

調査研究報告 No.375
RESEARCH REPORT 2017. 3

道産コンブの生産安定化に関する研究
(建築研究本部北方建築総合研究所実施分)

Studies on stabilization of kelp production
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

道産コンブの生産安定化に関する研究
(建築研究本部北方建築総合研究所実施分)

Studies on stabilization of kelp production in Hokkaido

立松 宏一¹⁾、月館 司²⁾、遠藤 卓³⁾、下ノ蘭 慧³⁾

Koichi Tatematsu¹⁾, Tsukasa Tsukidate²⁾, Suguru Endo³⁾, Kei Shimonosono³⁾

キーワード : 産業施設、水産、乾燥、省エネルギー、ヒートポンプ

Keywords : *Industrial facility, Fisheries, Drying, Energy conservation, Heat pump*

本調査研究報告は、水産研究本部釧路水産試験場・中央水産試験場、産業技術研究本部工業試験場、建築研究本部北方建築総合研究所、水産総合研究センター、株式会社寺島商会、昆布森漁業協同組合が共同で実施した研究のうち、北方建築総合研究所が担当した内容を取りまとめたものである。

1. 研究概要

1) 研究の背景

近年、本道の基幹漁業であるコンブ漁業の生産量は減少傾向が続いており、このまま減少が続けば、漁家経営への多大な影響をおよぼし、漁村の存続が危惧される。コンブ生産量の減少要因として雑海藻繁茂による漁場の荒廃、コンブ漁業者の減少や高齢化・後継者不足などによる影響が指摘され、漁場の生産性回復に向けたより効率的な雑海藻駆除手法や重労働であるコンブ乾燥工程の省力化技術の開発が強く要望されている。

2) 研究の目的

コンブ漁場の雑海藻駆除時期および駆除回数や残存雑海藻量の再検討を行い、コンブの生産性向上に繋がる新たな雑海藻駆除基準を作成する。また、コンブ乾燥工程の省力・省エネ化を特徴とし、品質評価技術の開発によってコンブ品質を維持した新たなコンブ乾燥技術および温湿度分布センシング・制御技術や熱交換機を導入した高度乾燥システムを確立する。

2. 研究内容（建築研究本部北方建築総合研究所実施分）

1) 既存乾燥施設や作業工程の実態調査

- ・ねらい：既存乾燥庫の実態調査により現状の課題や設計条件を把握する
- ・試験項目等：建築・設備使用調査、温湿度調査、作業工程調査、エネルギー分析

2) コンブの乾燥特性、乾燥機特性の把握

- ・ねらい：コンブの乾燥特性やヒートポンプの機器特性を把握し、シミュレーションモデルを構築する。
- ・試験項目等：乾燥試験、軟化試験、乾燥シミュレーション

3) 新たなコンブ乾燥システムの提案

- ・ねらい：一次エネルギー削減量 50%以上を目標として新たな乾燥システムを提案する。
- ・試験項目等：コスト・性能試算、基本設計

¹⁾ 建築研究本部企画調整部企画課主査 ²⁾ 建築研究本部北方建築総合研究所環境研究部環境 G 主幹 ³⁾ 同 研究職員

¹⁾ Chief of Planning Section ²⁾ Senior Research Manager of Environment Group ³⁾ Researcher of Environment Group

3. 研究成果

1) 既存乾燥施設や作業工程の実態調査

昆布森、齒舞、南茅部、羅臼の4地区で従来型乾燥施設の調査を行い、地域によって異なる作業工程や乾燥時の温湿度などの実態を把握した。いずれも、燃焼型の乾燥機を用いた熱風乾燥を採用しており、排気による熱損失が大きいことがわかった(図1)

2) コンプの乾燥特性、乾燥機特性の把握

コンプの乾燥特性(温湿度、風速、含水率と乾燥速度との関係、図2)や乾燥機の実験室実験と実証プラントにより明らかにし、乾燥時間やエネルギー消費量を予測できる乾燥シミュレーションモデルを構築した。

3) 新たなコンプ乾燥システムの提案

一次エネルギー削減量50%以上、軟化処理を含めた乾燥時間を20時間以内とすることを目標として、乾燥シミュレーションや、軟化試験、数値気流解析による検討を行なった。これらの検討により、ヒートポンプ除湿乾燥の採用、建屋の高断熱化、天井扇の適正配置、吹出し・吸込み口の適正配置を行うことで、一次エネルギー消費量で59%削減を達成する、新たな乾燥システムを提案した(図3、図4)。

<具体的な成果>

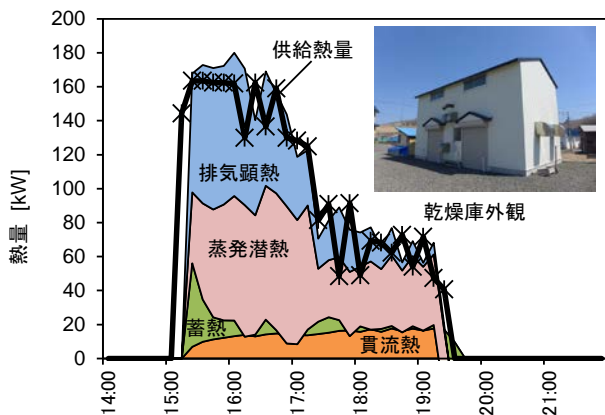


図1 乾燥庫の熱収支の例(昆布森A実測による)

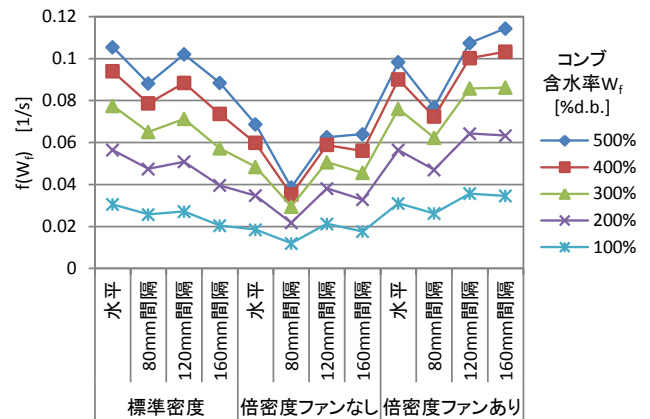


図2 実証プラントにおけるコンプ乾燥特性の把握

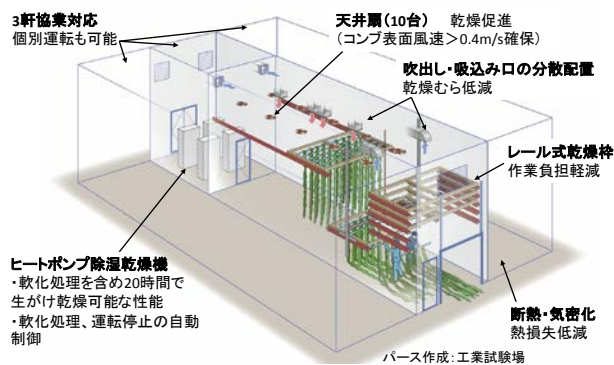


図3 新たな乾燥システムの提案

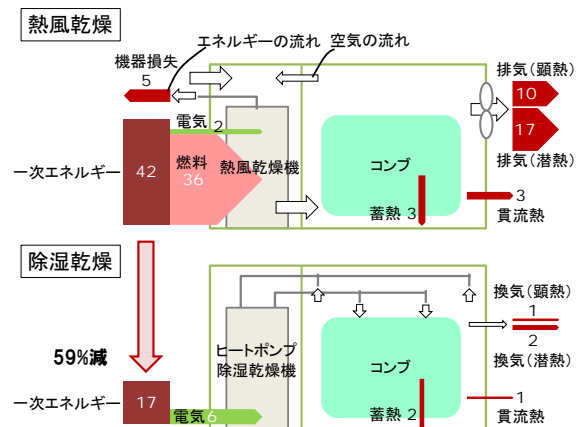


図4 ヒートポンプ除湿乾燥による省エネ効果

4. 今後の見通し

協業化も含めて行政や漁業関係団体と連携して技術普及に努める。

目次

1. 研究の背景と目的.....	1
2. 既存乾燥施設の実態調査.....	2
(1) 釧路・根室地域における実態調査.....	2
(2) その他の地域.....	7
(3) 地域別のコンブ乾燥方法.....	8
(4) 既存乾燥施設における課題.....	11
3. 実験室実験におけるコンブの乾燥特性の把握.....	12
(1) 乾燥特性.....	12
(2) 軟化特性.....	15
4. 実証プラントにおける検証.....	19
(1) 実証プラントの概要.....	19
(2) 除湿器特性の把握.....	20
(3) コンブの乾燥特性.....	21
(4) 密度試験.....	21
5. シミュレーションによる性能試算.....	24
(1) 計算モデルの構築.....	24
(2) 実証プラントにおける実測値とシミュレーション値の整合性.....	25
(3) シミュレーションによる乾燥条件の検討.....	26
6. スケールアップシステムの基本設計.....	28
(1) 配置および各部寸法.....	28
(2) 建築仕様.....	29
(3) 設備仕様.....	29
(4) 吹出し、吸込み方式および天井扇の配置について.....	30
(5) 基本設計.....	35
(6) 性能試算.....	35
7. まとめ.....	39
付録.....	40

1. 研究の背景と目的

コンブは「うま味」による動物性油脂の置き換えを特徴とする日本の伝統的な食文化になくはならない食材であり、平成 25 年 12 月に「和食」がユネスコ無形文化遺産に登録されたことでも、改めて注目されている。国内におけるコンブの漁獲量は、北海道が約 95%のシェアを有しており、道内の漁業就業者の約 5 割がコンブ採取に従事しているが、近年減産傾向が続いている。コンブ生産量の中長期的な減少要因として、雑海藻などによる漁場の荒廃、漁業者の高齢化や廃業・後継者不足のほか、乾燥工程に携わる陸上作業者の減少による影響も指摘されている。

本研究は、コンブ漁場の雑海藻駆除と乾燥工程の両面から技術開発を行い、コンブ生産の安定化を図ることを目的としている。実施内容を、表 1-1 に示す。本研究は地方独立行政法人北海道立総合研究機構水産研究本部釧路水産試験場、同・水産研究本部中央水産試験場、同・産業技術研究本部工業試験場、同・建築研究本部北方建築総合研究所、独立行政法人水産総合研究センター（当時）の共同で実施した。本報告書は、このうち北方建築総合研究所で実施した内容を取りまとめたものである。

