



道總研

ISSN2189-1230

CODEN HOKSA 9

北海道立総合研究機構 工業試験場報告

Reports
of
Hokkaido Research Organization Industrial Research Institute

(No.320)

2021

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術環境研究本部

工業試験場

目 次

一般論文

1	カウンターウェイト位置の自動調節機能を備えた重力補償システムの開発	今岡 広一, 伊藤 壮生, 浦池 隆文 林 峻輔	1
2	深層学習による自動撮影カメラ画像のエゾシカ検出技術の開発	近藤 正一, 全 慶樹, 藤澤 怜央 堀 武司	7
3	森林空撮画像の深層学習による樹冠領域推定手法の開発	近藤 正一, 全 慶樹, 藤澤 怜央, 堀 武司	13
4	トラクタ位置情報履歴を用いた農作業推定技術	全 慶樹, 藤澤 怜央, 近藤 正一 堀 武司	19
5	慣性センサ及び動画像を利用した作業姿勢計測手法の開発	栗野 晃希, 泉 巖, 中島 康博 近藤 正一, 全 慶樹, 前田 大輔	25
6	北海道内のバイオマス資源から作製されるナノファイバーの特性評価	瀬野修一郎, 細川 真明, 大市 貴志 可児 浩, 吉田 昌充, 山岸 暢 吉田誠一郎, 松嶋景一郎, 鎌田 樹志	31
7	熱湿気同時移動解析による調湿材の設計と鮮度保持技術への応用	森 武士, 執行 達弘, 野村 隆文 伊庭千恵美	41
8	レーザー部分熱処理によるダイカスト金型の長寿命化技術の開発	櫻庭 洋平, 戸羽 篤也, 鶴谷 知洋 鈴木 逸人, 三戸 正道, 宮腰 康樹 板橋 孝至, 中嶋 快雄, 飯野 潔 高田 公一, 高橋 保行, 齊藤 倫正 大津 直史, 長船 康裕	47
9	溶融亜鉛めっき品の水素脆化・液体金属脆化の研究	坂村 喬史, 中嶋 快雄, 飯野 潔 宮腰 康樹, 齋藤 隆之, 板橋 孝至 米田 鈴枝	57
10	耐溶損性に優れたコーティング方法の開発	板橋 孝至, 飯野 潔, 戸羽 篤也, 高橋 英徳	63
11	プレス加工シミュレーション活用技術の構築	鶴谷 知洋, 神生 直敏, 安田 星季	69
12	青銅AM造形における空隙率と機械的性質	鈴木 逸人, 戸羽 篤也	77
13	金属積層造形品の表面粗さに及ぼすレーザー照射条件の影響	戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 飯野 潔	83
14	メタマテリアルの応用による等方性ミリ波フィルタの開発	齋藤 隆之, 宮崎 俊之, 坂村 喬史 本間 稔規, 米田 鈴枝	91

研究ノート

- 1 四足歩行ロボットによる不整地運搬補助に関する基礎検討
伊藤 壮生, 浦池 隆文, 今岡 広一 …………… 99
林 峻輔
- 2 外観検査のための多視点画像解析技術の開発
飯島 俊匡, 岡崎 伸哉, 本間 稔規 …………… 103
- 3 機能性包材によるメロンの長期保存技術
細川 真明, 山岸 暢, 野村 隆文 …………… 107
瀬野修一郎, 森 武士, 可児 浩
- 4 調湿材の鮮度保持技術への応用
野村 隆文, 執行 達弘, 森 武士, …………… 113
山岸 暢, 黒島 学

CONTENTS

Regular Paper

- 1 Development of the Gravity Compensation System with Automatic Adjustment of Counterweight Position 1
Koichi IMAOKA, Soki ITO, Takafumi URAIKE,
Shunsuke HAYASHI
- 2 Development of Technique for Yezo Sika Deer Detection in Time-lapse Camera Images
using Deep Learning 7
Shouichi KONDOU, Keiki ZEN, Reo FUJISAWA,
Takeshi HORI
- 3 Development of Technique for Tree Canopy Area Estimation using Deep Learning for Forest
Aerial Images 13
Shouichi KONDOU, Keiki ZEN, Reo FUJISAWA,
Takeshi HORI
- 4 Estimation of Agricultural Work Type using Tractor Location Histories 19
Keiki ZEN, Reo FUJISAWA, Shouichi KONDOU,
Takashi HORI
- 5 Development of Methods for Detection of Working Postures using IMU and Video Image Processing 25
Koki KUWANO, Iwao IZUMI, Yasuhiro NAKAJIMA,
Shouichi KONDOU, Keiki ZEN, Daisuke MAEDA
- 6 Characterization of Nanofibers Prepared from Biomass Resources in Hokkaido 31
Shuichiro SENO, Masaaki HOSOKAWA, Takashi OHICHI,
Hiroshi, KANI, Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI,
Seiichiro YOSHIDA, Keiichiro MATSUSHIMA, Tatsuyuki KAMADA
- 7 Simulation-assisted Design of Humidity Control Materials for Long-term Preservation
of Perishable Vegetables 41
Takeshi MORI, Tatsuhiko SHIGYO, Takafumi NOMURA,
Chiemi IBA
- 8 Development of the Life Extension Technology for Die-casting Mold by Laser Local Heat Treatment ... 47
Yohei SAKURABA, Atsuya TOBA, Tomohiro TSURUYA,
Hayato SUZUKI, Masamichi MITO, Yasuki MIYAKOSHI,
Koji ITABASHI, Yoshio NAKAJIMA, Kiyoshi IINO,
Koichi TAKEDA, Yasuyuki TAKAHASHI, Noritaka SAITOH
Naofumi OHTSU, Yasuhiro OSAFUNE

一 般 論 文

Regular Paper

カウンターウェイト位置の自動調節機能を備えた重力補償システムの開発

今岡 広一, 伊藤 壮生, 浦池 隆文, 林 峻輔

Development of the Gravity Compensation System with Automatic Adjustment of Counterweight Position

Koichi IMAOKA, Soki ITO, Takafumi URAIKE, Shunsuke HAYASHI

抄 録

農業における重量野菜の収穫・運搬作業や、工場での重量物運搬作業は作業者の大きな負担となっており、様々な運搬補助装置が開発されている。しかし、既存の運搬補助装置は運搬前に対象物の重量を測定し、その重量に合わせて機構を調整する必要があるため、重量のばらつきが多い農水産物などの場合、運搬のたびに機構調整時間が必要になるといった課題がある。

そこで本研究では、機構調整時間が短い運搬補助装置の開発を目的として、基礎的な技術開発に取り組んだ。カウンターウェイト式の重力補償機構をベースとして、運搬物の重量に応じてカウンターウェイト位置を自動制御することで事前の重量測定や機構の手動調整を行うことなく、任意の重量を補償可能な技術を開発した。さらに、シミュレーションによる検討及び試作した実機による操作感評価により、容易に運搬物を持ち上げることができることを確認した。なお、カウンターウェイト式の重力補償機構には可搬重量の増加に比例してカウンターウェイト部が大型化することが課題である。この課題の解決策としてバネ式の重力補償機構との組み合わせによる改良案を考案した。

キーワード：重力補償, 自重補償, カウンターウェイト, 軽労化

Abstract

Carrying of heavy vegetables in agriculture and heavy items in factories is a one of the major burdens for workers. Various lift assist devices have been developed to solve this problem. However, existing lift assist devices require time to measure the payload weight before transporting it, and to adjust the mechanism to match the weight.

In order to reduce the adjustment time as much as possible, we conducted a basic study by using counterweight type gravity compensation mechanism in this report. We developed a technology that can compensate for any weight by control of the counterweight position automatically without measuring the weight and adjusting the mechanism manually. From numerical simulations and evaluation experiments of operation feeling, it was confirmed that the counterweight and the payload are balanced and the payload can be lifted easily. In addition, the counterweight type gravity compensation mechanism has the problem that the counterweight part becomes larger in proportion to the increase in the load capacity. As a solution to this problem, we propose an improvement by combining it with a spring type gravity compensation mechanism.

KEY-WORDS : Gravity Compensation Mechanism, Self-weight Compensation, Counterweight, Labor-Saving

1. はじめに

農作業などの現場では、重量物運搬が作業者の大きな負担の一つとなっている。運搬作業の省力化（軽労化）のために、アシストスーツや、軽トラックの荷台に装着可能な電動クレーンなどが実用化されている。

しかし、一般的なアシストスーツは装着したままで、自動車の運転など、他の作業を行うことが困難である。また、電動クレーンは、人力での運搬が困難な対象に対しては、絶大な効果を発揮するが、かぼちゃんなどの人力でも運搬可能な重量物を軽トラックの荷台に積載する場合など、電動クレーンを用いずに人力で積み下ろしの方が作業時間が短い事から、使用されない事が多い。

そのほか、運搬物の重量をセンサーで感知し、モーターなどで補助するシステムも存在するが、空圧源が必要であったり、運搬前に運搬物の重量を測定し、重量に合わせて機構を調整する時間が必要となるため、重量のばらつきが大きい農水産物などの運搬では一回の運搬ごとに調整時間が必要となる。そのため、電動クレーンと同様に農作業現場では活用されていない。

そこで、本研究では次章で説明する重力補償機構に着目し、アシストスーツのように特別な操作をすることなく直感的に使用が可能であり、電動クレーンのように軽トラックの荷台などに設置できる運搬補助装置の開発を目的として基礎的な検討を行った。カウンターウェイト式の重力補償機構をベースとして、運搬物とカウンターウェイトのモーメントが釣り合うようにカウンターウェイト位置を自動調整する制御を組み込むことにより、運搬物の事前の重量測定や重量に合わせて手動調整を行うことなく、任意の重量の運搬物の重量を補償可能な技術を開発したので報告する。

また、本研究のベースとなるカウンターウェイト式の重力補償機構には、可搬重量の増加に比例してカウンターウェイト部が大型化するという課題がある。既存のバネ式重力補償機構と本研究で提案する重力補償機構を組み合わせることで、この課題を解決する改良案についてもあわせて報告する。

2. 重力補償機構の種類

重力補償機構とは、対象物の重量をおもりなどで相殺する機構であり、運搬作業の補助などを行うために用いられる。

作業者の運搬補助以外にも、産業用多関節ロボットなどにおいて高出力のアクチュエーターを用いずに可搬重量を増加させるために関節部に重力補償機構が利用されるなど、応用先の広い技術である。

近年、重力補償機構はさまざまな種類のもが開発されているが^{1,2)}、最も古くからよく用いられている仕組みは次の2方式である³⁾。

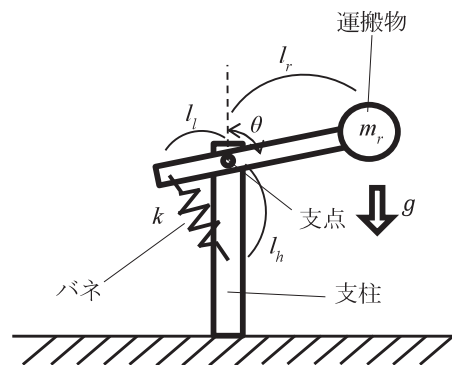


図1 バネ式重力補償機構の例

2.1 バネ式

対象物の重量をバネ力によって相殺する仕組みであり、最も用いられている方式の一つである。

図1に、バネ式の重力補償機構の一例を示す。運搬対象物の重量を m_r 、支点から運搬対象物までの腕の長さを l_r 、支点からバネの固定点までの腕部の長さを l_i 、支点から支柱のバネ固定点までの長さを l_h とし、バネ定数を k 、バネの自然長を l_s 、バネの伸びを l_e 、腕の角度を θ 、重力加速度を g とする。リンクの質量を無視できるとすると、支点まわりの運搬物によるモーメントは

$$m_r \times g \times l_r \times \sin\theta \quad (1)$$

で表される。同様に、バネによる支点まわりのモーメントは

$$k \times l_e \times \frac{l_h \times \sin\theta}{l_s + l_e} \times l_i \quad (2)$$

となり、バネの伸び l_e が次式を満足するとき両者は釣り合う。

$$m_r \times g \times l_r = k \times l_e \times \frac{l_h}{l_s + l_e} \times l_i \quad (3)$$

バネ式の重力補償機構はコンパクトな設計が可能であり、次項で説明するカウンターウェイト式と比較して可搬重量が増加しても装置の重量が増加しにくいといったメリットがある。

一方、デメリットとして式(3)に示されるように、通常の線形バネで支柱部と腕部をつないだ場合、バネの伸びが特定の値の場合にしか釣り合わないため、左右のモーメントを常に等しくするためには、zero-free-lengthバネと呼ばれる、バ

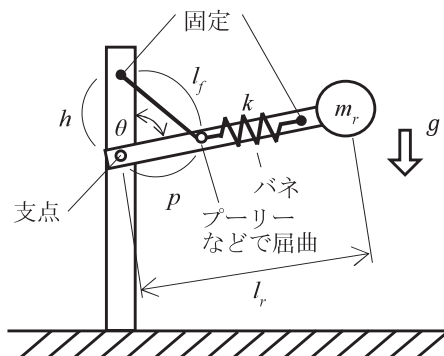


図2 森田らが考案した重力補償機構

ネの全長と弾性力が比例する特殊なバネが必要となることなどがあげられる。

このデメリット解消のため、線形バネと非円形プーリーを組み合わせた方法などが考案されている⁴⁾。

なかでも、森田らが考案した方法は、通常の線形バネのみを使ったシンプルな方法ながら、容易にzero-free-lengthバネと同様の効果を実現可能としている^{5,6)}。

図2に森田らの考案した重力補償機構を示す。バネの一端を腕部に固定し、もう一方の端部にワイヤーなどを取り付け、プーリーなどを介して支柱に取り付ける。運搬対象物の重量を m_r 、支点から運搬対象物までの腕の長さを l_r 、バネ定数を k 、バネの伸びを l_e 、腕の角度を θ 、重力加速度を g とし、ワイヤーの固定点から支点までの支柱長さを h 、プーリーから支点までの距離を p 、プーリーからワイヤー固定点までの長さを l_f とすると、この時、装置先端の運搬物によるモーメントは、図1の単純なバネ式と同じく式(1)で表される。同様に、バネによるモーメントも式(2)と同じ形の以下の式となる。

$$k \times l_e \times \frac{h \times \sin \theta}{l_f} \times p \quad (4)$$

ここで、バネの伸び l_e が l_f と等しくなるようにワイヤーの長さを設計すると、式(4)は以下のように書き換えられる。

$$k \times h \times \sin \theta \times p$$

ここで、おもりによるモーメントとバネによるモーメントがつり合うためには、次式を満足させる必要がある。

$$k \times h \times p = m_r \times g \times l_r \quad (5)$$

つまり、バネ定数 k が

$$k = \frac{m_r \times g \times l_r}{h \times p}$$

となるバネを用いることにより、腕部の角度によらずに重力補償が可能となる。

2.2 カウンターウェイト式

つぎに、もう一つの主流な仕組みであるカウンターウェイト式の重力補償機構について説明する。

図3にカウンターウェイト式の重力補償機構の例を示す。天秤のように、腕部の両側の運搬物とカウンターウェイトのモーメントがつりあう仕組みである。ここで、次式が成り立つ場合に両側のモーメントがつり合う。

$$m_r \times l_r = m_i \times l_i \quad (6)$$

m_r 、 m_i 、 l_r 、 l_i はそれぞれ、運搬対象物の重量、カウンターウェイトの重量、支点から運搬対象物までの腕の長さ、支点からカウンターウェイトまでの腕の長さである。

カウンターウェイト式の重力補償機構には、腕部の重量及び慣性モーメントの増加や、カウンターウェイトが操作の妨げになるといったデメリットがある。特に、可搬重量を増加させるとこれらの欠点は顕著になる。しかし、カウンターウ

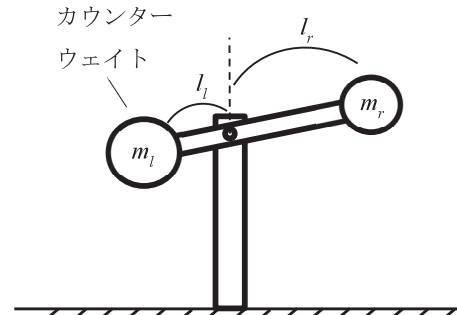


図3 カウンターウェイト式重力補償機構

イト方式の原理は非常にシンプルであり、単純な線形バネ式の重力補償機構とは異なり、腕の角度によらずにバランスが取れるというメリットや、支柱の根元に大きなモーメントがかからないというメリットがある。また運搬物の重量 m_r が変わった場合、腕部上のカウンターウェイト位置 l_i を移動させるだけで、任意の重さの重量物を補償可能である。

2.3 任意荷重に対する重力補償

以上のような代表的な重力補償機構は、単一の重量の場合のみ補償可能であり、補償対象の重量が異なる場合には、バネ力の調整やカウンターウェイトの位置・重量の調整が必要である。

この問題を解決するため、木村らはロードセルを用いて補償対象の重量を測定し、その重量に応じてバネ力を自動調整する制御機構を備えた重力補償機構を考案し、人の腕部のリハビリ補助器具などに適用している⁷⁾。また、森田らは、運搬物積載部にバネを内蔵し、このバネのたわみにより自動的に重力補償機構内のバネ力が調整される仕組みを考案し、任意荷重を補償可能な完全機械式の重力補償機構を発明している^{8,9)}。

しかし、これらの任意荷重を補償可能な重力補償機構は、運搬物の重量測定時や、積載時に各関節部を一度固定しなければならない。そのため、野菜など重量にばらつきのある物を連続的に運搬する用途には適していない。

3. カウンターウェイト式の任意荷重補償システムの提案

そこで、本研究では運搬対象物の積載時に関節部を固定することなく、任意荷重を補償可能な重力補償システムの検討を行った。

2.2節で述べたように、カウンターウェイト式の重力補償機構はカウンターウェイト位置を変えるだけで任意荷重に対応可能であるため、これをベースとしてカウンターウェイト位置を自動で調節可能な重力補償システムを考案した。

図4に考案した重力補償システムを示す。また、表1に諸元を示す。本システムは天秤のように支点回りのモーメント

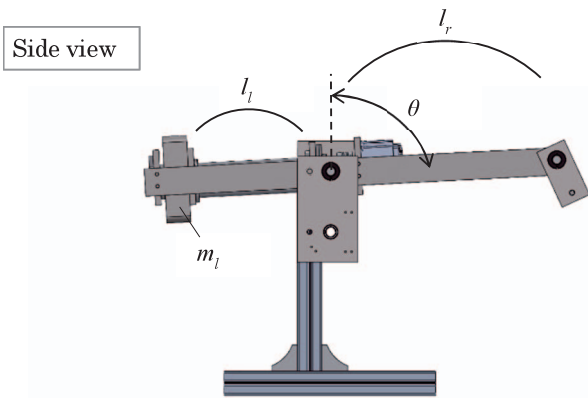
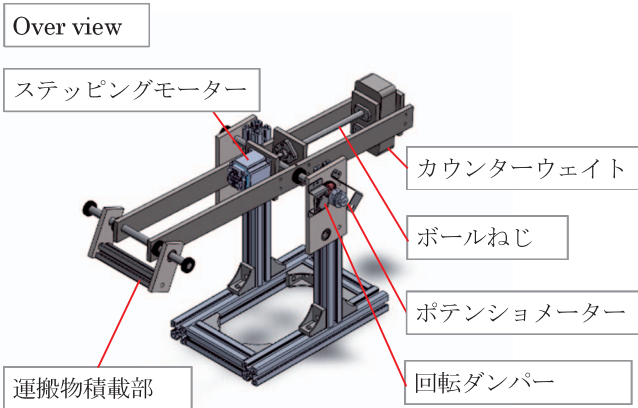


図4 提案する重力補償機構

のつり合いをとるカウンターウェイト方式のシステムとなっており、アームの先端に積載した運搬物とカウンターウェイトがつり合うことで、操作者が重量を感じることなく運搬物を持ち上げることが可能である。

カウンターウェイトは、ステッピングモーターに取り付けられたボールねじにより前後に移動可能である。アームの角度をポテンシオメーターで計測し、この角度を元にマイコンによってステッピングモーターを制御する。

カウンターウェイト位置の制御手法について述べる。本制御は補償モードと運搬モードの2つのモードからなっており、スイッチ操作により切り替えを行う。補償モードではマイコ

表1 提案する重力補償機構の諸元

装置重量 [kg]	20.7
全長 [m]	0.71
全幅 [m]	0.33
支点高さ [m]	0.74
運搬物積載部から支点までの長さ l_r [m]	0.37
カウンターウェイトの支点からの最大距離 l_l [m]	0.26
カウンターウェイト重量 m_l [kg]	3.45
回転ダンパーの最小必要トルク [mN・m]	150

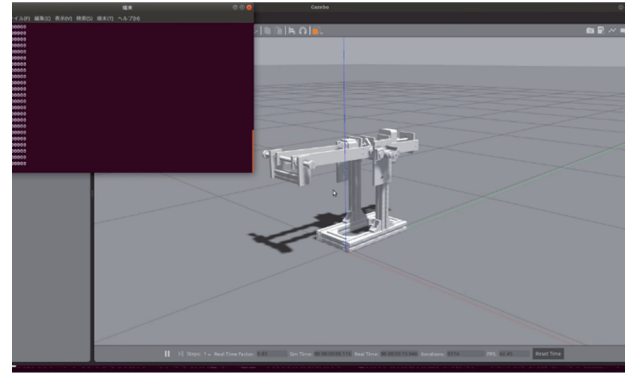


図5 シミュレーションの様子

ンによってアームの角度を常に監視し、支点まわりのモーメントのつり合いが取れ、アームが動かなくなるようカウンターウェイト位置を調整する。一方、運搬モードではカウンターウェイトは動かなくなり、調整後の位置に固定される。どちらの制御時にもアームの固定などは行わない。

操作者はまず装置先端に運搬物を積載し、スイッチを補償モードに切り替える。これにより、カウンターウェイトが装置後方のアーム端に移動をし、運搬物が持ち上がる。運搬物が地面から離れると、モーメントのつり合いが取れるようカウンターウェイト位置を制御する。ここで、運搬モードにスイッチを切り替えるとモーメントがつり合っているため、操作者はほとんど重さを感じることなく運搬物を持ち上げることが可能となる。

上記の制御について、ロボット開発用プラットフォームであるROS及びシミュレーターGAZEBOを用いて、シミュレーションを行った。運搬物搭載部に荷重を加えると、モーメントのつり合いが取れるよう、カウンターウェイトが移動することを確認した。図5にGAZEBOによるシミュレーションの様子を示す。

4. 評価試験

つぎに、シミュレーションを基に提案したシステムを試作し、評価試験を行った。試験の様子を図6に示す。運搬物が地面に接地した状態から、重力補償システムを稼働させた(図6①)。補償モードでは、カウンターウェイトが徐々に後方のアーム端へ移動し(図6②)、運搬物が地面から離れた瞬間にカウンターウェイトが停止し(図6③)運搬物とカウンターウェイトがつり合うことを確認した(図6④)。

カウンターウェイトが停止したことを確認し、スイッチを運搬モードに切り替えた(図6⑤)。カウンターウェイトと運搬物がつりあっているため、重量を感じることなく運搬物を持ち上げられることを確認した(図6⑥~⑧)。

最後に、720gの運搬物を積載した状態で運搬物を持ち上げるために必要な力をアームの角度ごとに比較した。

測定の様子を図7に示す。つり合った状態の重力補償装置

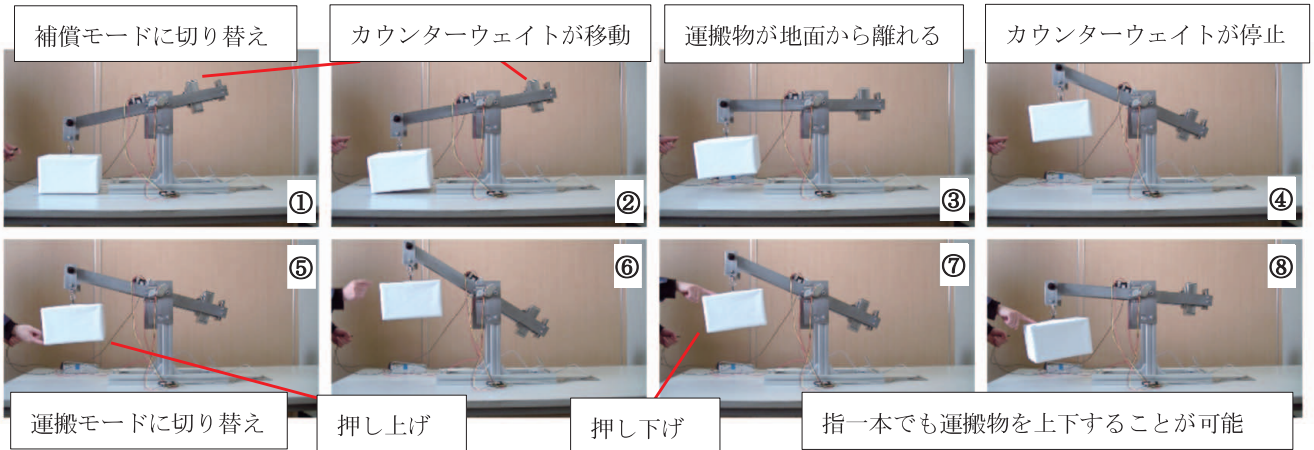


図6 実験の様子（左上から右上，左下，右下の順）

について、アームを特定の角度にして、運搬物積載部を真下からフォースゲージで押し上げ、アームが動いた時の荷重を測定した。アームの角度と補償荷重（運搬物の重量及びフォースゲージ荷重）の関係を図8に示す。アーム角度 θ が50deg~100degの範囲において、補償荷重はほぼ理論値と一致しており、重力補償が正常に作用していることを確認した。

5. 可搬重量の増加を可能とする改良案の考案

カウンターウェイト式の重力補償機構の欠点の一つとして、2章であげたようにカウンターウェイトの大きさの問題がある。可搬重量を増加させる場合、カウンターウェイトを重くするか、支点からカウンターウェイトまでの後方部の長さを長くしなければならない。後方部が短くコンパクトになると取り回しが良くなり、カウンターウェイト式の重力補償機構の活用幅が広がると予想される。

この課題の解決のために、本研究のカウンターウェイト式の重力補償システムと2.1節で紹介した森田らの重力補償機構^{5,6)}とを組み合わせることを考える。

図9に両者を組み合わせた改良案を示す。森田らの機械式自重補償装置の腕部に移動可能なカウンターウェイトを取り

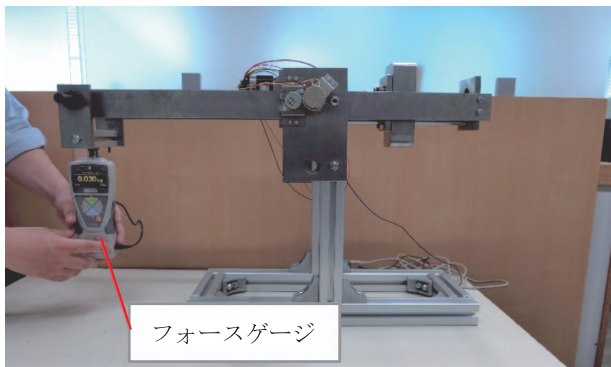


図7 フォースゲージによる最小動作荷重の測定の様子 ($\theta = 90\text{deg}$)

付け、運搬物を積載しない状態で、カウンターウェイトを装置の先端（運搬物積載部と同じ位置）に移動させる。つぎに、バネ力とカウンターウェイトによりモーメントが釣り合うようバネ定数やワイヤーの固定位置を選択すると、式(5)より次式が成り立つ。

$$k \times h \times p = m_i \times g \times l_r$$

この装置の先端にさらに補償したい重さ m_r の対象物を吊り下げ、カウンターウェイトを位置 x に動かすことを考えると、上式は次のように書き換えられる。

$$k \times h \times p = (m_r \times l_r + m_i \times x)g$$

上の2式の左辺は等しいことより、

$$x = \frac{m_i - m_r}{m_i} \times l_r \tag{7}$$

となり、この x を満足する位置にカウンターウェイトを移動させることで補償が可能となる。

この改良案と前章までで提案した重力補償システムを比較する。改良案の最大可搬重量 m_{rmax} は式(7)の x に $-l_i$ を代入した時の m_r であり、

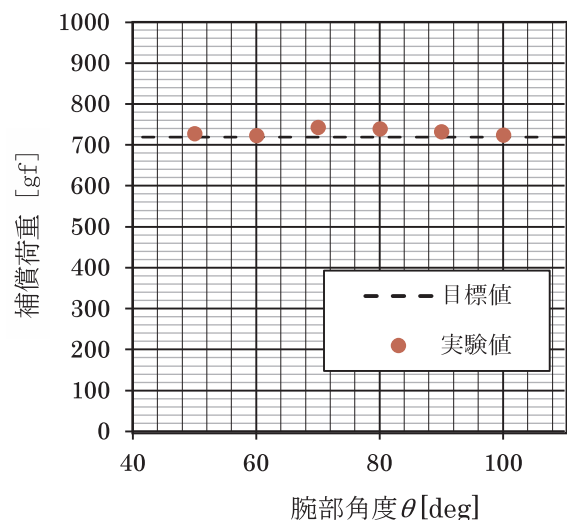


図8

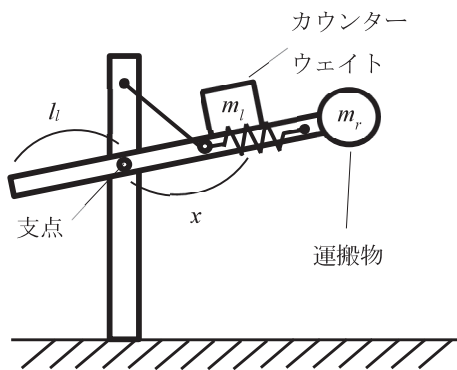


図9 改良案

$$m_{rmax} = m_l \times \frac{l_r + l_l}{l_r}$$

となる。改良前の重力補償システムの最大可搬重量は式(6)より、 $m_l \times \frac{l_l}{l_r}$ であるので、支点前後の腕部長さ l_r , l_l 、及びカウンターウェイト重量 m_l が等しいとすると、本改良により最大可搬重量は $1 + \frac{l_r}{l_l}$ 倍となる。

以上より、支点後方の部分を大型化せずに可搬重量を増加させることが可能となり、本システムの様々な分野での活用が期待できる。

6. おわりに

本研究では、重量のばらつきが大きい重量物を運搬する際の作業者の負荷軽減を目的としたカウンターウェイト方式の重力補償システムを設計・試作した。

カウンターウェイト位置を自動調整する制御を組み込むことで、運搬物の事前の重量測定や重量に合わせた手動調整を行うことなく、任意の重量の運搬物が運搬可能であることを確認した。

また、森田らが考案したバネ式の重力補償機構と本研究で開発したカウンターウェイト式の重力補償システムを組み合わせ、通常のカウンターウェイト式と同じ大きさで可搬重量を増加させる機構の提案を行った。

今後は、この提案した重力補償システムの改良案に対する実機による検証などを行い、実用化を進めていきたい。

本研究で提案した重力補償システムは1リンク構造だが、実用においては運搬の自由度を向上させるため2リンク以上の構造が望ましい。しかし、カウンターウェイト式には、単純に多リンク化した場合、リンクが増える毎に支柱に近いリンクのカウンターウェイトが増大するという課題がある。この課題は先行研究で示されているようなワイヤーなどを用いてカウンターウェイトを支柱側に集約する機構¹⁰⁾などを組み込むことで解決可能と考える。

謝辞

本研究を実施するにあたり、慶應義塾大学 森田寿郎准教授、あいち産業科学技術総合センター 木村宏樹主任研究員には多くのご助言・ご協力を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 江島源太・武居直行・友延英史・藤本英雄：「ガスピリングによるロボットアームの重力補償」, 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2015)論文集, pp.1490-1492 (2015)
- 2) 山田泰之・森田寿郎：「倍力装置を備えた流体式自重補償装置」, 日本機械学会論文集 (C編) Vol.77, No.779, pp.2576-2585 (2011)
- 3) 武井直行：「省エネ・安全のための重力補償機構」, 日本ロボット学会, Vol. 29, No.6, pp.508-511 (2011)
- 4) 遠藤玄ほか：「非円形プーリ - バネ系による自重補償機構と4節平行リンク型アームへの適用」, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1, pp.77-84, (2010)
- 5) T. Morita, F. Kuribara, Y. Shiozawa and S. Sugano, "A novel mechanism design for gravity compensation in three dimensional space," Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), Vol.1, pp.163-168 (2003)
- 6) 森田寿郎・栗原史好・塩澤裕樹・菅野重樹：機械的自重補償装置, 特開 2003-181789 (2003).
- 7) 木村宏樹・酒井昌夫・竹中清人：「ロボット要素技術としての可変自重補償機構 (免荷装置)」, 愛知産業科学技術総合センター研究報告2016, pp.52-55 (2016)
- 8) 山田泰之・長坂 俊・森田寿郎：「機械的荷重補償装置の開発」, 日本機械学会論文集 (C編) Vol.77, No.777, pp.2042-2051 (2011)
- 9) 森田寿郎：「自重補償機構の設計原理と動作支援技術への応用」, バイオメカニズム学会誌, Vol.30, No.4, pp.200-204 (2006)
- 10) S. Hirose, T. Ishii and A. Haishi, "Float arm V: hyper-redundant manipulator with wire-driven weight-compensation mechanism," 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422), Vol.1, pp.368-373 (2003)

深層学習による自動撮影カメラ画像のエゾシカ検出技術の開発

近藤 正一, 全 慶樹, 藤澤 怜央, 堀 武司

Development of Technique for Yezo Sika Deer Detection in Time-lapse Camera Images using Deep Learning

Shouichi KONDOU, Keiki ZEN, Reo FUJISAWA, Takeshi HORI

抄 録

北海道ではエゾシカによる農林業被害や交通事故等の問題が起きており、捕獲による個体数の管理が行われている。銃器に比べて安全性が高いことや捕獲個体の有効活用のしやすさから囲いワナによる捕獲が注目されており、効果的に捕獲を行うためにはエゾシカが多く出没する場所にワナを設置することが重要である。捕獲候補地に一定期間自動撮影カメラを設置し、撮影された画像から得たエゾシカの出没情報をもとに設置場所を選定することは非常に効果的であるが、画像の確認作業に手間がかかるという課題がある。

本研究では、自動撮影カメラで撮影された画像の確認作業を省力化するために、深層学習による物体検出技術を用いてエゾシカを検出する技術を開発した。また、牧草地での撮影画像に開発した手法を適用し有効性を確認した。

キーワード：エゾシカ, 深層学習, 物体認識, 画像解析

Abstract

In Hokkaido, since Yezo sika deer have caused damage to agriculture and forestry, traffic accidents, and other problems, management of their population by capture has been implemented. The use of enclosure traps is attracting attention because they are safer than firearms and can capture live animals. For effective capture, it is important to set traps in places where Yezo sika deer often appear. When selecting a location, it is effective to install an automatic camera at the potential capture site for a certain period of time and use the information on the appearance of Yezo sika deer obtained from the captured images. However, there is a problem that it takes time and effort to check the images.

In this study, we developed a technology for detecting Yezo sika deer using object detection technology based on deep learning in order to automate the confirmation process of images taken by automatic cameras. In addition, the effectiveness of the developed method was confirmed by applying it to images taken in a pasture.

KEY-WORDS : Yezo sika deer, Deep Learning, Object Recognition, Image analysis

1. はじめに

1990年代以降に北海道においてエゾシカの数が増加した結果、エゾシカによる農林業被害額は約38億円（令和元年度）に達し、交通事故は年間2,000件を超える水準で発生している。そのため、北海道では、平成22年度から緊急対策を開始し、狩猟の規制緩和や市町村が行う駆除への支援などを行って生息数の削減に努めている。また、エゾシカの食肉としての有効活用も推進されている。食肉として活用する場合、肉質の安定化や衛生的な処理の面から、生きた状態での捕獲が望ましい。

エゾシカによる農業被害額のうち、約半分は牧草被害が占める。牧草被害を低減するためには、加害個体を直接捕獲することが有効であるが、牧草地では非積雪期の夜間に出没するエゾシカが多いことから、銃器によって捕獲することが困難である。囲いワナは、銃器が使用できない夜間にも捕獲可能であり、加害個体を複数頭まとめて生体で捕獲可能なことから、有用な捕獲手法として注目されている。一方で、囲いワナは、物理的な制約により移設に係るコストが高いため、効果的な捕獲のためには、適切な場所にワナを設置することが重要である。

設置場所を選定するためには、事前調査等によりあらかじめエゾシカの生息に関する情報を収集することが重要である。エゾシカの生息情報の調査手法には、住民等に出没情報を確認する「聞き取り調査」や、食痕や糞、足跡などの痕跡からエゾシカが出没しやすい場所を特定する「痕跡調査」、GPS首輪などの電波発信機を装着し、個体の行動を追跡する「テレメトリー調査」、カメラの前を通過した動物を自動的に撮影できる赤外線センサー付きのカメラ（自動撮影カメラ）を活用した「自動撮影法」等がある。それぞれの手法には長所と短所があるが、エゾシカがどこに出没したかを写真により直接確認できることから、自動撮影法はワナ設置場所選定に適した方法である。しかし、撮影された画像を目視で確認し集

計する作業に時間がかかることが課題である。

そこで、本研究では、自動撮影カメラで撮影された画像の確認作業の省力化を目的として、深層学習による物体検出を用いて監視カメラ画像に写ったエゾシカを検出する手法を開発した。

2. 自動撮影法



図1 自動撮影カメラ

自動撮影カメラ（図1）は、人感センサが反応した際に自動的に撮影する機能がついた装置で、屋外に設置し野生動物のモニタリングや防犯目的で使用される。センサの反応距離は20～30mのものが多い。また、図2に示すように赤外線LEDフラッシュにより夜間でも撮影可能である。

自動撮影法は、複数のワナ設置候補場所に一定期間自動撮影カメラを設置し、各カメラで撮影されたエゾシカの頭数の多少を比較することで、ワナ設置場所の選定を行う。



図2 自動撮影カメラで撮影されたエゾシカ画像（左：昼間、右：夜間）

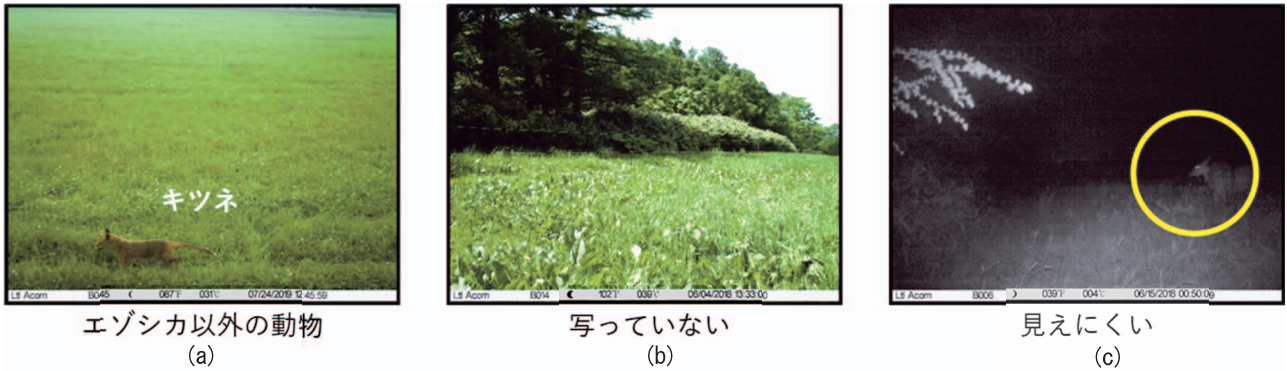


図3 エゾシカ以外が写った画像やエゾシカが見えにくい画像

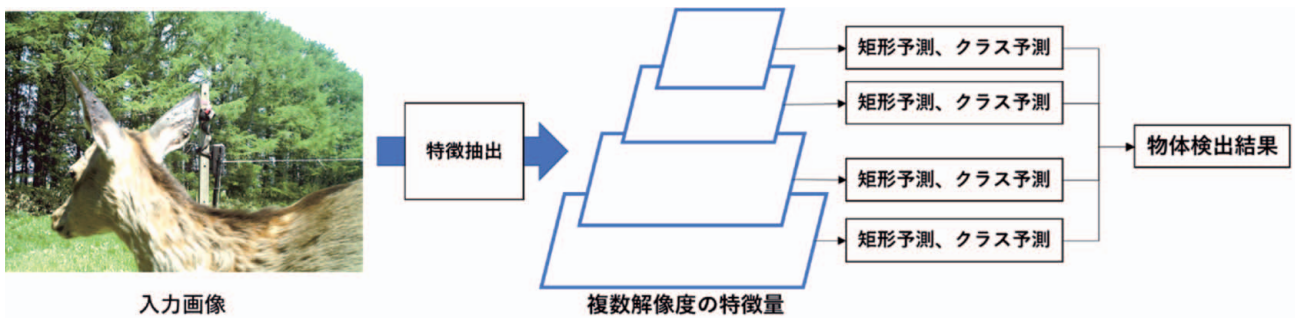


図4 RetinaNetによる物体検出

人感センサは、周囲と温度差のある動物や物体の動きを感知するため、図3(a)に示すようにエゾシカ以外の動物や、図3(b)に示すように太陽光で熱を帯びた草や葉の動き等でも撮影される場合がある。また、夜間の撮影画像は図3(c)に示すように被写体が見えにくい場合も多い。そのため、撮影された全ての画像についてエゾシカの存在の有無を確認する必要がある。

エゾシカ調査のための手引書¹⁾では、捕獲の1ヶ月～1ヶ月前に、候補地に最低6台の自動撮影カメラを2週間～4週間程度の期間設置することを推奨している。調査から捕獲までの期間が短いため、迅速に撮影データの集計を実施する必要がある。目視での画像確認に係る時間は一枚当たりでは数秒程度でわずかだが、撮影される画像は数千枚から数万枚に及ぶこともあり、数日がかりの作業となる場合がある。

3. 深層学習によるエゾシカ検出技術

3.1 深層学習による物体検出

画像内のエゾシカを検出するために、深層学習による物体検出手法であるRetinaNet²⁾を用いた。RetinaNetは画像内の物体の位置及び、その物体が何であるかを推定する手法である。RetinaNetは図4に示すように、複数解像度の特徴抽出をすることで、高精度かつ高速な処理を実現している。入力画像の画素値を物体検出をしやすい数値に変換する特徴抽出部分はResNet-152³⁾+FPN⁴⁾を用いた。特徴抽出、矩形予

測及びクラス予測部分のネットワークの係数は画像と物体位置がペアになったデータセットを学習することで決定される。

3.2 データセット

2010年～2017年に北海道の牧草地及び森林で撮影したエゾシカが写った画像19,681枚(44,004頭)を収集し、画像内に含まれるエゾシカの外接矩形を人手により付与(図5)してデータセットを作成した。



図5 学習用データセット作成の様子

3.3 学習と精度検証

作成したデータセットのうち、17,713枚(39,495頭)のデータをRetinaNetのネットワークの学習に使用し、残りの1,968枚(4,509頭)のデータを学習済みネットワークの検出性能

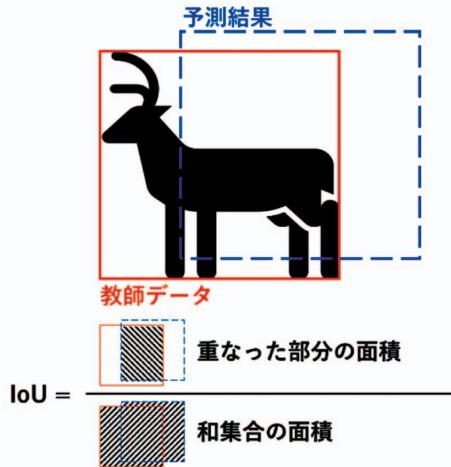


図6 IoU(Intersection over Union)

の検証に用いた。また、学習は繰り返し50回行った。学習済みのネットワークにより検出されたエゾシカ検出結果について、図6に示したIoU (Intersection over Union)を計算し、IoUが0.5以上のときに検出成功とした。IoUは0～1の値を取り、2つの領域の重なり具合を表す指標で、完全に重なっている場合に1、全く重なっていない場合に0となる。閾値は0.5～0.95の間で評価されることが多いが、エゾシカの有無を確認する目的においては、位置や大きさは重要ではないため0.5を閾値とした。RetinaNetの計算はNVIDIA社のGPU GeForce GTX 1080 Tiを用いて行い、画像一枚当たり約0.17秒で実行可能だった。目視での計測では一枚当たり約3.2秒かかるため、約1/19の時間で処理可能である。

表1 エゾシカ検出結果

検証に使用した頭数	4,509
正しく検出できた頭数	4,259
検出できなかった頭数	250
誤検出数	135

表1に検出結果を示す。検出できたエゾシカの頭数は4,509頭中4,259頭となり、全頭数に対する検出できた頭数の割合を表す再現率は94.5%となった。図7に検出成功例を示す。身体の向きや姿勢、撮影の時間帯を問わず、複数頭写っている場合や全身が写っていない場合等、様々な条件でエゾシカを検出可能であることを確認できた。

検出できなかったエゾシカ頭数は250頭、IoUが0.5未満またはエゾシカ以外のものを検出した誤検出数は135となった。図8に検出失敗例を示す。遠方において小さく写っている個体や、二頭以上が重なって写っている場合に検出できていない例が多かった。また、障害物等により身体の一部が写っていない場合に、一頭を複数頭として誤検出する例が多かった。上述のように検出失敗する場合はあるが、エゾシカの頻出場所を把握する目的としては十分な精度で検出できていると考えられる。

4. 牧草地での撮影画像への適用

牧草地に設置した複数の自動撮影カメラで撮影した画像に対して、3章で学習したRetinaNetによるエゾシカ検出結



図7 エゾシカ検出成功例



図8 エゾシカ検出失敗例 (破線枠：検出失敗, 実線枠：検出成功)



図9 自動撮影カメラの設置位置

果からカメラ毎のエゾシカ検出頭数を算出し、目視でカウントした結果と比較をすることで評価を行った。

自動撮影カメラは、図9に示すようにワナ設置候補の草地の林縁沿いに約25m間隔で48台設置した。これは、使用した自動撮影カメラの人感センサの最大反応距離が25mであることから、森林から牧草地に侵入するエゾシカを見逃すことな

く撮影するためである。設置は、図10に示すように地面に打ち込んだ杭に自動撮影カメラを括り付けることで行った。括り付ける高さは、地上から1～1.5mの高さとし、カメラの向きは隣のカメラが写り込む方向とした。

図11に提案手法によるエゾシカ頭数の算出結果と目視によりカウントした結果を示す。検出漏れや誤検出はあるものの、提案手法と目視ではほぼ同じ傾向の結果が得られた。



図10 牧草地の林縁沿いに設置した自動撮影カメラ

また、検出漏れが多かったカメラB014とカメラB021、誤検出が多かったカメラB032の検出失敗例を図12に示す。

B014とB021については、いずれもカメラからの距離が遠い個体の検出ができなかったが多かった。B014の例は、群れのうちカメラからの距離が近い個体にセンサが反応して撮影した際に、遠くの個体も写り込んだものと思われる。B021の例は、センサの反応距離内に動物がいないため、熱を帯びた草の揺れ等に反応して撮影した際に、たまたま遠くにいたエゾシカが写り込んだと見受けられる。エゾシカがよく通る位置にワナを設置することが目的であるため、カメラから遠

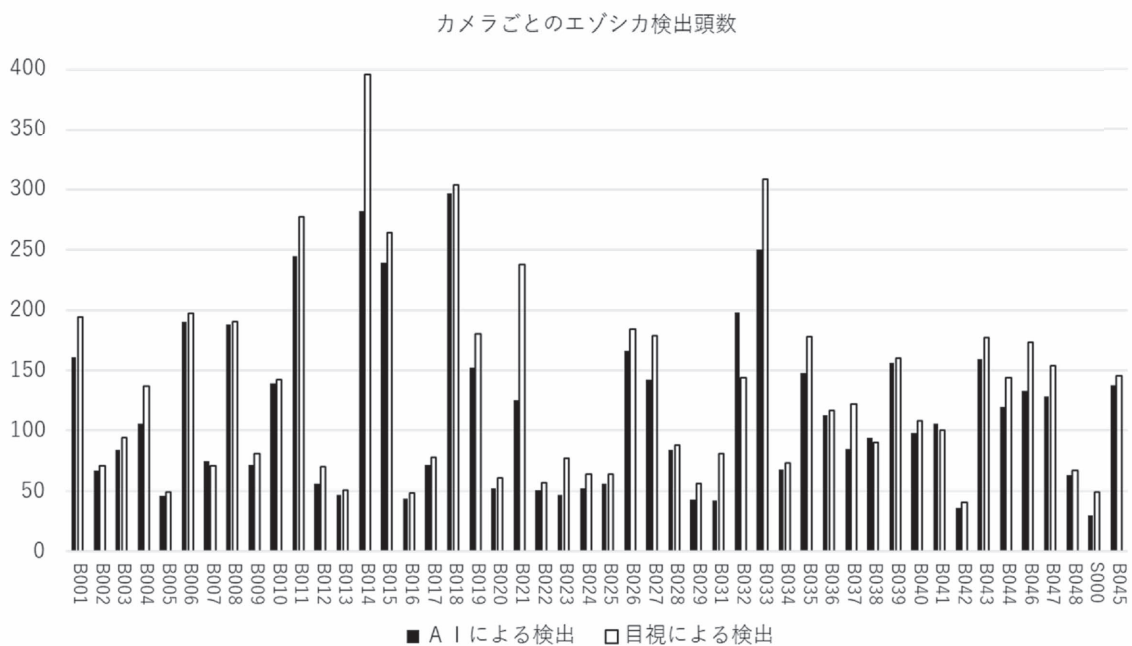


図11 牧草地の林縁沿いに設置した自動撮影カメラ



図 12 検出失敗例（破線枠：検出失敗，実線枠：検出成功）

い位置の個体が撮影されないことは問題ない。

B032については、電気柵の一部をエゾシカと識別して誤検出していた。この例のように、撮影画像に写る可能性が高いエゾシカ以外の物体については、学習用データセットに含めて学習し、エゾシカ以外のものとして検出して区別することで誤検出を防ぐことができると考えられる。

5. おわりに

本研究では、エゾシカ捕獲用ワナ設置場所選定の際の画像確認作業の省力化を目的として、深層学習による物体検出手法を用いてエゾシカを自動で検出し頭数を数える手法を開発した。

牧草地及び森林で撮影したエゾシカが写った画像19,681枚に対して、人手によりエゾシカの外接矩形を付与しデータセットを構築した。

作成したデータセットを用いて、特徴抽出部がResNet-152+FPNのRetinaNetの学習を行った結果、再現率94.5%でエゾシカの検出できた。また、画像一枚当たりの処理時間は0.17秒で、目視での計測と比較して約1/19の時間で処理できることがわかった。

牧草地に設置した複数の自動撮影カメラで撮影した画像に対して学習したRetinaNetでエゾシカ結果を行った結果、カメラごとのエゾシカ検出頭数は目視とほぼ同じ傾向の結果が得られ、本手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) 森林管理者のためのエゾシカ調査の手引き，北海道立総合研究機構，2017
- 2) Tsung-Yi Lin, Priya Goyal, Ross Girshick et al. : Focal Loss for Dense Object Detection, 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), (2017)
- 3) Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun : Deep residual learning for image recognition,

Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 770-778, (2016)

- 4) Tsung-Yi Lin, Piotr Dollár, Ross Girshick et al. : Feature pyramid networks for object detection, Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.2117-2125, (2017)

森林空撮画像の深層学習による樹冠領域推定手法の開発

近藤 正一, 全 慶樹, 藤澤 怜央, 堀 武司

Development of Technique for Tree Canopy Area Estimation using Deep Learning for Forest Aerial Images

Shouichi KONDOU, Keiki ZEN, Reo FUJISAWA, Takeshi HORI

抄 録

現在、道内人工林では樹木の多くが利用に適した樹齢に達してきて、伐採や育林に係る作業を効率的に進めることが重要である。森林管理者は伐採や管理を行う際、管理する森林内にどれだけ木があるのか把握するために資源量調査を実施している。資源量調査では、樹高や胸高直径（人の胸の高さにおける立木の直径）、材積（幹の部分の体積）等を計測する。計測の際は、各立木付近まで近づき人手で直接計測してきて、木以外の植物も生い茂り傾斜もある森林内においては非常に重労働である。近年は、UAVで空撮した画像から資源量を推定する方法が注目されているが、熟練者による高度なデータ解析作業が必要なことから自動化が困難とされてきた。

本研究では、これらのデータ解析作業を自動化し、森林資源量推定の省力化を実現するために、空撮画像から各立木の位置及び樹冠領域を推定する手法を開発した。

キーワード：森林資源量調査, UAV, 深層学習, 物体認識, 画像解析

Abstract

At present, many of the trees in the plantation forests in Hokkaido have reached an age suitable for use, and it is important to efficiently carry out work related to logging and forest growth. When conducting logging and management, forest managers conduct resource surveys to understand how many trees are available in the forests they manage. In resource surveys, measurements are taken of tree height, diameter at breast height (the diameter of a standing tree at the height of a person's chest), and timber volume (the volume of the trunk). This is very hard work in a forest where plants other than trees grow thickly and there are slopes. In recent years, the method of estimating the amount of resources from aerial images taken by UAVs has been attracting attention, but it has been considered difficult to automate because it requires advanced data analysis work by skilled personnel.

In this study, we developed a method for estimating the location and canopy area of each standing tree from aerial images in order to automate these data analysis tasks and realize labor-saving estimation of forest resources.

KEY-WORDS : Forest Resources Survey, UAV, Deep Learning, Object Recognition, Image Analysis

1. はじめに

北海道の人工林は約148万haあり、その多くが利用に適した時期を迎えて今後伐採量の増加が見込まれる一方、人口減少や高齢化から林業従事者が減少している。このため、林業における作業の効率化が求められている。森林管理者は、木材生産量の見積もりや伐採、育林の作業計画を立てる際、森林内にある立木の本数、種類、太さや高さ等を把握するため

に資源量調査を行うが、資源量調査で最も一般的なのは、調査者が森林内に入り込み、輪尺や測高機により一本ごとに直接計測する方法（図1）である。大変な労力がかかるため作業の省力化が求められている。また、広範囲の資源量調査を行う手法として、有人航空機に搭載したLiDAR（Light Detection And Ranging, レーザー光を用いた測距センサ）により計測する手法がある。公共事業による基盤データの整備として利用されることがあるが、非常に大がかりで高コス

事業名：経常研究

課題名：UAVを活用した低コスト森林調査手法の研究



図1 輪尺により胸高直径を計測する様子

トであるため個別の森林管理者が実施するのは困難である。一方、近年は、UAVに搭載したカメラによる空撮が安価かつ手軽に行えるようになったことから、森林の空撮画像から資源量を調査する方法が注目されており、林野庁から調査方法のマニュアル¹⁾(UAV立木調査マニュアル)も発行されている。この方法は、適切な条件で空撮を行うことで、特別な計測機器を使用せずに各立木の樹種及び材積(幹の部分の体積)を推定することができ非常に有用である(図2)。しかし、解析作業のうち立木位置及び樹冠領域の取得(図2(c))は、熟練者による高度なデータ解析作業が必要なことが課題である。

本研究では、この課題を解決し森林資源量調査の省力化を行うために、空撮画像から各立木の位置及び樹冠領域を推定する深層学習を用いた画像解析技術を開発した。また、道内

人工林の主要な樹種であるトドマツに開発した手法を適用し、有効性を検証した。

2. 空撮画像による森林資源量推定

図2に示した森林資源量調査方法の各処理について説明する。

まず、図2(a)の空撮画像の取得では、市販のUAVの自動航行ソフトを用いることで可能である。自動航行ソフトは、飛行経路や撮影のタイミングを事前に設定し、UAVを自動航行させることが可能なソフトウェアである。これにより、図2(b)でオルソ画像及びDSMの取得に適した画像を取得するための飛行経路や撮影条件を簡単に設定することができる。なお、空撮の際は、図3に示す空撮画像の例のように、同じ地点が複数の画像に写るように撮影することが重要である。左右の画像は違う視点から撮影しているが、大部分(破線で囲った枠内)には同じ地点が写っている。

図2(b)のオルソ画像及びDSM(Digital Surface Model, 樹木や建築物等を含めた地球表面の高さを表す3次元データ)の取得では、空撮画像群にSfM/MVS(Structure from Motion/Multiple View Stereo, 多視点画像から対象の高密度な3次元メッシュモデルを生成する技術)を適用することで、森林の3次元形状(図4)及びオルソ画像(図5)を取得する。オルソ画像は、どの地点でも真上から歪まないように空撮画像を変換したもので、被写体の正しい位置と大きさが得られる。SfM/MVSは、市販のソフトウェア等ではほぼ自動で解析できる。図5(a)のオルソ画像への変換前の空撮画像では、画面端の立木が斜めに写り幹が見えているが、



図2 空撮画像による森林資源量調査の流れ

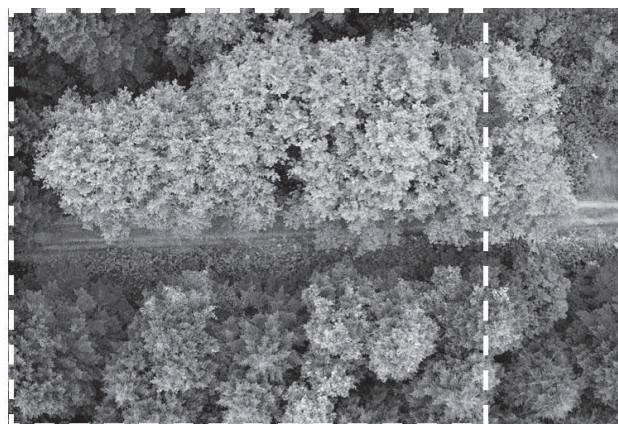
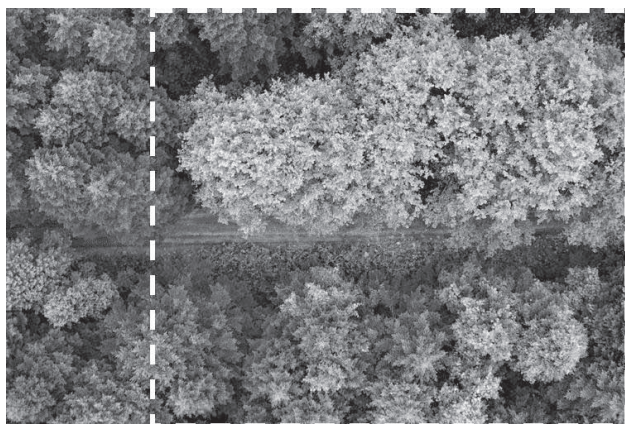


図3 空撮画像の例

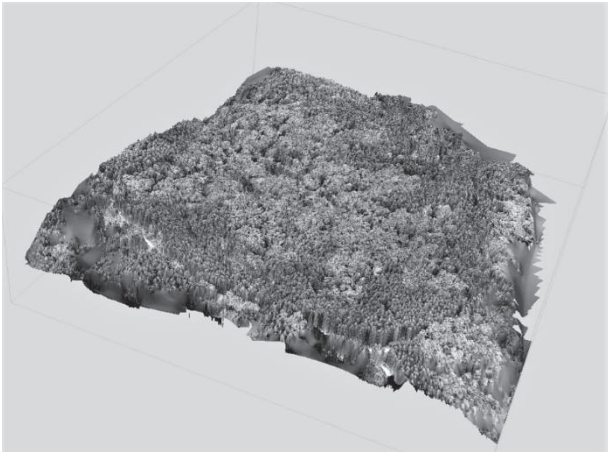
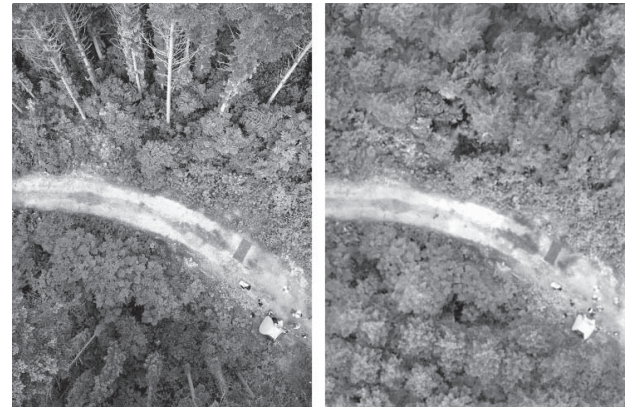


図4 空撮画像による3次元形状(DSM)推定例



(a) 変換前の空撮画像 (b) オルソ画像

図5 オルソ画像の例

図5 (b)のオルソ画像では真上から見たように幹が見えなくなっているのが確認できる。

図2 (c)の立木位置及び樹冠領域の取得は、UAV立木調査マニュアルにおいて、市販の地理情報システムを使った方法が示されているが、データに応じた適切なパラメータ設定が必要であり、自動化が困難である。本研究では、このシステムに頼らずに、深層学習を用いて立木位置及び樹冠領域を推定する手法を開発した。手法の詳細は次章で説明する。

最後に、図2 (d)の樹高、胸高直径、材積の推定について、それぞれの推定方法を説明する。樹高推定では、図6に示すように、得られた森林の3次元形状と国土地理院等から得られる地表高データの差分を取ることで、各立木の樹高を計測できる。胸高直径推定については、立木の幹全域は空撮画像には写らないため太さを直接計測することはできないが、胸高直径と樹冠投影面積(図7)から推定することができる¹⁾。オルソ画像は一画素あたりの実寸がわかるため、樹冠領域がわかれば樹冠投影面積を求められ、胸高直径の推定ができる。材積については、樹高と胸高直径から推定可能であることが知られている²⁾。

3. 樹冠領域取得を自動化する手法

3.1 オルソ画像からの樹冠領域推定

オルソ画像から樹冠領域を推定する手法の実現のために、深層学習による画像の領域分割手法であるMask R-CNN³⁾を用いた。Mask R-CNNは、入力画像からニューラルネットワークによって抽出した特徴量を元に、物体の位置検出、カテゴリ分類及び領域分割を同時に行う手法である。図8にMask R-CNNによる樹冠領域推定手法を示す。オルソ画像から特徴抽出層により特徴量を抽出し、物体検出により立木位置を、領域分割により樹冠領域を推定している。また、特徴点検出処理を追加することで、樹頂点位置の推定も同時にできるようにした。



..... DSM (表層高データ、UAVで取得)
 --- DEM (地表高データ、国土地理院等)
 樹高 = DSM - DEM

図6 樹高の求め方

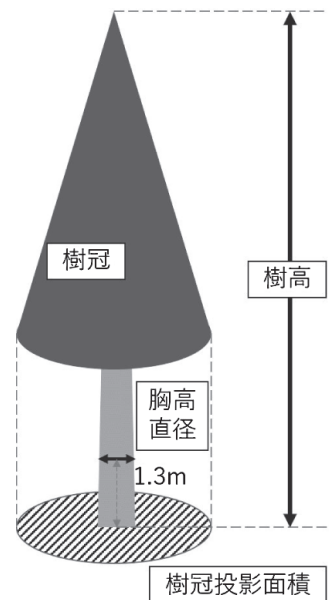


図7 立木各部の名称

Mask R-CNNの学習用データは、図9のようにオルソ画像内の各立木に対して、樹冠領域の輪郭及び樹頂点の位置を手手で記録することで作成した。学習用及び評価用のオルソ画像の解像度は0.05[m/pixel]とし、1,024×1,024画素ごと

