

X線CTとガス分析を用いたアルミニウムダイキャスト製品の内部品質評価

高橋 英徳, 板橋 孝至, 中嶋 快雄, 宮腰 康樹, 戸羽 篤也, 相山 英明
北原 総一郎*, 赤見 行弘**, 倉田 一美***, 松浦 清隆****

Internal Quality Evaluation of the Aluminum Die-Cast Products Using X-Rays CT and Gas Analysis

Hidegori TAKAHASHI, Koji ITABASHI, Yoshio NAKAJIMA, Yasuki MIYAKOSHI
Atsuya TOBA, Hideaki AIYAMA, Soichiro KITAHARA*, Yukihiro AKAMI**
Kazumi KURATA***, Kiyotaka MATSUURA****

抄 録

アルミニウムダイキャスト製品は、軽量化の観点から自動車部品に多用されている。その内部には不可避な空孔があり、製品不良の発生の一因となっている。この空孔の低減により、製品不良率の低減や製品強度の向上、ひいては品質向上が期待できる。近年、開発されたX線CTにより製品中の空孔位置を精密に検出できているが、空孔発生原因を特定できないために根本的な解決には至っていない。本研究は、X線CTとガス分析を組み合わせることにより製品内部の空孔の定性的・定量的評価を行い、製品中の空孔発生原因を視覚的に可能とする「空孔原因分布図」を作製した。この分布図を基に企業と連携して casting プロセスの改良・改善を実施することにより、アルミニウム鋳物製品内部の空孔の低減を行った。また、鋳造工程の改善に寄与できるダイキャスト鋳造用シミュレーション手法を検討した。これらによりアルミニウム鋳物製品の品質向上を図り、道内アルミニウム製品製造企業の技術力向上に資することを目的としている。

キーワード：アルミニウムダイキャスト, X線CT, ガス分析, 鋳造シミュレーション

Abstract

From the viewpoint of weight saving, Aluminum die-casting products are used for many motor parts. There is an unavoidable cavity in products, and this may be a main cause of the defective product. It can be expected that the defective product rate would be improved by the reduction of this cavity. In late years, X-rays CT was developed and it can precisely identify the cavity position in a product. However, basic solution was not obtained because the cavity origin was not still identified.

In this study, the qualitative or quantitative evaluation of the cavity in the product by combining gas analysis with X-rays CT was conducted. Furthermore, in order to understand cavity origin in a product at first sight, a manufacture technology of “a cavity cause distribution map” was developed. In addition, simulation technique for die-casting casting that could contribute to the improvement of the casting process was conducted. By these techniques, the quality improvement of the product will be conducted and it contributes to the technology improvement of the aluminum production company in Hokkaido.

KEY-WORDS : Aluminum, Die-Cast, X-Ray CT, Gas Analysis, Casting Simulation

* ホクダイ株式会社 * Hokudai Co, Ltd.

** アイシン北海道株式会社 ** Aisin Hokkaido Co., Ltd.

*** トヨタ自動車北海道株式会社 *** Toyota Motor Hokkaido, INC.

**** 北海道大学大学院工学研究院 **** Hokkaido University

事業名：重点研究

課題名：自動車部品用アルミニウム鋳物製品の品質化に関する研究

1. はじめに

北海道への集積が進む自動車関連産業は裾野が広い産業であり地域への波及効果は大きい。道では重点施策の一つとして自動車産業の振興を推進しており、道内産業にとって重要な位置を占めるに至っている。しかし、自動車産業を支える鋳造等のものづくり基盤産業において、地場企業の参入が進んでいないのが現状である¹⁾。これは、道内企業の競争力不足が要因の一つであり、特に、製品の品質向上が課題となっている。工業試験場では、平成22年度にアルミニウムの利用技術および生産技術の高度化を目的として、「北海道アルミニウム利用技術研究会」を立ち上げた。この中で、自動車部品用アルミニウム鋳物製品、特にダイカスト製品には、不可避な空孔が内在することから、これらの低減により製品品質や製品歩留まりが向上することが提起された。

