

北海道における農業用温室を対象とした
施設内環境解析及び構造形式に関する研究

Study on thermal environment analysis and
structural strength for greenhouse in Hokkaido

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部 北方建築総合研究所

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization
Building Research Department Northern Regional Building Research Institute

概要 Abstract

北海道における農業用温室を対象とした施設内環境解析及び構造形式に関する研究 Study on Thermal Environment Analysis and Structural Strength for Greenhouse in Hokkaido

立松 宏一¹⁾、高倉 政寛²⁾、月館 司³⁾

Koichi Tatematsu¹⁾, Masahiro Takakura²⁾, Tsukasa Tsukidate³⁾

キーワード : 施設園芸、農業用ハウス、温熱環境、省エネルギー、構造安全性

Keywords : *Greenhouse horticulture, Agriculture, Energy conservation, Structural safety*

1. 研究概要

1) 研究の背景

温室は、外皮のほぼすべてが透明であること、地温の影響を大きく受けること、作物を介した水分移動の影響が大きいこと、構造安全性に対する考え方など、一般建築とは異なる取り扱いが求められる。

2) 研究の目的

北海道における温室を対象に、様々な園芸施設に応用できる実用的な施設内環境解析手法を構築するとともに、構造安全性確保のための検討を行う。また、施設内環境・エネルギーと構造の観点から、温室に関する技術開発要素の提案を行う。

2. 研究内容

1) 温室の実態調査と類型化

(H26~27 年度)

- ・ねらい：国内で普及しているハウスやガラス温室のほか、国内外の先進事例、養液栽培向けの温室などの調査、検討対象とする温室の規模、構造、使用資材、使われ方の調査を行い、類型化を行う。
- ・試験項目等：国内で普及している温室や国内外の先進事例の調査、生産者・メーカーなどへの聞き取り

2) 温室に適用可能な施設内環境、熱負荷のシミュレーション手法構築

(H26~28 年度)

- ・ねらい：温室特有の外皮条件（大部分が透明である、保温性能、日射透過率、通風用開口面積が逐次変化する、長波長放射を透過する、水滴付着の有無により放射透過率が変化する）、地盤の影響、水分移動の影響を考慮した施設内環境（温度、湿度、光など）のシミュレーション手法を構築する。
- ・試験項目等：試験ハウスを用いた実験、フィルムの光学性能測定、シミュレーション

3) 温室の構造安全性確保のための検討

(H26~28 年度)

- ・ねらい：規基準の運用実態を踏まえ、施設の使用方法与地域の気象条件に応じた積雪荷重、風荷重を検証する。また、荷重被害を抑制する構造上の手法や留意点について検討する。
- ・試験項目等：各種荷重の設定、構造設計

4) 改善に向けた技術開発要素の提案

(H27~28 年度)

- ・ねらい：類型化した温室のそれぞれの課題を整理し、改善に向けた技術開発要素を提案する。
- ・試験項目等：類型化した温室の比較分析、課題抽出

¹⁾ 企画調整部企画課主査 ²⁾ 地域研究部居住・防災 G 主査 ³⁾ 環境研究部環境 G 主幹

¹⁾ Chief of Planning Section ²⁾ Chief of Residential Planning and Disaster Management Group ³⁾ Senior Research Manager of Environment Group

3. 研究成果

1) 温室の実態調査と類型化 (H26~27年度)

関係行政、普及指導員、メーカー、農業共済組合、生産者等にヒアリングを行い、温室の実態や課題を把握した。その結果を踏まえ、研究内容2)に関しては太陽光利用型植物工場などを含む温室全般を対象に、研究内容3)に関しては、特に課題が大きいパイプハウスを対象として検討を行うこととした。

2) 温室に適用可能な施設内環境、熱負荷のシミュレーション手法構築 (H26~28年度)

温室被覆資材は長波放射を透過することから、放射率、長波放射透過率の測定を実施し(図1)、JIS A4710に応じた熱貫流率測定により長波放射透過が被覆の保温性に及ぼす影響を明らかにした(図2)。また、計算モデル検討のために放射収支及び土壌の熱伝導率、含水率、温度分布測定を行い、これらを反映した温熱環境及び暖冷房負荷のシミュレーション手法を構築した(図3)。

3) 温室の構造安全性確保のための検討 (H26~28年度)

構造基準類やハウスの耐荷重との関係(図4)や、地域別のハウス仕様と積雪荷重の関係について分析し、降雪による被害リスクや、補強によるリスク軽減の可能性について示した。

4) 改善に向けた技術開発要素の提案 (H27~28年度)

温熱環境について、暖房負荷や無加温時の夜間温度保持に影響を与える要因を分析し、保温・蓄熱資材など温熱環境改善に必要な技術やその効果検証方法に関する課題を提案した。構造安全性に関しては、荷重の検証や、過去の災害調査報告、既往の温室災害対策マニュアルに基づき留意点を整理した。

<具体的な成果>

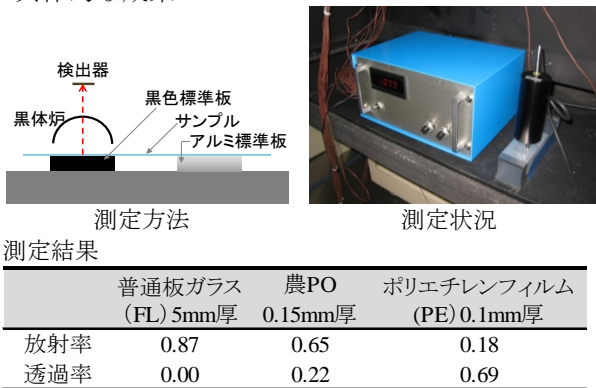


図1 透明外皮の放射率、長波放射透過率の測定

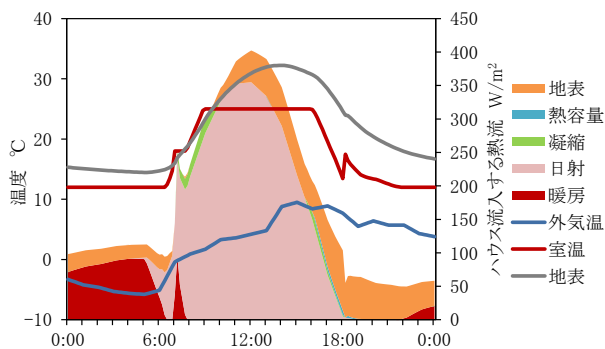


図3 温度と熱流のシミュレーションの例

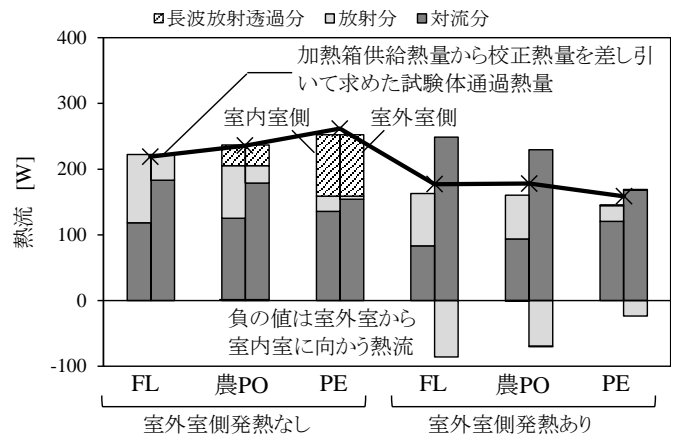


図2 被覆材の通過熱流と内訳

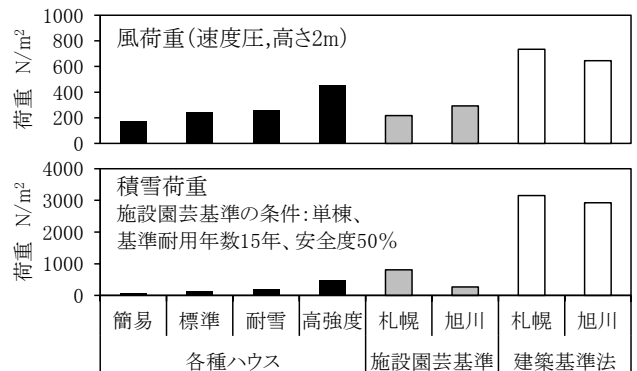


図4 ハウスの耐荷重と構造基準

4. 今後の見通し

本研究の成果は、重点研究「保温装備と耐雪性を強化した北海道型ハウスの無加温周年利用技術の確立」(H29~31)において、保温・蓄熱方法等の技術開発に活用する。また、技術相談、技術支援に活用する。

目 次

1. 研究の背景と目的.....	1
2. 温室の実態調査と類型化.....	2
(1) 実態の把握.....	2
(2) 温室の分類.....	2
(3) 温室に関わる課題.....	4
(4) 本研究で対象とする温室.....	6
3. 温室に適用可能な施設内環境、熱負荷のシミュレーション手法構築.....	8
(1) 温室における温熱環境シミュレーションの課題.....	8
(2) 長波放射を透過する透明外皮の熱貫流率測定.....	9
(3) 放射収支測定.....	12
(4) 土壌特性測定.....	15
(5) シミュレーションモデルの構築.....	16
4. 温室の構造安全性確保のための検討.....	21
(1) 温室の構造に関する基準類と運用.....	21
(2) 各地域の積雪の実態とハウス強度の検証.....	23
5. 改善に向けた技術開発要素の提案.....	29
(1) 温熱環境の改善、省エネルギーについて.....	29
(2) 構造安全性の向上について.....	32
6. まとめ.....	33
付録.....	34

1. 研究の背景と目的

パイプハウスやガラス温室などの農業用温室は、作物の栽培時期の拡大や集約的な生産を可能にし、現代の食料生産や食生活になくってはならないものとなっている。近年、担い手の減少や燃料費の高騰により、温室の設置面積は漸減の傾向にあったが、食の生産・消費の多様なニーズに対応していくために、農業分野における温室利用は今後も不可欠といえる。また、国は「農林水産業・地域の活力創造プラン」（平成 25 年 12 月 10 日、農林水産業・地域の活力創造本部決定）の中で、「次世代施設園芸*等の生産・流通システムの高度化の推進」を位置づけた。これを受け、農林水産省では平成 25 年度に次世代施設園芸導入加速化支援事業を創設し、北海道においても平成 26 年から 28 年にかけて、苫小牧市に計 4ha のイチゴの養液栽培ハウスが建設された。

農業用温室は、もともと大都市圏近郊の野菜生産が盛んな地域や、冬季の温室利用価値が高い温暖地で導入が進んできた経緯があり、北海道における温室設置面積の全国比率は 5.5%と、農業生産額や耕地面積の全国比率（それぞれ 13%、26%）と比べると低い。このような中、北海道においても、施設園芸は新規就農者が比較的取り組みやすいことや、地域の産業振興のため近年注目されている。平成 23 年 2 月に生産者や関係事業者、行政、研究者などにより、北海道養液栽培研究会が設立、平成 25 年には北海道の温室環境制御に関する意見交換会（北大、中央農試、北農研、北総研ほか参画）が開催され、平成 26 年 3 月の日本農業気象学会全国大会（札幌開催）では、「寒冷地における施設園芸の可能性」と題したセッションが設けられるなど、北海道においても温室利用に関する機運が高まりつつあった。

北方建築総合研究所では、道農政部の園芸ハウスエネルギー性能評価方法検討委託業務の一環として平成 24 年度に実施した「園芸ハウスエネルギー性能評価方法確立に関する研究」が、温室を対象とした研究課題の最初である。その後も、植物工場の技術実証への参画の機会や、大雪などによるハウスの倒壊被害について相談を受けるケースが度々あった。しかしながら、農業用温室は、全面が透明な外皮に覆われていることや、一定の条件を満たす場合は、建築基準法上の建築物とみなされず構造関係規定の適用を受けない（建築主事の判断による）ことから、一般建築物における知見をそのまま適用できない部分がある。

そこで本研究では、北海道における農業用温室の技術開発や技術支援に応用できる基礎的な知見の蓄積を目的とし、温熱環境、構造安全性の両面から検討を行うこととした。本研究の実施内容を表 1-1 に示す。

※ 施設園芸：パイプハウスやガラス温室などを利用して野菜、花卉、果樹などを栽培する形態

表 1-1 本研究の実施内容

研究項目	実施内容	本報告書の対応する章
温室の実態調査と類型化	国内で普及しているハウスやガラス温室のほか、国内外の先進事例、養液栽培向けの環境制御型の温室などの調査、検討対象とする温室の規模、構造、使用資材、使われ方の調査を行い、類型化を行う。	2
温室に適用可能な施設内環境、熱負荷のシミュレーション手法構築	温室特有の外皮条件（大部分が透明である、保温性能、日射透過率、通風用開口面積が逐次変化する、長波長放射を透過する、水滴付着の有無により放射透過率が変化する）、地盤の影響、水分移動の影響を考慮した施設内環境（温度、湿度、光など）のシミュレーション手法を構築する。	3
温室の構造安全性確保のための検討	類型化した各種温室について、規基準の運用実態を踏まえ、施設の使用手法と地域の気象条件に応じた積雪荷重、風荷重を検証する。また、荷重被害を抑制する構造上の手法や留意点について検討する。	4
改善に向けた技術開発要素の提案	類型化した温室のそれぞれの課題を整理し、北海道における温室の改善に向けた技術開発要素を提案する。	5

2. 温室の実態調査と類型化

(1) 実態の把握

北海道における温室の実態を把握するため、生産者、関係行政、パイプハウスメーカー、農業共済組合へのヒアリングを実施した。ヒアリングの一覧を表 2-1 に示す。このほか、施設園芸が盛んな旭川近郊、道南地区の JA へ電話での照会を行った。

これらのヒアリングを踏まえた、温室の実態や類型を以降に記す。

表 2-1 本研究で実施したヒアリング一覧

実施日	相手先	主な内容
H26. 8. 8	生産者（石狩市）	ハウスの使い方／フィルムについて／構造・施工について／風・雪害について／改善要望
H26. 8. 8	北海道建設部建築指導課 建築基準 G	建築確認における温室の取り扱い
H26. 8. 8	北海道農政部農産振興課 園芸 G	研究ニーズについて／建築基準法について／補助事業における施設建設基準について
H26. 10. 7	花・野菜技術センター駐在技術普及室	ガラス温室について／越冬型ハウスについて／ハウスの被害／ハウスの基本的構造、普及指導員の関わり／補助事業との関係／今後の動向
H26. 12. 12	パイプハウスメーカー A 社	ハウスの仕様／ハウスの性能／ハウスの被害対策／北海道のハウスの特徴、改善の余地／高強度ハウスについて／企業の取り組み
H27. 7. 27	上川中央農業共済組合	園芸施設共済について／共済金額・共済掛金の設定／被害軽減について
H27. 11. 9	パイプハウスメーカー B 社	ハウスの被害対策／ハウスの規格／高強度ハウスについて

(2) 温室の分類

1) 構造材と被覆材の種類による分類

温室の分類は統一されたものがなく、時代によっても変化がみられる。ここではまず、最新の状況を反映していると考えられる「園芸用施設安全構造基準—平成 28 年版—」¹⁾における定義を表 2-2 に示す。

表 2-2 「園芸用施設安全構造基準—平成 28 年版—」における園芸用施設の定義

ガラスハウス	金属系の構造材を用いて構成された骨組をガラスで被覆したハウス
プラスチックハウス	金属系や木質系の構造材を用いて構成された骨組をプラスチックフィルムまたは硬質プラスチック板で被覆したハウス
パイプハウス	小径の鋼管を用いて半円状に作られた骨組をプラスチックフィルムで被覆したハウス

現在パイプハウスの被覆材としてビニルはあまり使用されておらず、多くは農業用ポリオレフィン系フィルム（農 P0）が使用されているため、「ビニルハウス」という呼称は適切でない場合がある。施設園芸に関する基本文献である「施設園芸・植物工場ハンドブック」²⁾では、温室をガラス温室とプラスチックハウスに大別していたが、表 2-2 ではプラスチックハウスとパイプハウスを分けて定義している。これは、近年農業用フッ素樹脂フィルムなど日射透過性や耐候性に優れたフィルムが開発されたことから、連棟型の大規模温室においても、プラスチックフィルムが被覆材に用いられている状況を踏まえたものと思われる。

表 2-3 に園芸用施設の設置面積を示す。北海道におけるガラスハウスの面積割合は 0.5%と小さく、プラスチックハウス、パイプハウスが圧倒的に多い。なお、表 2-3 は園芸用施設（野菜用、花き用および果樹用）が対象になっているため、水稻育苗用のハウスなどは数字に含まれていない場合があると考えられる。

表 2-3 園芸用施設の設置面積 (単位 千 m²)³⁾

		ガラスハウス		プラスチックハウス・パイプハウス	
		全国	北海道	全国	北海道
設置実面積	野菜用	7,970	110	316,722	21,730
	花き用	9,618	4	62,266	2,594
	果樹用	1,300	-	66,609	1,294
	計	18,888	114	445,598	25,618

2) 単棟と連棟

積雪のある北海道では、連棟の場合に谷間の雪処理の問題が生じることから、丸屋根の単棟ハウスが最も一般的である。一方、作業効率や暖房効率の点では連棟が優れていることから、近年は周年栽培を前提とし、谷間に融雪装置を有する連棟の大規模温室も道内各地に建設されている。これらの大規模温室は、太陽光利用型植物工場^{*}と呼ばれることもある。

※ 太陽光利用型植物工場：従来、植物工場は人工光を利用した閉鎖環境で生産する施設を指していたが、平成 21 年以降、農林水産省と経済産業省により「高度に制御された環境で周年的に栽培・収穫ができる生産施設」と定義され、これらは人工光利用型植物工場と太陽光利用型植物工場に大別されることとなった。したがって、プラスチックハウスやパイプハウスであっても、高度に環境を制御でき、周年栽培が可能な施設であれば、植物工場と呼ばれることになった。

3) 海外事例など

施設園芸の先進地であるオランダで普及している温室として、ダッチライト型ハウス（フェンロー型温室）がある。これは、トラスを用いて 2～3 棟ごとに柱を入れる（1 スパン内に連棟屋根を持つ）軽快な構造で、日本でも一部で導入され、園芸用施設安全構造基準の中でも一般のプラスチックハウスと異なる取り扱いを定めている部分がある。ほかに中国で普及している「日光温室」（北面に蓄熱壁を持つ片屋根の温室）や、イスラエルなどの乾燥地帯や日本の南西諸島で見られる、防虫や防風を目的とした「スクリーンハウス」など、地域事情を反映した温室形態があるが、道内では普及していない。

4) ハウスの使われ方

北海道では試験用温室など特殊なケースを除き、ガラスハウスを必要とする栽培品目はないとされる。パイプハウスの利用形態として代表的なものの一つは、水稻育苗用のハウスで、1970 年代以降道内で大量に導入された。使用期間が 4 月～5 月の 1 か月間程度のため、コスト面から各種ハウスの中でも簡素な仕様が採用されている。標準的にはパイプ径 25.4mm、間口 5.4m、パイプピッチ 600mm である。

その他、北海道のハウスにおいては表 2-4 に示す野菜のほか、花き、果樹が栽培されている。雪害対策から、道内ではハウスの被覆を積雪期に撤去するのが一般的である。被覆を張ったまま越冬する主なケースとしては、たまねぎ、トマト、きゅうり、メロン、すいかの育苗ハウスがある。これらは、各農家で 1 棟程度であり、住宅から近い場所にハウスを設けるなどして、除雪をまめにし、雪による変形、倒壊を防いでいる。なお、通年被覆をすると、土壌養分が上層に移行し障害を起こすため、越冬型のハウスであっても夏季に被覆を剥がして雨に当てることが推奨されている。越冬型以外のハウスでは、概ね 3 月上旬以降に被覆を行う。

表 2-4 北海道のプラスチックハウス・パイプハウスにおける主要野菜栽培面積³⁾

品目	栽培延面積(千 m ²)	品目	栽培延面積(千 m ²)	品目	栽培延面積(千 m ²)
トマト	5,472	ほうれんそう	2,990	すいか	699
うちミニトマト	1,802	アスパラガス	931	パセリ	686
メロン	5,281	きゅうり	900	いちご	528
うち温室メロン	2,518	ねぎ	704	さやいんげん	462

(3) 温室に関わる課題

1) 温熱環境に関する課題

パイプハウスのうち、加温設備を有するのは表 2-5 に示すとおり、園芸用ハウスに限っても 1 割程度にとどまっている。加温設備の熱源はほとんど石油で、一部地域で温泉熱が利用されている。2008 年をピークとする石油価格の値上がりにより、加温設備の使用は縮小傾向となっている。ヒートポンプやバイオマスボイラーの利用は、ごく一部に留まっている。