表 1-1 本研究の実施内容

研究項目	北方建築総合研究所における実施内容
①道東海域の雑海藻駆除技術の高度化の検討	
②新たな乾燥技術の開発	既存乾燥施設や作業工程の実態調査 コンブの乾燥特性、軟化特性の把握 シミュレーション手法の構築
③高度乾燥システムの開発	シミュレーションによる効率化の検討 スケールアップしたシステムのコスト・性能試算・設計
④品質評価技術等の開発	乾燥施設、保管庫における環境測定

コンブの乾燥は天日乾燥が一般的であるが、天候によっては乾し上がりが不十分となり、既に多くの地域で乾燥機による機械乾燥を併用している。特に道東地域では機械乾燥への依存度が高く、価格が不安定な灯油や重油を熱源とする機械乾燥は、経済的に大きな負担となっている。また乾燥工程は、乾燥室へのコンブの搬入・搬出や乾燥度合いの調整など人手に頼る作業が多く、コンブ漁業者は早朝の漁獲から深夜の乾燥終了まで、重労働を強いられている現状にある。

本研究では、これらの課題を踏まえ、省エネルギー・低コスト化と省力化を実現する乾燥システムの構築を目指した。乾燥方法としては、従来の熱風乾燥に代えて、排気による熱損失の少ないヒートポンプ除湿乾燥を導入することを想定した。

2. 既存乾燥施設の実態調査

(1) 釧路・根室地域における実態調査

1) 調査概要

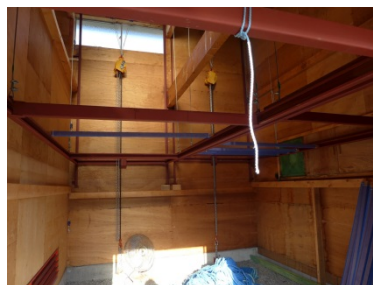
乾燥工程の課題やシステム設計の条件を把握するため、既存コンブ乾燥施設を対象に、乾燥室内の温熱環境やエネルギー消費量に関する実測調査を行った。はじめに、平成25年度に釧路・根室地域で行った実態調査について報告する¹⁾。

コンブ生産は採取から製品化に至るまで、基本的に漁家単位で行われており、乾燥施設も漁家ごとに有している。また、調査地域のコンブは「ながこんぶ」であり、名前のとおり長さが4~15m程度と非常に長いのが特徴である。

写真2-1にコンブ乾燥施設の例を示す。実測対象としたコンブ乾燥施設は、釧路町昆布森漁協管内1棟、根室市歯舞漁協管内2棟の計3棟である。



(a) 昆布森地区乾燥施設外観



(b) 昆布森地区乾燥施設内観



(c) 乾燥機



(d) 歯舞地区乾燥施設外観



(e) 歯舞地区水分噴霧状況



(f) 歯舞地区小束結束状況

写真2-1 コンブ乾燥施設の例

図2-1にコンブ採取から出荷までの作業工程の例を示す。昆布森、歯舞地区とも、天然コンブを採取しており、操業は好天時に限られる。したがって、原則として、採取したコンブは干場において一次乾燥（天日乾燥）が行われ、午後にコンブを乾燥施設に移して、機械乾燥で仕上げる。なお、昆布森地区では、天日乾燥のみで仕上げる日もある。また、採取後、天候が悪化した場合には、天日による一次乾燥を行わず、はじめから機械乾燥を行う場合もある。

機械乾燥後、コンブを棒から外して結束するため、再度水分を含ませて軟化を行う必要がある。軟化処理の方法としては、スプリンクラーなどによる水分噴霧を行う場合と、高湿な外気を導入による場合がある。

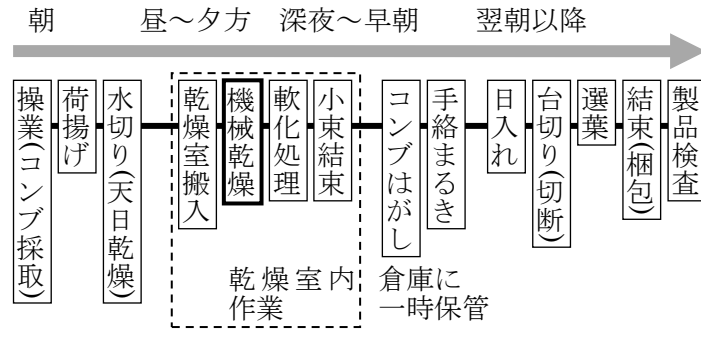
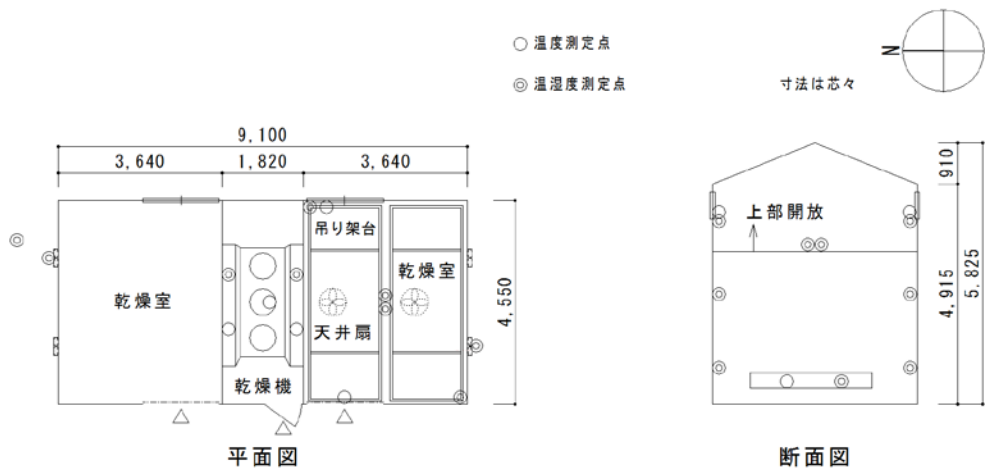
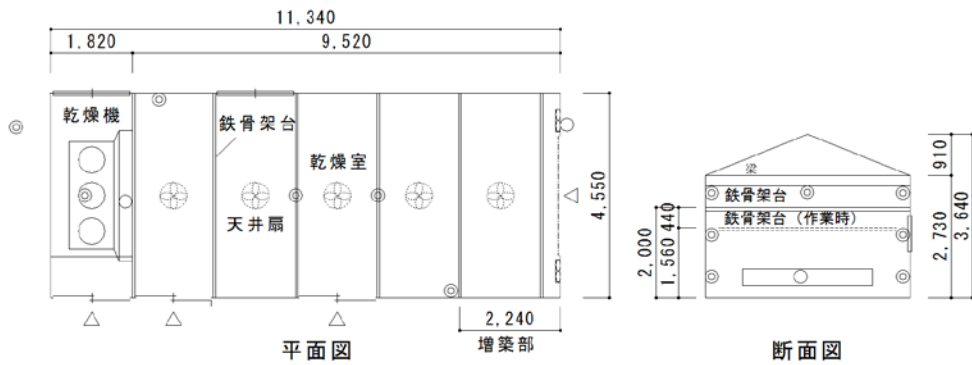


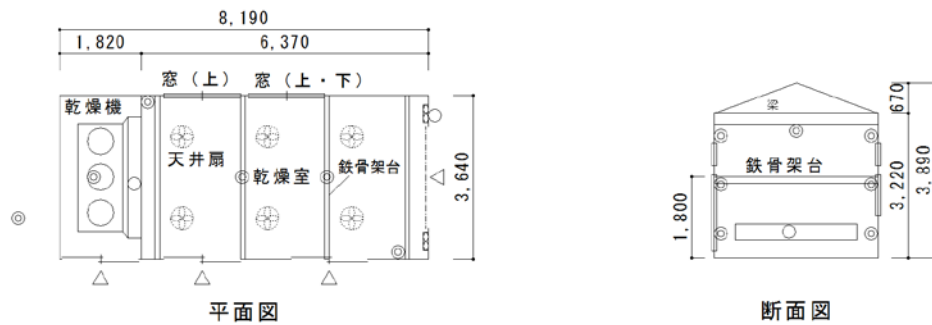
図 2-1 コンブ採取～出荷の作業工程の例（釧路・根室地区）



(a) 昆布森 A



(b) 齒舞 A



(c) 齒舞 B

図 2-2 実測対象のコンブ乾燥施設

図 2-2 に実測調査対象施設の平面図、断面図、表 2-1 に主要仕様の一覧を示す。昆布森 A は 2 階建てに相当する高さがあり、乾燥運転時には棒掛けしたコンブを吊り架台によって上方に移動させる方式としている。概ね落石岬より西側の地域では、この高軒高の乾燥施設を採用している。歯舞 A、B は手の届く位置に、固定式の架台を設けている。

熱源はいずれも A 重油で、熱風式のコンブ乾燥機を使用している。その他の機械設備として、排気ファンおよび首振り型の天井扇を有するほか、歯舞 A のみ水分噴霧のためのスプリンクラーを設けている。給気は機械室に設けられた常時開放の換気フードから行われ、機械室と乾燥室は上部でつながっているため（開閉機構を設けている場合もある）、乾燥機には外気と乾燥室内の空気が混合して取り込まれる。

測定項目を表 2-2 に示す。測定間隔は 10 分とし、常時連続して測定を行った。測定期間は、昆布森 A は平成 25 年度にコンブ採取が行われた全期間、歯舞 A、B は 6 月の棹前昆布から 7 月の夏昆布採取が行われた期間とした。

表 2-1 実測対象施設の主要仕様

	昆布森 A	歯舞 A	歯舞 B
建屋構造	木造	木造	木造
断熱	なし	壁のみ GW 充填	壁のみ GW 充填
床面積	41.4 m ²	51.6 m ²	29.8m ²
熱源	A 重油	A 重油	A 重油
熱源出力	174kW	233kW	不明
熱源送風機	7,200m ³ /h×3	10,200m ³ /h×3	7,620m ³ /h×3
排気ファン	3,720m ³ /h×4	5,040m ³ /h×2	4,800m ³ /h×2
天井扇	50cm×4	60cm×5	不明×6
スプリンクラー	なし	あり	なし