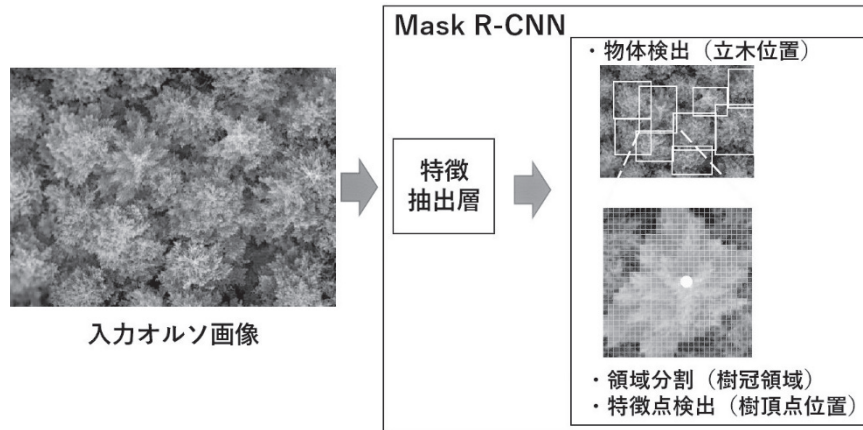


図8 オルソ画像からの樹冠領域推定手法

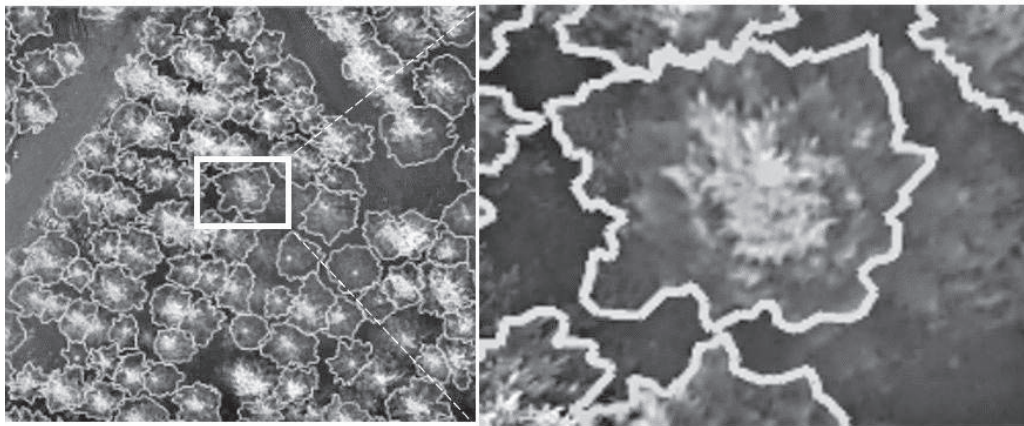
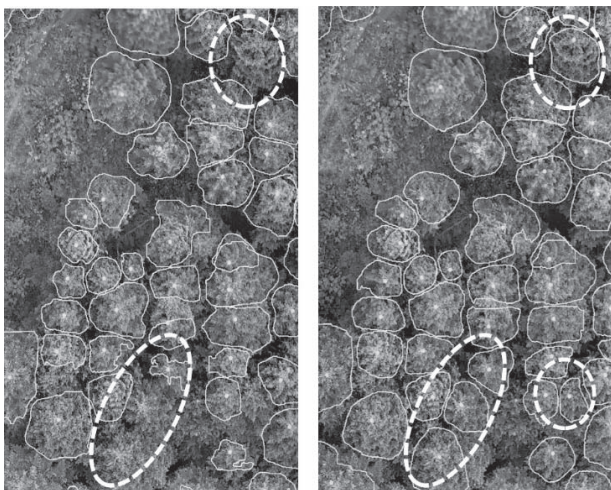


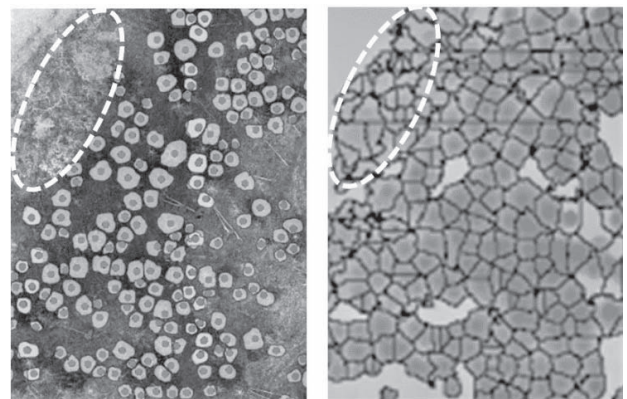
図9 人手で与えた樹冠領域と樹頂点位置
(多角形：樹冠領域，点：樹頂点)



635本で学習 3,338本で学習
図10 Mask R-CNNによる
樹冠領域及び樹頂点の推定結果

に分割したものを使用した。また、各画像に対して回転や切り抜き、拡大・縮小を適用したものも加え、学習用のデータを拡張した。特徴抽出層はResNet-101⁴⁾を使用した。

トドマツ林のオルソ画像に対して学習を行い、未使用のオ



提案手法 従来手法 (Watershed法)
図11 従来手法との比較

ルソ画像に対して推定した結果の一例を図10に示す。オルソ画像のみから各立木の樹冠領域及び樹頂点を推定できていることが確認できた。また、学習に使用するデータの数が増えると、図10の破線の楕円で囲った部分からわかるように未検出の立木が減り、樹冠領域の形状もより正確に推定できることが確認できた。

図11に、森林の3次元形状データから樹冠領域を推定する

際に従来から用いられている Watershed 法による結果と、本手法による推定の結果を比較したものを示す。従来手法では形状情報のみから樹冠領域を判断するため、破線の楕円で囲った広葉樹が存在する部分を誤って検出しているが、提案手法では適切にトドマツの樹冠のみを検出できることを確認した。

3.2 オルソ画像と高さ情報から樹冠領域推定

前節でオルソ画像から Mask R-CNN により樹冠領域を推定する手法を示したが、さらに精度向上を図るためにオルソ画像及び森林の 3 次元形状の両方を用いて樹冠領域を推定する手法を開発した。

図12に手法の詳細を示す。空撮画像から計算した 3 次元形状に対して図6で示した手法を適用して得られた高さ情報は、格子状に並んだセルに高さの値を持つデータである。この高さの値を 0～255の値に正規化することで画像と同様に扱う

ことができるため、オルソ画像のカラー (RGB) データに正規化した高さデータを加えて 4 チャンネルの画像とみなして特徴抽出層に入力する。樹冠推定には、深層学習による領域分割手法である Hybrid Task Cascade⁵⁾を用いた。Hybrid Task Cascadeは、Mask R-CNNをベースとして、物体検出や領域分割を行うための識別器を複数の閾値で多段に連ねることで推定精度を向上させる手法である。特徴抽出層は、より高解像度の特徴を扱える HRNet⁶⁾に変更した。樹頂点の位置の推定については、高さ情報を使用できるようになったため、Hybrid Task Cascadeで直接推定はせず、樹冠領域内のうち最大の高さを持つ位置を樹頂点位置とすることとした。

学習用データの作成手順は、3.1節の手法と同様であるが、樹頂点位置を高さ情報から推定するように変更したため、樹冠領域のみ人手で記録した。また、データの拡張は、回転や拡大・縮小等の幾何変換に加え、明度やコントラストの変更

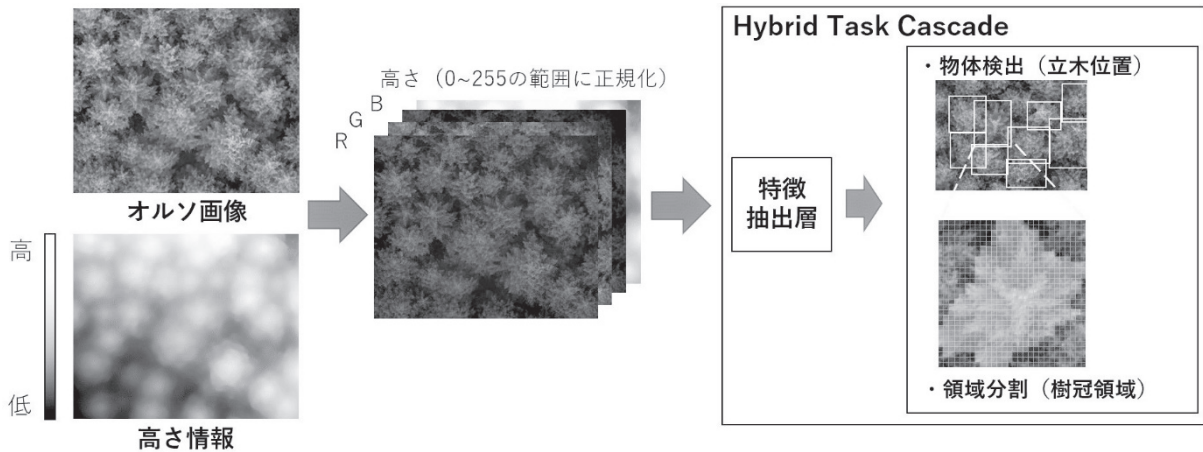


図 12 オルソ画像と高さ情報による樹冠領域推定手法

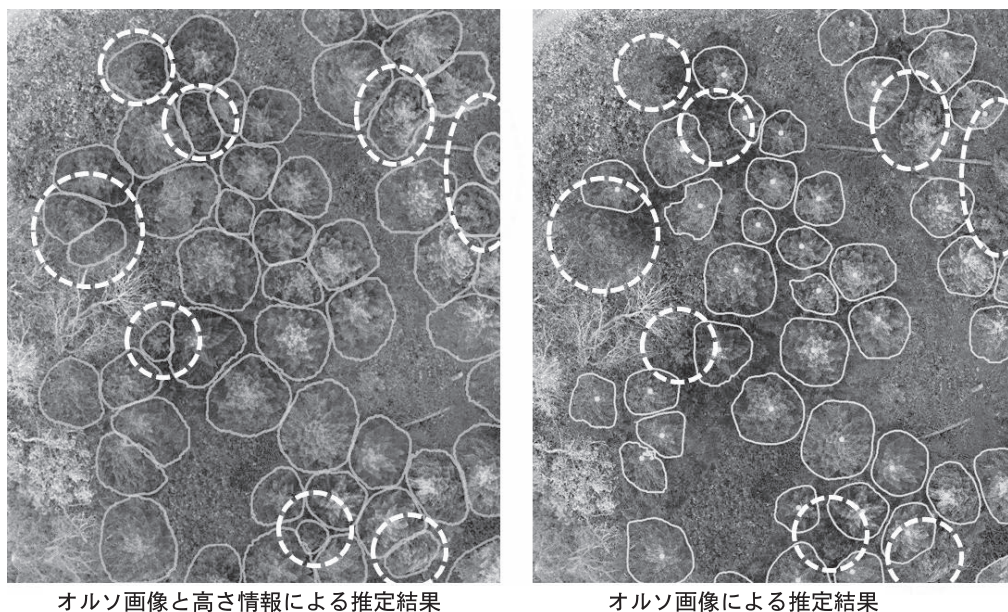


図 13 樹冠領域推定結果の比較

表1 立木の検出精度

	実際の本数	検出できた本数	検出成功率(%)	RMSE(m ²)	平均誤差率(%)
林分A	145	121	83.4	2.01	17.8
林分B	156	148	94.9	1.85	8.36
林分C	252	227	90.1	4.91	13.89
合計	553	496	89.7	3.29	13.2

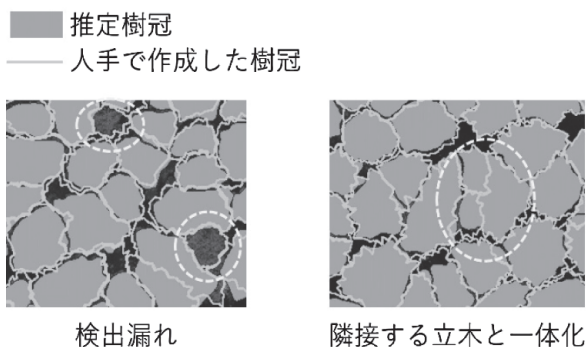


図14 主な検出失敗例

等の色情報を変化させる処理を追加した。

図13に樹冠領域推定結果を示す。破線で囲った部分を見ると、3.1節の手法では検出できていなかった立木が正しく検出できるようになっていることがわかる。

3.3 推定精度の評価

地上において位置、樹高及び胸高直径を計測した立木553本(3林分)について、3.2節で示した手法を適用して検出性能を評価した。

表1に立木検出結果を示す。推定した樹冠と実際の樹冠の重なりが小さいものに関しては検出失敗とした。林分ごとにばらつきはあるが、合計すると89.7%の立木の検出に成功した。図14に示すように、検出に失敗したパターンは、検出漏れと、隣接する立木と一体化してしまった場合が多く、いずれも立木が密集している場所で樹冠の小さい立木が多かった。Hybrid Task Cascade等の領域分割手法は、あらゆる場面の画像、あらゆるカテゴリや大きさの物体を満遍なく検出できるように設計されていることが理由の一つと考えられる。森林の空撮画像のように、似たような見た目の物体が密集している画像に特化したアルゴリズムに改良することで検出成功率を向上させることが可能と考えられる。また、一般に画像解析では、入力データの質が解析結果に影響するため、高品質なオルソ画像及び高さ情報を取得することでも検出が向上すると考えられる。これは、空撮時の条件(風速、天候、カメラ性能、撮影設定等)によるところが大きいので、本手法を利用する際は、これらの条件を整えて空撮を行うことが重要である。

推定した樹冠面積と人手で算出した樹冠面積を比較した結果については、林分ごとのばらつきはあるが、合計で

RMSE(平均二乗偏差)が3.29 m²、平均誤差率は13.2%だった。樹冠面積から胸高直径を推定する統計モデルを適用して胸高直径に換算すると3.5%(胸高直径30cmの立木に対して約1.05cmの誤差)で、概ね良好な結果が得られた。

4. おわりに

森林資源量調査を省力化するために、深層学習による画像解析技術を用いて空撮画像から各立木の樹冠領域を推定する手法を開発した。森林の3次元形状のみから樹冠領域を推定する従来のWatershed法と比べて良好な結果が得られた。また、画像と3次元形状を組み合わせて樹冠領域を推定する手法を開発した。地上で計測した結果と比較したところ、89.7%の立木の樹冠を検出でき、樹冠面積から推定した胸高直径は誤差3.5%だった。

今後は、本手法を活用した森林資源量推定サービスの実用化を目指した研究開発を進める予定である。

参考文献

- 1) 林野庁: UAV立木調査マニュアル, (2019)
- 2) 中島広吉: 北海道立木幹材積表, (1950)
- 3) Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollar, Ross Girshick: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 2961-2969, (2017)
- 4) Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun: Deep residual learning for image recognition, Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 770-778, (2016)
- 5) Kai Chen, Jiangmiao Pang, Jiaqi Wang, et al.: Hybrid Task Cascade for Instance Segmentation, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 4974-4983, (2019)
- 6) Ke Sun, Bin Xiao, Dong Liu, Jingdong Wang: High-Resolution Representations for Labeling Pixels and Regions, Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 5693-5703, (2019)

トラクタ位置情報履歴を用いた農作業推定技術

全 慶樹, 藤澤 怜央, 近藤 正一, 堀 武司

Estimation of Agricultural Work Type using Tractor Location Histories

Keiki ZEN, Reo FUJISAWA, Shouichi KONDOU, Takeshi HORI

抄 録

農作業の記録は農作業計画の改善やノウハウの継承に役立つが、農作業の情報を手作業で詳細に記録することは大きな負担となっており、記録作業の省力化や自動化が必要とされている。本研究では、畑作を対象に農作業情報の記録作業の自動化について取り組んだ。トラクタの位置情報データ及び圃場データを機械学習により分析することで、農作業情報として重要な作業機の種類を推定する技術を開発した。あわせて、トラクタの位置情報データを安定的に取得し、記録された農作業情報をウェブ上で確認できるシステムを試作した。

キーワード：機械学習, 位置情報履歴, 農作業

Abstract

Agricultural work records are useful for improving farm planning and knowledge transfer. However, it is a heavy burden to manually record detailed agricultural work information, and labor-saving or automation of the recording process is required. In this study, we investigated the automation of the recording of agricultural work information for upland farming. We developed a technique to estimate the type of work machine connected to a tractor, which is important as the agricultural work information, by analyzing the tractor location data and the field data using machine learning. We also prototyped a system that can stably acquire the tractor location data and check the recorded agricultural work information on the web.

KEY-WORDS : Machine learning, Location history, Agricultural work

1. はじめに

農作業記録は、農作業計画の改善やノウハウの継承に有用である。農作業を行った時間や場所、作業内容等の履歴情報は、農作業日誌や営農管理システム(Farm Management Information System, FMIS)に作業者の手によって記録されることが一般的である。しかし、日々の作業のなかで農作業の情報を詳細に記録することは大きな負担となっており、人の手による記録は抜け漏れの発生にもつながるため、記録作業の省力化や自動化が必要とされている。

本研究では、畑作を対象に農作業情報の記録作業の自動化について取り組んだ。道内の畑作地帯では農家戸数の減少に伴い、一戸あたりの経営耕地面積が増加しており¹⁾、一つの農家が広く分布する多数の圃場を運用する傾向にある。その

ため圃場によって異なる標高や気候、圃場間の移動距離などを考慮した営農が行われており、農家にとって過去の農作業記録は重要なノウハウであるといえる。



図1 農業用トラクタと作業機

事業名：経常研究

課題名：機械学習による大規模時系列データの状態推定に関する研究

畑作では、耕起や播種、施肥、収穫などに応じた作業機をトラクタに取り付けて農作業を行う（図1）。したがって、畑作における農作業の情報は、トラクタの位置情報履歴及び取り付けられていた作業機の種類からおおよそ把握することができる。そこで農作業記録の自動化にあたっては、これらのデータを自動的に取得あるいは推定するアプローチを選択した。トラクタの位置情報履歴に関しては、トラクタに搭載されているGPS機能やスマートフォンなどのIoT機器、市販のデータロガー等を利用して比較的容易に取得できると考えられる。一方で、取り付けられていた作業機の種類に関しては、一部のISOBUS対応機器を除いて作業機の種類を自動的に取得することが難しいため、ほかのデータを利用して推定する必要がある。

本研究では、トラクタ位置情報履歴等のデータを機械学習により分析することで、取り付けられていた作業機の種類を推定する技術を開発した。また、記録作業の自動化に向けて、遠隔地のトラクタから必要な位置情報データを安定的に取得し、記録された農作業情報をウェブ上で確認できるシステムを試作したのであわせて報告する。

2. データセットの作成

機械学習による作業機の推定に使用するデータセットは、トラクタの位置情報データ及び圃場データ（圃場図と作付情報）をもとに作成した。本データセットの作成方法について述べる。

2.1 トラクタ位置情報データの取得

道内農業法人の協力のもと複数台のトラクタのキャビンに小型のデータロガーを設置し、トラクタ位置情報データを取得した。この農業法人では、数年前からトラクタ位置情報データの取得試験を行っており、十分なデータを取得できた2015年と2016年のデータを分析に使用した。それぞれの年で11台のトラクタからデータを取得しており、データの総数は2年分で約650万となった。

また、今回使用したデータロガーは通信機能を持たず内部

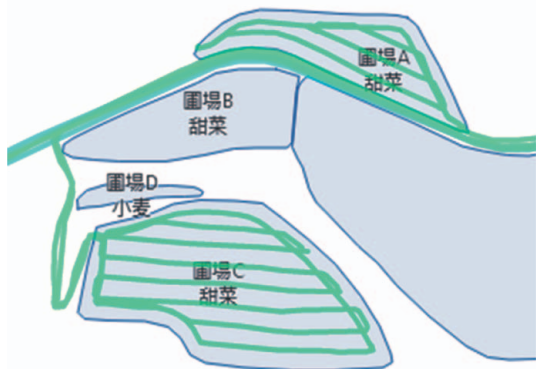


図2 圃場図及びトラクタのGPS位置情報履歴（走行軌跡として表示）

メモリにデータを保存するため、メモリ節約のためにデータの記録間隔を5秒に設定した。

トラクタ位置情報データの例を図2に示す。図ではGPSの位置情報の点をつないだ走行軌跡として表示しており、2つの圃場での圃場内作業と圃場間移動の様子を確認することができる。

2.2 圃場図及び作付情報の利用

記録された各点が圃場内作業か圃場間移動かを判別するために地図上で圃場の領域を表した圃場図を利用した。また、農作業推定の手がかりとして各圃場の作付情報を利用した。圃場図は年によって大きく変化しないが、作付情報は年ごとに化する。これは北海道では4品目（小麦、馬鈴薯、甜菜、豆類）の輪作が普及しており¹⁾、同一圃場でも前年と異なる作付になる場合が多いためである。

圃場図と作付情報の例を図2に示す。各圃場の領域は緯度経度のポリゴンデータとして保存されている。

2.3 単位作業の計算

本研究の農作業推定では、トラクタが圃場に入ってから退出するまでを一回の農作業の単位とし、これを単位作業と呼ぶ。単位作業の例を図3に示す。

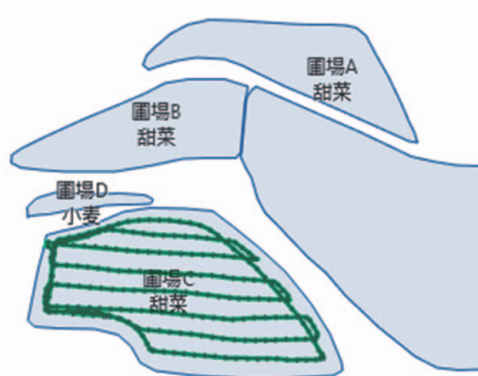


図3 単位作業の例（圃場C内の濃色の点線）

単位作業ごとに農作業推定を行うため、位置情報データの系列を単位作業に分割する必要があるが、圃場図を利用して単純に圃場内にある連続する点をまとめる方法では、一つの単位作業を細かく分割してしまう恐れがある。これは圃場図の精度またはGPS測位精度の低下により、単位作業の一部の点が圃場外に記録されてしまうことによる。このような点は圃場の境界で頻繁に発生する（図4）。そこで、次の手順で単位作業への分割を行った。

- (1) 圃場図を利用して各点が所属する領域（各圃場または圃場外）を判別する。
- (2) 各点の前後90秒間の点について所属する領域を集計し、最も多い領域をその点の作業対象の領域とする。
- (3) 同じ作業対象の領域が連続する点をまとめて一つの単

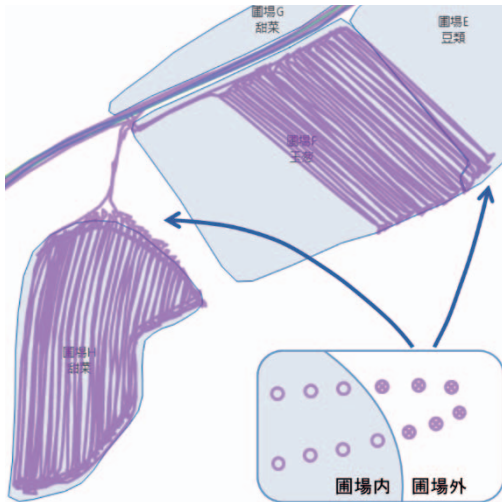


図4 単位作業の一部が圃場外に記録された例

位作業とする。

これにより多くの場合で適切な単位作業の計算が可能となった。

なお、点がどの領域に含まれるかなどの空間分析には PostgreSQL 上の PostGIS 等を使用した。また、座標系は必要に応じて平面直角座標系に投影して空間分析を行った。

2.4 ラベルの付与

機械学習のうち教師あり学習は、入力データとそれに対応すべき出力（ラベル）が必要になる。今回の農作業推定では、単位作業から計算された入力に対し、その時トラクタに取り付けられていた作業機の情報がラベルとして必要である。2015～2016年に取得した位置情報データについては、作業者が記録した農作業記録にもとづきラベルの付与を行った。

以上の手順により、計9種類の作業機（スプレーヤ、ブロードキャスト、サブソイラ、ビート移植機、ロータリ、プラウ、カラット、カルチベータ、コンビドリル）を含むデータセットを作成した。各作業機のデータ数（単位作業数）を表1に示す。なお、以降で述べる機械学習では2015年のデータセットを学習用及び検証用に使用し、2016年のデータセットをテスト用に使用した。

表1 データセットの単位作業数

作業機（農作業）	2015年	2016年
スプレーヤ（防除）	471	1,026
ブロードキャスト（施肥）	266	191
サブソイラ（心土破碎）	228	165
ビート移植機（移植）	194	119
ロータリ（砕土・整地）	142	171
プラウ（耕起）	127	168
カラット（混和・耕起）	124	118
カルチベータ（中耕・除草）	110	119
コンビドリル（播種等）	87	98
合計	1,749	2,175

※ 平均速度 1 km/h 以下または作業時間 5 分以下の単位作業、データ数の少ない作業機を除く。

3. 機械学習による農作業推定

作成したデータセットに機械学習アルゴリズムを適用し、各单位作業の農作業を推定した。アルゴリズムの適用方法と推定結果について述べる。

3.1 勾配ブースティング決定木

機械学習アルゴリズムには、勾配ブースティング決定木（Gradient Boosting Decision Tree, GBDT）の一種である LightGBM²⁾を使用した。近年の勾配ブースティング決定木は、高度なデータ分析の問題に対してディープラーニングと並び広く使用されているアルゴリズムであり、巨大なニューラルネットワークを用いるディープラーニングと比べ高速に計算できるほか、欠損値やカテゴリカル変数をうまく扱える³⁻⁴⁾等の性質から汎用性に優れている。今回対象とするデータは位置情報の系列などを含みディープラーニングの適用方法が明らかではないため、汎用性の高い勾配ブースティング決定木の適用を検討した。

ディープラーニングは画像データを得意とする畳み込みニューラルネットワークのようにネットワークの内部で高度な特徴量を抽出する。一方で、勾配ブースティング決定木は多くの機械学習アルゴリズムと同様にあらかじめ問題の特性に合わせた特徴量を計算し、アルゴリズムへ入力する必要がある。以降ではアルゴリズムへの入力について説明する。

3.2 位置情報データの入力

勾配ブースティング決定木への入力は固定長である必要があるため、含まれるポイント数がそれぞれ異なる単位作業の位置情報データをそのまま入力することはできない。そこで次の特徴量を計算し固定長の入力とした。

- 単位作業の総移動距離
- 平均速度
- 速度の標準偏差
- 速度の中央値を含むパーセンタイル

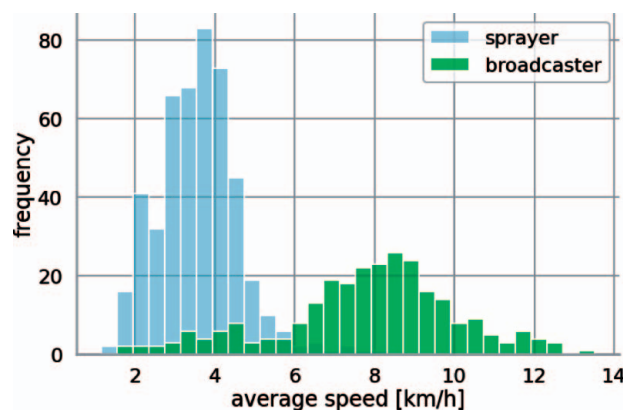


図5 単位作業の平均速度に関するヒストグラム（スプレーヤとブロードキャスト）

- 方位角の変化量の平均
- 方位角の変化量の標準偏差
- 方位角の変化量の中央値を含むパーセンタイル
- 単位作業に含まれるポイント数

単位作業の平均速度に関するヒストグラムの一部を図5に示す。スプレーヤとブロードキャストの識別には平均速度が有効であることが確認できる。

3.3 作業面積情報の入力

作業機の種類によって作業幅は様々であり⁵⁾、同じ速度で走行した場合でも単位時間あたりの作業面積に違いが生じる。この特徴を捉えるために単位作業の作業面積を計算し、作業時間で除算した値を入力の一つとした。

単位作業の作業面積を計算する方法として単純に圃場図から作業を行った圃場の面積を計算する方法が考えられるが、単位作業において圃場の一部分を対象に作業する場合も多いため適さない。次に単位作業に関する凸包を計算する方法について考える。ここでの凸包は、与えられた点集合をすべて包含する最小の凸多角形のことであり、効率的に計算できるアルゴリズムが知られている。単位作業の凸包の例を図6(a)に示す。凸多角形は凹みがないため、図の例のように作業を行った領域が凹んでいる場合は、実際の作業面積との乖離が大きくなることがわかる。そこで、作業面積の計算には凸包を一般化したアルファシェイブ(alpha shape)を使用した。

アルファシェイブは、凹みのある形状を含む凸包の一般化

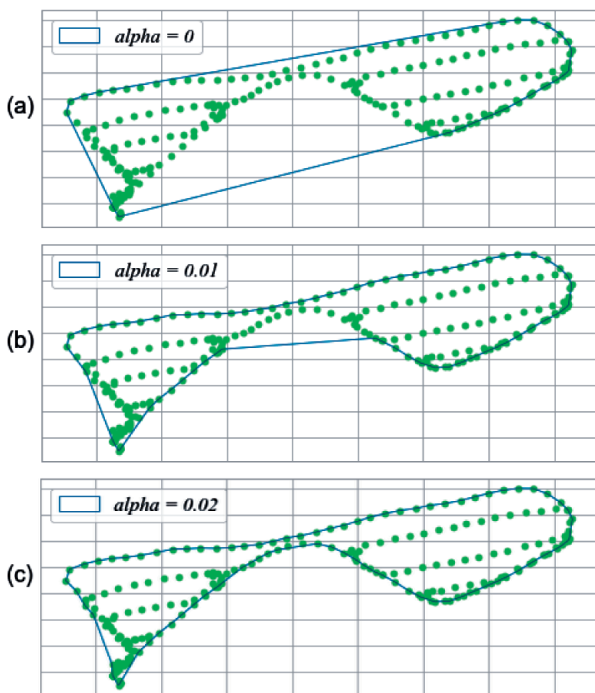


図6 アルファシェイブによる作業面積の計算 (アルファパラメータを0, 0.01, 0.02とした例)

表2 農作業推定結果

作業機 (農作業)	F 値 [%]
スプレーヤ (防除)	95.6
ブロードキャスト (施肥)	94.8
サブソイラ (心土破碎)	92.3
ビート移植機 (移植)	82.9
ロータリ (碎土・整地)	98.5
ブラウ (耕起)	90.6
カラット (混和・耕起)	90.3
カルチベータ (中耕・除草)	86.7
コンビドリル (播種等)	91.6
正解率 [%]	93.4

※ 2015年のデータセットで学習したモデルを使い、2016年のデータを推定した。

であり、アルファパラメータにより形状を調整する。 $\alpha = 0$ のときは凸包であり、 α を徐々に大きくすると点集合を包含したまま領域が小さくなる(図6)。 α の値によっては複数の領域に細かく分割される場合もあるため、データに合わせて α の調整が必要だが、本研究ではデータセットに共通のアルファパラメータを事前に計算し適用した。

これにより計算された単位作業の作業面積をポイント数で除算し、単位時間あたりの作業面積の近似値とした。

3.4 そのほかのデータ

そのほか圃場の作付情報、トラクタ機種名、時間に関連する情報として月(month)、時(hour)、年始からの経過日数を入力として与えた。

3.5 学習と推定結果

2015年のデータセットを学習に使用した。学習ではデータセットの20%を検証用として分離し、過学習を抑制するための早期停止⁶⁾(early stopping)とモデルの選択に使用した。

学習したモデルを使い、2016年の農作業を推定した結果を表2に示す。農作業全体の正解率は約93%となった。

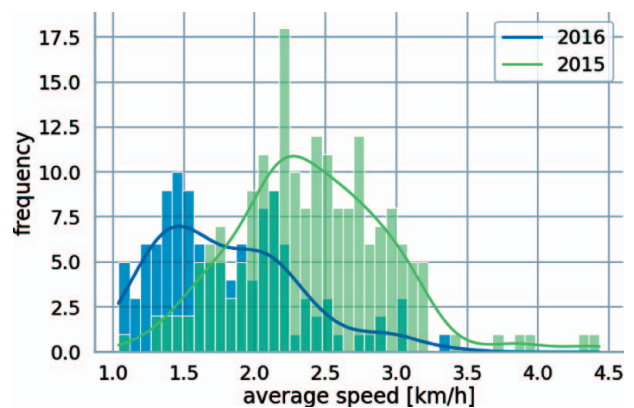


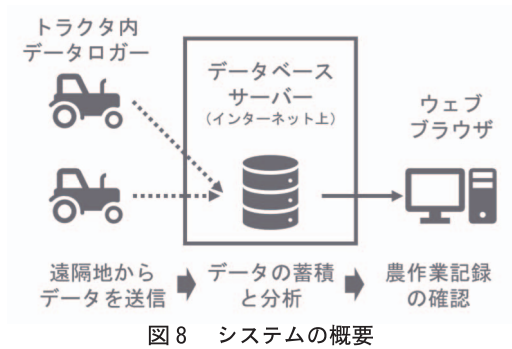
図7 各年のビート移植機の比較 (単位作業の平均速度に関するヒストグラム)

3.6 考察

農作業全体に対しての識別性能は高いが、一部の農作業の識別性能は相対的にやや低く、ビート移植機のF値は約83%と今回の農作業のなかでは最も低い。各年のビート移植機の平均速度を図7に示す。2015年と2016年を比較して、ほかの農作業では見られなかったピークのずれなどの分布の変化が確認できる。ビート移植機に関しては、このようなデータの特徴の変化が性能に影響を与えたと考えられる。

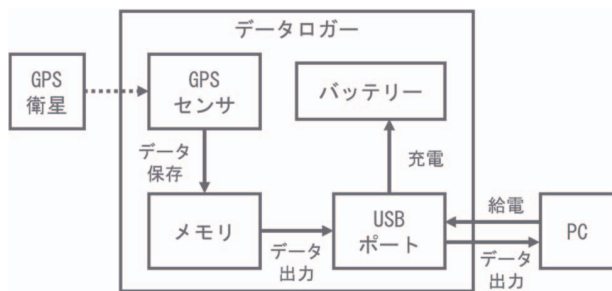
4. 農作業記録システムの試作

記録作業の自動化に向けて、遠隔地のトラクタから必要な位置情報データを安定的に取得し、記録された農作業情報をウェブ上で確認できるシステムを試作した。システムの概要を図8に示す。



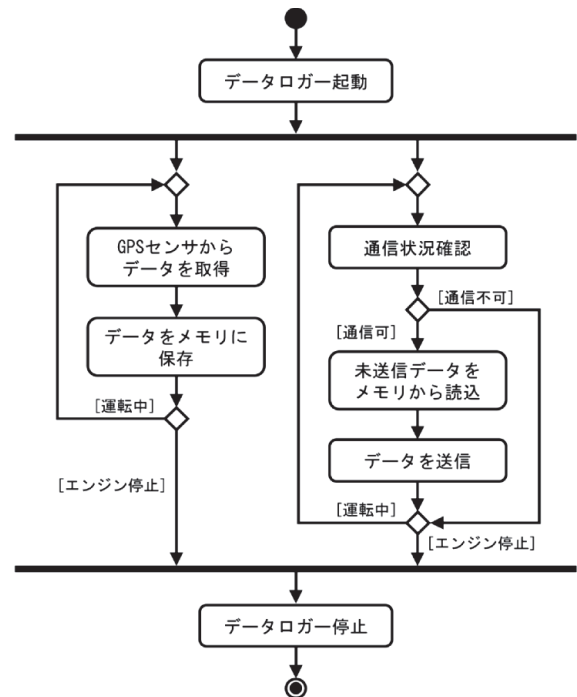
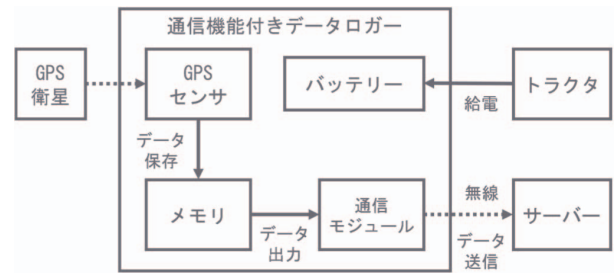
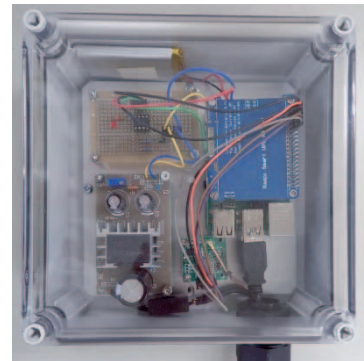
4.1 データ取得の自動化

2015～2016年に使用したデータロガーのブロック図を図9に示す。このデータロガーは通信機能を持たず内部メモリにデータを保存するため、定期的なデータの回収作業を必要とした。メモリ節約のためにデータの記録間隔を5秒に設定し、1～2ヶ月に1回の頻度でデータの回収作業を実施した。また、バッテリーで駆動するため、データ回収の際にバッテリーの充電を同時に行った。



今回、このデータの回収作業を自動化するために通信機能付きデータロガーを開発した。開発したデータロガーの外観

を図10に、ブロック図を図11に示す。以前のデータロガーと比べてデータを無線通信で送信する点とトラクタから給電される点が大きく異なっている。トラクタのキャビンに設置されたデータロガーは、携帯電話回線を使用してサーバーへデータを送信する。また、山間部等の圃場は携帯電話回線のエリア外であることが多いため、エリア外で取得したデータは、通信が可能なエリアでまとめて送信する仕組みとした。関連するデータの保存と送信のフローを図12に示す。なお、デー



タの記録間隔を1秒に設定したが、内部メモリは少なくとも1年分のデータを保存できるため、長期間通信できない場合でもデータの欠測を防ぐことができる。以上により全域でのデータの取得を可能とした。

通信プロトコルにはIoTなどで使用されることが多いMQTTを使用した。MQTTは軽量でシンプルなPub/Sub型のプロトコルであり、不安定な通信環境においても通信コストを抑えながら確実にデータの送信を行うことができる。

そのほかの機能としては、筐体の防水、トラクタの稼働に連動した起動、DIN規格のソケットによる給電などがある。

気象条件が厳しい夏季及び冬季にデータロガーの試験を行い、複数のトラクタから安定的にデータを取得できることを確認した。

4.2 農作業記録の確認

サーバーに記録された農作業情報をGUIで確認するためのウェブアプリケーションを開発した。図13に動作画面の例を示す。ウェブブラウザ上で集計方法の切り替えとデータの絞り込みを行うことができる。



図13 ウェブブラウザによる農作業記録の確認

5. おわりに

本研究では、北海道の畑作を対象に農作業情報の記録作業の自動化について取り組んだ。トラクタの位置情報履歴などを機械学習により分析することで、農作業情報として重要な作業機の種類を推定する技術を開発した。道内の農業法人のデータに対して適用した結果、高い正解率で推定できることを確認できた。しかし、学習は1年分のデータで行っているため、今後は複数年のデータや別の農業法人のデータを使用した詳細な性能評価を実施したい。また、遠隔地のトラクタから必要な位置情報データを安定的に取得し、記録された農作業情報をウェブ上で確認できるシステムを試作した。今後は試作したシステムと営農管理システムの連携などの展開を目指す。

参考文献

- 1) 辻 博之：北海道畑作の大規模化における課題と今後の展望，農作業研究，53巻1号，pp. 3-13，(2018)
- 2) Guolin Ke, Qi Meng, Thomas Finley, et al. “Light GBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree.” Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017), pp. 3146-3154.
- 3) Tianqi Chen, Carlos Guestrin. “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System.” Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2016), pp. 785-794.
- 4) Anna Veronika Dorogush, Vasily Ershov, Andrey Gulin. “CatBoost: gradient boosting with categorical features support.” Workshop on ML Systems at NIPS 2017.
- 5) 北海道農政部：北海道農業生産技術体系 第4版，公益社団法人 北海道農業改良普及協会，521PP，(2013)
- 6) Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, 他：統計的学習の基礎 データマイニング・推論・予測，共立出版，853PP，(2014)

慣性センサ及び動画像を利用した作業姿勢計測手法の開発

栗野 晃希, 泉 巖, 中島 康博, 近藤 正一, 全 慶樹, 前田 大輔

Development of Methods for Detection of Working Postures using IMU and Video Image Processing

Koki KUWANO, Iwao IZUMI, Yasuhiro NAKAJIMA,
Shouichi KONDOU, Keiki ZEN, Daisuke MAEDA

抄 録

少子高齢化による生産年齢人口の減少から、高齢労働者の活用が重要視されているが、加齢に伴う心身機能低下による労災リスク増加の懸念がある。また、人手不足のために労働者が不慣れな作業に従事する機会も増えていることから、事業者には不安全な作業にならないよう適切な作業管理が求められている。

そこで、安全に関わる重要な要素である、作業姿勢に起因する筋骨格系の負担の把握をねらいとして、慣性センサおよび動画像を用い、作業現場での利用が容易な姿勢の計測・分析手法を開発した。

キーワード：少子高齢化，安全管理，作業姿勢

Abstract

Due to the decrease in the working-age population caused by the declining birthrate and aging population, utilization of the abilities of elder workers is becoming more important. However, there are concerns about the increasing risk of industrial accidents by the decline in physical and mental functions associated with aging. In addition, there are cases for workers to engage in unfamiliar work due to the shortage of labor, and employees are required the appropriate management to avoid unsafe work. In order to understand the musculoskeletal burden caused by working posture, which is an important factor for safety, we developed methods for measuring and analyzing posture using inertial measurement unit (IMU) and video images, which can be easily operated at work sites.

KEY-WORDS : Declining birthrate and Aging population, Safety management, Working postures

1. はじめに

日本は人口に占める高齢者（65歳以上）の割合が増加する「高齢化」と、出生率の低下により若年者人口が減少する「少子化」が同時に進行する少子高齢化社会となっている。1995年をピークに、生産年齢人口（15歳以上65歳未満）は減少に転じており、経済社会の活力を維持するためには、高年齢労働者（55歳以上）の活躍が一層重要とされている¹⁾。しかし、一般に加齢には心身機能の低下を伴う²⁾ことから、高齢労働者の雇用においては労災リスクの増加が懸念されている³⁾。令和2年における60歳以上の休業4日以上⁴⁾の労働災害死傷者数は、対平成29年度比で16.3%増の34,928人となっている⁴⁾。こうした状況に対し、ヘルメットや腕時計型のデバイスに組み込んだセンサによって、体温や心拍数を計測し、

熱中症や疲労などの体調面の安全を看視するシステムが開発されている⁵⁾。しかし、体調面以外の作業姿勢や動作など筋骨格系に起因する労働災害リスクも無視できない。実際に、「動作の反動・無理な動作」は転倒、転落に次ぐ3番目の死傷災害事由となっている⁴⁾。ここで「動作の反動・無理な動作」とは、腰を深く曲げた姿勢から重い荷物を反動をつけて持ち上げる、長時間にわたり低い姿勢をとる、荷物を持ったまま腰をひねる等の身体負担の大きな動作を指し、重量野菜の収穫、荷物の搬送、商品棚の整理といった作業に見られる。こうした動作は腰痛や捻挫の要因や労働災害になり得る。

これらの動作をはじめとして、作業中の筋骨格系への身体負担を把握し、作業工程や作業姿勢を見直すことで、労災リスク低減や身体負担軽減が期待できる⁶⁾。現在、人の姿勢や動作などの把握には様々なアプローチが提案されている。例

事業名：経常研究

課題名：作業現場の安全管理に向けた姿勢・動作簡易分析手法の開発

例えば、姿勢分析手法の一つである、モーションキャプチャと呼ばれる技術がある。ただし、この技術は詳細な動作の分析を目的としているため、全身に多数の慣性センサや計測用マーカーを装着する上に、特殊な計測環境を整えねばならず、その解析には専門的な知識や分析労力を必要とする。また、スナプリーディング法と呼ばれ、30秒や1分といった一定時間間隔で作業者の瞬間の姿勢を観察し記録する方法があるが、この方法では特別な機材は不要であるものの、作業者の姿勢を調査者が目視で特定し、姿勢に付されたコードなどを手作業で記録する必要がある、手間がかかる他、調査者の姿勢特定に対する慣れも求められる。こうしたことから、既存の技術を現場労働者の作業管理へ適用するには手間や環境整備の点から課題がある。

そこで、本研究では労働現場での活用を目指し、計測や分析の手間をかせずに、姿勢や動作の時間や回数を自動的に計測する二つの手法の開発に取組んだので報告する。一つは少数の慣性センサを用いる方法である。上述のように、全身の動作分析にセンサを用いて行う方法では、身体部位ごとに多数のセンサを装着する必要があるが、開発した手法では、作業の安全管理に必要とされる姿勢や動作の種類を限定することで、センサ数を低減できた。もう一つは、一般的なビデオカメラで作業者を撮影した動画像にを用い、機械学習を適用することで姿勢や動作の推定を可能とする手法である。

2. 計測対象とする姿勢と動作の定義

一般に、姿勢とは体位と構えの2つに区分される⁷⁾。体位は身体の重力方向に対する位置関係で、立位、座位、臥位の3つ、構えは頭部、体幹（腰より上の部分）、四肢各部の位置関係を指す。これらの位置関係の組合せにより、人の姿勢は膨大な数となる。本研究は、労働現場の作業姿勢を手間や分析コストをかけずに計測することを目的としているため、代表的な姿勢を再定義することとした。ここで、労働時の作業姿勢の評価法の一つである、長町らによって開発された「つらさ指数⁸⁾」を参考にした（図1）。この指数は、身体の力学モデル、筋電図、心拍数、エネルギー代謝率、主観的なつらさを総合し、代表的な姿勢について、身体負担を1から10の数値で表している。通常、前述のスナプリーディング法で活用し、身体負担面における作業の特徴、負担の大きさや各姿勢の発生頻度を把握する目的で用いられる。この評価法は、身体負担に影響する体幹の姿勢変化と下肢（膝）の屈伸に着目していることに特徴がある。このことを利用し、腰の前屈角度と膝の屈曲角度によって、代表的な姿勢を定義できると考えた。

図2に横軸を膝の屈伸角度、縦軸を腰の前屈角度に設定し、姿勢（No.1～No.9）の範囲を示す。右上にはつらさ指数が10の「膝を深く曲げた中腰で上体を前屈」など身体負担の

No.	つらさ指数	姿勢	動作内容	具体例
9	10		膝を深く曲げた中腰で上体を前屈	かかとは浮いている（水泳のスタート直前の格好）
8	6		膝を伸ばした中腰で上体を深く前屈	90度以上この姿勢で膝が曲っていても同じ
7	6		膝を曲げた中腰で上体を前屈	45～90度（腰） 0～45度（膝）
6	5		膝を伸ばした中腰で上体を前屈	45～90度 足に障害物があっても同じ
5	5		しゃがんだ姿勢（かかどがついている）	かかどが浮くと膝前に出る——区分(J)
4	5		膝を伸ばし上体を軽く前屈	30～45度 無理な姿勢に見えたら——区分(G)
3	4		膝を軽く曲げ上体を軽く前屈	0～50度 立ち姿勢で軽く膝が当たる
2	3		立ち姿勢で背伸び（かかどが浮いている）	目より高い物を取る格好
1	1		立ち姿勢	0～30度 背筋が伸びている

図1 つらさ指数⁸⁾
（長町三生ほか共著、「現代の人間工学」, 朝倉書店, pp.153より引用）

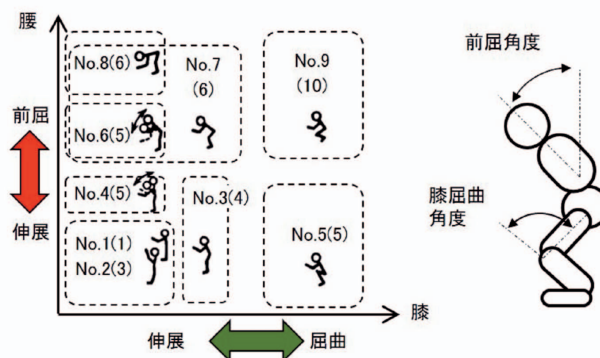


図2 前屈角度と膝の屈曲角度による姿勢の分布（括弧内は、つらさ指数）

大きな姿勢、左上には同6の「膝を伸ばした中腰で上体を深く前屈」など身体負担が中程度の姿勢、右下には同5の身体負担が中程度の「しゃがんだ姿勢」、左下には同1の「立ち姿勢」などの身体負担が小さい姿勢が分布することになる。このことから、それぞれの姿勢を膝の屈曲角度と腰の前屈角度によって特徴付けられることがわかる。ここで、つらさ指数における具体例を参考に、前屈角度を45°として、腰の屈曲と伸展を区分した。また、膝の屈曲については、膝を曲げたNo.7のつらさ指数6の姿勢では、屈曲角度を0～45°としているが、No.9は特につらさ指数が10の姿勢、No.5はしゃがんだ姿勢で、これらは膝を「深く」屈曲している状態であることから、本研究においては、膝の屈曲と伸展の基準を90°として区分した。こうした基準に基づき、以下の4つの代表的な姿勢を定義できた（図3）。

- 姿勢1：立位
- 姿勢2：膝屈曲
- 姿勢3：前屈
- 姿勢4：膝屈曲・前屈

また、身体の動作とは仕事や課題を遂行する身体行動や、保持姿勢の連鎖の全体を指す場合があるが⁹⁾、本研究においては、今後、上記で定義した各姿勢から他の姿勢に移行することを動作と呼ぶこととする。

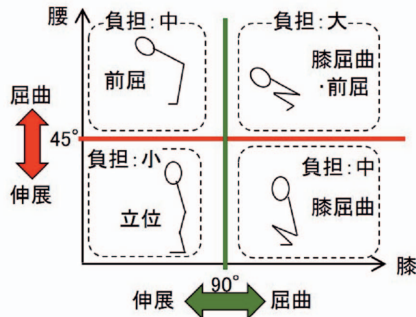


図3 定義した4つの姿勢

3. 姿勢の計測手法

定義した4つの姿勢を、慣性センサおよび動画像を用いて計測する手法について検討した。

3.1 慣性センサを用いた姿勢の計測手法

一般に市販されている慣性センサは3軸加速度と3軸角速度の6軸の時系列データを計測可能である。さらに3軸の地磁気成分や気圧も計測可能としたタイプも販売されている。図4に今回利用した慣性センサ(TSND151, ATR-Promotions製)を示す。計測対象とする姿勢は膝の屈曲角度と腰の前屈角度で区分しているため、それぞれの角度を取得し、その組合せで場合分けすれば、定義した姿勢の検出が可能である。しかし、この方法では少なくとも2個の慣性センサを用意し、体

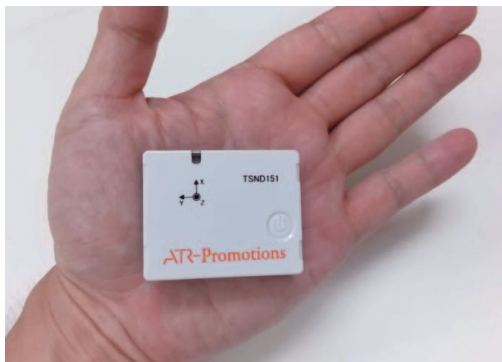


図4 計測に用いた慣性センサ (TSND151, ATR-Promotions製)

幹の背部あるいは胸部、さらに下肢の計2箇所に装着しなければならぬため、作業現場での活用を考えると計測の手間や作業の妨げの原因となる。そこで、身体背部に装着した1個のセンサから取得できる時系列データのみで姿勢を計測する手法を考案した。また、考案した手法により、データから自動的に4つの姿勢を検出するプログラムを作成した。

図5は本手法における、前屈と膝の屈曲角度の計測方法を示す概略図である。まず、身体背部に装着したセンサの3軸角速度情報を積分することで、前屈角度を得ることができる。しかし、一般に慣性センサデータには温度ドリフト等のノイズ成分が含まれるため、積分を継続すると、角度が真値からずれてしまう現象が起こる。そのため、角速度と同時に取得できる重力加速度の3軸方向成分を複合する、一般に相補フィルタと呼ばれる補正技術を用い、鉛直方向に対するセンサの傾きを求め、腰の前屈角度を推定した。しかし、これだけではセンサを装着していない膝の屈曲角度は直接計測できない。そこで、膝を屈曲、伸展すると、体幹に装着したセンサも鉛直方向に変位することに着目した。一定以上の鉛直方向の変位が発生した場合に膝の屈曲、あるいは伸展と判別できる。ここで設定する変位の閾値については、例えば農作業や工場内での荷役を考えた場合、深いしゃがみの姿勢が起こり得ることから、この姿勢を計測できる値を設定することとした。今回は、(社)人間生活工学研究センター発行の「日本人の人体計測データ」(1992-1994)から、成人の座位と立位による体幹の高度差がおよそ身長22%であることを基準とした。身

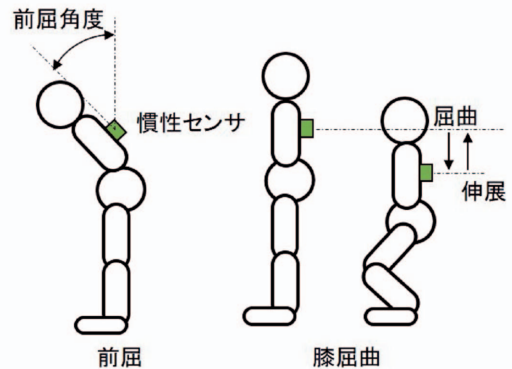


図5 腰の前屈と膝の屈曲の計測

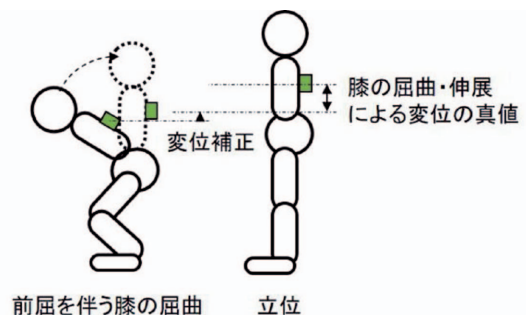


図6 腰の前屈を伴う膝の屈曲の計測

長との比をパラメータとすることで、計測対象とする作業者ごとに値を設定することが不要となる。さらに、前屈を伴った膝の屈曲については、図6に示すように前屈角度を用いて変位を補正することで、膝の屈曲、伸展を判別可能にした。

3.2 動画像を用いた姿勢の計測手法

動画像を用いた機械学習によって身体各部位の3次元位置を推定し、部位間の角度から姿勢を特定するアルゴリズムを開発した。ここでは、単眼のカメラ映像のみから関節点の3次元位置を推定する手法¹⁰⁾の適用を検討した。手法の詳細は引用文献に委ね、ここでは概略を述べる。図7の最左列に示す、ビデオカメラ（GZ-E765、(株)JVCケンウッド製）で撮影した動画像を構成する2次元画像を用いて、フレーム毎に機械学習による特徴点抽出手法を適用し、作業者の体幹や四肢などの身体部位の関節点の画像上での位置を推定する。次に、対象となるフレームとその前後数フレームの画像上での関節点の位置を利用した機械学習を行うことで、時間的な関節位置の変動情報を利用して関節点の3次元位置を推定する。推定した関節点を連結することで、下肢や上肢、体幹などの身体部位と、その配向がわかることから、この解析結果により、前屈角度、膝屈曲角度を取得した（図8）。前屈は図3に示

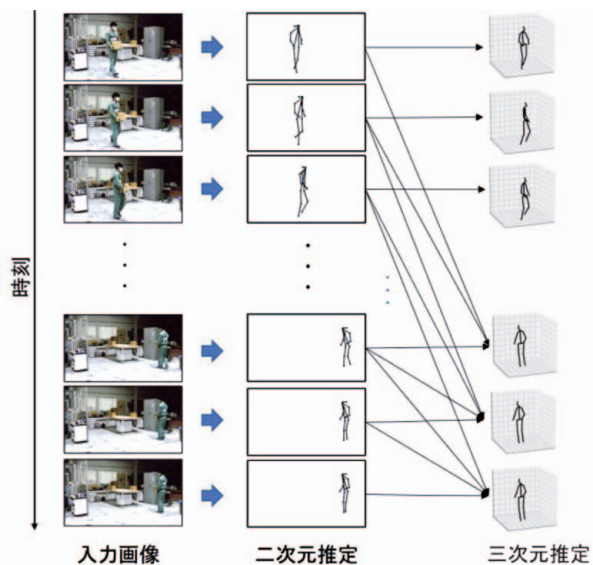


図7 動画像からの身体部位推定

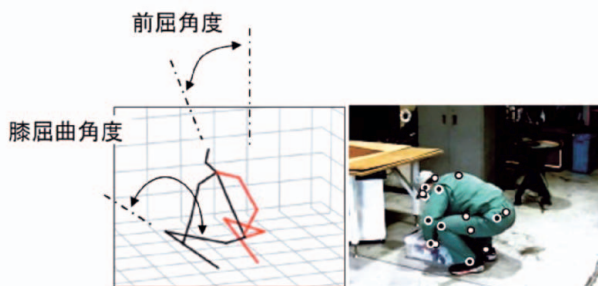


図8 腰の前屈と膝の屈曲の計測

すように慣性センサと同様の45°以上の角度とし、膝の屈曲角度については90°を判定基準とした。

4. 荷役作業の模擬実験と結果

4.1 実験の手順と条件

身体的作業負荷の大きい現場を想定し、図9に示す荷役作業の模擬試験を実施し、慣性センサおよび動画像を用いた計測手法により、4姿勢の検出を行った。なお、事前に実験参加者に、荷下ろし時の姿勢を以下のように指示した。

- 1回目：前屈
- 2回目：膝屈曲・前屈
- 3回目：膝屈曲

また、荷下ろし時の姿勢確認のため、検証用として身体側面を撮影するビデオカメラを設置した。検証には動画から静止画を抽出し、画像上で前屈角度や膝の屈曲角度を取得し、姿勢の確認に利用した。

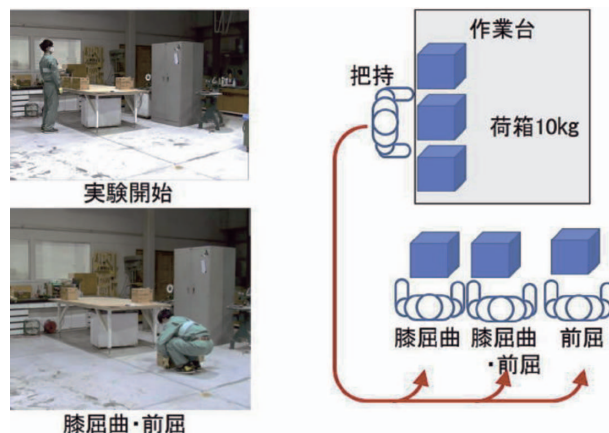


図9 模擬実験の概略図

4.2 実験結果

図10に慣性センサを用い、3.1で述べた手法によって取得した腰の前屈角度と膝の屈曲・進展に伴う変位を示す。図中には前屈の検出閾値45°及び膝の屈曲の検出閾値である身長比0.22（22%）を表示している。図11に動画像を用い、3.2で述べた手法によって得た腰の前屈角度と膝の屈曲角度の変化を示す。また、それぞれの検出閾値角度45°、90°を図示している。図12に、これら2つの手法と、検証用のビデオ画像から取得した姿勢検出結果を示す。両手法とも、姿勢確認用のビデオカメラ画像の姿勢検出結果とほぼ一致していることが確認できた。表1は各姿勢の保持時間を示しており、検証画像との時間差は-0.08秒から+0.19秒であった。動作については、立位から、荷下ろし時に指定した3姿勢へ、また、それらの姿勢から立位に移行する動作についても、判定する

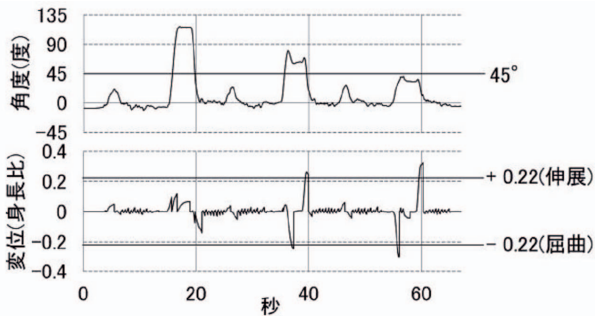


図10 慣性センサにより取得した前屈角度（上段）と膝屈曲・伸展による変位（下段）

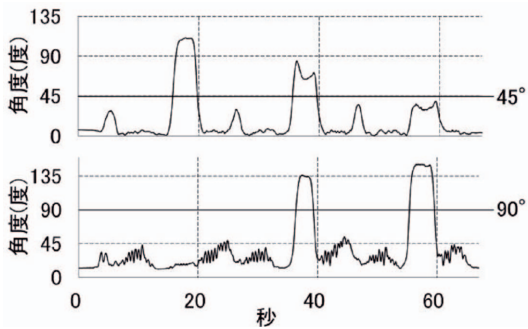


図11 動画像により取得した前屈角度（上段）と膝屈曲・伸展角度（下段）

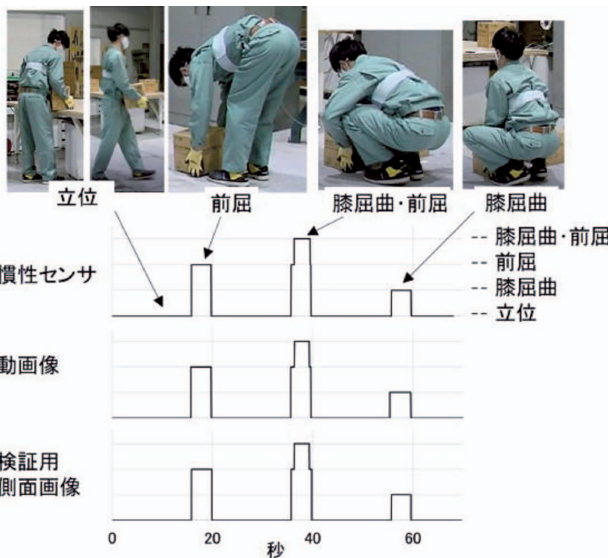


図12 4 姿勢の計測結果

ことができ、姿勢確認用の画像と同様の変化を確認した。

5. 考 察

荷役作業の模擬実験結果について、慣性センサ、動画像による計測結果は検証用画像から取得した姿勢変化とはほぼ一致している（図12）。表1に示した姿勢の保持時間には誤差が発生しているが、これは本研究で目的とする、簡易的に身体

リスクを把握する分析手法においては問題にならない値であり、一定の精度が得られたと考える。このことについては、今後、実際の作業現場で本手法を導入し活用する場合、まず各姿勢の有無や発生頻度を把握することが重要と考えられることから妥当な判断と言える。

表1 各手法による姿勢の維持時間比較

	確認用側面画像	慣性センサ	動画像
前屈	4.00	3.92 (誤差 -0.08)	4.03 (誤差 +0.03)
膝屈曲・前屈	2.98	3.06 (誤差 +0.08)	2.90 (誤差 -0.08)
膝屈曲	3.88	3.92 (誤差 +0.04)	4.07 (誤差 +0.19)

表2 各手法の特徴

	計測範囲	多人数計測	全身計測	暗所計測
慣性センサ	○	△ 人数分のセンサが必要	△ 多数センサの装着が必要	○
動画像	△ 遮蔽物・画角	○	○	× 照明が必要

ここで、慣性センサ及び動画像を用いた姿勢推定における特徴を表2に示す。動画像による手法では、画角内に対象となる作業者を捉え続けることが条件となる。また、撮影される作業者の心的ストレスや遮蔽物の出現、カメラを配置する適当なスペースが確保できないなど、想定外の状況が起り得ることに注意を払う必要がある。こうした場合においては、慣性センサによる計測手法が適していると考えられる。一方、本研究の応用展開として、前屈、膝の屈伸以外の、例えば上肢の運動や腰のひねり動作などを計測する場合、身体各部分に慣性センサを装着することなく、全身を計測可能な動画像の利用が適していると考えられる。以上のことから、対象とする作業環境、内容に応じて手法を選択することも考慮し労働現場での活用を図る。

6. まとめ

作業現場での安全管理に向け、4つの作業姿勢および動作を、慣性センサおよび動画像を用いて計測する手法を開発した。慣性センサによる手法では、身体背部に装着した一つのセンサで計測可能であることを確認した。また、一般に市販されているビデオカメラで撮影した動画像を用い、機械学習によって身体各部位の3次元位置を推定し、同様に姿勢、動作を取得できることを確認した。

参考文献

- 1) 「高年齢者雇用安定法改正の概要」(厚生労働省)
<https://www.mhlw.go.jp/content/11600000/000694689.pdf>
- 2) 齊藤 一：向老者の機能の特性-停年制問題を背景に考
えて, 労働の科学, vol.22, No.1, pp.4-9 (1967)
- 3) 「高年齢労働者の活躍促進のための安全衛生対策」(中央
労働災害防止協会) (2017)
- 4) 「令和2年の労働災害発生状況」(厚生労働省)
<https://www.mhlw.go.jp/content/11302000/000790380.pdf>
- 5) 丸山 崇：熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサー
の活用と効果的な熱中症予防法の検証, 労災疾病臨床研
究事業費補助金 (2019)
- 6) 中央労働災害防止協会：エイジアクション100, pp.9
(2018)
https://www.jisha.or.jp/age-friendly/pdf/ageaction100_gaiyou.pdf
- 7) 藤澤宏幸：姿勢の定義と分類の再考, 理学療法の歩み,
vol.24, No.1, pp.31 (2013)
- 8) 長町三生ほか著：『現代の人間工学』, 朝倉書店, pp.153
(1986)
- 9) 長崎 浩：動作分析のこれから, 理学療法科学, vol.13,
No.3, pp.147-151 (2003)
- 10) 3D human pose estimation in video with temporal
convolutions and semi-supervised training: Proceedings
of the IEEE Conference on Computer Vision and
Pattern Recognition. 2019.