ハウスは日射で容易に室温が上昇するため、被覆材やカーテン、トンネルの開閉により温度調整をすることが必須で、生産者の大きな負担となっている。近年は、電動開閉装置や、温度により自動で開口面積を制御する自動開閉装置も導入されてきているが、より低コストで信頼性の高い装置を望む意見もある。また、ハウスの側面開口は、基本的に軒（肩部）より下方に設けられるため、ハウス上部には熱気が溜まりやすく、夏季には過熱が問題となる。天窗や換気扇によって改善は可能であるが、導入されているハウスは表 2-5 に示すとおり一部に留まっている。

被覆材には古くは油紙が用いられたが、1950 年代以降、ポリ塩化ビニルフィルム（農ビ）が普及した。その後、べたつきや伸びがないため作業性が良く、ハウスバンド不要で展張できる農業用ポリオレフィン系フィルム（農 P0）が開発され、現在では農 P0 がパイプハウス被覆の主流となっている。耐久性は 2 年から 10 年程度とされるが、経年により日射透過率が低下するため、特に日射を必要とする果菜類などでは、2 年更新としている場合もある。大型のプラスチックハウスに使用される農業用フッ素フィルムは、耐用年数が 10～15 年と高く、日射を散乱させることにより構造材の陰による光環境のむらを解消できる製品も実用化されている。

表 2-5 北海道のプラスチックハウス・パイプハウスにおける環境制御設備導入状況³⁾

種類	面積(千m ²)
プラスチックハウス・パイプハウス設置面積	25,618
うち加温設備のあるもの	2,735
うち石油温風	2,261
うち石油温湯	214
地熱水利用	227
自動天側窓開閉装置のあるもの	126
換気扇のあるもの	303

2) 構造安全性に関する課題

① 建築基準法との関連

農業用のパイプハウスや、連棟のプラスチックハウスは、被覆の取り外しが可能であるなど一定の条件を満たすものは、建築基準法上の建築物として取り扱われていない。

② 園芸用施設安全構造基準について

ハウスの安全性に関する任意の基準として、施設園芸協会で「園芸用施設安全構造基準」を策定している。昭和 43 年から農林水産省の通達を受けて検討され、昭和 49 年に（案）として決定された後、昭和 50 年に「暫定基準」となり、昭和 56 年、平成 9 年の改定を経て、平成 28 年 7 月に「園芸用施設安全構造基準—平成 28 年版—」として刊行された。ただし、パイプハウスについては接合部が摩擦接合であること、基礎がないことなどから、構造計算に係る規定は適用しないこととされており、別途、昭和 62 年に施設園芸協会により「地中押し込み式パイプハウス安全構造指針」が策定されている。

これらの基準類は、温室の建設に係る一部の補助事業で要件とされており、例えば、「次世代施設園芸導入加速化支援事業実施要領」(25 生産第 3016 号平成 26 年 2 月 6 日農林水産省生産局長通知)では、「50m/s 以上の風速(事業対象作物について、ハウスの被覆期間中における過去の最大瞬間風速が 50m/s 未満の地域にあっては、当該風速とすることができる。ただし、当該風速が 35m/s を下回る場合においては 35m/s を下限とする。)に耐えることができる強度を有するもの(被覆期間以外の期間は、被覆

資材を確実に外すこと等により、ハウスが風害を受けないよう適切に管理すること。)若しくは 50kg/m²以上の積雪荷重に耐えることができる強度を有するもの又は構造計算上これらに準ずる機能を有するもの」で、園芸用施設安全構造基準に従って設計するものとされている。

一方、その他一般のハウスにおいては、これらの基準類が意識されることはほとんどなく、生産者個別の経験的判断により、仕様が選択されている。ハウスの強度は主にハイクの径と間隔、間口、補強方法で決まる。道内における標準的な組み合わせを表 2-6 に示す。地域によって、標準的な仕様を有する場合や、過去の地場のパイプハウスメーカーの仕様との互換性を持つため、アーチパイプの形状や補強方法が指定されている事例もあるが、パイプハウスメーカーや農業協同組合において、構造安全性の観点から基準を設けている例は確認できなかった。

表 2-6 道内の標準的なパイプハウス構造仕様⁴⁾

間口(m)	アーチパイプ径(mm)					アーチピッチ(mm)		
	22	25	28	32	34	500	600	
4.5	○					○	○	○印は標準的な組み合わせの例。このほかに、パイプを太くした耐雪タイプ、アーチパイプを交差させた耐雪・耐風タイプ(トラスハウス)などがある。
5.4	○	○				○	○	
6.0		○				○	○	
6.3		○	○			○	○	
7.2				○		○	○	
8.1					○	○		
9.0					○	○		

なお、一部のパイプハウスメーカーでは、耐雪性、耐風性に関して性能表示を行っており、これらの耐荷重は園芸用施設安全構造基準に従って計算されている。ただし、計算された耐雪性、耐風性は必ずしも、園芸用施設安全構造基準で定める地域別の積雪荷重・風圧力を満足するものではない。近年、各メーカーでは積雪荷重・風圧力の基準を満足しうる仕様を開発しているが、普及は極めて限定的である。価格面のほか、施工を外注しなければならないことや、構造材による採光性能の低下も、高強度のハウスが普及しない要因となっている。

③園芸施設共済について

パイプハウスの被害に対する補償制度として農業共済組合(NOSAI)が実施する園芸施設共済がある。加入した場合には、パイプと被覆材の両方が、自然災害などによる損害の補てん対象となる。また、施設内農作物の被害や撤去費用、復旧費用についても選択式で補償対象とすることができる。園芸施設共済への加入率は水稻育苗ハウスでやや低いが、園芸用ハウスはほとんどが加入しているとされる。ただし被覆しない期間の損害は補償対象外となる。

農家が負担する共済掛金は、次式で算定される。

$$\text{農家負担共済掛金} = \text{共済金額} \times \text{共済掛金率} \times (\text{共済責任期間} / 12 \text{ ヶ月}) \times \text{農家負担割合}$$

共済掛金率は、組合などごと、特定園芸施設の種類ごと、さらに特定園芸施設(附帯施設を含む)、施設内農作物と特定園芸施設撤去費用、園芸施設復旧費用ごとに、農林水産大臣が過去 20 ヶ年の被害率を基礎に定め、3年ごとに改定される。さらに、組合の判断により、農家ごとの過去の被害率などを加味した危険段階別共済掛金率を採用することも可能となっている。

④ハウスの被害について

被害が出やすいのは3月下旬で、一晩で数 10cm の積雪があった場合に被害が生じることが多い。近年の主な被害として以下の事例がある⁵⁾。

・平成 23 年の大雪

平成 23 年 12 月から平成 24 年 3 月にかけて、空知・石狩管内を中心に記録的な大雪に見舞われ、6,485 棟のパイプハウスが被害を受けた。うち、6,129 棟は被覆を剥がしたパイプハウスで、雪の沈み込みによるパイプの変形が生じたもので、これまでにない被害であった。

・平成 24 年の暴風雪

平成 24 年 11 月から平成 25 年 3 月にかけて、各地で 30m/s 以上の暴風雪によるハウスの被害が生じ、被害棟数は 2,018 棟であった。特に平成 25 年 3 月には網走市で最大瞬間風速 31.4m/s を記録するなど、オホーツク地域で 851 棟と多くの被害が生じた。被害内容の大半は、被覆資材の破損であった。

ただし、ハウスは構造耐力が小さい一方、適切な除雪や補強により、多くの被害は防ぐことができるとの意見もある。また、補強方法については、ホクレンでマニュアル⁶⁾を作成しており、補強に必要なパイプ、接合部材などの資材は市場に出そろっているとも言われる⁷⁾。なお、被害を受けなかった場合には、パイプの耐用年数は長く、腐食部位の部分的な交換により、少なくとも 20 年以上は使用できるとされる。

(4) 本研究で対象とする温室

以上の温室の実態把握を踏まえ、本研究で対象とする温室を図 2-1 に示す。施設内環境、熱負荷のシミュレーションについては、パイプハウス、プラスチックハウス、ガラスハウスを含む広く温室全般を対象とし、共通して解析に使用できる手法構築を目指す。構造安全性確保のための検討については、各温室で異なる課題を有するが、ガラスハウスは特殊事例であり、プラスチックハウスも専門事業者による相応の構造設計がなされることから、構造安全性の考え方が不明確な点があり、被害も少ないパイプハウスを対象とする。



図 2-1 本研究で検討対象とする温室

[参考文献]

- 1) 園芸用施設安全構造基準—平成 28 年版—, 日本施設園芸協会, 2016. 7
- 2) 日本施設園芸協会:施設園芸・植物工場ハンドブック, 農山漁村文化協会, 2015. 5
- 3) 園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する実態 (平成 24 年), 農林水産省, <http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/haipura.html>
- 4) ハウス丸わかり読本地域別価格早わかり編北海道地方 Vol. 3, 渡辺パイプ株式会社, 2013
- 5) 大雪等による農業被害の防止に向けた取組について, 北海道農政部, 2013. 11
- 6) パイプハウス補強マニュアル, ホクレン 施設資材部 資材課, 2005. 1
- 7) 現代農業, 第 91 巻第 11 号, 2012. 11

3. 温室に適用可能な施設内環境、熱負荷のシミュレーション手法構築

(1) 温室における温熱環境シミュレーションの課題

1) 既往のシミュレーション手法と課題

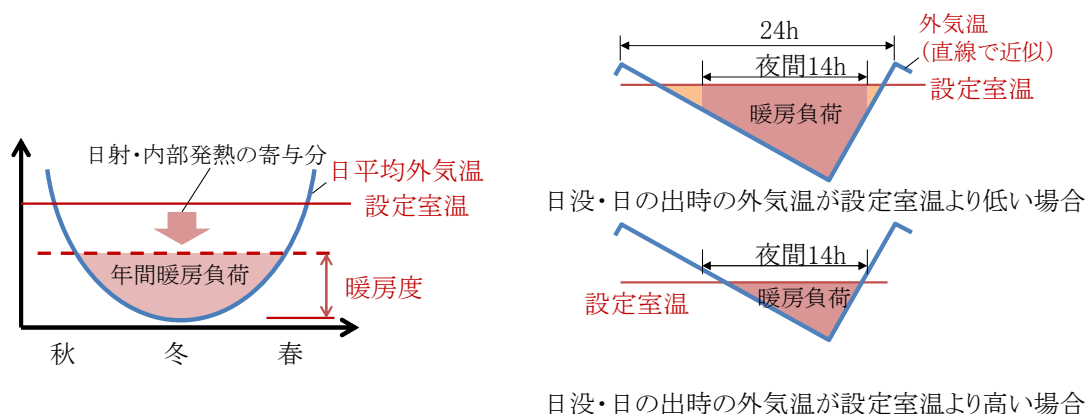
温室の急速な普及をみたのは農ビが市場に出た昭和 20 年代後半以降である。昭和 40 年代になると、園芸環境工学分野の研究者による温室を対象とした温熱環境解析の研究が進展し、その成果は、「温室設計の基礎と実際」¹⁾としてまとめられている。現在の温室設計でも多くが同書の計算方法に基づいている。

温室の温熱環境解析でまず必要とされるのは、暖房機器の容量を決めるための最大暖房負荷計算である。これは一般建築と同様に、温室の単位内外温度差あたりの熱損失と、建設地の最低外気温から算出するものである。施設園芸・植物工場ハンドブック²⁾には計算に必要な各係数が整理されており、最大暖房負荷計算の方法に関しては、ほぼ確立されているとあってよい。

一方、期間暖房負荷計算は、一般建築と比べて難しい面がある。住宅においては、室内取得熱を考慮したデグリーデー法³⁾を用いることで、あらかじめデグリーデー表を用意しておくことにより、手計算レベルで期間暖房負荷を求めることができる(図 3-1(a))。

一方、温室においては、通年使用されるとは限らないこと、日射により冬季でも容易に設定室温を越えること、温度設定が昼間と夜間で異なることなどにより、同様の方法を用いることができない。

温室の暖房負荷計算法として、暖房デグリーアワーによる方法が提案されている^{1)、4)}。この方法によれば、外気温の変化が日最高気温と日最低気温を頂点とする三角形で近似できると仮定し(図 3-1(b))、年間の気象データから、比較的小さな計算負荷で期間暖房負荷を求めることができる。野菜茶業研究所が開発した「温室暖房燃料消費量試算ツール」⁵⁾は本手法を用いている。



(a) 室内取得熱を考慮したデグリーデー

(b) デグリーアワー

図 3-1 期間暖房負荷の簡易計算法

しかしながら、これらの簡易計算法は、時々刻々の温度や熱流を計算するものではないため、暖房時の熱の流れや各部位の温度を把握することはできない。また、蓄熱が考慮できないため、非暖房時の室温を計算することもできない。

商用の非定常熱解析ソフトとして SMASH for Windows (一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構) や AE-Sim/Heat (株式会社 建築環境ソリューションズ) などがあるが、これらも外皮条件や設定室温が時間とともに変化する温室の計算に用いるには、十分な機能を有していない。そこで本研究では、汎用的な表計算ソフト Microsoft Excel を用い、温室の温熱環境、熱負荷解析に利用できるシミュレーション手法を構築する。

2) 温室特有の取り扱いを要する事項

一般建築と比較して温室の場合、表 3-1 に示すような特有の取り扱いを必要とする。本研究では、

これらの各項目に対応するシミュレーション手法を構築することを目指し、以降ではそのために必要なくつかの検証を行う。

表 3-1 温熱環境解析上の温室の特徴

項目	一般建築	温室
外皮	不透明外皮（屋根・壁）を基本とし、一部に透明外皮（窓）が設けられる。	すべて透明外皮で日射熱取得の影響が極めて大きい。
外皮の断熱性能	一定として扱うことができる。	多層被覆の場合、被覆の開閉で温度調節を行うため、変動する。
外皮の光学性能	窓にはガラスが用いられ、長波放射の透過は想定していない。	プラスチックフィルムは長波放射を透過するものがある。また長波放射透過率は被覆への結露状態によっても変化する。
開口面積	通風時に窓を開放することがあるが、熱負荷計算は基本的に窓を閉鎖した状態で行なわれる。	年間を通じ、窓の開閉によって温度制御を行う。
地盤	床下を介して接しているため、熱的な影響は小さい。	直接地盤に接しているため、極めて大きな影響を受ける。
水分移動	一般的に室内で発生する水分は小さく、熱計算では無視されることが多い。	地面からの蒸発や植物の蒸発散による熱的な影響を無視することができない。
設定室温	一般に冷房時と暖房時に分けて、それぞれ一定の値が使用される。	植物の種類、生育ステージ、日射量などにより適温は随時変化する。
使用（居住）期間	通年使用が前提である。	年間を通じて使用されるとは限らない。

（２）長波放射を透過する透明外皮の熱貫流率測定

1) 検討の目的

一般建築の透明外皮として使用されるガラスは、波長 3,000nm 程度以上の長波長の赤外線（以下「長波放射」という）をほとんど透過しない。一方、農業用のパイプハウスや温室の被覆資材に使用されている農業用塩化ビニルフィルム（農ビ）、農業用ポリエチレンフィルム（農ポリ）、農業用ポリオレフィン系特殊フィルム（農 P0）などの各種フィルムの中には、長波放射の透過を無視できないものがある（図 3-2）。

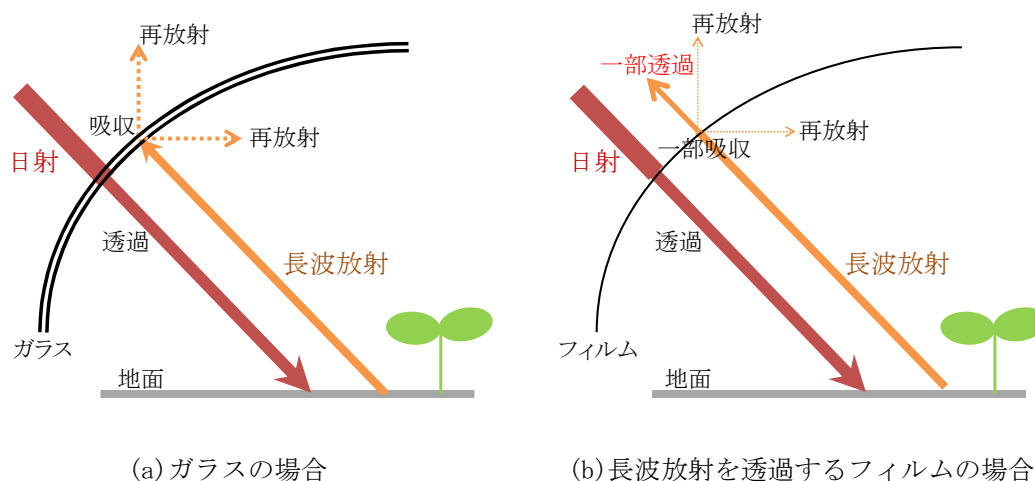


図 3-2 透明外皮の長波放射を透過性の違い

温室被覆資材の熱貫流率を実験室実験で評価する試みとして、屋外気象を模擬できる熱貫流率測定装置の開発⁶⁾、熱流計法の熱伝導率測定装置を用いた評価方法の検討⁷⁾などがあるが、建材の JIS に基づく熱貫流率測定とは測定条件が異なる。そこで本報では JIS A4710「建具の断熱性試験方法」に準じた校正熱箱法による測定を試みた。

2) 測定の方法

図 3-3 に試験装置の概要を示す。試験は北方建築総合研究所の断熱防露試験室で実施した。試験体は、FL（フロート板ガラス 5mm 厚）、農 PO（0.15mm 厚）、PE（住宅防湿用ポリエチレンフィルム 0.1mm 厚）の 3 種類とした。幅 2,000×高さ 2,500×厚さ 200mm の断熱材で製作した取付パネルを、室内外を模した試験室の界壁に設置し、中央部に 1,450mm 角の開口を開けて、試験体を取り付けた。

室内室の熱箱内はヒーターと攪拌ファンにより 20℃一定に制御し、20℃を維持するための消費電力を測定した。室内室の相対湿度は 30%以下で、試験体表面への結露は生じない。室外室側は 0℃とし、風洞内に上向きに約 3m/s の気流を与えた。また、空気温度と放射温度が異なる場合の影響を検証するため、風洞の内側には面発熱体をコの字型の側面全面に設置し、発熱させない場合と発熱させる場合（発熱量約 2,200W）の 2 条件で実験を行った。

温度は、試験体を等面積に 9 分割した正方形の中心位置 9 点で、室内外のバッフル板表面と空気温度を測定した。また、取付パネルの見込み部表面温度は上下左右の各中央計 4 点で測定した。さらに、校正熱量算出のため、加熱箱表面（内外各 5 点）、取付パネル表面（内外各 4 点）の温度を測定した。測定装置を写真 3-1 に示す。