表 2-2 測定項目

項目	測定内容
温湿度	乾燥室中央(梁上または梁下)、送風側隅部(上中下)、排気側隅部(上中下)、乾燥機入気、外気
温度	乾燥機送風口、排気ファン近傍、窓下(窓を開放しない歯舞 A は非設置)
内外差圧	昆布森 A のみ 6/19~7/24 測定
燃料消費量	昆布森 A のみ 7/11~11/12 測定
測定期間	昆布森 A:2013 年 6/19~11/12、歯舞 A,B:2013 年 6/8~8/3

2) 代表日の温湿度推移

代表日として、昆布森 A については 8 月 27 日、歯舞 A、B については 6 月 17 日の温湿度推移を図 2-3 に示す。施設により制御方法に違いが見られるので、工程ごとに以下に詳述する。

①乾燥機運転開始～排気ファン停止

当日は 3 施設とも、朝に水揚げしたコンブを、干場で水切り(天日乾燥)し、14 時から 15 時にかけて乾燥室に搬入して乾燥機運転を開始している。運転開始後 2~4 時間は排気ファンを稼働している。この間、昆布森 A では設定温度に達し ON/OFF 運転に移行しており、歯舞 A では昇温が 35℃程度で頭打ちになっている。歯舞 B は昇温を続けている。室内絶対湿度は外気より高い状態が続くが、乾燥機入気部の絶対湿度は外気と乾燥室の中間にあり、外気と室内循環空気が半々程度で混合されて乾燥機に入気していると考えられる。

②排気ファン停止～乾燥機停止

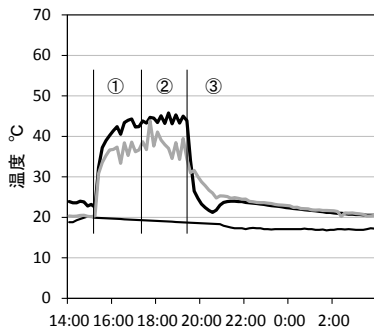
ある程度乾燥が進んだ時点で、生産者が手動で排気ファンを停止する。外気導入量が減ることで、歯舞 A、B では室温が再度上昇し、設定温度に達した時点で乾燥機が ON/OFF 運転に移行する。設定温度は昆布森 A が 40℃、歯舞 A が 60℃、歯舞 B が 50℃程度である。排気ファンを止めることで室内

循環空気が増えるが、乾燥機室の上下に設けられた給気口は開放されたままのため、温度差換気による外気導入量は、乾燥室内の昇温に伴い増加すると考えられる。この間、絶対湿度は外気導入量の減少により一時的に上昇した後、低下に転じ、昆布森 A、歯舞 A ではコンブからの発湿がなくなって外気とほぼ同じ絶対湿度に達した段階で乾燥機を停止している。歯舞 B は運転を停止した段階で室内絶対湿度が外気より高く、コンブの水分がまだ相当残っている状態と考えられる。

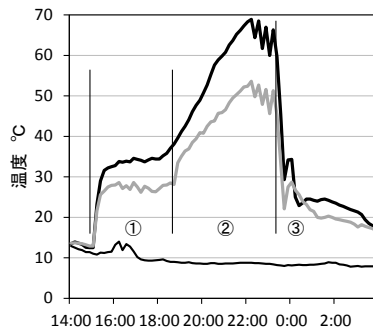
③乾燥機停止～コンブ搬出

昆布森 A では乾燥機の停止後ただちにシャッターおよび高窓を開放した上で排気ファンを運転し、室内を急冷している。このことによって室内の相対湿度を 60%RH 程度まで上昇させ、その後開口部を締め切って 60%RH 程度を翌朝まで維持することによりコンブを軟化させ、搬出を行う。

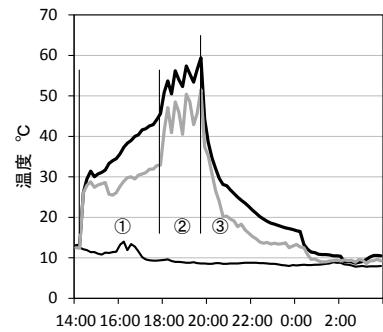
—乾燥室中央 —外気 —ボイラー入気



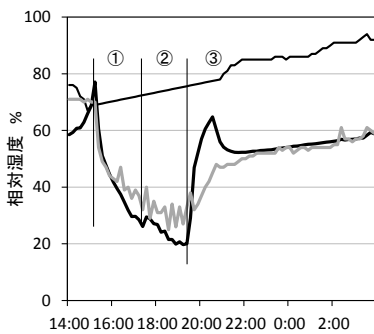
(a-1) 昆布森 A (8月27日) 温度



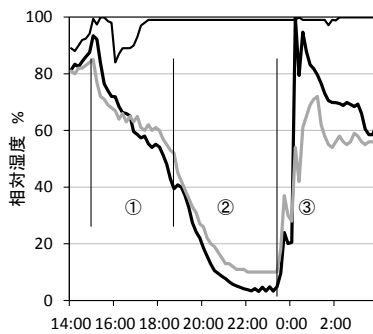
(b-1) 歯舞 A (6月17日) 温度



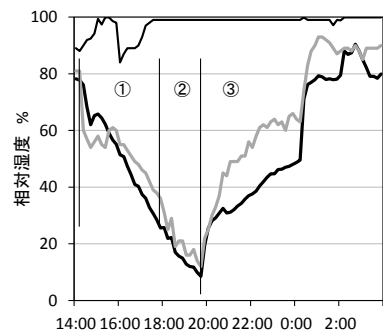
(c-1) 歯舞 B (6月17日) 温度



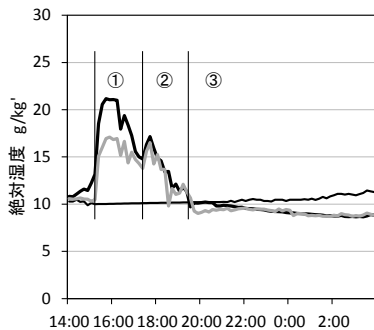
(a-2) 昆布森 A (8月27日) 相対湿度



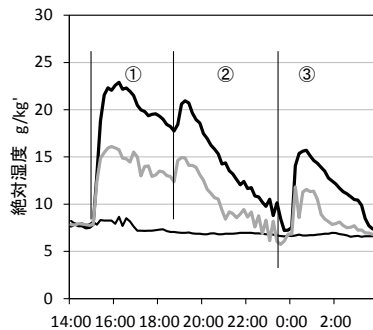
(b-2) 歯舞 A (6月17日) 相対湿度



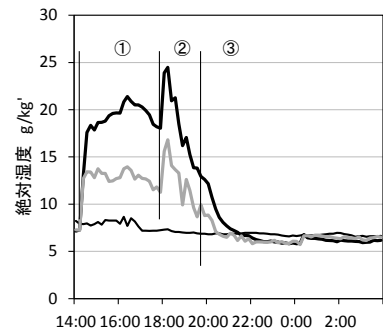
(c-2) 歯舞 B (6月17日) 相対湿度



(a-3) 昆布森 A (8月27日) 絶対湿度



(b-3) 歯舞 A (6月17日) 絶対湿度



(c-3) 歯舞 B (6月17日) 絶対湿度

外気温湿度は吹出し気流の影響を受けるため、昆布森は乾燥前後の測定値を直線補完して用い、歯舞は A、B の測定値のうち低温のデータを採用した。①、②、③は本文の項目に対応している。

図 2-3 代表日の温度、相対湿度、絶対湿度

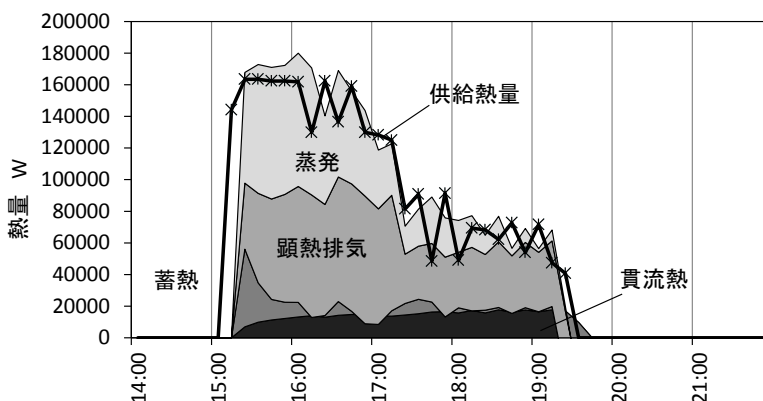
歯舞 A は乾燥機停止後ただちにスプリンクラーによる散水を行い、高湿状態で 3 時間程度放置した後、搬出を行っている。

歯舞 B は乾燥機停止後そのまま放置し、余熱でコンブを完全に乾燥させている。そして 0 時頃、高窓を開放することにより室内の相対湿度を 80%RH 程度まで上げ、コンブを軟化させてから搬出を行っている。

以上のように機械乾燥の制御方法には、漁家ごとに違いが見られた。この違いには、地域によるコンブの種類の違い、気象条件、品質評価の考え方や、生産者の経験による判断が反映されていると考えられる。また、機械乾燥作業は夕方から深夜、早朝に及び、生産者にとっては負担の重い作業となっている。さらに、コンブが長いので、10m 程度の長さのまま乾燥を行っていることも、この地域特有の作業負担になっている。

3) 代表日の熱負荷の内訳

燃料消費量を実測した昆布森 A の、供給熱量と熱負荷の内訳を図 2-4 に示す。乾燥の初期はコンブから大量の水分が蒸発するため、投入熱量の半分程度が蒸発潜熱として消費される。一方、乾燥の後半は蒸発速度が落ちるため、供給熱量の多くが換気により失われることになる。



計算条件

供給熱量=燃料消費量実測値×単位発熱量×機器効率(0.9)

顕熱排気熱=空気比熱×内外温度差×換気量

換気量:強制換気時2,750m³/(h台)、温度差換気時は有効開口0.6m²、高低差4.2mとして温度差の平方根に比例

蒸発熱=蒸発潜熱×空気密度×内外絶対湿度差×換気量

貫流熱=内外温度差×総熱損失係数(728W/K)

蓄熱:壁・屋根合板(t=12)、碎石(t=50)、コンブの水分(固形物量を除く)を熱容量として考慮

図 2-4 供給熱量と熱負荷(昆布森 A、8 月 27 日)

4) 期間中の除去水分量、燃料消費量、熱効率

図 2-5 に実測期間中の燃料消費量、図 2-6 に除去水分量を示す。昆布森 A では平成 25 年度のコンブ操業日数 25 日に対し、乾燥施設が使用されたのは図に記載の 13 日間で、その他は天日乾燥のみで製品化している。また、日によって除去水分量、燃料消費量にばらつきがある。6 月 19 日は悪天候により、生から機械乾燥を行っており、極端に燃料消費量と除去水分量が増えている。