当場には、これまでに部品の内部構造を3次元的に解析するX線CT装置が導入され、自動車部品用アルミニウム製品、特にダイカスト製品の空孔などの内部品質評価が可能となった²⁾。しかし、空孔の発生原因と有効な低減策は明らかになっていない。そこで、空孔に含有するガスの種類や量を測定するガス分析と組み合わせることにより、空孔生成由来の明確化を図っている³⁻⁵⁾。本研究は、上記のX線CTを用いた非破壊検査技術およびガス分析技術を用いて、空孔の定性的・定量的評価を可能とする「空孔原因分布図」の作製技術を開発し、この分布図を基に企業と連携して鋳造プロセスの改良・改善を実施することにより、アルミニウム鋳物製品内部の空孔の低減を行うことを目的とする。また、鋳造工程の改善に寄与できるダイカスト鋳造用シミュレーション手法を検討する。これらによりアルミニウム鋳物製品の品質向上を図り、道内アルミニウム製品製造企業の技術力向上を目的とする。

2. アルミニウム鋳物製品の空孔原因分布図の作製

X線CTは含有する空孔の位置及び大きさは明確化できるが、その発生原因までは特定できない。そこで、空孔内部に含有するガスの種類および量を測定することにより空孔の発生原因を特定し、これらの組み合わせによりアルミニウム鋳物製品の内部空孔の分布および原因を明確化する「空孔原因分布図」の作製を行った。

内部空孔の検出には、図1上に示すX線CT装置（株式会社製作所 マイクロフォーカスX線CTシステムinspeXio SMX-225CT）を用いた。この装置は、母材のアルミニウムと空孔ではX線吸収係数が異なることを利用して空孔の検出を行っており、最小10 μ m程度の空孔を検出できる能力を有している。続いて、空孔を含む近傍を製品から切り出した試料について、図1下に示すガス分析装置（日本金属化学㈱製グラビマスGMC-C-7000）を用いて含有ガスの分析を行った。この



図1 X線CTおよびガス分析装置の外観

装置は、試料加熱部と測定部から構成され、真空中で所定の温度に加熱した試料内部から発生するガスを質量分析器（Q-MS）により迅速に定性・定量分析することとを特徴としている。ガス測定では、試料を高温真空中で固体状態の試料から発生するガスを測定する、いわゆる固体抽出法を用いていることから、測定条件についても検討した。

図2に製品から切り出した試料についてX線CTで得られた空孔の分布について、実際の大きさよりも拡大して示している。なお、X線CTによる透過結果は現行製品の内部情報を反映していることから、図2は製品中の任意の場所について部分的に抽出した結果を示している。図中黒色および灰色の部分は含有する空孔である。これより黒色で示した微小な空孔の集合に加えて灰色で示した比較的大きな空孔を有していることがわかる。

図3にガス分析で得られた結果を示す。予めX線CTを用いて内部透過観察した製品からガス分析の対象部分（約30g）を切り出し、アセトンによる超音波洗浄を行った後に直ちにガス分析を行った。測定は装置の基本的な測定条件である真空中530℃で1時間行った。測定では分子量100までのガスが定性・定量分析できる。図3には試料中に含有する各種ガスのうち、ダイカスト製品の品質に影響を及ぼす4ガス種、すなわちアルミニウム合金中の水素（ H_2 ）、離型剤由来の炭化水素（ C_xH_y ）、空気（ CO/N_2 ）、および水分（ H_2O ）について

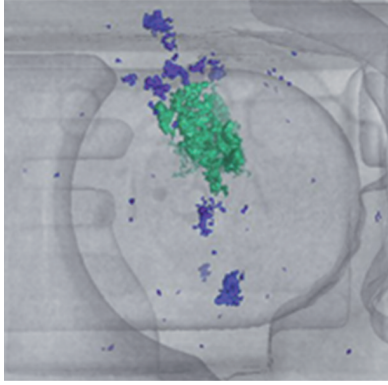


図2 X線CTで得られた製品中の空孔分布

ての結果を示している。なお、ガス測定結果は現行製品の定量的なガス含有情報を反映していることから、図3には結果を相対値として示している。測定の結果、製品中のある部位では空気含有量が多いことがわかり、この部分では casting 時に空気を巻き込んでいることが明確になった。これより、X線CTとガス分析の組み合わせにより、製品中の空孔の位置及び大きさのみならず、その由来を明確化できることが判明した。