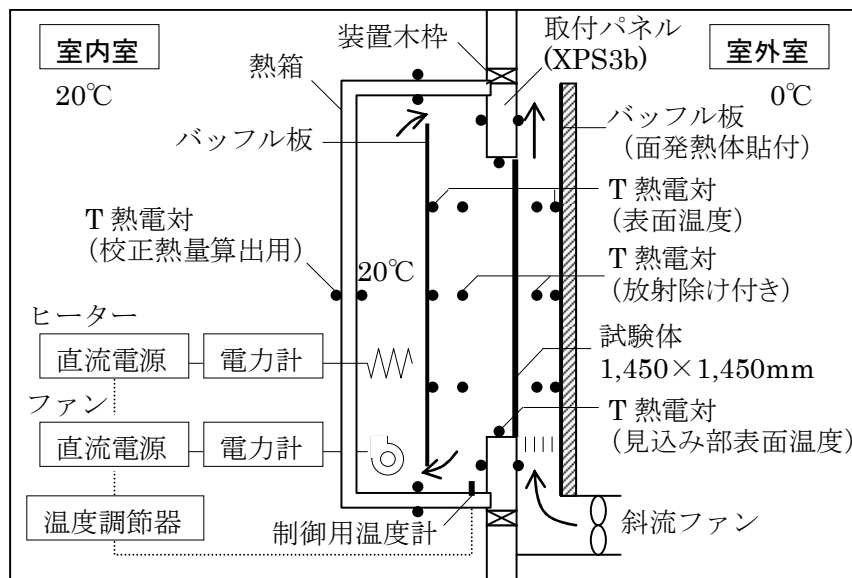


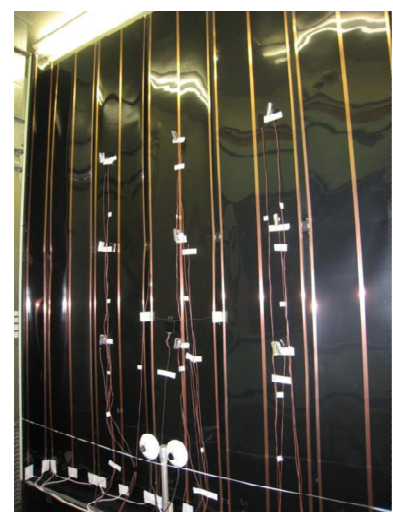
図 3-3 熱貫流率測定装置の概要



(a) 熱箱内



(b) 試験体と取付パネル



(c) 室外室バッフル板

写真 3-1 校正熱箱法による熱貫流率測定装置

3) 放射率、長波放射透過率の測定

試験結果の分析に必要となる、各材料の放射率などを、ジャパンセンサー製放射率測定器 TSS-5X を用いて測定した。測定状況を写真 3-2 に示す。試験体の放射率、長波放射透過率は次の 2 式を連立して求めた⁸⁾。測定結果を表 3-2 に示す。

$$A_1 = \varepsilon + \tau - 0.06\tau^2 \quad (3-1)$$

$$A_2 = \varepsilon + \tau\varepsilon / (\varepsilon + \tau) \quad (3-2)$$

A_1 : 黒色標準板上の放射率測定値、 A_2 : アルミ標準板上の放射率測定値、

ε : 試験体の放射率、 τ : 試験体の長波放射透過率

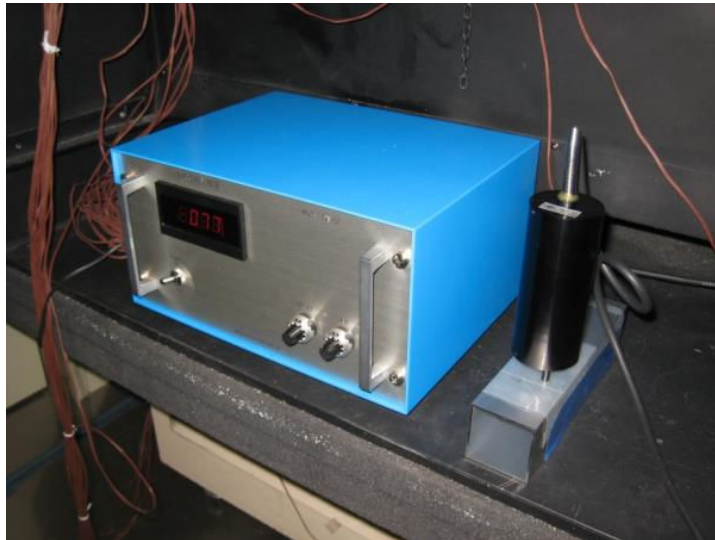


写真 3-2 放射率測定状況

表 3-2 放射率、長波放射透過率の測定結果

	バップル	面発熱体	取付パネル	FL	農PO	PE
放射率	0.91	0.91	0.70	0.87	0.65	0.18
透過率	-	-	-	0.00	0.22	0.69

4) 熱貫流率の測定結果

熱貫流率の算出に必要となる諸数値の測定結果、計算結果を表 3-3 に示す。環境温度 θ_n は JIS A4710 附属書 1 (規定)「環境温度の求め方」に基づき次式で求めた。

$$\theta_n = (h_c\theta_c + h_r\theta_r) / (h_c + h_r) \quad (3-3)$$

放射温度は次式で求めた。

$$\theta_r = (\alpha_{sb}h_{sb}\theta_b + \alpha_{sp}h_{sp}\theta_p) / (\alpha_{sb}h_{sb} + \alpha_{sp}h_{sp}) \quad (3-4)$$

試験体の表面温度は実測が困難であるため、表面温度と環境温度の差に熱伝達率を乗じて求めた熱流が、室内外で等しくなることを条件として計算により求めた。試験体表面の対流熱伝達率は、熱抵抗の異なる校正板を用いて求めた結果から室内側は式(3-5)で与え、室外側は $15.4\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ で一定とした。放射熱伝達率は式(3-6)で与えた。

$$h_c = 0.106(\theta_c - \theta_s) + 2.61 \quad (3-5)$$

$$h_r = \alpha_{sb}h_{sb} + \alpha_{sp}h_{sp} \quad (3-6)$$

校正熱量は取付パネル、熱箱、試験体端部、木枠の各部位からの損失熱量の和である。取付パネルと熱箱からの損失熱量は表面温度差と熱抵抗から、試験体端部、木枠からの熱損失は 2 次元伝熱計算により求めた。

図 3-4 には、被覆材の通過熱流とその内訳を示す。棒グラフは、試験体の放射率、透過率をもとに、計算で求めた熱流成分の内訳である。計算式は次のとおりである。なお、室内室から室外室へ向かう熱流を正とする。

$$\text{対流分} = h_c A |\theta_e - \theta_s| \quad (3-7)$$

$$\text{放射分} = h_r A |\theta_r - \theta_s| \quad (3-8)$$

$$\text{長波放射透過分} = \varepsilon_i \varepsilon_e / (\varepsilon_i + \varepsilon_e - \varepsilon_i \varepsilon_e) \sigma |T_{ri}^4 - T_{re}^4| \tau A \quad (3-9)$$

A: 試験体面積[m²]、ε: 形態係数を考慮した放射率(室内室側 0.86、室外室側 0.91)、σ: ステファン-ボルツマンの定数 5.67×10⁻⁸[W/(m²K⁴)]、T_r: 放射温度 θ_r の絶対温度[K]、添え字の i は室内室、e は室外室を示す。

表 3-3 環境温度、試験体表面温度、試験体通過熱量の算出

項目	記号	単位	室外室側発熱なし			室外室側発熱あり				
			FL	農PO	PE	FL	農PO	PE		
環境温度算出	空気温度	θ _e	°C	19.8	19.8	19.9	19.5	19.6	20.1	
	放射温度	θ _r	°C	17.9	17.7	17.6	17.9	18.1	19.1	
	バップル表面	θ _b	°C	18.6	18.4	18.4	18.5	18.7	19.7	
	室内側 取付パネル見込み部	θ _p	°C	15.2	15.0	14.7	15.6	15.8	16.8	
	黒体の放射熱伝達率	h _{sb}	W/(m ² K)	5.3	5.2	5.2	5.3	5.3	5.3	
	黒体の放射熱伝達率	h _{sp}	W/(m ² K)	5.2	5.2	5.1	5.3	5.2	5.2	
	放射率	α _{sb}	-	0.62	0.47	0.13	0.62	0.47	0.13	
	放射率	α _{sp}	-	0.17	0.12	0.03	0.17	0.12	0.03	
	環境温度	θ _n	°C	18.8	18.9	19.5	18.6	18.9	19.9	
	室外側	空気温度	θ _e	°C	-0.3	-0.2	-0.2	0.8	0.9	0.8
		放射温度	θ _r	°C	0.5	0.8	1.8	18.2	18.5	18.9
		バップル(面発熱体)表面	θ _b	°C	0.5	0.8	1.8	18.2	18.5	18.9
		黒体の放射熱伝達率	h _{sb}	W/(m ² K)	4.8	4.8	4.8	5.3	5.3	5.3
		放射率	α _{sb}	-	0.79	0.59	0.16	0.79	0.59	0.16
環境温度		θ _n	°C	-0.1	-0.1	-0.1	4.5	3.9	1.8	
試験体表面温度算出	熱抵抗	R _s	m ² K/W	0.0050	0.0008	0.0005	0.0050	0.0005	0.0008	
室内側	対流熱伝達率	h _c	W/(m ² K)	4.1	4.1	4.2	3.7	3.8	4.1	
	放射熱伝達率	h _r	W/(m ² K)	4.1	3.1	0.8	4.2	3.1	0.9	
	試験体表面温度	θ _s	°C	5.9	5.4	4.6	8.9	8.0	6.1	
室外側	対流熱伝達率	h _c	W/(m ² K)	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	
	放射熱伝達率	h _r	W/(m ² K)	3.8	2.8	0.8	4.2	3.1	0.9	
	試験体表面温度	θ _s	°C	5.4	5.3	4.6	8.5	8.0	6.0	
通過熱量算出	加熱箱内供給熱量	W		236	252	278	189	191	173	
	校正熱量	W		18	18	18	13	14	15	
	試験体通過熱量	Q	W	218	234	260	176	177	158	

sb: 試験体からバップルを表す添え字、sp: 試験体から取付パネル見込み部を表す添え字

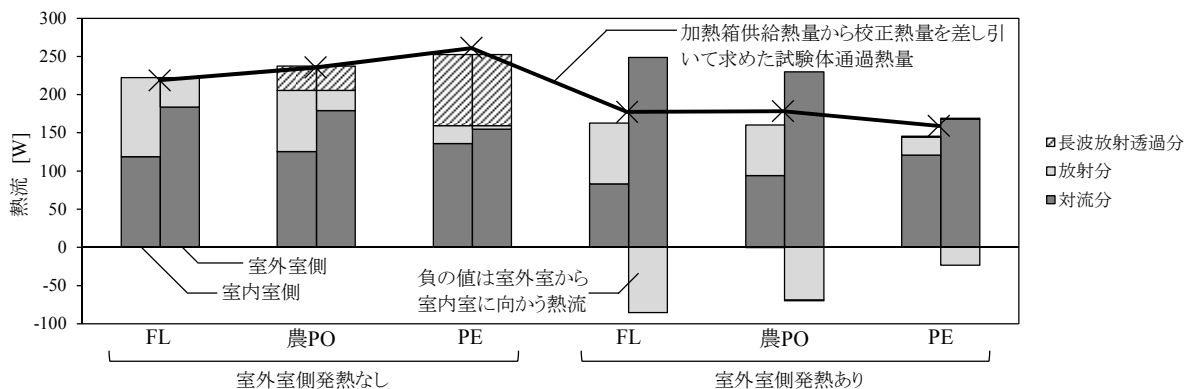


図 3-4 被覆材の通過熱流と内訳

室内外で通過熱量の和は一致するが、室外室のほうが風速が大きいため、対流分の割合が大きくなる。室外室側発熱なしの場合、農 PO、PE は表面熱伝達による熱流が FL に比べて減少するが、長波放射透過の増加の影響のほうが大きく、長波放射透過率が大きいほど通過熱量の合計も大きくなる結果となった。室外室で発熱がある場合は、室内外の放射温度がほぼ同じであるため、長波放射透過分は収支としてはほとんど生じないが、PE の場合は室外側の発熱の影響を受けて室内側のパッフル温度が高温となっており、通過熱量は FL に比べて減っている。

図 3-4 中の折れ線は、加熱箱内供給熱量から校正熱量を差し引いて求めた試験体通過熱量である。棒グラフの和と、折れ線グラフの傾向は一致しているものの、室外室側発熱ありの場合にやや乖離があるのは、温度測定点が限られていることや、放射伝熱の近似的な取り扱いに起因すると考えられる。

長波放射透過の影響を含んだ熱貫流率を表 3-4 に示す。内外温度差を JIS A4710 の定義に従う環境温度差としたもののほか、参考に空気温度差としたものを併せて示す。

室外側発熱なし時の環境温度差基準の熱貫流率は FL に対して、農 PO が 8% 増、PE が 15% 増となった。なお、FL の室外側発熱なし時の合計表面熱伝達抵抗は $0.174\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ であり、合計表面熱伝達抵抗を $0.165\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ として補正した熱貫流率は $5.75\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ となる。これは、JIS R3107「板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法」による計算値 $5.88\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と概ね一致する。

表 3-4 長波放射透過の影響を含む熱貫流率の算出結果

		室外室側発熱なし			室外室側発熱あり		
		FL	農PO	PE	FL	農PO	PE
熱貫流率	$Q/(A \cdot \Delta\theta_n)$	5.47	5.88	6.31	5.94	5.58	4.14
[$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	$Q/(A \cdot \Delta\theta_a)$	5.17	5.58	6.16	4.49	4.49	3.90

(3) 放射収支測定

地表面における熱収支を把握するため、日射計および赤外放射計を用いた放射収支測定を行った。測定には、日射計と赤外放射計が対になったクリマテック製 2 成分放射計 CHF-RA01 を 2 台使い、1 台は上向きに、もう一台は下向きに設置した。また、参考として、デルタオーム製放射収支計 LP NET07 による測定も同時に行った。測定状況を写真 3-3 に示す。

測定はハウスの内外で行った。屋外は芝地で、ハウス内は農 PO 一重被覆の無栽植状態である。

測定期間のうち、晴天日と曇天日を含む 2 日間の測定結果を図 3-5 に示す。図 3-5(a-1)、(b-1) の短波放射フラックス（日射量）の測定結果から、地表面の日射吸収率を求めると、屋外で 0.8、屋内で 0.85 程度であった。また、長波放射フラックスの測定結果から、期間中は下向き放射よりも、常に地

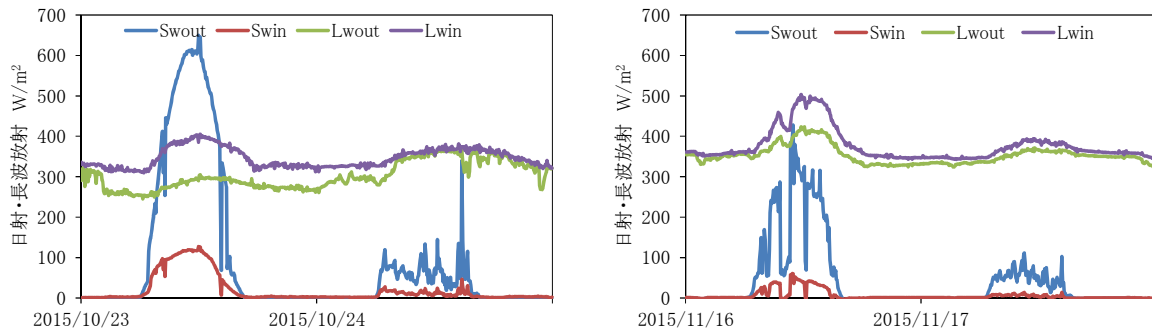


(a) 屋外



(b) 屋内

写真 3-3 放射収支測定状況

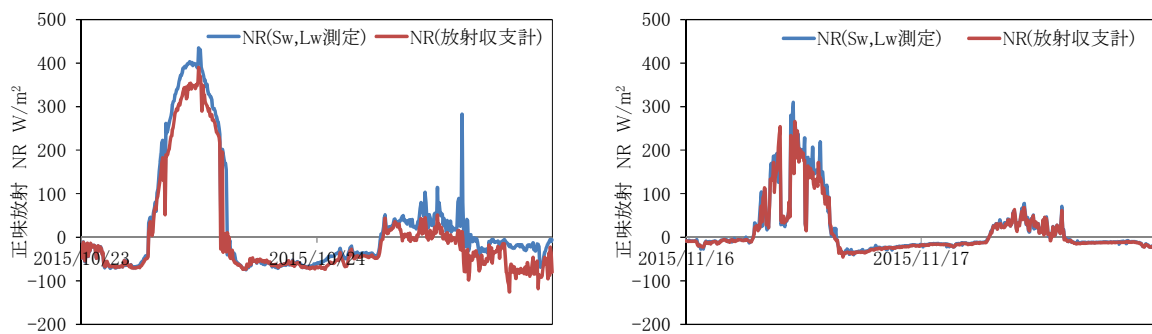


Sw_{out}: 上側短波放射フラックス、Sw_{in}: 下側短波放射フラックス

Lw_{out}: 上側長波放射フラックス、Lw_{in}: 下側長波放射フラックス

(a-1) 放射フラックス測定値 (屋外)

(b-1) 放射フラックス測定値 (屋内)

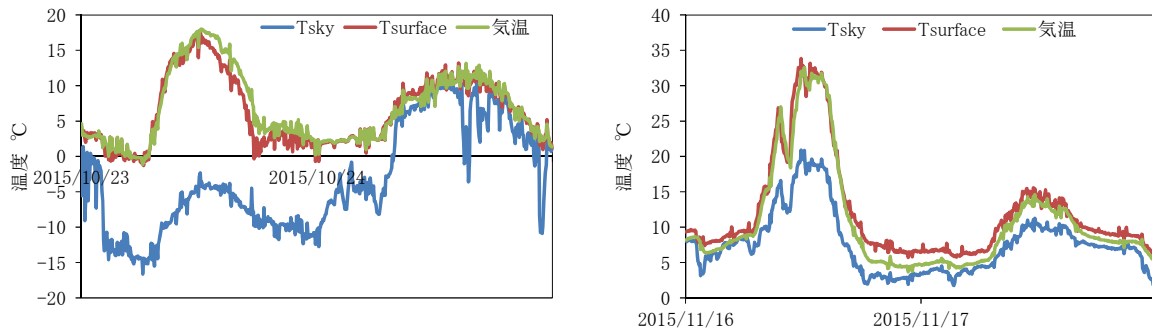


NR (Sw, Lw 測定) : 上記 4 成分の放射フラックスから求めた正味放射

NR (放射収支計) : デルタオーム製放射収支計 LP NET07 の計測値

(a-2) 正味放射 (屋外)

(b-2) 正味放射 (屋内)



$T_{sky} = (LW_{out} / (5.67 \cdot 10^{-8}))^{1/4} - 273.15$: 天空側温度、 $T_{surface} = (LW_{in} / (5.67 \cdot 10^{-8}))^{1/4} - 273.15$: 地表面温度

(a-3) 温度 (屋外)

(b-3) 温度 (屋内)

図 3-5 放射収支測定の結果

面から天空側への上向き放射が大きかったことがわかる。

図 3-5(a-2)、(b-2)に示す正味放射は、短波と長波それぞれの上向き、下向きの値の収支で、屋内外とも、昼間は下向き（地表面に吸熱される方向）、夜間は上向き（地表面から放熱される方向）の傾向となっている。また、4成分測定と、放射収支計 LP NET07 の比較では、屋外の場合、外部風やセンサー表面の濡れ状態が測定誤差の要因となり、一部違いを生じている時間帯があるが、屋内の場合は両者の測定値がよく一致している。

図 3-5(a-3)、(b-3)は、長波放射フラックスの測定結果から推定した表面温度と、CHF-RA01 の内部

に組み込まれた测温抵抗体による温度測定値である。特に屋外の場合に、晴天日と曇天日で天空温度に大きな違いが生じていることがわかる。

図 3-6 は屋内における地表面の熱収支を示す。対流熱伝達は、長波放射フラックスの測定結果から推定した地表面温度と CHF-RA01 の内部温度 (図 3-5 (a-3)、(b-3) 中の気温) の差に、対流熱伝達率 (上向き熱流のとき $6\text{W/m}^2\text{K}$ 、下向き熱流のとき $2\text{W/m}^2\text{K}$) を乗じて求めた。また、地中への熱伝導は、土壌が乾燥しているため潜熱移動はないと考え、正味放射 = 地中への熱伝導 + 空気への対流熱伝達の関係から求めた。昼間に関しては、地表面が吸収した日射のうち、約 6 割が地中への熱伝導により吸熱され、残りは対流と放射により放熱されることがわかる。

なお、以上の測定値については、季節や植栽の有無、ハウス内の加温状況によっても異なる傾向となると考えられるため、多様な状況における測定については今後の課題である。

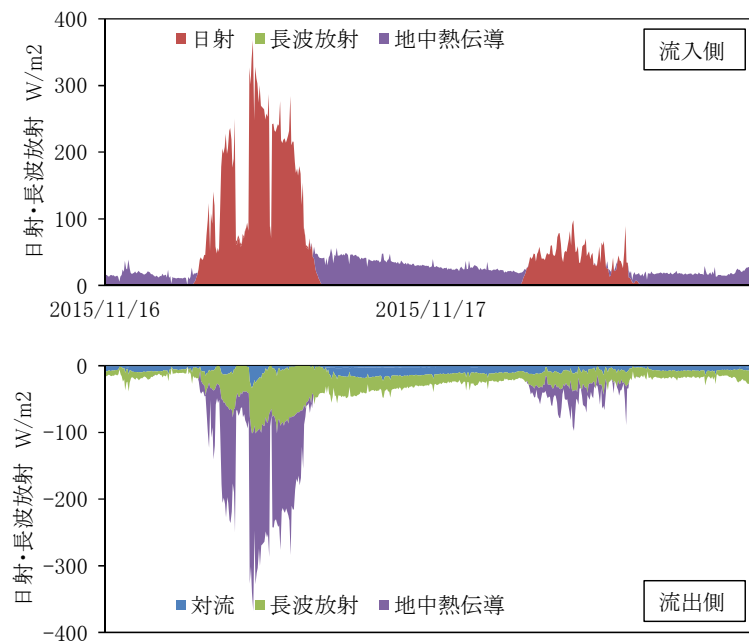


図 3-6 地表面の熱収支 (屋内)