北海道内のバイオマス資源から作製されるナノファイバーの特性評価

瀬野修一郎, 細川 真明, 大市 貴志, 可児 浩, 吉田 昌充, 山岸 暢
吉田誠一郎, 松嶋景一郎, 鎌田 樹志*

Characterization of Nanofibers Prepared from Biomass Resources in Hokkaido

Shuichiro SENO, Masaaki HOSOKAWA, Takashi OHICHI, Hiroshi KANI,
Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI, Seiichiro YOSHIDA,
Keiichiro MATSUSHIMA, Tatsuyuki KAMADA*

抄 録

バイオマス由来のセルロースやキチンをナノサイズに解繊したバイオマスナノファイバー (BNF) は、ポスト炭素繊維として大変注目されている新素材である。道内には、その原料となるセルロース資源 (木材, 農業残渣, 食品加工残渣など) やキチン資源 (カニ殻, エビ殻など) が豊富にあり、高付加価値な産業利用が期待されている。しかしながら、道内の各種バイオマス資源を同時にナノ解繊し、そのナノファイバー特性を系統的に評価した例はほとんどない。

そこで本研究では、道内の各種原料 (トドマツチップ, ビートパルプ, ポテトパルプ, ズワイガニ殻, ハナサキガニ殻) に着目し、湿式法および乾式法によるナノファイバー化およびその特性評価 (粘度特性, 機械的特性, 樹脂補強性) を行った。各種特性評価の結果、原料依存性が確認され、活用する用途の要求特性によって原料の適性があることが示唆された。

キーワード : セルロースナノファイバー, キチンナノファイバー, 道産バイオマス

Abstract

Biomass nanofiber (BNF), which is obtained by nanofibrillating biomass-derived cellulose and chitin, is a new material that is attracting a great deal of attention as a post carbon fiber. There are abundant cellulose resources (wood, agricultural residues, food processing residues, etc.) and chitin resources (crab shells, shrimp shells, etc.) as raw materials of nanofiber in Hokkaido, and high value-added industrial use is expected. However, there are few examples of nanofibrillation of various biomass resources in Hokkaido and systematic evaluation of characteristics about all of their nanofiber at the same time.

In this research, it focused on various raw materials in Hokkaido (saxhalin fir chip, beet pulp, potato pulp, snow crab shell, blue king crab shell). We made nanofibers by wet method and dry method and evaluated their characteristics (viscosity characteristics, mechanical characteristics, reinforcement of resins). As a result of various characteristic evaluations, the dependence on raw materials was confirmed, and it was suggested that the raw materials are suitable depending on the required characteristics of the intended application.

KEY-WORDS : Cellulose nanofiber, Chitin nanofiber, Biomass in Hokkaido

1. はじめに

バイオマス由来のセルロースやキチンをナノサイズに解繊

したバイオマスナノファイバー (BNF) は、ポスト炭素繊維として大変注目されている新素材である^{1,2)}。BNFの一種であるセルロースナノファイバー (CNF) はバイオマス由来

*エネルギー・環境・地質研究所, *Research Institute of Energy, Environment and Geology

事業名: 経常研究

課題名: バイオマスファイバーの解繊および特性評価に関する研究 (平成30~令和2年度)

に基づく持続可能性に加え、軽量かつ高強度、高弾性、低収縮率、低線膨張率などの特長があると言われている。その特長を利用し、環境省の Nano Cellulose Vehicle のコンソーシアムでは、京都大学が代表事業者となり、CNFを活用した軽量化自動車の製造にチャレンジする取り組みが行われている。

キチンナノファイバーにおいては前述したCNFの特長に加えて、抗菌・抗カビ性、創傷治癒効果、育毛効果などの機能性を示すことが知られており、CNFとは異なる衛生・医療分野での用途開発が活発に行われている。

道内には、BNFの原料となるセルロース資源（木材、農業残渣、食品加工残渣など）やキチン資源（カニ殻、エビ殻など）が豊富にあり、高付加価値な産業利用が期待されている。しかしながら、道内の各種バイオマス資源を同時にナノ解繊し、そのナノファイバー特性を系統的に評価した例はほとんどない。

そこで、資源量が豊富かつ比較的まとまった量の入手が容易で工業原料として活用できる可能性が高い原料としてセルロース資源に関してはトドマツチップ、ビートパルプ、ポテトパルプ、キチン資源に関してはズワイガニ殻およびハナサキガニ殻に着目し、湿式法および乾式法によるナノファイバー化およびその特性評価を行った。

湿式法によるBNFについては増粘性やチキソトロピー性*などの特徴的なレオロジー特性を比較するため、粘度特性の評価を、ナノファイバーそのものの強さを比較するため、機械的特性の評価を行った。

(*チキソトロピー性：懸濁液のレオロジー的性質の一種で、等温状態においても、変形を与えることで見かけ粘度が一時的に低下する性質のこと。)

乾式法によるBNFについては樹脂の補強繊維としての性能を比較するため、得られたBNF強化樹脂の機械的特性評価を行った。

2. 実験方法

2.1 原料について

原料の入手先については以下のとおりである。トドマツチップ（燃料として利用される間伐材等を数cmのチップ状に加工したものは道総研林産試験場から入手、ビートパルプについては市販のビートパルプペレット（牛用飼料として活用されている）を購入、ポテトパルプについては道内でんぶん工場よりでんぶん粕（ふすま等と混合した後に家畜用飼料となる原材料）を購入、ズワイガニ殻および花咲カニ殻（身出し後の食品加工残渣）は道内水産加工会社より入手した。カニ殻については未乾燥かつ冷凍状態で保管されたものを使用した。ズワイガニ殻については脱灰、脱タンパク質処理した粉末も道内キトサン製造業者より入手し、試験に供した。



図1 検討に用いられた原料

2.2 ナノファイバー化を行う解繊方法について

ナノファイバー化を行う方法として、水中で解繊を行う湿式法と、乾燥した原料を樹脂のような水以外の媒体中で解繊を行う乾式法の二種類が活用されている。

湿式法による解繊においては、大別すると機械処理³⁾と化学処理+機械処理⁴⁾の二種類がある。機械処理においては様々な方法（高圧ホモジナイザー法やグラインダー法⁵⁾、ボールミル粉砕法⁶⁾など）が提案されているが、今回は当場で保有する石臼式磨砕機（スーパーマスコロイダーMKCA6-2、増幸産業(株)）を用いたグラインダー法による機械処理にてナノファイバー化を行うこととした。

乾式法による解繊については低コストでの製造が最も期待されている二軸混練押出機（TEM-26SS、東芝機械(株)）によるパルプ直接混練法⁷⁾を活用した。なお、本法においてはキチン系原料ではまだ技術が確立していないため、セルロース系原料（トドマツチップ、ビートパルプ、ポテトパルプ）のみを検討した。

2.3 原料の精製

セルロース系原料についてはヘミセルロース・リグニン・色素の除去を目的とする精製処理としてアルカリ処理（2%水酸化カリウム水溶液[トドマツのみ5%]、80℃、4時間）、ワイズ法による処理（亜塩素酸ナトリウム+酢酸、80℃、1時間×3回）、イソプロパノールによる処理を行った。キチン系原料についてはタンパク質・炭酸カルシウム・色素の除去を目的とする精製処理としてアルカリ処理（5%水酸化カ

リウム水溶液、環流、6時間)、酸処理(1M塩酸、室温、2日)、イソプロパノールによる処理を行った。また、精製後の固形分量を精製前の固形分量で除することで残渣率を求めた。

2.4 湿式解繊ナノファイバーに関する実験について

2.4.1 グライNDER法による湿式解繊

精製した原料の固形分濃度が0.8wt%となるように調整した懸濁液をホモジナイザー(T50 digital ULTRA-TURRAX®, IKA社, シャフトジェネレーター:S50N-G45G-ST)を使って粗粉碎(10,000rpm, 30秒×2)した。ただし、未乾燥のカニ殻については精製直後は殻の形状がそのまま残っていたため、ホモジナイザーによる処理の前にさらに市販のジュースミキサーを使い、事前の粉碎処理を行った。

準備した0.8wt%懸濁液を石臼式磨砕機を使って、解繊中の負荷に対応すると考えられる電流値が一定(約5A)となるように回転数(300~500rpm)、石臼のクリアランス(-220~-400 μ m)を調整し、処理を行った。クリアランスにおいては設定上はマイナスの値となっているが、試料がない状態で石臼同士が擦れ合う音が聞こえる位置をゼロ点としており、試料が石臼間に充填されるとクリアランスが少し広がってしまうため、見かけ上マイナスの値となっていると推測される。

2.4.2 湿式解繊によるBNFの形態観察

湿式解繊によるBNFの繊維径等を確認するため、電界放出形走査電子顕微鏡による形態観察を行った。観察試料は乾燥による凝集を防ぐため、t-ブタノールで溶媒置換後、凍結乾燥し、白金薄膜を蒸着し、FE-SEM(JSM-7001F, 日本電子㈱)で観察した。

2.4.3 BNF懸濁液の粘度特性評価

各種原料由来の0.8wt%BNF懸濁液の粘度特性を評価するためにB型粘度計(RV DV-IP, 英弘精機㈱)による粘度測定を行った。BNF懸濁液は剪断速度の上昇により粘度が下降するというチキソトロピー性と呼ばれる特徴的な粘度特性を有するため、複数の回転数(0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100rpm)で測定を行った。また、そのチキソトロピー性のため、粘度が安定するまで非常に時間がかかるので、各回転数における粘度は定常状態となる際(1分間あたりの粘度変化が0.5%以下となる程度)の粘度を評価した。スピンドルは粘度に応じてRV-1, RV-2, RV-3を用いた。

2.4.4 BNFシートの機械的特性評価

各種原料由来の0.2wt%BNF懸濁液を吸引ろ過によりろ紙からシート状のまま剥離できるまで脱水し、含水シートを作製した。そのシートを風乾することで機械的特性評価用サン

プルを得た。紙の引張試験に関する規格(JIS P8113)を参考に引張試験を実施した。試験条件、使用した装置などの詳細は以下のとおりである。

試験速度: 6 mm/min.

試験片: 60×15mm

試験温度: 23°C

試験装置: オートグラフAG-100kNXplus(㈱島津製作所)

2.5 乾式解繊ナノファイバーに関する実験について

2.5.1 パルプ直接混練法による乾式解繊

冒頭でも述べたが、本法においてはキチン系原料で技術が確立されていないため、トドマツチップ、ビートパルプ、ポテトパルプのみを検討した。精製した原料を無水酢酸を用いてエステル化することで、アセチル変性パルプを作製した。その変性パルプを二軸混練押出機(TEM-26SS, 東芝機械㈱)を用いて、ナイロン6(PA6)中でナノ解繊および複合化し、CNF含有率10%のCNF強化PA6(以下、CNF-PA6)のペレットを得た。得られたペレットから射出成形機(EC100SX, 東芝機械㈱)を用いて、ダンベル型試験片(JIS K7139タイプA)を作製した(図2)。



図2 ダンベル型試験片

2.5.2 乾式解繊によるBNFの形態観察

解繊処理後パルプの繊維径を確認するため、CNF-PA6中のPA6成分をヘキサフルオロイソプロパノールで溶解した後、解繊後の繊維のみを抽出し、電子顕微鏡観察を実施した。抽出された解繊後繊維の表面に白金薄膜を蒸着し、FE-SEM(JSM-7001F, 日本電子㈱)で観察した。

2.5.3 機械的特性評価（3点曲げ試験、引張試験）

3点曲げ試験では、ダンベル型試験片中央の平行部を用いてJIS K7171に準拠し、曲げ強さと曲げ弾性率を測定した。試験は射出成形直後の試験片に水分が入らないようアルミ袋や密閉容器で保管し、絶乾状態に近い状態で実施した。試験条件、使用した装置などの詳細は以下のとおりである。

試験速度：10mm/min.

支点間距離：64mm

試験温度：23℃

試験装置：オートグラフAG-100kNXplus(榊島津製作所)

引張試験では、ダンベル型試験片を用いてJIS K7161に準拠し、引張強さと引張弾性率を測定した。試験は射出成形直後の試験片に水分が入らないようアルミ袋や密閉容器で保管し、絶乾状態に近い状態で実施した。試験条件、使用した装置などの詳細は以下のとおりである。

試験速度：10mm/min.

チャック間距離：115mm

試験温度：23℃

試験装置：オートグラフAG-100kNXplus(榊島津製作所)

3. 結果と考察

3.1 精製後の原料

得られた精製後の各原料の様子を図3に示した。いずれも脱色されて、ほぼ無色の状態となったが、ハナサキガニ殻については元々の色が濃く色素成分が多いためか、少し橙色と

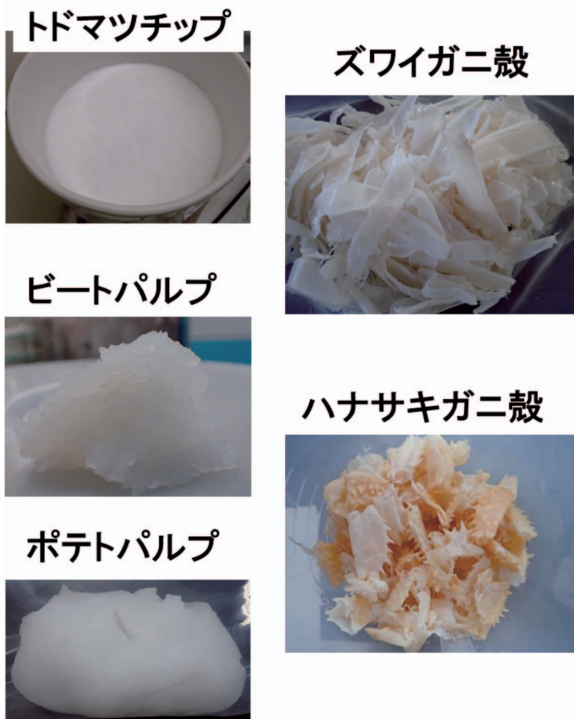


図3 精製後の原料

なっていた。また、ビートパルプとポテトパルプについては精製後すでにペースト状の状態となっていた。残渣率に関しては表1のとおりで、セルロース系においては農産物よりも木材の方がセルロース成分が多いと言われているとおり、実際にトドマツチップの残渣率が高かった。

表1 各原料の精製後の残渣率

種類	原料	残渣率(%)
セルロース系	トドマツチップ	43
	ビートパルプ	22
	ポテトパルプ	17
キチン系	ズワイガニ殻	21
	ハナサキガニ殻	11

3.2 湿式解繊により作製したナノファイバーの特性評価

3.2.1 BNF懸濁液の外観およびナノファイバーの形態観察

湿式解繊処理により得られた0.8wt% BNF懸濁液の外観を図4に示した。いずれの原料からも白濁した懸濁液が得られ、原料による外観の差異はあまり見られなかった。

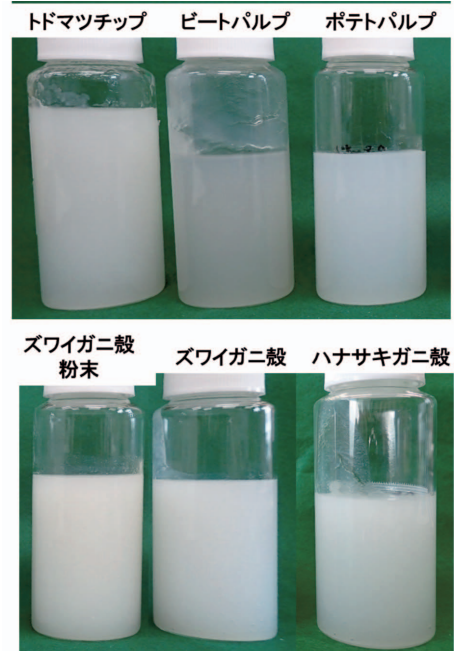


図4 0.8wt% 懸濁液の外観

電子顕微鏡により湿式解繊BNFの形態観察を行った結果を図5に示した。いずれの原料においても数十～数百nm幅の繊維が観測されており、各種原料のナノファイバー化を確認することができた。セルロース系とキチン系の原料間で明

確な差異はあまり見られなかったが、わずかながらキチン系原料由来ナノファイバーの方が100~200nm程度太い繊維が比較的多く残っており、繊維径の分布という点では広がっていた。セルロース系の原料においてはトドマツチップ由来ナノファイバーに比べてビートパルプやポテトパルプといった農産物系原料由来ナノファイバーの方が繊維径が少し細く、短かった。

また、ズワイガニとハナサキガニは同じ甲殻類ではあるが、それぞれカニ種とヤドカリ種で種類が異なっている。しかしながら解繊されたナノファイバーの形態を見る限りは明確な差異はなく、ナノファイバー化において種類の違いはそれほど影響を与えないことがわかった。

今回の電子顕微鏡による形態観察において繊維径の定性的なナノファイバー化の確認はできたが、BNF自体のアスペクト比が非常に大きく、孤立した繊維が観察できなかったため、繊維径や繊維長の分布などの定量的な評価ができておらず、その点においては課題が残っている。

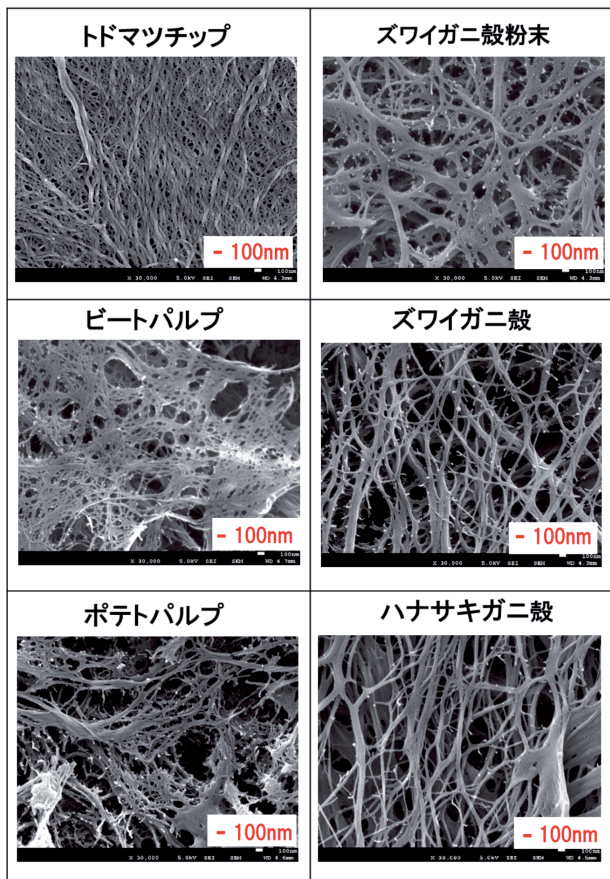


図5 湿式解繊 BNF の電子顕微鏡画像

3.2.2 懸濁液の粘度特性

湿式解繊処理前後における各種原料由来の0.8wt%懸濁液のB型粘度計による粘度測定の結果を図6に示した。いずれの原料においても湿式解繊処理によって、処理前に比べて粘度が上昇していた。粘度に与える大きな影響因子としては繊

維長と繊維径のいずれも考えられるが、繊維長においては処理によって伸張することが考えられないため、おそらく繊維径の微細化が進行することによって絡み合い点が増大し、ネットワーク構造が形成され、粘度が上昇したものと推測される。また、いずれの原料においても解繊処理後の懸濁液はBNF懸濁液でよく見られる回転数が上昇するとともに粘度が低下するチキソトロピー性³⁾と呼ばれる粘度特性が観測されており、そのことから原料のナノファイバー化が支持される。

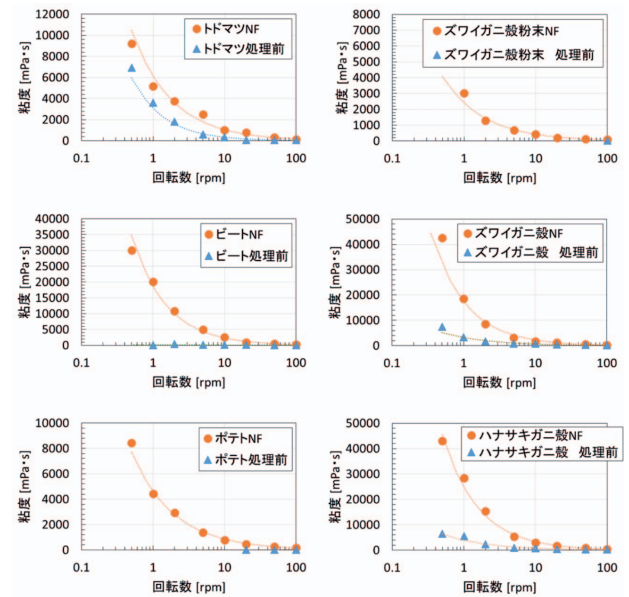


図6 湿式解繊処理前後の0.8wt%懸濁液の粘度特性 (測定範囲外 [100 ~ 13×10⁶mPa・s] の値の粘度については参考値)

図7に各原料由来0.8wt%BNF懸濁液の粘度特性をまとめた図を示した。解繊処理条件によって各原料の解繊の程度が変わってくるので、この順序は変動する可能性はあるが、今回の処理条件においてはセルロース系の原料の中では低回転数の粘度がビート>トドマツ≒ポテトとなり、キチン系の原料の中ではズワイガニ殻≒ハナサキガニ殻>ズワイガニ殻粉

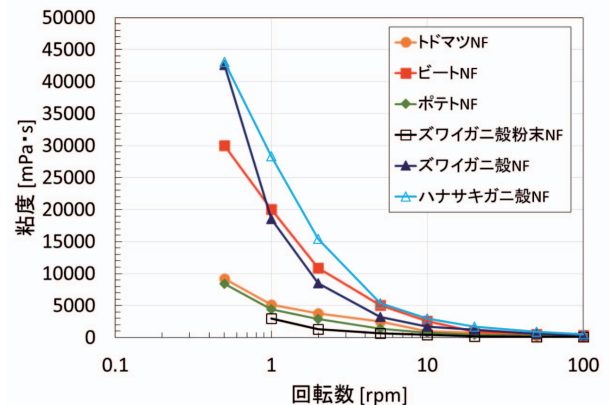


図7 各原料由来0.8wt%BNF懸濁液の粘度特性

末となった。電子顕微鏡による形態観察からは定性的な情報しか得られなかったが、粘度におけるこれらの差異は解繊程度の差異が反映しているものと考えられる。解繊処理により同程度の負荷を与えたとしても粘度に差異が現れたことから、原料によって解繊の起き易さが異なると推測される。

また、原料精製の時点でビートパルプとポテトパルプについてはトドマツチップと異なり、ナノファイバー化された状態に近いようなペースト状の状態となっていたが、これも原料の違いによる解繊の起き易さを反映しているものと予想される。

一方で各原料に由来する繊維長の差異も粘度に影響を与えると思われるが、一般的に農産物よりも木材の方が繊維長が長いと言われており、それにも関わらずビート由来懸濁液の方が粘度が高かったことから、本結果においては解繊の程度が与える影響が強いものと考えている。

キチン系においては同じズワイガニ殻の中でも乾燥粉末状態と未乾燥の状態が大きく粘度が異なっていた。これは乾燥することでキチンナノファイバーの束の凝集が進行し、解繊処理によってもその束が解れなかったためと推測される。これらのことから増粘剤といった粘度が機能を支配するような用途でBNFを活用する際には粘度に影響を与える原料の選択や乾燥状態の管理が重要であることがわかった。

3.2.3 シートの機械的特性

機械的特性評価用サンプルは各種原料由来の0.2wt%BNF懸濁液の吸引ろ過により作製したシートを風乾することで得られた(図8)。未解繊の原料から作製したシートでは塊状の部分が散見され、酷い場合にはシート形状が維持できず成形できなかったが、いずれの原料からも解繊処理することにより成形が可能となった。粒子がサブミクロンスケール以下になるためと推測されるが、背後が透けて見えるシートが作製できた。

次に紙の規格(JIS P8113)を参考に実施した引張試験の結果を図9、10に示した。体積が同一でもシートの出来映えによって空隙率が異なり、見かけの密度が異なっているため、坪量(単位面積あたりの重量)で規格化された比強度、比弾性率で評価することとした。

試験の結果、全ての原料において解繊することで比強度、比弾性率が上昇した。これは解繊処理によって、原料中の粒子形状が均一となり、破壊の基点となる応力集中が起こる不均一な箇所が減少したことにより上昇したものと推測される。また、その値は原料によって異なっており、解繊処理後の機械的特性はセルロース系ではトドマツ、ビートが値が高く、キチン系では未乾燥のカニ殻が種類に関係なく値が高くなった。

以上より機械的特性においても原料の依存性が確認されたことから、食品の食感改良など強度が求められるような添加

剤といった用途においても最適な原料の選択が重要であると推測される。

	解繊	未解繊
トドマツ		
ビート		
ポテト		
ズワイガニ殻粉末		× シート形状を維持できず成形不可
ズワイガニ殻		
ハナサキガニ殻		

塊状の部分あり

図8 BNF懸濁液から作製したシート外観

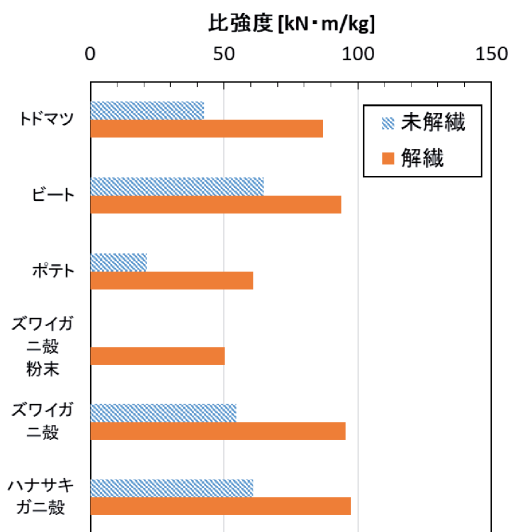


図9 BNF懸濁液から作製したシートの比強度

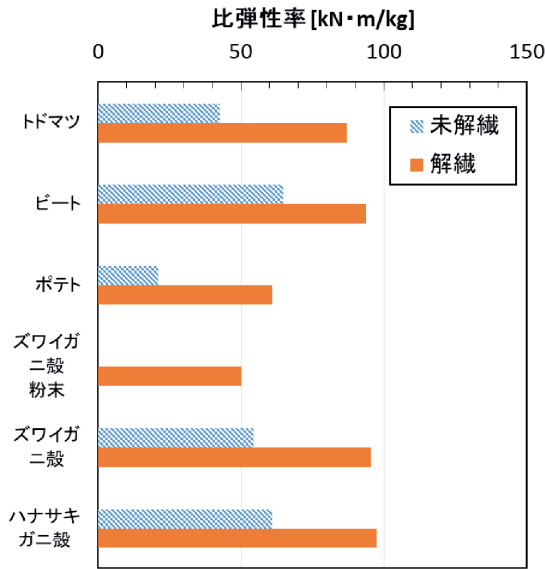


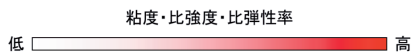
図 10 BNF 懸濁液から作製したシートの比弾性率

3.2.4 湿式解繊により作製したBNFの特性評価まとめ

表2にこれまで評価した湿式解繊により作製したナノファイバーの形態観察による繊維の様子、粘度特性、機械的特性をまとめた。各特性には原料依存性があり、例えばビート由来ナノファイバーは粘度も高く、単体で強度の強いファイバーとなることがわかり、原料によって作製されるナノファイバーの特性が異なることがわかった。また、ズワイガニ殻の乾燥粉末試料と未乾燥試料では、解繊処理後の特性が大きく異なることから、試料の乾燥状態も大きな影響因子となることがわかった。このことから用途における要求特性に応じて原料の選択および乾燥状態の管理が重要であることが示された。

表 2 各原料から作製した湿式解繊ナノファイバーの特性

	トドマツ	ビート	ポテト	ズワイガニ殻粉末	ズワイガニ殻	ハナサキガニ殻
繊維の様子	長	微細、短	細、短	長	長	長
粘度(1rpm)	mPa・s 5170	20070	4450	3020	18510	28340
比強度	kN・m/kg 87	94	61	50	95	98
比弾性率	kN・m/kg 4080	5010	3530	4250	4480	4840



3.3 乾式解繊により作製したセルロース系原料由来NF(CNF)強化PA6の特性評価

3.3.1 機械的特性

パルプ直接混練法は樹脂との複合材を作製する上で最も実用性の高いプロセスであるが、樹脂との親和性を高めるため、パルプをアセチル変性することで疎水化している。各原料由来アセチル変性パルプの変性度はフーリエ変換赤外分光光度計を使って1730 cm⁻¹ 付近のアセチル基の C=O に関する吸収から求め、それぞれトドマツチップ由来パルプが1.0、ビー

トパルプが1.0、ポテトパルプが0.7であることがわかった。変性度はセルロースを構成するグルコース中の3つの水酸基が全て置換された場合に3となる。

まずはじめに乾燥した変性パルプを用いてパルプ直接混練法によりPA6と複合化した。パルプを変性した際、反応後にイソプロパノールで洗浄しているため、変性パルプは洗浄溶媒で膨潤し、固形分量が低い状態で得られるが、樹脂との混練は膨潤した溶媒が蒸発するような高温下で行われるため、固形分量が90%以上となるように減圧乾燥を行った。

そこで得られたCNF-PA6の曲げ特性(曲げ最大強さ、曲げ弾性率)を図11に示した。いずれの原料においても曲げ弾性率は向上した。しかしながら、曲げ最大強さにおいてはビート・ポテトCNF-PA6はPA6単体と同等もしくは低下しており、繊維による補強効果が見られなかった。この原因として繊維の凝集が予想されるため、熱プレス機にてシートを成形し、凝集状態を確認したところ、ビート・ポテトCNF-PA6においては肉眼で確認できるほどの凝集物が存在することがわかった(図12)。これはパルプの乾燥によって、混練前にすでに二軸混練による剪断力でも解繊が進行できないような凝集が発生していたものと推測される。

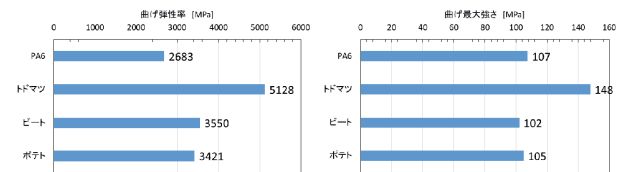


図 11 各原料由来 CNF-PA6 (パルプ乾燥) の曲げ特性

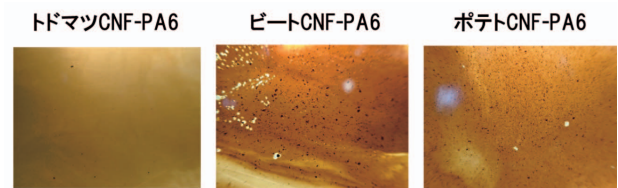


図 12 各原料由来 CNF-PA6 (パルプ乾燥) から作製したフィルムの外観

そこで、変性ビートパルプおよびポテトパルプにおいては乾燥を中断し、固形分量を調整(約60%)した状態でPA6と混練することとした。そうして得られたCNF-PA6の曲げおよび引張特性の評価の結果を図13に示した。いずれの原料においても曲げ最大強さ、曲げ弾性率、引張最大強さ、引張弾性率はPA6単体に比べて向上が見られた。先ほど見られたような曲げ最大強さの低下は見られず、乾燥による凝集を抑制できたものと考えられる。

樹脂の補強性に関しては原料による差異が見られ、トドマツ>ビート≧ポテトとなる結果であった。定性的な観察によるものなので明確には言及できないが、電子顕微鏡観察にお

いて農産物系に関しては細く、短い繊維になっている様子が見られていたので、繊維形態の違いが補強性に影響を与えている可能性が考えられる。しかしながら、樹脂の補強性が原料に依存することは明らかであり、補強繊維として活用する場合も最適な原料の選択は重要であると考えられる。

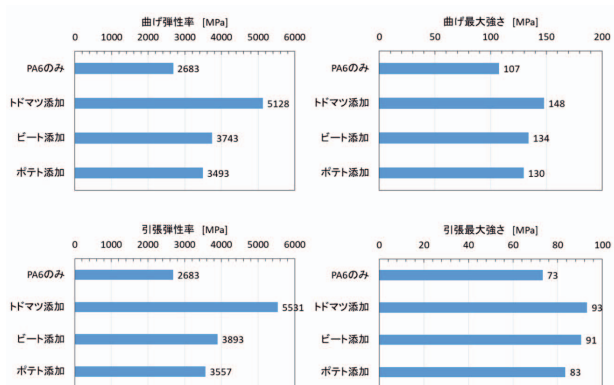


図 13 各原料由来 CNF-PA6 の機械的特性

3.3.2 解繊後繊維の電子顕微鏡観察

各原料由来 CNF-PA6 中の解繊後繊維の電子顕微鏡観察結果を図14に示した。いずれの原料においても50~300nm 程度まで細くなり、パルプ直接混練法による樹脂中の解繊で、ナノスケールまで解されていることが確認された。

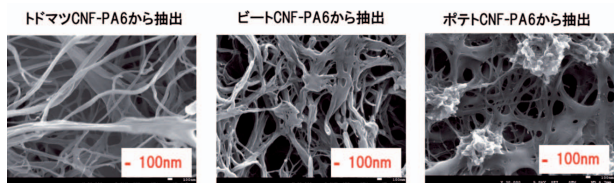


図 14 樹脂中の解繊後繊維の微細構造

3.3.3 パルプの変性度の影響について

変性度の影響について調べるため、変性度が異なるパルプを PA6 と複合化し、その曲げ特性を評価した。その結果を図15に示した。変性度には樹脂の極性とセルロースの極性の兼ね合いによって最適な値があり、PA6 の場合は0.4~0.6あたりとされている⁹⁾。トマトの場合は変性度の影響が顕著であったが、ビートやポテトの場合はトマトほど変性度の

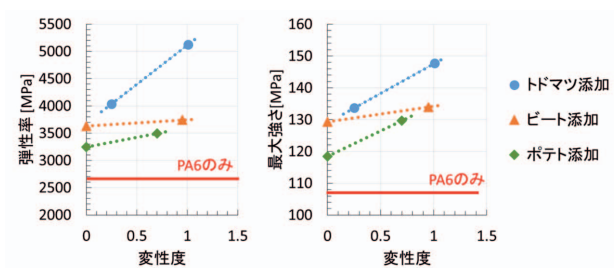


図 15 CNF-PA6 の曲げ特性に変性度が与える影響

影響が見られなかった。これは湿式解繊の際にも示唆されたが、原料によって解繊のしやすさに差異があり、トマトの場合は細胞壁の厚みが厚く解繊がしにくいことが推測されるため、変性の効果が顕著に表れたものと推測される。

3.3.4 界面活性剤の添加による乾燥時の凝集抑制について

前述の検討では変性パルプの乾燥を中断し、固形分量を調整することで凝集を抑制したが、乾式解繊と呼ばれているようにパルプ直接混練法は混練前の原料をハンドリングが容易なドライな状態で取り扱えることが一つのメリットである。そこで、乾燥による凝集を抑制する手段の一つとして、界面活性剤の添加について検討を行った。乾燥による凝集はセルロース分子間の水素結合により引き起こされるもので、セルロース表面に界面活性剤が存在することで水素結合による凝集の抑制が期待される。界面活性剤についてはカチオン界面活性剤である第4級アンモニウム塩（コータミン60W、花王㈱）を用いた。変性後、イソプロパノールで洗浄中に界面活性剤を加え、攪拌し、固形分量を77%程度となるあたりで乾燥を中断し、得られた界面活性剤添加変性ビートパルプを PA6 と複合化した。

得られた CNF-PA6 の曲げ特性を評価した結果を図16に示した。界面活性剤を添加したのものについては固形分量が高いにも関わらず固形分量が低い CNF-PA6 よりも良好な物性を示しており、界面活性剤の添加が乾燥によるパルプの凝集抑制に有効であることがわかった。紙の平衡水分量は4~6%と言われており、それと比べると固形分量が77%でも水分量は多いが、水がボタボタと垂れ落ちるような状態でもなく、

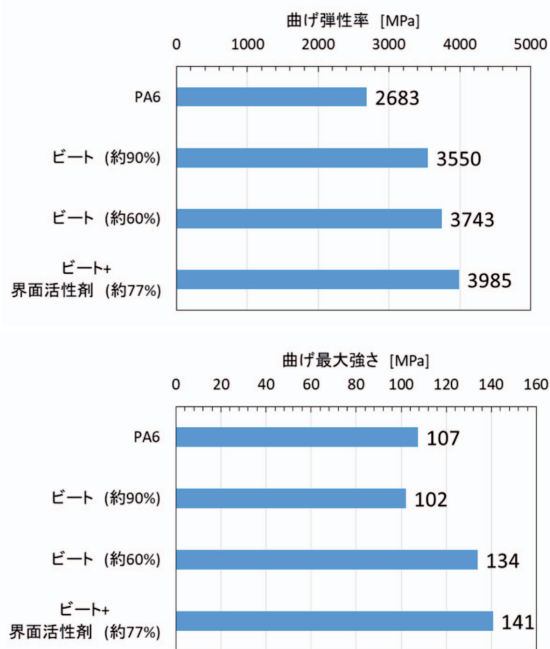


図 16 界面活性剤を添加したビート由来 CNF-PA6 の機械的特性 (括弧内の数字はパルプの固形分量)

触った感じも少し湿ったような感じで、乾燥した粉体に近いような取り扱いが可能であった。したがって、ビートパルプやポテトパルプのような乾燥により樹脂中の混練で分散が不十分となる凝集が発生する原料においても凝集を抑制する処理を加えることでパルプ直接混練法を十分活用できると考える。

3.3.5 乾式解繊により作製したBNFの特性評価まとめ

パルプ直接混練法により各原料由来CNF-PA6を作製し、各原料における強化樹脂の機械的特性（引張、曲げ）を評価したところ、最大強さ・弾性率についてトドマツ>ビート≧ポテトの傾向となることがわかった。このことより樹脂の補強性についても原料による差異があることが明らかとなった。

さらに変性度の異なるパルプから作製したCNF-PA6の評価から原料によって変性度の依存性が異なり、ビートやポテトの場合はトドマツほど変性度の影響が少ないことがわかった。

ビートパルプやポテトパルプの場合は乾燥すると凝集して樹脂中での解繊が困難になるが、ハンドリング性の観点からなるべく乾燥した状態で取り扱えるように検討を行った結果、乾燥前に界面活性剤を添加しておくことで、凝集を抑制し、固形分量を高められることがわかった。

4. まとめ

道内各種バイオマス資源を湿式および乾式解繊によりナノファイバー化し、その特性評価を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・道内各種バイオマス資源（トドマツチップ、ビートパルプ、ポテトパルプ、ズワイガニ殻、ハナサキガニ殻）を石臼式磨砕機を用いて湿式解繊した結果、ナノファイバー化が可能であることがわかった。
- ・湿式解繊BNF懸濁液の粘度特性評価の結果、いずれの原料においてもBNF懸濁液に特徴的なチキソトロピー性を有しており、原料によって懸濁液の粘度が大きく異なることがわかった。
- ・湿式解繊BNFシートの引張強度特性評価の結果においても原料によって比強度や比弾性率に違いがあり、原料依存性を示すことがわかった。これらのことから活用する用途の要求特性によって原料の適性があることが示唆された。
- ・パルプ直接混練法によりセルロース系原料由来NF強化樹脂を作製し、各原料における樹脂の補強性を評価したところ、トドマツ>ビート≧ポテトとなった。樹脂の補強性についても原料による差異があることが明らかとなった。
- ・変性度の異なるパルプからセルロース系原料由来NF強

化樹脂を作製し、機械的特性を評価したところ、原料によって変性度の依存性が異なり、ビートやポテトの場合はトドマツほど変性度の影響が少ないことがわかった。

- ・ビートやポテトの場合はパルプを乾燥すると凝集して樹脂中での解繊が困難になるが、ハンドリング性の観点からなるべく乾燥した状態で取り扱えるように検討を行った結果、乾燥前に界面活性剤を添加しておくことで、凝集を抑制し、固形分量を高められることがわかった。

以上のように原料によってナノファイバー特性が異なることがわかり、応用開発には要求特性に応じた原料の選択も重要であることがわかった。しかしながら、ナノファイバーの繊維長・幅分布の直接的な評価方法が確立されていないため、ナノファイバー特性の差異の要因が明らかとなっていない。今後も引き続き評価方法などナノファイバー関連の最新技術動向を注視し、道産バイオマスナノファイバーの実用化に向けた関連技術の開発に努める予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、京都大学生存圏研究所矢野教授を始め研究室の皆様、京都市産業技術研究所の皆様には多大なご協力を頂きました。サンプルの入手にあたりましては多くの道内企業および道内機関の皆様にも多大なご協力を頂きました。

また、本研究で使用した射出成形機、二軸混練押出機は独立行政法人科学技術振興機構の地域産学官共同研究拠点整備事業により、オートグラフAG-100kNXplusは競輪の補助を受けて整備されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 矢野浩之：構造用CNFの現状と将来展望，工業材料，第68巻，第8号，pp.14-16（2020）
- 2) Shinsuke Ifuku and Hiroyuki Saimoto: Chitin nanofibers: preparations, modifications, and applications, *Nanoscale*, 4, pp.3308-3318（2012）
- 3) H.P.S.Abdul Khalil, Y.Davoudpour, *et al.*: Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review, *Carbohydrate Polymers*, 99, pp.649-665（2014）
- 4) Tsuguyuki Saito, Satoshi Kimura, *et al.*: Cellulose Nanofibers Prepared by TEMPO-Mediated Oxidation of Native Cellulose, *Biomacromolecules*, 8(8), pp.2485-2491（2007）
- 5) Hidayah Ariffin, Tengku Arisyah *et al.*: Chapter 2: Synthesis of Cellulose Nanofiber from Oil Palm Biomass by High Pressure Homogenization and

- Wet Disk Milling, Nanocellulose, pp.51-64 (2021)
- 6) Liyuan Zhang, Takuya Tsuzuki and Xungai Wang: Preparation of cellulose nanofiber from softwood pulp by ball milling, Cellulose, 22, pp.1729-1741 (2015)
- 7) 京都大学生存圏研究所 生物機能材料分野 矢野研究室 : http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labm/wp-content/uploads/2015/12/KyodaiG_OriginalMethod_1.pdf
- 8) Aline Czaikoski, Rosiane Lopesda Cunha, Florencia Cecilia Menegalli: Rheological behavior of cellulose nanofibers from cassava peel obtained by combination of chemical and physical processes, Carbohydrate Polymers, 248(15), pp.116744 (2020)
- 9) 仙波 健・西岡聡史・他：セルロースナノファイバー強化熱可塑性樹脂複合材料—高融点樹脂への適用とリサイクル性能—, 成形加工, 第28巻, 第6号, pp.232-235 (2016)

熱湿気同時移動解析による調湿材の設計と鮮度保持技術への応用

森 武士, 執行 達弘, 野村 隆文, 伊庭千恵美*

Simulation-assisted Design of Humidity Control Materials for Long-term Preservation of Perishable Vegetables

Takeshi MORI, Tatsuhiro SHIGYO, Takafumi NOMURA, Chiemi IBA*

抄 録

調湿材は、住環境内の湿度を適切に保つことができる性質を有することから、住宅用の建材として利用されてきた。一方、食料品の貯蔵、美術品や書籍の保管、電子機器や精密機器の維持管理などにも適用できることがわかっている。用途に応じて最適な湿度が異なるため、用途ごとに調湿材の開発（細孔制御など）と、使用条件（使用量、形状、配置など）の最適化が必要である。パラメータの数が非常に多く、膨大な数の試行が必要であり、効率化やコスト削減が求められている。本研究では、「熱湿気同時移動解析」と呼ばれるシミュレーション技術を活用し、調湿材を効率的に設計する手法を提案する。調湿材の新用途の一つであるメロンの鮮度保持を対象とし、貯蔵空間を高湿度に保つために必要な調湿材の設計を行う。

キーワード：MA包装, 調湿材, シミュレーション, 移動現象

Abstract

Humidity control materials (HCMs) are mainly used as indoor wall tiles in houses, due to their performance stabilizing indoor humidity at the ideal level for humans. HCMs can also be used in various application such as preservation of perishable foods, art works and electronic devices. Since the ideal humidity level depends on the type of the target to be preserved, properties of the materials (porosity) and utilization condition (amount, shape, location) should be optimized in each case to realize the ideal humidity. This optimization is a time-consuming process thus challenging since numerous parameters should be considered and optimized. In this work, we propose a simulation-assisted approach for effective optimization of the parameters through the analytical method known as “simultaneous heat and mass transfer analysis”. We focused on preservation of cantaloupes in a packaging system, which is one of emerging applications of HCMs. HCMs which can maintain relative humidity to a high level suitable for cantaloupes were successfully designed.

KEY-WORDS : modified-atmosphere packaging, humidity control material, simulation, transport phenomena

1. はじめに

湿度は、快適な温熱環境、健康、建物の耐久性に大きく影響しており、その制御は非常に重要な技術である¹⁾。空間内の湿度を一定の水準に収まるように調節する技術を「調湿」と呼ぶ。近年、省エネルギー化や導入の容易さから、調湿材と呼ばれる機能性材料を用いた調湿技術が注目されている。調湿材は、空間内の湿度が上昇すると、水蒸気を吸着し、湿

度の上昇を抑制する。一方、空間内の湿度が低下すると、調湿材は蓄えていた水蒸気を放出し、湿度の低下を抑制する。このように、調湿材には空間内の湿度の変動を緩和する効果がある。

住環境の快適化を目的とした住宅用建材（内装材）として、多くの調湿材が上市されている²⁻⁴⁾。調湿材が効果を発揮する用途としては、住環境の快適化のほかにも、食料品（穀物、野菜、果物）の貯蔵、美術品や書籍の保管、電子機器や精密

*京都大学 工学研究科, *Graduate School of Engineering, Kyoto University

事業名：経常研究

課題名：熱湿気同時移動解析を活用した調湿材の開発と使用条件の最適化

機器の維持管理などが挙げられる¹⁾。このように、調湿技術は、様々な用途で利用できるが、それぞれ目標とする湿度の値が大きく異なるため（表1）、使用環境（湿度範囲、使用温度など）に合わせた調湿材の開発（細孔制御など）と使用条件（使用量、形状、配置など）の最適化が求められている。パラメータの数が非常に多いため、調湿材の開発、使用条件の最適化には膨大な数の試行が必要であり、効率化やコスト削減が課題となっている（図1）。

表1 調湿材の用途

分野	用途	目標とする湿度
機械	精密機械加工工場	<60%
	電子機器	30-60%
農業	野菜倉庫	65-95%
	果物倉庫	85-90%

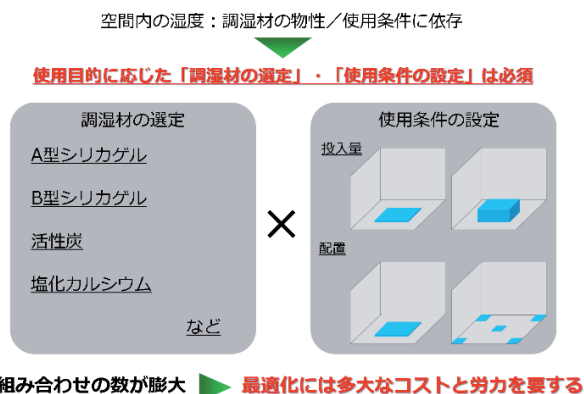


図1 調湿材の使用環境と条件の最適化

銚井らは、多孔質材料内の温度分布、湿度分布を計算するための基礎式を提案している⁵⁾。調湿材の材質や使用条件が与えられれば、湿度分布を計算で予測できる。実験に先立ち、調湿材の材質や使用条件を予め最適化できれば、実験での試行回数を減らすことができ、調湿材の開発と使用条件の最適化を効率よく行うことができる。本研究では、このシミュレーション技術を「熱湿気同時移動解析」と呼称する。

本研究では、調湿材の用途の一つである、青果物の鮮度保持技術に利用可能な調湿材を設計する。青果物の鮮度保持技術の一つに、MA (Modified Atmosphere) 包装技術がある。青果物をガスバリア性の保存袋 (MA包装) の中で貯蔵すると、自身の呼吸により発生する炭酸ガスが袋の中に貯まり、その濃度は約10%まで上昇する⁶⁾。この条件では、青果物の呼吸速度が低下する。呼吸は青果物の養分である糖を分解する化学反応であるため、これを抑制することで青果物の品質が低下しにくくなり、消費期限が延びる。MA包装技術により様々な青果物の消費期限を延ばすことができるが、蒸散量 (水蒸気発生量) の多い青果物の消費期限を延ばすのは困難である⁷⁾。蒸散量の多い青果物には、商品単価が高いメロンや、大量に消費される葉物野菜などがあり、これらの長

期貯蔵技術には必要がある。蒸散量の多い青果物を貯蔵しようとすると、袋の内部で結露が発生する。結露はカビ・細菌の発生原因となるため、相対湿度を極端に高くしないことが重要である。一方、相対湿度が低い場合、青果物からの水分の放出 (蒸散) が促進され、水分を失う。重量減少や萎れなどが起こり、商品価値が低下するため、相対湿度を低くし過ぎないことも重要である。これらの理由から、多くの青果物にとって理想的な相対湿度は概ね85-95%である。本研究では、メロンの鮮度保持を対象に、熱湿気同時移動解析を活用し、MA包装内の湿度を85-95%に保つための調湿材の材料設計を行う。

2. シミュレーションに必要な物性値の測定

銚井らが提唱した基礎式をもとに数値解析を行うことで、調湿材内の温度分布と湿度分布を計算できる。伊庭らは、上記の基礎式を活用し、空間内の温湿度履歴を予測するシミュレーション技術を開発した⁸⁾。空間内の温湿度が均一であるという仮定を置いている。本課題で実施したシミュレーションでは、静止空気も材料の一つとみなし、多孔質材料に関する計算方法を応用することで、空間内の温湿度分布も併せて計算した (表2)。計算には調湿材の平衡含水率、湿気伝導率、熱伝導率、かさ密度が必要であり、本項ではこれらの測定方法とその結果を記載する。

2.1 調湿材 (メソポーラスシリカ) の合成

調湿材には、水ガラスから合成できるメソポーラスシリカを使用した⁹⁾。水ガラス、蒸留水、濃硫酸を混合し、常温で安置してシリカ湿潤ゲルを調製した。この湿潤ゲルが入ったテフロン容器をオートクレーブで密閉し、180℃で3h加熱処理した。その後、110℃で一晩乾燥させてから粉砕し、メソポーラスシリカ粉末を得た。湿気伝導率、熱伝導率、かさ密度の測定を行うためには、メソポーラスシリカ粉末をタイル状に成形する必要がある。そこで、メソポーラスシリカ粉末をメチルセルローズ粉末と混合し、加水してスラリーを作成した後、一軸成形機でタイル状に成形した。その後、得られた成形体を常温で乾燥し、タイル状の調湿材を得た。

メソポーラスシリカの平衡含水率 $w(\phi)$ は、各相対湿度 ϕ における水蒸気吸着量の関数 (水蒸気吸着等温線) であることから、自動蒸気吸着量測定装置 (N-V P, マイクロトラック・ベル株式会社) を用いて測定した。各相対湿度における平衡含水率の値は表3の通りである。

メソポーラスシリカ成形体の湿気伝導率 $\lambda'(\phi)$ は、調湿材内の相対湿度に対する水蒸気透過速度の関数である。成形体の片面が高湿度の空間、もう片面が低湿度の空気と接している際に、水蒸気は前者から成形体内を經由して後者に拡散する。この拡散速度をカップ法で測定した¹⁰⁾。湿気伝導率の測

定結果は表4の通りである。

メソポーラスシリカ成形体の熱伝導率は、迅速熱伝導率計（京都電子工業株式会社、Kemtherm QTM-D3）を用いて測定した。熱伝導率は $0.16 \pm 0.01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ と測定された。かさ密度は、成形体の寸法・重量から算出した。かさ密度の値は $565 \pm 30 \text{ kg m}^{-3}$ であった。

表2 熱湿気同時移動解析に用いた非定常拡散方程式と非定常熱伝導方程式

材料内の 拡散方程式	$(\phi\rho_a + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} = \lambda' \nabla^2 X + v \frac{\partial X}{\partial t}$	(1)
材料内の 熱伝導 方程式	$(c_m \rho_m + H_{gl} v) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + H_{gl} \kappa \frac{\partial X}{\partial t}$	(2)
空間の 拡散方程式	$\rho_a \frac{\partial X}{\partial t} = D_w \nabla^2 X$	(3)
空間の 熱伝導方程式	$c_{p,a} \rho_a \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_a \nabla^2 T$	(4)
吸放湿 特性関数 $\kappa(\phi)$	$\kappa = \frac{1}{X_s} \frac{\partial w}{\partial \phi}$ (絶対湿度変化に対する含水率変化率)	(5)
吸放湿 特性関数 $v(\phi)$	$v = -\kappa \phi \frac{dX_s}{dT}$ (温度変化に対する含水率変化率)	(6)

ϕ : 材料の空隙率 [-], ρ_a : 空気密度 [kg m^{-3}], λ' : 湿気伝導率 [$\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} (\text{kg kg}^{-1})^{-1}$], c_m : 材料の比熱 [$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$], ρ_m : 材料の密度 [kg m^{-3}], H_{gl} : 水の蒸発潜熱 [J kg^{-1}], λ : 材料の熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$], D_w : 水蒸気の拡散係数(空気中) [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$], λ_a : 空気の熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$], X : 材料内または空間の絶対湿度 [kg kg^{-1}], T : 材料内または空間の温度 [K], ϕ : 相対湿度 [-]

表3 メソポーラスシリカの平衡含水率

相対湿度 ϕ [-]	平衡含水率 $w(\phi)$ [$\text{cm}^3 (\text{STP}) \text{ g}^{-1}$]
0.10	25.4
0.29	49.8
0.52	90.4
0.69	178
0.91	719

表4 メソポーラスシリカの湿気伝導率

相対湿度 ϕ [-]	湿気伝導率 $\lambda(\phi)$ [$\text{ng m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$]
0.30	13.9
0.60	16.6
0.90	38.4

2.2 調湿材A, B, Cの合成

調湿材A, B, Cは炭素系の調湿材である。調湿材A, Bは熱硬化性樹脂由来の多孔質炭素材料である。調湿材Aはマイクロ孔のみを有している。調湿材Bはマイクロ孔とメソ孔の階層構造を有している。調湿材Cは、マイクロ孔のみを有するバイオマス由来の多孔質炭素材料である。タイルへの成形、各種物性値（平衡含水率曲線、湿気伝導率、熱伝導率、かさ密

度）の測定は、調湿材（メソポーラスシリカ）と同様の方法で行った。

3. 熱湿気同時移動解析による吸放湿性試験のシミュレーション

MA包装資材内のシミュレーションに先立ち、本項では比較的単純な系である住宅建材用調湿材の吸放湿性試験（温度応答法、JIS1740-2）を対象として、シミュレーション技術の有効性を検証した。

3.1 吸放湿性試験の概要と実験結果

温度応答法は、温度が周期的に変化する空間内に調湿材を入れ、相対湿度の変化をどの程度抑制できるかを測定する試験である¹¹⁾。相対湿度は、空気中の水蒸気の量（絶対湿度）だけでなく、温度によっても変動する。今回は、図2に示す実験装置を用いて吸放湿性試験を行った。温湿度センサーは、密閉箱の上面の中心点から、垂直下方向に15cm離れた位置に固定した。図3に、調湿材がある場合と調湿材がない場合の密閉箱内の相対湿度変化を示す。温度の変化に伴い、相対湿度も周期的に変化し、35-75%の間の値で変化した。調湿材を入れた場合も、同様に相対湿度の周期的な変化が見られたが、相対湿度の変動が抑えられていた。相対湿度の最大値は75%から70%に低下し、相対湿度の最小値は35%から37%まで上昇した。

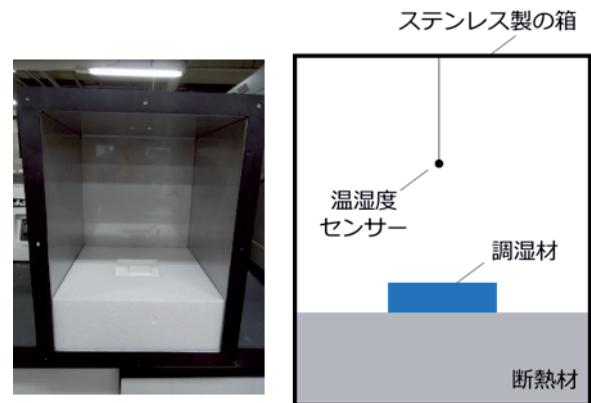


図2 吸放湿性試験に用いた実験装置

3.2 熱湿気同時移動解析による吸放湿性試験の再現

調湿材を入れた場合の相対湿度の変化を、熱湿気同時移動解析で再現した。熱湿気同時移動解析に用いるプログラムは、既報の内容を参考に、FORTRANで作成した⁸⁾。計算の流れは次の通りである。最初に、計算に必要な物性値（平衡含水率、湿気伝導率など）を入力する。次に、計算対象となる空間を微細な空間（コントロールボリューム, CV）に分割する。式(1)~(4)を前進差分により離散化し、これらの式を用いて各CVにおける温湿度の時間変化を計算する（陽解法）。

本節では、容器の底面に対して垂直な方向（z軸）について、一次元の温湿度分布を計算した。計算結果を図4に示す。なお、調湿材の側面はアルミテープで断湿している。計算結果では、湿度の最小値が36%（ $t=1.8$ [h]）であり、実験値（35%）と概ね一致している。一方、湿度の最大値は69%（ $t=4.0$ [h]）であり、実験値（75%）よりも若干低い値となっている。また、相対湿度が最小、最大を迎える時間が、計算値と比べて0.5h程度早くなっている。計算プログラムの物性値として平衡含水率曲線を用いているが、この測定は相対湿度を徐々に上昇させながら測定した曲線であり、「吸着枝」と呼ばれている。ここから相対湿度を低下させて測定される平衡含水率曲線（脱着枝）は、吸着枝とは異なる挙動を示す場合がある。今回の検討では、プログラムを簡素化し計算時間を短縮するため、吸着枝のみを用いた計算を行った。これが実験値と計算値の差に繋がっている可能性がある。しかし、実験値の湿度の周期的な変化、および湿度の最大値・

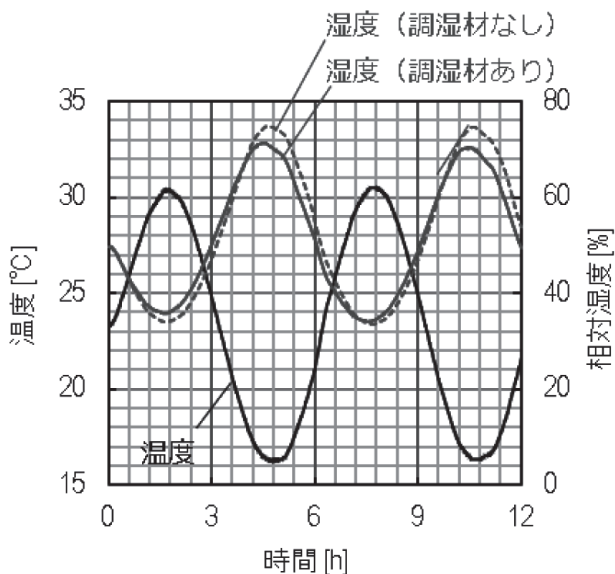


図3 密閉箱内の温度変化と相対湿度変化（実験値、調湿材ありの場合と調湿材なしの場合を併記）

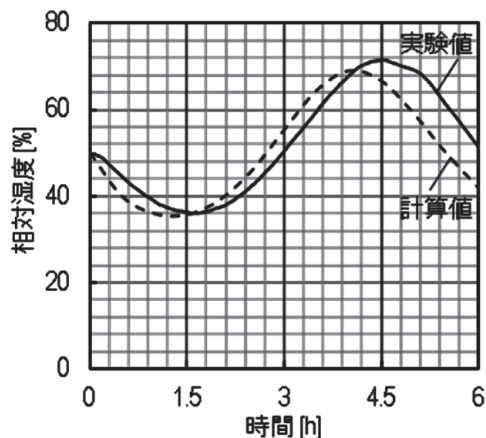


図4 密閉箱内の相対湿度変化（計算値、調湿材ありの場合のみを記載）

最小値は概ね計算により再現できている。以上より、開発したプログラムは、空間内の湿度を概算するには有用であることが判明した。このプログラムを用い、次章ではMA包装内の湿度変化の予測を行う。

4. 熱湿気同時移動解析による鮮度保持用調湿材の材料設計

近年、北海道産の農産物は安全・安心で高品質であることが認知されており、アジア圏をはじめ国外への輸出額が増加している。青果物を輸送する際には、青果物をMA包装資材に入れて輸送する。輸送時には冷蔵機能付きの輸送機への荷積み・荷下ろしを伴うため、資材内の温度は急激に変化する。特に、温度が急激に低下する場合は、カビの発生要因である結露が発生する場合があり、その対策が課題であった。そこで、本章では、熱湿気同時移動解析により、青果物の入った包装資材を急冷した場合における、資材内の湿度変化をシミュレーションにより予測した。

シミュレーションは、蒸散量の多い青果物であるメロンを対象として行った。具体的には、段ボール箱の中にMA包装資材があり、その中に4玉のメロンを貯蔵する系を想定した（図5）。調湿材は、箱内の中心部に配置した。これを25℃から3℃まで急冷した際の包装資材内の湿度分布を計算した。対称性を考慮すると、図5の点線で示す領域（全体の四分の一）のみの計算を行うことで、系全体の湿度分布を計算することができる。そのため、この領域のみについて、二次元（高さ10cm）で湿度分布の計算を行った。なお、メロンからの水蒸気発生速度は、物質移動係数（ $1.48\mu\text{g}^{-1}\text{m}^{-2}\text{Pa}^{-1}$ と仮定）に水蒸気分圧差とメロンの表面積を乗じて計算した。

化学組成、多孔質構造の異なる3種類の調湿材（調湿材A, B, C）を対象として、いずれの調湿材がメロンの貯蔵に最適であるかを検討した。なお、これらの調湿材は、図6に示すような異なる平衡含水率曲線を持つ。貯蔵試験開始から10h後のMA包装資材内の相対湿度分布を図7に示す。調湿材A, Bについては、調湿材近傍の空間の湿度が80%以下になっていることがわかる。

この要因として、調湿材A, Bは低い相対湿度でも水蒸気を吸着することが挙げられる。図6の平衡含水率曲線では、相対湿度0.4-0.6において、急激な水蒸気吸着量の立ち上がりが見られる。これは、相対湿度が40-60%以上になると、水蒸気を吸着し始めるということである。メロンの貯蔵に適した相対湿度は85-95%であるため、この湿度はメロンにとって過乾燥であると言える。調湿材A, Bを使うと、メロン表面のうち調湿材に近い領域では乾燥が起こり、商品価値に影響を及ぼす可能性が示唆される。一方、調湿材Cの場合は、調湿材内部の湿度が低い値（80%以下）となっているのに対し、メロン近傍の相対湿度は85%程度に保たれている（図7）。

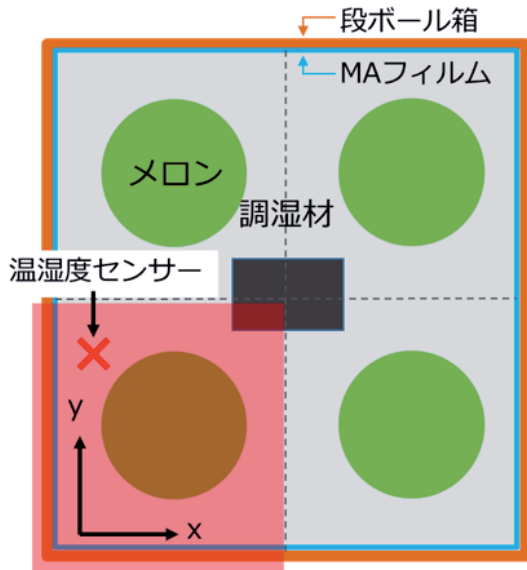


図5 計算時に想定したMA包装資材の系

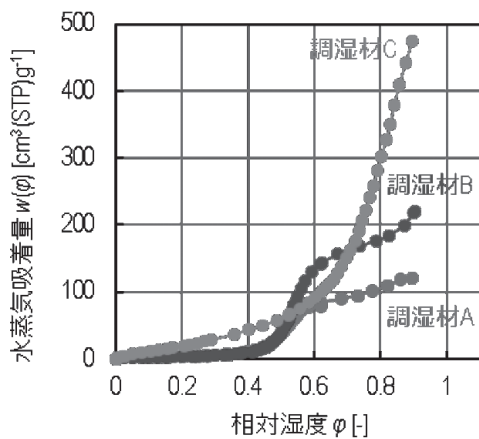
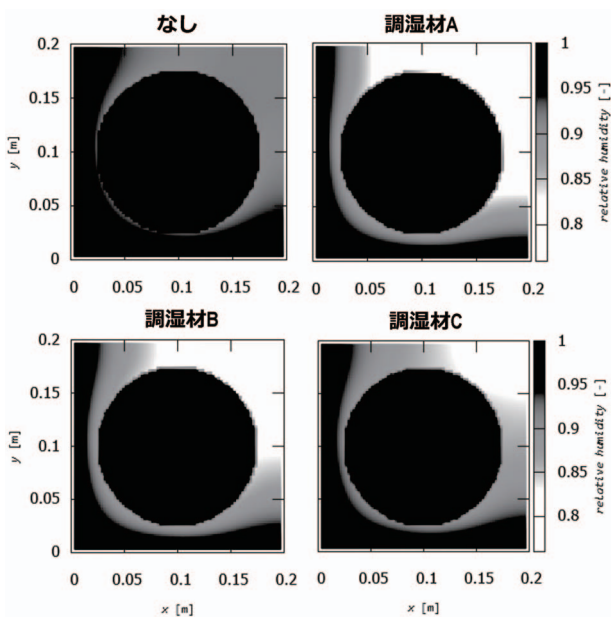


図6 調湿材 A, B, C の平衡含水率曲線



調湿材 A, B と比較し、調湿材 C はより高い相対湿度で水蒸気を吸着する性質をもつ (図 6)。そのため、包装内の湿度を過剰に低下させることはなく、メロンにとって適切な値に保つことができたと考えられる。以上の結果より、調湿材 C のような平衡含水率曲線をもつ材料が、メロンの貯蔵に有効であるということがわかった。

次に、調湿材 C を用いたメロンの貯蔵試験を行い、MA 包装内の相対湿度を実測した。相対湿度の測定は、図 5 に示す通り定点 ($x=2.5[\text{cm}]$, $y=17.5[\text{cm}]$) で行った。その結果、相対湿度は試験開始直後から急激に上昇した後、ほぼ一定の値 (92%) に収束し、シミュレーションの結果とほとんど一致していた。以上の実測結果から、シミュレーションにより、実験結果を正しく再現できていることが確認され、本手法による材料設計が妥当であることが示された。

5. おわりに

本研究では、調湿材の効果を予測する熱湿気同時移動解析を用い、MA 包装資材内の相対湿度を予測できるシミュレーション技術を開発した。これを活用し、鮮度保持に利用可能な調湿材の設計を行った。

最初に、調湿材の物性値の測定と住環境の系を対象としたシミュレーションを行い、空間内の湿度の経時変化を予測した。次に、この手法を MA 包装資材の系に適用し、メロンの貯蔵に最適な調湿材の選定を行った。計算結果は実測値と一致し、本手法の妥当性が確認された。今後の課題としては、シミュレーションの計算速度・精度の向上が挙げられる。調湿材に関する物性値のデータベースの蓄積や計算手法の変更などにより、改善を図る予定である。

調湿材は、建築・農業・機械分野など、様々な分野で活用されていることから、シミュレーションによる材料設計・使用条件の予測は汎用性の高い技術である。当场には、調湿材に関して多方面から技術相談が寄せられている。本研究で得られた知見を活用し、より効率的な材料開発方法を提案することで、道内製造業の生産性の向上に寄与できれば幸甚である。

謝辞

本研究で使用した自動蒸気吸着量測定装置は、競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 鈴木修一, 池田哲朗, 新田勝通著: 建築環境工学 II — 熱・湿気・換気—, 朝倉書店, pp.74 (2002)
- 2) 北海道・鈴木産業株式会社, 稚内層珪藻土を利用した調

湿機能材料の製造法，特許第2652593号，1997-09-10

- 3) 株式会社INAX・独立行政法人産業技術総合研究所・芝崎靖雄，調湿建材及びその製造方法，特許第3368278号，2003-01-20
- 4) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構・株式会社加賀谷ブリック，調湿内装材の製造方法，特許第5070529号，2012-11-14
- 5) 銚井修一，湿った建築壁体の熱的特性に関する基礎的研究，京都大学（博士論文），pp.8（1986）
- 6) *L.G.M Gorris, H.W.Peppelenbos: Handbook of Food Preservation, CRC Press, pp.318 (2007)*
- 7) 執行達弘，野村隆文，森 武士，吉田憲司，橋本祐二：札幌軟石を用いた高湿度域調湿材料の開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告，Vol.317，pp.83(2018)
- 8) 伊庭千恵美，吉野利幸，高倉政寛：高い吸放湿性を有する材料を用いた室内調湿の設計手法に関する研究，北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所 調査研究報告，No.316，pp.9（2012）
- 9) *T. Mori, T. Shigyo, T. NomuraI, S. R. Mukai: Synthesis of Humidity Control Materials with a Hierarchical Pore System of Meso- and Macropores, The 8th Pacific Basin Conference on Adsorption Science and Technology, PD-6 (2018)*
- 10) JIS A 1324 建築材料の透湿性測定方法
- 11) JIS A 1470-2 建築材料の吸放湿性試験方法-第2部：温度応答法

レーザー部分熱処理によるダイカスト金型の長寿命化技術の開発

櫻庭 洋平, 戸羽 篤也, 鶴谷 知洋, 鈴木 逸人, 三戸 正道, 宮腰 康樹, 板橋 孝至,
中嶋 快雄, 飯野 潔, 高田 公一*, 高橋 保行**, 斉藤 倫正**, 大津 直史***,
長船 康裕****

Development of the Life Extension Technology for Die-casting Mold by Laser Local Heat Treatment

Yohei SAKURABA, Atsuya TOBA, Tomohiro TSURUYA,
Hayato SUZUKI, Masamichi MITO, Yasuki MIYAKOSHI,
Koji ITABASHI, Yoshio NAKAJIMA, Kiyoshi IINO,
Koichi TAKADA*, Yasuyuki TAKAHASHI**, Noritaka SAITOH**,
Naofumi OHTSU***, Yasuhiro OSAFUNE****

抄 録

ダイカスト casting は、寸法精度の高いアルミニウム部品などの量産に適した精密 casting 法であり、北海道内では多くの自動車用アルミダイカスト部品が生産されている。しかし、道内工場で使用されるダイカスト金型の大半は道外で製作・補修されており、補修に伴う輸送コストや時間ロスがダイカストメーカーにとって負担となっている。

本研究では、溶接補修したダイカスト金型の耐久性低下を改善するため、溶接補修部のみをレーザーで改質する部分熱処理技術を開発した。溶接補修した金型材料をレーザー照射し、溶接による熱影響部の硬さを母材と同水準に回復する条件を明らかにした。また、凹凸形状の溶接補修部にレーザーを照射し、凹部ではレーザー出力を増加させ、凸部では減少させる必要があることを明らかにした。さらに、溶接補修のみの金型とレーザー熱処理を加えた溶接補修金型についてヒートチェック発生までのショット数を比較した結果、ショット数が約60%増加した。

キーワード：ダイカスト金型, ヒートチェック, レーザー熱処理, 熱影響部, 金型形状, 長寿命化

Abstract

Die-casting is the precision casting method suitable for the mass productions such as aluminum parts having high dimensional accuracy, and many aluminum die-casting parts for automotive are produced in Hokkaido. However, Die-casting factories in Hokkaido are burdened with transportation cost and time loss of the repaired die, because most of die-casting molds are produced and repaired the outside of Hokkaido.