一方歯舞では、一次乾燥後、必ず機械乾燥を行っており、日による水分処理量の違いは比較的少ない。7 月 23 日は悪天候により生から機械乾燥を行っている。1 日のコンブ処理量は乾物量で 250kg 程度であり、歯舞の場合、乾燥コンブ 1kg あたり 0.5~1L 程度の燃料を消費していることになる。

図 2-7 は日別の熱効率である。効率としては、生に近い状態から処理するほうが高くなる。また、歯舞では期間の後半ほど効率が向上する傾向があるが、これは外気温からの加温による上昇温度を同じとすれば、高い外気温から上昇させるほうが乾燥のポテンシャル(湿球温度における飽和絶対湿度と周囲空気の絶対湿度の差)は大きくなり、乾燥が速く進むためだと考えられる。

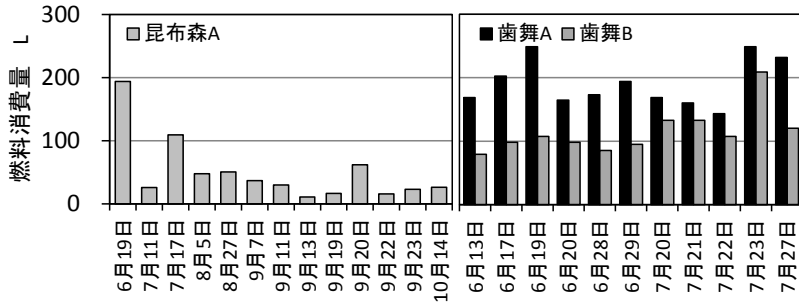


図 2-5 実測期間中の燃料消費量(歯舞は推定値)

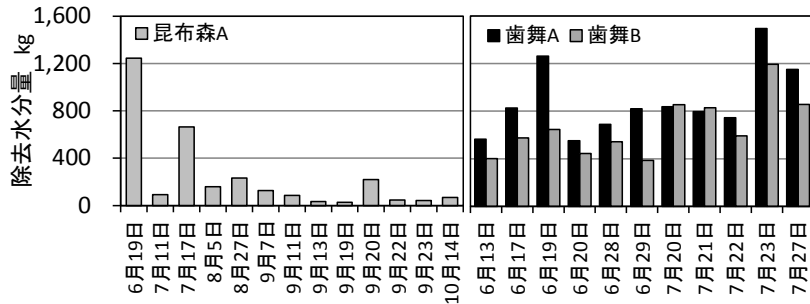
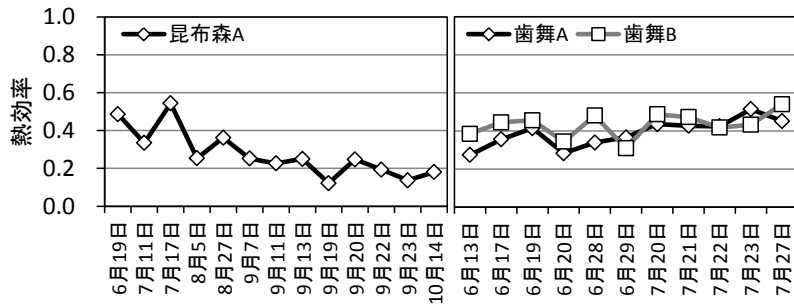


図 2-6 実測期間中の除去水分量



熱効率=蒸発に必要な熱量/供給熱量

図 2-7 実測期間中の熱効率

(2) その他の地域

平成 26 年および 27 年には、羅臼漁協の協力を得て、羅臼地区の乾燥施設 7 棟と保管庫 4 棟で温湿度の実測調査を行った。羅臼地区では、高級出汁昆布である「りしり系えながおにこんぶ」(通称：羅臼昆布)が生産されている。かつては、天日乾燥が行われていたが、40 年程前より機械乾燥が導入され、現在ではほぼ全戸が機械乾燥を行っている。特に、養殖コンブは天候に関わらず連日採取を行うため、生の状態から機械乾燥を行っている。



(a) 乾燥施設外観の例 1



(b) 乾燥施設外観の例 2



(c) 乾燥室内

写真 2-2 羅臼地区のコンブ乾燥施設

平成 26 年および平成 28 年には南かやべ漁協の協力を得て、南茅部地区のコンブ乾燥施設の調査を行った。同地区は、道内最大のコンブ産地で、「まこんぶ」が生産されている。養殖コンブが主であり、干場がないため、全量機械乾燥を行っている。

コンブ長さは 3 メートルほどで、ピンに挟んで吊るしている。レール式の架台を採用している乾燥施設が多いのが特徴で、水平 2 方向、さらに上下方向に台車が動くよう工夫されたものがある。乾燥施設に隣接して、屋外に水切り場を有し、水切りによって機械乾燥時間の短縮を図っているケースもある。



(a) 乾燥施設内



(b) 水切り場



(c) コンブかけ外し場

写真 2-3 南茅部地区のコンブ乾燥施設

(3) 地域別のコンブ乾燥方法

以上の実態調査のほか、一般社団法人北海道水産物検査協会への聞き取りや文献²⁾による情報を参考に、道内のコンブの機械乾燥に関する実態を以下に記す。機械乾燥の方式は多様であるが、漁協単位で見ると地域内ではほぼ同じ方式が採用されている傾向がある。

1) 機械乾燥への依存度

コンブの種類（1 日で乾燥するかどうか）、生産量、気象条件、操業形態（旗採りを行うかどうか）、天然か養殖か、干場の状況、品質の考え方などにより、各地域により機械乾燥への依存度が異なる。

①原則として天日乾燥で仕上げる地域（乾燥施設の保有は一部に留まる地域）

いわゆる「旗採り」により、好天時のみ操業を行う地域では、天日乾燥が主体である。現在でも日高や宗谷の一部では、乾燥施設を保有せず、天日乾燥だけで仕上げる地域がある。日高では、天日乾燥のほうが仕上がりの色艶が良いとされることや、宗谷では、生産量が少ないため機械乾燥のコストメリットが出にくいことも、天日乾燥が維持されている要因になっていると考えられる。

②補助的に機械乾燥を行う地域（乾燥施設を保有するが、好天時は天日乾燥だけで仕上げる地域）

釧路は、天日乾燥主体であるが、途中から天候が悪くなった場合には機械乾燥を使用する。これは、釧路特有の気象条件によるものと考えられる。宗谷地区にも同様の地域がある。

③一次乾燥後に機械乾燥を行う地域

根室では天日による一次乾燥後、機械乾燥で仕上げることを基本としている。これは、気象条件のほか、根室のコンブの特徴として、天日だけで仕上げると焼けたように色が変わる要因になっている。

④生から機械乾燥を行う地域

養殖コンブは天候に関わらず採取することができるため、基本的に機械乾燥を行っている。このうち利尻や、道南の上磯以西では、天日による一次乾燥を併用しているが、南茅部や羅臼では生から機械乾燥を行っている。南茅部は干場が十分に確保できないことや、機械乾燥のほうが黒く一様に仕上がること、羅臼ではテトラポットによる干場の環境変化や、機械乾燥のほうが艶や旨味の点で優れているとされることが機械乾燥導入の要因となっている。また、天日乾燥が可能な地域でも、雄武など他の漁種との兼業のため、作業上の効率を考えて生から機械乾燥としている場合がある。

2) 機械乾燥を行う時間

釧路など補助的に機械乾燥を行う地域では、天候次第で2時間～10時間以上（生がけの場合）と、日により変化する。基本的には20時頃までに仕上がるよう、タイミングを見計らって、干場から乾燥施設にコンブを移すこととなる。

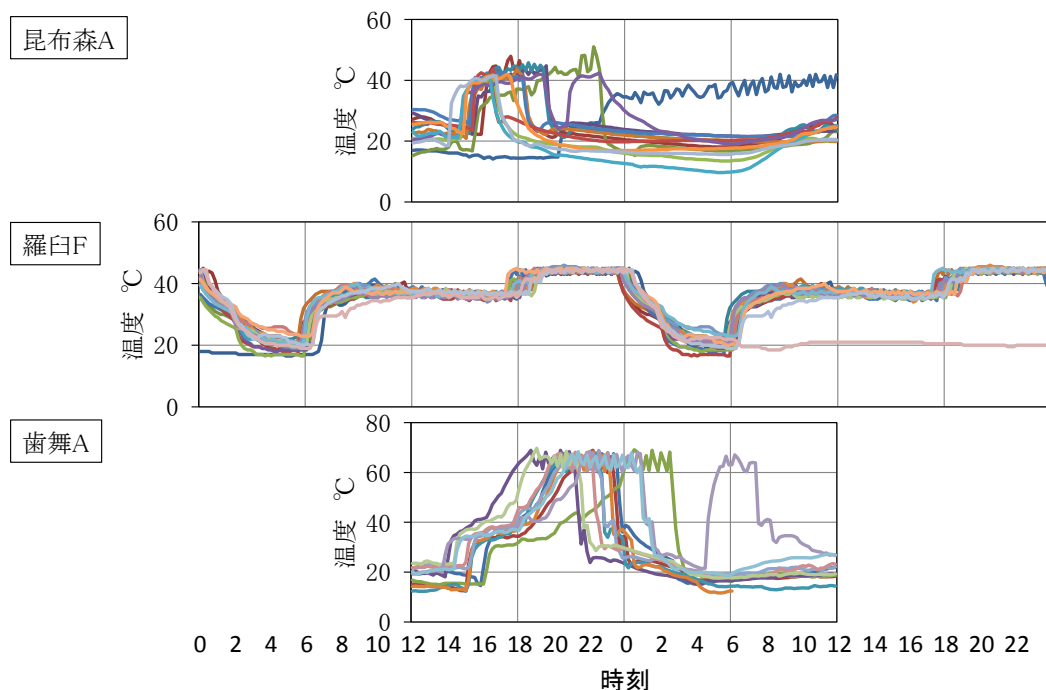
根室では一次乾燥後、午後のほぼ一定の時間に乾燥施設に移すが、天候の具合により、乾燥終了が深夜0時前後になるケースがある。