(4) 土壌特性測定

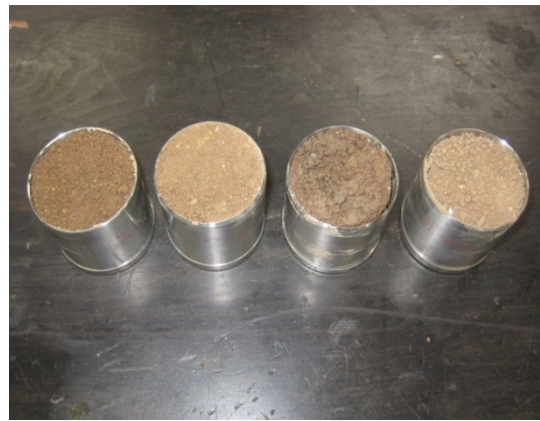
地表面下の伝熱計算の参考とするため、土壌の含水率および熱伝導率を測定した。含水率測定には TDT 土壌水分センサー CACC-SEN-SDI を用いた。また、校正のため、試験後に測定箇所近傍の土壌を、コアサンプラーを用いて 100ml 採取し、絶乾処理前後の重さを計測することにより含水率を実測した。熱伝導率の測定にはクリマテック製熱特性センサー CHF-TP01 を用いた。測定状況を写真 3-4 に示す。

測定結果を表 3-5 に示す。建築物の基礎周りの伝熱計算では、土の熱伝導率として 0.6~1.0W/mK 程度の値が使われることが多いが、温室内の土壌の実態としては、熱伝導率がかなり小さい場合もあることがわかった。

TDT センサーによる体積含水率の測定値は、図 3-7 示すとおり、絶乾法による測定値とおおむね一致していた。図 3-8 にはより正確と思われる、絶乾法による体積含水率と熱伝導率の関係を示す。含水率と熱伝導率には明瞭な相関関係が見られた。



(a) 測定に使用したセンサー



(b) 100ml コアサンプル

写真 3-4 土壌特性測定状況

表 3-5 土壌特性測定結果

		体積含水率		熱伝導率	比重
		センサー	絶乾法	[W/mK]	[kg/m ³]
水耕ハウス	中央部	11.1%	16.5%	0.37	1.18
	端部	15.7%	20.8%	0.41	1.12
土耕ハウス	乾燥部	4.7%	4.3%	0.28	1.05
	湿潤部	50.4%	46.7%	0.89	1.42

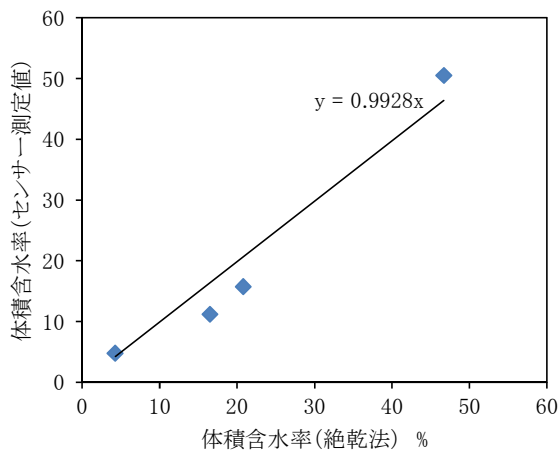


図 3-7 含水率測定値の検証

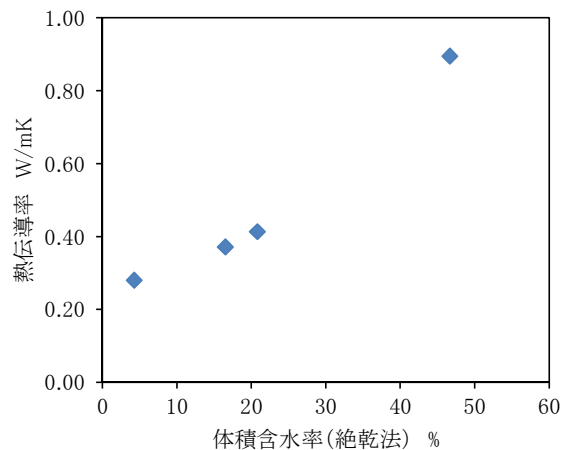


図 3-8 含水率と熱伝導率の関係

(5) シミュレーションモデルの構築

1) 計算式

シミュレーションモデル構築の基本的な方針は以下のとおりとする。

- ・任意の時間間隔で経時的に値の変化を求めることができる非定常計算モデルとする。
- ・熱容量による放熱・蓄熱や、水分による熱移動についてもモデル化を行う。
- ・単棟、連棟など各種温室の形状に対応できるものとする。
- ・設定温度、暖冷房の有無、通風有無、強制換気の有無が任意で設定できるものとする。
- ・カーテン、換気有効開口面積などの外皮条件が任意に設定できるものとする。
- ・各部位の温度、暖冷房負荷（暖冷房を行う場合）、各部位の熱流が出力できるものとする。
- ・複雑な計算となる部分は、近似的な取扱いによる簡略化を検討する。

以上の方針を踏まえ、計算モデルを図 3-9 のように設定する。まず温室の内部を、カーテンの内部と外部の 2 つの空間に分けて扱うこととし、それぞれの空間内の気温は一様であると仮定し、両空間における熱収支式を立てる。

例として、カーテンが開放されている場合を考えると、熱平衡式は次のようになる。

$$\sum UA_{oi}(\theta_i - \theta_{SAT}) + c_a \gamma_a Q_{oi}(\theta_i - \theta_o) + \frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau}(\theta_i - \theta_i^{p-1}) + \alpha_{si}(\theta_i - \theta_{si}^{p-1}) - \sum H_i - S_{gst} - l(E_i + C_{condi}) = 0 \quad (3-10)$$

θ_i : 室温[°C]	V_i : ハウス内の気積[m ³]
θ_{SAT} : 相当外気温度[°C]	C_{Fi} : ハウス内の資材などの熱容量[J/K]
θ_o : 外気温[°C]	τ : 計算間隔[s]
θ_{si} : 地表面温度[°C]	α_{si} : 地表面の総合熱伝達率
$\sum UA_{oi}$: 外張り被覆の単位温度差あたり熱損失量[W/K]	H_i : 室内発生熱[W]
c_a : 湿り空気比熱[J/kgK]	S_{gsti} : 日射取得熱[W]
γ_a : 空気の比重量[kg/m ³]	lE_i : 潜熱負荷[W]
Q_{oi} : 外気の流入量[m ³ /s]	laC_{ondi} : 被覆表面結露による凝縮熱のうち室内側に放熱される分[W]

添え字の p-1 は 1 ステップ前の数値を示す。

なお、詳細な計算方法は付録に示す。

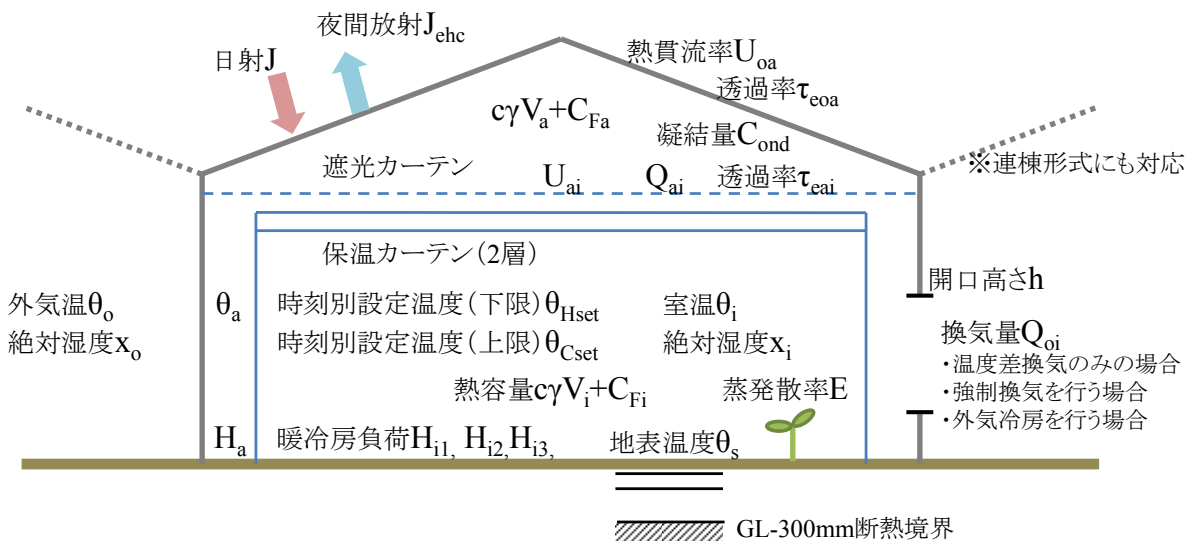


図 3-9 計算モデル

被覆については、実態として長波放射透過率の小さい農 PO や農業用フッ素樹脂フィルムが主に使用されていることから、簡略化のため長波放射透過を想定せず、相当外気温度（夜間放射（実効放射）の影響を考慮した外気温度）を用いて貫流熱損失を求める。夜間放射量は、日本建築学会の拡張アメダス気象データに収録されている気温と大気放射量のデータから算出することを想定している。室内側は、本来、空気温度と被覆温度を考慮した環境温度を用いるべきであるが、簡略化のため相当外気温度と空気温度の差を、貫流熱損失を求める際の内外温度差とする。被覆の熱貫流率は、JISR3107「板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法」を参考に求める。施設園芸・植物工場ハンドブックに掲載されている各種被覆資材の熱貫流率も参考となるが、内外の空気温度差を基準としており、夜間放射の影響が熱貫流率に反映されている場合があることと、外部風速の扱いが不明確なものがあることに留意が必要である。

カーテンは、保温カーテンと遮光カーテンを想定し、保温カーテンは一部 2 層の設定も可能としている。

換気は、まず温度差換気として任意の内外温度差のときの換気回数を設定し、温度差の平方根に比例するものとする。ハウス内が設定温度の上限を超える場合は、窓開放による通風を可能とし、設定温度の上限値になるよう、開口面積を調整する。開口面積が上限に達してさらに取得熱が増えると、ハウス内が設定温度の上限を超える。なお、機械換気や、冷房の設定も可能としている。

地表伝熱は、地表面下 300mm までを 3 層に分割し、各領域で蓄熱量と温度変化に要する熱量に関する熱平衡式を立てることにより求める。地表面下 300mm 以深は断熱境界とし、地盤は蓄熱要素としてのみ考慮する。

暖房負荷は、複数の供給形態を想定し、カーテン外側に 1 種類、カーテン内側に 2 種類の暖房負荷を設定できるようにしている。冷房負荷は、カーテン内側にのみ 1 種類設定している。

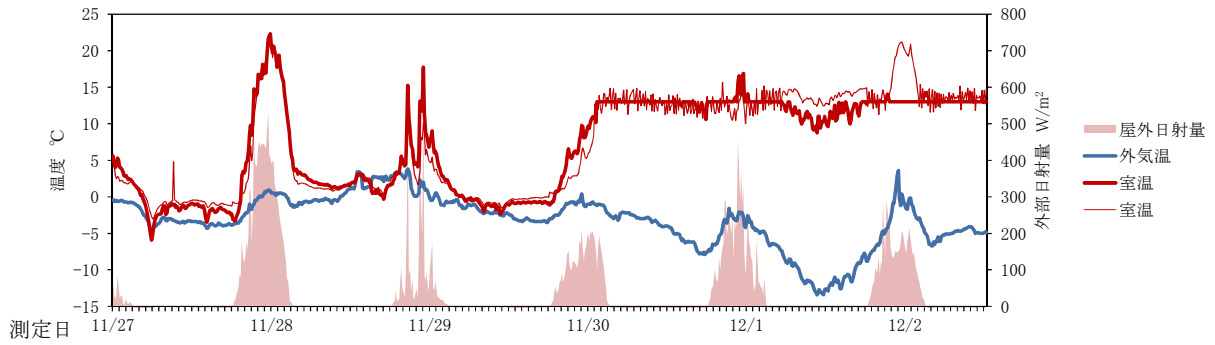
日射は、保温、遮光カーテンの透過率、地中への配分を設定できるようにし、カーテンの内外空間および地表面に割り振って与える。

湿度計算を行うかどうかは選択式とし、行う場合は蒸発散量が湿度に反映される。結露部位は簡略化のため、外側被覆か内側被覆どちらかを指定することとしている。指定したほうの被覆内面温度により、結露による凝縮熱を算出し、内外の総合熱伝達率の比により室内側に配分される凝縮熱を求める。

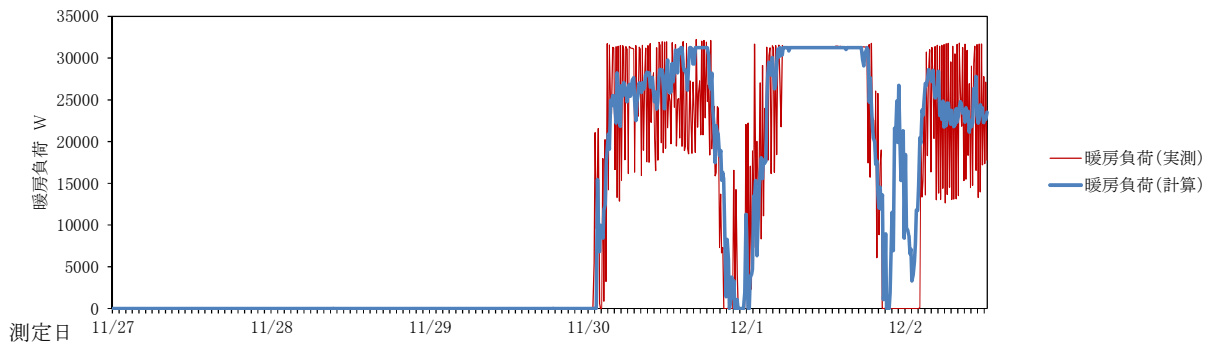
2) 実測データとの比較検証

シミュレーションの妥当性を検証するため、実測データとシミュレーションによる計算値との比較を行う。図 3-10、図 3-11 は既往研究における実測値と、本研究で構築したシミュレーションによる計算値との比較である。相当外気温度、外部日射量、被覆の日射透過率、温度差換気量は実測に基づく値を入力した。土壌特性は、本報告書 3（4）の測定を参考に、熱伝導率 0.4W/mK、比重量 1,200kg/m³とした。内部日射取得の地中への配分は、本報告書 3（3）の測定を参考に、50%とした。暖房時の設定温度は 13℃一定とした。無栽植ハウスのため、蒸発散の影響は少ないと考え、湿度計算は行わない設定とした。室温、暖房負荷とも実測結果をよく再現できている。

図 3-12 には地表温度の実測値とシミュレーションによる計算値との比較を示す。ハウスは一重で、室温と室内日射量に実測値を入力して、地表および地中温度を計算した。土壌特性と内部日射取得の地中への配分は前記と同じである。シミュレーションは地表面下 300mm を断熱境界としており、地中温度にやや実測値とのずれが見られるが、地表温度については実測結果をよく再現できている。

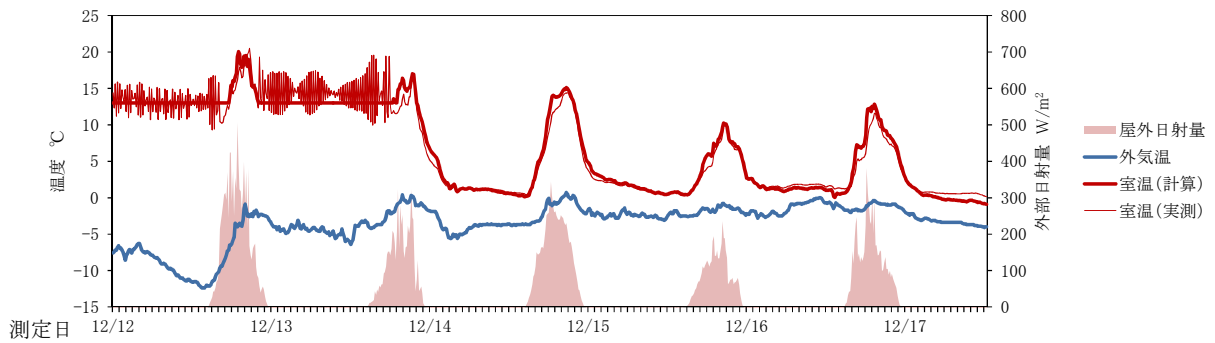


(a) 室温

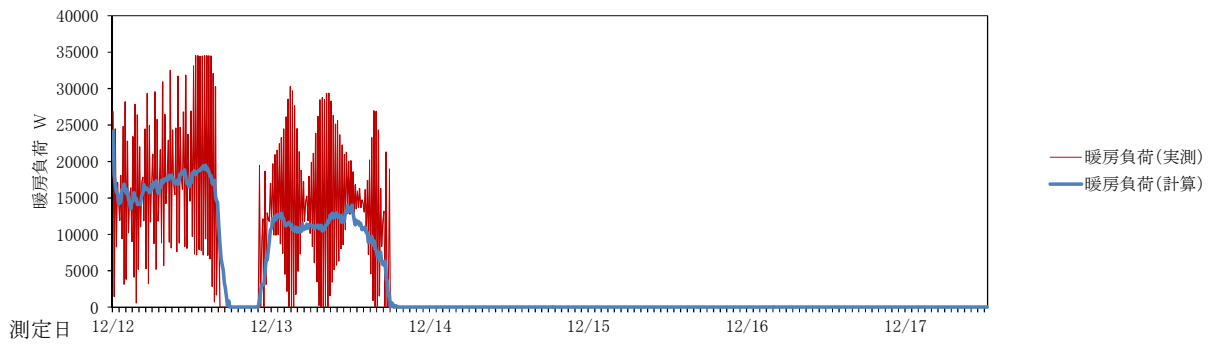


(b) 暖房負荷

図 3-10 一重ハウスにおける室温、暖房負荷の計算値の検証



(a) 室温



(b) 暖房負荷

図 3-11 空気膜+カーテン1層ハウスにおける室温、暖房負荷の計算値の検証

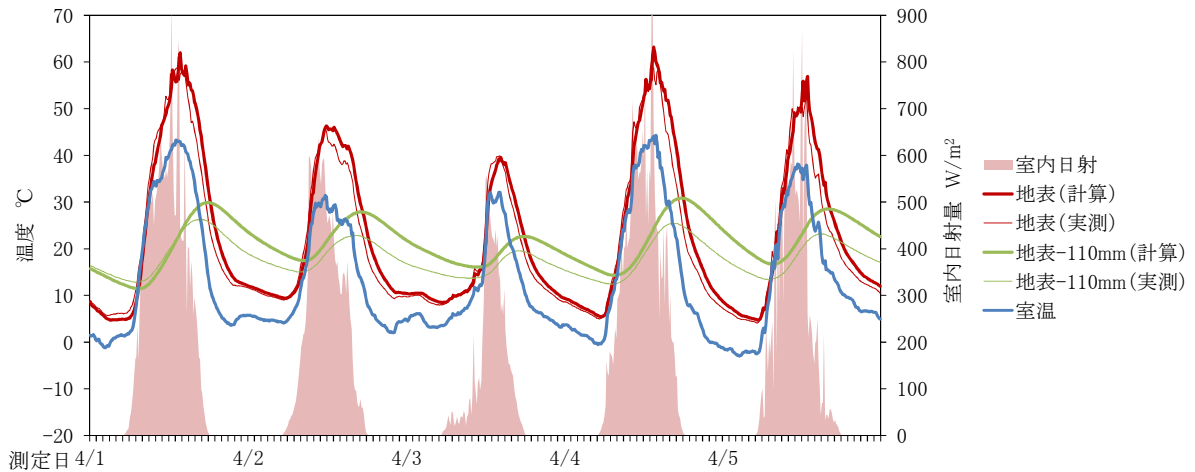


図 3-12 地表温度の計算値の検証

3) シミュレーションによる試算例

図 3-13 は、単棟ハウスを想定したシミュレーションの例である。なお、ここでは湿度計算を行っている。蒸発散量は文献 9) を参考に、次のように設定した。

- ・昼間：温室内日射量のうち 35% が蒸発散の潜熱にあてられる
- ・夜間：飽差 5mmHg のとき $3.8 \times 10^{-6} \text{kg/m}^2\text{s}$ として飽差に比例とする