In this study, we developed laser local heat treatment technology, that are used for only the welding repaired part, to improve the durability of welding repaired mold. Laser irradiation are used for welding repaired material, and discovered the condition to revive the hardness of heat affected zone by welding, to the same level of base material. Laser irradiation are used for the part of irregularities shape, and discovered the necessity to adjust the laser power, such as, increased to concave region and decreased to convex region. Number of shots are compared, between the mold applied laser local heat treatment and only for welding repaired, and increased the number of shots about 60%

KEY-WORDS : Die-casting Mold, Heat Check, Laser Heat Treatment, Heat Affected Zone, Shape of Die, Life Extension

* ホクダイ 株式会社 Hokudai Co.Ltd. ** 苫小牧市テクノセンター Tomakomai Industrial Technology Center

*** 北見工業大学 Kitami Institute of Technology **** 室蘭工業大学 Muroran Institute of Technology

事業名：重点研究

課題名：レーザー加工を利用した自動車部品用金型の長寿命化技術の開発

1. はじめに

ダイカスト鋳造法は、金型に溶融したアルミニウム合金や亜鉛合金を加圧注入し、短時間で凝固させて製品を鋳造する精密鋳造法のひとつである。この鋳造法は砂型鋳造などと比べ寸法精度が高く、また金型から製品を取り外した後すぐに次の製品を鋳造できることから大量生産にも適している。北海道内では、1990年前後からバルブボディ、ウォーターポンプボディ、トランスミッション筐体など、自動車用アルミダイカスト部品の製造工場が道内に進出している。特に2011年の東日本大震災以降は、部品供給のリスク分散の観点から既存工場の設備増強や関連企業の進出が進み、現在では国内の主要な生産拠点となっている。しかし、道内の工場で使用されるダイカスト金型は、大半が道外で製作されており¹⁾、損傷時の補修作業についても道内の金型関連メーカーで対応できない工程や処理が多いため、未だに道外への依存度が高い。これにより、補修する金型の輸送コストや時間ロスの発生が、道内のダイカストメーカーにとって負担となっている。その一方で、道内の金型関連メーカーにおいては金型補修業務の受注拡大に対する期待が高まっており、ユーザ側のダイカストメーカーと金型関連メーカーの双方から地元企業による金型補修技術の強化が求められている。

ダイカスト鋳造では、金型の表面にヒートチェックと呼ばれる微細な割れが発生し(図1)、製品の寸法精度が維持できなくなるため、溶接による定期的な補修が必要となる。しかし、補修した箇所は金型によっては新作時の1/10以下のショット数で再び損傷するため、耐久性の向上が求められている。

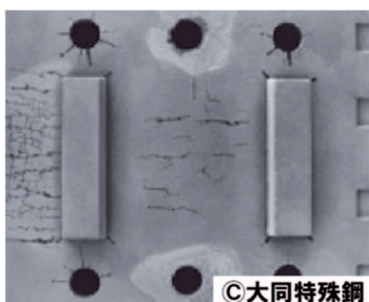


図1 ダイカスト金型のヒートチェック²⁾

本研究では、補修したダイカスト金型で課題となっている溶接補修部の耐久性低下を改善するため、金型全体への入熱を最小限に抑えながら、耐久性低下の原因となる溶接補修部のみの材料組織を改質するレーザー部分熱処理技術を開発し、従来の溶接補修のみの材料と耐久性を比較した。また、レーザー部分熱処理を実製品の金型に適用し、従来の溶接補修金型とヒートチェック発生までのショット数を比較した。

2. ダイカスト金型のレーザ部分熱処理

2.1 ダイカスト金型の損傷形態と補修の現状

図2に、ダイカスト鋳造の製造サイクルを示す。アルミニウム合金のダイカスト鋳造(以下アルミダイカスト)の場合、650℃以上の溶融金属が金型の表面に接し、凝固するまで数10秒から数分程度保持した後に製品を取り出し、離型剤を塗布して再び次の溶融金属が供給される。離型剤を塗布した時に、金型の表面温度が150℃前後まで低下することから、金型の表面は数10秒間隔で500℃前後の急激な温度変化に晒される³⁾。

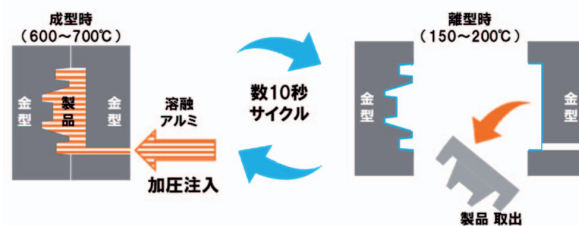


図2 ダイカスト鋳造の製造サイクル

この温度変化によって金型の表面にヒートチェックが生じ、製品ショットを繰り返すうちに割れが徐々に拡大していく。金型の割れは製品側に転写されるため、割れが拡大すると面粗さや寸法精度が低下し、ヒートチェックが繋がって金型が欠損(大割れ)するなど、製品不良の原因となる。

損傷した金型は、損傷箇所を切削で除去した後、金型本体(以下母材)と同系統の溶加材を肉盛溶接し、切削や研磨仕上げを経て元の形状に戻される。しかしながら、溶接補修した箇所では金型の新作時に施した熱処理や、窒化処理・コーティング処理などの表面改質層が失われるため、新作時と比べて耐久性が大幅に低下し、短時間で再び損傷が発生する(図3)。このため、金型が使用不能となるまでに、多いもので20回前後の溶接補修が必要となる。

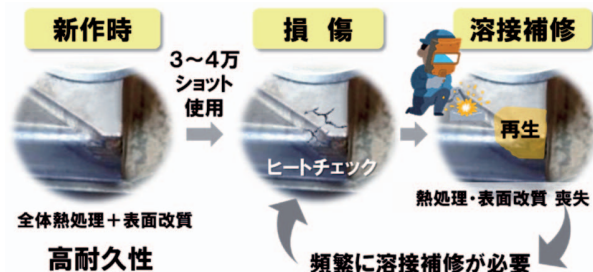


図3 金型の溶接補修サイクル

溶接補修部の耐久性を新作金型と同水準まで回復させるには、一旦金型全体を焼鈍して熱処理前の材料組織に戻し、改めて熱処理や表面改質を施すのが理想的である。しかしこの方法は、焼鈍や再熱処理の際に金型が変形するため溶接補修

前の寸法精度が維持できず、加えて新作時と同等以上の加工コストや加工時間が必要になることから、現場では殆ど行われていない。このため、現場では個々の金型毎に新作コストと溶接補修を繰り返すコストとの折り合いをつけ、溶接補修と廃棄を選択しているのが現状である。

2.2 溶接補修後の金型組織

肉盛溶接したダイカスト金型材料の肉盛溶接部から母材にかけて、溶接補修部の表面から測定した硬さ分布を図4に、各部の断面組織の写真を図5に示す。

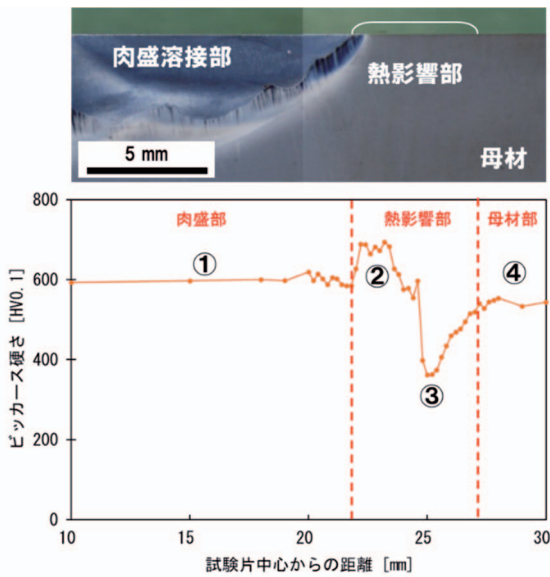


図4 溶接補修部の断面と硬さ分布の関係

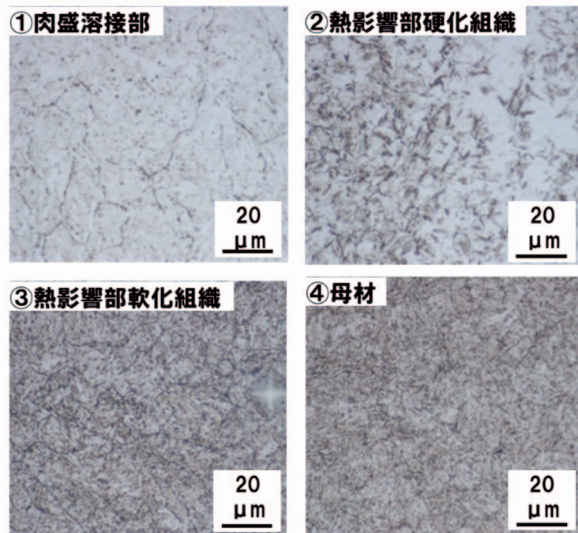


図5 溶接補修部各部の断面組織

図4①の溶加材を肉盛溶接した領域（以下肉盛溶接部）では、材料組成や熱処理状態が母材と異なるため、必然的に硬さや金属組織も異なったものとなる。次に、②③の熱影響部では、材料組成は母材と同じだが、肉盛溶接部に近づくほど④の母材に比べて組織が不均一となり、肉盛溶接部に近い部

分（以下硬化領域）では母材と比べビッカース硬さで100HV以上硬化し、母材寄りの部分（以下軟化領域）では200HV近く軟化していた。硬さ分布が大きく変化する熱影響部は熱応力の影響を受けやすくなり、また硬さの低い材料ほどヒートチェックの発生や割れの進展が早いことが既往の研究で報告されている⁴⁾。このため、硬さ分布の不均一さを低減することが耐久性改善に効果的と考えられる。

2.3 レーザ熱処理

レーザー熱処理は、熱源にレンズ等で収束させたレーザー光を利用する部分熱処理手法のひとつである。レーザー熱処理の長所として、高周波焼入や炎焼入などの既存の部分熱処理手法と比べ加熱領域を小さくできることや、レーザーの出力調整で入熱量を任意に制御可能なことが挙げられる。これにより、切削工具の刃先やギア歯面、プレス金型のエッジ部分の焼入など、硬さや耐摩耗性が必要な小領域のみを改質する場合に利用されている⁵⁾（図6）。

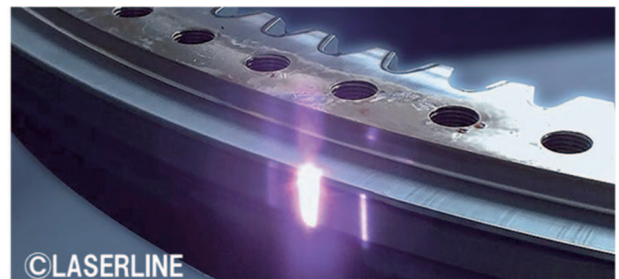


図6 レーザ熱処理の実用例（ギア軌道部）⁶⁾

3. 実験目的・実験方法

図4に示したように、溶接補修部は複雑な硬さ分布を示すことから、どの材料組織をどのような条件でレーザー照射するか判断が重要となる。また、溶接補修部は性質の異なる材料組織が連続しているため、レーザーの熱影響でひとつの組織が最適化されても、隣接する組織の性状が悪化することも考えられる。このため、熱処理条件は個々の組織だけでなく、母材を含む他の組織への熱影響も考慮する必要がある。

さらに、レーザー熱処理による組織変化は、加熱部の形状や熱容量によっても異なってくるため、平坦面と同等の硬さ分布を得るためには、レーザー出力などの照射条件を形状に応じて適切に補正する必要がある。

このため本研究では、平坦面の溶接補修部の硬さ分布を改善する、基準となるレーザー熱処理条件を検討し、その後凹凸形状を設けた箇所でも平坦面と同様の硬さ分布が得られるレーザー熱処理条件を検討した。また、レーザー熱処理によるヒートチェック耐性を確認するため、溶接補修部に実際のダイカスト金型と同様の加熱・冷却サイクルを加え、割れが生じるまでの耐久性を比較した。

3.1 溶接補修部のレーザー熱処理条件の検討

溶接補修部の基準となるレーザー熱処理条件を探るため、本研究では溶接補修した金型鋼の平板上にレーザー出力、走査速度、照射回数を変えてレーザーを照射し、試験片表面の硬さ分布や断面組織を比較して、目標とする硬さ分布が得られる照射条件を検討した(図7)。

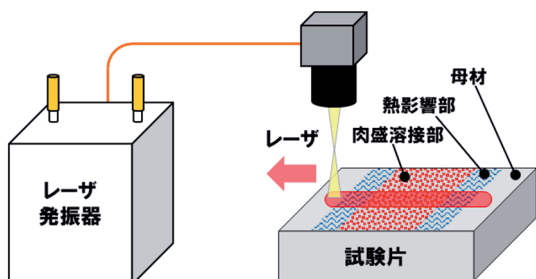


図7 レーザー熱処理実験の概要図

試験片は、図8のように80×70×20mmの金型鋼母材の上に深さ3mmの溝を作り、そこに溶加材を肉盛溶接したものを用意した。試験片の表面を平面研削盤で仕上げた後、母材から肉盛溶接部にかけて直線状にレーザーを照射した。レーザーはファイバーレーザー(IPG Photonics, YSL-2000, λ=1,070nm)を使用し、硬さ分布はビッカース硬さ計(株)マツザワ, MMT-X3)で測定した。試験片の材料は、母材には大同特殊鋼(株)のSKD61改良鋼DH31-Sを使用し、溶加材には熱間加工工具用の溶接材DIN 8555 WSG 3-GZ-45-Tを使用した。材料組成は表1のとおりで、母材には実際のダイカスト金型と同様の熱処理(焼入焼戻, 硬さ550~600HV)を加えた。肉盛溶接の溶接条件は表2のとおりとした。

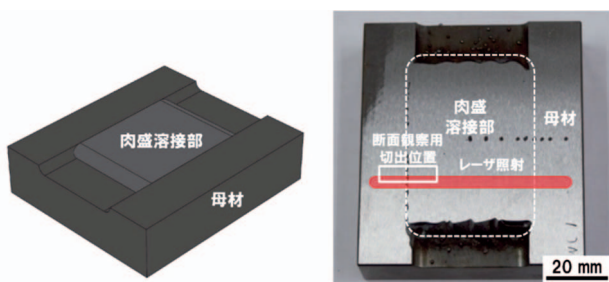


図8 金型鋼試験片

表1 金型母材と溶加材の材料組成

溶接材料	化学成分 (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	V
金型母材	0.33	0.3	0.6	0.07	—	0.04	0.08	5.5	2.9	—	0.8
溶加材	0.25	0.5	0.7	—	—	—	—	5.0	4.0	0.6	—

表2 試験片の肉盛溶接条件

溶接方法	MAG溶接	※ 走行台車による自動溶接
予熱条件		350℃
溶接条件	パス間温度	200~300℃
後熱条件		350~400℃・1時間保持

レーザー照射条件は、レーザー光の焦点直径をφ4.0mmに固定し、レーザー出力と走査速度は予備実験で硬さの変化が発生した200W, 1.0mm/sとした。レーザーの照射回数は1~3回とし、同じ位置に重ねて照射したが、3回照射については試験片が溶融し、熱処理としては不良となったため対象から除外した。

断面組織の比較は、レーザー照射した位置を照射方向に沿って切断し、断面を1μmまでバフ研磨した後ナイトル液でエッチングし、実体顕微鏡(オリンパス(株), SZX16)及び金属顕微鏡(オリンパス(株), GX71)で観察した。また、硬さ変化の原因を探るため、EPMA(日本電子(株), JXA-8100)による組成分析を行った。

レーザー熱処理の良否は各組織の硬さから判定した。母材から肉盛溶接部の硬さを、図9の帯状に示す500~600HVの範囲に納めることとし、①硬さ変化による熱応力の集中を緩和することと、②ヒートチェックの発生リスクが高い軟化領域を解消することを目指した。

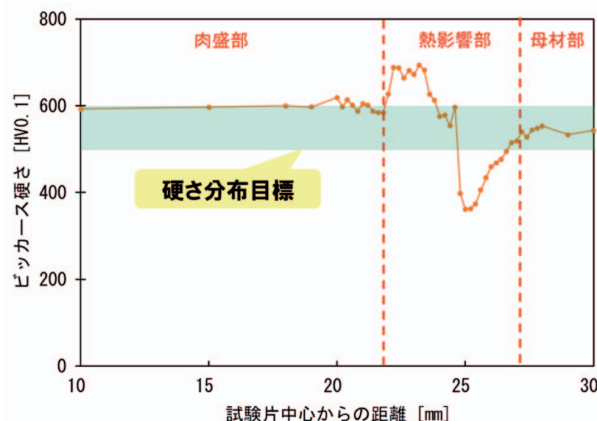


図9 硬さ分布の目標イメージ

3.2 金型形状を考慮したレーザー熱処理条件の検討

レーザー熱処理を加える部分の、形状や熱容量による温度履歴の変化に対応する熱処理条件を探るため、凹凸形状を設けた金型鋼試験片にレーザーを照射し、平坦面と同等の硬さ分布が確認される照射条件を検討した。

3.1節の金型鋼試験片の、母材から肉盛溶接部にまたがる部分を切り出し、図10のように直角の凹凸部を設け、凹凸部の頂点を狙って3.1節と同様に母材部から肉盛溶接部にかけてレーザーを照射した。その後、熱影響部軟化領域の断面を切り出し、硬さが平坦面と同等に回復するレーザー出力を求めた。レーザーの照射条件は、焦点直径φ4.0mm、走査速度は1.0mm/s、照射回数2回で固定し、レーザー出力のみ凹部で200~350W、凸部で100~200Wに変化させた。硬さの評価はビッカース硬さで行ったが、凹部凸部ともに試験片の表面からは硬さを測定できないため、レーザー熱処理前の軟化領域で試験片を切断し、レーザー照射した表面から深さ0.05~0.20mmの断面硬さの平均値で比較した。

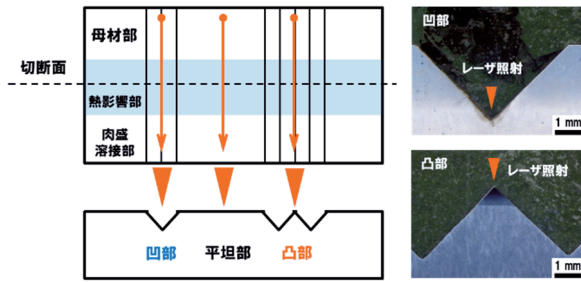


図10 凹凸部を設けた金型鋼試験片

3.3 レーザ熱処理の耐久性試験

3.3.1 金型鋼試験片による熱サイクル試験

レーザー熱処理による耐久性の改善効果を確認するため、3.1節の金型鋼試験片に加熱と冷却を繰り返す熱サイクル試験を行った。試験片形状を図11に、実験装置を図12にそれぞれ示す。

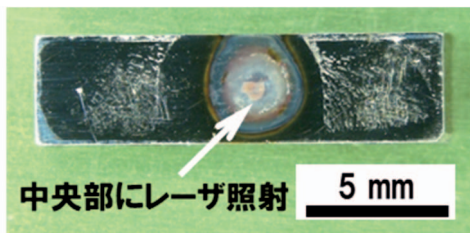


図11 熱サイクル試験片

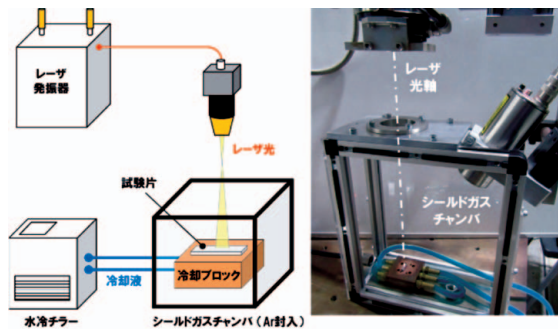


図12 熱サイクル試験片装置

金型鋼試験片から切り出した $15 \times 4 \times 2.0$ mmの試験片を、実験装置の冷却ブロック上に固定治具で取り付け、ガスチャンバ内にアルゴンガスを5 L/minで常時供給した。熱サイクル試験片を切り出す位置は、中央部が熱影響部の軟化組織になる位置とし、レーザー熱処理ありの熱影響部となしの熱影響部で耐久性を比較した。

冷却ブロックには、水冷チラーから常時 $+5$ ℃の冷却水が供給されており、試験片を冷却しながらチャンバ外から試験片の中央部にレーザーを照射した。レーザーは一定周期で繰り返しON-OFFさせ、試験片の熱膨張と冷却収縮を繰り返すことで割れを発生させた。レーザーの照射条件は、焦点直径 $\phi 6.0$ mm、レーザー出力240W固定とし、加熱4s冷却4sの8s周期で照射した。

熱サイクルを加えた試験片は、100サイクル毎にレーザーを停止して取り外し、バフ研磨で表面の酸化スケールを除去した後、金属顕微鏡などで割れの有無を観察した。レーザー照射した部分に図13のような割れが確認された時点で照射を打ち切り、このときのサイクル数でヒートチェック耐性を比較した。

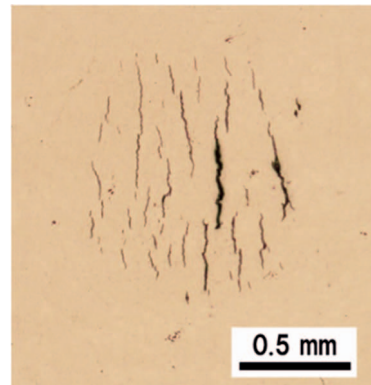


図13 熱サイクル試験で発生した割れ

試験片の固定治具は、図14左図のように3パーツで構成され、レーザーを照射する試験片の中心部のみが表面から見えるよう図14右図のように取り付け、試験片の中央に熱応力が集中するようXYZの全方向からねじで固定した。ねじ固定の締め付けトルクは、試験片の拘束力を一定にするため全て $3.0\text{N}\cdot\text{m}$ とした。

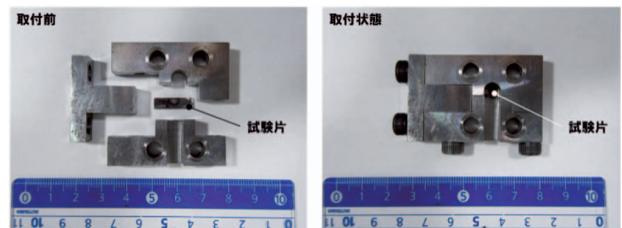


図14 試験片固定治具

3.3.2 実製品による耐久性実証試験

レーザー熱処理を加えた金型の、実際の耐久性を評価するため、溶接補修した実製品の金型で実際にダイカスト铸造を行う実証試験を行った。実証試験は、従来の溶接補修金型と、溶接補修後の熱影響部にレーザー熱処理を加えた金型で実際に製品をショットし、金型が寿命と判定されるまでのショット数を比較した。金型の寿命判定は、毎日の終業直前にショットした製品の寸法を検査し、測定箇所の変形量が寸法許容値の範囲を超えた時点で判定した。レーザー熱処理の照射条件は、前項3.1で得られた焦点直径 $\phi 4.0$ mm、レーザー出力200W、走査速度1.0mm/sとした。

金型にレーザー熱処理を加える熱影響部の位置について、実際に使用する金型は、金型鋼試験片のように切断や硬さ測定で熱影響部を探ることができないため、溶接補修時の肉盛溶接部の形状から位置を推定した。

位置推定の方法は、非接触三次元測定（図15）で肉盛溶接後と切削仕上後の形状をそれぞれ測定し、両者の形状データを照合させることで肉盛溶接部の境界を割り出した（図16）。軟化領域の位置は、金型鋼試験片の実験結果から肉盛溶接部境界より2.0～2.5mmの位置と推定し、この位置にレーザー熱処理を加えた。

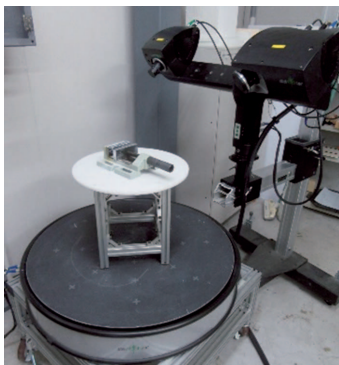


図 15 非接触三次元測定システム

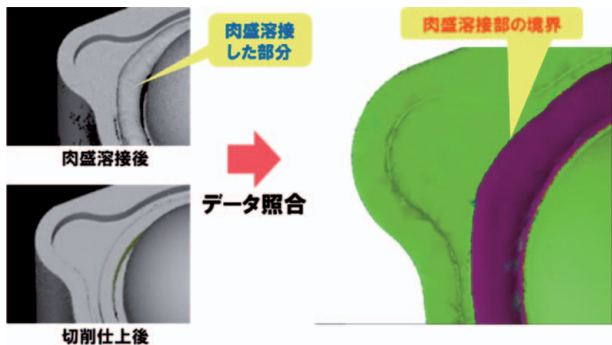


図 16 三次元測定画像から検出した溶接補修部の境界

4. 結果と考察

4.1 溶接補修部のレーザー熱処理条件の検討

金型鋼試験片の母材から肉盛溶接部にかけての硬さ分布について、図17にレーザー照射なしの測定結果を、図18、19にレーザー1回照射と2回照射の測定結果をそれぞれ示す。グラフの横軸は、肉盛溶接部と母材の境目を0として表記した。

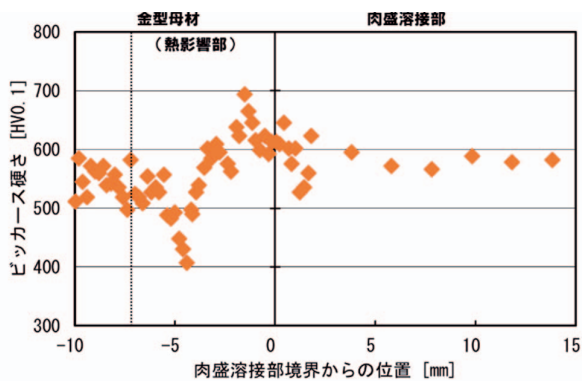


図 17 レーザ照射なしの表面硬さ分布

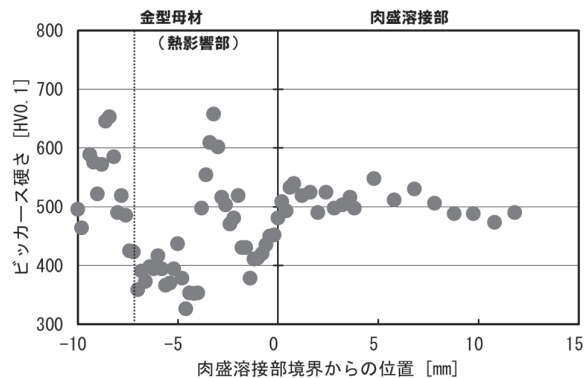


図 18 レーザ1回照射の表面硬さ分布

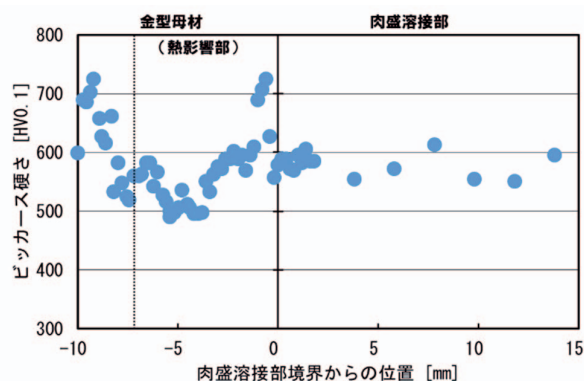


図 19 レーザ2回照射の表面硬さ分布

溶接補修後の硬さ分布は、図17のとおり肉盛溶接部境界から約2mm付近に硬化領域が、4～5mm付近に硬化領域が形成された。レーザー1回照射では、図18のとおり熱影響部の硬化領域であった部分が軟化し、軟化領域も肉盛溶接部の境界から約7mmまで拡大した。レーザー2回照射では1回照射と異なり、図19のとおり硬化領域であった部分の軟化は見られず、一部に700HV前後の領域が残ったことを除いて550～600HVに硬さが回復した。また軟化領域についても、レーザー熱処理前に最小400HV前後まで低下した硬さが500HV前後まで回復し、母材から溶接補修部にかけての硬さ変化が500～600HVの範囲に緩和された。なお、肉盛溶接部の境界から母材側の8～10mmの領域はレーザー熱処理の始末端に相当し、入熱状態が他の部分とは異なるため硬さの評価から除外した。

次に、レーザー熱処理による熱影響部軟化領域と硬化領域の境界付近の組織変化について、レーザー照射なしとレーザー2回照射の断面組織をそれぞれ示す。（図20、21）

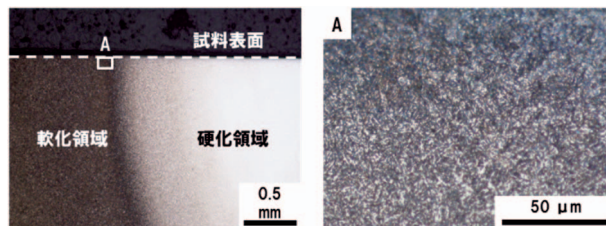


図 20 レーザ照射なしの熱影響部組織

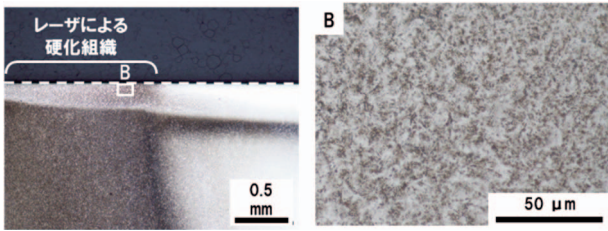


図 21 レーザ 2 回照射の熱影響部組織

図20左側のマクロ組織写真のとおり、レーザ熱処理されていない熱影響部では硬化領域と軟化領域に明瞭なコントラスト差が生じており、最軟化領域Aを拡大した組織も図5の軟化組織と類似している。一方、図21のレーザ熱処理後の組織は、軟化領域の表層0.2~0.3mmの部分が硬化領域の白色に近い色に変化しており、最軟化領域Bの拡大組織についても硬化組織と類似の白色部が増加する傾向が見られた。

レーザ熱処理で軟化領域の硬さが回復する要因については、加熱による再焼入や、析出炭化物の影響が考えられる。しかし、前者については図21の硬さが回復した組織と母材の焼入焼戻組織に類似性は見られず、後者については母材の構成元素と炭素をEPMAで面分析しても明確な炭化物の生成は認められなかった。このため、硬さ回復の要因については今後とも継続的に検討することとした。

4.2 金型形状を考慮したレーザ熱処理条件

凹凸部のレーザ熱処理におけるレーザ出力と断面硬さの関係について、図22、図23に結果を示す。

図22のとおり、凹部では平坦部で硬さが回復した出力200Wでは硬さは回復せず、出力を350Wまで上げて初めて硬さが回復した。これに対し凸部では、図23のとおり、出力120W以上で硬さが回復し、出力300Wでは凸部の先端が溶融した。

硬さが回復するレーザ出力が変化した場合について、図24のようにレーザの焦点径がφ4mmとなる位置を基準とし、

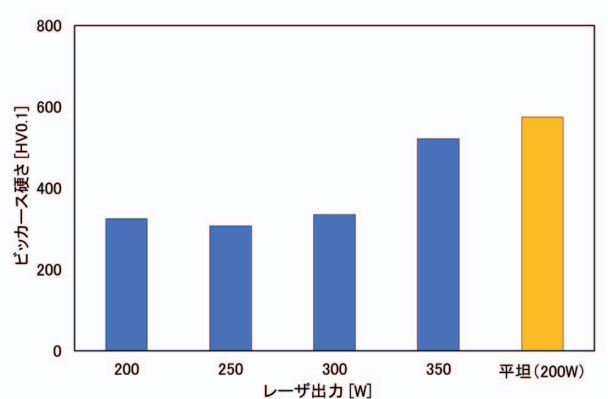


図 22 レーザ出力と硬さの関係 (凹部)

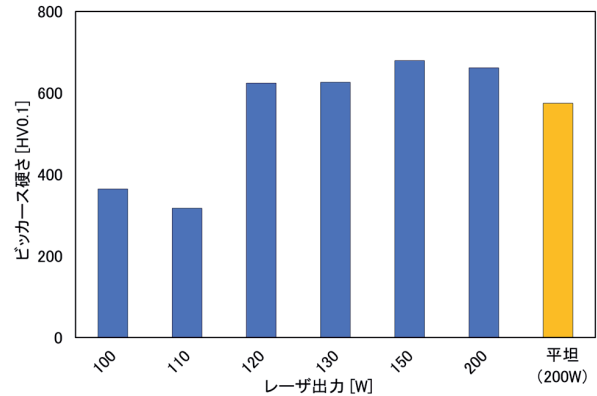


図 23 レーザ出力と硬さの関係 (凸部)

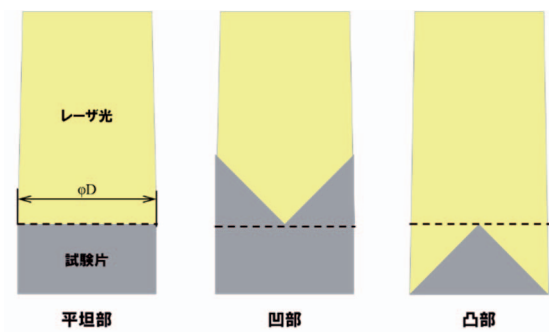


図 24 焦点位置を基準としたレーザ照射領域の体積

照射された領域の体積と硬さが回復したレーザ出力との関係を比較した。図25に、平坦部を1.0としたレーザ照射領域の体積比と、硬さが回復したレーザ出力との関係を示す。

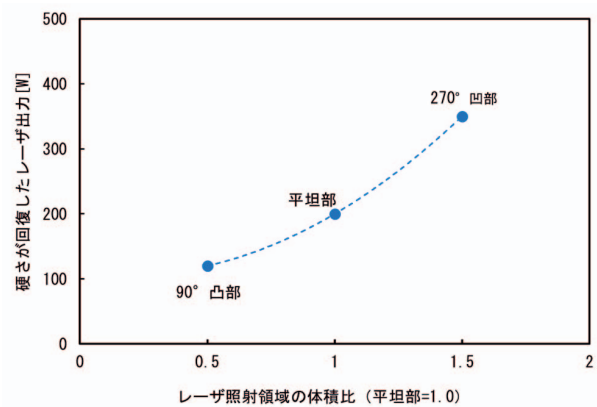


図 25 レーザ照射領域の体積比とレーザ出力の関係

その結果、凹凸部の硬さを平坦部と同程度に回復するためには、図25のとおりレーザ照射部の体積比が大きいほど高いレーザ出力が必要となることがわかり、体積比が支配的な要因となる傾向が見られた。

4.3 レーザ熱処理の耐久性試験

4.3.1 金型鋼試験片による熱サイクル試験

図26に、熱サイクル試験による耐久性比較の結果を示す。

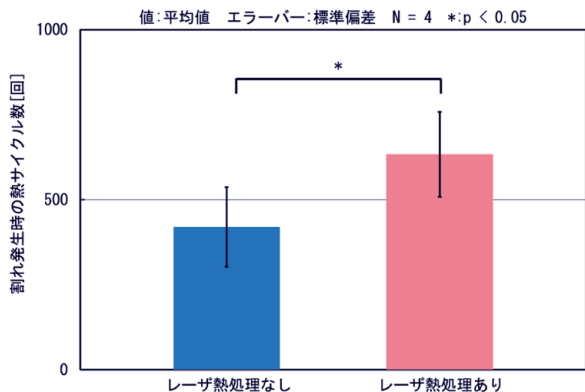


図26 熱サイクル試験によるレーザー熱処理部の耐久性比較

熱影響部の軟化領域にレーザー熱処理を加えたものは、熱処理なしと比べ熱サイクル数が50%以上増加し、ヒートチェックに対する耐久性が向上した。

本試験でクラックが発生したサイクル数について、後述の実証試験と比べ一桁以上少なくなっている。この原因について、熱サイクル試験のレーザー出力を試験片が溶融しない範囲の最大出力に設定したため、レーザー照射点の最高温度は1000℃以上と推定される。さらに冷却時の温度は10℃以下に低下するため、1サイクルの温度差は1000℃以上となる。これに対し、実際の金型に加わる温度差は前述のとおり500℃前後であり、加熱時と冷却時の温度差が実際の金型の2倍以上と予測されることから、クラックの発生が促進されたと考えられる。

また、ヒートチェックは一般的に、図1の左側のように全方向に広がるが、本実験では図13のように一方向のみに割れが広がっている。この原因について、図14のとおり試験片の中心部以外は固定治具または冷却ブロックと密着しており、試験片の拘束力は全て方向とも同じである。しかし、レーザー照射部の上側のみ、レーザーの光軸を塞がないよう固定治具に円弧状の切欠を設けたため、この部分のみ試験片と密着せず冷却速度が低下した。これにより熱応力が不均一になり、試験片の長手方向の熱応力が最大なることを解析で確認できたことから、本実験のヒートチェックが一般的な形態と異なると考えられる。

4.3.2 実製品による耐久性実証試験

図27に、実製品の金型を用いた耐久性実証試験の結果を示す。

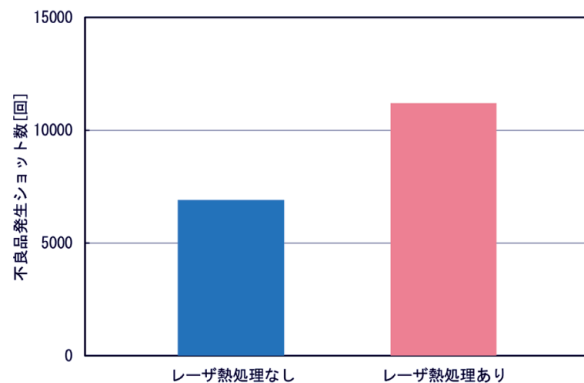


図27 実製品の金型によるレーザー熱処理部の耐久性比較

図27のとおり、レーザー熱処理を加えた金型では未処理の金型に比べて、不良品が発生するまでのショット数が60%以上増加しており、熱サイクル試験と同様に耐久性が向上した。

5. おわりに

本研究では、溶接補修したダイカスト金型の耐久性低下を改善するため、熱応力の集中や硬さの低下によってヒートチェックが早期に発生し進展する溶接補修部のみを改質する、レーザー部分熱処理技術を開発した。

- (1) 肉盛溶接を施した金型鋼試験片でレーザー熱処理実験を行い、母材と比べ±100HV以上の軟化領域と硬化領域が混在する熱影響部の硬さを、母材や肉盛溶接部と同水準に回復させるレーザー熱処理条件が得られた。
- (2) 凹凸形状に対するレーザー熱処理において、硬さを回復させるためには平坦面と比べ凹部ではレーザー出力を増加、凸部では減少させる必要があることを明らかにし、レーザー照射部の体積比（熱容量）によって必要なレーザー出力が変化する傾向が見られた。
- (3) レーザ熱処理による溶接補修部の耐久性を、レーザー加熱による熱サイクル試験と、実製品の金型による実証試験と比較し、従来の溶接補修のみと比べサイクル数、ショット数ともに50%以上増加し、ヒートチェック耐性が改善した。

今後は、金型補修の多くを道外に依存するダイカストメーカーに技術を普及し、金型の運用コスト削減に役立てる。また、道内の金型メーカーやレーザー加工専門メーカーにも技術を普及し、道内外からの補修業務の受注拡大に役立てる。

謝辞

本研究で使用したファイバーレーザー加工溶接装置・試料理込装置、実体顕微鏡、金属顕微鏡、非接触三次元測定システ

ムは、国立研究開発法人科学技術振興機構の地域産学官共同研究拠点整備事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 経済産業省工業統計，型種別都道府県別金型生産額および事業所数（2017）
- 2) 横井直樹・河野正道・井上幸一郎，ダイカスト用金型のヒートチェックに及ぼす硬さと合金元素“モリブデン，シリコン”の影響，大同特殊鋼，電気製鋼 第81巻1号，pp.25-31，（2010）
- 3) 日原政彦，ダイカスト用金型の寿命対策，日刊工業新聞社，pp.49-50，（2003）
- 4) 日原政彦，ダイカスト金型における寿命向上技術動向，素形材センター，素形材 49巻2号，pp.18-24，（2008）
- 5) 辻川正人，レーザを活用した金型熱処理技術～レーザ技術を利用した金型イノベーションに関する戦略策定から～，素形材センター，素形材 56巻10号，pp.30-35，（2015）
- 6) Laserline Co.Ltd. HP
<https://www.laserline.com/jaint/%E7%86%B1%E5%87%A6%E7%90%86/>（2021.6.24）

溶融亜鉛めっき品の水素脆化・液体金属脆化の研究

坂村 喬史, 中嶋 快雄, 飯野 潔, 宮腰 康樹,
齋藤 隆之, 板橋 孝至, 米田 鈴枝*

Research on Hydrogen Embrittlement and Liquid Metal Embrittlement of Hot-dip Galvanized Products

Takashi SAKAMURA, Yoshio NAKAJIMA, Kiyoshi IINO,
Yasuki MIYAKOSHI, Takayuki SAITOU, Koji ITABASHI, Suzue YONEDA*

抄 録

溶融亜鉛めっき品はその製造工程から水素脆化及び液体金属脆化を起こしやすく、この2つの現象はともに鋼の粒界破壊を生じることが多いため判別が困難である。本研究では水素脆化及び液体金属脆化を破面観察から判別する可能性について検討を行った。その結果、軟鋼の水素脆化では、脆化の度合いが小さいとき粒界近傍での塑性変形を伴う破壊の可能性が示唆された。一方、脆化の度合いが大きいときはへき開を呈することが分かった。溶融亜鉛めっき及びはんだめっきを施した純鉄線による液体金属脆化試験では、破面観察から典型的な粒界破壊が観察され、液体金属成分が検出された。これらの結果より、2つの脆化を破面観察から判別できる知見を得た。

キーワード：溶融亜鉛めっき、水素脆化、液体金属脆化

Abstract

Hot-dip galvanized products are easy of hydrogen embrittlement and liquid metal embrittlement due to the manufacturing process. It is difficult to distinguish both phenomena, to be accompanied by grain boundary fracture of steel. In this study, a fracture surface observation was investigated a possibility of discriminating hydrogen embrittlement and liquid metal embrittlement. As a result, it was suggested that hydrogen embrittlement on mild steel may be resulted in fracture accompanied by plastic deformation near the grain boundaries when the degree of embrittlement is small. On the other hand, it was found that cleavage was exhibited when the degree of embrittlement was large. In the liquid metal embrittlement test using hot-dip galvanized and solder-plated pure iron wire, typical grain boundary fracture was observed from a fracture surface observation, and a liquid metal component was detected. From these results, the fracture surface observation was obtained the knowledge that the two embrittlements can be discriminated.

KEY-WORDS : Hot-dip Galvanized Products, Hydrogen Embrittlement, Liquid Metal Embrittlement

1. はじめに

亜鉛めっきとは鉄鋼材料の表面に亜鉛の皮膜を形成する表面処理のことで、亜鉛の犠牲的防食により鋼材の腐食を抑制するものである。亜鉛めっきの手法としては溶融金属めっきと電気めっきがあり、溶融亜鉛めっきは電気亜鉛めっきと比べ皮膜が厚いことが特徴である。このため、高い耐食性による鋼構造物の長寿命化を目的とする場合には、主に溶融亜鉛

めっきが用いられている。

溶融亜鉛めっき品は前処理である酸洗いにより水素脆化を、溶融亜鉛めっき処理により液体金属脆化を起こす危険性があり、この2つの現象による鋼の強度低下が問題となっている。しかし、実際の製品では、製造工程の最後に行われる製品検査、又は使用中に破損が生じたときに脆化が判明するため、どちらかの脆化に起因する破損であるか判別できなければ対応策を検討できない。これらの脆化による破面はともに粒界

事業名：経常研究

課題名：溶融亜鉛めっき品の環境脆化に関する研究

* 北海道大学大学院工学研究院 Hokkaido University Graduate School Faculty Engineering

破壊となる場合が多く、破面観察から両者の判別は困難である。

そこで本研究では、熔融亜鉛めっきの母材として一般に用いられている軟鋼の水素脆化、および熔融亜鉛めっきの液体金属脆化の基礎的な知見を得るため、強度試験及び破面観察を行い、両者の判別の可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 水素脆化の実験方法

水素脆化試験には図1(a)に示す平行部が $\phi 6 \times L40$ mmの丸棒サイズの引張試験片を用い、実験手順は①引張試験による予歪みの導入、②水素添加処理、③水素脆化引張試験の順で行った。用いた試験片の材質はS15Cである。亜鉛めっき品は道内ではSS400などの普通鋼で製造されることが多い。しかし、SS400では炭素含有量などの規定がないため結果がばらつく恐れがあることから、SS400相当品としてS15Cを本実験では用いた。使用したS15Cの組織観察SEM像を図1(b)に示す。粒径が $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度のフェライト・パーライト組織である。引張試験は引張速度 $0.25\text{mm}/\text{min}$ 、オートグラフ(島津製作所、AG-100kNXplus)を用いて室温にて行った。水素脆化試験において低速の引張速度ほど脆化は起こりやすいことが知られているが、試験に時間を要するとその間に試験片に添加した水素が放出されてしまう恐れがある。そこで、 $1\text{mm}/\text{min}$ 以下の引張速度で予備試験を行い、脆化が十分に確認できる速度として $0.25\text{mm}/\text{min}$ を選定した。

①引張試験は初めに水素添加のための予歪みの導入から行った。鉄鋼材料中の水素は、粒界や転位などの格子欠陥に偏析するように固溶する。そのために、焼きなまし材のような格子欠陥が少ない材料は、水素の固溶度が少なく水素脆化を起こし難い。このため、引張歪みを導入することで固溶度を増加させた。試験片の最大応力のおよそ80%に相当する370MPaまで引っ張り、引張りを中断し治具から取り外してから水素添加処理を行った。

②水素添加処理は、水溶液の電気分解を利用した陰極電解水素チャージ法を用いた。これは試験片を陰極として対極にカーボン電極を用い、水溶液の電気分解を行うことで試験片表面に水素を発生させ、水素雰囲気中に曝露させることで水素を吸蔵させる方法である。

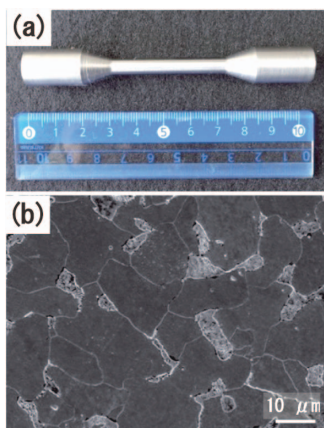


図1 (a)引張試験片の外観写真、(b)S15Cの組織観察SEM像(ナイタールエッチング)

電気分解には、ガルバノスタット(北斗電工、HA-5000)を用いた。電解液には $0.05\text{kmol}/\text{m}^3 \text{H}_2\text{SO}_4$ に対して $0.5\text{wt}\%$ の割合で NH_4SCN を添加した水溶液を用い、電流密度 $50\text{A}/\text{m}^2$ 、処理時間 $1, 4, 6, 24\text{h}$ と変えることで水素添加量の異なる試験片を製作した。

③水素脆化引張試験は、水素添加処理の 5min 後に行った。試験片破面観察は、FE-SEM(JEOL、JSM-7001F)を用いた。

2.2 液体金属脆化の実験方法

液体金属脆化は、めっきを施した $\phi 1.6\text{mm}$ の純鉄線を用いた高温引張試験により発現させた。JIS G3129などに記載されているように熔融亜鉛めっき割れ感受性は鉄鋼材料の合金元素の影響を受けることが知られているため¹⁾、本研究では合金元素の影響が少ない純鉄を用いた。

試験片は $\phi 1.6\text{mm}$ 純鉄線(室温における最大荷重 739N)を用い、 $\#1000\text{SiC}$ 研磨紙で磨いた後、めっきを溶湯温度 600°C 、浸漬時間 10min の条件で施した。水素脆化の可能性を排除するため、酸洗いやフラックス処理は行わず研磨後熔融亜鉛めっきを行っている。次に、高温引張試験は図2に示す釣り鐘式の引張試験方法を行い、釣りに錘を一個ずつ増加させ、試験片が破断するまで段階的に荷重を加えた。試験温度 $500 \pm 50^\circ\text{C}$ とし、熱電対で試験片温度を測定しながらガスバーナーで加熱した。負荷荷重 98N の錘を温度が安定する3分前後ごとに増加させた。また、比較のため同条件で錫-鉛合金(はんだ)めっきを施した試験片についても同様の試験を行った。試験片の破面観察及び成分分析は水素脆化同様にFE-SEMを用い、さらにEDSを用いた破面上の成分分析も行った。

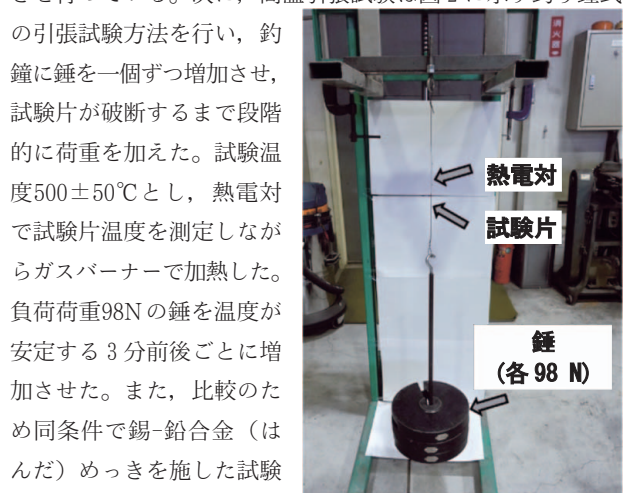


図2 荷重段階式高温引張試験機の外観写真

試験片の破面観察及び成分分析は水素脆化同様にFE-SEMを用い、さらにEDSを用いた破面上の成分分析も行った。

3. 実験結果・考察

3.1 水素脆化の実験結果・考察

図3に、各水素添加量の試験片を用いた引張試験の応力-歪み線図を示す。予歪みを 370MPa まで導入したことで、全ての試験片において降伏点とその近傍となる線図となっている。図より水素脆化試験片からは弾性変形及び降伏応力には変化が見られない。しかし、破断歪み及び最大応力には影響が生じ、水素添加量が増加するにしたがい、延性と強度が低下する傾向が観察される。未処理の試験片と 24h 水素添加処

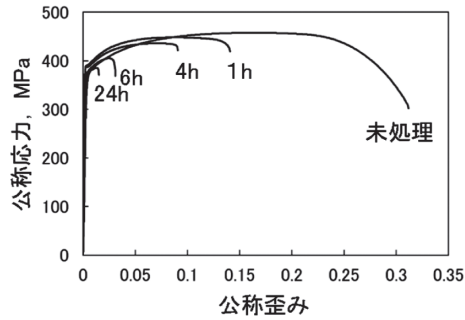


図3 各処理時間における引張試験の応力-歪み線図

理試験片を比較すると歪みは1/10程度まで減少する。図4(a)に破断後の試験片の外観写真、図4(b)に水素添加処理時間-真破断応力のグラフを示す。図4(a)の外観写真より、図3の応力-歪み線図、および図4(b)の真破断応力に対応するように試験片が脆化を示すにすぎない破断部のくびれが目視確認できなくなり、真破断応力は未処理の1036MPaから24hの375Paまで低下している。また、1h試験片の時点で破断部は延性破壊を示すカップアンドコーンの形状を取っておらず、不規則な凹凸が目視で確認できる破面形状を呈していた。これを例えば低温脆性の応力-歪み線図と比較すると、低温脆性の場合、破断歪みは低下し、弾性率、最大応力及び破断応力は延性変形よりも増大し、硬く・脆くなる²⁾。そして、破面は平坦な形状のへき開破面を呈す。しかし、本研究結果の水素脆化の場合、室温での試験のため弾性率は変化がなく、歪み及び破断応力は未処理試験片より低下して、脆く・弱くなった。また、破面は不規則な凹凸が目視で確認できる形状であった。ここで、図3中の水素脆化のときの応

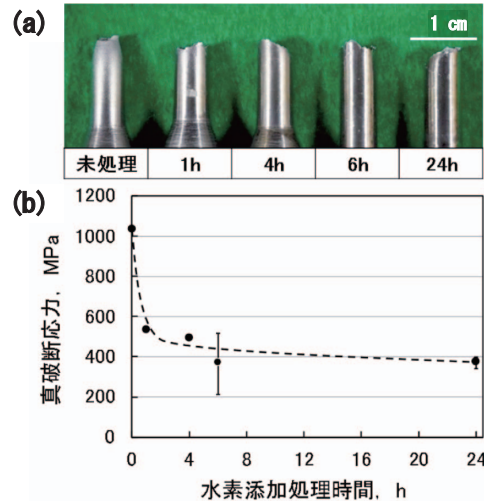


図4 (a) 破断後の試験片の外観写真
(b) 水素添加処理時間 - 真破断応力のグラフ

力-歪み線図に着目すると、低温脆性のような線形的な線図と異なり、最大応力の後に強度低下し破断する延性材料と同様の傾向を示しており、この実験結果から水素脆化した領域の一部は塑性変形を伴う破壊である可能性が示唆される。

図5(a)に水素未添加試験片の破断面全体を観察したSEM像を示す。図5(a)の破面からもカップアンドコーン形状が確認でき、破面の中心部を拡大すると図5(b)に示すとおりディンプル破面も合わせて確認されることから典型的な延性破壊と言える。一方で、図5(c)に示す24h水素添加処理を施した試験片の破断面全体像は、水素未添加のときとは異なる形状を有しており、不規則な凹凸と平坦な箇所が混

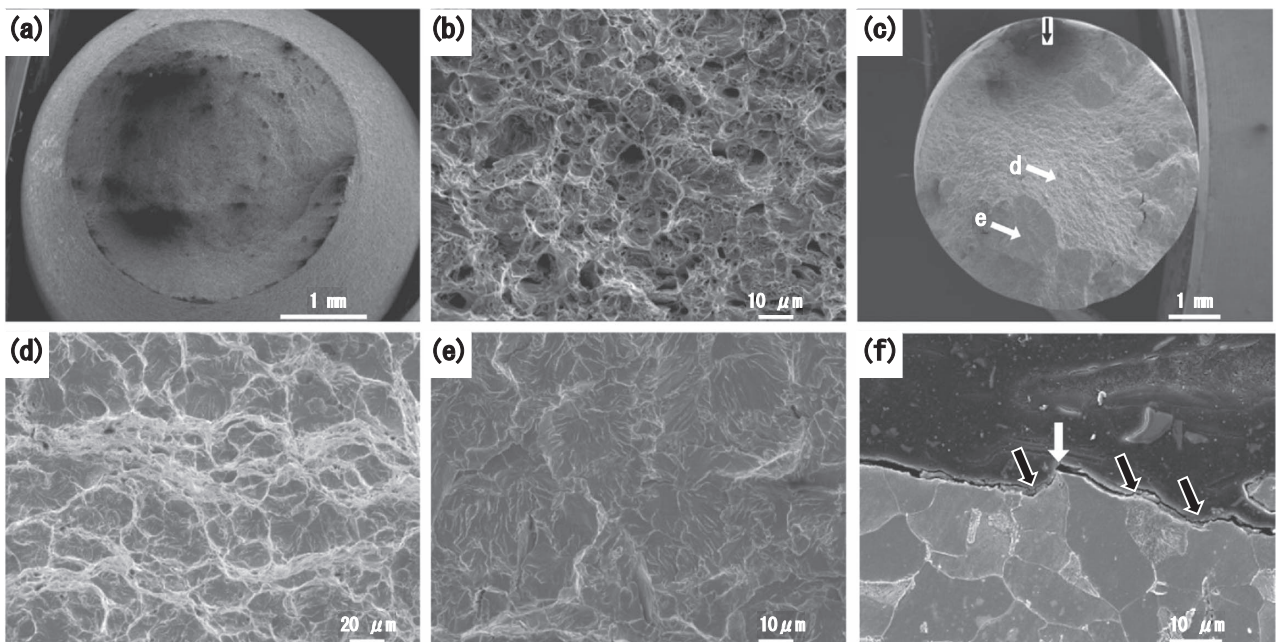


図5 水素脆化試験の各破断片SEM観察像、(a)未添加試験片の破断面の外観、(b)未添加試験片のディンプル破面、(c)24h試験片の破断面の外観、(d)c中の矢印dの箇所の拡大像、(e)c中の矢印eの箇所のへき開破面部の拡大像、(f)24h試験片の断面観察