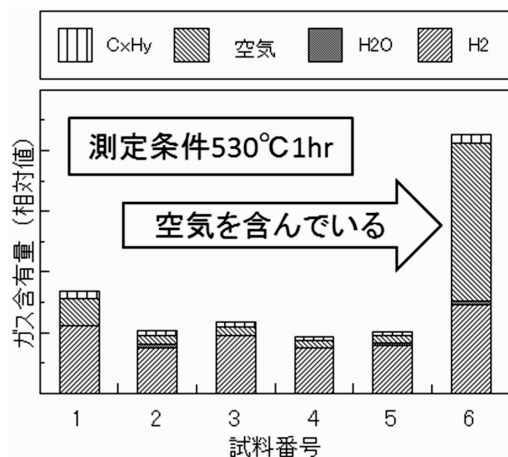


図3 各試料のガス分析結果

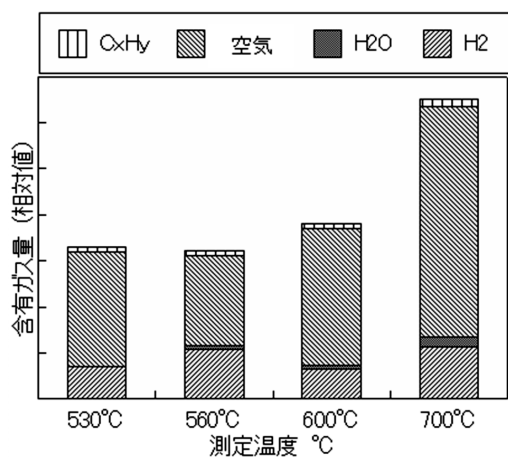


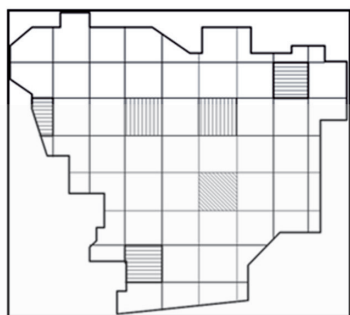
図4 各温度におけるガス分析結果

ところが、図3の結果を製品製造元と検討した結果、検出された総ガス量は製造現場において経験的に得られているガス量よりも極めて少量であることが判明した。これについて検討した結果、装置の基本的測定条件（530℃、1 hr）では、前述のように試料が固体状態での測定であることから、試料内部の含有ガスのすべてを検出できていないことが推定された。当該ガス分析装置は、試料を熔融させない、すなわち固体状態で真空中に高温保持すると表面近傍のガスを排出するという固体抽出法を採用している。評価対象のダイカスト製品はダイカスト合金 JIS ADC12（Al-10Si-1.3Fe-2.0Cu-1.0Zn）を用いており、この熔融開始温度は548℃であることから、530℃での測定では試料は明らかに固体状態である。また、今回の測定に供した試料はアルミニウムダイカスト製品から切り出したもので20mm以上の厚みを有している。空孔は厚さ方向の中心部に多く存在する傾向があることから、この部分に含有するガスを検出できていないと推定された。そこで、予備実験として高温での挙動を調べた結果、700℃では試料は完全に熔融状態になることを確認した。これを基に測定条件を検討した結果を図4に示す。測定に供した試料は4個の製品の同一位置から採取した。その結果、測定温度の上昇と共に総ガス量は増加し、700℃で1時間の測定では現場の知見と一致するレベルのガス量を検出できた。したがって、以降のガス分析では700℃1時間の測定を行うこととした。

図3に示したガス分析を基に作製した空孔原因分布図の一例を図5に示す。評価対象は、企業の機密保持の面から図5上はモザイク化した製品外観を示している。評価試料製造元と協議して、品質に影響を及ぼすと想定される5箇所を予め特定して分析した結果、空孔の多い部分は空気が巻き込まれていることがわかり、一方では品質には何ら影響のない部分もあることが認められた。

3. 鑄造品質向上のための工程改善

図6に企業での製造工程の改善前後の製品から抽出した試料に対するガス分析結果の比較を示す。測定は、前述のように700℃、1 hrでの熔融状態で行った。図6左の工程改善前の結果では、総ガス量が多く、空気が多く含まれていることがわかる。一方、図6右の工程改善後の結果では総ガス量が少なくなっており、特に空気含有量が低下していることがわかる。これらの結果から、工程改善により製品中の空気含有量が低下したことが明らかとなり、ガス分析によって工程改善の結果を裏付けることが可能となった。この結果は、ガス分析による製品品質評価が有効であることを示している。