暖房を行う場合、夜間は暖房により設定温度 12°C に維持される。日の出と同時に、保温カーテン 2 層のうち 1 層が空き、一瞬暖房負荷がわずかに増えるが、日射熱取得により 7 時ごろまでに暖房負荷は 0 となる。カーテン外部の温度が保温カーテン開放の設定温度 (10°C) に達した時点で、保温カーテンがすべて開放され、ほぼ同時に暖房設定温度が 12°C から 18°C に移行するため、再び暖房負荷が発生する。その後、さらに日射熱取得が増えると、室温は暖房設定温度を超えて成り行きで上昇し、上限の設定室温 (25°C) に達すると、側窓を開放し室温を 25°C に調整する。この日は外気温が低く、側窓は全開に至らないため、室温が 25°C を超えることはない。日没とともに保温カーテンが閉じ、当日 22 時頃までは地表からの放熱により室温が暖房設定室温以上に維持されるため、暖房負荷は生じていない。

暖房を行わない場合は、夜間の室温が成り行きとなり、朝方に室温が約 5°C まで低下している。その後、日射取得により室温が上昇し、9 時以降は暖房を行う場合とほぼ同じ推移をたどっている。

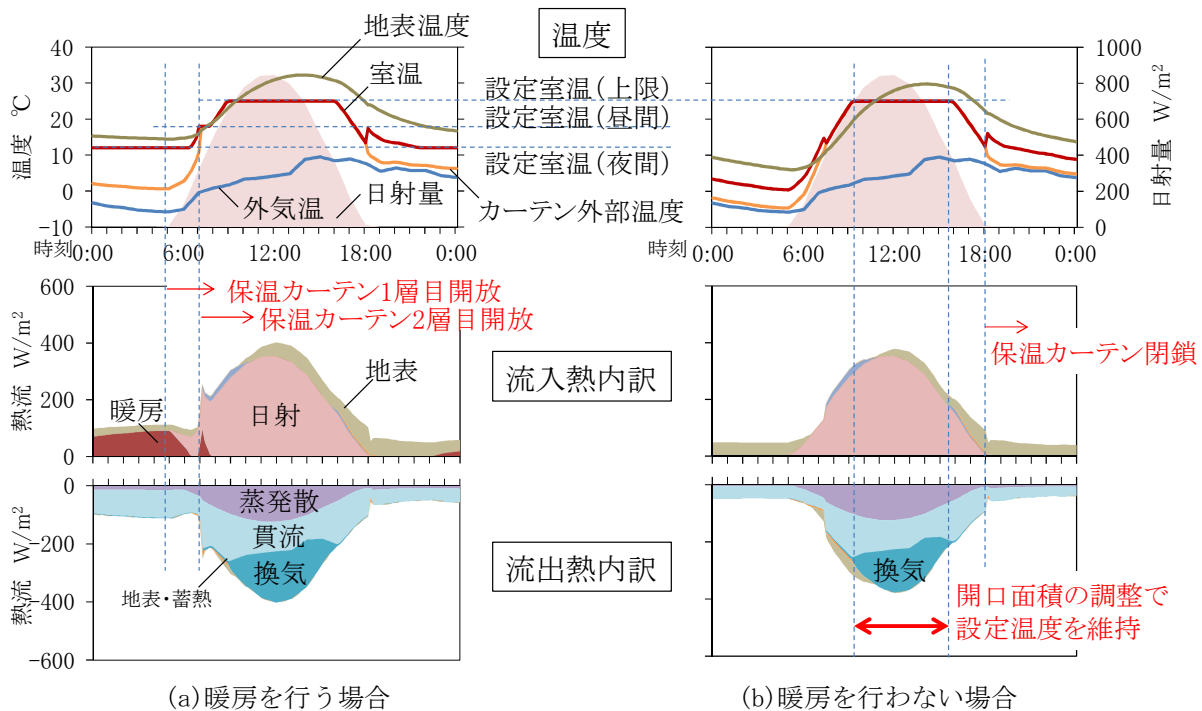


図 3-13 シミュレーションによる試算例（熱流は床面積当たり）

4) シミュレーションにおける課題

今回構築したシミュレーション手法では、簡略化や検証データの不足のため、以下の事項に対応していないので、今後の課題として記しておく。

- ・外部風速による、換気量、被覆貫流熱量の影響を考慮していない。
- ・被覆貫流熱計算の際、室内側温度は空気温度と表面温度を考慮した環境温度とすべきところ、空気温度で計算している。
- ・被覆材の長波放射透過と結露により透過性能の変化は考慮していない。
- ・地盤は蓄熱要素としてのみ考慮しており、地盤を介した外界との熱移動は考慮していない。
- ・土壌の凍結は想定せず、地表温度は 0°C を下回らない設定としている。
- ・蒸発散、被覆における凝縮については、モデル化を行ったものの、実測データとの比較検証を行っていない。
- ・ハウス内は温湿度環境が一様と仮定し、温湿度のむらを考慮していない。

[参考文献]

- 1) 三原義秋編著：温室設計の基礎と実際，養賢堂，1980.5
- 2) 日本施設園芸協会：施設園芸・植物工場ハンドブック，農山漁村文化協会，2015.5
- 3) 堀江悟郎，荒谷登，本間宏，横平昭：木造住宅の自然温度，基礎断熱構造の仕様調査，日本建築学会論文報告集号外，p. 421，1966.10
- 4) 林 真紀夫・古在豊樹・岡田益己：園芸環境工学における最近の話題（10）暖冷房負荷の算定法(1)－暖房負荷の算定法－，農業および園芸，第61巻11号，pp.1342-1348，1986-11
- 5) わが国各地における各種温室の暖房燃料消費量の試算ツール，農研機構野菜茶業研究所，<http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/vegetea/2007/vegetea07-02.html>
- 6) 林真紀夫，大原基広，清水美智，山元隆義：温室用被覆資材の熱貫流率測定装置の開発，農業施設，Vol.41(4)，pp.163-169，2011.3
- 7) 有賀広志，小田康一，西村安代，福元康文：熱伝導率測定装置を用いた簡便な農業用被覆資材の断熱性評価方法の検討，植物環境工学，Vol.27(1)，pp.14-23，2015
- 8) 岡田益己：放射率計によるプラスチックフィルムの長波放射特性の測定，農業気象，Vol.39(1)，pp.31-34，1983
- 9) 古在豊樹，林真紀夫，鈴木等，渡部一郎：温室水耕栽培キュウリの蒸発散量と環境要因の関係，農業気象，38(2)，pp.153-159，1982

4. 温室の構造安全性確保のための検討

(1) 温室の構造に関する基準類と運用

本報告書 1. で概説したように、ハウスの安全性に係る任意の基準として、一般社団法人施設園芸協会により「園芸用施設安全構造基準」が策定されている（現行は平成 28 年改訂版）。本基準は、園芸用施設は人の生命、健康、財産の保護を目的とする建築基準法よりは求められる安全性のレベルは低いという認識のもと、地域ごとの自然条件に見合った強度を持ち、安全で、かつ投資効率の高い施設を導入するために策定されたものである¹⁾。また、パイプハウスについては「地中押し込み式パイプハウス安全構造指針」が策定されている。

これらの基準を要約すると、単棟のパイプハウスの積雪荷重の考え方は次のようになる。

①被覆材を除去した骨組……多雪区域では 300N/m² 以上で設計する。

被覆材がある場合

②次の条件を満足する場合……基準積雪荷重（最大積雪深に基づく）を屋根勾配に応じて低減できる。

- ・ガラスハウスまたは滑雪を妨げない留め方の硬質プラスチック板・硬質プラスチックフィルムで被覆したハウス
- ・常時栽培、加温されているハウス

③次の条件を満足する場合……新積雪重量（1 日に降り積もる雪の重量、ただし最大 800N/m²）としてよい。

- ・軒下の除雪を完全に行う
- ・被覆材の整備点検を十分行う
- ・降雪時には窓を閉じ、外気が内部に侵入しないようにする。

④さらに、③の条件を満たし、加温施設で屋根付近の温度が 4℃以上、屋根勾配が 20 度以上、被覆材がガラス、硬質プラスチック板・硬質プラスチックフィルムもしくは軟質プラスチックフィルムで滑落阻害要因がないハウス

……積雪荷重が 300N/m² を超える場合であっても 300N/m² まで低減してよい。

道内で積雪時に被覆を行うハウスは、多くが③の条件に該当すると思われる。「新積雪重量」は、園芸用施設安全構造基準の付表として、道内 23 地点の値が、再現期間別（15、22、30、43、57 年）に掲載されており、パイプハウスの場合、再現期間 15 年（標準耐用年数 10 年、安全度 50%）の値を使うこととされている。

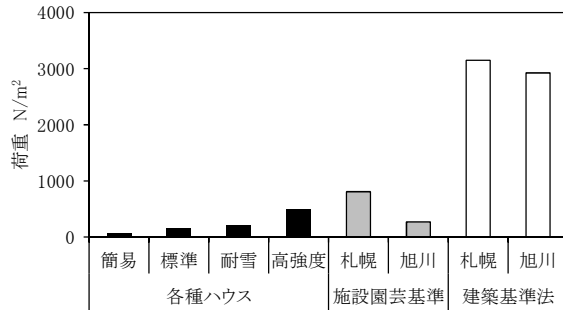
風速も同様に、付表に設計用風速が掲載されており、パイプハウスの場合、再現期間 15 年の値を採用する。速度圧 q (N/m²) は、次式で求める。

$$q=0.16V^2h^{1/2} \quad (4-1)$$

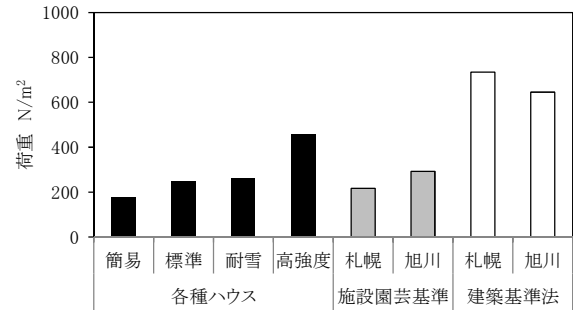
V：設計用風速(m/s)

h：施設の軒部（肩部）の地表面からの高さまたは棟部高さの 1/2 の高さの大きな方の値(m)

代表的なパイプハウスの耐荷重と、園芸用施設安全構造基準および建築基準法による積雪荷重と風の速度圧の比較を図 4-1 に示す。園芸用施設安全構造基準の積雪荷重は、パイプハウスでは 1 日以内に落雪することを前提として日最大積雪量に基づくため、最大積雪深に基づく建築基準法の荷重設定と比べて著しく小さい。しかも、実際のパイプハウスは日最大積雪量に対する耐力も有していない場合が多い。一方、風に対しては、標準的な仕様のハウスであっても、建築物の場合に建築基準法で要求される耐力には満たないものの、園芸用施設安全構造基準の速度圧に相当する耐力を有するものもある。



(a) 積雪荷重



(b) 風圧力

各種ハウスの耐荷重は以下の仕様を想定し、メーカー資料²⁾により求めた。

簡易：間口 6.3m、パイプ径 25mm、ピッチ 600mm

標準：間口 6.3m、パイプ径 28mm、ピッチ 600mm

耐雪：間口 6.3m、A 社トラスハウスの一例

高強度：A 社八角ハウスの一例

施設園芸基準の積雪荷重は新積雪重量に基づく。建築基準法の積雪荷重は屋根勾配を 30° で低減後の値。風荷重の基準値は風圧係数を乗じる前の速度圧で表示。速度圧は、ハウス軒高 2m、棟高 4m とし、建設地は都市計画区域外で計算。

図 4-1 ハウスの耐荷重と構造基準の比較

(2) 各地域の積雪の実態とハウス強度の検証

北海道内で使用されている農業用ハウスのうち、地中押し込み式パイプハウスの普及実態と、その強度について検討を行うことを目的とする。

1) 道内で普及する地中押し込み式パイプハウスの概要

北海道で普及する地中押し込み式パイプハウスの概要を把握するため、パイプハウスメーカーにヒアリングを行い、代表的なパイプハウスの仕様を把握した。

農業用資材メーカーが道内で取り扱う標準的なアーチパイプの一覧を表 4-1 に示す。このうち農業用のパイプハウスで用いられるものは、網掛け部分で示したパイプ径がφ25.4～φ31.8mm のものが主である。パイプハウスの間口によって、アーチパイプの長さは変化するが、5.4～7.2mの間口に対応するものが多い。

次に、各地域の代表的なパイプハウス仕様の例を表 4-2 に示す。表中のフィルム展張時期で示すように、ハウスは通年利用するケースは少なく、3月以降に被覆展張するケースが多い。各仕様の耐雪性を、メーカー資料³⁾の類似仕様から抽出すると、表中左欄の参考で示したとおり、耐雪性は9～16kgf/m²程度であり、新雪で単位積雪重量100kgf/m³とすると、9～16cm程度の耐雪性となる。

なお、既存の水稻育苗ハウスなどでは、パイプ径19.1mm、22.2mmのハウスも存在している。

表 4-1 パイプハウスメーカーが取り扱う標準的なアーチパイプ規格

主な用途	間口 (m)	埋め込み深さ (mm)	肩高 (mm)	軒高 (mm)	アーチパイプ規格 (φ×t×L)	型名 (ホクレン)	型名 (越浦パイプ)	型名 (渡辺パイプ)
育苗ハウス 家庭菜園	4.5	300	1100	2215	19.1×1.2×3900	25型	25-A	K-15
					19.1×1.2×3900	25-B型	25-B	K-15
					19.1×1.2×3900	25-C型	25-C	K-15
育苗ハウス 家庭菜園	5.4	300	1200	2300	22.2×1.2×4250	30-B-42型	30-B	A-26
					25.4×1.2×4250	30型	30-C	B-35
					22.2×1.2×4600	30-B-46型	30-L	K-18
育苗ハウス 家庭菜園	5.4	400	1050	2550	25.4×1.2×4600	30-C-46型	30-M	B-36
育苗ハウス 栽培ハウス	5.4	400	1400	2830	25.4×1.2×4900	30-H型	30-H	B-37
栽培ハウス	5.4～6	400	1350	2950	25.4×1.2×5100	B-38型	30-G	B-38
栽培ハウス	6	500	1520	3310	25.4×1.2×5500	B-39型	35-C	B-39
					28.6×1.6×5500	35型	35-D	C-38
					31.8×1.6×5500	D-48型	35-E	D-48
栽培ハウス (越冬用)	7.2	500	1500	3420	28.6×1.6×6000	C-39型	40-D	C-39
					31.8×1.6×6000	40型	40-E	D-49
栽培ハウス (越冬用)	7.2	500	1800	3890	31.8×1.6×6500	D-51型	45-E	D-51
栽培ハウス (越冬用)	8.1	500	2000	4200	31.8×1.6×7000	D-52型	50-E	D-52
倉庫用 多目的ハウス	8.5	500	2200	4400	31.8×1.6×7500			
倉庫用 多目的ハウス	9	500	2400	4700	42.7×2.3×8000			H-80
倉庫用 多目的ハウス	9	500	2900	5200	42.7×2.3×8500			
倉庫用 多目的ハウス	10	500	2350	4850	42.7×2.3×8500			

表 4-2 道内の代表的なパイプハウス仕様

地域	主たる生産地	生産物	フィルム展張時期	間口(m)	ハウス長さ(m)	パイプ間隔(mm)	埋め込み深さ(mm)	肩高(mm)	軒高(mm)	アーチパイプ規格(φ×t×L)	参考(カタログ値*1)仕様、耐雪荷重	備考
渡島	函館近郊(北斗市、七飯町)	葉物(ほうれん草等) トマト・きゅうり	2月下旬～11月	5.4	50	500	400	1350	3000	25.4×1.2×4900	UK-18(φ25.4)@500 13kg/m ²	
								1550	3200	25.4×1.2×5100		
胆振	知内町	ニラ	11月～翌10月	5.4	50	500～600	400	1350	3000	25.4×1.2×4900	UK-24(φ31.8)@500 16kg/m ²	
								1550	3200	25.4×1.2×5100		
後志	伊達市	葉物・トマト	通年	7.2	50	500	500	1800	3890	31.8×1.6×6500	UK-24(φ31.8)@500 16kg/m ²	
空知	共和町	スイカ・メロン	3月～10月	6	100	700	500	1400	2700	27.2×1.6×6500(天上) 27.2×1.6×1900(肩下)	UK-18(φ25.4)@500 13kg/m ²	
日高	夕張市	メロン	2月下旬～9月	5.4	100	600	400	1350	2750	25.4×1.2×4900	UK-18(φ25.4)@500 13kg/m ²	
								1350	2750	25.4×1.6×4900		
上川	平取町	トマト	2月下旬～10月	7.5	50～80	600	500	1600	3450	31.8×1.6×6300	UK-20(φ25.4)@500 9kg	
上川	富良野市	スイカ・メロン	2月下旬～10月	6	100	600	400	1350	2900	25.4×1.2×5100	UK-20(φ25.4)@500 9kg	
								1500	3300	25.4×1.2×5500		
上川	旭川市	葉物・トマト	2月下旬～10月	6	50	500	400	1350	2900	25.4×1.2×5100	UK-20(φ25.4)@500 9kg	
								1500	3300	25.4×1.2×5500		
空知・上川	水稲育苗		3月～5月	5.4	50	600	300	1200	2300	22.2×1.2×4250	UK-18(φ22.2)@500 8kg/m ²	旧来品
空知・上川	水稲育苗		3月～5月	6	50	600	400	1050	2550	25.4×1.2×4600	UK-18(φ25.4)@500 13kg/m ²	旧来品
空知	玉ねぎ育苗		12月～5月	7.2	100	500	500	1500	3300	25.4×1.2×5100	UK-20(φ25.4)@500 9kg/m ²	現行
空知	玉ねぎ育苗		12月～5月	7.2	100	500	500	1500	3420	31.8×1.6×6000	UK-24(φ31.8)@500 16kg	
								1800	3890	31.8×1.6×6500		
十勝	ピート育苗		3月～5月	5.4	18～36	600	400	1050	2550	22.2×1.2×4250	UK-18(φ22.2)@500 8kg/m ²	旧来品
十勝	ピート育苗		3月～5月	5.4	18～36	600	400	1350	2750	25.4×1.2×4600	UK-18(φ25.4)@500 13kg/m ²	旧来品
十勝	ピート育苗		3月～5月	7.2	18～36	600	500	1800	3890	31.8×1.6×6500	UK-24(φ31.8)@500 16kg	現行

*1 グリーンハウス総合カタログ2016(渡辺パイプ株式会社)

2) 地中押し込み式パイプハウスに求められる諸強度について

昭和 59 年豪雪による被害を契機として、「地中押し込み式パイプハウス安全構造指針」が策定された。同指針に記載されているパイプハウスの設計諸条件を表 4-3 に示す。表のように、一般に用いられるパイプハウスは、耐用年数が 5～10 年、許容される積雪深は 20～25cm（耐雪性：20～25kgf/m²）と想定されている。20～25cm の積雪深は、北海道の最深積雪深からみると、1/4～1/5 程度の値であるが、ハウスに展張されるフィルムの形状や強度などから、許容される強度が積雪深 20cm 程度であり、パイプ部分に求める強度も同程度に設定されているのが現状となっている。

先の表 4-3 で示したとおり、道内で普及しているパイプハウスの耐雪性は、9～16kgf/m² のものが多い。このため、ハウス周囲の除雪や雪下ろしのほか、ハウスの合掌部分に支柱を建てて、荷重増加によるパイプの変形を抑制する補強を行うことも行われており、表 4-4 中の上欄で示すように、指針では、φ80mm 以上の針葉樹丸太を 3m 間隔で設置することで、耐積雪性を 25cm（25kgf/m²）まで向上させることができるとされる。同様の措置は、ホクレンのパイプハウス補強マニュアルにも記載されている。

一方、ハウス周りの除雪を常時行っていれば、屋根上の雪は比較的短時間で落雪すると言われているが、雪質などにより、雪下ろしが必要になる場合もある。労力などの軽減を考えた場合、ハウス倒壊の危険を防止する雪下ろしなどの措置が必要となる回数が最大どの程度なのかに関心の一つになる。

表 4-3 押し込み式パイプハウス安全構造指針で想定されている条件（積雪地域）

耐用年数	5～10年程度
許容される積雪深	20～25cm（単位積雪重量100kg/m ² ）
強風対応	上記積雪深で設計されている場合は、風速が特に大きい地域を除いては特段の対策は不要
許容される変形の限度	棟のたわみ ≤ L / 60 （間口L=6mでは100mm）
	柱の倒れ ≤ h / 35 （肩高h=1.55mでは44mm）