在している。図中に白矢印d, eで示した箇所のそれぞれの拡大SEM像を図5(d), (e)に示す。図5(d)から不規則な凹凸部分は20 μm 程度の大きさの凹凸が連続していることが観察され、図5(e)からはへき開破面が観察される。ここで、図1(b)では結晶粒径が10~20 μm 程度であったことから、図5(d)の不規則な凹凸は粒界に沿った破面の可能性が考えられるが、破面表面の形状をよく観察すると、平坦なディンプル模様であることが確認できる。この破面を詳細に観察するため、図5(c)中の黒矢印の方向から試験片を切断し断面方向から観察を行ったSEM像を図5(f)に示す。ここでクラックの向きが変わる偏向箇所注目すると、図中に白矢印で記したとおり、1箇所のみ粒界で偏向しているが、それ以外の箇所(黒矢印)は、粒内で偏向しているのが見て取れる。今回の結果からの水素脆化したS15Cの破壊においては、塑性が低下し、粒界に沿った不規則な凹凸を伴うディンプル破面を呈することが分かった。また、図5(e)で観察されたへき開破面は低温脆性における代表的な破面であるが、水素脆化においてもへき開破面が発生することが報告されている³⁾。

他の水素添加試験片の破面も確認したが6h及び24hの試験片のみ、へき開破面が確認されたことから、処理時間、つまり水素添加量が増加するにつれて破面がへき開に変化することが確認され、これにより破断応力及び歪みのさらなる低下につながっていることが示唆された。

3.2 液体金属脆化の実験結果・考察

液体金属脆化試験(荷重段階式高温引張試験)では、溶融亜鉛めっきの有無による比較を行った。めっき未処理試験片の破断荷重は490Nに対して、亜鉛めっき試験片の破断荷重は294Nと破断荷重の低下が確認された。また、未処理試験片の破面観察を行うと、カップアンドコーン、及びディンプル破面が確認された。

図6(a)に亜鉛めっき試験片の破面全体像を示す。破面の拡大観察を行うと、一部からはディンプル破面も観察されているが、それ以外の破面も観察される。図中に白矢印b, gおよびc, hで示す部分の拡大写真をそれぞれ図6(b), (c)に示す。図6(b)では水素脆化とは異なり、典型的な粒界破

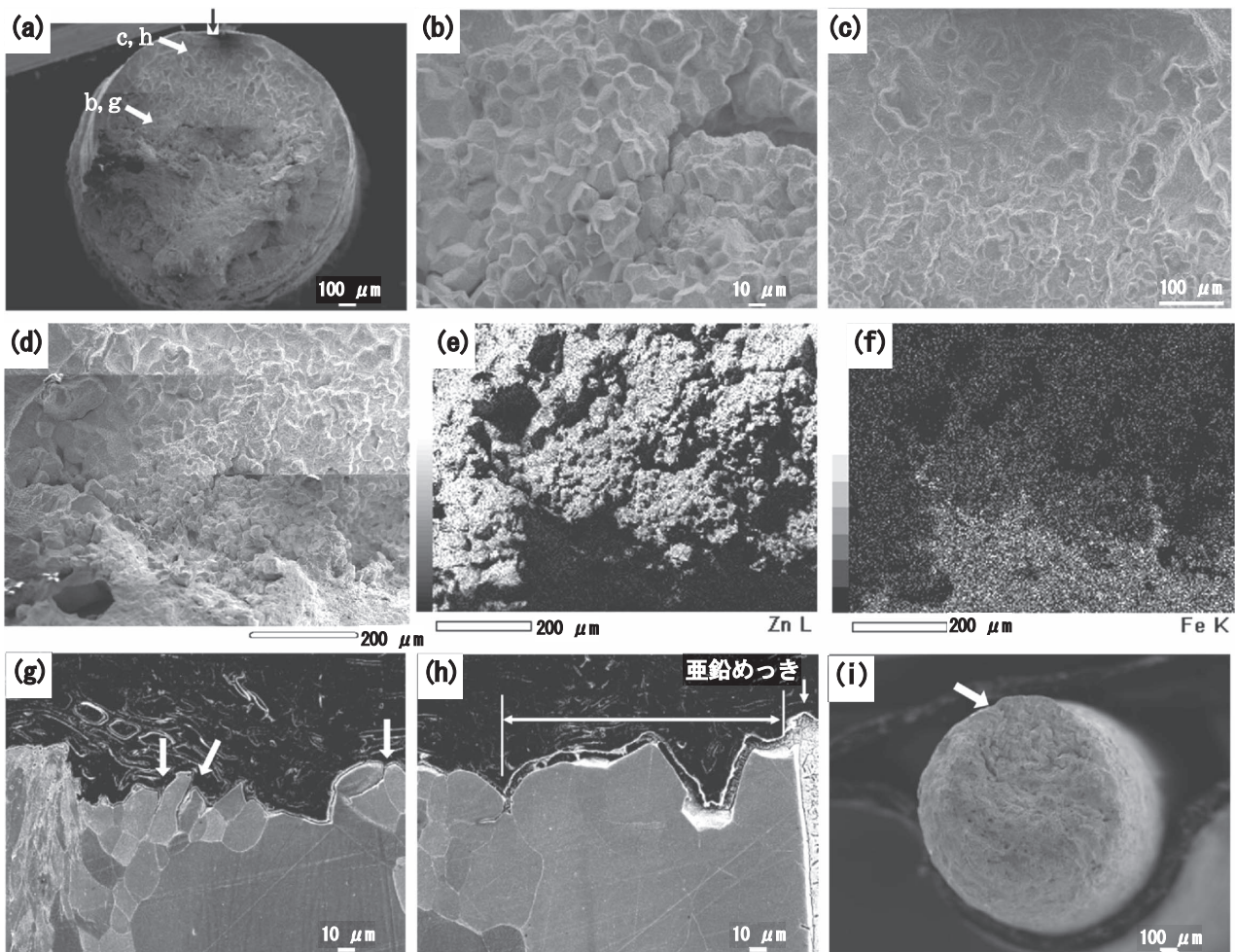


図6 液体金属脆化試験の各破断片SEM観察像、(a)亜鉛めっき試験片の破断面の外観、(b)a中矢印b箇所の拡大像、(c)a中矢印c箇所の拡大像、(d)EDS分析箇所のSEM像、(e)Znのマップング像、(f)Feのマップング像 (g)破面中心近傍の断面組織観察、(h)破面側面近傍の断面組織観察、(i)はんだめっき試験片の破断面の外観

面を呈している。一方で、図6(c)では粒界破面と異なるやや滑らかな不明瞭な破面が観察される。そこで、図6(a)を拡大観察した図6(d)に対してEDS分析を行った。その結果であるマッピング像を図6(e)、(f)に示す。図6(d)のSEM像において粒界破面、及び不明瞭な破面の箇所からは図6(e)より亜鉛成分が多く検出され、ディンプル破面が確認されている箇所からは図6(f)よりFe成分が多く検出されている。そこで粒界破壊と考えられる破面及び不明瞭な破面を詳細に観察するため、図6(a)中の黒矢印の方向から切断し断面方向から観察した。図6(g)に図6(b)に相当する箇所の断面組織を示す。クラックの進展方向は粒界で偏向していることが確認できることから、図6(b)は粒界破壊であることが確認される。また、図中に白矢印で示す引張方向と平行に存在するクラックは、水素脆化破面では見られない液体金属脆化特有のものであることが報告されている⁴⁾ことから、報告されている破面と同様の破面が得られている。図6(h)に図6(c)に相当する箇所の断面方向のSEM像を示す。観察結果から粒界でクラックの偏向が見られることから、この箇所も粒界破壊であることが確認される。また、図中に矢印で囲ってある範囲の破面上部の層は、ナイターエッチングにより溶出し隙間となっているが、EDS分析から亜鉛が主成分であることが認められた。このことから、不明瞭な破面は試験片が最終破断する前に発生した粒界破面に、溶融亜鉛が侵入することによって形成されたと考えられる。

比較のために行ったはんだめっき試験片の破面を図6(i)に示す。破面観察より図中に白矢印で示す箇所に粒界破面が確認されたが、破断荷重は490Nと未処理試験片と同強度であった。これは破面観察より粒界破壊の面積が小さいため破断荷重に有意義な差が表れなかったと考えられる。また、粒界破面部のEDS分析では、使用したはんだ成分はSn 44.3wt%、Pb 55.7wt%であるのに対して、破面では70wt%以上がPbであった。このことから、鉄-はんだにおける液体金属脆化の原因は鉛の鉄鋼材料中への侵入が脆化要因であることが示唆された。

4 おわりに

水素脆化試験片の引張試験により、応力-歪み線図と水素脆化破面を確認した。応力-歪み線図からは水素添加処理時間の増加に伴い、歪みは小さくなるが塑性を伴った線図が得られ、また真破断応力の低下が確認された。破面観察から不規則な凹凸模様と平坦なディンプル破面と6h以上の水素添加処理を行った試験片からは、へき開破面が観察された。

液体金属脆化試験片の段階荷重式高温引張試験からは、亜鉛めっき試験片の破断荷重の低下及び破面観察から典型的な粒界破面が観察された。粒界破面からは亜鉛成分が検出され、断面観察からクラックが粒界上で偏向していることと、引張

方向に対して平行方向にも入ることが確認された。また、クラック形成後、亜鉛が侵入することで不明瞭な破面を形成すると考えられる。

以上の結果より、S15Cの水素脆化では、粒界破面が生じる可能性は低く、延性が低下したディンプル破面もしくはへき開破面を呈すること、純鉄の溶融金属脆化からは典型的な粒界破壊を呈することがわかった。これにより水素脆化及び液体金属脆化を判別するための知見を破面観察並びに成分分析から得た。溶融亜鉛めっき品においては、両者の複合的な破損が生じる可能性もあり、より実製品に即したデータ構築を行っていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学 野口徹名誉教授には多くの助言を頂きました。

本研究で使用したオートグラフは競輪の補助を受けて整備されました。

ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 家澤 徹, 井上尚志, 他, 鉄と鋼, 79 (1993) p.1108-1114
- 2) 例えば, 深井 有, 田中一英, 他, (1998) 水素と金属 内田老鶴圃
- 3) 南雲道彦, 材料と環境, 56(2007) p.132-147
- 4) 小関智也, 天野虔一, 川崎製鉄技報, 25(1993) p.20-26

耐溶損性に優れたコーティング方法の開発

板橋 孝至, 飯野 潔, 戸羽 篤也, 高橋 英徳

Development of Coating Method for Steel against Erosion in Molten Zinc

Koji ITABASHI, Kiyoshi IINO, Atsuya TOBA, Hidenori TAKAHASHI

抄 録

溶融亜鉛メッキ業界では、溶融亜鉛と接触する熱電対保護管等の鋼製治具が損傷する、いわゆる溶損が問題となっており、鋼製治具を被覆する安価で耐溶損性に優れたコーティング方法が求められている。本研究では、鉄-アルミニウム（以下Fe-Al）合金による簡便で安価なコーティング方法の開発を行った。ねずみ鑄鉄にAC4Cを添加して作製した種々の濃度のアルミニウム含有鑄鉄（以下、アルミ鑄鉄）を溶融し、鋼材を浸漬することによりコーティングが可能であることがわかった。アルミニウム濃度18wt%に調整したアルミ鑄鉄によるコーティングは、コーティング皮膜を最も厚く付与することができ、溶融亜鉛中を41.2mm/secで攪拌する溶損促進試験において、溶湯浸漬後24時間まで優れた耐溶損性を示した。

キーワード：溶融亜鉛メッキ, 熱電対保護管, 鉄-アルミニウム合金, コーティング

Abstract

In the hot-dip galvanizing industry, damage to steel jigs that come into contact with hot-dip zinc, such as thermocouple protection tubes, has become a problem. Therefore, there is a demand for an inexpensive coating method having excellent erosion resistance for coating steel jigs. In this study, a coating method with an iron-aluminum alloy was developed. Aluminum-containing cast iron, referred as "aluminum cast iron", of various concentrations by adding aluminum alloy AC4C to gray cast iron were prepared. It was found that a simple and inexpensive coating is possible by immersing a steel material in aluminum-containing cast iron. As the result, the coating sample made of aluminum cast iron of 18 wt% aluminum was able to give the thickest coating film. Furthermore, the alloy with 18 wt% aluminum showed excellent melting resistance up to 24 hours in a melting damage acceleration test in which the zinc melt was stirred at 41.2mm/sec.

KEY-WORDS : the molten galvanizing, thermocouple protector tube, Iron-aluminum alloy, coating way

1. はじめに

溶融亜鉛メッキは、街路灯や送電線鉄塔などの屋外鉄鋼構造物の美観向上および耐候性付与のために施され、電解メッキなどの他の施工法と比較して①厚くメッキできる、②メッキと母材である鋼の中間に形成される合金層により密着性が高く耐久性が高い、③安価である、④大型構造物へのメッキが容易である、ことから広く利用されている。

図1に溶融亜鉛メッキ炉の代表的な構造図を示す。特殊鋼で作製したメッキ釜を耐熱レンガなどで構成した燃焼室で囲んで加熱し、槽内の亜鉛を450℃前後に溶融する。溶融亜鉛

を24時間溶融状態で維持するため、メッキ炉各所の温度は熱電対で管理している。溶融亜鉛に挿入する熱電対は、市販の保護管のままではすぐに破損してしまうため、さらに厚さ10～20mmの鋼製保護管で保護している。しかし、この鋼製保護管も激しい溶損（高温の溶融金属との接触による鋼の損傷）を受けるため、1ヶ月あたり2～3本の頻度での交換を要している企業もある。

図2に、使用後の鋼製保護管の写真を示す。左側が溶融亜鉛に浸漬していた部分で、外観からは大きな変化がないように見えるがこれは表面に鉄-亜鉛合金層が厚く成長しているためであり、実際には当初の肉厚15mmが1ヶ月で約半分に

事業名：経常研究

課題名：耐溶損性に優れた新規コーティング方法の開発

まで減少している。

この問題に対してこれまで様々な耐溶損性材料および被覆方法が考案されてきた^{1,2)}が実用化には至っていない。そのため安価な材料を消耗部材として用いているが、さらなるコスト削減のため鋼製保護管への耐溶損性に優れたコーティング方法が求められている。

本研究では、溶融亜鉛の温度管理用熱電対の鋼製保護管に対して耐溶損性が高いコーティング技術の開発を行った。

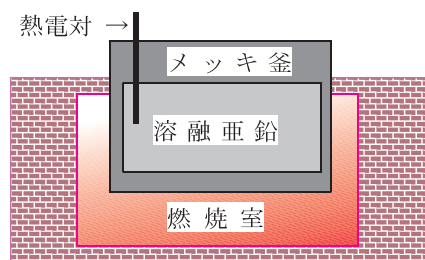


図1 溶融亜鉛メッキ炉の構造図



図2 操業炉で使用後の鋼製保護管

2. 試験方法

2.1 鋼材溶損量の評価方法

溶損性を評価する試料としては、SS400引抜丸棒材（以下、鋼材）及びこれにコーティングを施した試料（以下、コーティング試料）を用いた。また、亜鉛は、市販のメッキ用亜鉛を用いた。表1に化学組成を示す。

鋼材及びコーティング試料の溶融亜鉛による溶損状況を確認する手段としては、切断または酸洗浄した後に寸法測定するのが一般的である。しかし、鋼材の新鮮面露出やコーティング皮膜の破損が生じるため、一度測定に供した試料を再度浸漬試験に利用することは困難であり、非常に多くのサンプルを必要とする。そこで、同一サンプルで経時変化を測定するためにX線CT（株式会社島津製作所製 inspeXio SMX-225CT）を用いて非破壊で鋼材直径及びコーティング厚さを測定し溶損量を算出することとした。鋼材の直径は、X線CTの透過能力を考慮して10mmとした。予備試験の結果、鋼材、コーティング皮膜、およびコーティング皮膜損失後の試料表面に生成する鉄-亜鉛合金層を輝度の違いで識別でき、表面にコーティング皮膜や鉄-亜鉛合金層を残存させたまま内部の鋼材の直径を測定できることが確認された³⁾。このことから、溶融亜鉛浸漬前後の試料について6カ所の直径、すなわち鋼材

の異なる3断面における直交する直径を測定し、その平均から次式により溶損量を算出した。

$$C = \rho \cdot \Delta D / 2 \quad \dots\dots(1)$$

ここに、C：各時間における溶損量 (g/mm²),

ρ ：鋼材の密度 (7.8×10⁻³ g/mm³),

ΔD ：各時間における直径減少の平均値 (mm)

表1 溶融亜鉛メッキ用亜鉛の成分 (wt%)

Zn	Pb	Fe	Mg 他
98.9	1.0	0.02	0.02

2.2 溶損促進試験法の開発

試料を溶融亜鉛に浸漬して静置した場合、試料界面付近の溶融亜鉛中の鉄が濃化する⁴⁾ ことにより溶損速度が低下することが予想された。そこで試料を溶融亜鉛中で一定速度で攪拌することにより溶損速度を増加させて実験効率の向上を図った。図3に溶損促進試験法の装置外観写真及び概略図を示す。つぼには、内径約220mmの黒鉛つぼを使用した。低速での回転を安定させるために、軸受け付きフレームを製作して市販の試薬用電動攪拌機、1/10減速機、フレキシブルカップリング及び円形の試料保持板を接続し、試料保持板中心から40mmまたは80mmの位置に鋼材またはコーティング試料を垂下した。試料を450℃の溶融亜鉛中に浸漬して試料保持板を回転数0～10rpm、すなわち周速度0～80mm/sで攪拌し、鋼材の直径を測定することにより攪拌による溶損促進効果を評価した。

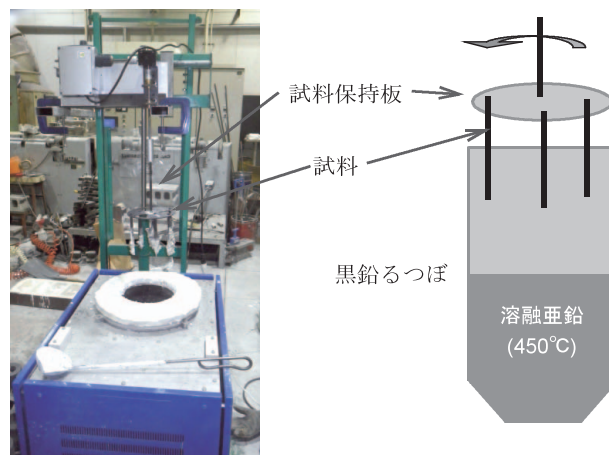


図3 溶損促進試験装置の外観写真及び概略図

2.3 コーティング材及び方法の検討

コーティング材に求められる条件としては、①メッキ操業炉である450℃前後で安定的である、②NiやCoなど高価な材料を使用しない、ことであり、当场で知見を有し耐食性が期待できるFe-Al合金⁵⁾をコーティング材として選定した。

Fe-Al合金は、1,400℃で溶融させたねずみ鋳鉄 (FC200

相当)に、入手が容易な铸造用アルミニウム合金AC4C (Al-6.5~7.5%Si)を添加することにより2, 8, 18wt%Alアルミ铸铁として作製した。表2にAC4Cの代表的な成分表を示す。コーティング試料は、鋼材を1,350℃で溶融させたアルミ铸铁に攪拌しながら5~15秒浸漬して作製した。

表2 AC4Cの成分表 (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
6.5~7.5	0.5	0.20	0.6	0.20~0.4	0.3
Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
0.05	0.20	0.05	0.05	—	残部

注：範囲を示していない数値は、許容限界値を示す。

2.4 コーティング試料の耐溶損性評価試験

コーティング試料の耐溶損性は、試料を450℃の溶融亜鉛中に所定の周速度で攪拌しながら計48時間まで浸漬し、鋼材の直径を測定することにより評価した。直径の測定は、前述のX線CTを用いて12時間ごとに行い、(1)式により溶損量を算出した。

3. 結果と考察

3.1 溶損促進試験法

図4に450℃の溶融亜鉛に下端から約50mm浸漬させて82.4mm/sで217時間攪拌した鋼材の外観写真及び垂直方向のX線CT断面画像を示す。X線CT断面画像においては、中央の暗灰色が鋼材を、その周囲の明灰色が鉄-亜鉛合金層を示している。鋼材の直径減少は、浸漬下端から約20mmまでの範囲においては約16.9mmであったが、それより上に行くに従って小さくなり、下端から44mmより上の範囲では直径減少は約0.6mmであった。

このように浸漬深さによって直径減少量が異なった原因としては、攪拌による溶融亜鉛の泡立ちの影響が考えられる。るつぼ内の溶融亜鉛の液面は、実験開始時には薄い酸化皮膜で覆われているだけだったが、実験終了時に観察したところ、攪拌した溶融亜鉛の液面は溶融亜鉛と酸化亜鉛を主成分とする厚さ50mm以上のメレンゲ状の泡で覆われていた。泡の下の溶融亜鉛に浸漬していた鋼材の浸漬深さは、当初50mmであったが泡の生成により液面が低下し、実験終了時には外見で約20mm程度となっており、上述した直径減少が大きい範囲とはほぼ一致した。鉄鋼材料の溶融亜鉛中への溶解の律速段階が液相における拡散である⁶⁾ことから、泡で被覆された範囲の鋼材の直径減少が小さかった原因は、気泡により鉄の拡散が抑制されたことによると推測する。

溶融亜鉛液面での泡成りは、攪拌なしの場合には発生しなかったが、攪拌した場合には攪拌速度の大小に関わらず発生した。泡層の厚さは実測できなかったが、攪拌速度の増加に

伴い厚くなる傾向であった。そこで、直径測定位置は、残存した鋼材の下端から約15mmの位置とし、攪拌速度による溶損速度の影響を調べた。

図5に鋼材を450℃の溶融亜鉛中で攪拌しながら浸漬した際の溶損速度 (g/mm²h) の影響を示す。鋼材の溶損速度は、攪拌速度の増加に比例して増加することが確認された。コーティング試料の耐溶損性評価に当たっては、82.4 mm/s攪拌よりも泡立ちが少なく、攪拌なしの浸漬と比較して2.5倍の溶損速度が得られていることから、試料攪拌速度が41.2 mm/sの条件について評価することとした。

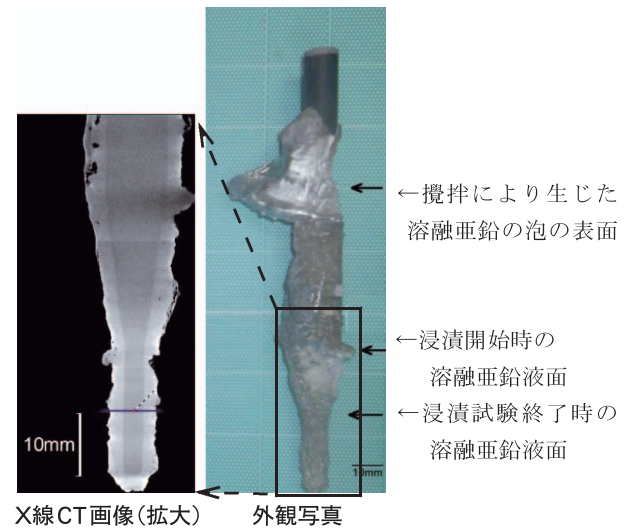


図4 溶湯中 82.4mm/s で 217 時間攪拌した鋼材

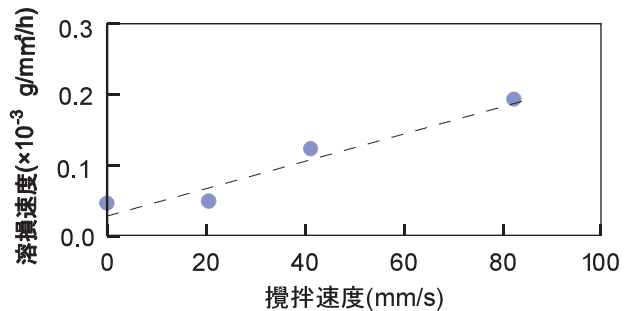


図5 鉄-溶融亜鉛相対速度による溶損速度の影響

3.2 アルミ铸铁によるコーティング方法の検討結果

まず、アルミ铸铁のコーティングのしやすさを検討することを目的として、鋼材を1350℃の2, 8, 18wt%Alアルミ铸铁に5秒攪拌浸漬して調査した。

図6に、鋼材を18wt%Alアルミ铸铁に浸漬して作製したコーティング試料の外観写真を示す。浸漬部すべての鋼材表面をコーティングすることができた。図7に、コーティングが不十分だった例として鋼材を8 wt%Alアルミ铸铁に浸漬して作製した試料の外観写真を示す。浸漬範囲の上下端から4分の1程度の範囲において全周に平滑なコーティングをす

ることができたが、中間付近では全周をコーティングできていない。2 wt%Al アルミ 鋳鉄を用いたコーティングは、8 wt%Al アルミ 鋳鉄と比較して被覆面積がさらに小さくなることがわかった。

図 8 に、上記 3 種の試料の浸漬中間部における X 線 CT 断面画像を示す。2 wt%Al アルミ 鋳鉄ではコーティング皮膜はほとんど確認できないが、浸漬したアルミ 鋳鉄のアルミニウム濃度の上昇に伴ってコーティング皮膜の厚さおよび被覆面積が増大している。この結果から、アルミ 鋳鉄によるコーティングにおいては、アルミニウム濃度が高いほど良好なコーティングが行えることがわかった。また、いずれの試料も鋼材の直径減少はごくわずかであった。

次に、コーティング皮膜厚さの増大を目的としてアルミ 鋳鉄浸漬時間を延長した場合の影響を調査した。例として図 9 に、鋼材を 1350℃ の 12wt%Al アルミ 鋳鉄に 10 秒及び 15 秒の攪拌浸漬によるコーティングを試みた試料の外観写真を示す。鋼材の直径が著しく減少したことがわかる。他のアルミニウム濃度のアルミ 鋳鉄においても同様であり、浸漬時間としては 10 秒以上は不適切であることがわかった。

以上のことから、18wt%Al アルミ 鋳鉄に 5 秒間浸漬したコーティング試料を耐溶損性評価試験に供することとした。



図 9 12wt%Al アルミ 鋳鉄に 10 ～ 15sec 浸漬した鋼材

3.3 コーティング試料の耐溶損性評価試験結果

図 10 に、18wt%Al アルミ 鋳鉄によりコーティングした試料の溶融亜鉛への浸漬前及び 12、24、36 時間浸漬後の X 線 CT 断面を示す。EPMA (日本電子(株)製 JXA-8100) 分析と突合した結果、中央の灰色が鋼材、その周囲の暗灰色が FeAl コーティング層、亜鉛浸漬後試料の最外層に代表される明灰色が鉄-亜鉛合金層を示していることがわかった。

コーティング層の形状及び厚さに着目すると、24 時間までは試験開始前と同程度の形状及び厚さを維持していたが、鋼材との間に黒色に観察される空隙を生じている。36 時間後の断面画像では、コーティング層の残存部における厚さは維持されているが、コーティング層の剥離及び鋼材とコーティング層との空隙への亜鉛の浸入が観察された。以上の結果より、耐溶損性を維持するためには、剥離や空隙の発生を予防する施工方法が必要であると考えられる。比較のために、図 11 に 8 wt%Al アルミ 鋳鉄によるコーティング試料の浸漬前及び 12 時間、24 時間浸漬後の X 線 CT 断面を示す。12 時間浸漬後の断面画像からは、コーティングは残存しているが、24 時間浸漬後にはコーティングの多くが剥離したことが観察される。2 wt%Al アルミ 鋳鉄によるコーティング試料も同様に 24 時間浸漬後にはコーティングの多くが剥離していた。

鋼材の溶損状況を確認することを目的として、アルミニウム濃度を変えて作製したコーティング試料の鋼材について、X 線 CT による直径測定から算出した鋼材溶損量の時間変化を調査した。図 12 にその結果を示す。18wt%Al アルミ 鋳鉄によるコーティングは、促進条件であるにも関わらず 24 時間まで高い耐溶損性を示した。3.1 で述べたとおり、本実験における促進条件は 2.5 倍であるので、実工場のような静止状態に近い条件においては、約 60 時間までの耐溶損性が見込まれる。2 wt%Al 及び 8 wt%Al アルミ 鋳鉄によるコーティングは 12 時間まで耐溶損性を示した。

溶損開始後のグラフの傾きに着目すると、コーティングなしのグラフと同様に直線的であることが確認できる。このことから、コーティング皮膜は試験中のある時点においてほぼ一斉に剥離したと考えられる。グラフの立ち上がり時期に着目すると、溶損開始は X 線 CT 撮影のタイミングとほぼ一致することから、コーティングの剥離は溶融亜鉛への出し入れに伴う温度変化に起因すると思われる。コーティング試料のアルミニウム濃度の違いによる溶損量の影響に着目すると、

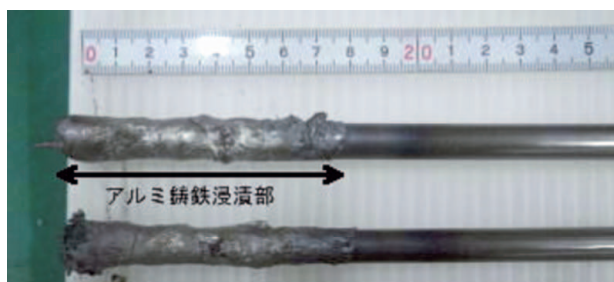


図 6 作製した 18wt%Al アルミ 鋳鉄によるコーティング試料

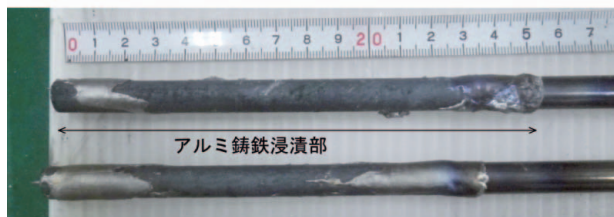
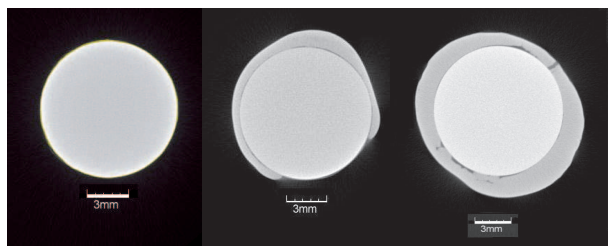


図 7 作製した 8 wt%Al アルミ 鋳鉄によるコーティング試料



2wt%Al アルミ 鋳鉄 8wt%Al アルミ 鋳鉄 18wt%Al アルミ 鋳鉄

図 8 各濃度によるアルミ 鋳鉄コーティング試料の断面比較

アルミニウム濃度が高いものほど鋼材の溶損量は低下した。これは、アルミ鋳鉄のアルミニウム濃度が高いほどコーティングの経時残存面積が増大したことによると思われるが、さらなる検証を要する。

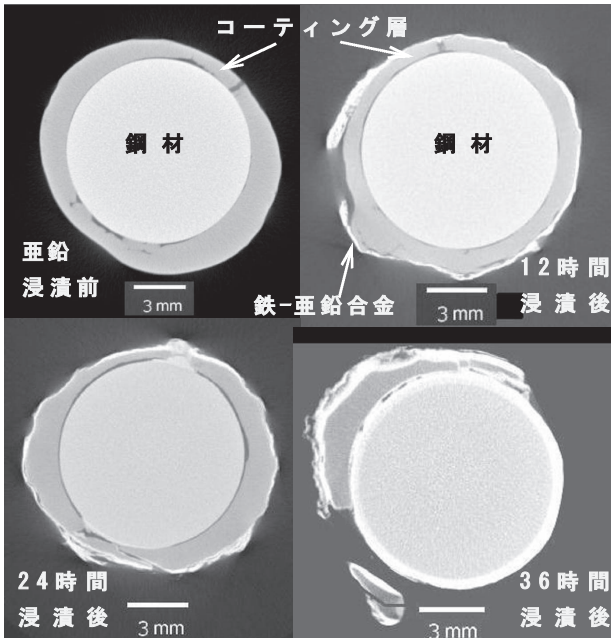


図10 浸漬試験した18wt%Alコーティング試験片のX線CT断層画像

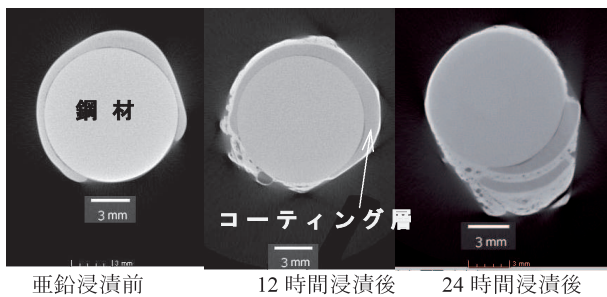


図11 浸漬試験した8wt%Alコーティング試験片のX線CT断層画像

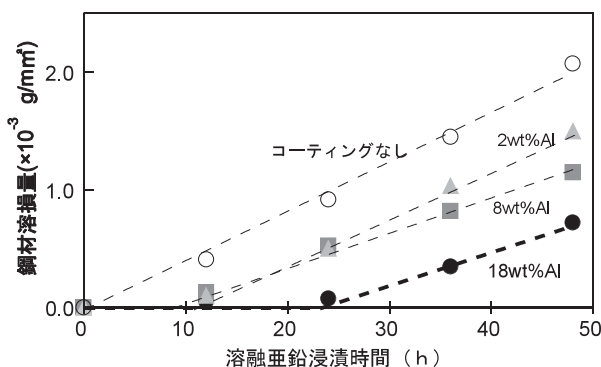


図12 促進溶損試験における各種コーティング試料の鋼材の溶損量の変化

3.4 考察

3.3で述べたように、耐溶損性を維持するためには剥離や空隙の発生を予防する施工方法が必要であると考えられる。

そこで、鋼材とアルミ鋳鉄の間に空隙が生じた原因の1つと考えられる線膨張率の違いについて調査した。図13に、熱変位測定装置（株式会社日立ハイテクサイエンス製 TMA7000）を用いて測定したアルミ鋳鉄におけるアルミニウム濃度と線膨張率との関係を示す。鋼材の線膨張率が $12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ であるのに対し、アルミ鋳鉄の線膨張率はアルミニウム濃度の増加に伴い上昇し、 $15 \sim 23 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ であった。試料作製後の冷却時に界面で剥離するように微細な空隙が発生し、直径測定時の冷却・再加熱により空隙が拡大して剥離に至ったと考えられる。このことから、コーティングの際の温度管理などにより剥離の抑制及びコーティング厚さの均一化を図ることや、鋼材側から外層に向かってアルミニウム濃度が増加するようにFe-Al合金層を調整することなどにより耐久性の向上が見込まれる。

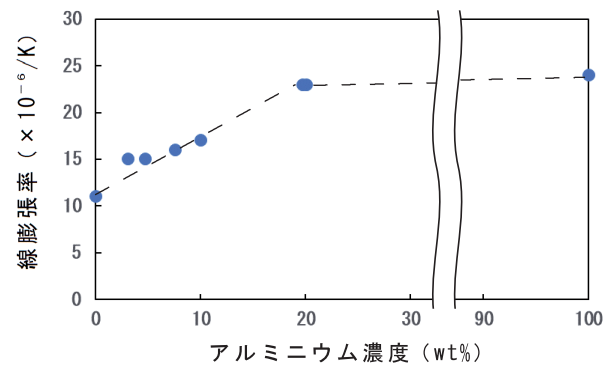


図13 アルミ鋳鉄におけるアルミニウム濃度と線膨張率との関係

4. まとめ

溶融亜鉛による鋼製熱電対保護管の耐溶損性を向上させるためのコーティング技術の開発を行い、次の結果を得た。

- 1) 試料の溶損速度を比較するための促進試験法を開発した。
- 2) 溶融亜鉛中での溶損速度は、鉄-溶融亜鉛相対速度に比例して増大することがわかった。
- 3) 鉄と亜鉛の合金化を抑制し耐溶損性を付与する方法として鋼材と溶融亜鉛の間にFe-Al合金を介在させることに着目し、鋼材をアルミ鋳鉄溶湯に浸漬して表面にFe-Al合金層を溶着させるコーティング方法を開発した。
- 3) Fe-Al合金をコーティングした試料を用いて溶融亜鉛による促進溶損試験を行った結果、18wt%Alアルミ鋳鉄でコーティングした試料は溶湯浸漬後24時間まで高い耐溶損性を示した。

今後、耐久性向上のためコーティング方法を改良する予定である。

謝辞

(株)ディー・ビー・シー・システム研究所の成田社長（元北海道大学名誉教授）には、コーティングの材料選定において多大なご指導をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 特開2004-018886「耐食耐摩耗部材およびその製造方法」
- 2) 中川師夫, 酒井淳次 他: 溶融亜鉛中における各種材料の溶損及び摩擦・摩耗特性, 鉄と鋼, Vol.81 No.10, pp.989-994, (1995)
- 3) 板橋孝至, 高橋英徳 他: 溶融金属手接触させた鋼材のX線CT観察, (一社)北海道機械工業会 検査部会・鉄骨部会 第41回検査技術研究会資料, pp.9-11, (2021)
- 4) 貝沼亮介, 鉄鋼と溶融亜鉛間の反応拡散に関する基礎研究, 公益財団法人JFE21世紀財団 2008年度 技術研究報告書, pp.29-35
- 5) 名雪東彦, 鴨田秀一 他: 鋳造品の高品質・高機能化とその利用技術に関する研究, 平成9年度北海道立工業試験場事業報告書, 31PP, (1998)
- 6) 箕輪 晋, 小坂岑雄, 溶融亜鉛中の鉄の拡散と鋼材の溶解速度, 鉄と鋼, 第50年第10号, pp.1424-1428, (1964)

プレス加工シミュレーション活用技術の構築

鶴谷 知洋, 神生 直敏, 安田 星季

Development of Utilization Technology for Press Forming Simulation

Tomohiro TSURUYA, Naotoshi KAMIO, Seiki YASUDA

抄 録

難易度の高いプレス加工技術を確立する際、プレス加工シミュレーションを活用して実加工を減らすことで、金型や加工テストに係るコストと時間を削減し、効率化を図る取り組みが進められている。しかし、プレス加工シミュレーションにおいて、プレス加工を高精度に再現するにはパラメータ設定などが重要であり、これらはノウハウとなっている。

本研究では、プレス加工シミュレーションの最適パラメータ決定手法の確立を目的として、実加工品とシミュレーション結果の比較や多変量解析に基づいてパラメータの最適値探索を行い、効率的に精度の高いシミュレーション結果が得られることを確認した。

キーワード：プレス加工シミュレーション, 深絞り, 多変量解析

Abstract

For establishing a highly difficult press working technology, efforts are underway to reduce the cost and time required for dies and forming tests and to improve efficiency by utilizing press forming simulation. However, in press forming simulation, parameter setting is important to reproduce press forming with high accuracy, and these are know-how.

In this research, for the purpose of establishing the optimum parameter determination method for press forming simulation, the optimum parameter value search is performed based on the comparison of the actual machined product, the simulation result and the multivariate analysis. As a result, the simulation result with high efficiency and high accuracy is obtained.

KEY-WORDS : Press forming simulation, Deep drawing, Multivariate analysis

1. はじめに

プレス加工は、他の機械加工法と比較して加工速度が大きく低コストであることから、量産加工技術として広く普及している。特に深絞り加工は、金型間に材料を流入させることで立体形状を得る加工法であり、加工時間が短いため生産性が高く、また複雑形状の成形も容易なため、自動車部品をはじめとする多くの工業製品に適用されている¹⁾。ものづくりの現場では、製品の高度化、生産システムの自動化や高度化に伴い、各加工工程において高い加工精度が要求されており、プレス加工においても低コストかつ高生産性を保ちながらも加工精度の向上が求められている。深絞り加工において、しわや割れなどの代表的な不良なく高精度な加工を行うために

は、金型加工部の形状や潤滑状態、材料押さえ力など複数の加工パラメータの調整が必要であり、その決定には時間がかかる。そのため最近では、FEM等を用いた加工シミュレーションにより割れやしわなどの不良対策を金型の設計段階で反映させることで、製品開発のリードタイムとコストを削減する傾向が強い²⁾。また、加工シミュレーションの高精度化のため様々なモデルが提案されており³⁻⁵⁾、特に絞り工程の破断やしわ・面ひずみなどの不良は、加工シミュレーションにより実用的な精度の予測が可能となってきている⁶⁾。加工シミュレーションで高精度な結果を得るためにはパラメータの設定が重要であるが、設定値の決定方法はユーザー企業のノウハウとして公開されることはない。

本研究では、プレス加工の中でも深絞り加工を対象として、

事業名：経常研究

課題名：プレス加工シミュレーションを活用した深絞り加工の評価技術の構築

材料物性値の測定、実加工とシミュレーション結果の比較や多変量解析などを行い、高精度なプレス加工シミュレーション結果を得るために有効なパラメータおよびその効率的な最適値の導出方法を確立した。

2. 実験方法

2.1 深絞り加工

本研究の対象である深絞り加工は、図1に示すサーボプレス機（アイダエンジニアリング㈱製NC1-800(D))を用いて行った。サーボプレスの加圧能力は800kNで、エアダイクッションを備えている。材料は板厚1.0mmの2種類のアルミニウム合金A5052P-OおよびA5052-H32を使用した。ブランク材を図2に、加工品を図3に示す。加工条件と加工結果の関係に影響する要因を少なくするため、加工の種類は軸対称形状である円筒深絞りを選択した。加工に使用した金型の概略図を図4に示す。金型のダイは両面が使用でき、使用する面によって材料が引き込まれる際に接触するコーナー部（ダイR）を変えることができる。加工条件を表1に、実験条件を表2に示す。実験条件の水準について、加工速度はサーボプレス機の設定、材料押さえ力はダイクッションに供給する空気圧の設定、潤滑状態は潤滑油の使用有無により変更した。加工実験は実験条件の水準を組合せて行い、成形高さにより加工品を評価した。成形高さは、正常な成形の場合は天面を、割れが発生した場合は側面の割れ部分の高さをハイトゲージにて測定した。

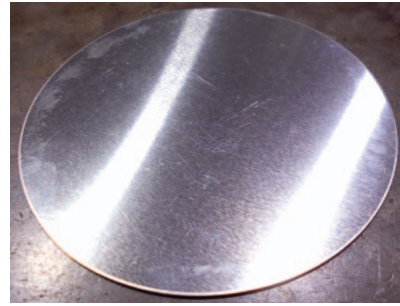


図2 ブランク材



図3 加工品（円筒深絞り）

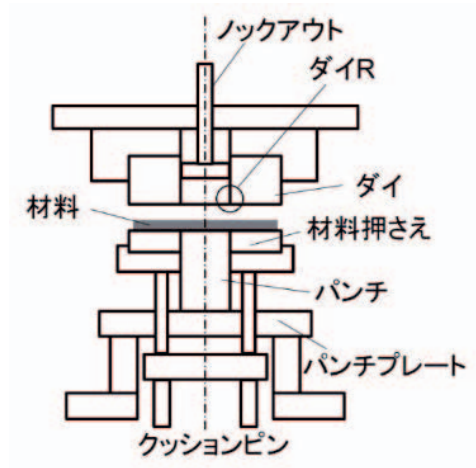


図4 金型概略図



図1 サーボプレス機

表1 加工条件

絞り径	φ54mm
ブランク径	φ110mm
絞り深さ	27mm
ダイ高さ	320mm
ストローク	160mm
潤滑油	カータジル GONEAT

表2 実験条件

加工速度	83.6mm/sec - 419mm/sec
材料押さえ力	6.25kN - 50kN
潤滑状態	低摩擦・高摩擦
ダイR	6・9

2.2 材料物性値測定

プレス加工シミュレーションを行う際、主に表3に示すシミュレーションパラメータの設定が必要となる。通常、設定の目安が示されているか、あらかじめ用意されている標準値があるためシミュレーションの実行は可能であるが、シミュレーション結果と実際の加工結果を比較し、シミュレーション結果の精度向上のため設定値の変更を繰り返すことが必要となる。そこで、シミュレーションパラメータの設定目安や標準値を用いたシミュレーション結果と、パラメータの実測値を用いた場合のシミュレーション結果を比較するため、材料物性値を測定した。測定は、引張試験機（㈱島津製作所製AG-100kNXplus）による応力-ひずみ曲線、摩擦摩耗試験機（新東科学㈱製HHS2000）による摩擦係数を対象として行った。使用した引張試験機を図5に、引張試験片形状を図6に、摩擦摩耗試験機を図7に示す。応力-ひずみ曲線は、14B号試験片を用いて試験速度20mm/minで測定した。摩擦係数は、φ6のステンレスプローブを使用して測定した。

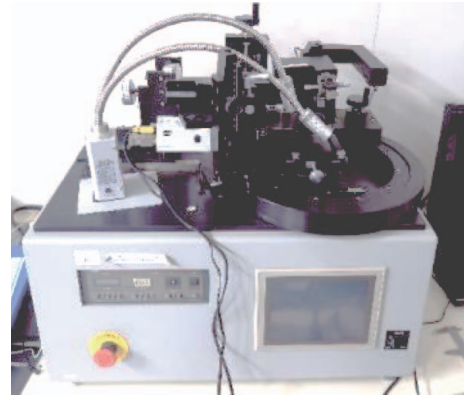


図7 摩擦摩耗試験機

表3 主なシミュレーションパラメータ

板厚	摩擦係数
質量密度	異方性特性
ヤング率	ブランクメッシュサイズ
ポアソン比	要素タイプ
降伏応力	断面方向積分点数
材料モデル	アワグラスタイプ
ストローク速度	ホルダ荷重

2.3 プレス加工シミュレーション

プレス加工シミュレーションには、㈱JSOL製JSTAMP/NV2.8を用いた。シミュレーション画面の一例を図8に示す。本ソフトウェアは、材料データベースが標準で用意されており、われやしわの評価のほか、ブランク展開、トリムライン展開ができる。また、シェルとソリッドの両要素が使用でき、しごき加工にも対応している。プレス加工シミュレーションの設定を表4に示す。プレス加工シミュレーションのパラメータ設定は推奨設定を基本とし、材料物性値や加工条件はシミュレーションソフトウェアで用意されている標準値で実行したほか、実測値でも実行した。



図5 引張試験機

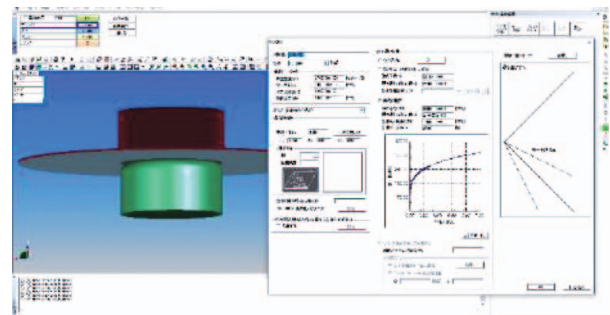


図8 プレス加工シミュレーション画面

表4 プレス加工シミュレーション設定

板厚	1.0mm
ブランクメッシュサイズ	0.7mm
材料モデル	Hill' 48 (タイプ37)
異方性特性	r : 0.85
要素タイプ	低減積分-ねじり剛性
断面積分点数	5層
アワグラスタイプ	剛性型

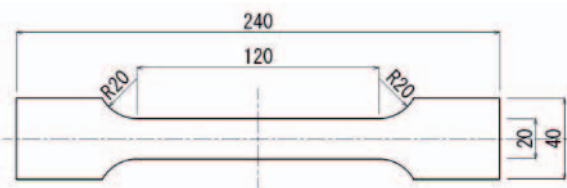


図6 引張試験片形状

2.4 パラメータ選定および最適値導出

実加工に近い高精度なシミュレーション結果を得るためには、シミュレーションのパラメータ値の調整が必要である。またその調整は、シミュレーション活用の主な目的がリード

タイムとコストの削減であることから、効率的に行う必要がある。そのため、シミュレーションに標準で用意されている値を用いた場合と実測値を用いた場合のシミュレーション結果を比較し、精度や効率の観点から評価するとともに、精度に影響が大きいパラメータを重回帰分析により調べた。またそのパラメータについて、高精度なシミュレーション結果が得られる最適値の導出方法を検討した。

3. 実験結果と考察

3.1 深絞り加工

実験で得られた A5052P-H32 の加工品の例を図 9，図 10 に、A5052P-O の加工品の例を図 11～13 に示す。A5052P-H32 については、実験条件に関わらず全て割れが発生した。A5052P-H32 は伸びが小さいことから、本実験の環境では深絞り加工で正常な加工品を得ることが困難と考えられる。一方、A5052P-O については、実験条件によって正常な加工、加工終期での割れ発生、加工初期での割れ発生が見られた。A5052P-H32 と比べて十分な伸びがあることから、実験条件の選択により正常な加工が得られると言える。A5052P-O の実験条件と成形高さの測定結果を表 5 に示す。成形高さが 27 mm 程度であれば正常な加工であったことを示しており、ダイ R が大きく潤滑状態が低摩擦の場合が該当していることがわかる。これは、パンチにより材料がダイ内に押し込まれる際、材料が破断することなく流入できたためと言える。



図 11 A5052P-O 正常



図 12 A5052P-O 加工終期での割れ



図 13 A5052P-O 加工初期での割れ



図 9 A5052P-H32 加工中期での割れ

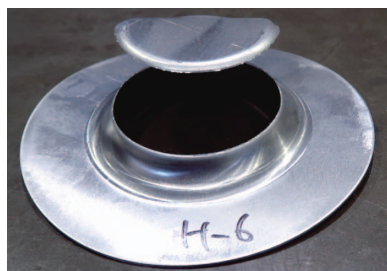


図 10 A5052P-H32 加工初期での割れ

表 5 実験条件と成形高さ (A5052P-O)

ダイ R	材料押さえ力 (kN)	加工速度 (mm/sec)	潤滑状態	成形高さ (mm)	加工状態
9	6.25	83.6	低摩擦	27.20	正常
9	6.25	419	低摩擦	27.16	正常
9	50	83.6	低摩擦	27.00	正常
9	50	419	低摩擦	26.98	正常
9	6.25	83.6	高摩擦	11.34	割れ
9	6.25	419	高摩擦	10.68	割れ
9	50	83.6	高摩擦	9.58	割れ
9	50	419	高摩擦	9.70	割れ
6	6.25	83.6	高摩擦	9.82	割れ
6	6.25	419	高摩擦	11.06	割れ
6	50	83.6	高摩擦	8.32	割れ
6	50	419	高摩擦	8.34	割れ
6	6.25	83.6	低摩擦	15.50	割れ
6	6.25	419	低摩擦	19.38	割れ
6	50	83.6	低摩擦	12.48	割れ
6	50	419	低摩擦	18.52	割れ

3.2 材料物性値測定

引張試験の結果を図14, 図15に示す。横軸はひずみ, 縦軸は応力である。図14はA5052P-H32, 図15はA5052P-Oの結果である。A5052P-H32はA5052P-Oと比較して伸びは小さいが引張強さが大きい。これらの引張試験の結果から得られた材料特性値を表6に示す。A5052P-H32の伸びが小さく, 前節の深絞り加工実験の結果の裏付けができた。次に摩擦係数の測定結果を表7に示す。摩擦係数については, 供試材それぞれについて3回測定した結果の平均である。A5052P-H32は潤滑油の有無の影響が小さいが, A5052P-Oでは潤滑油なしの場合, ありの場合と比べて摩擦係数が2倍程度となった。これは, A5052P-Oが柔らかくプローブの影響を受けやすいためと考えられる。

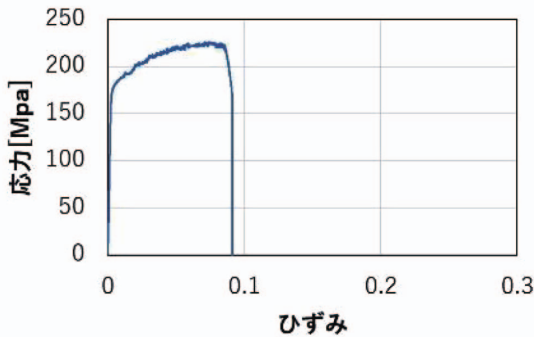


図14 応力-ひずみ線図 (A5052P-H32)

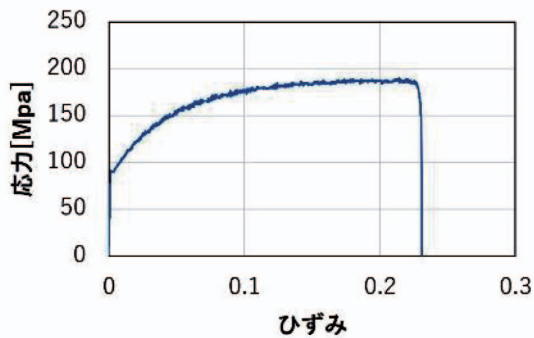


図15 応力-ひずみ線図 (A5052P-O)

表6 材料特性の実測値

	A5052-H32	A5052P-O
引張強さ (MPa)	226	190
伸び (%)	9	23
ヤング率 (MPa)	78000	69000

表7 摩擦係数

	A5052-H32	A5052P-O
潤滑油なし	0.114	0.279
潤滑油あり	0.142	0.145

3.3 プレス加工シミュレーション

A5052P-Oを用いたシミュレーション結果の例を図16~18に示す。A5052P-H32については, 深絞り加工の実験結果から本実験環境で正常な加工品を得ることが困難なため除外した。図において, 濃い部分は割れが発生した場所を示している。加工速度, 引張強さ, 伸び, ヤング率の標準値を用いた実験結果を表8に, 実測値を用いた結果を表9に示す。本研究で設定した条件では, 標準値を用いた場合と実測値を用いた場合で成形高さに大きな違いはなかった。また, 深絞り加工と同様に, 加工条件によって正常な加工, 加工終期での割れ発生, 加工初期での割れ発生が見られ, その傾向は似ていることから, シミュレーションの再現性は高いことが確認できた。

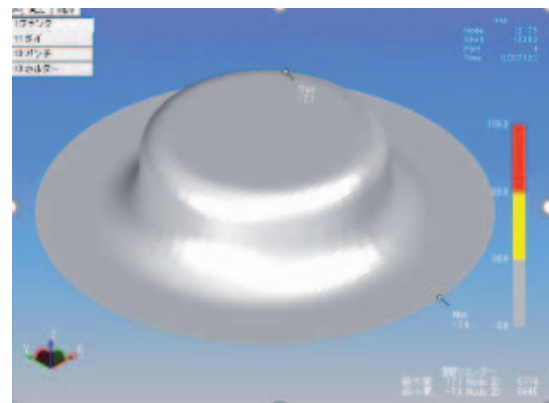


図16 シミュレーション結果 (正常)

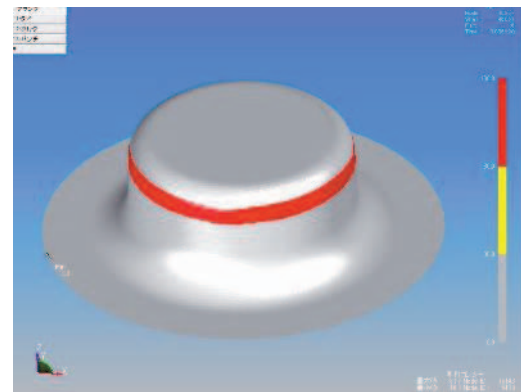


図17 シミュレーション結果 (加工終期での割れ)

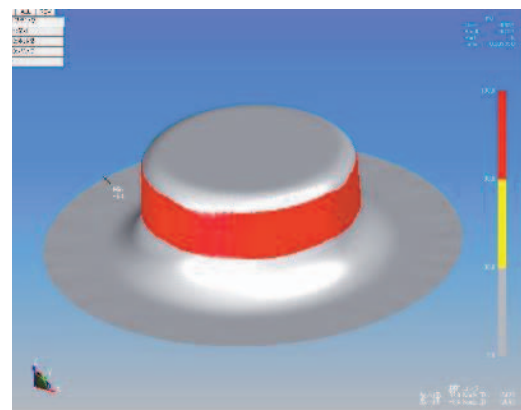


図18 シミュレーション結果 (加工初期での割れ)

表8 シミュレーション結果 (標準値)

ダイ R	材料押さえ力 (kN)	加工速度 (mm/sec)	摩擦係数	成形高さ (mm)	加工状態
9	6.25	5000	0.15	27.03	正常
9	6.25	10000	0.15	27.03	正常
9	50	5000	0.15	18.88	終割
9	50	10000	0.15	18.93	終割
9	6.25	5000	0.28	11.63	初割
9	6.25	10000	0.28	11.14	初割
9	50	5000	0.28	11.63	初割
9	50	10000	0.28	11.12	初割
6	6.25	5000	0.28	8.98	初割
6	6.25	10000	0.28	9.28	初割
6	50	5000	0.28	8.96	初割
6	50	10000	0.28	9.20	初割
6	6.25	5000	0.15	27.02	正常
6	6.25	10000	0.15	27.01	正常
6	50	5000	0.15	17.78	終割
6	50	10000	0.15	18.96	終割

初割：加工初期での割れ
終割：加工終期での割れ

表9 シミュレーション結果 (実測値)

ダイ R	材料押さえ力 (kN)	加工速度 (mm/sec)	摩擦係数	成形高さ (mm)	加工状態
9	6.25	5000	0.15	27.03	正常
9	6.25	10000	0.15	27.04	正常
9	50	5000	0.15	18.72	終割
9	50	10000	0.15	18.93	終割
9	6.25	5000	0.28	11.58	初割
9	6.25	10000	0.28	11.12	初割
9	50	5000	0.28	11.59	初割
9	50	10000	0.28	11.14	初割
6	6.25	5000	0.28	8.85	初割
6	6.25	10000	0.28	9.19	初割
6	50	5000	0.28	8.92	初割
6	50	10000	0.28	9.16	初割
6	6.25	5000	0.15	27.01	正常
6	6.25	10000	0.15	27.01	正常
6	50	5000	0.15	17.74	終割
6	50	10000	0.15	18.98	終割

初割：加工初期での割れ
終割：加工終期での割れ

3.4 パラメータ選定および最適値導出

表9および表10のシミュレーション結果により、加工速度、引張強さ、伸び、ヤング率の標準値と実測値では成形高さに大きな違いが見られなかったことから、迅速にシミュレーション結果を得るためには、材料特性値を測定せずに標準値を用いても支障がないと考えられる。実際の深絞り加工と標準値を用いたシミュレーション結果の比較を図19に示す。横軸は加工条件を組み合わせた加工サンプル、縦軸は成形高さを示す。横軸の中心線より左側はダイ R9、右側はダイ R6の結果を示している。なお、成形高さ27mm付近は正常な加工、それより小さい場合は加工中に割れが発生したことを示してお

り、割れが発生した時点での高さである。実際の深絞り加工とシミュレーション結果の誤差は、正常な加工と加工終期に割れが発生する加工条件の近くでのみ大きくなっている。よって、シミュレーション結果の精度向上のためにはパラメータ値の微小な修正が必要と言える。そこで、重回帰分析により成形高さに与える影響が大きいパラメータを導出し、値の調整を試みた。多変量解析の結果を表10に示す。目的変数は成形高さである。t 値から、成形高さへの寄与度は摩擦係数、材料押さえ力、ヤング率の順に大きく、特に摩擦係数の t 値が大きかった。そこで、調整するパラメータを摩擦係数一つにし、実際の深絞り加工とシミュレーション結果の迅速な合わせこみを行った。手順として、ダイ R9 で正常な深絞り加工品が得られたもののシミュレーションでは割れが発生した 2 サンプルを対象に、摩擦係数を初期値の 0.15 から変化させてシミュレーションを行い、実加工とシミュレーション結果の誤差が小さくなる摩擦係数を調べた。その結果、摩擦係数 0.12 の場合に最も誤差が小さくなった。次に、ダイ R6 を対象に摩擦係数を R9 と同じ 0.12 を適用したところ、実加工とシミュレーション結果の誤差が大きくなった。シミュレーションの調整パラメータを摩擦係数に固定していることから、ダイ R が加工結果に与える違いを摩擦係数で表現するため、基準となる摩擦係数とダイ R を用いて式(1)により適用する摩擦係数 μ を算出し最適値とした。その結果、ダイ R6 の場合の摩擦係数の最適値は 0.18 となった。この値を適用したシミュレーション結果を図20に示す。誤差の平均値は、最適化前が 19.1%、最適化後が 10% 以内となり、高精度なシミュレーション結果が得られた。

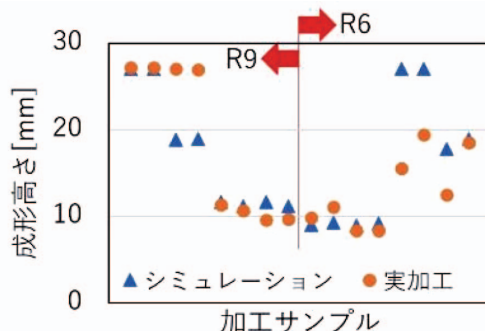


図19 深絞り加工とシミュレーション結果の比較

表10 多重回帰分析結果

説明変数	t 値
ダイ R	1.68
摩擦係数	-15.92
材料押さえ力	-4.88
加工速度	0.16
引張強さ	-0.64
伸び	-0.64
ヤング率	2.28

$$\mu = \mu_0 \frac{R_0}{R}$$

μ_0 基準摩擦係数 R_0 基準ダイR

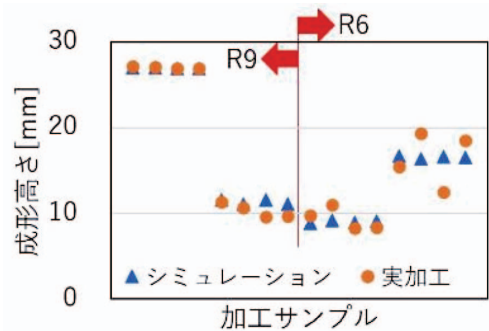


図 20 シミュレーション最適化の結果

4. おわりに

本研究では、深絞り加工を対象として実加工とシミュレーション結果の比較から、誤差の傾向やパラメータとシミュレーション結果の関係などを明らかにした。また、多変量解析によりシミュレーションパラメータの寄与度を明らかにし、調整するパラメータを絞った効率的な最適値導出手法を検討し適用した。その結果、誤差が10%以内となり、高精度なシミュレーション結果を得ることができた。

今後は、被加工材を変えた適用実験を行い、見出した手法の汎用性を検証する予定である。

謝辞

本研究で使用した引張試験機は、競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 河本基一郎・宮坂卓嗣・山道 顕・野田拓也・北山哲士・小山浩季・山崎光悦：深絞り加工におけるブランク形状と分割可変ブランクホルダー力の同時最適化，日本機械学会論文集，Vol. 83, No. 845 (2017)
- 2) 小山純一・柳 明：金型内蔵マイクロセンシングシステムの開発，塑性加工学会誌，Vol.51, No.596, pp.60-64, (2010)
- 3) Khelifa, M., Oudjene, M: Numerical damage prediction in deep-drawing of sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, Vol.200, pp.71-76, (2008)
- 4) Gallee, S., Pilvin, P.: Deep drawing simulation of a metastable austenitic stainless steel using a two-phase model, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, pp. 835-843, (2010)
- 5) Karupannasamy, D.K., Hol, J., de Rooij, M.B., Meinders, T., Schipper, D.J.: Modelling mixed lubrication for deep drawing processes, Wear, Vol. 294-295, pp. 296-304, (2012)
- 6) 守屋岳志・高橋進・桑原利彦，自動車パネル絞り成形工程の成形条件自動最適化技術の開発，塑性加工学会誌，Vol.49, No.574, pp.53-57, (2008)

青銅AM造形における空隙率と機械的性質

鈴木 逸人, 戸羽 篤也

Porosity and Mechanical Properties in Additive Manufacturing of Bronze

Hayato SUZUKI, Atsuya TOBA

抄 録

近年, 付加製造 (Additive manufacturing; AM, 3Dプリント) 技術の発展により, 従来の加工方法では実現が困難であった複雑形状の製品が製作可能となった。金属材料の造形には, 主にレーザー粉末床溶融結合法 (Laser beam-powder bed fusion; LB-PBF) が用いられる。最近になり, 銅合金のLB-PBFによる造形技術が注目され, 国内外で研究開発が行われているが, 報告例は少ない。特に, レーザー吸収率の低い銅系材料を200 W以下の低出力装置で造形を行った報告はなく, これまでの400 W以上の装置と同じように高密度な造形物を製作可能であるかは未知である。そこで本研究では, 最大出力200 Wの低出力LB-PBF装置を用いて, 青銅粉末で造形を行い, レーザー照射条件と空隙率の関係を整理した。さらに, 空隙率の異なる試験片を作製し, 青銅粉末AM造形物における空隙率が機械的性質に与える影響を検討した。

キーワード: 付加製造, レーザー粉末床溶融結合法, 青銅, 空隙率, 機械的性質

Abstract

In recent years, additional manufacturing technology has been developed, and it has become possible to manufacture products with complicated shapes, which was difficult with conventional processing methods. Laser beam-powder bed fusion (LB-PBF) is mainly used for metal materials. Copper alloy have been used in various industrial applications for their unique properties. However, there are few reports of using copper alloys in LB-PBF. In particular, there are no reports using copper alloy, which is low laser absorption, with a low-power LB-PBF device of 200 W or less. It is necessary to examine that the low-power device manufacture a high-density bulk body like a general 400 W device. In this study, the porosity under each laser condition was investigated in order to product the high-density bulk sample using the low-power LB-PBF of bronze. In addition, tensile tests were conducted on specimens with different porosities to investigate the effect of porosity on mechanical properties in bronze AM sample.