南茅部では、乾燥所要時間は8～10時間程度で、同じ乾燥施設で1日2回乾燥させる場合と、乾燥施設を複数保有し、併行して乾燥を行う場合がある。1日2回乾燥させる場合は、2回目を翌朝までかけるか、乾燥機を高出力として22時頃までに終わらせるかであるが、時間的な作業負担を減らすため、乾燥施設を複数保有し、当日18時頃までに乾燥を終わらせるケースも増えてきている。

羅臼では、乾燥時間が20時間前後と長く、深夜2時から早朝6時ごろの時間帯にコンブの掛け外しを行っている。

3) 設定温度

乾燥時の設定温度については、低すぎても高すぎても品質（色味や白粉）に影響が出るとされ、各地区の事情によって温度が設定されている。図2-8に3地区における温度の実測例を示す。基本的に各地域とも、前半は全外気導入または一部内気循環で運用し、後半に内気循環として温度を上げる。前半の温度は30℃から40℃程度の場合が多い。後半は、一般的には50℃程度であるが、根室地区では60℃以上に昇温させている漁家もある。羅臼は40度程度の比較的低温で長い時間かけているが、肉厚である「もと」の部分が乾燥するまでに時間がかかる（温度を上げて他の部分が速く乾燥したとしても「もと」の部分には水分が残る）ためであると思われる。



各地区における乾燥施設使用日の乾燥室の変化を、時間軸を重ねて示したもの。

昆布森A、歯舞Aは乾燥室中央付近の温度

羅臼Fは乾燥室隅角部（吹出し側・排気側の2点平均、高さ約2m）

図2-8 各地区の乾燥施設の温度推移

4) 乾燥中の作業

乾燥の速度は、湿球温度における飽和絶対湿度 H_m と周辺空気の絶対湿度 H の差 $H_m - H$ に依存する。コンブが十分に湿っている前半は $H_m - H$ が小さくても乾燥が進むが、コンブの表面が乾いてくると、 $H_m - H$ を大きくとらないと乾燥が進まなくなる。乾燥中はコンブの状況をみながら、外部扉の開閉、排気ファンの発停、乾燥機の温度設定、循環空気開口の開閉などにより、 $H_m - H$ を確保するとともに、排気による損失が少なくなるよう、徐々に内気循環量を増やしていく。

図 2-9 に羅臼地区 7 件の乾燥施設における $H_m - H$ の推移の比較を示す。温度設定は同様にみえても、 $H_m - H$ の推移は漁家による差が顕著に現れる傾向があり、羅臼 C、D は前半 $H_m - H$ が 2g/kg 程度と非常に小さい値で運転を開始している一方、羅臼 D、E、G は他の漁家よりも $H_m - H$ が大きく、必要以上に昇温や外気導入を行っている可能性がある。

また羅臼 B を除き、途中で $H_m - H$ の傾向が変化していることから、何らかの操作を行っていることがわかるが、特に羅臼 C は途中で 5 回の操作を行い、 $H_m - H$ を徐々に大きくしている。このほかにも、グラフには表現されていないが、風に揺られてくっついた昆布を剥がす作業や、乾燥状態の悪い場所のコンブを動かして乾燥むらを改善する作業が途中で必要であり、暑熱環境下のため体力的に負担の大きな作業となっている。

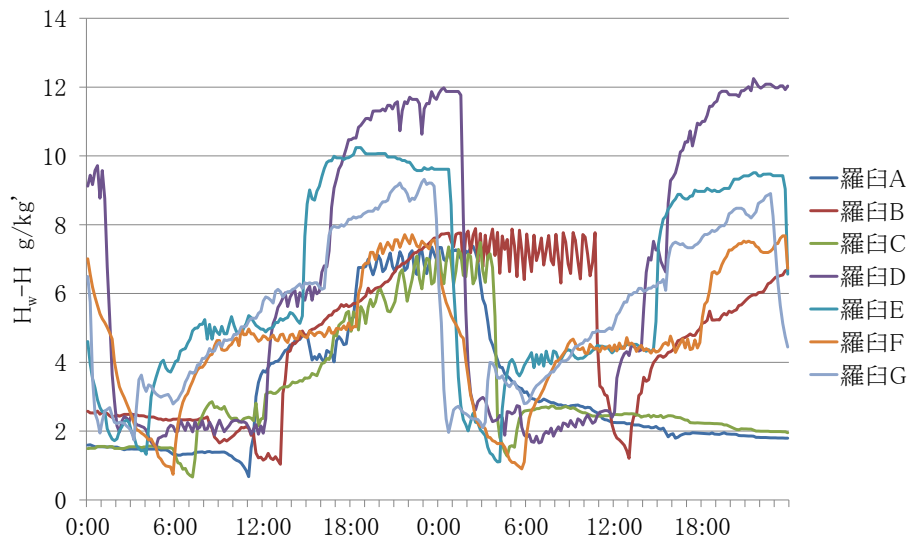


図 2-9 羅臼地区における $H_m - H$ の推移の比較 (吹出し側・排気側の 2 点平均、高さ約 2m)

5) コンブの干し方

① 棒にかける

「ながこんぶ」は長いため、棒にかけて吊るす。棒はコンブの変色や滑りを防止するため、ネットで覆われている。釧路地区の場合、コンブを Λ 型に棒にかけ、すべてかけ終わった後、架台ごと滑車で上方に異動させる。それでもコンブが床につくほど長いときは、一部 M 字状に折り返す。根室では、棒にコンブを M 字状に折り返してかける。

乾燥終了後はコンブに柔軟性がなくなるため、そのままでは棒から外せなくなる。そのため、再度コンブに水分を含ませる軟化処理を必要とし、高窓開放や排気ファンを用いた強制給気により朝方の高湿な外気を導入するか、スプリンクラーなどによる水分噴霧が行われる。根室地区では水分噴霧を行うケースも多いが、釧路と比べて根室のコンブは「みみ」がありくつきやすいことも影響していると言われる。通常外気導入で軟化処理可能な場合でも、生から乾燥を行った場合は、コンブ同士がくっついた部分を剥がすため、水かけが必要となる場合もある。

②ピンに挟んでつるす

長さの比較的短い羅臼昆布や「まこんぶ」は、ピンで挟んで棒から吊るす。コンブの頭を上にするかしっぽを上にするかは地域により違いがある。南茅部では、ピンの位置が高さ3m以上にあるため、脚立に上って掛けるか、上下移動機構を持つ架台を用いている。ピンに挟んで吊るすケースでは、乾燥室内での軟化处理は必須でない。

③寝かせて並べる

実態調査を行った地域では行われていなかったが、渡島の一部や宗谷では、のし昆布を作るため、あらかじめ切ったコンブをキャスター付きの台車に寝かせて並べる方法を採用している。

(4) 既存乾燥施設における課題

以上の実態調査から、既存乾燥施設においては、以下のような課題が挙げられる。

- ・既存乾燥施設はすべて熱風乾燥を採用しており、排気による損失が大きい。また、熱源は灯油または重油のため、原油価格変動の影響を受けやすい。
- ・乾燥中は、乾燥むらの抑制や軟化处理のため、何度も乾燥室に入っただけの操作が必要であり、時間的、体力的な負担が大きい。
- ・コンブ生産は、コンブの採取から乾燥まで、漁家単位で行われている。早朝から深夜まで人手を要する作業が断続的に生じ、少子高齢化、核家族化が進む中で、家族による作業は難しくなる状況が生じている。一方で、従来からアルバイトに頼る部分も多かったが、近年はアルバイトの確保が非常に厳しくなっている。
- ・従来、天日乾燥主体の地域においても、アルバイトの確保困難などを背景に、生がけ機械乾燥を導入する動きが見られる。
- ・建屋については、南茅部の一部乾燥施設を除き木造で簡素な構造であるが、良好な状態で維持されている。そのため、建屋はそのままとして、乾燥機のみ10～20年程度で入れ替えを行っているケースが多い。

[参考文献]

- 1) 立松宏一・遠藤卓・月館司・鈴木大隆・福士暁彦・木村 稔・飯田憲一・鶴谷知洋：釧路・根室地域におけるコンブ乾燥施設の温熱環境・エネルギー実測調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol. 87，pp. 221-224，2014. 6
- 2) 北海道ぎょれん広報なみまるくん，北海道漁業組合連合会，No. 328，2016. 2

3. 実験室実験におけるコンブの乾燥特性の把握

(1) 乾燥特性

1) 目的

コンブの乾燥速度は、先に述べた湿球温度における飽和絶対湿度 H_m と周辺空気の絶対湿度 H の差 $H_m - H$ に依存するほか、周囲の風速や、そのときのコンブの含水率にも影響すると考えられる。コンブの乾燥に要する時間やエネルギーを予測するためには、コンブの乾燥速度とこれらの要因の関係を把握する必要がある。平成 27 年～28 年に実施した実証プラントにおける試験においても、乾燥特性の把握を行ったが、ここでは、先行して平成 25 年～26 年に実施した、実験室実験による乾燥特性の把握について報告する。

2) 試験方法

試験装置の写真を 3-1 に示す。試験装置は、北方建築総合研究所の安定性試験器（エスペック製 CRH-220）の中に設置した。試験体（コンブ）の寸法は長さ 25cm、幅は 10cm 以内とする。試験体は回転可能なクリップにより、ロードセルから吊り下げられ、常時重さを測定することができる。ロードセルは、温湿度環境により誤差を生じるため、毎回の試験の開始・終了時に分銅による校正を行った。なお、写真 3-1 では、コンブの下方もクリップで挟んでいるが、測定時には下方のクリップは取り付けていない。

試験装置の内部は正方形断面の風道としており、前面は取り外し可能な透明アクリル板としている。風洞の風上側には整風板、風下側に排気ファンを設けており、開口の調整により風量を加減できる。