表 4-4 押し込み式パイプハウスの主な耐雪補強手法

資料名	想定する積雪深	支柱間隔	使用する支柱材料	支柱高さ
地中押し込み式パイプハウス安全構造指針	25cm	3m	針葉樹2類丸太 φ80mm	3m
パイプハウス補強マニュアル ホクレン 施設資材部	-	1.5～1.8m	伸縮の専用支柱 鋼製パイプφ34mm程度	4m以下

3) 道内各地に設置される地中押し込み式パイプハウスの被害リスクについて

北海道内において、降雪の深さを観測している AMeDAS 地点の観測結果から、各地の地中押し込み式パイプハウスにおける積雪荷重の超過する回数を計算した。具体的には、一日の降雪の深さが増加してハウスの耐雪荷重 kgf/m² を超えた日が生じた場合を 1 回と定義し、対象期間のリスク回数を算出した。単位積雪重量は、ハウスの屋根上に積もる雪の重さに影響を及ぼすが、その値は、新雪に近い 100kgf/m² と設定した。降雪の深さは、2004～2014 年の 10 年間の観測データを使用し、多くのパイプハウスでフィルムを展張する 3 月の 1 か月を対象に分析した。

3 月におけるパイプハウスの耐雪荷重別のリスク回数の算出結果を表 4-5 に示す。表中に示す空知地方の深川を例にみると、耐雪荷重が 10kgf/m² の農業用ハウスでは 10 年間の平均で、ハウスの屋根雪を落とす措置をしなければハウスの骨組みが被害を受ける可能性が 3.8 回生じることになる。同様に、

耐雪荷重 25kgf/m^2 のハウスでは 0.5 回となっている。表 4-2 で示したとおり、空知地方に多い水稻育苗ハウスの耐雪重量は 9kgf/m^2 程度なので、ハウスのフィルムを 3 月に展張したとすれば、週に一回（約 4 回）ほど降雪によるハウス被害のリスクが発生し、それに対応する形で、ハウス外周の除雪や場合によっては雪下ろしが必要になる。もし合掌部分に補強の支柱を取り付けるとすれば、耐雪重量を 25kgf/m^2 として、リスクが生じる回数を $1/4$ （0.5 回 \Rightarrow 1 回）程度にまで軽減できることとなる。

農業用ハウスの耐積雪性を向上させる方法として、支柱設置のほかに、アーチパイプの径を太くする手法がある。メーカーのカタログから抽出した標準的な農業用ハウスの耐雪性表示一覧を表 4-6 に示す。表のように、間口が 6.3m で $\phi 25.4\text{mm}$ のパイプを使用するパイプ間隔が 500mm の農業用ハウスでは、耐雪性が 7kgf/m^2 であるが、パイプを $\phi 31.8\text{mm}$ に変更すると耐雪性が 3 倍（ 22kgf/m^2 ）になる。

無被覆のパイプハウスにおける、雪の沈降力によるハウス被害の例であるが、道農政部の調査⁴⁾によれば、パイプ径 19.1mm のハウスでアーチパイプが倒壊に至る事例でも、パイプ径 25.4mm のハウスでは、アーチパイプのゆがみに留まるなど、被害が少なかったことが報告されている。

表 4-6 には、パイプの設置間隔を変化させた例も示した。先に示した間口が 6.3m、 $\phi 25.4\text{mm}$ のアーチパイプを使用したパイプハウスの場合、パイプ間隔を 500mm から 450mm へと 50mm 小さくすることで、耐雪性が 7kgf/m^2 から 16kgf/m^2 へと強度が 2.3 倍ほど増加する。パイプの間隔は、通常のハウスで 600mm 間隔、越冬用で 500mm 間隔とする場合が多いと言われるが、パイプ径とともに、ハウスの強度に及ぼす影響は大きいので、慎重な選択が必要である。

表 4-5 道内各地に設置される農業用パイプハウスの耐雪性別リスク回数（3月に展張の場合）

地方名	現行の参考耐雪荷重	気象観測点	耐雪荷重 (kgf/m ²)						
			10	13	15	20	22	25	30
宗谷	-	稚内	1.8	1.0	0.8	0.5	0.5	0.4	0.3
		北見枝幸	3.5	2.4	1.4	0.6	0.5	0.4	0.1
		歌登	4.8	3.2	2.5	1.4	1.2	0.9	0.5
		中頓別	5.5	3.1	2.4	1.5	1.3	0.8	0.7
		豊富	2.6	1.5	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1
		沼川	3.3	1.8	0.9	0.4	0.4	0.2	0.1
		浜鬼志別	3.1	2.0	1.7	0.8	0.7	0.5	0.1
上川	9~13 (kg/m ²)	美深	4.1	2.2	1.7	0.5	0.5	0.3	0.1
		名寄	3.4	2.3	1.4	0.5	0.5	0.2	0.0
		下川	4.7	3.0	2.0	0.8	0.5	0.4	0.2
		上川	3.7	2.7	1.7	0.6	0.5	0.4	0.3
		旭川	2.5	1.4	1.0	0.4	0.4	0.1	0.1
		富良野	3.5	1.4	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0
		層雲峡	6.0	3.8	2.8	1.2	1.0	0.9	0.5
		美瑛	3.2	1.9	1.2	0.5	0.2	0.2	0.2
		和寒	3.2	1.7	1.1	0.4	0.3	0.3	0.2
		幾寅	3.2	2.0	1.2	0.5	0.5	0.2	0.2
		占冠	3.5	1.9	1.3	0.6	0.3	0.2	0.0
		音威子府	6.3	4.3	3.0	1.8	1.2	1.0	0.6
		幌加内	6.4	4.4	3.4	1.7	1.4	0.7	0.5
留萌	-	朱鞠内	7.2	4.8	4.2	1.8	1.5	1.0	0.4
		天塩	2.7	0.9	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0
		羽幌	1.8	0.9	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1
		留萌	2.5	1.1	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0
		古丹別	2.8	1.0	0.6	0.1	0.1	0.1	0.0
		初山別	2.4	1.1	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0
		幌糠	5.1	3.4	2.4	1.5	1.4	0.6	0.3
石狩	-	新篠津	3.6	1.7	0.8	0.1	0.1	0.1	0.0
		札幌	2.5	1.5	0.7	0.4	0.1	0.1	0.1
		小金湯	4.0	2.1	1.0	0.8	0.7	0.5	0.1
		恵庭島松	2.2	1.4	1.0	0.5	0.4	0.1	0.1
		石狩	2.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1
空知	9~16 (kg/m ²)	厚田	2.5	1.3	1.1	0.3	0.1	0.1	0.0
		深川	3.8	1.9	1.4	0.9	0.7	0.5	0.3
		滝川	4.5	2.5	1.3	0.4	0.4	0.3	0.2
		芦別	3.2	1.7	1.2	0.5	0.3	0.2	0.2
		美唄	2.2	1.1	1.0	0.6	0.5	0.4	0.2
		岩見沢	2.7	1.0	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0
		夕張	4.2	2.5	1.6	0.8	0.6	0.2	0.0
後志	15kg/m ²	余市	4.9	2.6	1.1	0.5	0.3	0.3	0.1
		小樽	3.3	1.7	1.1	0.5	0.5	0.3	0.0
		共和	2.0	1.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0
		蘭越	3.6	1.7	1.4	0.3	0.3	0.3	0.0
		倶知安	5.2	3.7	3.0	1.2	1.0	0.6	0.4
		寿都	1.9	1.3	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
		喜茂別	4.4	2.5	1.9	0.5	0.5	0.3	0.2
		黒松内	3.8	2.1	1.4	0.5	0.4	0.3	0.1
		赤井川	5.9	4.4	3.2	1.2	1.0	0.6	0.4
オホーツク 1	-	雄武	2.1	1.0	0.8	0.5	0.3	0.1	0.0
		紋別	2.4	1.6	1.5	0.5	0.3	0.3	0.2
		滝上	2.9	2.3	1.7	0.9	0.6	0.5	0.5
		遠軽	2.8	1.5	1.0	0.4	0.3	0.3	0.1
		佐呂間	2.9	1.9	1.3	0.5	0.4	0.2	0.1
		網走	1.8	1.3	0.9	0.5	0.4	0.3	0.1
		北見	1.8	1.3	0.6	0.5	0.5	0.1	0.1
		オホーツク 2	-	斜里	2.5	1.3	0.9	0.3	0.3
留辺蘂	2.4	1.3		1.3	0.4	0.2	0.1	0.0	
津別	1.7	0.7		0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	
宇登呂	3.8	2.4		1.6	1.0	0.6	0.5	0.3	
西興部	3.3	2.5		1.5	0.7	0.6	0.2	0.1	
白滝	3.1	1.9		1.2	0.8	0.7	0.2	0.1	
根室	3.0	2.2		1.6	0.9	0.0	0.2	0.2	
中標津	2.4	1.5		1.1	0.7	0.5	0.3	0.1	
釧路	-	別海	2.2	1.5	1.1	0.6	0.3	0.1	0.1
		根室	1.1	0.6	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1
		厚床	2.8	1.6	1.0	0.4	0.2	0.1	0.1
		川湯	2.1	1.3	0.7	0.5	0.3	0.3	0.3
		阿寒湖畔	3.0	2.0	1.2	0.5	0.5	0.4	0.3
		標茶	1.3	0.7	0.6	0.4	0.1	0.1	0.0
		中標別	2.5	1.4	1.0	0.5	0.4	0.2	0.0
		白糠	1.2	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0
		釧路	0.8	0.4	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
		鶴居	1.7	1.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.0
十勝	8~16 (kg/m ²)	太田	2.5	1.4	0.9	0.5	0.4	0.2	0.1
		陸別	1.7	1.1	0.7	0.3	0.2	0.0	0.0
		ぬかひら源泉郷	3.2	2.0	1.4	0.6	0.5	0.4	0.3
		上士幌	1.2	0.6	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1
		本別	0.5	0.4	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
		新得	2.5	1.5	1.0	0.5	0.5	0.3	0.3
		芽室	2.3	1.3	0.8	0.3	0.2	0.1	0.1
		帯広	1.4	0.5	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1
		浦幌	1.0	0.9	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0
		大樹	2.5	1.8	1.5	0.9	0.9	0.5	0.2
胆振	16kg/m ²	広尾	2.5	1.8	1.6	0.8	0.7	0.5	0.3
		上札内	2.9	2.2	1.8	0.8	0.8	0.5	0.4
		安平	1.5	0.7	0.6	0.5	0.3	0.1	0.0
		穂別	1.5	0.8	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0
		苦小牧	0.6	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
		大岸	2.3	1.2	0.8	0.3	0.3	0.0	0.2
		白老	0.8	0.5	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0
		登別	2.0	1.3	0.9	0.2	0.2	0.1	0.1
		室蘭	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.2	0.0
		大滝	3.9	2.4	2.1	0.9	0.5	0.2	0.1
日高	-	静内	0.6	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
		浦河	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
		日高	2.2	1.5	1.1	0.4	0.3	0.3	0.2
		目黒	2.5	1.8	1.4	0.9	0.8	0.6	0.5
		中札白	1.5	0.7	0.5	0.3	0.3	0.2	0.0
		旭	1.5	0.7	0.5	0.3	0.0	0.3	0.2
		渡島	13kg/m ²	長万部	3.3	1.2	0.7	0.2	0.2
八雲	2.6	1.5		1.0	0.3	0.2	0.2	0.1	
森	2.7	1.6		1.1	0.4	0.0	0.2	0.2	
大沼	2.6	1.2		0.7	0.2	0.1	0.1	0.1	
函館	1.5	0.9		0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	
千軒	4.7	2.6		1.9	0.8	0.5	0.3	0.1	
熊石	0.9	0.5		0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
檜山	-	今金	2.2	0.7	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
		江差	0.4	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
		鶉	2.2	1.5	0.7	0.5	0.1	0.1	0.0
全道	-	最大値	7.2	4.8	4.2	1.8	1.5	1.0	0.7
		最小値	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
		平均値	2.8	1.6	1.1	0.5	0.4	0.2	0.1

表 4-6 農業用パイプハウスの主な形式と耐雪性

呼称	間口 (m)	パイプ径×肉厚 (mm)	耐雪性(kg/m ²)		強度比 ①/②
			パイプ間隔		
			①450mm	②500mm	
UK-15	4.5	φ 19.1×1.2	13	11	1.2
UK-18	5.4	φ 22.2×1.2	16	8	2.0
		φ 25.4×1.2	21	13	1.6
UK20	6	φ 25.4×1.2	17	9	1.9
UK21	6.3	φ 25.4×1.2	16	7	2.3
		φ 31.8×1.6	24	22	1.1
UK24	7.2	φ 25.4×1.2	14	3	4.7
		φ 31.8×1.6	24	16	1.5

5) まとめ

道内で普及する農業用ハウスの実態を把握するとともに、その強度について検討を行った。その結果をまとめると、次のとおりである。

- ①道内で普及する農業用ハウス（地中押込み式パイプハウス）は、間口が 5.4～7.2m、パイプ径は φ 25.4mm～φ 31.8mm、パイプ間隔は 500mm～600mm のものが多い。
- ②耐雪性は 9～16kgf/m²（新雪で 9～16cm）程度のもので多いと推察される。
- ③トラスハウスなどを除き、一般のパイプハウスの強度は、積雪深で 20～25cm 程度が上限である。
- ④20～25cm の積雪に耐えられるハウスについては、風速が特に大きな地域を除いては、特段の構造上の風対策は不要と考えられている。
- ⑤既存の農業用ハウスは、耐雪性が 10kgf/m²以下であるものも多く、3月にフィルムを展張すると、1ヶ月のうちに数回程度の被害リスク（状況によっては雪下ろしが必要になる日）が発生する。
- ⑥耐雪性を 25kgf/m²にすると、多くの地域で、3月の被害リスクが 1回/月程度まで軽減できる。耐雪性を向上させる方法としては、パイプ径を太くする、パイプの設置間隔を密にする、支柱による補強を行うなどの方法がある。

[参考文献]

- 1) 築部孝：19年ぶりの改定のポイント，ニューカントリー，No. 755，pp. 13-15，2017. 2
- 2) ハウス丸わかり読本地域別価格早わかり編北海道地方 Vol. 3，渡辺パイプ株式会社，2013
- 3) グリーンハウス総合カタログらくちん大百科 2016，渡辺パイプ株式会社，2016
- 4) 北海道農政部食の安全推進局技術普及課：2012年冬のパイプハウス被害の状況と対策，2012. 10

5. 改善に向けた技術開発要素の提案

(1) 温熱環境の改善、省エネルギーについて

1) 規模による違い

温熱環境のシミュレーションモデルは、大規模な植物工場から単棟のパイプハウスまで、各種温室の解析に用いることができるよう構築した。そこでまず、規模の異なる温室を対象に、年間の暖房負荷計算を行い、傾向の違いを確認する。

図 5-1 に計算を行う温室の規模・形状を、表 5-1 に各種パラメータ設定を示す。

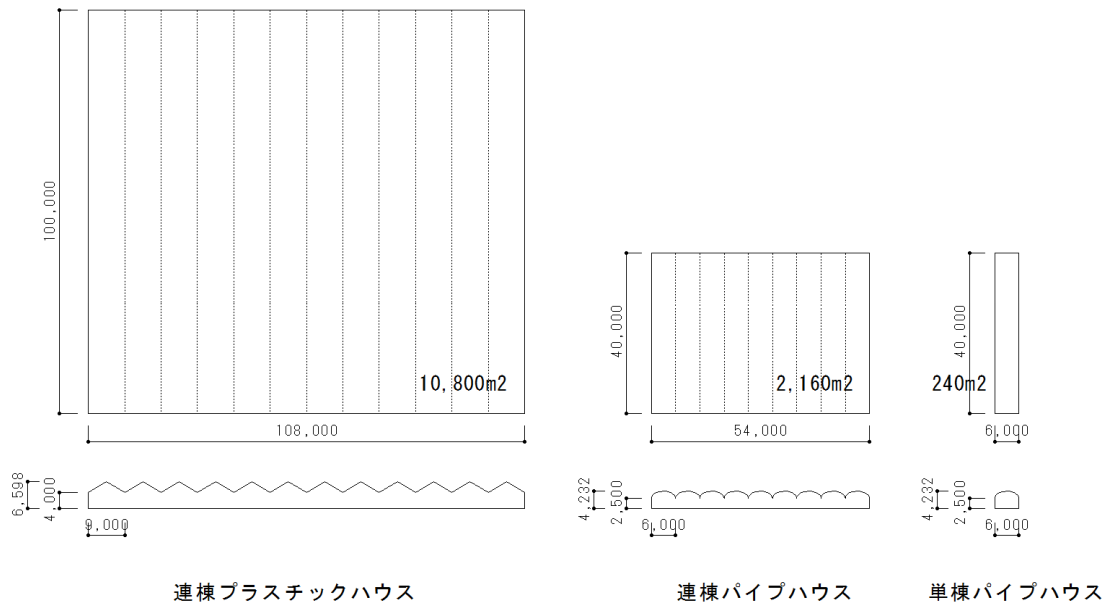


図 5-1 計算を行う温室の規模・形状

表 5-1 各種パラメータ設定

項目	連棟プラスチックハウス	連棟パイプハウス	単棟パイプハウス	
被覆	熱貫流率	外張り 6.0W/m²K 保温カーテン 4.5W/m²K		
	開閉条件	外気温<15℃かつ日射量<50W/m²のとき保温カーテン閉鎖 外気温>25℃かつ日射量>500W/m²のとき遮光カーテン閉鎖		
	温度差換気	外張り内外温度差 10K のとき 0.3 回/h カーテン内外温度差 10K のとき 0.5 回/h		
暖房設定室温	15℃			
気象データ	拡張アメダス気象データ 旭川標準年			
通風	通風開始条件	室温>25℃以上で側窓開放による通風開始		
	開口(最大開放時)	天窓あり 側窓高さ 1.5m	天窓なし 側窓高さ 1.5m	天窓なし 側窓高さ 1.5m
	開口上下中心間距離 (最大開放時)	5m	0.75m	0.75m
	流量係数	0.5(防虫ネット)		
日射透過率	外張り 0.6、保温カーテン 0.8、遮光カーテン 0.5			
日射の地中への配分	0.3			
蒸発散量	キュウリ水耕栽培を参考に昼間は日射量、夜間は飽差に比例とする			

図 5-2 に室温の計算結果、表 5-2 に暖房負荷の計算結果を示す。図 5-3 に示すように、同じ被覆の仕様であっても、単棟の場合は気積当たりの外皮面積が大きくなることから、床面積当たりの暖房負荷は大きくなる。したがって、暖房負荷の点では、連棟が有利と言うこともできるが、連棟とした場

合には屋根融雪のため通年暖房が前提となる。

また、連棟とした場合には、床面積当たりの通風開口面積が小さくなるため、夏季のオーバーヒートが問題となりやすい。図 5-4 に示すように、連棟の場合、窓を全開としても 30℃を超える時間が発生し、栽培品目によっては暑すぎる環境となる。その中でも連棟プラスチックハウスは天窓を設ける設定のため、天窓のない連棟パイプハウスと比べると、30℃を超える時間が短く抑えられている。連棟の場合は、天窓や細霧冷房など、冷却装置の必要性が単棟の場合より高いと言える。