KEY-WORDS : Additive manufacturing, Laser beam-Powder bed fusion, Bronze, Porosity, Mechanical property

1. はじめに

アディティブマニュファクチャリング (Additive manufacturing; AM) は, 国内では3Dプリントもしくは付加製造とよばれ, 3次元モデルデータから材料を積層することで物体を造形する手法である。国際規格およびJISでは, 材料の積層方法により7種類の方式に分類されている¹⁾。これらの方式のうち複雑形状や微細構造, 3次元配管の造形に

は, 造形テーブル上に敷き詰められた金属粉末を溶融, 積層させる粉末床溶融結合法 (Powder bed fusion; PBF) (図1) が用いられる。粉末床溶融結合法には, 熱源として主にYbファイバーレーザー (波長1030-1070 nm) が使用されるレーザー粉末床溶融結合法 (Laser beam-powder bed fusion; LB-PBF) と電子ビームを用いる電子ビーム粉末床溶融結合法 (Electron beam-powder bed fusion; EB-PBF) がある。LB-PBFは, 窒素またはアルゴン雰囲気中で造形が

事業名: 経常研究

課題名: 銅系粉末積層造形物の特性評価 (平成30~令和元年度)

行われ、マルエージング鋼やSUS316L, Al合金, Ti合金, Co-Cr合金, インコネルなどの研究開発が行われてきた²⁻⁵⁾。EB-PBFは、真空中で造形を行うことから、Ti合金や純銅, インコネルなどで研究開発⁶⁻⁸⁾が行われ、LB-PBFでの造形が困難な高活性、高融点金属で活用が期待されている。LB-PBFは、50 μm以下の金属粉末を用いて造形を行うため造形精度や微細構造の再現性が良好であるのに対して、EB-PBFは40-100 μmの粉末を用いるため造形精度に劣るが、造形速度が速くかつ材料選択が広い特徴がある。

金属AMで最近注目されている材料に銅系材料がある。銅系材料は、優れた熱・電気特性を有し、多くの工業製品で使用されてきた。EB-PBFと比較して高精度かつ微細構造の造形が可能なLB-PBFによる銅系材料の報告は非常に少ない。これは、LB-PBF装置で使用されるYbファイバーレーザーの銅に対する吸収率が非常に低いためである。LB-PBFにより造形を行うには、材料粉末の融点までエネルギーを与えるため、吸収率の低さを補う高い出力が必要である。最近になり、1,000Wレーザーを用いることで純銅のLB-PBF造形が可能との報告⁹⁾がなされた。しかし、この出力のLB-PBF装置は国内に数台であり、また、世界の稼働台数も非常に少ない。一般的なLB-PBF装置は、最大出力400W程度が標準的である。一般的なLB-PBF装置で銅系材料の金属AMを行う場合、純銅と比較して融点が低く、レーザー吸収率が向上する銅合金を用いるのが現実的である。国内では、最大出力400Wの装置を用いて、機械的性質と導電率を両立させたCu-Cr合金による積層造形法の特許¹⁰⁾が報告された。熱交換機や放熱部品の一体化や複雑化による性能向上、放電加工電極の一体化製作や微細孔流路を用いた加工くず排出による長寿命化¹¹⁾など、銅合金による金属AM製品開発が期待され、研究開発が行われている。海外でも同様に、一般的な最大出力のLB-PBF装置を用いて、レーザー照射条件や粉末状態など各種造形条件が銅合金造形物の組織や特性に与える影響に関して研究報告^{12,13)}がなされており、銅合金のAM造形が注目されている。

LB-PBF装置は、価格が数千万から1億円程度と高価な装置であり、技術普及を加速させるため装置の低価格化が望まれている。最近、少量で複数の金属を配合して行う材料開発やAM造形物のラボ開発機を想定し、レーザー最大出力200W以下で造形体積を小型化することで低価格化した装置の開発が進められ、一部は販売が開始されている。銅合金のAM造形は、レーザー吸収率が低いために400Wから1,000Wの装置で研究がされてきた。これまで、200W以下の低出力における銅合金のAM造形に関する報告はない。材料開発や装置低価格化に向け、200W以下の低出力装置で従来装置と同様に高密度な造形物を製作可能であるか検討することは、金属AM技術の発展、普及に非常に重要である。

本研究では、最大出力200WのLB-PBF装置による青銅粉

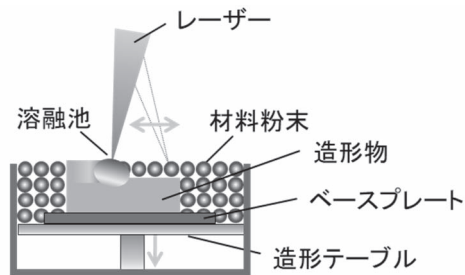


図1 レーザー粉末床溶融結合法模式図

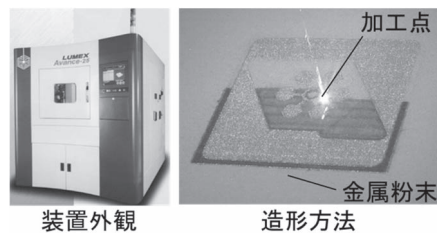


図2 造形装置外観

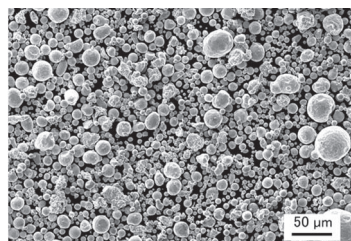


図3 青銅粉末 SEM 画像

末を用いたAM造形について、高密度な造形物を製作可能か明らかにする。さらに、レーザー照射条件を操作することで空隙率の異なる試験片を作製し、空隙率が造形物の機械的性質に与える影響について報告する。

2. 実験方法

2.1 造形装置および造形材料

本研究では、レーザー粉末床溶融結合法造形装置 (Lumex Avance-25, 松浦機械製作所) を使用した (図2)。本装置は、最大出力200WのYbファイバーレーザー発振器を使用し、最大造形サイズがW256×D256×H185mmである。造形材料は、ガスアトマイズ法で製作された球形の青銅粉末 (Bro-At-200, 福田金属箔粉工業) を用いた (図3)。粉末組成および見掛密度、粒径割合を表1に示す。

表1 青銅粉末組成および見掛密度、粒径割合

Cu [%]	BAL.
Sn [%]	9.48
見掛密度 [g/cm ³]	4.97
粒径 63 μm 以上 [%]	4.3
粒径 45 μm 以上 [%]	15.4
粒径 45 μm 未満 [%]	80.3

2.2 試験片

本研究では、各レーザー照射条件における造形物内部の空隙を観察する「空隙率計測試験片」と空隙率と機械的性質の関係を検討する「引張試験片」の2種類の試験片を用いた。試験片は、ベースプレート（材質：S50C）上に造形した。空隙率計測試験片の造形では125×125×t10mm、引張試験片では125×125×t20mmのベースプレートを使用した。空隙率計測試験片は、図4(a)に示す9×9×H6mmの直方体とし、各レーザー照射条件で3個ずつ製作した。図4(b)にベースプレート上の試験片造形配置を示す。x方向に材料供給リコーターが移動し、z方向を積層方向とした。横方向の3個を一組として同一レーザー照射条件で造形した。図4(c)に示す造形後試験片のサポート部分をベースプレートから金属用バンドソーを用いて切り離し、空隙率計測に使用した。引張試験片は、図5(a)に示す丸棒試験片とし、平行部がφ6×25mm、つかみ部直径10mm、全長60mmとした。試験片下部にサポートを配置し、造形後に切断した。図5(b)に試験片の造形配置を示す。x方向に材料供給リコーターが移動し、z方向を積層方向とした。各レーザー条件で4本ずつ造形を行った。図5(c)に示す造形した試験片は、仕上げ加工を行うために全体が目標寸法に対して0.5mm大きくなるように製作した。4本のうち3本の表面を旋盤、サンドペーパーで滑らかになるまで仕上げ加工し、引張試験を行った。残り1本は、空隙率計測および組織観察に使用した。

2.3 造形条件

図6にレーザー照射の模式図を示す。LB-PBFで設定可能なレーザー照射条件パラメータには、レーザー出力 P [W]、レーザー集光径 D [mm]、レーザー走査速度 v [mm/s]、レーザー走査間隔 e [mm]、積層厚さ d [mm]がある。これらに加え、LB-PBFの造形条件探索には、式(1)に示す金属粉末床の単位体積に与えるエネルギー量であるエネルギー密度 q [J/mm³]が用いられる¹⁴⁾。

$$q = \frac{P}{evd} \quad (1)$$

本研究では、レーザー集光径に対して、走査間隔を正規化するため、式(2)で示すレーザーパス重複率 L [%]を定義した。

$$L = \left(1 - \frac{e}{D}\right) \times 100 \quad (2)$$

レーザーパス重複率100%は、直前の走査パスと同じ位置でレーザーが走査することを意味する。また、0%は、直前のレーザー走査パスと重なることなく、既成層に接するようにレーザーが照射されることを意味する。

表2に空隙率計測用試験片のレーザー照射条件を示す。本研究では、レーザーパワー160W、積層厚さ0.05mmを固定し、レーザー集光径、レーザー走査速度、レーザー走査間隔を変量した。各レーザー集光径とレーザーパス重複率に対し

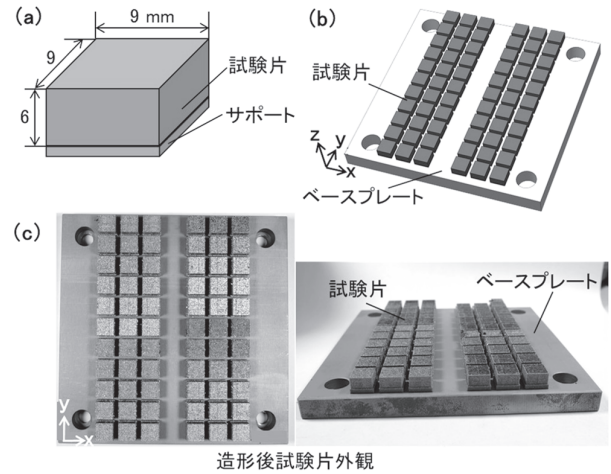


図4 空隙率計測試験片

(a) 試験片寸法, (b) 試験片造形配置, (c) 造形後試験片外観

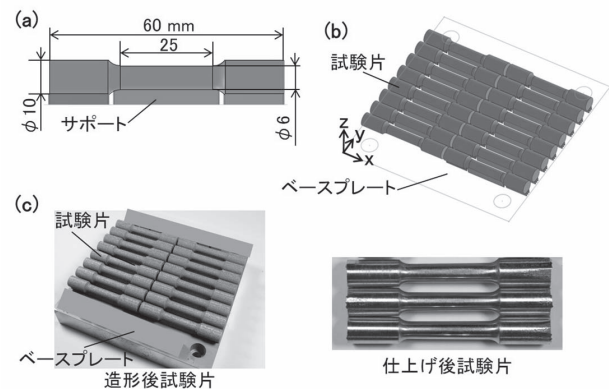


図5 引張試験片

(a) 試験片寸法, (b) 試験片造形配置, (c) 造形後試験片外観

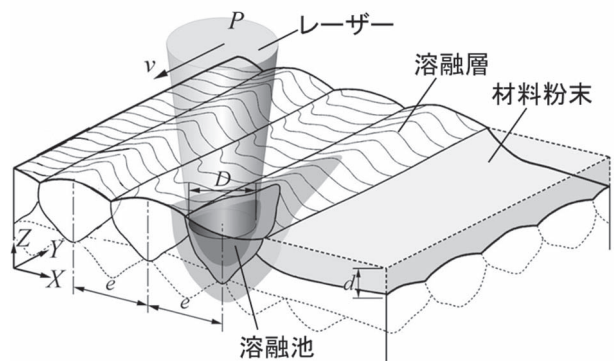


図6 レーザー照射模式図

て所定のエネルギー密度となるようにレーザー走査速度を設定した。表3に引張試験片のレーザー照射条件を示す。空隙率計測用試験片を計測した結果から、空隙率0.5~5%となる4種類のレーザー照射条件を選定した。

造形雰囲気は、窒素雰囲気とし、造形室内の酸素濃度は2 vol%であった。各層のレーザー走査方向は、図7に示すように、xまたはy方向に走査させ、各層毎で走査方向が異なるように設定した。

表2 空隙率計測試験片レーザー照射条件

レーザー出力 P [W]	160
積層厚さ d [mm]	0.05
レーザー集光径 D [mm]	0.1, 0.2
レーザーパス重複率 L [%]	0, 25, 50, 75
エネルギー密度 q [J/mm ³]	20, 40, 60, 80, 100, 120

表3 引張試験片レーザー照射条件

試験片番号	S1	S2	S3	S4
レーザー出力 P [W]			160	
積層厚さ d [mm]			0.05	
レーザー集光径 D [mm]			0.1	
レーザーパス重複率 L [%]	0	25	0	25
エネルギー密度 q [J/mm ³]	120	100	80	60
設定空隙率 [%]	0.5	1.0	2.1	4.8

2.3 空隙率計測

試験片の縦断面を高速切断機で切断し、樹脂埋め、研磨を行った後、金属顕微鏡により倍率100倍で試験片の断面組織写真を10視野ずつ撮影した。撮影した10視野の画像から部位に偏りが無いよう5視野を選択し、画像解析ソフト(QuickGrainPro, イノテック)により二値化処理を行い空隙部と金属母材部の面積比率を測定した。この測定を1個の試験片に対し3回行い、3回の平均を試験片の空隙率とした。

2.4 引張試験

引張試験は、万能材料試験機(オートグラフ AG-250kND, 島津製作所)を用いてヘッド移動速度0.5mm/minで破断まで行った(図8)。ひずみは、ビデオ式非接触伸び幅計(TRViewX, 島津製作所)で試験片表面に貼付けたマーカーシールより測定した伸びから算出した。弾性率は、応力-ひずみ曲線において、0.01%ひずみと0.15%ひずみ間の傾きから求めた。

3. 結果・考察

3.1 各レーザー照射条件における空隙率

図9に各レーザー照射条件における試験片3個の空隙率の平均と標準偏差を示す。エネルギー密度が高く、レーザーパス重複率が低いほど空隙率が減少した。また、同一のレーザーパス重複率では、集光径が小さいほど空隙率が減少する傾向となった。本研究で行った条件では、最小空隙率が0.5±0.2%, 最大空隙率が30.6±2.2%となった。

金属AMでは、空隙率0.5%以下で高密度な造形体とされる。本研究で計測された空隙率は、0.5±0.2%であったことから、最大出力200WのLB-PBF装置を用いて青銅粉末の高密度体造形が可能であることが明らかとなった。また、レー

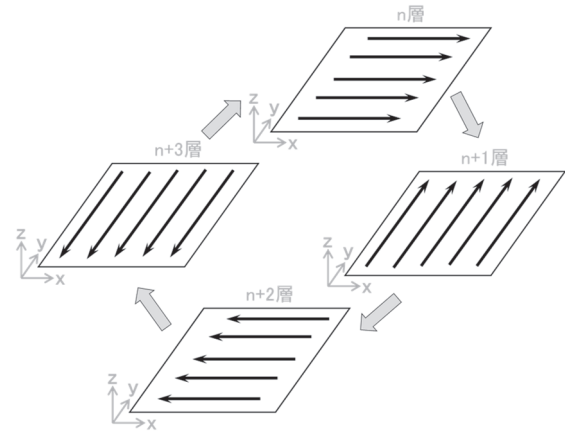


図7 各層レーザー走査方向



図8 引張試験装置

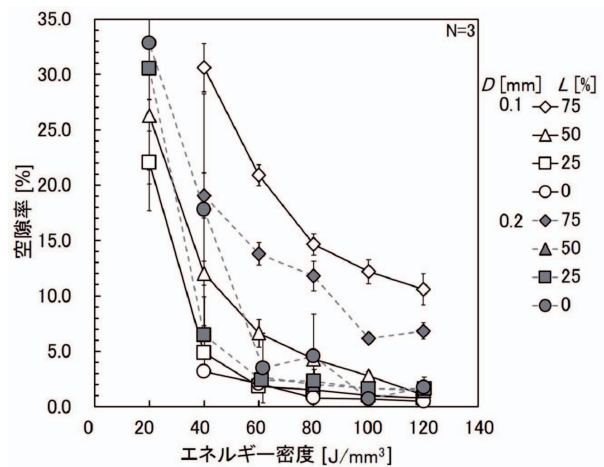


図9 各レーザー照射条件における空隙率

ザー照射条件を操作することで、空隙率30.6%の低密度体から高密度体まで空隙率を制御可能であることが示された。さらに、同一のエネルギー密度で造形した場合、レーザーパス重複率が小さいほど空隙率が減少する傾向にあることがわかった。LB-PBFの造形プロセスにおいて、レーザーは既成層、溶融池表面、粉体層に照射される。このうち、粉体層では、照射されたレーザーが層内に射し込み、内部で反射が繰り返されるため、見かけ上レーザー吸収率が向上する¹⁵⁾。レーザーパス重複率が大きい場合、レーザー吸収率の低い既成層側でレーザーが反射され、見かけの吸収率の高い粉体層側でレー

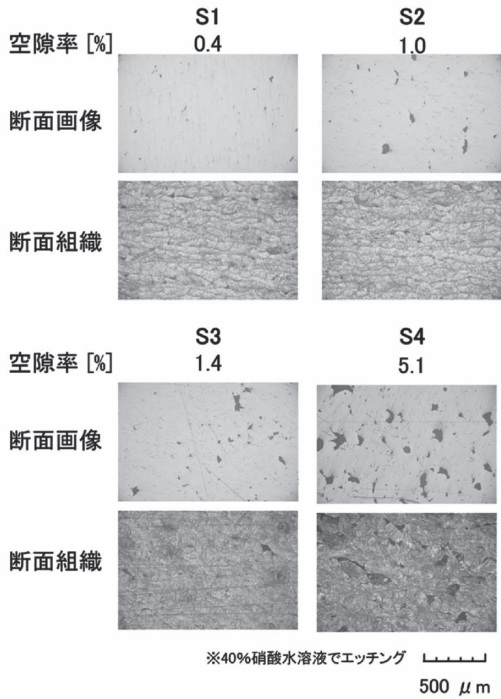


図10 引張試験片の断面画像および組織，空隙率

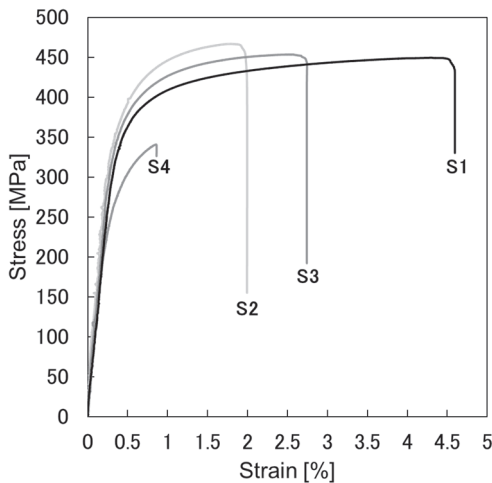


図11 応力-ひずみ曲線例

レーザー光の差し込みが減少する。このため，粉末溶融に使用されるエネルギーが減少し，未溶融領域が増加するためレーザーパス重複率が小さいほど空隙率が減少する傾向となったと考えられる。本研究では，エネルギー密度 $120\text{J}/\text{mm}^3$ までの検討を行った。式(1)に示した通り，レーザー出力およびレーザー集光径，レーザーパス重複率を一定とした場合，さらに高いエネルギー密度にするには，レーザー走査速度を小さくする必要がある。一方で，レーザー走査速度を低下させた場合，吸収率の低い既成層にレーザーが長く照射されるため，反射が強くなる。一定以上のレーザーが反射した場合，装置光源を破損する恐れがある。このため， $120\text{J}/\text{mm}^3$ より大きいエネルギー密度に関する検討については今後の課題とし，装置の安全を担保した後に実施することとした。

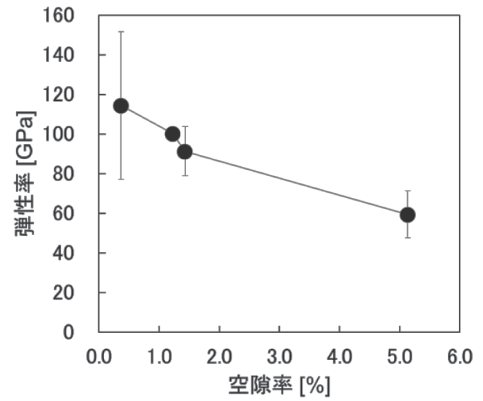


図12 各空隙率における弾性率

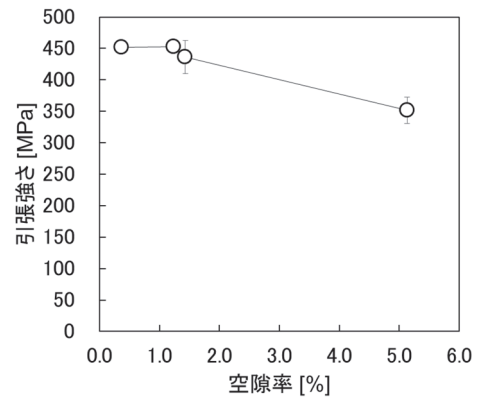


図13 各空隙率における引張強さ

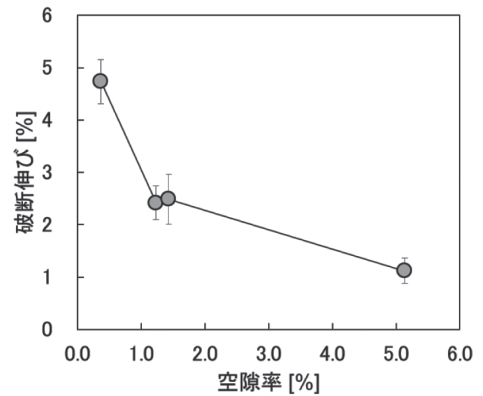


図14 各空隙率における破断伸び

3.2 空隙率と機械的性質の関係

図10に引張試験片の断面画像および組織，断面画像から計測した空隙率を示す。エネルギー密度の低下に従い，未溶融型の角のある空隙が観察された。また，組織は金属AMで一般的なうろこ状組織であり，凝固セルの大きさに違いは認められなかった。図11にS1からS4試験片の応力-ひずみ曲線の例を示す。応力-ひずみ曲線は，一般的な銅合金と同じ曲線を示した。図12-14に各空隙率における弾性率，引張強さ，破断伸びの3試験片の平均と標準偏差をそれぞれ示す。弾性率と引張強さは，空隙率1%程度まではほぼ変化せず，その後減少する傾向となった。破断伸びは，空隙率1%程度

で急激に低下し、その後も減少する傾向となった。本研究の条件では、空隙率0.4%において最も良好な機械的性質を示し、引張強さ451.6MPa、破断伸び4.7%であった。

成分組成が類似しているCAC502A (Cu: 87-91%, Sn: 9-12%, Pb: 0.05-0.2%) の引張強度と破断伸びの規格値は、それぞれ195MPa以上と5%以上である¹⁶⁾。本研究で金属AMにより製作した試験片の引張強度は、同程度の成分組成における銅合金鋳物の規格値より良好な値を示した。また、空隙率5.1%の試験片における引張強さも、この規格値よりも高い値となった。破断伸びは、空隙率0.4%でこの規格値と同程度の値を示した。低空隙率の金属AMの造形物は、同程度の成分組成の鋳造材と比較して、引張強度が高く、同程度の伸びを示すことがわかった。

Scudinoらは、一般的なLB-PBF装置を用いて、Cu-10Sn粉末をレーザー出力271W、レーザ走査速度210mm/s、レーザー集光径0.1mm、レーザー走査間隔0.9mm、積層厚さ0.09mmで造形を行った場合、空隙率0.3%を実現した¹²⁾。この条件で製作した試験片の引張試験を行った結果、引張強さ420MPa、破断伸び17%であった。本研究の結果は、破断伸びが低下しているが、引張強さは同程度であった。破断伸びは、内部の空隙の量の他、位置、形状、大きさが影響を与える。これらは、試験片の造形条件や積層方向により変化する。本研究の破断伸び低下については、積層方向等の影響を検討することで改善できる可能性があり、今後の課題とした。本研究により、最大出力200W以下の低出力装置を用いて、一般的な装置と同程度の高密度な造形物を製作可能であることがわかった。

4. おわりに

本研究は、最大出力200Wの低出力LB-PBF装置を用いて、青銅粉末で造形を行い、レーザー照射条件と空隙率の関係を整理した。さらに、空隙率の異なる試験片を製作し、青銅粉末AM造形物における空隙率が機械的性質に与える影響を検討した。検討の結果、低出力LB-PBF装置を用いて、最大出力400W程度の装置と同様に高密度な造形物を製作可能であることを実証した。さらに、空隙率が機械的性質に与える影響を明らかにした。今後、残された課題の解決、技術移転を行い、金属AM技術の発展、普及に努める予定である。

参考文献

- 1) JIS B 9441: 2020 付加製造 (AM)
- 2) 戸羽篤也, 鈴木逸人: 鉄系粉末を用いた積層造形法による内部三次元構造を有する金属部材の製作, 鋳造工学, Vol.91 No.9, pp.652-658, (2019)
- 3) 鈴木逸人, 戸羽篤也: SUS316Lを用いた金属AM法に

- おけるレーザー照射条件が空隙率および機械的性質に与える影響, 鋳造工学, Vol.91 No.9, pp.659-663, (2019)
- 4) 木村貴広, 中本貴之: 金属粉末レーザ積層造形法により作製したAl-10%Si-0.4%Mg合金の組織と機械的性質, 粉体および粉末冶金, Vol.61 No.11, pp.531-537, (2014)
- 5) 中野貴由, 石本卓也: チタンならびにチタン合金のAdditive Manufacturingプロセス, まてりあ, Vol.58 No.4, pp.181-187, (2019)
- 6) 萩原幸司, 石本卓也, 中野貴由: 金属積層造形法における形状・組織制御による異方性付与, まてりあ, Vol.57 No.4, pp.145-149, (2018)
- 7) M. Lodes, R. Guschlbauer, C. Körnerb: Process development for the manufacturing of 99.94% pure copper via selective electron beam melting, Materials Letters, Vol.143, pp.298-301, (2015)
- 8) 千葉晶彦: 電子ビーム積層造形技術による金属組織の特徴, 計測と制御, Vol.54 No.6, (2015)
- 9) T. Ikeshoji, K. Nakamura, M. Yonehara et al.: Selective laser melting of pure copper, JOM, Vol.70, pp.396-400, (2018)
- 10) 特許第6532396号 銅合金粉末, 積層造形物の製造方法および積層造形物
- 11) 柳田大祐, 南久, 内田壮平: 金属積層造形法による電極製作と高能率放電加工, 型技術, Vol.36 No.5, pp.64-66, (2021)
- 12) S. Scudino, C. Unterdörfer, K.G. Prashanth et al.: Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze, Materials Letters, Vol. 156, pp. 202-204, (2015)
- 13) A. Popovich, V. Sufiiarov, I. Polozov et al.: Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy, Materials Letters, Vol. 179, pp.38-41, (2016)
- 14) V. Matilainen, H. Piili, A. Salminen et al.: Characterization of process efficiency improvement in laser additive manufacturing, Physics Procedia Vol.56, pp.317-326, (2014)
- 15) 池庄司敏孝: レーザ積層造形における溶融・凝固現象, スマートプロセス学会誌, Vol.6 No.3, pp. 109-114, (2017)
- 16) JIS H 5120: 2016 銅及び銅合金鋳物

金属積層造形品の表面粗さに及ぼすレーザー照射条件の影響

戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 飯野 潔

Effect of Laser Irradiation Conditions to Surface Roughness of Metallic AM Products.

Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Kiyoshi IINO

抄 録

金属粉末を用いたAM造形技術において、造形条件が製作物の空隙や機械的性質、寸法精度に与える影響について多くの報告が見られる。しかし、金属AM造形物の表面粗さに関する研究報告はあまり見られない。そこで、本研究では、レーザー光を用いた粉末床溶融結合（LB-PBF）方式による金属AM造形物の表面粗さに及ぼすレーザー照射条件の影響を調べた。実験では、レーザーの集光径、走査速度、走査間隔、走査オフセット、走査経路を変えて試験片を積層造形し、その外形寸法と表面粗さを測定した。外形寸法計測の結果、レーザー照射による熱影響範囲を推定する実験式を明らかにした。表面粗さ測定の結果、造形物の表面粗さはレーザー照射による熱影響幅と輪郭走査経路の影響を受け、これらの条件を適切に選定することにより、造形表面の平均粗さを10 μ m以下で造形できることを明らかにした。

キーワード：金属3D造形，マルエージング鋼，表面粗さ，レーザー照射条件，輪郭走査経路

Abstract

In metal AM technology, there are many reports on the effects of manufacturing conditions on the porosity, mechanical properties, and dimensional accuracy of products. However, there are few reports on the surface roughness of metal AM products. This study investigated the effect of laser irradiation conditions on the surface roughness of metal AM products in laser beam-powder bed fusion (LB-PBF). Specimens with different laser diameters, scanning speeds, scanning pitch, scanning path offsets, and scanning path strategies were prepared and measured the external dimensions and surface roughness. As a result of the external dimension measurement, the empirical formula for estimating the heat effect range due to laser irradiation was clarified. As a result of the surface roughness measurement, it was found that the surface roughness was affected by the thermal influence width of the laser and the outline scanning path. The average roughness of the product was 10 μ m or less by adjusting the laser scan conditions and the outline scanning path.

KEY-WORDS : Metal 3D-Printing, Maraging Steel, Surface Roughness, Conditions of Laser Irradiation, Outline Path

1. はじめに

金属AM（Additive Manufacturing）方式の一つである粉末床溶融結合法（Powder Bed Fusion, 以下「PBF」という）は、金属粉末を水平に敷き詰めた上面にレーザー光線あるいは電子線を選択的に照射して所用の断面形状を溶融固化し、これを積み重ねることで実体を製作する加工法である^{1,2)}。レーザー光を用いるPBF造形では、レーザー集光径

を小さく絞り、高いエネルギー密度でレーザー照射することで、瞬時に材料を昇温し、金属粉末の溶解と既造形材との溶接を行う。このときの金属粉末下層の既造形材の溶融量は、レーザー照射による入熱量に依存するため、内部欠陥の少ない良好品質の造形物を製作するには、造形時のレーザー照射条件を造形金属材料の特質に合わせて適切に制御する必要がある。当场でも、これまでにいくつかの金属粉末材料を対象に造形試験を実施し、PBF造形におけるレーザー照射条件

事業名：連携協定活用型研究 ほか

課題名：積層造形技術の迅速性・複雑形状造形の優位性を活かしたCO₂生成反応容器の最適設計に関する研究（H30～）

と造形物の金属組織や機械的性質との関係について知見を得た^{3~5)}。

これからの金属AM応用展開として、航空宇宙関連分野における部品製作などへの利用が期待されている⁶⁾。航空宇宙関連の製品や部品に求められる機能としては、第一に軽量化が挙げられるが、流体を扱うことが想定される部品では造形物の表面粗度が重要な評価対象となる可能性が高い。

金属AM造形におけるレーザー照射条件が造形物の金属組織、機械的性質へ及ぼす影響に関する研究報告は多く見られるが、金属AM造形物の寸法精度や表面粗度に関する研究報告例は極めて少なく、金属AM造形物の表面粗さに関しては、積層造形法の特徴から理論的に考察した報告⁷⁾や内部構造の特定の部位に着目した報告例⁸⁾が見られるものの、造形物の外観表面性状に関して実際の造形試験に基づく報告例はみられない。

本報では、金属AM造形（PBF）法で製作した試料の寸法と表面粗さの計測結果から、レーザー照射条件が金属AM造形物の寸法精度、表面粗度へ及ぼす影響について調査したので報告する。

2. 金属AM造形における表面粗さ形成メカニズム

本研究の前提として、レーザー光によるPBF造形法における造形物製作過程とその表面粗さ形成メカニズムの考え方について概説する。

レーザー光によるPBF造形法では、造形層ごとに所定断面形状をハッチング走査で塗りつぶすようにレーザー光を照射した後、断面形状の輪郭に倣って単線レーザー光を照射して一層分の造形を終了する。ハッチング走査は、レーザー集光径と同等の走査間隔を設定し、所定の幅の中で折り返すようにレーザー光を照射するもので、最上層の金属粉末を面状に溶融・堆積していくプロセスに用いられる。通常、ハッチング走査の軌跡は矩形で構成されるので、断面形状の外周は、レーザー集光径あるいはハッチング走査間隔に従った矩形段

差を有する形状になっている。一般に造形物を製作するための各水平断面の輪郭形状は曲線が多いので、所望の造形物形状を得るために、この矩形段差を滑らかに補間する目的で造形断面形状の輪郭を単線レーザー照射するプロセスを追加する。

図1は、造形層ごとの本体ハッチング走査を終えた後、輪郭走査による造形状態を示す模式図である。図中の ϕD は輪郭走査時のレーザー集光径、 d は一層ごとの積み増し厚さ、 c は造形物の設計形状に対する基準寸法となる境界と輪郭走査経路とのオフセット量、 s は輪郭レーザー照射の熱影響によって形成される輪郭形成領域の厚さを示す。

輪郭端部にレーザー光を照射すると、その一部は既に所定断面のレーザー光ハッチング走査等で溶融・堆積処理を終えた部位（以下「既成層」という）と、もう一部は未溶融の金属粉末が敷かれている部位を加熱する。すなわち、輪郭レーザー照射によって投入された熱量は、既成層の再溶融と輪郭端部付近の金属粉末を溶融または半溶融した金属粉末の融着に消費される。このとき、既成層と金属粉末層とで見かけの熱容量や熱伝導率が異なり⁹⁾、既成層側よりも金属粉末層側の方が昇温し易い。図1に示す「熱影響を受ける粒子」の量や輪郭形成領域の厚さは、輪郭走査におけるレーザー光照射熱量の大小と、輪郭走査パスの既成層端部との位置関係により変化する。最外殻の未溶融金属粉末がその形状を保ったまま融着すると、造形物の表面粗さをより粗くすることが推定される。すなわち、造形物最外殻形成時の輪郭レーザー照射において、半溶融融着する金属粉末の量を減らすことにより造形物表面粗さの改善効果が期待できると考える。

以上の仮説を踏まえ、レーザーPBF造形におけるレーザー照射条件が造形物の表面粗さに及ぼす影響を調べる実験を行った。

3. 実験方法

試験片は、(株)松浦機械製作所製金属粉末光造形複合加工装置（図2、LUMEX Avance-25）により、金属粉末材料にマルエージング鋼粉末（粒径30~50 μ m）を使用して製作した。

試験片の形状・寸法は、図3に示すように、外形寸法を10mm \times 20mm、肉厚3mmの口の字矩形形状とした。試験片の造形は、125 \times 125 \times t20mmの鋼製基板（ベースプレート）上に、最初の1mmの高さまでを後で切り離すためのサポート部とし、その上方向に12mmの高さで積層造形した。積層造形一層当たりの高さを0.05mmとし、各層の断面をレーザーハッチング照射した後、図4の輪郭パス#1で示すように設計矩形寸法の外側全周に $c = 0 \sim 0.06$ mm オフセットした走査経路を設定して単線レーザー照射を行った。また、試験片の下方約半分に対応する6.25mmの高さまでは、図4の輪郭パス#2で示すように、輪郭パス#1のさらに外側に所定の距離だけオフセットした走査経路を設定して再度単線レーザー

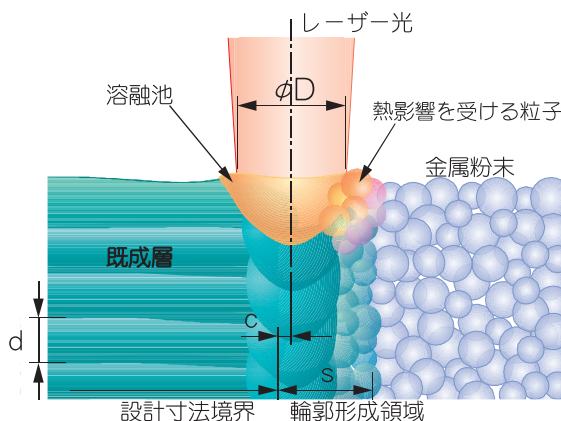


図1 造形表面粗さ形成メカニズムの模式図

照射を行った。輪郭パス#2の設計寸法からのオフセット量は、試験片の手前長辺（以下「-Y面」という）から右辺にかけて図4のaで示す間隔を空けた経路と、奥手長辺（以下「+Y面」という）から左辺にかけて同図bで示す間隔を空けた経路とを設定した。

試験片の造形は、図5に示すように、横4個×縦4列を等間隔に配列し、金属粉末材料を上面に敷き詰める操作（リコート）の際、試験片上面角辺へのリコーターブレードの衝突を緩和させるために、粉末のリコート方向に対して、長手方向を右回りに30°傾けて配置した。各試験片には、便宜上、図5の座標系に対して「#yx」の様式で試料番号を付与した。

各試験片の造形に用いたレーザー照射条件を表1に示す。レーザー出力 P は、試験片本体造形、輪郭照射ともに160Wとした。試験片本体の造形に関するレーザー照射条件は、レーザー集光径 D を0.15~0.30mmに変化させ、これに合わせてレーザーハッチング走査間隔 e を調整した。レーザー光走査速度 v は、次式で計算されるレーザー光与熱密度 q が概ね 5 J/mm^2 になるように設定した。

$$q = \frac{P}{ev} \quad (\text{式1})$$

輪郭パス#1のレーザー照射条件は、レーザー集光径 D_1 を試験片本体造形と同じ条件とし、レーザー走査速度 v は、次式で計算される単線レーザー光与熱密度 q_s が概ね 4 J/mm^2 となるように設定した。

$$q_s = \frac{P}{vD} \quad (\text{式2})$$

輪郭パス#2のレーザー照射条件は、レーザー集光径 D_2 を輪郭パス#1照射径の3分の2とし、レーザー走査速度 v は、単線レーザー光与熱密度（式2） q_s が概ね 2.5 J/mm^2 となるように設定した。

図4のa, bで示した輪郭パス#2の本体造形輪郭からのオフセット量は、同図cで示す輪郭パス#1のオフセット量と輪郭レーザー集光径とを考慮して表1に示す数値を設定した。

造形した試験片の表面粗さの測定は、(株)ミットヨ製表面粗さ計（SV-648型）を用い、-Y面と+Y面について輪郭パス#1のみのレーザー照射で積層造形した試験片の上半分の面（以下「上部位面」という）と、輪郭パス#2のレーザー照射を追加して造形した試験片の下半分の面（以下「下部位面」という）に対してそれぞれ3回の粗さ測定を行い、最大粗さ R_z 、平均粗さ R_a の平均値を求めた。

試験片表面粗さの測定に先立って、輪郭走査のレーザー照射条件と輪郭形成領域厚さとの関係を知るため、試験片の寸法計測を行った。試験片寸法の測定は、各試験片の上部位面と下部位面に対して試験片長辺方向と短辺方向の外形幅をマイクロメータでそれぞれに対して3回計測し、その平均値を求めた。



図2 金属粉末積層造形装置の外観
(株)松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25)

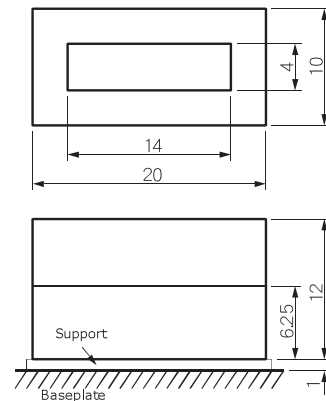


図3 試験片造形寸法

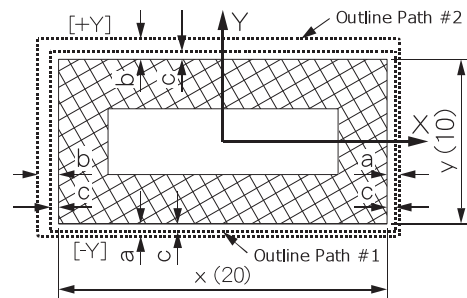


図4 輪郭レーザー照射パス

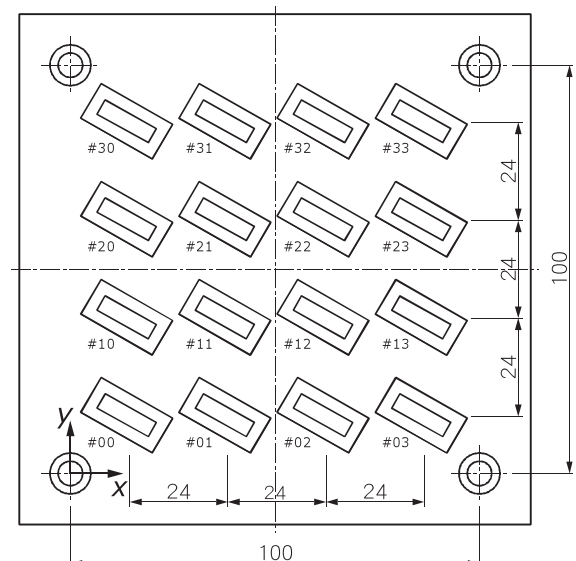


図5 試験片造形配置図

表 1 試験片造形に用いたレーザー照射条件

試料番号	試験片本体造形				輪郭パス#1			輪郭パス#2			
	出力 P[W]	集光径 D[mm]	走査速度 v[mm/s]	走査間隔 e[mm]	集光径 D ₁ [mm]	走査速度 v ₁ [mm/s]	オフセット c [mm]	集光径 D ₂ [mm]	走査速度 v ₂ [mm/s]	オフセット a [mm]	オフセット b [mm]
#00	160	0.30	128	0.25	0.30	133	0.00	0.20	320	0.05	0.08
#01							0.02			0.12	0.15
#02							0.04			0.19	0.22
#03							0.06			0.26	0.29
#10		0.24	160	0.20	0.24	167	0.00	0.16	400	0.04	0.06
#11							0.02			0.10	0.12
#12							0.04			0.16	0.18
#13							0.06			0.22	0.24
#20		0.18	213	0.15	0.18	222	0.00	0.12	533	0.03	0.05
#21							0.02			0.08	0.10
#22							0.04			0.13	0.15
#23							0.06			0.18	0.20
#30		0.15	320	0.10	0.15	267	0.00	0.10	640	0.02	0.03
#31							0.02			0.06	0.07
#32							0.04			0.10	0.11
#33							0.06			0.14	0.15

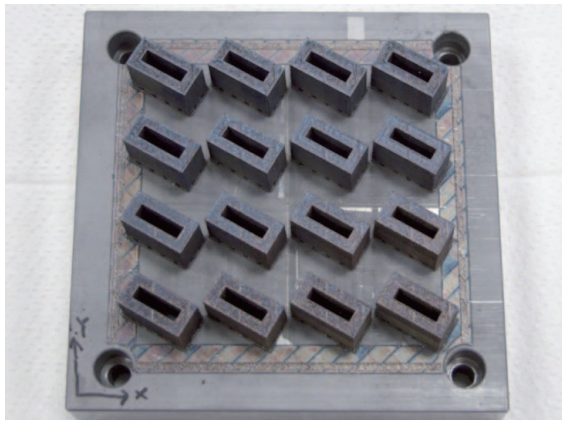


図 6 造形試験片の外観



図 7 造形試験片の側面写真

表 2 試験片の外形寸法測定結果

試料番号	輪郭パス#1		輪郭パス#2	
	短辺[mm]	長辺[mm]	短辺[mm]	長辺[mm]
#00	10.517	20.466	10.575	20.505
#01	10.653	20.711	10.706	20.692
#02	10.724	20.759	10.863	20.876
#03	10.738	20.682	10.795	20.919
#10	10.459	20.413	10.489	20.377
#11	10.568	20.532	10.557	20.634
#12	10.608	20.587	10.603	20.773
#13	10.663	20.748	10.697	20.684
#20	10.276	20.268	10.293	20.367
#21	10.415	20.517	10.404	20.399
#22	10.475	20.558	10.499	20.489
#23	10.542	20.480	10.584	20.534
#30	10.269	20.245	10.289	20.264
#31	10.344	20.348	10.343	20.376
#32	10.395	20.384	10.440	20.456
#33	10.436	20.455	10.504	20.604

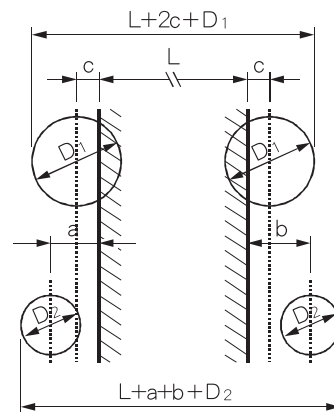


図 8 レーザー集光径・輪郭パスと造形寸法の関係

4. 実験結果と考察

4.1 試験片外形寸法計測とレーザー照射条件の影響

レーザー照射条件を変えて製作した試験片の外観を図 6 に示す。また、図 7 に試料番号 #0x 側から見た側面の外観を示す。この写真で各試験片中断に上下に領域を分ける線が見えるが、これは輪郭走査条件の違いによる上部位面と下部位面の分岐線である。

試験片を鋼製基板から切り離した後、各試験片の上部位面と下部位面のそれぞれに対して長辺と短辺の外形寸法を測定した。計測結果を表 2 に示す。

試験片の外形寸法計測面は、積層断面を鉛直方向に積み上げて形成した面であるから、その外形寸法は積層断面の最外

周輪郭レーザー照射経路と単線レーザー照射による輪郭形成領域の厚さで決定される。寸法測定における両端面の輪郭走査経路間の距離とレーザー集光径とから推測される外形寸法は、レーザー集光径とその照射によって溶融・溶着する線幅

が等しいと仮定した場合、上位面の外形寸法 M_1 と下部位面の外形寸法 M_2 は、図8に示すように、基準寸法 L 、輪郭パス#1のオフセット量 c 、輪郭パス#2のオフセット量 a, b 、レーザー集光径 D_1, D_2 から、それぞれ、

$$M_1 = L + 2c + D_1 \quad (式3)$$

$$M_2 = L + a + b + D_2 \quad (式4)$$

として計算できる。

本試験では、表1に示した実験条件により、上位面の最外周のオフセット量は、図5で示した試験片配列のX方向の向き（試料番号の1桁目の数値）にしたがって大きくなり、下部位面の最外周のオフセット量は各段の比較において試験片配列のY方向の向き（試料番号の2桁目の数値）にしたがって相対的に小さくした。一方、輪郭走査のレーザー集光径は、試験片配列のY方向の向きにしたがって小さくなるように設定した。外形寸法の実測値は、これら造形条件の違いで予測される寸法変化傾向と一致した。

試験片の外形寸法計測値を分析したところ、造形条件と外形寸法実測値の関係性について、長辺(x方向)、短辺(y方向)で傾向が大きく異なることを確認したので、寸法計測面の広い試験片短辺幅($L=10\text{mm}$)の計測値について以下の考察を進める。

前出の式3、式4で算出した試験片の外形寸法推測値（以下「理論寸法」という） y_t と、試験片Y方向の外形寸法実

測値 y_e を比較すると、いずれの計測においても理論寸法より実測値の方が大きくなった。実験に使用した造形装置のレーザー集光径の値は、アルマイト処理後黒色に着色したアルミニウム板表面に、出力160W、走査速度1,500mm/sでレーザー光を照射し、その溶融幅の実測値に基づいて設定する。これに対し、実験には熱特性の異なる鋼材を用いたこと、レーザー照射のエネルギー密度が異なることにより、実験条件に設定したレーザー集光径の値よりも造形時の溶融造形線幅が大きくなったと推定する。

理論寸法と実測値の差分を分析すると、上位面、下部位面いずれについても、造形時のレーザー集光径が大きいほど寸法実測値と理論寸法との乖離が大きくなる傾向が認められた。これは、レーザー集光径が輪郭形成領域の厚さに強く影響していると考えられたので、最外周の輪郭パス幅に対する寸法実測値 y_e の増分 Δy を以下の式で求め、輪郭照射レーザー集光径との関係を図9のグラフに整理した。

$$\text{上位面； } \Delta y = y_e - (L + 2c) \quad (式5)$$

$$\text{下部位面； } \Delta y = y_e - (L + a + b) \quad (式6)$$

輪郭パス#1、輪郭パス#2ともにレーザー集光径 D と Δy との間に比例関係が認められ、それぞれの比例定数は、輪郭パス#1で $k_1=2.019$ 、輪郭パス#2で $k_2=1.839$ であった。これらは試験片の外形を造形する際に、装置が定義するレーザー集光径に対して、マルエージング鋼に所定の熱エネルギーを与えた場合に用いるべき補正係数 k_1, k_2 とみることができるので、式3、式4の集光径 D_1, D_2 にこれらの係数を掛けて補正した理論寸法 y_a と実測寸法 y_e の関係をプロットすると、図10に示すように、実測値との乖離は小さくなった。これにより、輪郭走査のレーザー照射条件による輪郭形成領域の厚さを推定する手がかりを得た。

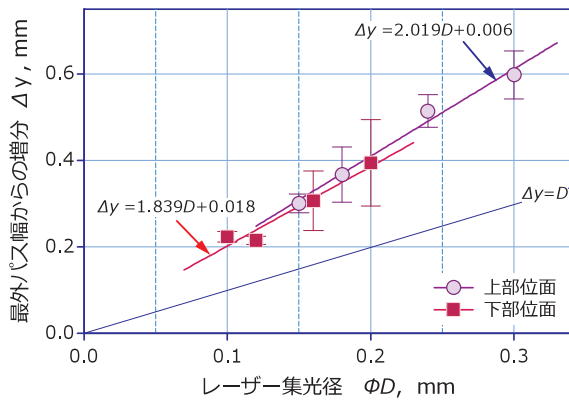


図9 パス幅に対する寸法増分とレーザー集光径との関係

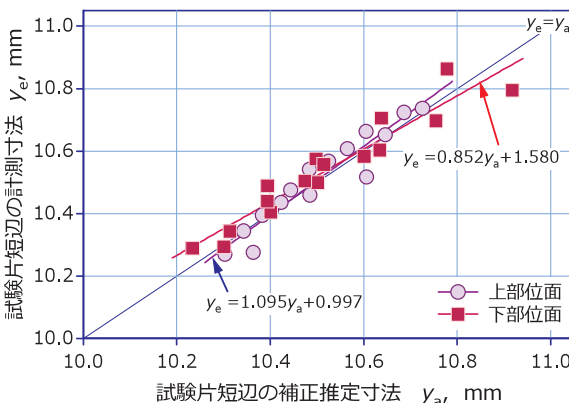


図10 集光径を補正した寸法推定理論値との比較

4.2 試験片表面粗さ計測とレーザー照射条件の影響

レーザー照射条件を変えて積層造形した試験片の上位面と下部位面の表面粗さを、それぞれ-Y面、+Y面に対して計測した結果を表3に示す。平均粗さ R_a と最大粗さ R_z の計測値の間に強い相関関係（比例定数6.936、相関係数 $R=0.951$ ）が認められたので、以下、実質的な造形物表面の滑らかさを表す平均粗さ R_a について考察を進めることとする。

表面粗さは、輪郭走査のレーザー集光径を小さく絞るほど表面粗さが小さくなる傾向が認められる。さらに測定結果を注視すると、表面粗さの数値が-Y面と+Y面で変化傾向が分かっているようなので、測定面の-Y面と+Y面で層別し、輪郭照射レーザー集光径ごとに平均粗さ測定値の平均とばらつき（標準偏差）を整理した（図11）。特に輪郭レーザー集光径を大きく設定した試料番号#0x、#1xの試験片において、上位面、下部位面ともに-Y面の方が集光径の大きさに応じて表面粗さが明確に粗くなっていることが判

表3 試験片の表面粗さ測定結果

計測部位		輪郭パス#1		輪郭パス#2	
試験片	測定面	Ra[μm]	Rz[μm]	Ra[μm]	Rz[μm]
#00	-Y面	20.91	160.47	27.64	187.44
	+Y面	18.02	127.77	17.23	138.57
#01	-Y面	28.01	173.38	25.49	162.54
	+Y面	21.31	165.07	16.12	132.97
#02	-Y面	31.80	203.51	16.83	118.35
	+Y面	26.49	177.18	14.73	100.47
#03	-Y面	33.87	213.04	24.01	173.25
	+Y面	23.67	166.56	12.16	79.39
#10	-Y面	20.50	157.46	20.35	124.61
	+Y面	13.93	105.36	13.05	102.28
#11	-Y面	22.51	176.15	18.15	127.80
	+Y面	18.09	120.86	11.84	87.02
#12	-Y面	27.11	167.17	9.91	83.15
	+Y面	20.02	141.66	9.47	76.39
#13	-Y面	29.59	168.41	8.68	86.01
	+Y面	20.86	133.85	7.94	62.83
#20	-Y面	9.27	73.10	12.60	84.61
	+Y面	9.60	76.90	11.38	84.25
#21	-Y面	9.45	68.48	10.21	86.76
	+Y面	10.42	75.16	11.29	77.02
#22	-Y面	10.95	108.00	9.42	75.55
	+Y面	11.60	90.87	9.89	71.45
#23	-Y面	9.01	74.64	8.81	75.02
	+Y面	9.05	74.64	6.88	50.58
#30	-Y面	7.35	58.40	7.41	55.55
	+Y面	8.72	69.87	11.10	80.93
#31	-Y面	8.08	63.90	6.92	54.47
	+Y面	7.58	61.97	9.34	76.48
#32	-Y面	8.26	63.65	8.57	82.29
	+Y面	8.56	66.73	11.66	79.90
#33	-Y面	7.49	60.54	9.48	70.01
	+Y面	6.78	58.56	8.76	68.54

た。この原因を精査するため、-Y面と+Y面とで輪郭走査パスのオフセットが等しい条件とした上部位面について、輪郭パス#1のオフセットと表面粗さの関係を整理した(図12)。特にレーザー集光径の大きい試料番号#0x, #1xにおいて、オフセット量の増大とともに表面粗さが大きくなる傾向が認められた。これは、前出の図1の模式図で想定した造形物の表面粗さ形成メカニズムにおいて、輪郭オフセットが大きくなるにつれて輪郭レーザー照射時の熱投入量が既成層よりも金属粉末側に多くなることによって表面粗さが大きくなるという仮説に沿った結果である。

図11, 図12に示す試料番号#0x, #1xの上部位面表面粗さの比較において、-Y面の方が+Y面より粗くなった原因の一つとして試験片の配置条件の影響が考えられる。試験片の作製では鋼製基板の中心をレーザー光制御系中心位置に合わせて設置した。実験に使用した装置は鋼製基板表面から上に約700mmの位置にレーザー制御用のミラーが設けられ、これを中心にレーザー光の照射位置を制御する。図5に示したとおり、試料番号#0x, #1xの試験片製作時のY軸方向配置はレーザー照射中心から離れているため、レーザー照射の角度は、Y軸方向成分について試料番号#0xで約 $2.94 \pm 0.41^\circ$,

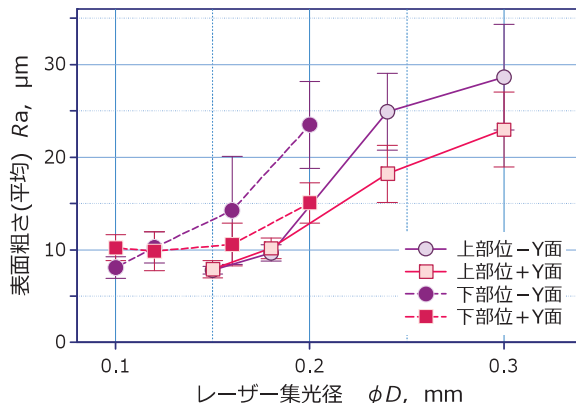


図11 輪郭造形のレーザー集光径と平均粗さとの関係

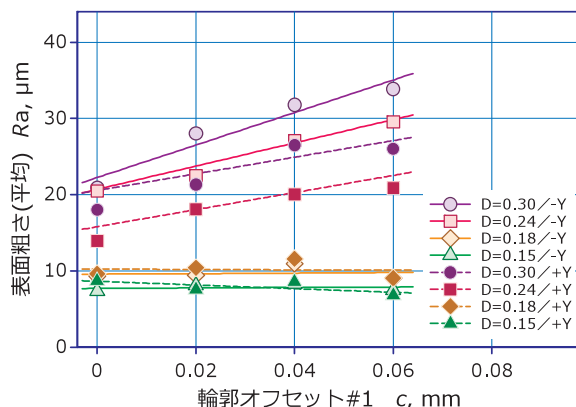


図12 輪郭パスのオフセット量と平均粗さとの関係

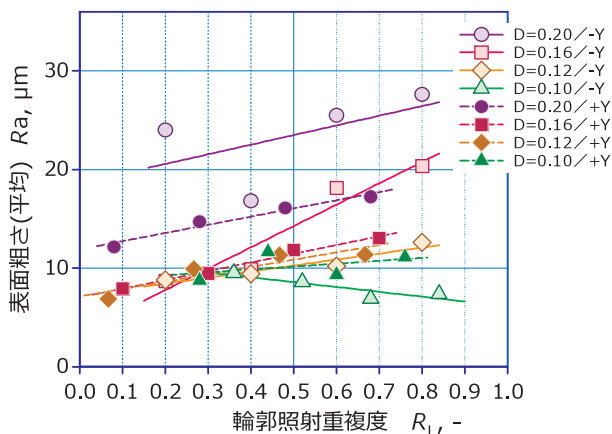


図13 試験片表面の平均粗さと最大粗さとの相関関係

試料番号#1xで約 $0.98 \pm 0.41^\circ$ の振幅が存在する。この振幅に加えて、-Y面は造形本体から金属粉末の向きに、+Y面は逆に金属粉末から造形本体の向きにレーザー光が照射されることになる。このレーザー照射条件の違いで金属粉末面への熱投入量が変化することにより、+Y面表面粗さより-Y面表面粗さが大きくなったと考える。

試験配置が鋼製基板中心より+Yの向きに配置された試験番号#2x, #3xについては、レーザー照射の振れ角が試料番号#0x, #1xとは逆になるので、+Y面表面粗さより-Y

面表面粗さが小さくなる想定となるが、実験条件でレーザー集光径を小さく設定したことから、顕著な差異は認められなかった。

一方、下部位面は、輪郭造形におけるレーザー走査経路の位置関係が上部位面に比べてかなり複雑であるから、輪郭パス#1と輪郭パス#2との熱影響幅重複度に着目し、輪郭パス照射のレーザー集光径 D_1 、 D_2 輪郭パス#1と輪郭パス#2とのオフセット量差分 Δc により、レーザー照射範囲の重複度を以下の式で定義し、これと表面粗さとの関係を図13に整理した。

$$R_1 = \frac{D_1 + D_2 - 2\Delta c}{D_1 + D_2} \quad (\text{式7})$$

下部位面の表面粗さも輪郭照射時のレーザー集光径の影響を強く受けることに加えて、造形時の試験片配置条件により、試料番号#0x、#1xでは相対的に+Y面表面粗さより-Y面表面粗さが大きくなった。特に、輪郭造形時のレーザー集光径 $D_2 = 0.1\text{mm}$ とした試料番号#3xの試験片では、+Y面表面粗さより-Y面表面粗さが小さくなったことは、前述のレーザー照射振れ角の違いで説明できる。

輪郭照射時のレーザー集光径について、いずれの試験条件においても、重複度が大きくなるにしたがって表面粗さが大きくなる傾向が認められ、輪郭照射時のレーザー集光径を大きく設定した場合は、輪郭パス#1と輪郭パス#2との間に集光径の10~20%を重複させる程度の距離を設けることで表面粗さを小さくする効果が得られるということがわかった。ただし、レーザー集光径を最も絞った試料番号#3xの-Y面のみは例外で、輪郭パス#1と輪郭パス#2を近づけた方が表面粗さは小さくなった。試料番号#3xの-Y面は、レーザー照射中心側を向いており、レーザー照射の振れ角の影響が強く影響したものと考える。

以上の実験結果から、マルエージング鋼による造形におい

て、集光径を0.15 mm 以下に絞り、造形物の輪郭に対して0.02~0.06 mm 程度の適当なオフセット間隔を設定し、 $2.5\text{J}/\text{mm}^2$ の与熱量で輪郭レーザー照射を行うことにより、造形試料表面の平均粗さを $10\mu\text{m}$ 以下にすることができた。

図14に代表的な試験片表面のSEM写真を示す。図14-a)は表面粗さが大きく計測された試料番号#03-Y面の上下部位の表面状態、図14-b)は表面粗さが小さく計測された試料番号#30-Y面の上下部位の表面状態を撮影したものである。表面粗さが小さく計測された試料番号#30の-Y面では、原料粉末の粒径 $20\sim 40\mu\text{m}$ の粒が試料表面に多く付着しているのが観察されるのに対して、表面粗さが大きく計測された試料番号#03の-Y面では、原料粉末粒径の粒のほかに粉末どうしが融着して生成されたと思われる $50\sim 100\mu\text{m}$ の大きな粒も散見される。このことは、輪郭照射の熱投入量や既成層端部と輪郭走査パスの位置関係による輪郭形成領域の厚さの違いから推測して、輪郭レーザー照射条件の違いが造形物表面の金属粉末の熔融状態に影響し、各層断面の輪郭造形時の金属粉末面への熱影響範囲が広いほど完全に熔融しない金属原料粉末が造形物表面に多く溶着して表面粗さを形成すると当初の仮説を裏付ける結果となった。

5. まとめ

金属AM法の一つであるレーザーPBF方式による積層造形物表面の粗さについて、その形成メカニズムの仮説に基づいて、輪郭照射におけるレーザー集光径とレーザー光走査経路の条件の違いに着目し、これらの造形物表面粗さへの影響を調べた。

実験の結果から、金属粉末積層造形物の表面粗さは、輪郭レーザー照射におけるレーザー集光径、輪郭走査経路のオフセット設計の影響に加えて、造形時の配置に伴うレーザー照射角度の影響を受けることを明らかにした。

参考文献

- 1) 山口修一ほか：「産業用3Dプリンターの最新技術・材料・応用事例」, シーエムシー出版 (2015.5)
- 2) 前田寿彦：「レーザー焼結型AMシステムのマニュファクチャリングへの活用について」, 素形材 Vol.53 No.2 (2012)
- 3) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形における製造品質に及ぼす熱線照射条件の影響」, 日本铸造工学会第165回全国講演大会 (2014.10)
- 4) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形による多孔質金属材料の熱伝導率に及ぼす空隙率の影響」, 日本機械学会2014年度年次大会 (2014.9)
- 5) 戸羽篤也・鈴木逸人・平野繁樹, 長船康裕, 葛西勝明・

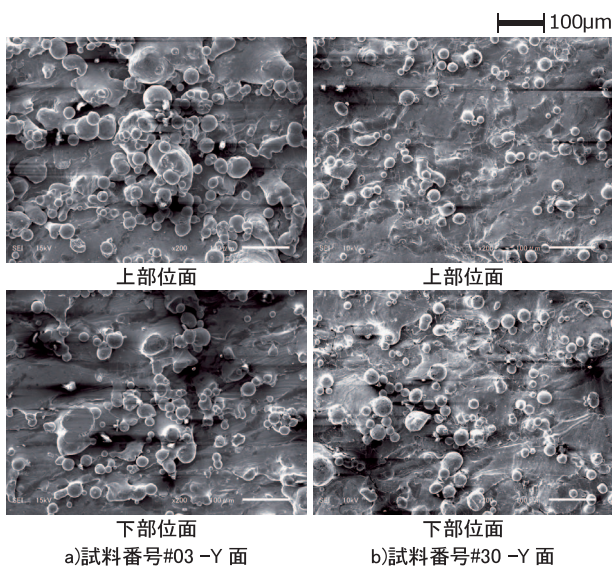


図14 代表的な試験片表面のSEM写真

葛西健央：「3D積層造形法で製作したマルエージング鋼材の金属組織」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.316, pp.69～76 (2017.8)

- 6) 池田博英・升岡 正「宇宙開発における金属Additive Manufacturing技術の活用」, 精密工学会誌Vol.82 No.7, pp.639～642 (2016)
- 7) 榎原弘之「日本におけるAdditive Manufacturingの概要とこれからの課題」, 計測と制御Vol.54, No.6, pp.381～385 (2015)
- 8) 寺澤章裕ら「金属積層造形物の総計条件が造形物アンダーカット部表面粗さに及ぼす影響」, 2019年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集G65, pp.511～512 (2019)
- 9) 池庄司敏孝「レーザ積層造形における溶融・凝固現象」, スマートプロセス学会誌 Vol.6, No.3, pp.109～114 (2017.5)

メタマテリアルの応用による等方性ミリ波フィルタの開発

齋藤 隆之, 宮崎 俊之, 坂村 喬史, 本間 稔規, 米田 鈴枝*

Development of the Isotropic Millimetric Wave Filters by Application of Metamaterials

Takayuki SAITOU, Toshiyuki MIYAZAKI
Takashi SAKAMURA, Toshinori HONMA, Suzue YONEDA*

抄 録

メタマテリアルの応用による、ミリ波W-bandの特定の周波数を透過・遮断するフィルタ開発を試みた。単位要素として、正方形の二重環の分割リング共振器：The split ring resonator (SRR) を、平面上に等間隔に配列した構造体を作製した。このとき、単位要素の寸法と配列について複数の条件で作製を行った。環の切れ目がすべて同一方向になるように配置した「正配列」の構造体では、入射の偏波面に対し平行と垂直の各方向において、ミリ波透過特性に異方性があることが分かった。単位要素が 4×4 個または 2×2 個の範囲内で、環の切れ目の向きが上下左右の方向に同一頻度でかつ周期的に配置した「循環」と「完全循環」のそれぞれの構造体を作製した。これら構造体のミリ波透過特性は等方性で、循環と完全循環での単位要素の寸法が1.75mmにおいて89GHz付近を選択的に透過するバンドパスフィルタとなっていた。さらに寸法が異なるこれらの配列の特性を互いに比較したところ、スケーリング則が成立していた。また、ミリ波透過特性は導体の厚さには大きな影響を受けなかった。

キーワード：メタマテリアル, W-band, ミリ波フィルタ, 等方性, 分割リング共振器 (SRR)

Abstract

A development of filters was conducted to achieve performance of transmittance at a specific frequency of millimetric wave W-band by using metamaterials. Filter structures were designed to arrange "unit element" on a plane at even intervals, where the unit element was the split ring resonator (SRR) which was the double rings of the square. Samples that have several conditions of the unit element dimensions and arrangement were prepared. With the "regular arrangement" that is arranged unit elements so that all the splits of the ring became the same direction, anisotropy was seen in a transmission characteristic of millimetric wave by the parallel and orthogonal configuration of the direction for the incidence of polarized wave. The filter structures which were arranged the direction of the split of the ring at right, left, up and down at the same frequency and periodically within 4×4 unit elements or 2×2 were fabricated. The characteristic of these structure bodies was isotropy, and there were the band pass filters that transmit selectively around 89GHz on the dimensions of the unit element 1.75mm. Furthermore, scaling law was confirmed when it was compared the characteristic of these various arrangement with different dimension each other. In addition, the characteristic was little influence of conductor thickness.