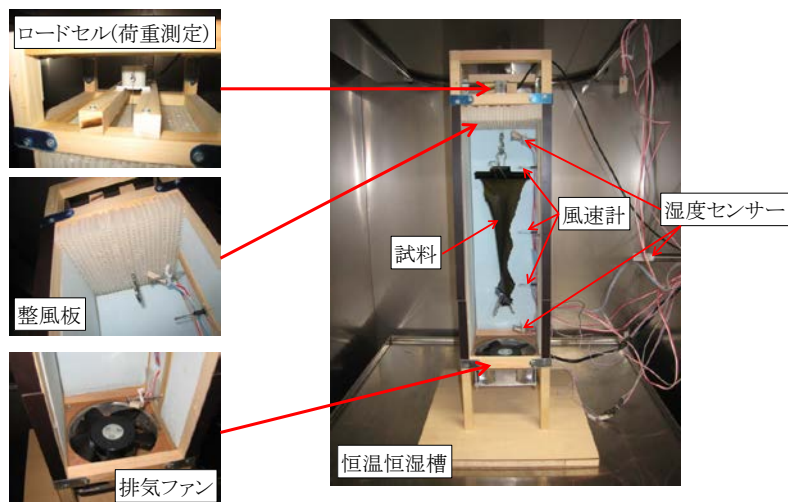


写真 3-1 乾燥特性の試験装置

3) PVA の乾燥特性

札幌の工業試験場敷地内で行う実証プラントの試験は、コンブの輸送の関係から、実物のコンブを使用するのが困難なため、代替試験体を必要とした。各種材料を模索した結果、吸水クロスに使用される、PVA(ポリビニルアルコール、写真 3-2)が、比較的コンブと近い乾燥特性を有することがわかった(図 3-1)。なお、図 3-1 の乾燥速度は、絶対乾時(PVA は 50°C、コンブは 105°C で 24 時間以上乾燥)の試験体重量当たり、1 秒間に蒸発する水分量としている。

次に温湿度を 40°C80%RH、40°C60%RH、30°C40%RH、50°C50%RH、40°C40%RH、50°C40%RH、50°C30%RH の 7 条件、風速を 2m/s、1m/s、ファン停止の 3 条件として、ある含水率の範囲ごとに $H_m - H$ と乾燥速度の関係をプロットすると、図 3-2 のようになった。減率乾燥期間に移行しているとみられる含水率 100% d. b. 以下においても、 $H_m - H$ と乾燥速度が比例関係で表現できることがわかる。

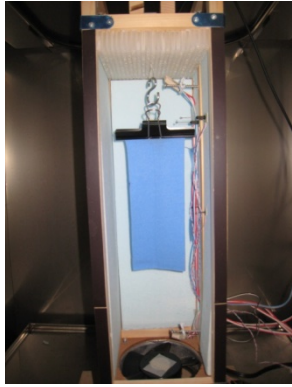


写真 3-2 PVA の試験状況

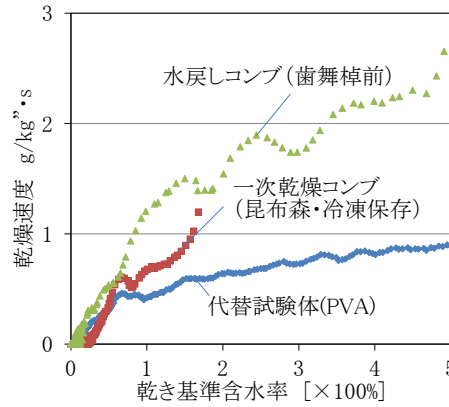


図 3-1 コンプと PVA の乾燥速度曲線 (40°C40%RH、風速 2m/s)

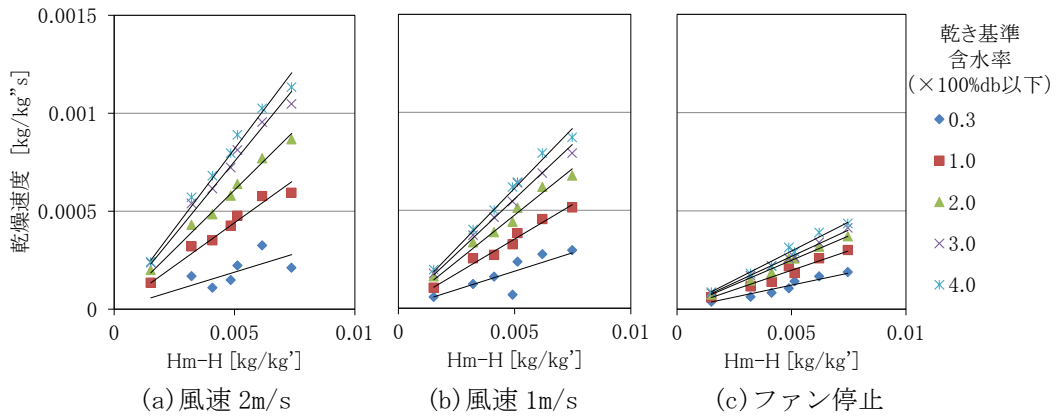


図 3-2 H_m-H と乾燥速度の関係 (PVA)

3) コンプの乾燥特性

次に、PVA と同様に、コンブを用いて試験を行った。コンブは昆布森産で、釧路水産試験場加工利用部で一次乾燥後冷凍保存を行い、北方建築総合研究所に冷凍状態で輸送されたものを、試験前に冷蔵庫内でドリップ（細胞内の水分が解けて浸出したもの）がなるべく出ないように緩慢解凍を行ったものを使用した。 H_m-H と乾燥速度の関係を図 3-3 に示す。コンブは工業製品である PVA と比べるとばらつきが大きいため、各条件でサンプル数を 3 とし、温湿度 10 条件×風速 3 条件×3 サンプル=90 回の試験を行った。なお、図 3-3 の含水率は、乾燥終了時（概ね 24 時間以上経過）の乾き基準含水率から、相対湿度ごとに平衡含水率を仮定し（図 3-4 参照）、乾き基準含水率から平衡含水率を差し引いた自由含水率を採用している。

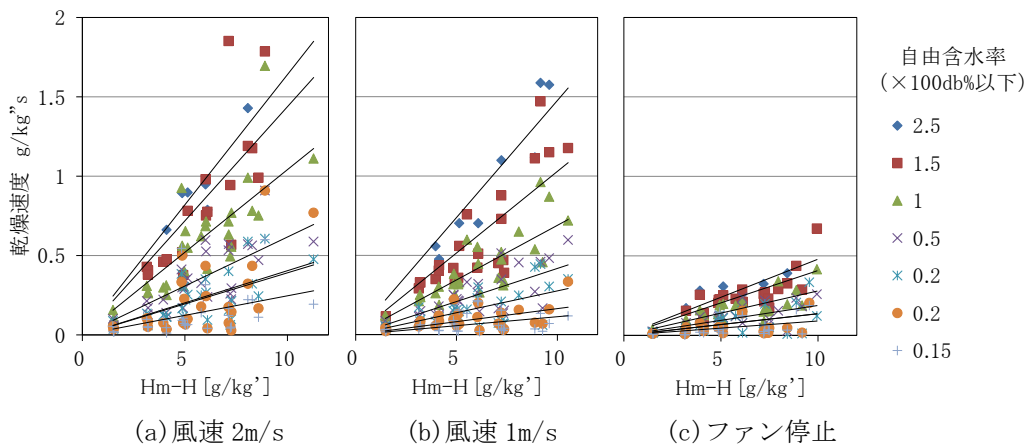


図 3-3 H_m-H と乾燥速度の関係 (冷凍後コンブ)

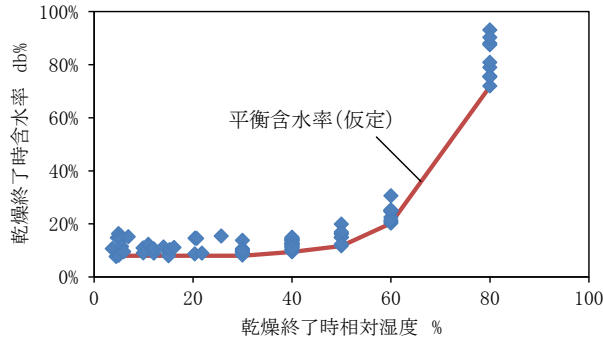


図 3-4 平衡含水率の仮定

図 3-3 から、ある含水率のとき乾燥速度は $H_m - H$ は比例関係にあると考え、乾燥速度を次式で表すこととする。

$$R_c = f(W_f) \times (H_m - H) \quad (3-1)$$

R_c : 乾燥速度 [kg/kg"s]、 W_f : コンブの自由含水率 [%db]

$f(W_f)$ はコンブの自由含水率の関数であり、図 3-5 に示すように、自由含水率と $f(W_f)$ の関係をプロットすると、各風速条件ごとに、原点を通る 2 次関数で良く近似できることがわかった。

以上の整理により、周囲の風速と温湿度、そのときの自由含水率を与えれば、乾燥速度が求まることとなり、コンブの乾燥特性を定式化することができた。

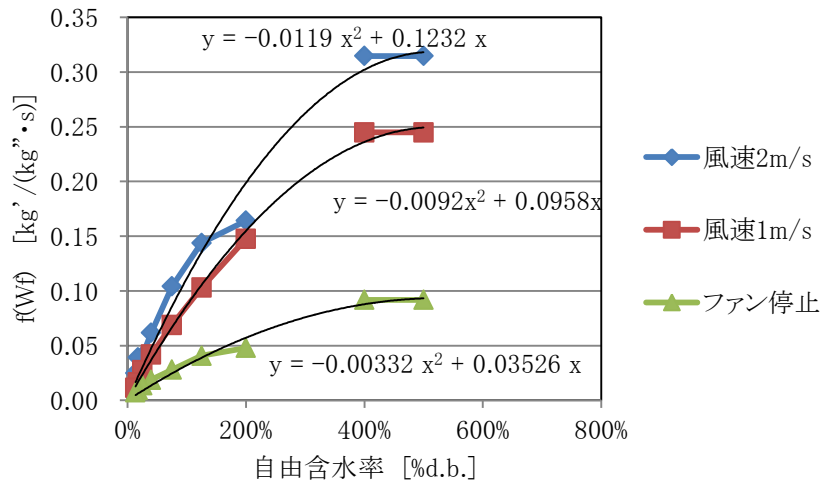


図 3-5 自由含水率と $f(W_f)$ の関係

(2) 軟化特性

1) 検討の概要

実態調査で確認したように、コンブの種類によっては、乾燥終了後、コンブを乾燥室から取り出し、結束して倉庫に保管するために、軟化処理が必要となる。軟化処理は外気導入または水分噴霧により行われる。ここでは外気導入により軟化処理を行うことを想定し、外気の温湿度条件と軟化に要する時間の関係を把握することを目的として実験を行った。

2) 実験概要

試験は、北方建築総合研究所の安定性試験器（エスペック製 CRH-220）の恒温恒湿槽内で行った。恒温恒湿槽内の平面図を図 3-6 に示す。コンブの支持板を 200mm 間隔で配置し、あらかじめ恒温恒湿槽内を所定の温湿度に設定し、安定した後、支持板に乾燥コンブを載せた。