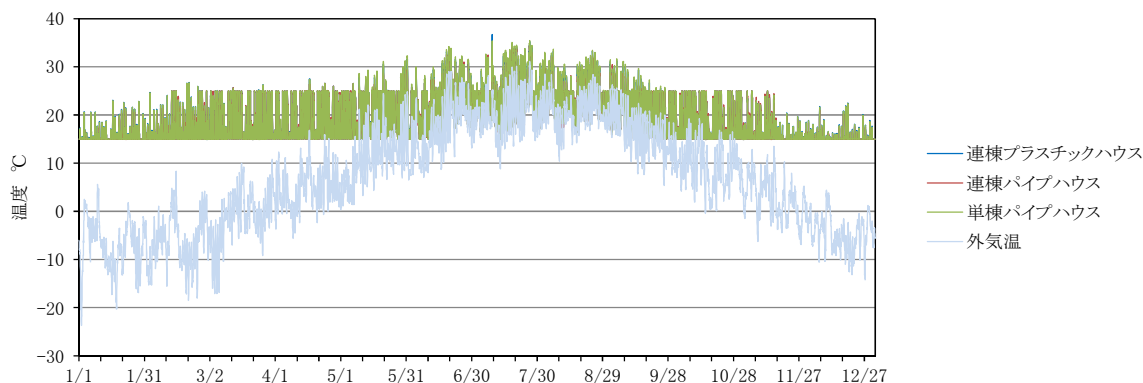


図 5-2 室温の計算結果

表 5-2 暖房負荷の計算結果（床面積当たり）

月	暖房負荷[MJ/m ² 月]			重油消費量[L/m ² 月]			重油代[円/m ² 月]		
	連棟プラスチックハウス	連棟パイプハウス	単棟パイプハウス	連棟プラスチックハウス	連棟パイプハウス	単棟パイプハウス	連棟プラスチックハウス	連棟パイプハウス	単棟パイプハウス
1	178	182	276	6.1	6.2	9.4	546	557	845
2	136	140	220	4.6	4.8	7.5	418	430	676
3	90	94	161	3.1	3.2	5.5	277	288	494
4	39	41	80	1.3	1.4	2.7	119	126	245
5	10	10	27	0.3	0.4	0.9	29	32	83
6	2	2	8	0.1	0.1	0.3	5	6	23
7	0	0	1	0.0	0.0	0.0	0	0	2
8	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	0	1
9	1	1	6	0.0	0.1	0.2	4	5	19
10	30	32	58	1.0	1.1	2.0	92	98	178
11	95	99	155	3.2	3.4	5.3	292	302	475
12	165	170	252	5.6	5.8	8.6	507	520	772
合計	747	771	1,243	25.4	26.3	42.4	2,288	2,365	3,812

計算条件 機器効率 0.8、A 重油発熱量 36.7MJ/L、A 重油単価 90 円/L

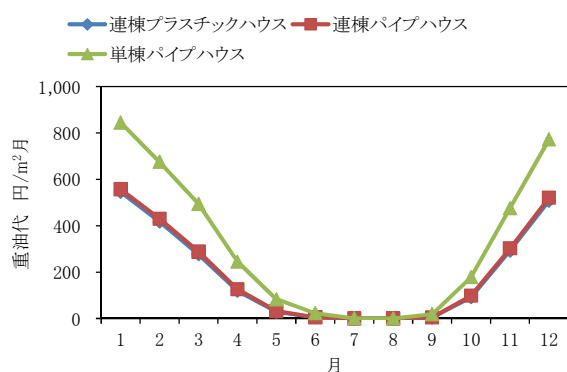


図 5-3 重油代の年変動

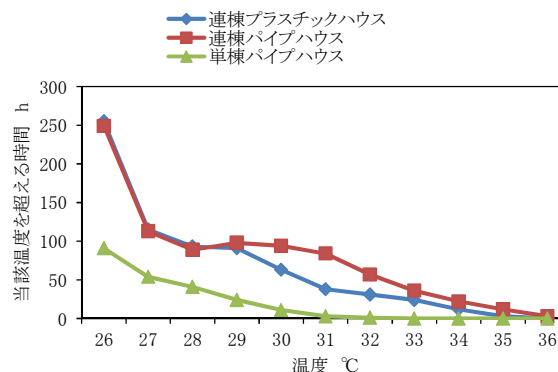


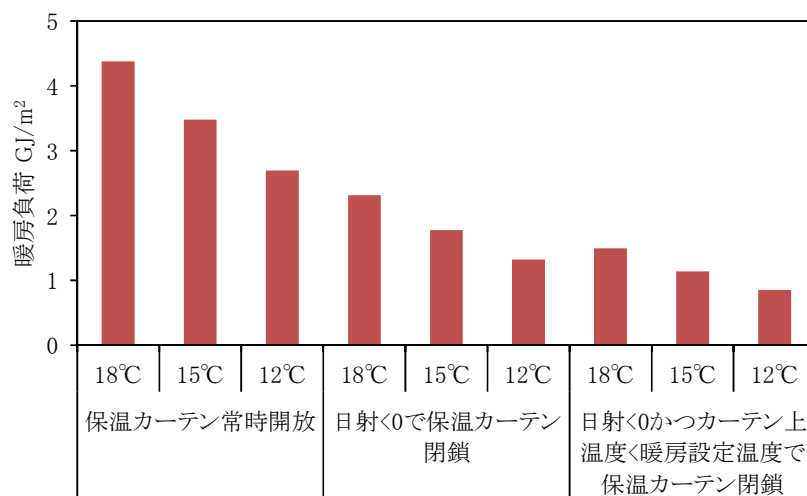
図 5-4 高温域の室温の発生頻度

2) 温度設定と被覆の制御

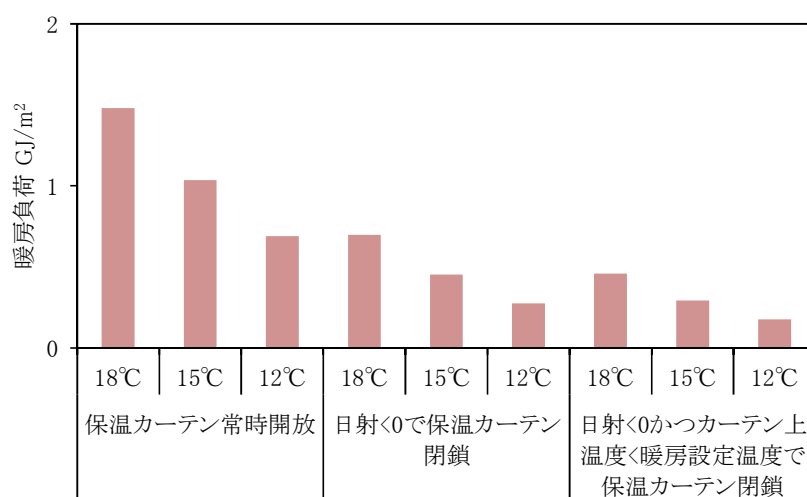
温度設定と被覆の制御方法を変更した場合の暖房負荷の計算結果を図 5-5 に示す。計算対象のハウスは、表 5-1 の単棟パイプハウスである。

年間暖房負荷の場合は、被覆の制御方法の影響が大きく、単純に日射量>0 で保温カーテンを開放した時と比べて、カーテン上の温度が暖房設定温度に達してからカーテンを開放した場合は、大きく暖房負荷が減少している。後者の 18℃設定のときの暖房負荷は、前者の 12℃設定のときの暖房負荷とほぼ同等であり、暖房設定温度の 6℃の差を、カーテンの開閉制御の工夫で解消できることとなる。

この傾向は、3月～10月の暖房負荷に限って見た場合にはやや異なっており、むしろ設定温度の影響が大きい。設定温度を 18℃から 12℃に低減した場合の暖房負荷削減率は、年間暖房負荷で見た場合 4 割程度であるが、3月～10月では約 6 割削減となる。したがって、促成・抑制栽培などで、端境期に暖房を行う場合には、温度設定の検討が重要となる。



(a) 年間の暖房負荷



(b) 3月～10月の暖房負荷

図 5-5 温度設定と被覆の制御による暖房負荷の違い

3) 無加温栽培の場合

無加温ハウスにおける年間の室温変動を計算し、日最低外気温と日最低室温の対応をプロットしたのが図 5-6 である。計算対象のハウスは、表 5-1 の単棟パイプハウスである。二重被覆の熱貫流率は $3.8\text{W/m}^2\text{K}$ 、日射透過率は 0.5 とした。蓄熱材は床面積 1m^2 当たり、水 0.01m^3 相当を想定し、凍結融解の潜熱は考慮していない。

無加温の場合も、地盤からの放熱があるため、被覆の保温性を上げるほどハウス内の温度は高く維持される。蓄熱材の効果はあまり大きくない結果となったが、これはシミュレーション上、蓄熱材の温度を 1 つの温度で表現していることも関係していると考えられる。無加温時の栽培環境について、より精緻な検討を行うためには、蓄熱モデルの改良や、シミュレーションをトンネル、べたがけなどへ対応させることも必要である。

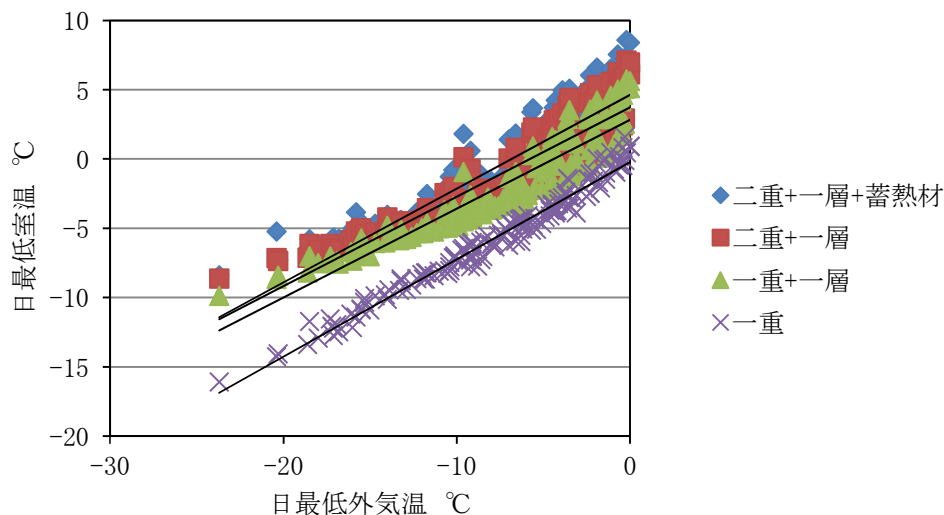


図 5-6 無加温ハウスにおける日最低外気温と日最低室温の対応

(2) 構造安全性の向上について

本研究の開始後、道内外でハウスの構造安全性に関する知見の蓄積が進んだ。

2014年3月には、上川農業改良普及センター上川北部支所により編纂された農業気象災害関係技術資料集が関係者に配布された。本資料の中には、国内外の農業気象災害事例や災害技術対策が網羅的に収録されている。収録されている災害事例から、ハウスの被害については、ほぼ雪害と風害に集約されることがわかる。

また、2012年冬の大雪で、被覆されていないハウスで多数の被害が生じたことを受け、道農政部では詳細な調査・分析を行い、2013年11月に地域営農指導資料「大雪等による農業被害の防止に向けた取組について～地域ぐるみでの効果的な対策の実施に向けて～」を取りまとめている。

2014年7月には、日本施設園芸協会が、2014年2月に関東甲信越地方で大規模に発生した大雪によるハウスの倒壊被害を受け、「平成26年2月の大雪被害における施設園芸の被害要因と対策指針」を取りまとめて公開している。さらに2016年7月に刊行された「園芸用施設安全構造基準—平成28年版—」では、保守管理基準の項目が全面的に改訂されて、積雪、強風、豪雨、地震などへの対策に関する記述が拡充された。

ハウスは、絶対に壊れないものではなく、日常の備えが、被害の大小を左右すると言われることから、まずはこれらの過去の被害経験による知見を踏まえて対策を行うことが重要である。主な留意点を記すと、以下のとおりである。

■雪害対策

○ハウス建設時

- ・除雪、耐雪スペースを考慮した隣棟間隔の確保
- ・冬季にアーチ部を除去できるよう、肩部に接合部のあるアーチパイプを選択
- ・ハウス強度の確保（パイプ径、肉厚、パイプピッチの適切な選択）
- ・筋交い、タイバーなどによる補強

○降雪前の対策

- ・気象情報の確認
- ・落雪阻害要因の除去、被覆の十分な展張
- ・支柱、筋交いなど補強資材を利用しやすい場所に用意しておく
- ・暖房機の点検
- ・接合部、パイプの腐食の点検
- ・一時的な中柱設置
- ・ハウス強度を大きく上回る降雪が予想される場合、被覆資材の切断除去も検討（農業共済の扱いに留意を要する）

○降雪・積雪時

- ・被覆を展張しているハウスは、落雪を妨げないよう外周部を除雪することを前提とする
- ・加温設備がある場合は、内部カーテンを開放して暖房し、内部温度を高める
- ・無加温ハウスでは開口部を密閉して日射や地温による室温上昇を図る。内部被覆は開放する
- ・被覆を除去したハウスで、アーチパイプ肩部の上まで雪が積もった場合は、肩部の上の雪を人力で取り除くか、のこぎりでパイプ間の雪割りを行う

■強風対策

- ・気象情報の確認
- ・防風網の設置
- ・被覆材固定部、被覆材の破れの保守点検。特に軒、棟、けらばなどの点検
- ・飛散物による被覆被害の防止
- ・筋交いなど補強資材を利用しやすい場所に用意しておく
- ・被覆材の膨張による飛散を防ぐため、風下側開口を開くなど、施設内を減圧側とする

6. まとめ

本研究では、北海道における農業用温室の技術開発や技術支援に応用できる基礎的な知見の蓄積を目的とし、農業用温室に関わる実態調査を行った上で、温熱環境、構造安全性の両面からの検討を実施した。

温熱環境については、被覆資材の長波放射透過が保温性に及ぼす影響を明らかにするとともに、実ハウスで放射収支及び土壌熱特性の測定を行い、これらを反映した温室の温熱環境及び暖冷房負荷のシミュレーション手法を構築した。また、構造形式について、大雪、強風に対する構造安全性の実態検証や留意点の整理を行った。

[謝辞]

本研究の成果の一部には、平成 25 年度に国内研修Ⅱで実施した独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所農地基盤工学研究領域における研修成果を含む。また、実態調査では、関係の方々にヒアリングなどへの協力をいただいた。ハウスにおける実測は、道総研花・野菜技術センターの協力を得て実施した。記して感謝申し上げます。

付録

本研究で構築したシミュレーション手法は、道総研の研究開発や技術支援における活用を目的としており、一般への配布は想定していない。ただし参考として、以下に計算式を示す。列は Microsoft Excel の画面上の記号を示す。

添え字の $p-1$ は 1 ステップ前の数値を示す。

	列	項目	計算式
時刻	A	月	
	B	日時	
気象条件	C	外気温 θ_o [°C]	気象データ
	D	屋外日射量 J [W/m ²]	気象データ
	E	外気絶対湿度 x_o [kg/kg]	気象データ
	F	実効放射量 J_{ehc} [W/m ²]	拡張アメダス気象データの収録データを用いる。
	G	夜間放射 J_{eh} [W/m ²]	$\sigma T_o^4 (0.474 - 0.076\sqrt{f})$ 参考値
	H	外気 SAT 温度 θ_{oSAT} [°C]	$\frac{1}{\alpha_o} ((1 - \tau_{oa})J - \varepsilon_{oa}J_{ehc})$
	I	外気水蒸気分圧 f [mmHg]	$(x_o \times 760)/(0.622 + x_o)$
設定	J	暖房設定 θ_{Hset} [°C]	設定値
	K	冷房設定 θ_{Cset} [°C]	設定値
	L	地中温度 [°C]	未使用
	M	温水温度 [°C]	設定値
	N	保温カーテン展開	1:あり、2:なし $\theta_o < \theta_{Hset}$ かつ屋外日射量 $J <$ 保温カーテン開放の設定外部日射量、またはカーテン外温度 $\theta_a <$ 保温カーテン開放のカーテン外設定温度のとき 1
	O	遮光カーテン展開	1:あり、2:なし $\theta_o >$ 遮光カーテン閉鎖の設定外気温かつ屋外日射量 $J >$ 遮光カーテン閉鎖の設定外部日射量のとき 1
カーテン外温度	P	カーテン外温度 θ_a [°C]	カーテン展開時 $\frac{\left(\sum UA_{oa} \theta_{oSAT} + c_a \gamma_a Q_{oa}^{p-1} \theta_o + \frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau} \theta_a^{p-1} \right)}{\left(\sum UA_{ai} + c_a \gamma_a Q_{ai}^{p-1} \right) \theta_i - H_a - S_{Gsta} - lC_{onda}^{p-1}}$ $\sum UA_{oa} + c_a \gamma_a Q_{oa}^{p-1} + \frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau} + \sum UA_{ai} + c_a \gamma_a Q_{ai}^{p-1}$ カーテン非展開時 $\theta_a = \theta_i$

単位熱負荷 カーテン外)	Q	外気側貫流熱 [W/m ² K]	$\sum UA_{oa} / S$ 遮光カーテンの展開有無により別の値を用いることができる。			
	R	外気換気 [W/m ² K]	$c_a \gamma_a Q_{1oa}^{p-1} / S$			
	S	室内側換気 [W/m ² K]	$c_a \gamma_a Q_{ai}^{p-1} / S$ 遮光カーテンの展開時は遮光カーテン下の外気換気単位負荷と同じとする。			
換気量計算 カーテン外)	T	外気側内外温度差 ΔT_{oa} [K]	$ \theta_o - \theta_a $			
	U	外気側温度差換気量 Q_{1oa}/S [m ³ /m ² s]	$\frac{Q_{(x)oa}}{S} \sqrt{\frac{\Delta T_{oa}}{x}}$ Q_{10oa} : 外気側内外温度差 x K のときの自然換気量			
	V	室内側内外温度差 ΔT_{ai} [K]	$ \theta_i - \theta_a $			
	W	室内側温度差換気量 Q_{1ai}/S [m ³ /m ² s]	$\frac{Q_{(x)ai}}{S} \sqrt{\frac{\Delta T_{ai}}{x}}$ $Q_{(x)ai}$: 室内側内外温度差 x K のときの温度差換気量			
温度計算 室内)	X	室温 θ_i [°C]	$\frac{\left(\sum UA_{ai} + c_a \gamma_a Q_{ai} + \frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau} \right) \theta_a^{p-1} + \sum UA_{oi} \theta_{oSAT} + c_a \gamma_a Q_{oi} \theta_o + \frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau} \theta_i^{p-1} + \alpha_{si} \theta_s^{p-1} - H_a^{p-1} - H_{i1}^{p-1} - H_{i2}^{p-1} - H_{i3}^{p-1} - S_{Gsti} - I(E + C_{ondi}^{p-1})}{\sum UA_{ai} + c_a \gamma_a Q_{ai} + \frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau} + \sum UA_{oi} + c_a \gamma_a Q_{oi} + \frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau} + \alpha_{si}}$			
	Y	自然室温 θ_i' [°C]	θ_i を求める上式で $H_a = H_{i1} = H_{i2} = H_{i3} = 0$ とする。 θ_i^{p-1} は $\theta_i'^{p-1}$ とする。 θ_{si} は室温を θ_i' ではなく θ_i として計算した値を用いるので誤差を生じる場合があるが、影響は小さいと考えて無視する。			
	Z	自然室温通風なし θ_i'' [°C]	θ_i' を求める上式で $Q_{oi} = Q_{loi}$ とする			
単位熱負荷 室内)	AA	カーテン外貫流熱 $\sum UA_{ai} / S$ [W/m ² K]	保温カーテン	遮光カーテン	日射条件	$\sum UA_{ai} / S$
			展開	なし	屋外日射量 $J >$ 保温カーテン 開放の設定外部 日射量	保温カーテン (日射あり)
			なし	展開	—	保温カーテン
			展開	展開	—	遮光時カーテン 上外張り
			なし	なし	—	保温カーテン
			なし	なし	—	0
	AB	外気側貫流熱 $\sum UA_{oi} / S$ [W/m ² K]	保温カーテン	遮光カーテン		$\sum UA_{oi} / S$
なし	なし	なし		外張り		
展開	なし	なし・展開		0		
なし	なし	展開		遮光時カーテン下外 張り		