■ 空孔多い(空気巻き込み) ■ 空孔やや多い ■ 空孔ほとんどなし

図5 空孔原因分布図

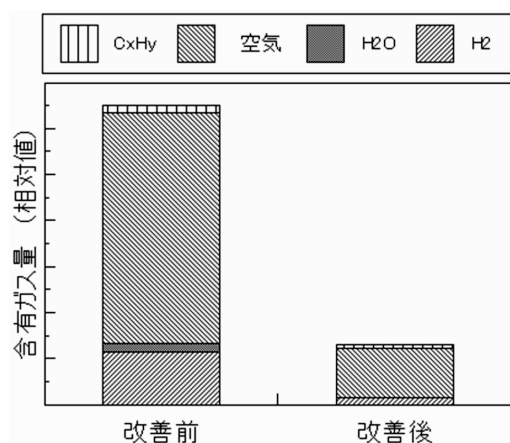


図6 ガス分析結果 (左:改善前 右:改善後)

4. 空孔部分の機械的性質評価

製品中に不可避に内在する空孔は製品の強度低下の一因となり、この強度低下を補うために厚肉化が行われると、アルミニウム化による重量軽減という本来の目的に支障が生じる。しかし、空孔が製品強度に及ぼす影響については評価が困難なことからこれまでほとんど行われていない。そこで、本研究では、空孔による強度低下状況を把握し、品質への影響を検討するために、内部に空孔を含む引張試験片をダイカスト鋳造にて作製し、空孔の大きさや形状をX線CT装置により分析し、次に引張試験によって材料内部の空孔が強度に及ぼす影響について検討した。

図7に作製した引張試験片の外観と図中○印で示した平行部のX線CTによる透過図を示す。これより平行部は内部に空孔を有していることがわかる。また、引張試験後の試料破断面を観察した結果から、空孔以外にも金型内部に入った溶湯がぶつかり合った際に生じる湯ざかいや引け巣などの、いわゆる鑄造欠陥が観察された。

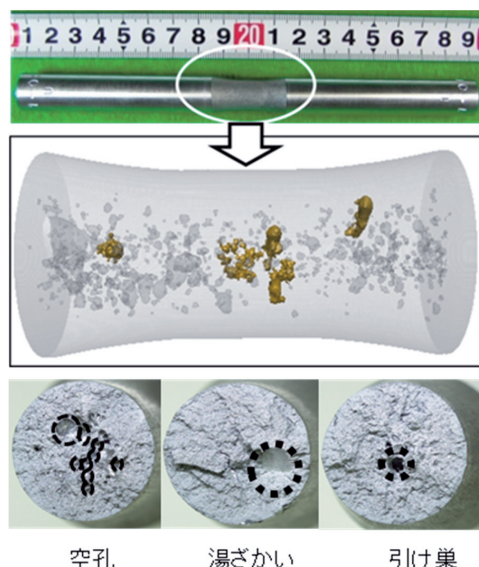


図7 引張試験片の外観と平行部の空孔

通常、内部に空孔や介在物が存在する部分に引張荷重が加わると、そこに応力集中が生じ破断しやすくなる。また、この応力集中は空孔などの形状に依存することが知られている。空孔および鑄造欠陥などの面積を破断面から差し引いた面積と破断荷重の関係を図8に示す。その結果、破断荷重は空孔や介在物の形状に関わらずこれらを除いた面積に相関していることが認められた。この結果は、X線CTを用いて内部の空孔や介在物を検出して破断強度の予測が可能であることを示している。

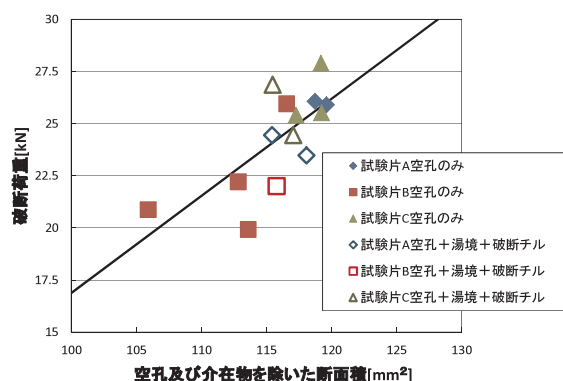


図8 破断部実面積と破断荷重の関係

5. ダイカスト製品製造用鋳造シミュレーション手法の検討

鋳造品の空孔発生予測法の一つに、鋳造シミュレーション解析法がある。鋳造シミュレーションとは、流体力学、伝熱学に基づく理論を背景に、高温で溶解した金属が鋳型内に注入されて鋳型等を介して冷却され、凝固していくまでの過程で起こる諸現象を数値計算によって可視化するものである。本節は、アルミダイカストプロセスで製造した鋳造品の内部空孔発生原因を判別することを目的とした技術開発において、空孔が発生する可能性の大小を関係づける際の理論的裏付けを得るための手法として、鋳造解析の利用を検討した結果について述べる。