実験の様子を写真 3-3 に示す。試験開始後、コンブが水分を含むと、自重で徐々に下方にたわむ。そこで、レーザー変位計（OMRON 製 ZX2-LPA）を木枠に取り付け、コンブとの距離（図 3-7 参照）を継続的に測定した。また、コンブ表面の凹凸が測定値に影響を及ぼすため、レーザーの受光点に円形のプラスチック板を載せた。最終的にコンブは支持板から脱落して、距離測定が不能となる。この落下により測定不能となるまでの時間を、軟化所要時間として評価することにした。

試験体外観を写真 3-4、絶乾時の試験体概要を表 3-1 に示す。コンブは面密度にばらつきがあるため、面密度が異なる 3 サンプル用意し、同じサンプルを用いて繰り返し試験に使用した。なお、絶乾時の重さは、すべての試験終了後に 105℃の乾燥機に 24 時間以上入れて計測した。

各試験の実施前に 50℃の乾燥機で 24 時間以上養生し、乾燥させた。乾燥機に入れる際にコンブがなるべく平滑に仕上がるよう、金網ではさむなどの工夫を行った（写真 3-5）。

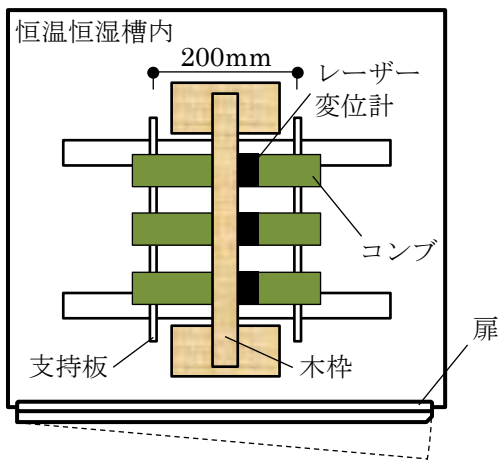


図 3-6 恒温恒湿槽内の上から見た図

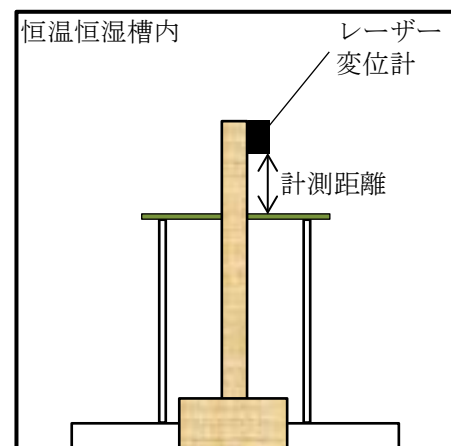


図 3-7 恒温恒湿槽内の手前から見た図

表 3-1 絶乾時の試験体概要

試験体	質量[g]	面積[cm ²] (横cm × 縦cm)	面密度[g/cm ²]
①	3.87	150.00 (6.00 × 25.00)	0.03
②	5.73	150.00 (6.00 × 25.00)	0.04
③	5.71	91.00 (3.50 × 26.00)	0.06

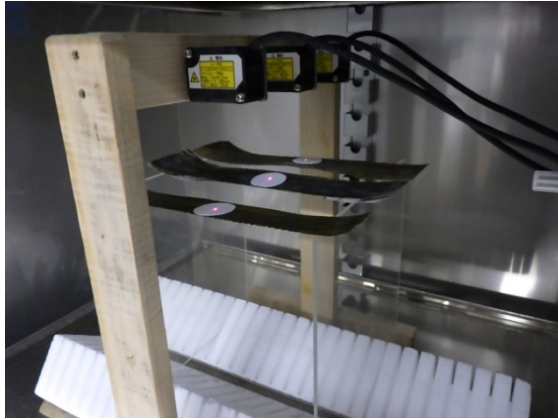


写真 3-3 実験風景

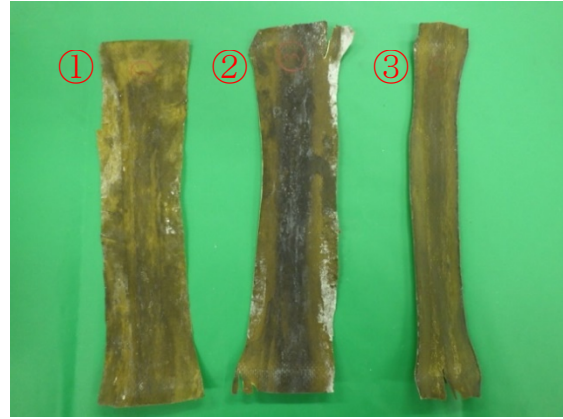


写真 3-4 試験体外観

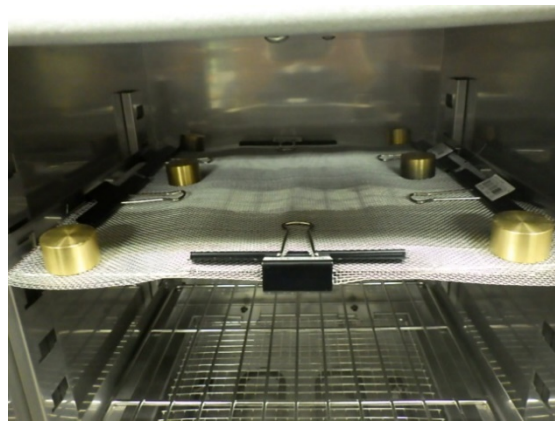
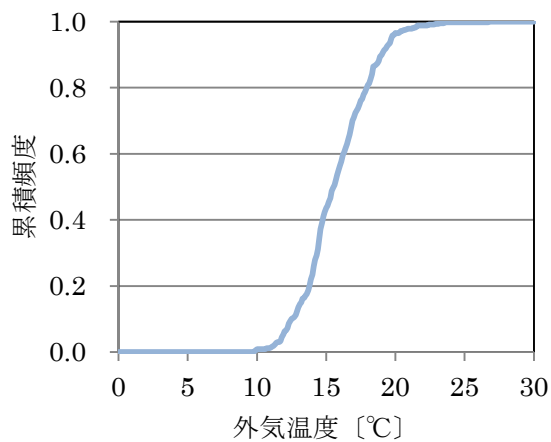


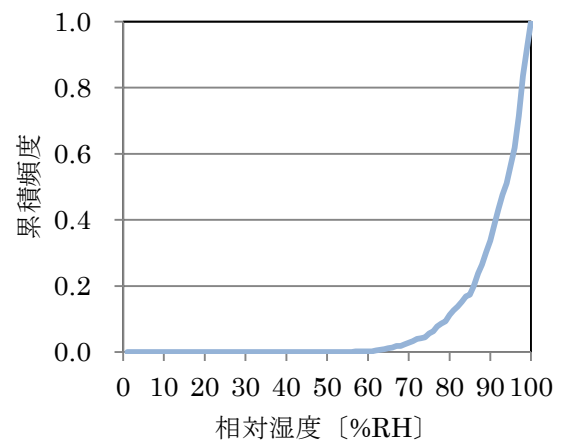
写真 3-5 乾燥機における乾燥状況

3) パラメータの設定

拡張アメダス気象データ（日本建築学会）に収録されている釧路（地点番号 110）の標準年の外気温度および相対湿度の累積頻度を図 3-8 に示す。図中に示されている外気温度および相対湿度はコンブ漁が行われる 7～8 月における午前 3 時～午前 9 時の集計を示している。外気温度は 15℃付近、相対湿度は 90%RH 付近に集中していることから、温湿度の条件は①15℃80%RH、②15℃90%RH、③20℃80%RH、④20℃70%RH とする。



(a) 外気温度の累積頻度



(b) 相対湿度の累積頻度

図 3-8 釧路の気象条件（7、8月の朝3時から朝9時まで）

湿気伝達率は風速に依存することから、風速が大きいほど軟化は速やかに進行すると予想される。恒温恒湿層内は気流が生じているため、より不利な試験条件とするため、風防を設けてコンブ周囲の風速が概ね 0.4m/s 以下になるよう調整した。

4) 実験結果

設定温湿度ごとに落下するまでの所要時間を表 3-2、測定距離の変化を図 3-9 に示す。表 3-2 の色つきのセルは 2 時間を超過しているものである。図 3-9 では、コンブを恒温恒湿槽内へ投入した時刻を 0min としており、図中の×が落下を示している。表 3-2 から、相対湿度が高いほど軟化が速いこと、同じ相対湿度でも温度が低いと軟化が遅くなること、コンブの面密度が大きいほど軟化に時間がかかることがわかる。2 時間以内に軟化可能な条件は 20°C80%RH 以上であり、15°C90%RH 条件でも概ね 2 時間で軟化している。

表 3-2 軟化処理所要時間 (分)

設定温湿度	試験体		
	①	②	③
15°C80% RH	43	88	161
15°C90% RH	40	92	124
20°C80% RH	28	50	84
20°C70% RH	112	213	293

また、上記試験とは別に 20°C80%RH 条件下において、コンブ落下後、速やかにコンブの質量を測定し、落下時の質量含水率を算出した。質量含水率 u は乾き基準 [% (d. b.)] とし、下式から算出している。

$$u = \frac{W_W - W_D}{W_D} \quad (3-2)$$

W_W : 軟化処理後のコンブ質量 [g]

W_D : 絶乾時のコンブ質量 [g]

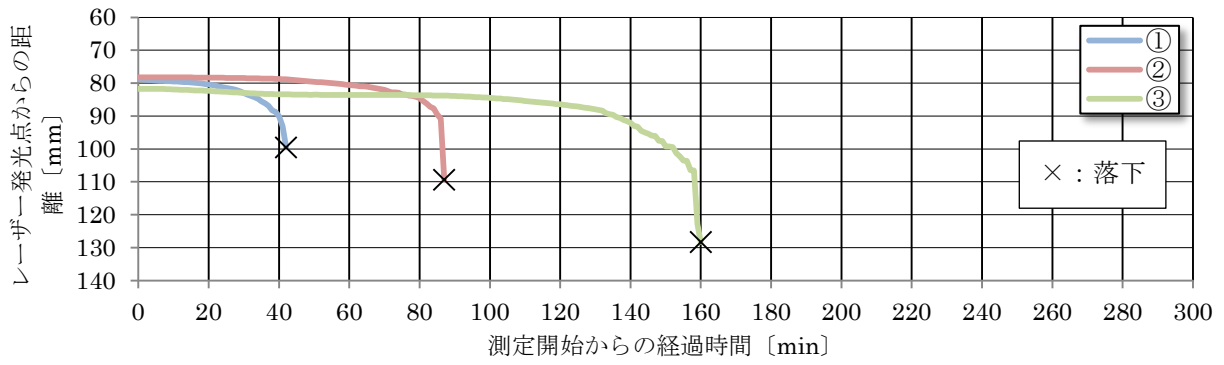
落下時の含水率は表 3-3 に示すとおりで、概ね 22~26% (d. b.) であった。触った感じでもコンブを取り外すには十分な程度に軟化していることを確認した。