KEY-WORDS : metamaterials, W-band, millimetric wave filters, isotropic, the split ring resonator (SRR)

事業名：経常研究

課題名：光・電波境界領域における電磁メタマテリアルの設計・作製・評価技術の開発（H30～R1年度）

*北海道大学大学院工学研究院 Hokkaido University Graduate School Faculty Engineering

1. はじめに

メタマテリアル(Metamaterials)とは、必ずしも明確な定義が確立していないが、多くの場合「電磁波(光)の波長よりも細かな構造体を利用して、物質の電磁気学(光)的な特性を人工的に操作した疑似物質¹⁾」を指している。最初にその概念が提唱されたのは、イギリスの理論物理学者 J.B.Pendry らが、1999年に発表した論文とされている²⁾。この知見を発展させ、D.R.Smith らが最初に実験的に負の透磁率と誘電率を示す微細構造を実際に作製し³⁾、さらにその後、マイクロ波に対する負の屈折率を実現している。マイクロ波に対する負の透磁率の構造は、既にWi-Fi用無線ルータに応用されている⁴⁾。

著者らはメタマテリアルに着目し、ミリ波帯域において波長より小さな導体構造を平面上に配列した1枚のシート状材料によって、任意の波長を透過または遮断する電磁波フィルタを目指している。メタマテリアルをシート状の構造とすることは、従来の立体的なメタマテリアル構造に比べて、作製の容易さや実装時の利便性を有し、実用上大きなメリットがある。ミリ波帯は現在、スマートフォンなどの情報通信が5G段階に入り利用され始めたことで、混信やノイズの除去の目的で特定の周波数のみを通す簡易で低コストのフィルタが必要とされつつある。本報告では、ミリ波帯域で等方性(ミリ波の進行方向に対する回転により特性が不変)で特定の波長を透過するバンドパスフィルタや逆に遮断するバンドストップフィルタの開発について述べる。

2. 既知のメタマテリアル構造とミリ波フィルタのためのメタマテリアル構造設計

これまで開発・提唱されたメタマテリアルはその構成としては立体的な導体(金属)構造がほとんどで、またその要素となる平面構造は環状で環の一部が途切れた構造を持たせたものが多い。その例を図1に示した。金属は自由電子が存在するため、電磁波の入射によりその振動に電荷が追随し、様々な応答が起こり得る。この途切れた環は、電磁気的な応答をする回路と見なしたとき分割リング共振器:The split ring resonator (SRR) と呼ばれる³⁾。この内外環はコイルの特性を有しその全体のインダクタンス(誘導容量)を L 、環どうしのギャップ及び一つの環の切れ目はコンデンサの特性を有し全体のキャパシタンス(静電容量)を C とすると、電磁気的な共振周波数 $f(\text{Hz})$ は $1/(2\pi\sqrt{LC})$ となる。なお、環が一重でも環同士のキャパシタンスが存在しないだけで定性的には同様で、単環のメタマテリアル要素も提唱されている。

本開発では、ミリ波帯などの電磁波に対するフィルタであるとともに視覚的な装飾性を兼ね備えた用途を想定した。そして実際のSRRとしては図1の右側の外形が正方形を用い

た。その理由は、作製上の観点から切れ目の向きを正確に縦横に配置し易いためと、金属装飾の観点から平面状をなるべく密に敷詰めるためである。今後、この正方形の2重SRRを単位要素と呼び、単位要素の形状を規定する変数とそれらの間隔は図2のような比率に固定し、その単位要素の並べ方と外形の寸法を変化させることとした。ミリ波はその名称の通り波長が1~10mm(周波数では300~30GHzに対応する)であり、現在普及しつつある5G通信がほぼ30GHzの周波数であるため、次世代を想定しその少し上で、かつ現在、自動車レーダーで頻用される80GHz付近を含むW-band(75~110GHz)をターゲットとした。波長で表すと4~2.72mmであるため、単位要素の外形を3mm以下に設定した。ただし作製上の制約から、今回の最小外形寸法は1.5mmとなった。



図1 メタマテリアルに用いられる導体形状の例

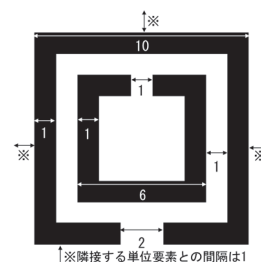


図2 単位要素の間隔の比率

3. 実験・結果及び考察

3.1 正配列とちどり配列の構造体作製と評価

単位要素の最も単純な配列である、図3(a)の配列の構造体作製と評価を行った。実際にはこれらを、60mm以上の正方形となるよう多数個を配列した。この配列を正配列と呼ぶ。また、同時に図3(b)のちどり配列の構造体も作製・評価し

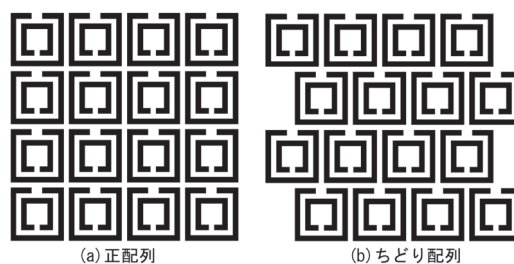


図3 単位要素の正配列とちどり配列

た。ちどり配列は、環の切れ目が上下に隣接する単位要素と単位要素の空隙の線上に位置しており、正配列とは違う隣接要素との相互作用での特性変化が予想された。本節では主に正配列の作製と評価結果を示し、簡単にちどり配列にも触れる。

3.1.1 作製方法

シート状のフィルタとするためには、非金属の基板の上に図3のような導体パターンを形成する必要がある。本開発では、プリント基板の製造など用いられる紫外線を用いたフォトレジスト法を用いた。ここでのフォトレジスト法はパターンが印刷されたマスクを用意し、紫外線感光剤の塗布された銅などの金属薄膜を有する樹脂基材に、マスクをかぶせ紫外線露光した後、現像・エッチングにより金属の所定の構造を作製する方法である。現像とは、露光されたまたはされなかった感光剤を溶解することを指す。前者の露光で溶解する感光剤をポジ型、後者をネガ型と呼ぶ。エッチングとは感光剤が溶解し露出した金属を溶解する操作を呼ぶ。最後に金属を溶解から保護していた感光剤を剥離すると、樹脂基板上の金属パターンができる。図4にこのプロセスの模式図を示した。

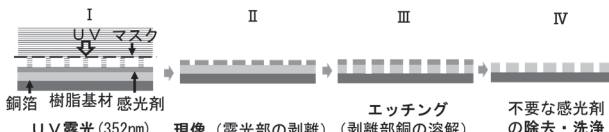


図4 構造体作製に用いたフォトレジスト法のプロセス

最初に、マスクを市販のインクジェットプリンタにより黒インクでPETフィルムに印刷した。このとき、外形1.5、2.0、2.5、3.0mmの単位要素のパターンマスクを作製した。単位要素を敷詰めた範囲は、60×60mm以上とした。外形2.0mmのパターンの場合、単位要素は約30×30個である。感光剤の塗布された銅箔を張った樹脂は、市販のサンハヤト製クイックポジ感光基板 NZ-G33Kを用いた。これは厚さ100μmのポリイミド (PI) に厚さ35μmの純銅箔が張られ、その上にポジ型紫外線感光剤が塗られている。現像液とエッチング液も同製品用の専用品を用いた。最初に2mm正配列パターンで、適正な金属構造が得られるように、露光時間・現像時間・エッチング時間の最適化を行った。現像時間は材料と現像液の組み合わせに対しほぼ指定されているが、露光時間とエッチ

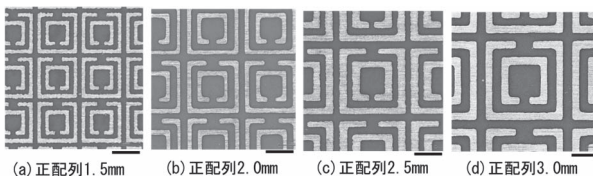


図5 作製した構造体の実体顕微鏡画像 (下部スケールバー：1.0mm)

ング時間で線幅と導体の除去量に変化する。他の寸法の構造体も同一条件で作製した。得られた構造体 (正配列) の実体顕微鏡画像を図5に示す。得られた構造体を60×60mmに切り取り、窓の開いたプラスチックまたは紙製のホルダにより平坦に保持し試験体とした。

3.1.2 ミリ波透過性評価とその結果

作製した試験体について、高周波ネットワークアナライザ (キーサイト・テクノロジ製E8362C) によりミリ波W-band領域の透過性を評価した。本装置では、電場が垂直で磁場が水平に振動する縦偏波が照射される。評価時の装置と試験体の配置を図6に示す。手前のホーンアンテナ1が送信側で、奥の2が受信側であり受信側に入射する電場振幅の減衰量 (S2I 試験体) [dB]を測定した。アンテナの間隔は60mmとし、試験体はその中間に置いた。ノイズとなる多重反射を乱反射させSN比を向上させるため、アンテナ付近にしわを寄せたアルミ箔を置いた。何も無い空間の減衰量 (S2I 空間) も測定し、各周波数で、

$$\text{透過率} = 10^{[(S2I \text{試験体} - S2I \text{空間}) / 20]}$$

として空間を1に規格化した透過率に変換した。正配列・ちどり配列とも偏波に対して原理的に異方向性が考えられるため、環の切れ目が垂直な配向である“縦配向”と、水平に配向する“横配向”で測定した。今後、この測定条件を縦、横と簡略に表現する。

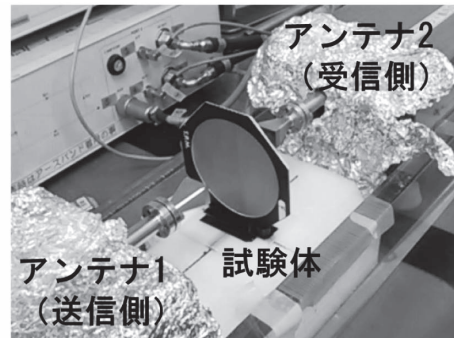


図6 ミリ波透過性評価時の装置と試験体の配置

正配列で単位要素1.5、2.0、2.5、3.0mmの試験体のミリ波透過特性を図7(a), (b), (c), (d)に示した。図7(a)1.5mmの結果は、3.1.3の考察で触れる。まずそれぞれの単位要素の寸法では、縦と横で全く異なる結果が得られた。例えば図7(b)の2.0mmでは、横は94GHzと105GHzに急峻な遮断が存在する特性であるが、縦では94Hz付近になだらかな遮断が一つだけ存在する特性となっている。いずれも特定の周波数を透過または遮断するフィルタといえるが、縦と横で特性が全く異なるので実用上は利用しにくい。2.5mmの図7(c)でも図7(b)と透過・遮断の位置は異なるが、定性的には同様だった。一方、3.0mm図7(d)では縦横で互いにわずかに異

なるのみといえるが、フィルタという意味では明確な透過または遮断特性が見られないため利用価値は低い。単位要素の寸法が異なる試験体間の比較では、特性は縦配向でも横配向でも単位要素の寸法により変化することも明瞭となった。

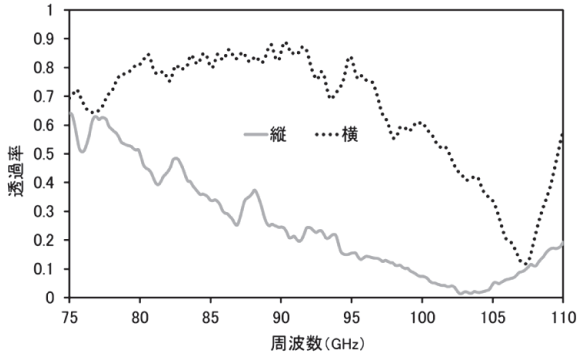


図7 (a) 正配列・単位要素 1.5mm のミリ波透過特性

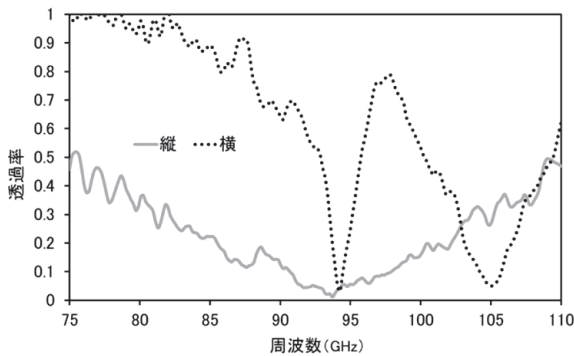


図7 (b) 正配列・単位要素2.0mmのミリ波透過特性

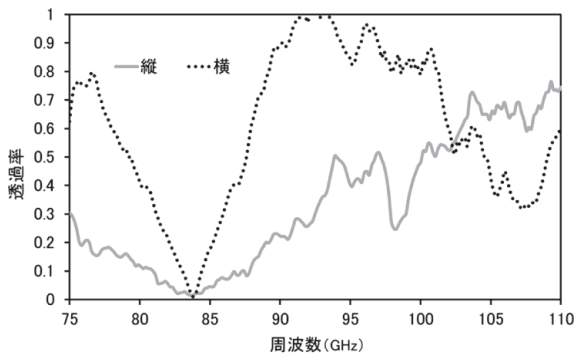


図7 (c) 正配列・単位要素 2.5mm のミリ波透過特性

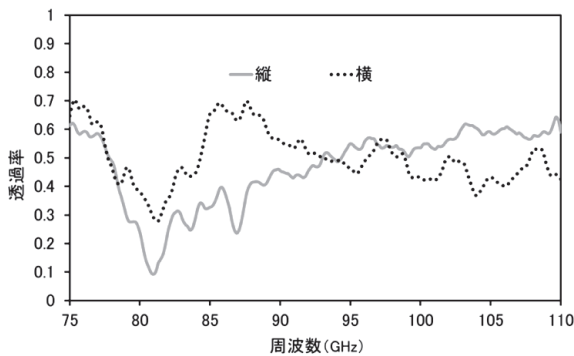


図7 (d) 正配列・単位要素 3.0mm のミリ波透過特性

ちどり配列の単位要素が2.0mmと2.5mmの試験体についての結果を図8 (a), (b)に示す。横配向では寸法が2.0mmと2.5mmにおいて透過・遮断の周波数は異なるが、比較的急峻な特性であった。この横配向の特性において、単位要素の寸法が同一の正配列との類似性と違いが認められる。類似性として単位要素2.0mm同士 (図7 (b)と図8 (a)) では、100~105GHzに比較的急峻な遮断があり、単位要素2.5mm同士 (図7 (c)と図8 (b)) では、80~85GHzに比較的急峻な遮断がある。違いとしては単位要素2.0mm同士で正配列の94GHzの急峻な遮断はちどり2.0mmでは見られず、単位要素2.5mm同士でちどりの93GHz付近の透過率0.5程度の明確な遮断は正配列2.5mmでは見られない。この違いは、行同士でのずれの有無 (図3) による隣接行との相互作用の変化のためと思われたが、十分に考察できていない。正配列とちどりの縦で同じ寸法同士での周波数特性は、比較的なだからでほとんど一致していた。

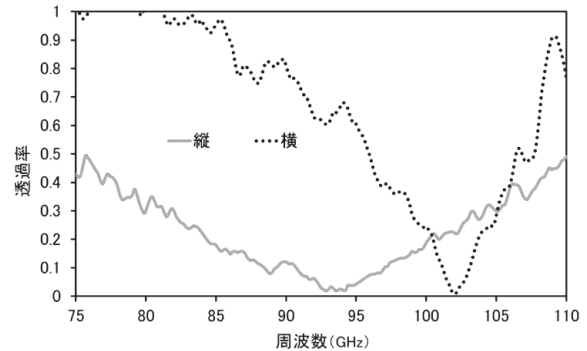


図8 (a) ちどり・単位要素 2.0mm のミリ波透過特性

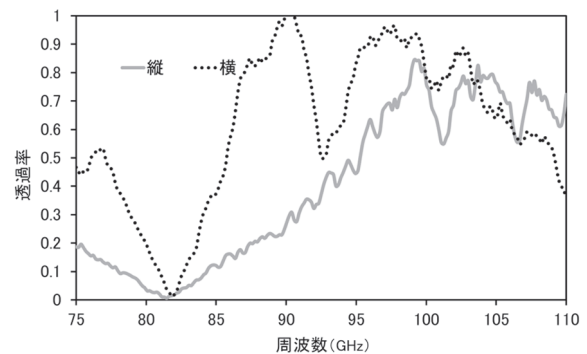


図8 (b) ちどり・単位要素 2.5mm のミリ波透過特性

3.1.3 正配列及びちどり配列構造体の特性に関する考察

いずれの配列でも、縦と横で透過特性に異方性が存在し、実用的なフィルタとしては利用しにくいことが明らかとなったが、今後の設計指針を得るため単位要素の寸法が特性にどのような影響を与えるか解析を行った。メタマテリアルでは、微細構造の寸法を変更すると周波数特性は寸法比に反比例するスケール則が理論的には成立する。例えば、単位要素の寸法が S で周波数 ω_s の共振特性が見られたとき、寸法を

より大きな L とした場合、共振周波数 ω_L が、

$$\omega_L = (S/L)\omega_s \dots\dots(1)$$

に変換される。これは周波数に反比例する波長側から考えると容易に理解できる。つまり構造が大きくなれば、同じ比率だけ長い波長と共振するためである。例えば2.0mmと2.5mmを比較すると、前者に対して後者では対応する遮断、あるいは透過ピークは周波数が低い方に移動することになる。正配列2.0mm横(図7(b))の遮断ピーク105GHzは(1)式から、正配列2.5mm横では $105 \times 2.0/2.5 = 84\text{GHz}$ に変換されることが予測されるが、実際に図7(c)では、その周波数に遮断ピークが存在する。ちどり2.0mm横(図8(a))と2.5mm横(図8(b))の構造体の横配置同士の特性比較でも、遮断周波数のこの変換関係が非常に良い一致で確認できる。以上のことから、正配列とちどり配列の構造体はミリ波W-band領域ではスケーリング則(1)式が成立すると考えられる。なお、正配列1.5mmの特性である図7(a)でも、横配向で107.5GHzにやや鋭い遮断が存在する。これは正配列2.0mmの94GHzの遮断に対応すると見られるが、スケーリング則から予測される125GHzからはかなりはずれている。1.5mmと単位要素が小さく、寸法誤差の比率が構造に対し大きくなったことが影響していると思われる。

3.2 等方性フィルタとなる構造体作製と評価

3.2.1 等方性の構造体の設計

正配列では、ミリ波透過特性において縦と横配向で異方性が見られたため、新たに等方性の配列を目指した。単位要素は変更せず、その配列法を変えた図9(a),(b)のような2種類の構造体を設計した。考え方としては、環の切れ目の向き上下左右の出現頻度が、 4×4 個または 2×2 個を配列したときに同一となるようにした。便宜的に図9(a)を循環(配列)、図9(b)を完全循環(配列)と呼ぶ。循環は左から右にたどると環の切れ目の向きが90度ずつ右回りに回転している。下にたどると左回りで同様である。完全循環は1行目などの奇数行で切れ目が左、上、左、上を繰り返す、2行目などの偶数行で下、右、下、右を繰り返す構造である。いずれの配列も周期的であるが、循環は4単位要素で1周期、完全循環は2単位要素で1周期となっている。

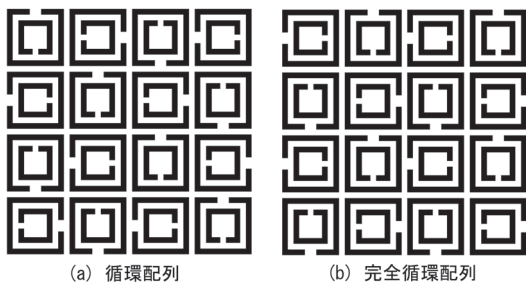


図9 単位要素の循環及び完全循環配列

3.2.2 作製方法

二つの配列について単位要素が1.75と2.5mmの構造体を作製した。循環については2.0mmも作製した。作製法は3.1.1に示した方法と同様である。出来上がった構造体は、いずれも図5に示した正配列とほぼ同様な形成状態であった。

3.2.3 ミリ波透過性評価結果

図10(a),(b),(c)に循環の単位要素1.75, 2.0, 2.5mmのミリ波透過特性を示した。測定方法は3.1.2に既に示した方法と同様である。図10(b)2.0mmと図10(c)2.5mmについては単位要素の任意の一边を縦(垂直)に向けた配向(0度)及び、そこから構造体の平面をミリ波の入射側から見て時計回りに90度回転させた配向を測定した。図10(a)1.75mmではそれに加えて、45度及び135度でも測定した。180度は初期0度の配向の上下を反転した状態で、原理的に0度と変わらないため省略した。図10(a)を見ると、すべての回転角度でほぼ異方性は無く、等方性であった。かつ、89GHz近辺に透過率が0.9程度となるピークを持ち、この近辺を選択的に透過するバンドパスフィルタといえる。図10(b),(c)を見ると2.0及び2.5mmにおいても、0度と90度の2方向で異方性はほとんど認められなかった。

図示は省略するが、完全循環の単位要素1.75, 2.5mmの透過特性は、寸法が同一の循環の特性、図10(a)及び図10(c)と非常に類似していた。ただし、循環1.75mmの89GHz付近の透過ピークが0.9程度であるのに対し、完全循環1.75mmのそれはやや低周波数側で、透過率も0.8以下となっていた。

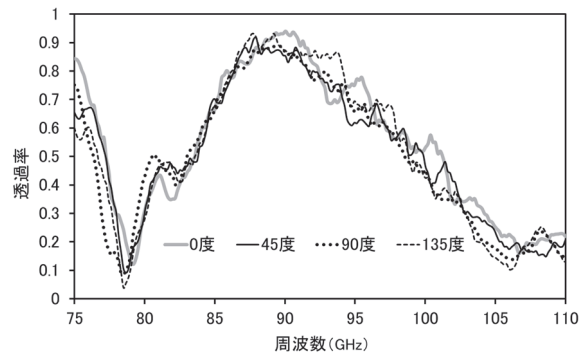


図10(a) 循環配列・単位要素1.75mmのミリ波透過特性

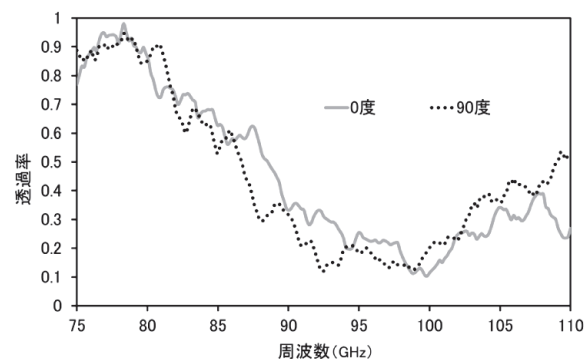


図10(b) 循環配列・単位要素2.0mmのミリ波透過特性

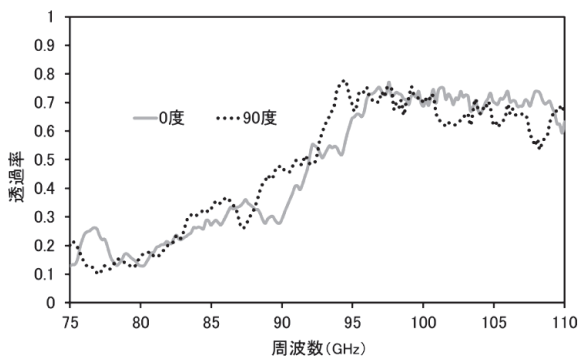


図 10 (c) 循環配列・単位要素 2.5mm のミリ波透過特性

寸法誤差などでこの差が生じるとも解釈できるが、最大ピークの透過率に関しては複数回の確認で循環が常に0.9程度、完全循環が常に0.8以下である現象を再現した。従って、このことは配列方法の差に由来する本質的な特性と考えられた。

3.2.4 等方性構造体の特性に関する考察

図10(b)2.0mmの78GHz付近の透過ピークは、図10(a)の89GHzを基準にすると、 $89 \times 1.75 / 2.0 = 77.9$ となりスケーリング則を満たしている。さらに図10(b)の100GHzの遮断のピークは、2.5mmに対してはスケーリング則により $100 \times 2.0 / 2.5 = 80$ GHzに変換され、実際に図10(c)のその付近に遮断らしきピークが存在する。以上のことから本単位要素を用いたミリ波W-band近傍のフィルタでは、正配列及びちどり配列も含めスケーリング則が成り立ち、これを利用すればピークなどの透過特性を任意の周波数に変換することができると考えられる。例えば図10(b)2.0mmで認められる100GHzの遮断を90GHzに変換するためには、その比で寸法を大きくすなわち $2 \times 10 / 9 = 2.22$ mm程度の単位要素と対応する間隔とすれば良い。この寸法を挟む循環2.0mm(図10(b))と循環2.5mm(図10(c))の特性から、循環2.22mmの構造体は比較的緩やかな特性ではあるが90GHzを遮断するバンドストップフィルタとなると推測できる。

3.3 等方性構造体の拡張の試み

3.2で見出されたように、今回用いた単位要素を循環と完全循環配列に配置することで、ミリ波W-bandの等方的なバンドパスまたはバンドストップフィルタを実現できることが分かった。他にも、これを実現できるような配列方法がないかを考察し、波長より小さな単位要素がある狭い範囲内でその環の切れ目の向き上下左右が、同一頻度で出現すれば良いと考えた。循環と完全循環は、それぞれ単位要素が 4×4 及び 2×2 の範囲でこれらが成立しているからである。多数個並べた時でも、前者はどの隣接する 4×4 個を選んでも上下左右が4回ずつ、後者はどの 2×2 個を選んでも1回ずつ出現する。図示を簡単にするため、単位要素の外側の環の切れ目を矢印で表すと、循環と完全循環は図11(a), (b)のようにな

る。ここで新たに、 4×4 個内で上下左右が4回ずつ出現する新たな配列4つC, D, E, Fを設計した。これらを図11(c), (d), (e), (f)に示した。単位要素の寸法は1.75mmとした。CとDは人為的に偏りを与えながらも条件を満たすようにした。EとFは条件を満たしつつ、完全にランダムな配列を生成した。これらは多数敷詰めたとき、どのような選び方をしてもかならず上下左右が4回ずつとなるわけではない。しかし、 8×8 個以上の広い範囲ではほぼ同じ頻度で出現する。

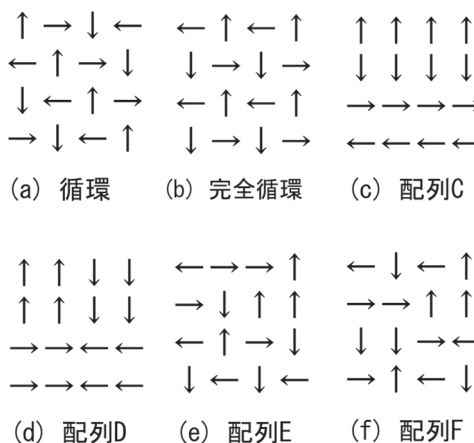


図 11 各配列の矢印表現

特性評価の結果、配列Cでは明らかな異方性があった。また、配列D, E, Fでは異方性のあるなしは判然としなかった。しかし4つの配列の特性はいずれもなだらかで、かつ透過率が0.7~0.2の範囲で同じ単位要素寸法の循環と完全循環で見られた特定周波数を透過(または遮断)する性質はなく、フィルタとしての利用価値は乏しいことが分かった。循環および完全循環との特性の違いは、配列C, D, E, Fの波長程度の範囲での対称性の低さに起因していると思われるが、十分な考察はできていない。ただこれら結果から、さらに広い範囲で環の切れ目の向き上下左右が同一頻度で出現しても、等方性のバンドパスまたはバンドストップフィルタにはならないと考えられる。

3.4 異なる作製方法と導体形状による特性の比較

ここまでの構造体は、すべて図4のフォトレジスト法で作製した。ここまで示したデータだけでは、作製方法や形状の違いが特性に与える影響は不明である。これらの知見を得るために、異なる方法で正配列2.0mmの構造体を作製し評価を行った。最初に厚さ $50 \mu\text{m}$ のPETフィルム上に、銀ナノインクで正配列2.0mmのパターンをインクジェット印刷した。このインクは乾燥すると銀が主成分の金属薄膜となる。この薄膜の上に無電解銅めっきを行い、銅の厚さを約 $3 \mu\text{m}$ とした。この二法で作製された、正配列2.0mmの実体顕微鏡画像を図12に示した。フォトレジスト法の方がやや銅の線が細く、銀ナノインクめっき法は線の太さ・形状とも設計

に近かった。なお、フォトレジスト法の基材には厚さ $100\mu\text{m}$ のポリイミド(PI)が、銀ナノインク-めっき法にはプロセスの都合上、厚さ $50\mu\text{m}$ のPET樹脂が用いられている。また、前者での銅箔の厚さは $35\mu\text{m}$ であり、後者では無電解めっきのためあまり厚くできず $3\mu\text{m}$ であった。すなわち銅の厚さは10倍以上異なっている。

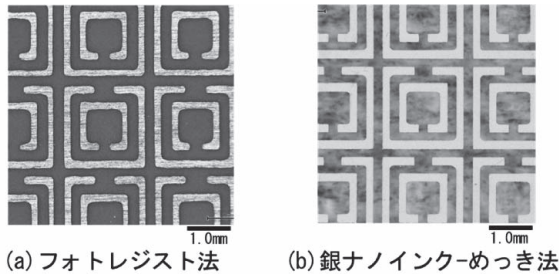


図12 異なる作製法の正配列2.0mmの実体顕微鏡画像

(b)銀ナノインク-めっき法で作製した正配列2.0mmの構造体のミリ波透過特性を図13に示した。(a)フォトレジスト法の正配列2.0mmの特性は既に図7(b)に示している。樹脂の種類を含む作製方法と導体形状の違いに関わらず、特性は非常に類似していた。特に導体の厚さは $3\sim 35\mu\text{m}$ の範囲で特性に大きな影響を与えないことが分かった。これらのことは、ちどり2.0mmの構造体でも確認された。

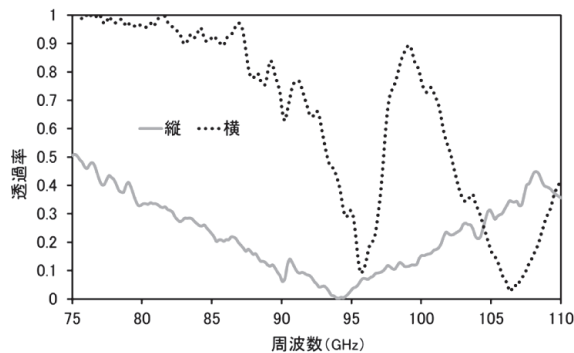


図13 銀ナノインク-めっき法での正配列2.0mmの特性

3.5 ミリ波透過特性の理論計算の試み

本開発の中では、構造設計データを用いてその構造体の透過特性を、FDTD法による電磁界シミュレーションで理論計算することも試みた。正配列2.0mmの縦配向と横配向の実測値に対し、ミリ波帯での樹脂基材の誘電率に妥当な仮定を用いることで理論計算はよく一致した。しかし他の寸法・配列の実測値に対し理論計算がまだ得られていないため、引き続き検討する予定である。複数の実測値との良い一致が確認されれば、ミリ波及びより高周波数のテラヘルツ波帯も含めて、透過特性の理論設計が可能になると考えられる。

4. まとめ

メタマテリアルを応用した、ミリ波W-bandの特定の周波数を透過・遮断するフィルタ開発を試みた。最も小さな構造である単位要素として、正方形の二重環の切れ目が互いに反対となっている分割リング共振器：The split ring resonator (SRR)を用い、この単位要素の寸法と配列を変え平面上に等間隔に配列した構造体を作製した。これらのミリ波透過特性を評価した結果、以下のことが分かった。

1. 環の切れ目がすべて同一方向になるように配置した「正配列」の構造体では、縦偏波の入射に対し縦配向と横配向ではミリ波透過特性に異方性が見られた。
2. 単位要素が 4×4 個または 2×2 個の範囲内で、環の切れ目の向きが上下左右の方向に同一頻度でかつ周期的に配列した「循環」と「完全循環」配列のそれぞれの構造体を作製したところ、これらのミリ波透過特性は等方性であった。
3. 2のいずれの構造体でも、単位要素の寸法が 1.75mm において 89GHz 付近を選択的に透過するバンドパスフィルタとなっていた。
4. 寸法が異なる同じ配列のミリ波透過特性を互いに比較したところ、スケーリング則が成立していた。これにより、循環 2.22mm の構造体は、 90GHz 付近のゆるやかなバンドストップフィルタとなることが推測された。
5. ミリ波透過特性は、導体の厚さが $3\sim 35\mu\text{m}$ の範囲で大きな影響を受けなかった。

参考文献

- 1) 日本化学会ホームページ：<https://www.chemistry.or.jp/division-topics/2015/02/post-36.html> (2021.6.22時点)
- 2) J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, Vol.47, No.11, NOVEMBER p.2075(1999)
- 3) D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol. 84, No. 18, p.4184(2000)
- 4) 鳥屋尾博 他, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン No.33 夏号, p.27(2015)

研究ノート

Research Note

四足歩行ロボットによる不整地運搬補助に関する基礎検討

伊藤 壮生, 浦池 隆文, 今岡 広一, 林 峻輔

Basic Study for Transportation Assistance on Rough Terrain with a Quadruped Robot

Soki ITO, Takafumi URAIKE, Koichi IMAOKA, Shunsuke HAYASHI

キーワード：運搬作業，不整地，四足歩行，協調

1. はじめに

林業現場や工事現場などに見られる急傾斜や起伏の激しい不整地では、車輪やクローラといった一般的な移動機構の使用が困難であり、運搬作業が作業者の負担となっている。そのような環境では不整地での踏破性に優れる四足歩行ロボットの活用が作業の省力化に有効と考えられる。しかし、ロボットによる不整地環境での運搬作業の自動化には様々な課題が存在する。

ロボットを用いて運搬作業を完全自動化するためには自己位置認識が必須であるが、不整地環境では建物や樹木によりGNSSの電波障害が発生し、さらに、周辺環境が刻々と変化することなどから画像処理等による自己位置認識技術の適用も困難である。したがって、不整地環境での運搬作業をロボットで完全に自動化することは現実的ではない。このような場合、図1のような人とロボットを協調させた運搬補助システムによる軽労化が有効と考えられる。人とロボットを協調させることで、台車やリヤカーなどと同様に作業現場で容易に活用することができ、ロボット単体では困難な作業への適用が可能となる。

本研究では、図1のような人とロボットの協調による運搬補助システムの実現を目指し、作業者が力を加えることで歩行する四足歩行ロボットを開発し、基本動作の確認を行った。

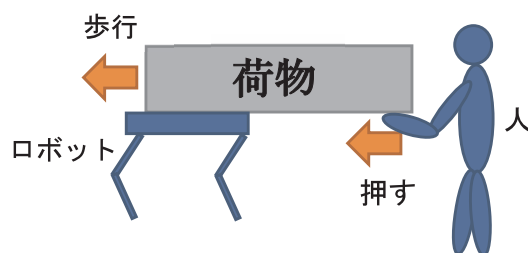


図1 運搬補助システムによる作業イメージ

事業名：職員研究奨励事業

課題名：脚式移動機構の活用による不整地向け運搬補助システムの開発に関する基礎的研究

以下、開発したロボットの概要、実装した歩行アルゴリズム、動作確認試験により得られた知見について報告する。

2. 開発したロボット

図2に、開発したロボットのハードウェア構成を示す。全長25cm、全幅20cm、全高20cm、重量3.1kgの大きさで、脚部は3個の関節を有し、合計12個のサーボモータ(DYNAMIXEL XM430-W210-R)で駆動される。モータの制御にはシングルボードコンピュータ(UP board 4GB RAM)を用いている。また、ロボットの姿勢を計算・推定するために9軸センサ(InvenSense mpu9250)を搭載した。

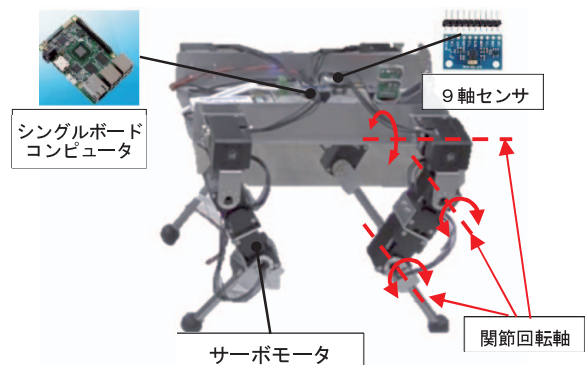


図2 ハードウェアの構成

3. 歩行制御

図3にロボットの歩行制御系の概略図を示す。歩行制御では足先軌道制御、逆運動学計算、姿勢推定などの処理を行う。足先軌道制御では脚の状態遷移に関する処理と、状態に応じて足先軌道を生成し、足先位置を計算する処理を行う。また、逆運動学計算により、足先位置から対応する関節角度を求め、9軸センサを使用した姿勢の推定を行い、進行方向の補正などを行う。

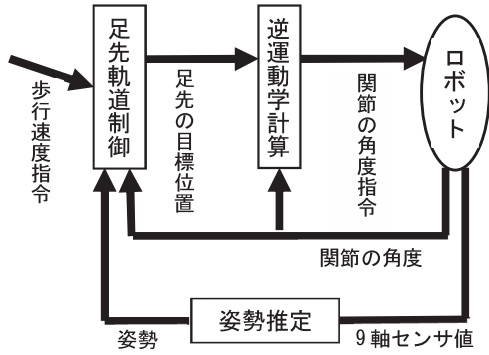


図3 歩行制御系の概略図

3.1 脚の状態遷移

歩行中、脚は地面に接触している支持脚期と地面から離れて振出されている遊脚期の2つの状態に分けられ、脚の状態に応じて適切な制御を行う必要がある。本研究では、この2つの状態を切り替えるために以下のようなパターン発生器を用いた^{1,2)}。図4にパターン発生器の概略図を示す。パターン発生器は周期的に変化する振動子によって構成される。基準となる振動子の状態を ϕ とすると、 ϕ は式(1)に示す周期関数で表される。ただし t は現在の時間、 t_0 は現在のサイクルを開始した時間 ($\phi=1$ となったとき $t_0=t$ とし、 ϕ を0にリセットする)、 T は歩行周期を表す。

$$\phi = \frac{t-t_0}{T} \quad \text{ただし、} 0 \leq \phi < 1 \quad (1)$$

これを用いて各脚の状態 ϕ_i ($i = \{FR(\text{右前脚}), FL(\text{左前脚}), BR(\text{右後脚}), BL(\text{左後脚})\}$ 。以下、添え字の i は脚の位置を表すものとする)は、基準となる振動子の状態と各脚の振動子の状態との位相差 $\phi_{i,offset}$ を用いて式(2)のように計算する。

$$\phi_i = \begin{cases} \phi + \phi_{i,offset} & (\phi + \phi_{i,offset} < 1) \\ \phi + \phi_{i,offset} - 1 & (\phi + \phi_{i,offset} \geq 1) \end{cases} \quad (2)$$

一歩行周期における支持脚期の割合であるデューティ比を β_i とすると $\phi_i < \beta_i$ のときに支持脚、 $\phi_i \geq \beta_i$ のときに遊脚となる。本研究では $\phi_{FR,offset}, \phi_{BL,offset}$ を0とし、 $\phi_{FL,offset}, \phi_{BR,offset}$ を0.5とすることで対角の脚を交互に動作させる「トロット歩容」を行った。

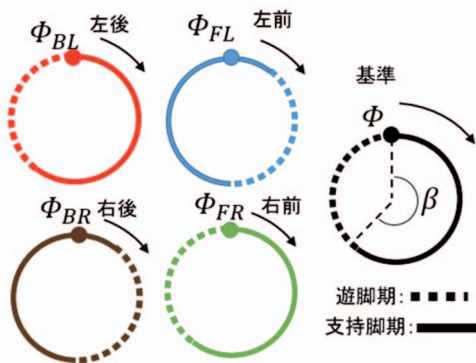


図4 パターン発生器を用いた脚の状態遷移

3.2 足先軌道の生成

支持脚、遊脚の状態に応じて足先軌道を計算し、足先位置($p_i = [p_x, p_y, p_z]^T$)を求める。図5にロボットの足先位置と初期姿勢を示す。座標系 B はロボットの胴体を基準とした座標系であり、原点は胴体の中心、 X 軸はロボットの正面を向くようにとる。座標系 I はロボットの初期姿勢を基準とした慣性座標系である。特に記載のない限りは座標系 B を基準とするものとする。 p_i は座標系 B からみた足先への位置ベクトル、 $p_{ini,i}$ は p_i の初期位置である。また、胴体の地面からの高さを h 、歩行速度指令は V_d 、ヨー方向角速度指令は ω_d であり、胴体高さは一定とみなす。

まず遊脚期の足先軌道について、支持脚期から遊脚期に切り替わったタイミングで脚の踏み出し位置 $p_{d,i}$ を式(3)により計算する。

$$p_{d,i} = p_{ini,i} + \frac{\beta_i}{2} T V_d \quad (3)$$

着地時の衝撃を小さくするため、遊脚軌道は支持脚期と切り替わる瞬間の足先の地面との相対速度が0となるように設計する必要がある。ここでは、三角関数を用いた遊脚軌道を図6のように設計した。遊脚軌道のXY成分は以下の式により計算した。

$$\phi_{sw} = \frac{\phi_i - \beta_i}{1 - \beta_i} \quad (4)$$

$$T_{sw} = T(1 - \beta_i) \quad (5)$$

$$A = \frac{p_{d,i} + V_d T_{sw} - p_{o,i}}{2} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (p_{o,i} + A(1 - \cos \pi \phi_{sw}) - V_d T_{sw} \phi_{sw}) \quad (7)$$

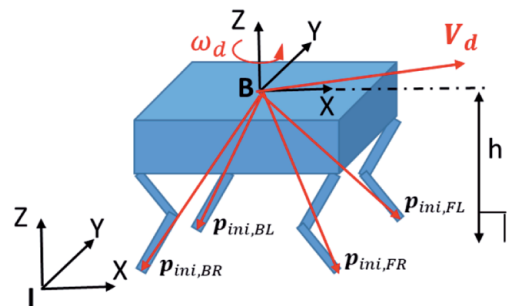


図5 ロボットの足先位置と初期姿勢

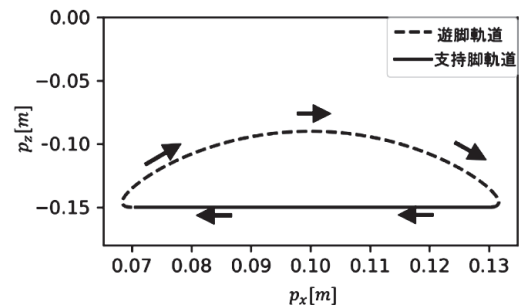


図6 脚軌道の例

ここで、 $p_{0,i}$ は支持脚期から遊脚期へ切り替わる瞬間の足先位置であり、サーボモータから得られる関節角度を順運動学にしたがって計算することで得られる。式(7)右辺の2行3列の行列は3次元ベクトルから2次元ベクトルへの変換に使用している。遊脚軌道のZ成分 p_z を式(8)に示す。

$$p_z = \frac{\Delta h}{2}(1 - \cos 2\pi\phi_{sw}) - h \quad (8)$$

Δh は足の持ち上げ高さである。また、幾何学的な位置関係から支持脚期の足先位置 p_i^k は式(9)のように計算した。

$$p_i^{k+1} = R_z(\omega_d \Delta t)(p_i^k - V_d \Delta t) \quad (9)$$

ただし、添え字の k は離散時間、 $R_z(\cdot)$ はZ軸まわりの回転行列、 Δt は制御周期を表す。

以上の手順により算出される目標の足先位置から対応する関節角度を逆運動学により計算し、ロボットのサーボモータへ送信する。本研究では順運動学・逆運動学の計算にはオープンソースのライブラリである KDL を使用した。

3.3 進行方向の補正

歩行ロボットは足の滑りなどにより、進行方向と目標方向にズレが生じるため、9軸センサを使用して進行方向の補正を行う。まず、9軸センサの測定値からカルマンフィルタを用いて、座標系 I を基準とした姿勢を表すクォータニオン ($\mathbf{Z} = [z_w, z_x, z_y, z_z]^T$) の推定値を得る。9軸センサからのデータ取得とカルマンフィルタの処理にはオープンソースのライブラリである RTIMULib2 を使用した。座標系 I のX軸方向とロボットの正面方向との間の角度である方位角 θ は式(10)により求める。

$$\theta = \arctan\left(\frac{2(z_w z_z + z_x z_y)}{1 - 2(z_y^2 + z_z^2)}\right) \quad (10)$$

目標のヨー方向角速度 ω_{cmd} を積分することで得られる目標の方位角 θ_{ref} を用いて、(9)式の ω_d を定数 K_θ を用いて以下のように計算する。

$$\omega_d = K_\theta(\theta_{ref} - \theta) \quad (11)$$

方位角を強制的に動かしたところ、上記の方法によりロボットが旋回し、進行方向が補正されることを確認した(図7)。

本研究で使用した歩行パラメータを表1にまとめる。

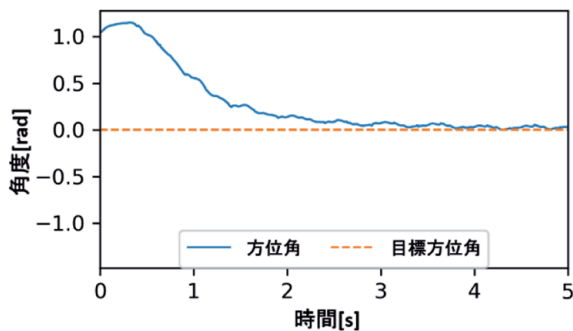


図7 進行方向の補正

項目	値
T	0.5[s]
$\phi_{FR,offset}$ $\phi_{BL,offset}$	0
$\phi_{FL,offset}$ $\phi_{BR,offset}$	0.5
B	0.6
h	0.15[m]
Δh	0.03[m]
Δt	3.3[ms]
K_θ	2

4. 歩行動作試験

上記の歩行制御プログラムの実装は、C++を用いて行った。シミュレーションを活用して繰り返し検証を行うことで、プログラム開発の効率化を図った。図8に歩行動作のシミュレーションの様子を示す。シミュレーションはオープンソースのシミュレータである Gazebo を使用して行った。図9に実機による歩行動作試験の様子を示す。実機での歩行動作試験の結果、ユーザが与えた歩行速度指令に応じてロボットが前後左右、旋回移動が可能であること、また、最大で20 cm/s 程度の速度で歩行可能であることを確認した。

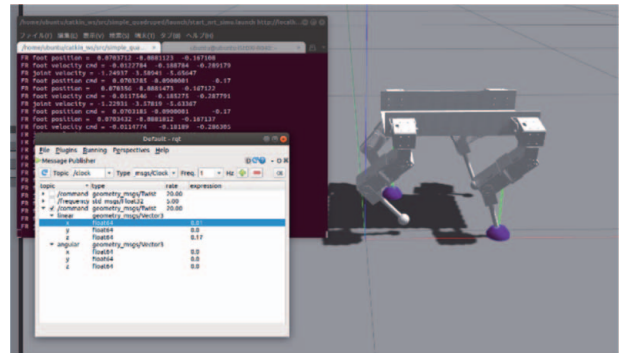


図8 Gazebo によるシミュレーションの様子

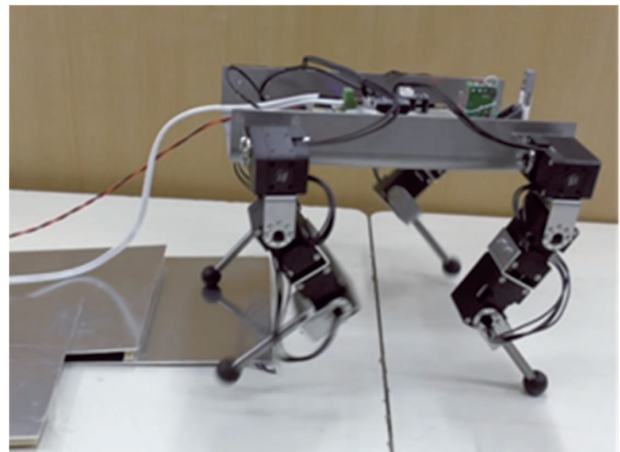


図9 実機による歩行動作試験の様子

5. 力の計測値を用いた協調動作

5.1 作業者の加える力による自動歩行

簡便な操作による人との協調作業を実現するため、作業者がロボットに加える力に応じて歩行する四足歩行システムの開発を行った。なお、本研究では基礎検討として、X軸方向のみについて力の計測値から歩行速度指令を生成し、図3のロボット制御系へ入力することでロボットの歩行制御を行った。ロボットに加わる力はロボット後部に取り付けた一軸のロードセルで測定し、マイコン（Arduino Nano）を通して取得した（図10）。力の測定値 f から歩行速度指令の X 成分である $V_{d,x}$ を、比例定数 K_f を用いて次式で求めた。なお、 K_f は $0.02[m/s \cdot N]$ とした。

$$V_{d,x} = K_f f \quad (12)$$

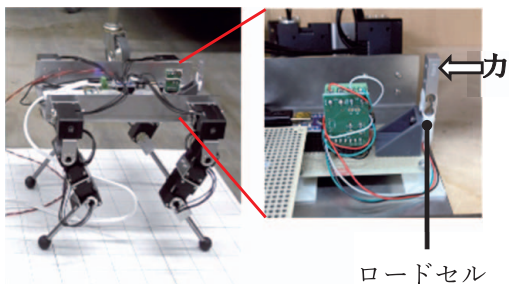


図10 ロードセルの取り付け位置

5.2 動作試験

ロボットに取り付けたロードセルに手で力を加えることにより歩行動作の確認を行った。図11に実験の様子、図12にロードセルの計測値を示す。実験の結果、加えた力の大きさに比例して歩行速度が変化することを確認した。しかし、歩行に伴う本体の揺動などにより、ロボットに加える力の大きさを一定に保つことは困難であった。式(9)と式(12)より、力の値の急激な変化は支持脚の動作へ直接影響を与えるため、さらに揺動が激しくなることが懸念される。

以上の検証により、運搬補助システムとして安全に動作させるためには、今後ロボット本体の揺動を低減するための姿勢制御方法や、力の測定値からの歩行速度の計算方法などを検討する必要があることがわかった。

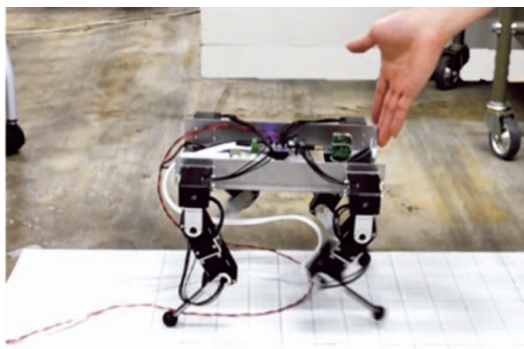


図11 加えた力に応じて歩行する様子

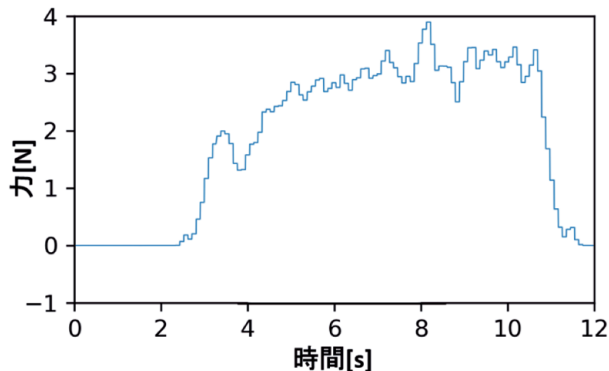


図12 歩行中のロードセルの測定値

まとめ

四足歩行ロボットについてシミュレーションによるアルゴリズムの検証と実機による動作試験を行い、前後左右や、旋回などの歩行が可能であることを確認した。人との協調による運搬作業を実現するため、加えた力に応じて歩行するシステムの検討を行い、ロードセルによる力の計測値から胴体の目標速度を生成し歩行制御が可能であることを確認した。

今後は歩行中の揺動の低減対策や、傾斜地での歩行を考慮したシステムの改良などの実用化に向けた検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 辻田勝吉, 重弘祐二, 増田達也: 四脚歩行ロボットの最適歩行パターンに関する一考察, 第48回自動制御連合講演会, DOI: 10.11511/jacc.48.0.159.0, (2005)
- 2) Bledt G., Patrick M., Sam I., et. al: Contact Model Fusion for Event-Based Locomotion in Unstructured Terrains, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.21-25, (2018)

外観検査のための多視点画像解析技術の開発

飯島 俊匡, 岡崎 伸哉, 本間 稔規

Development of Multi-View Image Analysis Technology for Visual Inspection

Toshimasa IJIMA, Shinya OKAZAKI, Toshinori HONMA

抄 録

機械部品製造業や食品加工業では、不良品の排除や食品原材料の不用部を除去するため、欠陥の有無や位置を目視で確認しているが、生産工程の省力化や生産性向上のため目視による外観検査の自動化が求められている。既存のカメラ画像を利用した自動外観検査では、対象物の撮影は一方からのみであることが多く、死角が生じたり三次元空間上の位置を特定できないなどの課題がある。そこで、対象物を複数の方向から撮像することで全周囲の画像を取得可能な撮影装置と、テクスチャ解析により対象物の不用部を抽出し、異なる視点の画像間で対応付けを行うことでその位置を推定する多視点画像解析手法を開発したので報告する。

キーワード：外観検査，多視点画像，位置計測，特徴点マッチング

1. はじめに

生産工程の省力化や生産性向上のため、目視で行っている外観検査の自動化に対するニーズが道内の機械製造業や食品加工業から多く寄せられている。金属探知機やX線検査装置、色彩選別機などの自動検査装置は普及してきているが、現状ではまだ多くの工程で目視に依存している。例えば、機械製造業では製品の傷やバリなどによる不良品の排除、食品加工業では大きさ等にバラツキがある原材料の受入検査や品質評価、不用部や異物の除去などで多くの人手を必要としている(図1)。



図1 目視による外観検査と食品加工での不用部除去作業

従来の自動外観検査ではカメラ一台を用いたものが多く、対象物を一方向から見た画像しか得られないため死角が生じたり、三次元空間上の位置を特定できないなどの課題がある。また、対象物の三次元形状を取得するステレオビジョンセンサーやデプスカメラでは、対象表面の色やテクスチャなど形状以外の特徴を得ることは難しく、通常のカメラ同様に単体

での撮影では死角が生じる。この死角の問題を解消するため、対象物を転動させる搬送機構と組み合わせて全周囲の検査を行う手法が考えられ、当场でもジャガイモ全周の芽の位置を計測して除去するジャガイモの芽取り装置を開発した²⁾が、検査装置が大型となるため、設置場所の制約が大きくなる。

そこで本研究では、既存の食品加工工程などに導入可能な大きさであり、目視検査と同等以上の処理速度での自動外観検査を実現するため、多方向からの撮像により死角の少ない対象物の画像を取得し、欠陥等の特徴的な部位を抽出して多視点画像間の対応付けを行うことで抽出した部位の位置推定を行う多視点画像解析技術を開発したので報告する。

2. 多視点画像撮影装置の開発

機械製造業や食品加工業などの外観検査工程においてフィールド試験を実施するため、対象物を4方向から同時に撮影し、死角の少ない画像を取得する多視点画像撮影装置(図2)を試作した。撮影装置は持ち運びが可能な大きさ(横幅1,450mm, 奥行550mm, 高さ720mm, 重さ約15kg)で、撮像範囲は搬送路面600mm×500mmとした。カメラは解像度3.2

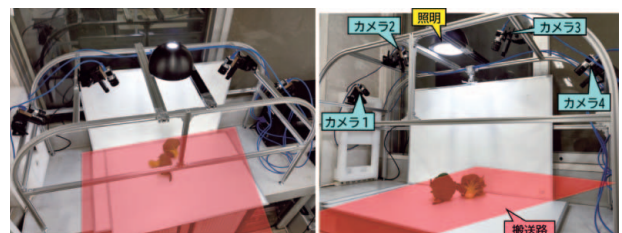


図2 開発した多視点画像撮影装置

事業名：経常研究

課題名：外観検査のための多視点画像解析技術の開発

Mピクセル（2048×1536画素）、フレームレート55fpsで撮像可能なグローバルシャッターのUSB3.0カラーカメラを4台使用し、撮影対象に応じてカメラ位置を変更可能とした。カメラレイアウトを変えて白菜を撮像した結果、接地面以外について死角のない画像が得られた（図3,4）。

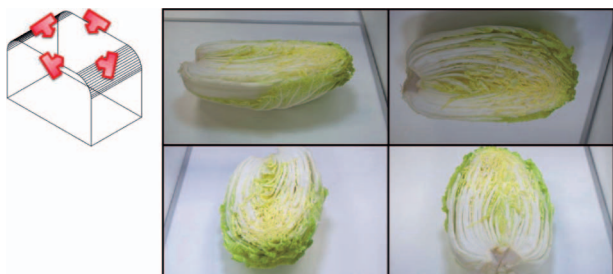


図3 カメラレイアウト：四方の撮像例



図4 カメラレイアウト：アーチ状の撮像例

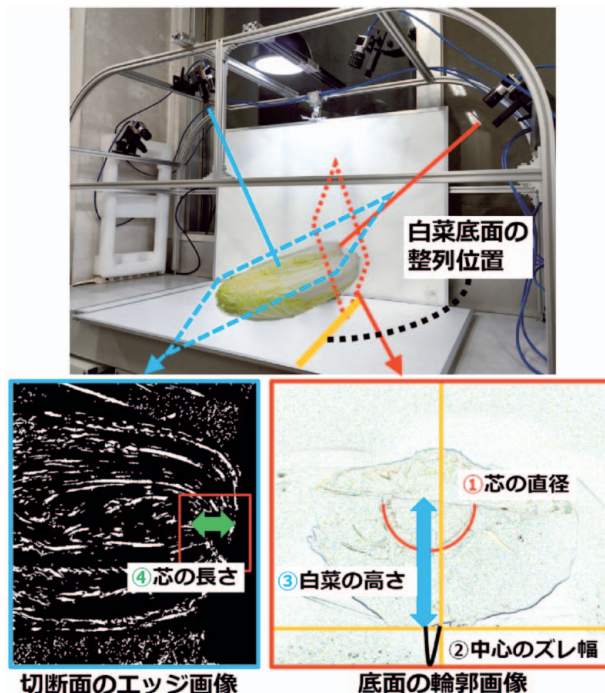


図6 多視点画像撮影装置を用いた不用部位置の推定

3. 不用部位置推定手法の開発

食品加工の対象物となる白菜は、産地や収穫時期による形状のバラツキが大きい。良い時期の白菜は芯が小さく葉の密度が高いが、悪い時期は芯が長くなり、葉の密度が低くなる（図5）。加工時は可食部ではない芯を目視と手作業で取り除く作業を行っていることからその作業を自動化するため、不用部となる芯の位置を推定する手法を開発した。

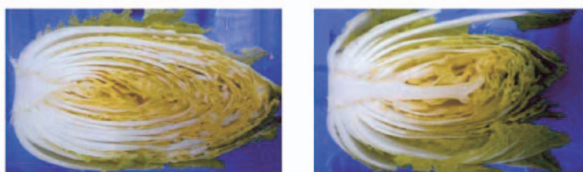


図5 白菜の産地、季節によるバラツキ

白菜の芯の切断面は均質でありテクスチャ（表面の質感や模様）が一様となっていることに対し、葉は積層していることから輪郭抽出とエッジ強度からテクスチャの境界を求めらることで芯の位置を推定することが可能である。白菜の底面画像（図6右下）から芯の直径，中心とのズレ幅，白菜の高さが求められ，白菜の切断面画像から芯の長さが求められる。このとき，白菜の底面が既知のライン上に整列するよう配置すれば，多視点画像撮影装置のカメラ座標は既知であることから，三次元空間上における白菜の芯の位置と大きさを推定可能となる。

4. 実時間特徴点マッチング処理手法の開発

4.1 特徴点マッチングの既存手法SURF

前節にある白菜芯の検出のように画像解析を用いて対象物から欠陥などを検出する場合，用いる画像の状態により欠陥等の特徴の捉えやすさが異なる。多視点画像を用いた画像解析を行う場合も同様であり，対象物を捉えるカメラの向きによって欠陥を容易に検出できる場合とできない場合が生じる。このとき，複数のカメラから得られた対象物の画像において，対象物上の点群が各画像間で対応付け可能であれば，あるカメラで検出できなかった欠陥があったとしても，他のカメラで検出した欠陥からその位置が推定可能となる。

2枚の画像間で特徴点を対応づけるマッチング手法は多くあり，当场でも局所画像特徴量SURF（Speeded Up Robust Features）を用いて領域合成を行う微細画像処理技術を開発した³⁾。SURFはその特徴点に平行移動，回転，拡大・縮小，明るさの変化があっても普遍的な固有値を特徴量とし，画像の変化に対して頑健さを持つため，まず多視点画像に対してSURFを用いた特徴点マッチングを試みた。ここでは半割の白菜を撮影対象とし，それを平行移動させて撮影する。検証には1つのカメラで撮影して得られた同じ視点の2枚の画像（図7左のペア）と，2つのカメラで撮影して得られた異なる視点の2枚の画像（図7右のペア）を用いた。

この2組の画像に対してSURFを用いて特徴点マッチングを行った結果を図8,9に示す。図8に示すとおり対象物

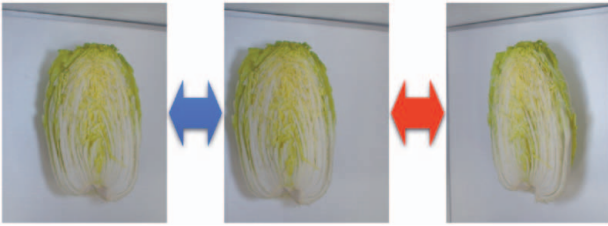


図7 左のペア：同じ視点画像，右のペア：異なる視点画像

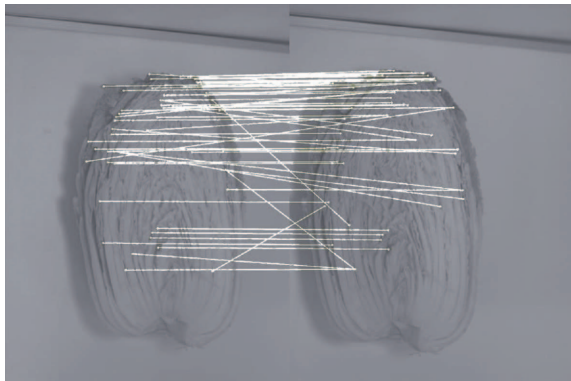


図8 SURF を用いた同じ視点の画像に対する対応付け

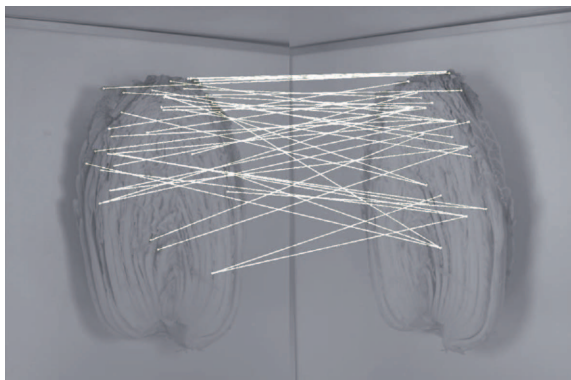


図9 SURF を用いた異なる視点の画像に対する対応付け

の姿勢が同じ場合，多くの特徴点について良好な対応付けが出来ている。しかし，図9に示すとおり対象物の姿勢が異なる場合，SURFは原理的に対応点の消失に対応していないため，対応付け出来る特徴点の数は減り，誤った対応付けも多くなってしまふ。多視点画像撮影装置で得られる画像は後者のケースが大半であることから，本検証によりさらに精度の良い特徴点マッチング手法が必要であることが分かった。

4.2 特徴点マッチングの新技术SuperGlue

近年，画像認識分野では機械学習やディープラーニングなどいわゆるAI手法を用いた成果が多く出ており，画像処理分野においても活用がなされている。特徴点マッチング手法においても，入力データと出力データの関連度スコア(Attention)を計算し，入力から出力に変換するモデルを構築する手法を組み込むことで，画像間の特徴点の対応付けを

高精度に実現する手法が提案されている。本研究では，特徴点マッチングにおける先端的手法の一つであるSuperGlue⁴⁾に着目し，多視点画像間の対応付けに適用した。

SuperGlueは，SURFと同様に普遍的な固有値を持つ局所特徴量から特徴点を抽出する。従来手法ではその局所特徴量をマッチングする2枚の画像間で直接比較することで対応点を探索していたが，SuperGlueでは特徴点の相対位置や顕著性，隣接している特徴など，画像内の特徴同士の関係性を関連度スコアとしてパラメータ化する。そしてマッチングする2枚の画像に対して，それぞれの画像内部における関連度スコア，2枚の画像間における関連度スコアをグラフニューラルネットワークに入力し，2枚の画像間における特徴点の対応付けの良好さを評価値として最大化問題を解く(図10)。このとき，2枚の画像の片方にしか現れない特徴点による影響を抑えるため，対応先が存在しない特徴点を棄却する仕組みを組み込む。それにより対象物の姿勢が変わったり，視点の異なる画像において特徴点が消しても精度良くマッチングを行うことが可能となる。

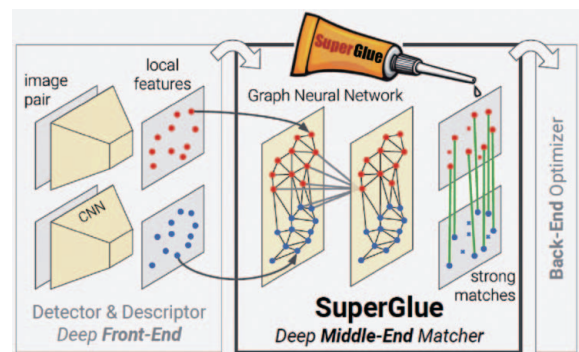


図10 SuperGlueによる画像マッチングの概念

図7に示した白菜の同じ視点の画像ペアと，異なる視点の画像ペアに対して，SuperGlueを用いたマッチング結果を図11，12に示す。どちらの画像ペアに対しても従来手法に比べ大幅に対応点が増え，誤った対応付けが少なくなっており，マッチングの精度が向上していることが分かる。

また，より複雑な形状であるブロッコリーを対象とした場合について評価した結果，図13に示すとおり誤った対応付けが少なく，多くの特徴点で良好な対応付けが出来ており，軸の位置や姿勢が大きく違う視点の異なる画像間においても精度良くマッチングが可能であることを確認した。

また，表1の仕様の計算機を用いてSuperGlueによる特徴点マッチングの処理速度を評価した結果，入力画像の解像度が800×600画素のとき，毎秒約14組の画像に対して対応付けが可能であることを確認した。

この処理速度は，人の目による不用部追跡と同等以上の処理速度であることから，目視による外観検査等の自動化に活用できる見通しが得られた。

表1 特徴点マッチングに用いた計算機仕様

CPU	INTEL Core i9-9900K (コア数:8個, 動作クロック:3.6GHz)
Memory	16GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti (CUDAコア:3,584個)
OS	Windows10 Pro 64bit

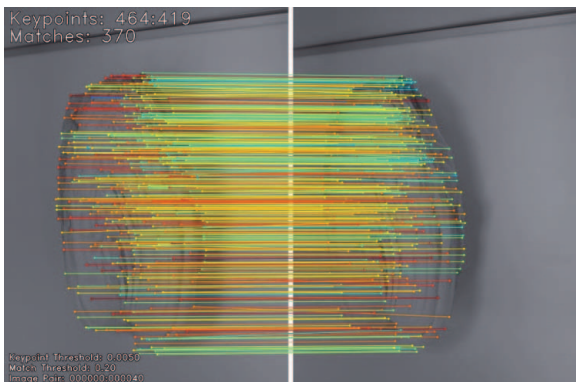


図11 SuperGlueを用いた同じ視点の画像に対する対応付け

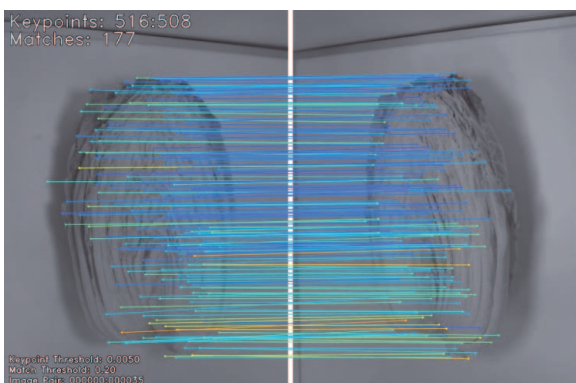


図12 SuperGlueを用いた異なる視点の画像に対する対応付け

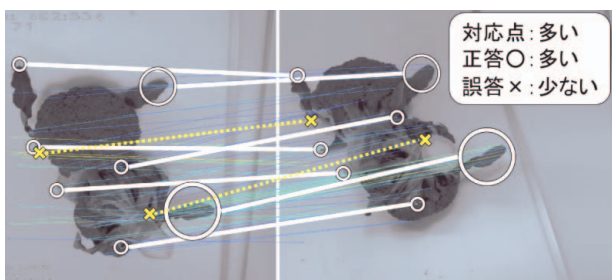


図13 異なる視点のブロッコリーのマッチング例

5. おわりに

本研究では、対象物を4方向から同時に撮影して全周囲の画像を取得する、持ち運びが可能な大きさの多視点画像撮影装置を試作した。また、開発した撮影装置を用いて半割の白菜の底面および切断面の画像を取得し、輪郭抽出とエッジ強度、テクスチャ解析を行うことで、不用部(白菜の芯)の位置を計測する画像解析手法を開発した。そして異なる視点から得られた対象物の画像に対して、特徴マッチング手法 SuperGlue を用いて画像間の対応付けを行うことで、抽出した不用部の三次元空間上の位置を推定する多視点画像解析手法を開発し、従来手法よりも高精度かつ毎秒14組の処理速度で画像の対応付けが可能であることを確認し、目視による外観検査等の自動化に活用する見通しを得た。

食品加工の主な原材料である農水産物は、形状や品質が一樣ではないなど特有の困難さがあり、自動検査装置の実用化、普及のためには、本研究で開発した実時間特徴点マッチング処理手法に加えて、対象物の画像から形状や色などの特徴を抽出して不良部位や異物などを判別する画像解析手法の開発が必要である。引き続き技術開発を行い、道内機械製造業へ技術移転して食品加工業の生産工程への導入を目指す。

引用文献

- 1) 大村 功・三田村智行・堤 大祐, 「FPGAを用いたリアルタイムステレオビジョンセンサの開発」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.311, 2012
- 2) 井川 久・中西洋介・他, 「じゃがいもの不用部除去システムの開発」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.317, 2018
- 3) 飯島俊匡・岡崎伸哉・他, 「画像計測・検査装置のための微細画像処理技術の開発」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.313, 2014
- 4) P.E. Sarlin, D. DeTone, T. Malisiewicz, A. Rabinovich, “SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks”, CVPR, 2020.