アルミダイカスト鋳造品に発生する空孔は、偏析や介在物などに代表される金属組織の異常と、ガスの巻き込みや引け巣等に代表されるものに大別される。本研究が対象とするのは、X線とガス分析を利用した空孔の判別が目的である。

アルミダイカスト鋳造品の空孔の発生原因とされるのは、鋳型内の空気を含む何らかの物質が熱分解してガス化し、鋳造時に空気も含めて鋳物内部に取り込まれることと、金属の凝固の過程での体積収縮により鋳物内部に鋳巣が生じることの2つが主なものとされる。現場的な空孔予測では、前者のガスの巻き込みは湯流れ解析の結果から、鋳巣は凝固解析の結果から、空孔の発生を予測して、その発生原因を推定する。鋳造解析結果と空孔とを関係づける考え方については、発生ガスの巻き込みによる空孔は、鋳型内の湯流れによる内部ガスの取り込み状況や、流速による溶湯圧力と溶湯含有ガスの分圧の関係から推定することができる。一方、引け巣については、最終凝固部の位置と周囲の冷却・凝固状況などの条件から空孔発生の可能性を評価することができる。このほか、湯回り不良や湯境などの溶湯流れと凝固の両方が関係する空孔についても、解析結果を総合的に判断することで空孔発生

原因の分析が可能となる。解析にあたっては、ダイカスト製品メーカーから実製品の提供を受けた。なお、試料は現行生産品であることから、解析結果はモザイク化して示している。

使用した鋳造解析システムは、ミッドレンジ普及版のADSTEFAN（茨城日立情報サービス㈱製）を用いた。解析計算の境界条件として、鋳物と鋳型の物性値と、鋳物と鋳型の熱伝達係数を設定する必要がある。鋳物と鋳型の熱伝達に関して、ADSTEFANシステムでは、「熱抵抗」というパラメータで鋳物と鋳型の熱移動を設定する。鋳物と金型との間の熱伝達は、塗型材、離型剤、空気等の介在があり、実際の鋳造条件に依存するため、鋳物と鋳型との間の熱抵抗を正確に設定することは困難である。したがって、この解析では、 $50 \sim 200 \text{ cm}^2 \cdot \text{秒} \cdot ^\circ\text{C}/\text{cal}$ の値を設定して計算を行い、それらの結果から空孔発生の可能性に関する定性的な評価を行うこととした。

図9に評価対象のダイカスト製品について、鋳造時の湯流れを元にした鋳造シミュレーション、特に空気の巻き込みおよび引け巣発生についての結果を示す。なお、図中でモザイク表示している部分が解析対象の試料を示している。図9左の空気巻き込みシミュレーション結果では、試料の左右に空気を巻き込んでいることが想定され、図9右では試料の下部に引け巣が生じる可能性があることを示唆している。

図10上にX線CTにより試料を内部透過観察した結果および断面組織観察結果の比較を示す。これより、図9左の鋳造シミュレーションで示した空気の巻き込み部分は、肉厚部分に多くの空孔が観察され、この部分のガス分析の結果から鋳造時に空気を巻き込んでいることが明らかになった。この部分を実際に組織観察した結果、図10中Aに示すように明らかに空孔が多く見られた。また、図9右の鋳造シミュレーションで示した引け巣が生じている可能性が高い部分は、図10のX線CTを用いて観察した結果から明らかに空孔が確認され、ガス分析の結果からは空気が検出されないこと、さらに前述と同様の組織観察の結果から、明らかに引け巣の発生が認められた。以上の結果から、鋳造シミュレーションを用いた空気巻き込みおよび引け巣発生の想定は、X線CT結果および組織観察と良い一致を示した。この結果は、鋳造シミュレーションとX線CTの組み合わせにより、空孔発生の可能性の事前評価が可能であることを示している。