単位熱負荷 換気	AC	カーテン外換気 $c_a \gamma_a Q_{ai}^{p-1} / S$ [W/m ² K]	保温カーテン展開時 $c_a \gamma_a Q_{1ai}^{p-1} / S$ 保温カーテンなし時 0
	AD	外気側換気 $c_a \gamma_a Q_{oi}^{p-1} / S$ [W/m ² K]	$c_a \gamma_a \frac{Q_{3oi}}{S} > 0$ true $\rightarrow c_a \gamma_a \frac{Q_{3oi}}{S}$ false 保温カーテン展開 true $\rightarrow 0$ false min $\left\{ \begin{array}{l} \theta_i'' > \theta_{Cset} \text{ かつ 冷房計算:0 かつ 通風:1} \\ \text{true} \rightarrow \theta_o < \theta_{Cset} \text{ かつ } c_a \gamma_a Q_{2oi} \text{ (全開通風)} > c_a \gamma_a Q \text{ (必要除熱量)} \\ \text{true} \rightarrow c_a \gamma_a Q_{1oi} \text{ (温度差換気のみ)} > c_a \gamma_a Q \text{ (必要除熱量)} \\ \text{true} \rightarrow c_a \gamma_a Q_{1oi} / S \text{ (温度差換気のみ)} \\ \text{false} \rightarrow c_a \gamma_a Q / S \text{ (必要除熱量)} \\ \text{false} \rightarrow c_a \gamma_a Q_{2oi} / S \text{ (全開通風)} \\ \text{false} \rightarrow c_a \gamma_a Q_{1oi} / S \text{ (温度差換気のみ)} \\ c_a \gamma_a Q_{2oi} / S \text{ (全開通風)} \end{array} \right.$
	AE	カーテン外蓄熱 $\frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau S}$ [W/m ² K]	$\theta_a < \theta_i$ かつ 保温カーテン展開なし true \rightarrow 保温カーテン開放直後 true \rightarrow カーテン外空気熱容量 false $\rightarrow 0$ false $\rightarrow 0$
	AF	カーテン内蓄熱 $\frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau S}$ [W/m ² K]	$\theta_a < \theta_i$ かつ 保温カーテン展開なし true \rightarrow 保温カーテン開放直後 true \rightarrow カーテン内熱容量 false \rightarrow カーテン開放時熱容量 false 保温カーテンまたは遮光カーテン展開 true \rightarrow カーテン内熱容量 false \rightarrow カーテン開放時熱容量
	AG	温度差換気のみ 熱負荷 $c_a \gamma_a \frac{Q_{loi}^{p-1}}{S}$ [W/m ² K]	保温カーテン展開あり true $\rightarrow 0$ false $\rightarrow c_a \gamma_a \frac{Q_{loi}^{p-1}}{S}$
	AH	全開通風時熱負 荷 $c_a \gamma_a \frac{Q_{2oi}^{p-1}}{S}$ [W/m ² K]	保温カーテン展開あり true $\rightarrow 0$ false \rightarrow $\min \left(c_a \gamma_a \frac{\alpha A}{S} \sqrt{2gh \frac{ \theta_i^{p-1}' - \theta_o }{\theta_o + 273.15}}, c_a \gamma_a \frac{Q_{2oi\max}}{S} \right)$ $Q_{2oi\max}$: 通風時最大換気負荷

	AI	強制換気時熱負荷 $c_a \gamma_a \frac{Q_{3oi}^{p-1}}{S}$ [W/m ² K]	強制常時:1 $c_a \gamma_a \frac{Q_{3oi}}{S}$ 強制換気 (設定温度以上のみ) :1 $\theta_i^{p-1} > \theta_{Cset}$ true $\rightarrow c_a \gamma_a \frac{Q_{3oi}}{S}$, false $\rightarrow 0$
	AJ	換気による必要除熱量 $c_a \gamma_a \frac{Q}{S}$ [W/m ² K]	$\theta_i'' > \theta_{Cset}$ true \rightarrow $\frac{\left(\sum UA_{ai} + c_a \gamma_a Q_{ai} \right) (\theta_a^{p-1} - \theta_{Cset}) + \sum UA_{oi} (\theta_{oSAT} - \theta_{Cset}) + \frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau} (\theta_a^{p-1} - \theta_{Cset}) + \frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau} (\theta_i^{p-1} - \theta_{Cset}) + \alpha_{si} (\theta_{si}^{p-1} - \theta_{Cset})}{\theta_{Cset} - \theta_o}$ false $\rightarrow c_a \gamma_a \frac{Q_{1oi}^{p-1}}{S}$
換気	AK	外気導入量 $\frac{Q_{oi}}{S}$ [m ³ /m ² s]	$\left\{ \min \left(c_a \gamma_a \frac{Q_{ai}^{p-1}}{S}, c_a \gamma_a \frac{Q_{1oa}^{p-1}}{S} \right) + c_a \gamma_a \frac{Q_{oi}}{S} \right\} / c_a \gamma_a$
	AL	換気回数[回/h]	$\frac{Q_{oi}}{S} \cdot \frac{3600S}{V}$ 参考値
	AM	内外温度差 ΔT_{oi} [K]	$\Delta T_{oi} = \theta_i - \theta_o $
	AN	温度差のみ換気量 Q_{1oi}/S [m ³ /m ² s]	$\frac{Q_{1oi}}{S} = \frac{Q_{(x)oi}}{S} \sqrt{\frac{\Delta T_{oi}}{x}}$ $Q_{(x)oi}$: 内外温度差 xK のときの自然換気量
	AO	非冷房時必要通風開口 A/S [m ²]	$Q_{oi} = \alpha A \sqrt{2gh \frac{\Delta T_{oi}}{\theta_i + 273.15}}$, $A = Lh$ より $\frac{A}{S} = \frac{1}{S} \left(\frac{Q_{oi}}{S} \cdot \frac{S}{\alpha} \div \sqrt{\frac{2g}{L} \cdot \frac{\Delta T_{oi}}{\theta_i + 273.15}} \right)^{\frac{2}{3}}$ 参考値 hは開口を上下に二分したときの開口部中央部間の距離
AP	非冷房時必要通風開口高さ h [m]	$h = \frac{A}{S} \cdot \frac{S}{L}$ 参考値	
熱流内訳 カーテン外	AQ	カーテン外顕熱暖房量 H_a^{p-1} [W/m ²]	$\theta_{wset} = 0$ または保温カーテン展開なし true $\rightarrow H_a = 0$ false \rightarrow 暖房計算:1 かつ外周暖房:1 true $\rightarrow H_a = -(\theta_{wset} - \theta_a^{p-1}) \frac{\sum q_w L_w}{S}$ false $\rightarrow 0$
	AR	カーテン外日射熱取得 S_{Gsta} [W/m ²]	$-\tau_{eoa} \times (1 - \tau_{eai}) \times J$

	AS	凝縮熱 lC_{onda}^{p-1} [W/m ²]	保温カーテン展開あり true →結露位置：外側被覆 $lC_{ond}' \times \alpha_i / (\alpha_o + \alpha_i)$ →結露位置：室内側被覆 $lC_{ond}' \times \alpha_i / (\alpha_i + \alpha_i)$ false→0
	AT	カーテン外貫流熱負荷 [W/m ²]	$\sum UA_{oa} / S \times (\theta_a - \theta_{oSAT}) + \sum UA_{ai} / S \times (\theta_a - \theta_i)$
	AU	カーテン外換気熱荷 [W/m ²]	保温カーテン展開あり true→ $c_a \gamma_a Q_{loa}^{p-1} / S (\theta_a - \theta_o) + c_a \gamma_a Q_{ai}^{p-1} / S (\theta_a - \theta_i)$ false→保温カーテン展開なしかつ遮光カーテン展開あり true→ $c_a \gamma_a Q_{ai}^{p-1} / S (\theta_a - \theta_i)$ false→0
	AV	カーテン外蓄熱熱負荷 [W/m ²]	保温カーテン展開なし true→0 false→ $\frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau S} (\theta_a^p - \theta_a^{p-1})$
	AW	熱収支 [W/m ²]	AQ列～AV列の計
暖冷房負荷	AX	顕熱暖房負荷 H_{i1}^{p-1} [W/m ²]	$\theta_i' \leq \theta_{Hset}$ true→ $\left(\begin{aligned} & \left(\sum UA_{ai} + c_a \gamma_a Q_{ai} \right) (\theta_{Hset} - \theta_a^{p-1}) + \sum UA_{oi} (\theta_{Hset} - \theta_{oSAT}) + c_a \gamma_a Q_{oi} (\theta_{Hset} - \theta_o) \\ & - \left(\frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau} (\theta_{Hset} - \theta_a^{p-1}) + \frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau} (\theta_{Hset} - \theta_i^{p-1}) + \alpha_{si} (\theta_{Hset} - \theta_{si}^{p-1}) \right) \\ & + H_{i2}^{p-1} + S_{Gst} + l(E + C_{ondi}) \end{aligned} \right) / S$ false→0 ただし $H_{i1}' \leq 0$
	AY	顕熱冷房負荷 H_{i3}^{p-1} [W/m ²]	$\theta_i'' \geq \theta_{Cset}$ true→ $\left(\begin{aligned} & \left(\sum UA_{ai} + c_a \gamma_a Q_{ai} \right) (\theta_{Cset} - \theta_a^{p-1}) + \sum UA_{oi} (\theta_{Cset} - \theta_{oSAT}) + c_a \gamma_a Q_{oi} (\theta_{Cset} - \theta_o) \\ & - \left(\frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau} (\theta_{Cset} - \theta_a^{p-1}) + \frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau} (\theta_{Cset} - \theta_i^{p-1}) + \alpha_{si} (\theta_{Cset} - \theta_{si}^{p-1}) \right) \\ & + H_a^{p-1} + H_{i1}^{p-1} + H_{i2}^{p-1} + S_{Gsti} + l(E + C_{ondi}) \end{aligned} \right)$ false→0 ただし $H_{i3}' \geq 0$
熱流内訳 (室内)	AZ	カーテン外顕熱暖房量 H_a^{p-1} [W/m ²]	$\theta_{wset} = 0$ または保温カーテン展開あり true→0 false→暖房計算:1 かつ外周暖房:1 true→ $-(\theta_{wset} - \theta_i^{p-1}) \sum q_w L_w / S$ false→0
	BA	顕熱暖房量 H_{i1}^{p-1} [W/m ²]	$\max \left(H_{i1}'^{p-1}, -H_{i1max} \right)$
	BB	培地加温 H_{i2}^{p-1} [W/m ²]	暖房計算:1 かつ培地暖房:1 true→ $-\max \left((\theta_{wset} - \theta_i^{p-1}) \times U_B A_B / S, 0 \right)$ false→0

	BC	顕熱冷房量 H_{i3}^{p-1} [W/m ²]	冷房計算:1→採用機器による温室冷房量 $\min\left(H_{i3}^{p-1}, H_{i3\max}\right)$
	BD	日射取得熱 S_{Gsti} [W/m ²]	$J \times \tau_{eoa} \times \tau_{eai} \times (1 - \psi)$ τ_{ai} はカーテン有無、カーテン種別により使い分ける。
	BE	潜熱負荷 IE [W/m ²]	湿度計算:1 $IE = \max(-S_{Gst} \times 0.35, \text{単位飽差蒸発散量} \times B \times 1)$
	BF	凝縮熱 IC_{ondi}^{p-1} [W/m ²]	保温カーテン展開なし true→ $IC_{ond}' \times \alpha_i / (\alpha_o + \alpha_i)$ false→結露位置：室内側被覆 true→ $IC_{ond}' \times \alpha_i / (\alpha_i + \alpha_i)$ false→0
	BG	貫流熱負荷 [W/m ²]	$\sum \frac{UA_{ai}}{S} (\theta_i - \theta_a^{p-1}) + \sum \frac{UA_{oi}}{S} (\theta_i - \theta_{oSAT})$
	BH	換気熱負荷 [W/m ²]	$c_a \gamma_a \frac{Q_{ai}^{p-1}}{S} (\theta_i - \theta_a^{p-1}) + c_a \gamma_a \frac{Q_{oi}^{p-1}}{S} (\theta_i - \theta_o)$
	BI	蓄熱負荷 (空気ほか) [W/m ²]	$\frac{c_a \gamma_a V_a + C_{Fa}}{\tau S} (\theta_i^p - \theta_a^{p-1}) + \frac{c_a \gamma_a V_i + C_{Fi}}{\tau S} (\theta_i^p - \theta_i^{p-1})$
	BJ	地盤[W/m ²]	$\alpha_{si} (\theta_i^p - \theta_{si}^{p-1})$
	BK	熱収支[W/m ²]	AZ~BJ の和 マイナスが流入
蒸発	BL	蒸発散率[kg/m ² s]	$E = IE / l$
	BM	換気による排湿 [kg/m ² s]	$Q_{oi} / S (x_i - x_o) \gamma_a$
外気湿度	BN	外気飽和水蒸気 圧 f_{so} [mmHg]	外気温 θ_o より Goff-Gratch の式で算出
	BO	外気水蒸気分圧 f_o [mmHg]	外気絶対湿度 x_o より
	BP	外気相対湿度 ϕ_o	$\phi_o = f_o / f_{so}$
室内湿度	BQ	室内絶対湿度 x_i [kg/kg']	f_i より
	BR	室内相対湿度 ϕ_i	$\phi_i = f_i / f_{i2}$
	BS	飽差 B [mmHg]	$f_{i2} - f_i$
	BT	室内水蒸気分圧 [mmHg]	$\min(f_{i1}, f_{i2}, f_{i3})$
	BU	室内絶対湿度 (蒸発散量より) x_{i1} [kg/kg']	$x_{i1} = x_o + \frac{E \times Q_{oi}}{S \times \gamma_a}$
	BV	室内水蒸気分圧 (蒸発散量より) f_{i1} [mmHg]	x_{i1} より
	BW	室内飽和水蒸気 分圧 (室温より) f_{i2} [mmHg]	θ_i より

フィルム表面	BX	フィルム表面温度[°C]	結露位置:外気側被覆 $\text{true} \rightarrow \theta_{oSAT} + \frac{U_{\max}}{\alpha_o} (\theta_i - \theta_{oSAT})$ $\text{false} \rightarrow \text{保温カーテン展開あり}$ $\text{true} \rightarrow \theta_i - \frac{U_{\max}}{\alpha_i} (\theta_i - \theta_a)$ $\text{false} \rightarrow \theta_{oSAT} + \frac{U_{\max}}{\alpha_o} (\theta_i - \theta_{oSAT})$ $U_{\max} \text{ はカーテン有無に応じた各部位 } U \text{ 値の最大値}$
	BY	フィルム表面飽和水蒸気分圧 f_{i3} [mmHg]	フィルム表面温度より
	BY	換気による排湿 [kg/m ² s]	$\frac{Q_{oi}}{S} (x_i - x_o) \gamma_a$
	BZ	結露量 C_{ond}' [kg/m ² s]	$\max(E - \text{換気による排湿}, 0)$
	CA	結露による凝固熱 lC_{ond}' [W/m ²]	$l \times C_{ond}'$
地表伝熱	CB	b_0	$b_0 = -(c\gamma)_{si} \theta_{si}^{p-1} - \tau \alpha_i \theta_i^{p-1}$
	CC	b_1	$b_1 = -(c\gamma)_{i2} \theta_i^{p-1}$
	CD	b_2	$b_2 = -(c\gamma)_{23} \theta_2^{p-1}$
	CE	b_3	$b_3 = -(c\gamma)_{so} \theta_{so}^{p-1}$
	CF	地表面温度 $\theta_{si(p-1)}$ [°C]	$[a_{ij}]^{-1} [b_i]$
	CG	1層目-2層目境界温度 $\theta_{1(p-1)}$ [°C]	$[a_{ij}]^{-1} [b_i]$
	CH	2層目-3層目境界温度 $\theta_{2(p-1)}$ [°C]	$[a_{ij}]^{-1} [b_i]$
	CI	3層目下部(断熱境界)温度 $\theta_{so(p-1)}$ [°C]	$[a_{ij}]^{-1} [b_i]$
CJ	θ_{iSAT} [°C]	$\theta_i + 1/\alpha_{si} \times \tau_{eoa} \times \tau_{eai} \times \psi \times J$ τ_{eai} はカーテン有無、カーテン種別により使い分ける。	

以下は、パラメータの設定部で、黄色地の部分が入力項目である。

計算設定

計算時間間隔 τ	3600 s
湿度計算	0 1:行う, 0:行わない
暖房計算	1 1:行う, 0:行わない
培地暖房	0
外周暖房	1
冷房計算	1 1:行う, 0:行わない
通風(外気冷房)	1 1:行う, 0:行わない
強制換気(設定温度以上のみ)	0 1:行う(窓閉鎖), 0:行わない
強制常時	0 1:行う(窓閉鎖), 0:行わない

温室形状

カーテン上部 外側被覆	
連棟数	1
間口	6.00 m
奥行	40.00 m
軒高	2.00 m
棟高	2.00 m
床面積S	240 m ²
気積V	330 m ³
気積/床面積	1.38 m ³ /m ²
屋根/床面積比	1.20

貫流熱

外張り		妻面	側面	屋根面
屋間U		6.0	6.0	6.0 W/m ² K
面積A		18.0	80.0	288.4 m ²
箇所数N		2	2	1
外張りΣUAoa/S		12.11 W/m ² K		
遮光時				
カーテン上外張り面積A		6.0		288.4 m ²
カーテン下外張り面積A		12	80	m ²
カーテン上外張りΣUAoa/S		7.51 W/m ² K		
カーテン下外張りΣUAoa/S		4.60 W/m ² K		
遮光カーテンΣUAai/S		3.66 W/m ² K		
遮光カーテンΣUAai/S(保温時)		6.14 W/m ² K		
保温時				
カーテンU		4.5	3.5	
カーテン面積A		10.0	78.0	195.0 m ²
箇所数N		2	2	1
保温カーテンΣUAai/S		6.14 W/m ² K		
保温カーテンΣUAai/S(日射あり時)		6.96 W/m ² K		

換気

強制換気量 c γ Q3oi/S		10.1 W/m ² K	10 回/h
通風時最大換気量 c γ Q2oimax/S		100.6 W/m ² K	100 回/h
外張りQ(x)oa/S		0.00025 m ³ /m ² s	0.3 回/h
同 温度差	x	10 K	
通風開口最大高さ(中心間)	h	3 m	
通風開口流量係数	α	0.7	
通風開口	A	72	
カーテン内外Q(x)ai/S	0.000191	m ³ /m ² s	0.5 回/h
同 温度差	x	10 K	
日射			
日射透過率(外側) τ eoa		0.6	
日射透過率(保温1層) τ eai		0.8	
日射透過率(遮光) τ eai		0.5	
保温カーテン開放の設定外部日射量		10 W/m ²	
保温カーテン開放のカーテン外温度		10 °C	or条件
遮光カーテン閉鎖の設定外部日射量		300 W/m ²	
遮光カーテン閉鎖の設定外気温		20 °C	and条件

被覆表面温度

結露位置		1 1:外側被覆, 2:室内側被覆
被覆外気側放射率	ε oa	0.8
室外側熱伝達率	α o	23 W/m ² K
室内側熱伝達率	α i	9 W/m ² K

機器容量

暖房Hi1max	1	200	833.33333
冷房Hi3max	1	200	833.33333

設定室温

時	暖房設定 θ Hset	冷房設定 θ Cset
0-1時	0	12
1-2時	1	12
2-3時	2	12
3-4時	3	12
4-5時	4	12
5-6時	5	12
6-7時	6	12
7-8時	7	18
8-9時	8	18
9-10時	9	18
10-11時	10	18
11-12時	11	18
12-13時	12	18
13-14時	13	18
14-15時	14	18
15-16時	15	12
16-17時	16	12
17-18時	17	12
18-19時	18	12
19-20時	19	12
20-21時	20	12
21-22時	21	12
22-23時	22	12
23-24時	23	12
平均	14	25

定数

外気の比重量	γ a	1.2 kg/m ³
水の気化熱	l	2501000 J/kg
湿り空気の比熱	Ca	1006 J/kgK
水の比熱	Ca γ a	4183.92 J/kgK
		1207.2

熱容量

全空気		カーテン外空気	その他
体積	300	1.375	m ³ /m ²
比重量	1.2	1.2	kg/m ³
比熱	1006	1006	J/kgK
熱容量	3622	1660	0 J/m ² K
単位時間当たり計 (c γ V+CF)/τ S			
カーテン開放時		1.01 W/m ² K	
カーテン外空気		0.46 W/m ² K	
カーテン内		0.54 W/m ² K	

地盤温度計算

地表面熱伝達率	α si	8 W/m ² K
日射配分	ψ	0.3
熱伝導率	λ	0.63 W/mK
比重量	γ	1890 kg/m ³
比熱	c	840 J/kgK

		1層目	2層目	3層目
厚さ	l	0.01	0.1	0.19 m
熱コンダクタンス	C	63	6.3	3.3 W/m ² K
熱容量	c γ	15876	158760	301644 J/m ² K
c γ	(c γ)si	(c γ)l2	(c γ)l3	(c γ)so
	7938	87318	230202	150822 J/m ² K

[aij]	a01	a02	a13	a24	a34
	a11	a12	a23	a33	
[ajj]	-263538	226800	0	0	0
	226800	-336798	22680	0	0
	0	22680	-264819	11937	0
	0	0	11937	-162759	0
逆行列[aij]-1	-9.10E-06	-6.16E-06	-5.29E-07	-3.88E-08	
	-6.16E-06	-7.16E-06	-6.15E-07	-4.51E-08	
	-5.29E-07	-6.15E-07	-3.84E-06	-2.82E-07	
	-3.88E-08	-4.51E-08	-2.82E-07	-6.16E-06	

温室形状