機能性包材によるメロンの長期保存技術

細川 真明, 山岸 暢, 野村 隆文,
瀬野修一郎, 森 武士, 可児 浩

Long-term Preservation Technique for Melons by the Functional Packaging System

Masaaki HOSOKAWA, Tohru YAMAGISHI, Takafumi NOMURA,
Shuichiro SENO, Takeshi MORI, Hiroshi KANI

キーワード：MA 包装, 青果物, 低温障害, 調湿, 鮮度保持

1. はじめに

メロンなどの青果物は、収穫されてから消費者の手に渡るまでの間に周辺の雰囲気を選択的に調整することで鮮度を延長させることができる。これには青果物が収穫後も行う呼吸反応を抑制することで、果実内の栄養の消費を抑える方法がある。一方で青果物は呼吸反応により細胞間物質であるペクチンやアミロースといった多糖類も分解されるため果肉は柔らかくなり食味が向上する¹⁾。しかし、同時に甘味も減衰するため、追熟と呼ばれる期間を置いて食べごろとなる時期を調節する必要がある。例えば、一般的なメロンは収穫後1週間程度で食べごろとなるが、その後は急速に甘味が減衰し、実は崩れ、アルコール由来の臭気を発生して腐敗していく²⁾。多くの鮮度保持技術では青果物を低温・高湿度・低酸素・高二氧化碳素雰囲気下で貯蔵し呼吸速度を低下させることで食べごろとなる時期を延長させている。

このような長期保存を実現するために、青果物を包材中に貯蔵し適切な雰囲気に調整するMA (Modified Atmosphere) 包装技術が用いられている。MA 包装は透湿性とガス透過性を持つプラスチックフィルムで青果物を包装することで、カビの繁殖を抑制しつつ、適度なMA 雰囲気を保持する特徴がある。MA 包装技術による青果物の鮮度保持技術は、食品の高付加価値化やフードロス削減の観点から世界的に重要視されている。しかし、一般的に用いられるMA フィルムの多くが性質の異なる素材を積層させたラミネートフィルムを使用しており、高価となり、他用途への再利用には向かないため、資源のリサイクルの観点からも現状の普及状況は極めて限定的である³⁾。

本研究では、北海道の天北地方で採掘される稚内層珪質頁岩と呼ばれる天然多孔質鉱物が非常に高い自然調湿能力を有

事業名：経常研究

課題名：機能性プラスチックフィルムの設計・成形加工技術の開発 (令和元～2年度)

することを利用し⁴⁾、一般的なプラスチック素材の直鎖状低密度ポリエチレン (LLDPE) と組み合わせた長期保存技術について検討を行った。さらに、汎用的なMA 包装体系による青果物貯蔵技術の普及を目指して、道産メロンの鮮度保持評価を行った。

2. 実験方法

2.1 貯蔵試験

供試体には北海道苫前産メロン (品種名：レノン) を用いた。包材は、容量が約30Lの防曇処理したLLDPE製袋に、 $\phi 0.5\text{mm}$ の針で横一列に10個の孔を穿孔したものを⁵⁾。調湿材として、粒状 (粒径2.5-8 mm) の稚内層珪質頁岩32gを乾燥後不織布袋に入れメロン1玉あたり1袋となるよう配



図1 メロン貯蔵時の様子 (上：梱包前, 下：梱包後)

置した。メロンは表皮を水洗したのち、約60℃の温水に30秒間浸漬した。自然乾燥後、メロン5玉を調湿材5袋および温湿度計とともに上記包材に入れ、蓋付段ボール箱に格納し、低温室内で室温2℃および0℃で貯蔵を開始した(図1)。

上記試験区の他、適切なMA雰囲気条件を検討するために、包材の有無、調湿材の有無および貯蔵温度を変えた計5試験区を設置し、6～9週間の鮮度の推移を観察した(表1)。

表1 貯蔵試験の各貯蔵条件

試験区	包材	梱包数	調湿材	温度
①	無し	3玉	0	2℃
②	無し	3玉	0	0℃
③	LLDPE	5玉	32g×5	2℃
④	LLDPE	5玉	0	2℃
⑤	LLDPE	5玉	32g×5	0℃

2.2 前処理方法の検討

青果物の腐敗原因の一つに高湿度下での保存によるカビの繁殖があるため、これを抑制することは鮮度保持において不可欠である。メロン表皮の電解水浸漬のような前処理を行うことでカビの繁殖を抑制できることが確認されているが、電解水が高コストになるため現在は使用されていない。そこでより安価にカビの繁殖を抑制する手法を検討するため、温水浸漬処理に着目した。具体的には、温水(60℃)のみに30秒間浸漬したメロンおよび温水(60℃)と電解水の両方にそれぞれ30秒間浸漬したメロンの処理前後の表皮約80cm²で拭き取り試験を行い、カビを培養することでその減少量を比較した。

2.3 各種鮮度指標の評価

貯蔵期間中の包材内の温度及び湿度推移を評価するため、(株)ティアンドデイ製温度湿度データロガーRTR507Sを各試験区に同梱し、15分おきに温湿度をモニターした。外観は1週間おきにカビや変色の度合いを観察した。貯蔵後の包材内ガス雰囲気を測定するため、東横化学(株)製ハンドヘルド型エチレン(C₂H₄)分析計F-950を用いて、包材内中の酸素、二酸化炭素およびエチレン濃度を測定した。蒸散による水分の減少量を比較するため、貯蔵前後のメロン果実の重量を測定し、その比を水分保持率とした。貯蔵前後の果肉硬度を比較するため、日本電産シンボ(株)製フォースゲージFGP-5に外径20mmのステンレス押し治具を取り付けて使用し、果肉中心部から表皮側へ治具を約15mm沈めたときの最大応力を硬度とした。貯蔵前後の果肉糖度を比較するため、(株)アタゴ製ポケット糖度計PAL-1を使用し、果肉断面の果梗、赤道、花痕付近から果汁を採取しBrix糖度を測定した。貯蔵前後の果肉の色彩を、コニカミノルタジャパン(株)製色彩色差計CR-410を用いて測定した。

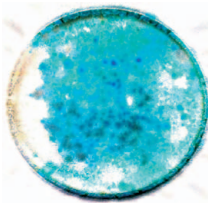
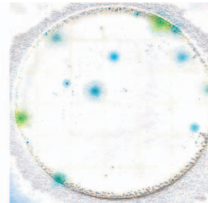
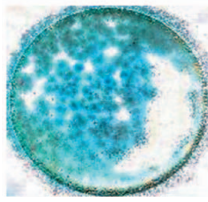
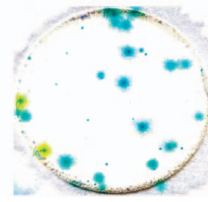
3. 結果と考察

3.1 前処理方法の検討

腐敗原因の一つとして懸念されるカビの抑制効果を検討するために、貯蔵前に行った温水浸漬処理および電解水浸漬処理によるカビ数の比較を行った(表2)。

温水浸漬および電解水浸漬により、カビ数についてはいずれの処理でも大幅にカビ数を減少させることが可能であり、高コストな電解水を用いなくても、温水浸漬のみの前処理で十分な効果があることが示唆された。

表2 メロン前処理前後の菌およびカビ数
(上：温水浸漬，下：温水浸漬+電解水浸漬)

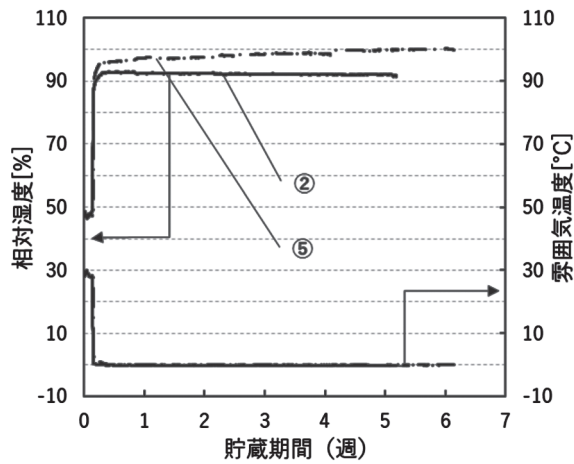
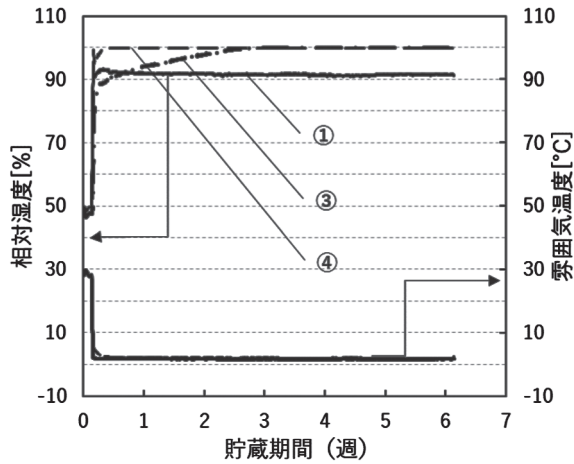
処理方法	温水浸漬	
	処理前	処理後
カビ培養後		
カビ数 (CFU/mm ²)	TNTC ^a	0.02
処理方法	温水浸漬+電解水浸漬	
	処理前	処理後
カビ培養後		
カビ数 (CFU/mm ²)	TNTC ^a	0.04

^a Too numerous to count.

3.2 貯蔵中の温湿度の推移

貯蔵中はメロン果実からの水分の蒸散により包材内中の湿度が上昇し、表皮が結露することでカビ発生の原因となる。一方で低温下での乾燥は青果物の呼吸障害を誘引するため、一般的にメロンの鮮度保持における相対湿度は85～95%程度が望ましいとされている⁶⁾。本研究で採用した調湿材による包材内の調湿効果を検証するために、気温0℃および2℃下での包材内の湿度の推移を測定した(図2)。包材無しで貯蔵した試験区①および②(ブランク)はいずれも湿度90%程度で推移していたのに対し、調湿材無しで包装した試験区④は1日程度で湿度が飽和し、結露を発生した。一方で調湿材を同梱した試験区③ではおよそ3週間湿度の飽和を抑制しつつ高湿度を維持することが可能であった。さらに、より低温で貯蔵した試験区⑤ではおよそ6週間湿度の飽和を抑制することが可能であった。メロンは蒸散量の多い青果物であるこ

とから、調湿材の量を増やすことでより高い鮮度保持効果を付与できると考えられる。



3.3 貯蔵中の外観変化

包装無しで2℃および0℃下に貯蔵した試験区①および②の9週間後の外観を図3の①、②に示す。いずれの試験区も表皮に典型的な低温障害の一つであるピッチング（黒点）が多く観察された。これは低温下で果実が乾燥する際に起こる呼吸障害の症状である（図3 ①、②左側矢印部）。特に0℃で貯蔵した試験区②については黒点が果肉内部付近まで侵食しており、重度の低温障害である陥没が発生していた（図3 試験区②右側矢印部）。これらの低温障害とみられる症状は貯蔵開始から約4週間で発生しており、包装無しでは長期間の鮮度保持が不可能であった。

包材を使用した試験区④では、表皮に赤カビが発生していた（図3 ④破線囲い線部）。試験区③ではわずかなカビが発生していたものの、試験区④と比較して明らかに外観が良好であった。これは調湿材の効果により、貯蔵期間中の結露の発生を長期間防止できたことが要因であると考えられる。さらに0℃で貯蔵した試験区⑤ではほとんどカビの発生は見られないことから、貯蔵温度を下げることでより長期の保存が可能であることが確認できた。

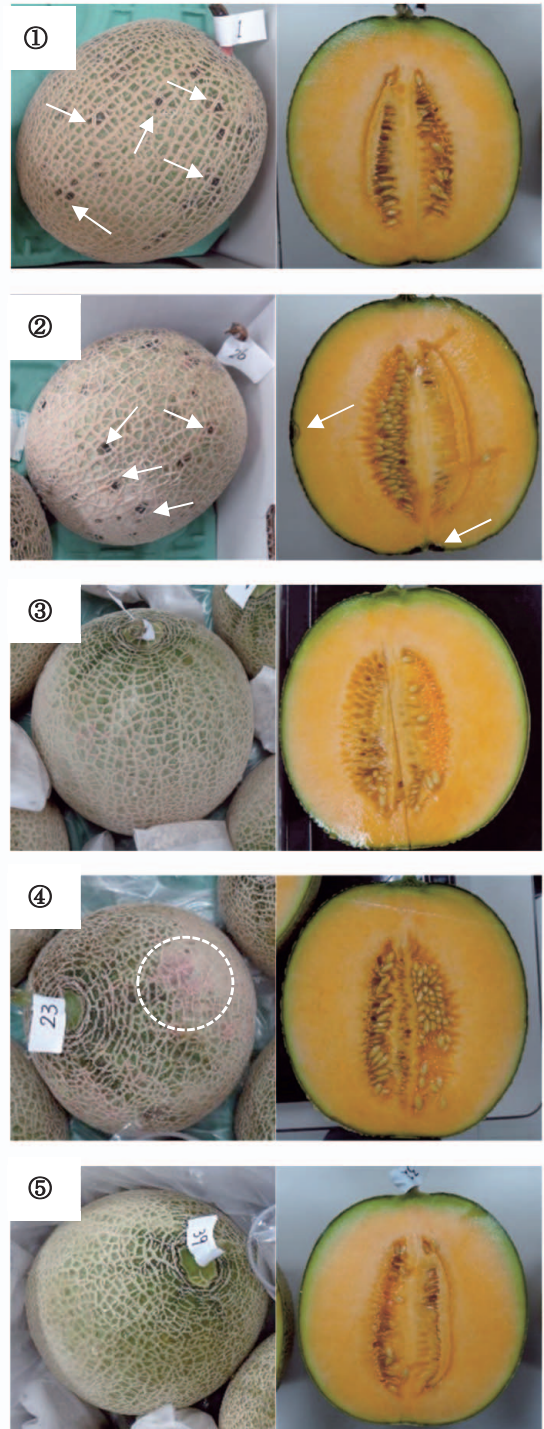


図3 6週間貯蔵後のメロン外観および断面（試験区①、②、③、④、⑤）

3.4 貯蔵中の包材内のガス組成

包材内のガス組成（エチレン C_2H_4 、酸素 O_2 、二酸化炭素 CO_2 濃度）の測定結果を図4に示す。試験区①および②は包材を用いていないため低温試験室内のガス組成を測定し、大気的一般組成と同様の結果を得た。包材を用いた試験区ではいずれも大気組成と比べて低酸素、高二酸化炭素濃度であるが、MA雰囲気としては依然不十分であるため、穿孔数を減らし、より低酸素、高二酸化炭素濃度にすることで鮮度保

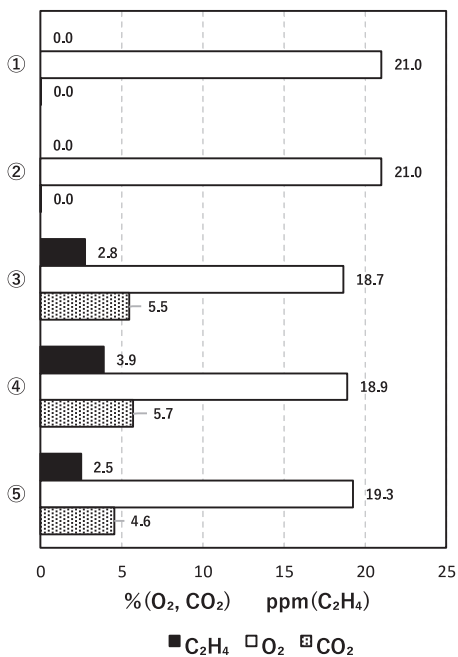


図4 試験区①～⑤のガス組成

持効果の長期化が期待される。また調湿材を用いたほうがエチレン濃度はやや低くなっており、エチレンが調湿材に吸着されていると考えられる。

3.5 貯蔵前後の水分保持率

蒸散により放出される水分量は貯蔵中の青果物の呼吸の活発さと関係していることから、貯蔵前後におけるメロン果実の水分保持率を測定した(図5)。試験区①および②は包材を用いていないため、蒸散量が多く水分保持率が他より小さい。包材を用いた試験区に有意な差は見られなかったが、いずれの試験区も蒸散による水分の減少は1%程度であることから呼吸は抑制されていると考えられる。

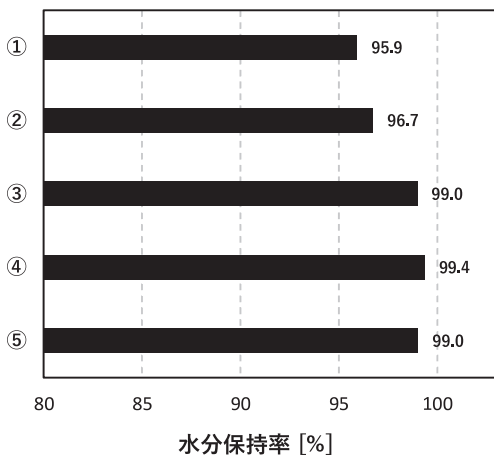


図5 メロン貯蔵後の水分保持率

3.6 果肉硬度の変化

MA 雰囲気下においても青果物は代謝を行うため、徐々に

果肉は柔らかくなる。図6に収穫直後のメロンの果肉硬度、常温で10日追熟させた際の果肉硬度および各試験区で貯蔵した後の果肉硬度を示す。追熟後の果肉は初期値に比べ硬度が大幅に小さくなっている。包材を用いた他試験区も初期と比較して柔らかくなっているが、追熟後のものより硬度は高く呼吸抑制による追熟の遅延が影響しているものと考えられる。また、2℃での貯蔵よりも0℃で貯蔵した試験区の方が硬度が高いことから、より低温で貯蔵することで追熟の遅延効果が大きくなっていることが確認された。いずれの試験区も果肉自体は貯蔵後もやや未熟な状態であり、表皮の腐敗を防ぐことで更なる長期鮮度保持が可能であると考えられる。

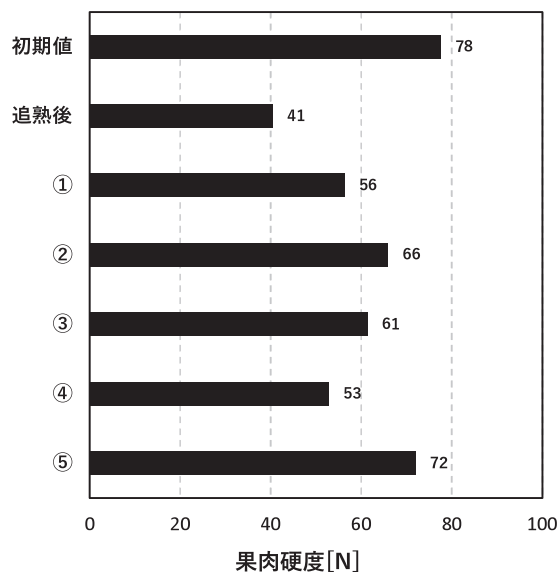


図6 メロン貯蔵前後の果肉硬度

3.7 果肉糖度の変化

呼吸反応によって分解される糖分の量が糖度に影響することから、収穫直後、常温で10日追熟後および各試験区①～⑤

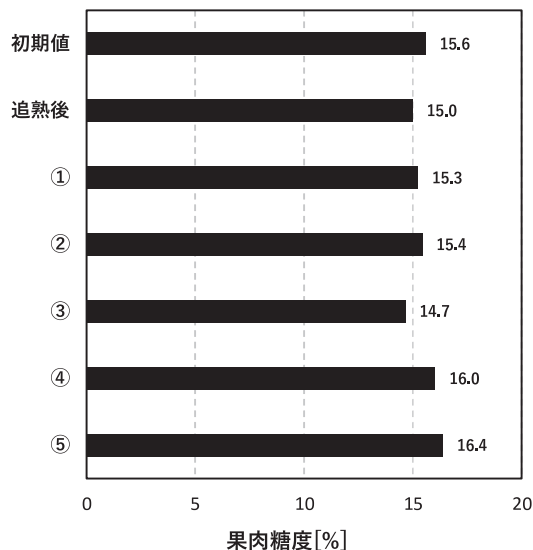


図7 メロン貯蔵前後の果肉糖度

で貯蔵した後の果肉糖度を測定した（図7）。果肉の糖度はすべての試験区で15%程度となり、本試験では有意な糖度の変化は見られなかった。以上のことから、追熟により食味が増すのはメロンの果肉硬度の低下によることが示唆された。

3.8 果肉色の変化

赤肉メロンの果肉が橙色になるのは果肉の成長過程でβ-カロテンが累積されるためである⁷⁾。メロン貯蔵試験後の追熟の程度を比較するために貯蔵後の果肉断面の色彩を測定した結果を図8に示す。色彩は $L^*a^*b^*$ 色空間測定により数値化して表した。対象の明度を表す L^* 値は0~100の範囲で数値化され、0になる近づく程暗く、100に近づく程明るい色彩であることを表す。緑-赤方向の色彩を表す a^* 値には上限値および下限値の定義はなく、無彩色の0を基準としてより低い値である程緑、より高い値である程赤の色彩が強いことを示している。青-黄方向の色彩を表す b^* 値も同様上限値および下限値の定義はなく、無彩色の0を基準としてより低い値である程青、より高い値である程黄の色彩が強いことを示している⁸⁾。

本試験においては各試験区で L^* 値に明確な変化は現れなかったものの、 a^* 値および b^* 値において貯蔵前および追熟後のメロンと比較して他試験区の貯蔵後のメロンは低くなった。この結果は果肉の明るさは変わらないものの、貯蔵後の果肉の赤みや黄みが薄れていることを示していた。

4. まとめ

道産メロンの実用的なMA貯蔵技術を確立することを目的として、LLDPE包材と稚内層珪質頁岩を用いたメロンの鮮度保持試験を行い、以下の結果が得られた。

- 本研究で用いたLLDPE包材と調湿材の組み合わせでは約6週間の鮮度保持が可能であった。
- 貯蔵中に起こる品質低下の原因はカビの発生または低温障害による表皮の腐敗であり、LLDPE包材と調湿材の組み合わせにより、これらの発生を遅らせることが可能であった。
- 低温貯蔵後のメロン果肉は常温で追熟したものと比較して硬く、果肉の赤みや黄みが薄れることが明らかになった。

本試験の結果を踏まえて、さらに長期にわたる鮮度保持を達成するために、包材の穿孔数や調湿材の使用量を調整する必要があることが判明した。今後の追試験によって貯蔵条件の最適化を検証していく予定である。

謝辞

本研究で使用した供試体のメロンは、るもい農業協同組合

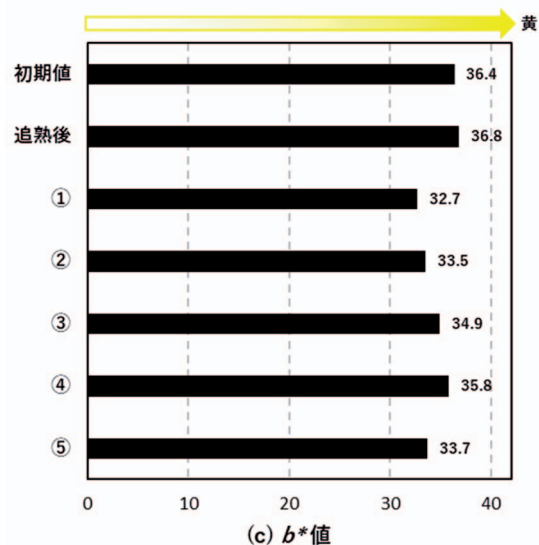
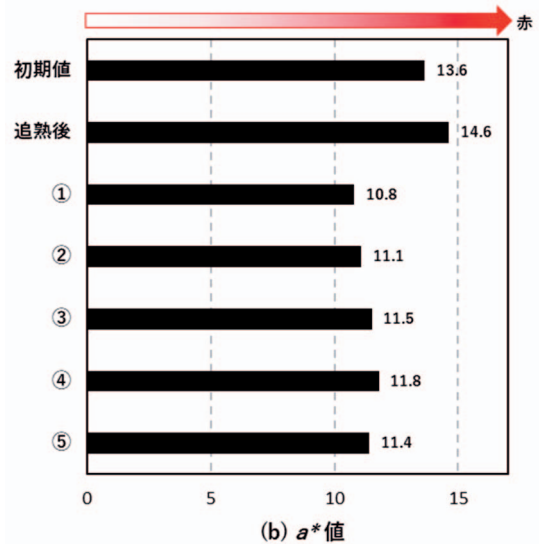
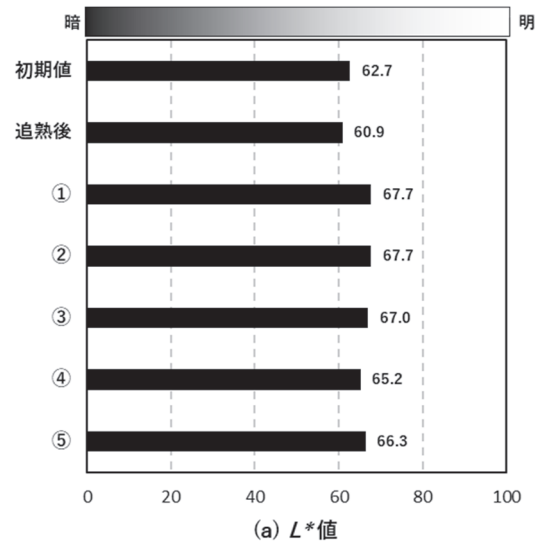


図8 メロン貯蔵前後の色差
(上: L^* 値, 中: a^* 値, 下: b^* 値)

苫前支所より提供いただきました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 平井 剛：メロン果実の追熟とテクスチャーに関する客観的評価法の開発, 北海道立農業試験場報告, Vol.117, pp.21-35, (2008)
- 2) 北村利夫, 板村裕之, 福嶋忠昭：メロン果実の追熟生理, 山形大学紀要(農学), Vol.11(1), pp.201-204, (1990)
- 3) 石谷孝佑：青果物の品質・鮮度保持流通と包装, 食包協会報, 159号, (2018)
- 4) 執行達弘, 森 武士, 野村隆文：メロンの長期輸送・貯蔵への調湿材の適用, 第31回日本吸着学会研究発表会講演要旨集, p.54, (2017)
- 5) 伊藤和彦, 樋元淳一：野菜の鮮度保持に関する研究(第2報), 農業機械学会誌, 56(5), pp.43-50, (1994)
- 6) 永田雅靖：青果物の鮮度に関する収穫後生理学, 食糧, 56巻, pp.43-56, (2018)
- 7) Bramely, P. M.: Regulation of carotenoid formation during tomato fruit ripening and development. JXB, 53(377), 2107-2113, (2002)
- 8) 山中俊夫：色差表示の最近の動向—CIE 色差表示—, 照明学会誌, Vol.62(12), pp.28-32, (1978)

調湿材の鮮度保持技術への応用

野村 隆文, 執行 達弘, 森 武士, 山岸 暢, 黒島 学*

Application of Humidity Control Materials for Preservation Technology of Fruits and Vegetables

Takafumi NOMURA, Tatsuhiro SHIGYO, Takeshi MORI, Tohru YAMAGISHI, Manabu KUROSHIMA*

キーワード：青果物，MA包装，調湿材，鮮度保持，長期貯蔵

1. はじめに

近年，MA (Modified Atmosphere) 包装を利用した青果物の鮮度保持技術が注目されている。MA包装は青果物周辺を低酸素濃度，高二酸化炭素濃度に制御することで青果物の呼吸を抑制し，鮮度を保持することができる¹⁾。

道産メロンは，10月が年内最終の出荷となるが，10月の市場単価は安い。一方，12月の単価は出荷量の減少に加え，クリスマス，年末年始などの需要期が重なり，10月の1.5倍以上に上昇する。生産者からは収益向上対策として10月収穫メロンの出荷期延長に高い関心が寄せられており，MA包装を活用した長期貯蔵技術の確立により，メロンの高付加価値化が期待されている。

これまで，MA包装資材でメロンを包装した貯蔵試験では，8週間の貯蔵が可能であることを確認している。MA包装による鮮度保持技術は青果物の貯蔵に有効であるが，使用条件によっては包装内に結露が発生し，青果物のカビや腐敗の要因となる現象も見受けられ，歩留まり向上が求められている。

当場では，道産天然無機資源を活用した調湿タイル等の建築分野における調湿材の開発²⁾に注力してきた。本研究ではメロンの長期貯蔵を目的として，調湿材によるMA包装内の結露防止効果を検証した。

2. 実験方法

2.1 調湿材の選定と評価

調湿材に要求される性能は約60日間，MA包装内を高湿度

* 花・野菜技術センター * Ornamental Plants and Vegetables Research Center

(現 中央農業試験場 Central Agricultural Experiment Station)

事業名：重点研究

課題名：道産メロンの冬季供給を可能とする長期貯蔵出荷体系の確立 (平成29～令和元年度)

に維持しながら，結露防止することである。

MA包装内の高湿度維持かつ結露防止に有効な調湿材を選定するために，道産調湿材として，稚内層珪質頁岩（以下WS (粒径2.5-8 mm)：(有)稚内グリーンファクトリー製)，市販調湿材として，高湿度シリカゲル（以下ID (粒径3-4 mm)：富士シリシア化学(株)製)，B型シリカゲル（以下SB (粒径3-4 mm)：富士シリシア化学(株)製)，クロマトグラフ用活性炭（以下AC：和光純薬工業(株)製）の4種試料を使用した(図1)。各試料について，N₂ガス吸着法によるBET比表面積，細孔容積の測定，水蒸気吸着等温線の測定およびMA包装環境下での調湿機能評価を行った。

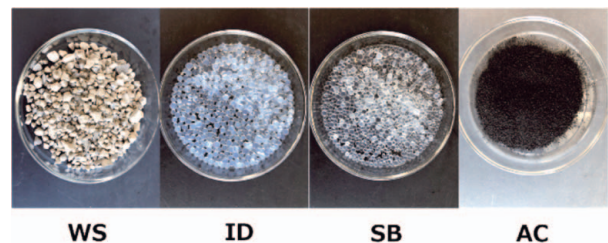


図1 試料の外観 (4種試料)

2.2 水蒸気吸着等温線法による調湿機能評価

水蒸気吸着等温線の測定には，自動蒸気吸着量測定装置 (マイクロトラック・ベル(株)製 BELSORP MAX) を用いた。水蒸気吸着等温線は測定温度 3℃，相対圧 0-0.9の範囲で，吸着平衡に到達した水蒸気吸着量を測定した。試料の前処理は120℃で24時間予備乾燥後，150℃で6時間真空脱気を行った。なお，高湿度域の調湿機能は相対圧0.9の水蒸気吸着量 (吸湿量) と相対圧0.8の水蒸気吸着量の差で評価した。

2.3 MA包装環境下での調湿機能評価

メロン貯蔵条件を模倣した環境下での調湿機能評価を行った(図2)。MA包装 (カンタロープ用 Xtend: StePac 製) で覆ったプラスチック容器内に水蒸気発生源である小型気化

式加湿器、調湿材、温湿度センサーを設置した。MA包装を封印後、MA包装を入れたメロン箱を10℃に設定した恒温恒湿器内に設置した。なお、調湿材はシャーレに入れた状態で使用した。



図2 MA包装環境下での調湿機能評価

2.4 メロン長期貯蔵試験による検証

MA包装のみ（調湿材なし）とMA包装内に調湿材を設置した処理区によるメロンの長期貯蔵試験を行い、調湿材の有効性を評価した。試験条件はMA包装処理したメロンを温度3℃に設定した低温室及び流通現場の貯蔵庫で約60日間貯蔵した。メロンは表面を洗浄・殺菌処理したレッド113を、MA包装はカントロップ用Xtendを用いた。調湿材は120℃、24hで前処理し、所定量をティーバック用不織布（寸法9.5×7.0cm,協和紙工(株)製）に入れ、メロンのつるに吊り下げて設置した（図3）。MA包装内の温湿度は温湿度データロガーにより経時変化を測定した。貯蔵後のメロン品質は外観観察、重量減少率、糖度、果肉硬度により評価した。なお、糖度はポケット糖度計（(株)アタゴ製PAL-1）でBrix糖度を、果肉硬度はフォースゲージ（日本電産シンボ(株)製FGP-5）を用いて測定した。MA包装内のエチレン、酸素および二酸化炭素濃度はハンドヘルド型エチレン分析計（東横化学(株)製F-950）を用いて測定した。



図3 不織布調湿材の設置状況

3. 結果と考察

3.1 水蒸気吸着等温線法による調湿機能評価

メロンの貯蔵に適した相対湿度は約95%であるが³⁾、温度変化による急激な結露発生を考慮すると、95%ではその危険性が極めて高いことから、MA包装内の相対湿度は85-90%の範囲で維持できることを目標とした⁴⁾。MA包装内の高湿度維持かつ結露防止に有効な調湿材には、高湿度域での吸着等温線の立ち上がりとし吸着量の増加が必要である。図4に各試料の水蒸気吸着等温線を示す。

WSは相対圧0.7付近で、SB、ACは相対圧0.6-0.7で曲線が立ち上がり、IDは相対圧0.8付近で曲線の立ち上がりを示した。表1に各試料の多孔特性と相対圧0.9と相対圧0.8の水蒸気吸着量の差（高湿度域の吸湿量）を示す。

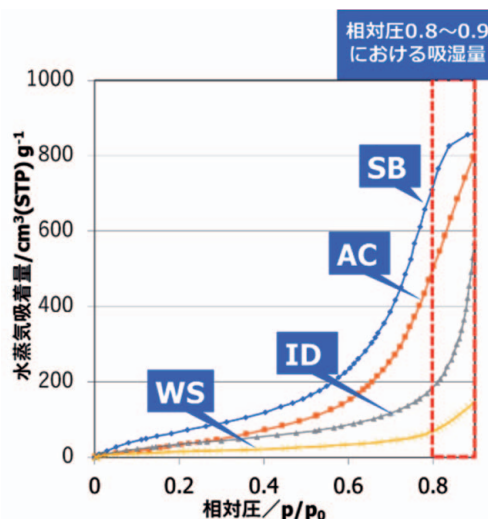


図4 各試料の水蒸気吸着等温線

表1 各試料の多孔特性と高湿度域の吸湿量

調湿材	比表面積 (m ² /g)	細孔容積 (cm ³ /g)	80-90%吸湿量 (cm ³ /g)
WS	129	0.29	78
ID	192	0.94	443
AC	1087	0.97	300
SB	486	0.76	150

高湿度域の吸湿量の序列は、ID (443 cm³/g) > AC (300 cm³/g) > SB (150 cm³/g) > WS (78 cm³/g) であった。高湿度調湿材であるIDは、高湿度域での吸着等温線の立ち上がりとし最大吸湿量を示したことから、高湿度調湿材として有効であると推察される。いずれの試料も、高湿度域での吸湿量の増加が認められたことから、使用量を最適化することでMA包装内の結露防止には有効であることが示唆された。

3.2 MA包装環境下での調湿機能評価

MA包装のみ（調湿材なし）の条件では、MA包装内湿度が約94%で一定になることを確認し、これをブランクとした。

まず、WSに対し、使用量を変化させて試験を実施した結果、WS 80gでMA包装内湿度は約85%で一定となった。これを基準として、他の調湿材の使用量を水蒸気吸着等温線の相対圧0.8から0.9の吸湿量を算出し、各々の吸湿量が同量になるように使用量を決定した（表2）。

表2 各試料の高湿度域の吸湿量と使用量

調湿材の種類	80-90%吸湿量 (cm ³ /g)	調湿材の使用量 (g)	表記
WS	78	80	WS80
ID	443	15	ID15
AC	300	20	AC20
SB	150	40	SB40

図5に各種調湿材によるMA包装環境下での相対湿度の経時変化を示す。MA包装のみでは、94%の高湿度で推移した。これは今回、使用したMA包装（Xtend）には透湿性があるため、MA包装内の相対湿度は100%にならず、94%に調湿されていたことに起因する⁵⁾。MA包装内に調湿材を設置することでWS, SB, ACはMA包装内の湿度を90%以下に低減することが可能であり、湿度の低減には有効であることを確認した。

一方、水蒸気吸着等温線法による調湿機能評価結果から、高湿度調湿材として有効であると判断したIDは、MA包装内湿度が最大で95%に達し、その後90%以上と高く推移しており、目標値85-90%の範囲外であったことから、貯蔵試験ではWS, SB, ACの調湿材を用いて試験を実施した。

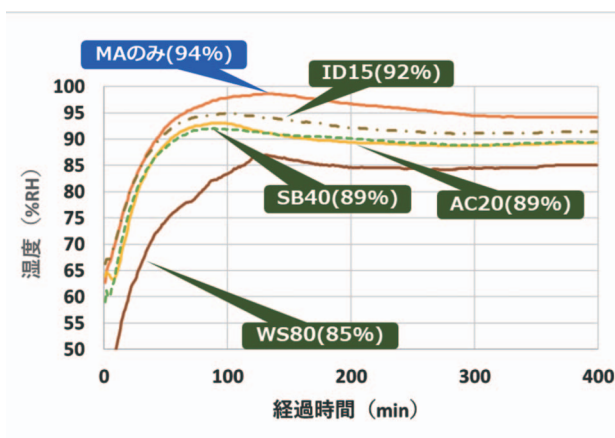


図5 各種調湿材によるMA包装環境下での湿度の経時変化

3.3 各種調湿材のメロン長期貯蔵試験による検証

3.3.1 調湿材 (WS, SB) を用いたメロン貯蔵試験と品質評価①

調湿材WSとSBを用いたメロン長期貯蔵試験(低温実験室)を行った。図6にMA包装内湿度の経時変化、図7にMA包装内最大湿度及び平均湿度を示す。貯蔵温度は約3.5℃と設定値3℃より高く推移した。MA包装のみでは最大湿度100%、平均湿度100%と極めて過酷な湿度条件であった。調湿材WSを設置した場合、貯蔵開始から約30日までは調湿材の効果が発揮され、急激な湿度の上昇を抑制していたが、時間の経過とともに湿度は徐々に上昇し、約60日後には湿度が100%に達した。調湿材SBでは最大湿度93%、平均湿度92%と湿度が安定し、約60日後の湿度も92%を維持しており、調湿材SBの有効性が確認された。MA包装内の結露は、MA包装のみとWSで袋内全体に結露の発生が認められたが、SBは部分的に少量の結露発生であった。

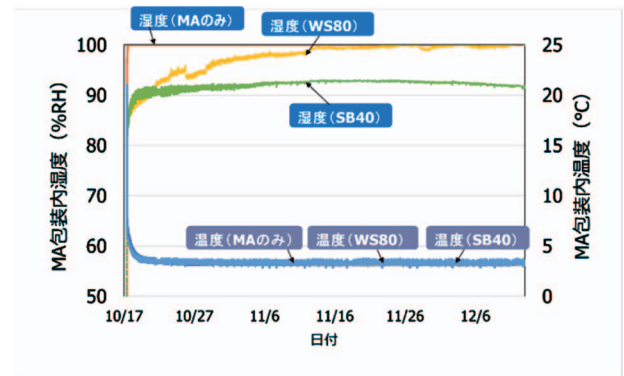


図6 MA包装内湿度の経時変化 (WS, SB)

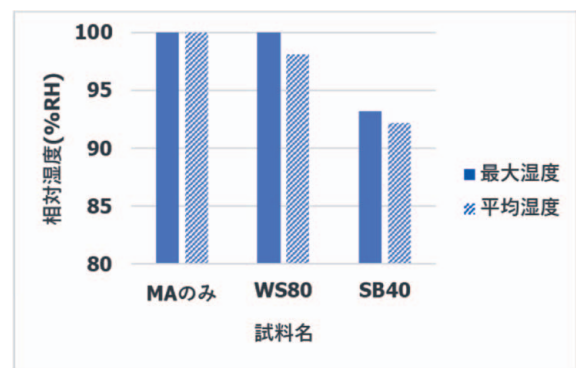


図7 MA包装内最大湿度及び平均湿度 (WS,SB)

図8に貯蔵メロンの外観および果肉の状態を示す。MA包装のみではメロン表皮に黒カビとつる部分に白カビが発生しており、メロン全体の青みが薄れ、褐変していた。WS80とSB40では、一部メロン表皮に黒カビと白カビの発生が認められたが、MAのみと比較するとメロンの青みは維持されていた。果肉はいずれも貯蔵前と比べて大きな変化はなかった。

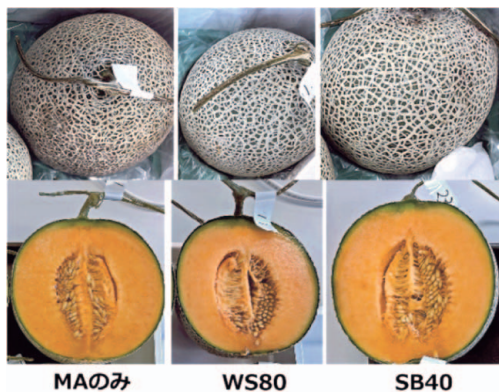


図8 貯蔵メロンの外観と果肉の状態 (WS, SB)

表3に貯蔵メロンの重量減少率、糖度、硬度を示す。貯蔵前後でのメロンの重量減少率は、MAのみと比較して、調湿材を設置したWS80, SB40で大きくなった。一般的に、乾燥等での水分蒸散により5%以上の重量減少があると商品価値を損なうとされているが⁶⁾、今回は1%程度の重量減少率であった。また、果肉硬度はWS80が最も大きい値となった。

表3 貯蔵メロンの品質評価

調湿材	重量減少率※ (%)	糖度 (%)	硬度 (kgf/cm ²)
MAのみ	1	13.5	0.7
WS80	1.3	12.1	0.8
SB40	1.2	14.0	0.6

※ (貯蔵後重量-貯蔵前重量) ×100/ (貯蔵前重量)

表4にMA包装内のエチレン、酸素、二酸化炭素濃度を示す。エチレン濃度はWS80が最も低い値となった。酸素濃度、二酸化炭素濃度はいずれの調湿材も低酸素、高二酸化炭素濃度であり、メロンの呼吸抑制がされていた。果肉硬度が最も大きいWS80はエチレン濃度が低いことから、メロンの熟成が遅れていたと考えられ、WSによるエチレン吸着効果が実証された⁷⁾。

表4 MA包装内のガス組成

調湿材	C ₂ H ₄ (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)
MAのみ	9.5	13.1	12.1
WS80	8.2	12.6	13.1
SB40	9.2	11.9	16.4

3.3.2 調湿材 (SB, AC) を用いたメロン貯蔵試験と品質評価②

メロン貯蔵試験①で有効な結果を示した調湿材SBとACを用いたメロン長期貯蔵試験 (低温実験室) を行った。図9

にMA包装内湿度の経時変化、図10にMA包装内最大湿度及び平均湿度を示す。貯蔵温度は約2.5℃と設定値3℃より低く推移したが、一部、停電による温度上昇があった。MA包装のみでは、最大湿度95%、平均湿度92%であったのに対し、SB40では、最大湿度91%、平均湿度89%と湿度が低減し、調湿材SBの有効性が確認された。AC20では最大湿度96%、平均湿度95%であり、MA包装のみより湿度が上昇し、湿度低減効果は認められなかった。この要因として、ACはかさ密度がSBよりも小さく、かさ高いため、不織布に入れた際、水蒸気との接触面積が少なくなり、調湿機能が有効に発現していなかったと推察される。なお、MA包装内の結露はMA包装のみ、SB40, AC20いずれも認められなかった。

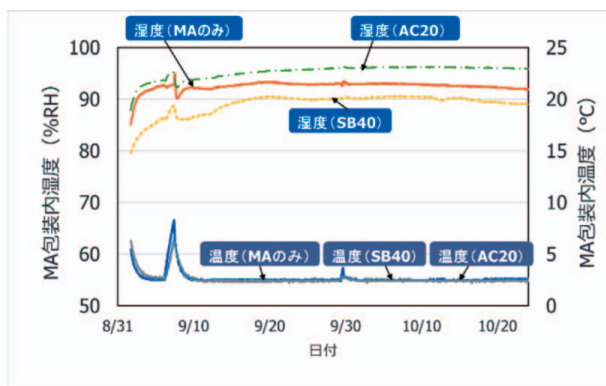


図9 MA包装内温湿度の経時変化 (SB, AC)

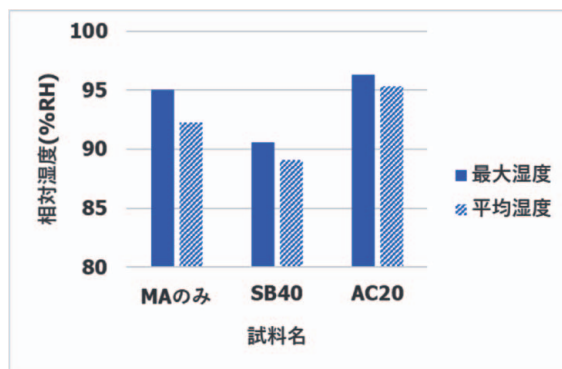


図10 MA包装内最大湿度及び平均湿度 (SB, AC)

図11に貯蔵メロンの外観および果肉の状態を示す。MA包装のみ、SB40, AC20のいずれもメロン表皮に異常は認められなかった。果肉は、MA包装のみとAC20では、底面部分に腐敗箇所が認められ、SB20は若干の組織の変質があったが、腐敗は認められなかった。

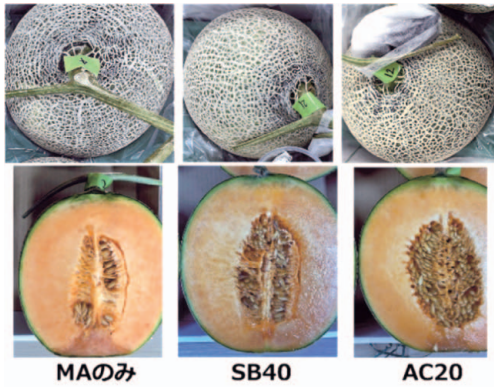


図11 貯蔵メロンの外観と果肉の状態 (SB, AC)

表5に貯蔵メロンの重量減少率、糖度、硬度を示す。重量減少率はいずれも約1.5%であったが、果肉硬度はMA包装のみが0.5 kgf/cm²と最も軟化しており、SB40とAC20は、MAのみと比べて高かった。MA包装内のエチレン濃度は測定できていないが、貯蔵試験①のエチレン濃度と硬度の相関を考慮すると、エチレンガスの吸着によって、追熟が遅れている可能性が示唆された。

表5 貯蔵メロンの品質評価

調湿材	重量減少率 (%)	糖度 (%)	硬度 (kgf/cm ²)
MAのみ	1.5	14.6	0.5
SB40	1.6	15.3	0.6
AC20	1.5	14.7	0.7

この果実品質の評価結果は、前述の湿度変化の挙動と関連づけて考察することができる。AC20を使用したメロンの果肉硬度は最も高く、追熟が遅延している。一般的に、青果物の蒸散速度は、追熟が進行するにしたがって低下する傾向にある。そのため、AC20では、メロンが「若い」状態のままであり、蒸散量が多くなったために、MA包装のみやSB40よりも相対湿度が高くなったと考えられる。さらに、追熟が遅延した理由として、メロンの追熟を促進する植物ホルモン(エチレン等)がAC20(活性炭)により除去されていたことが考えられる⁸⁾。今回の検討では、植物ホルモンを直接検出できていないため仮説の域を出ないが、1) 植物ホルモンの多くは有機化合物であり、活性炭と親和性があるため、SB40(シリカゲル)よりも活性炭に吸着されやすい可能性があること、2) 活性炭とシリカゲルで、メロンの追熟度合いに差があることから、何らかの有機化合物がメロンの蒸散挙動に影響を及ぼしている可能性があること、等が考えられる。湿度制御を行うにあたっては、調湿材だけでなく、青果物の状態も考慮した設計を行う必要があり、今後、このような観点からの検討も進めていく予定である。

3.3.3 調湿材 (SB,AC) を用いたメロン貯蔵試験(流通) と品質評価③

流通現場の貯蔵庫で調湿材SBとACを用いたメロン長期貯蔵試験を行った。図12にMA包装内温湿度の経時変化、図13にMA包装内最大湿度及び平均湿度を示す。貯蔵温度は約3.3℃と設定値3℃より高く推移した。MA包装のみでは、試験開始直後から、湿度100%で推移した。SB40では、最大湿度が98%と高い数値を示したが、平均湿度は94%であり、湿度低減効果が認められた。AC20は、メロン貯蔵試験②の結果とは挙動が異なり、試験開始および終了間際に湿度低減効果は認められたが、それ以外の期間は湿度100%となり、効果は認められなかった。MA包装内の結露は、MA包装のみとAC20で袋内全体に結露の発生が認められたが、SB40に結露の発生は認められなかった。

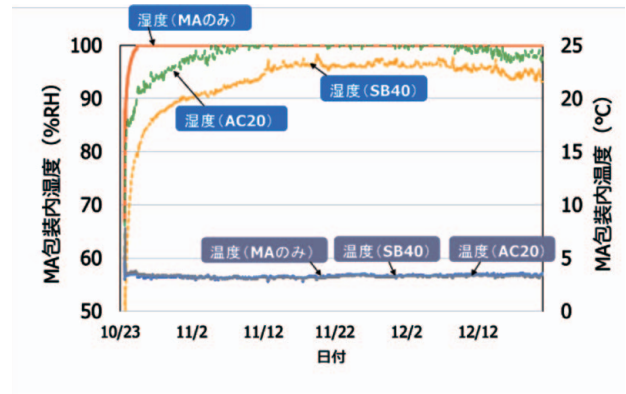


図12 MA包装内温湿度の経時変化 (SB, AC)

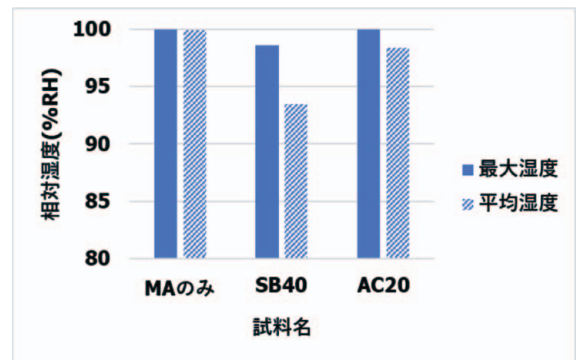


図13 MA包装内最大湿度及び平均湿度 (SB, AC)

図14に貯蔵メロンの外観および果肉の状態を示す。MA包装のみでは、メロン表皮に黒カビが複数箇所に認められ、メロンのつるの萎れやメロン全体の青みが薄く、褐変していた。SB40では、メロン表皮には異常が認められなかった。AC20は、メロン表皮の一部に黒カビの発生が認められたが、MA包装のみと比較するとメロンの青みは維持されていた。果肉はMA包装のみで、複数箇所に腐敗が認められた。SB40は異常が認められなかった。AC20では腐敗は認められなかったが、果肉の白色化や組織の変質が認められた。

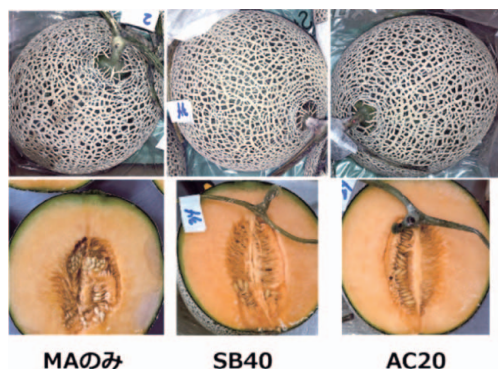


図 14 貯蔵メロンの外観と果肉の状態 (SB, AC)

表 6 に貯蔵メロンの重量減少率、糖度、硬度を示す。MAのみと比べて、調湿材を施用したSB40、AC20で重量減少率が大きくなった。糖度、果肉硬度はいずれも同程度であった。

表 6 貯蔵メロンの品質評価

調湿材	重量減少率 (%)	糖度 (%)	硬度 (kgf/cm ²)
MAのみ	1.6	15.0	0.6
SB40	1.8	15.5	0.5
AC20	1.8	15.1	0.5

4. まとめ

MA 包装を用いた鮮度保持技術に関して、調湿材による MA 包装内の結露防止効果を把握するとともに、メロンの長期貯蔵試験を実施し、その効果を検証した。以下に得られた結果を示す。

1. 4 種の調湿材に対して、水蒸気吸着等温線法及び MA 包装環境下での調湿機能評価を行った結果、高湿度域での水蒸気吸着量の増加と MA 包装内の湿度を約 85-90% に制御可能な WS, SB, AC を選定した。
2. 選定した調湿材 (WS, SB, AC) を用いて、メロン長期貯蔵試験を行った結果、WS と SB が MA 包装内の湿度を低減可能であり、メロンの鮮度保持に有効であった。
3. 調湿材 SB は MA 包装内の湿度を 60 日間、約 90% に制御可能であり、最も結露防止効果が高かった。
4. 調湿材 WS は 30 日間の湿度低減効果と MA 包装内のエチレン濃度の低減によるメロンの熟成遅延効果が実証されたが、長期貯蔵では使用量や使用形態の検討が必要である。
5. 調湿材 AC は湿度低減効果がほとんど認められなかったが、炭化物由来の吸着特性がメロンの熟成遅延効果を発現している可能性が示唆された。

6. メロン長期貯蔵試験結果から、貯蔵温度が 3℃ 以上になると MA 包装のみの包装内湿度は 100% となり、極めて過酷な湿度条件になることがわかった。

今後、MA 包装を利用した鮮度保持技術の効果を向上させるためには、低温障害が生じない温度範囲 1-3℃ の貯蔵により、メロンの呼吸を抑制し、蒸散量を低下させた状態で調湿材の施用条件の最適化を検討することが有効であると考えている。

現在、道内 JA に対し、本研究成果をベースにした技術支援を継続中であり、最適条件の検討とともに早期の実用化が期待される。

謝辞

本研究で使用した自動蒸気吸着量測定装置は、競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 漆崎末夫：農産物の鮮度保持，筑波書房，pp.72-79，(1997)
- 2) 野村隆文・赤澤敏之・稲野浩行・吉田憲司・斎藤隆之・勝世敬一：吸着機能性材料の開発と応用，北海道立工業試験場報告，No.303，pp.81-89，(2004)
- 3) 永田雅靖：青果物の鮮度に関する収穫後生理学，食糧，56巻，pp.43-59，(2018)
- 4) 岩元睦夫・河野澄夫・岡村憲道・新堀二千男・西條了康・垣内典夫：青果物・花き鮮度管理ハンドブック，サイエンスフォーラム，pp.63-64，(2004)
- 5) 牧野義雄：青果物の鮮度・栄養・品質保持技術としての各種フィルム・包装での最適設計，AndTech，pp.189，(2018)
- 6) 椎名武夫：野菜の品質保持技術について，野菜情報，独立行政法人農畜産業振興機構，pp.45-46，(2016)
- 7) 外川純也・船崎孝一・菅野亨・堀内純一・小林正義：椎内層珪藻土セラミックを配合した青果物鮮度保持フィルムの開発，加工技術研究会，コンバーテック 27(10)，pp.1-3，(1999)
- 8) Nicolas Keller・Marie-Noëlle Ducamp・Didier Robert・Valérie Keller: Ethylene Removal and Fresh Product Storage: A Challenge at the Frontiers of Chemistry. Toward an Approach by Photocatalytic Oxidation, Chemical Reviews, pp.5045, 113,(2013)

北海道立総合研究機構工業試験場報告
No.320 (2021)

発行 令和4年3月

発行所 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術環境研究本部
工業試験場

〒060-0819 札幌市北区北19条西11丁目
電話 (011) 747-2321 (代表)

印刷所 小南印刷株式会社