6. おわりに

自動車は、今後、省エネルギー化に向けて一層の燃費向上、部品の軽量化が求められる。このため、アルミニウム部品の増加や薄肉化への対応を念頭においた鋳物製品の内部空孔低減による高品質化は、自動車用アルミニウム鋳物製品を製造する既存企業および今後の参入を目指す企業にとって喫緊の課題である。今後は、本研究にて確立したアルミニウム鋳物

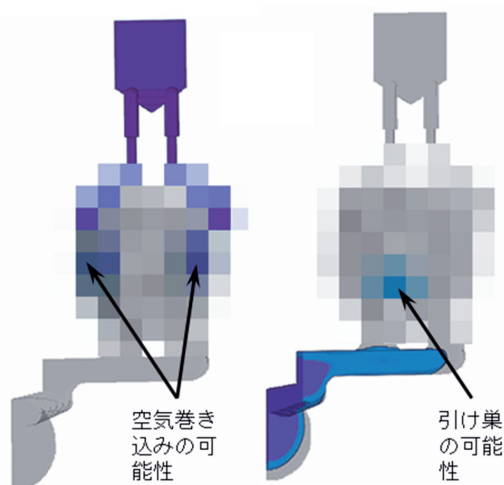


図9 鋳造シミュレーション結果

製品の内部品質評価技術をベースに、対象とする評価製品を増やして継続的な評価を行う予定である。また、X線CTを用いた非破壊検査技術およびガス分析を組み合わせた評価方法について、産業技術総合研究所および他府県公設試験研究機関と共同で分析方法の高精度化を行い、評価方法の標準化を目指した検討を行う予定である。

(連絡先：takahashi-hidenori@hro.or.jp, 011-747-2981)

謝辞

本研究で使用したX線CTは、経済産業省の北海道地域イノベーション創出協働体形成事業研究開発環境支援事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

北海道自動車産業集積促進協議会（2014）

- 2) 例えば、相山英明：「X線CTシステムを用いた三次元形状評価」，工業試験場報告，No.311（2012）
- 3) 高橋英徳，板橋孝至：「ガス分析を用いたアルミニウム鋳物製品の内部欠陥評価」，軽金属学会第121回秋期講演大会概要集（2011.10）
- 4) 高橋英徳，板橋孝至：「ガス分析を用いたアルミニウム鋳物製品の鋳造欠陥評価」，日本金属学会第149回秋期講演大会概要集（2011.11）
- 5) 高橋英徳，板橋孝至：「ガス分析を用いたダイカスト製品の内部品質評価」，軽金属学会第123回秋期講演大会概要集（2012.11）

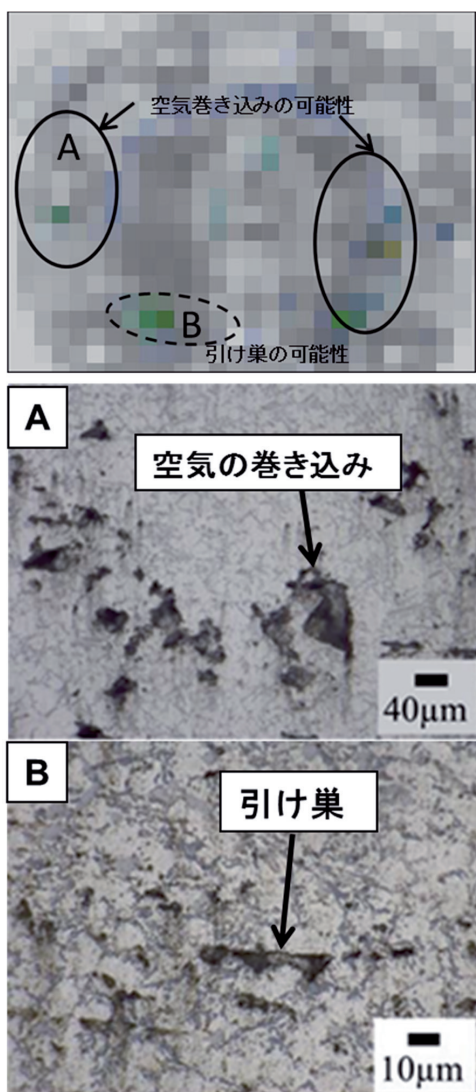


図10 X線CT結果と断面組織観察結果の比較

引用文献

- 1) 例えば，北海道自動車産業集積促進アクションプラン，