表 3-3 落下時の含水率

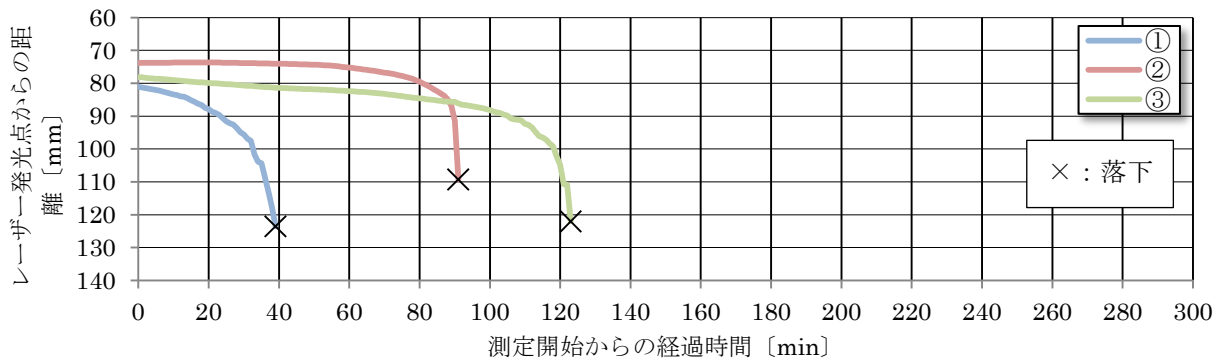
	①	②	③
絶乾時質量 [g]	3.87	5.73	5.71
落下時質量 [g]	4.74	7.14	7.17
含水率 [% (D.B.)]	22.5	24.6	25.6

5) 小括

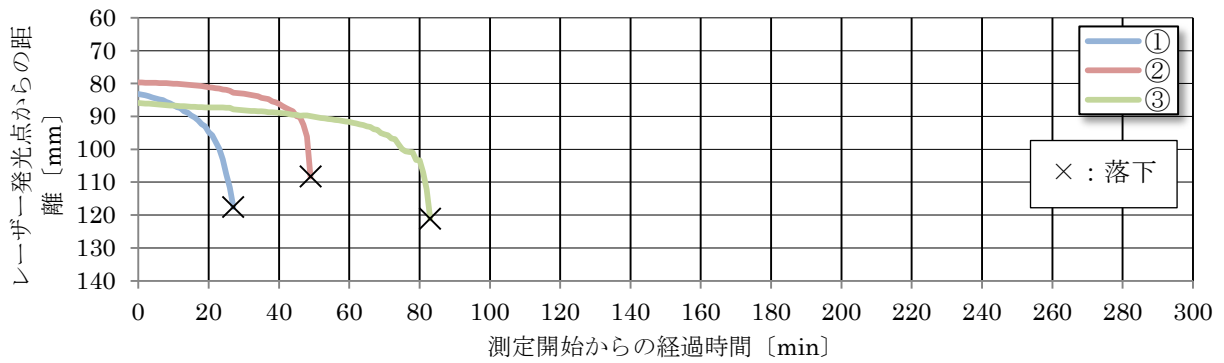
コンブの軟化処理に要する時間と温湿度条件の関係を明らかにするために実験室実験を行った。15°C90%RH または 20°C80%RH 程度以上の高湿な外気を取り入れることができれば 2 時間程度に軟化処理が可能であり。釧路の夏季朝方の気象条件を想定すると、外気導入による軟化処理も十分に可能であることを確認した。



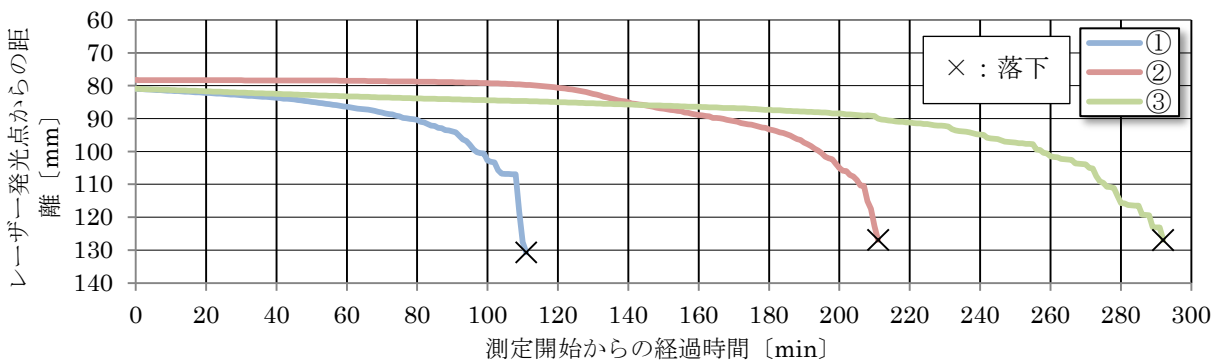
(a) 15°C80%RH



(b) 15°C90%RH



(c) 20°C80%RH



(d) 20°C70%RH

図 3-9 コンプのたわみ量の変化

4. 実証プラントにおける検証

(1) 実証プラントの概要

本研究で開発するコンブ乾燥システムは、排気による熱損失の少ない、ヒートポンプを用いた除湿乾燥システムである。従来型システムとの比較を図 4-1 に示す。

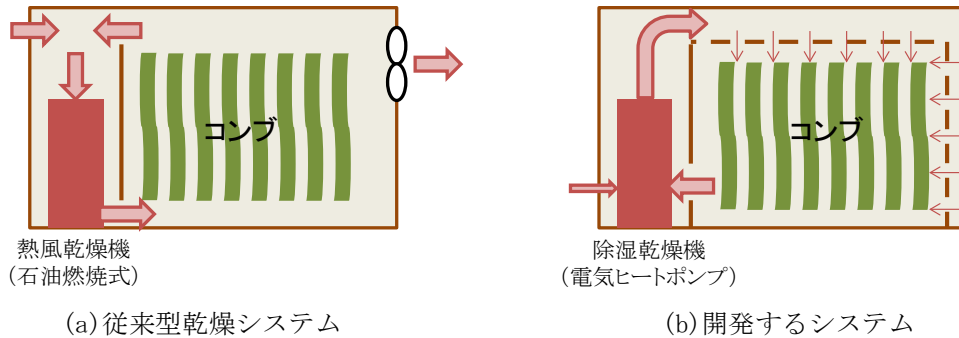


図 4-1 従来システムと開発システムの比較

システム開発のため、本研究の共同実施者の工業試験場において、実証プラントを構築した。実証プラントの断面図を図 4-2 に、内外観、試験状況を写真 4-1 に示す。

実証プラントは、実態調査における「歯舞 A」の乾燥施設の 1/9 スケールを想定しており、機械室と乾燥室から構成される。機械室には、既成のヒートポンプ除湿乾燥機が設置されている。乾燥室には、釧路、根室地区の既存乾燥施設と同様に、ネットを巻いた棒を配置し、コンブを A 字状に掛ける。棒の端部には図 4-3 に示すようにロードセルを配置し、棒単位および全体のコンブの重さが継時的に測定できる。その他、温湿度、風速、除湿乾燥機の有効消費電力などを測定するセンサーを設置している。

乾燥室の外周は 50mm 厚程度の断熱材で断熱されており、内側は防湿フィルムで防湿・気密処理を行っている。コンブを掛ける木の棒は、吸放湿の影響を排除するため、アルミテープで被覆している。

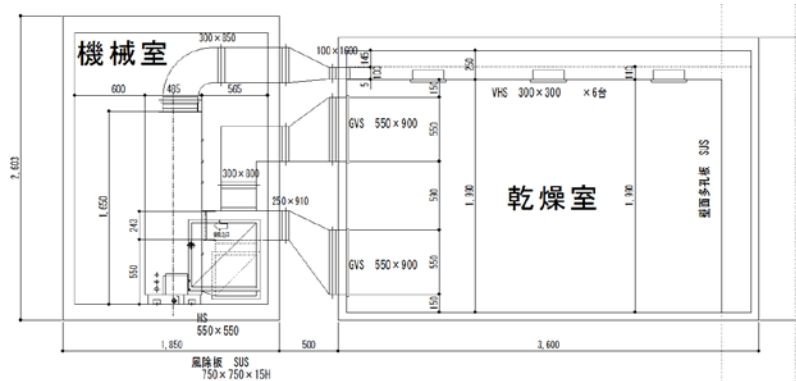


図 4-2 実証プラントの断面図



(a) 外観

(b) 内観

(c) コンブを掛けた状況

写真 4-1 実証プラント内外観、試験状況

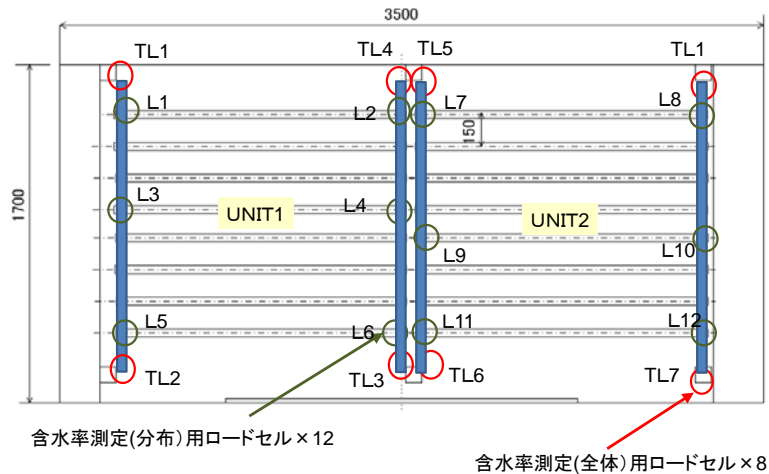


図 4-3 ロードセル設置位置

(2) 除湿器特性の把握

実証プラントで使用した除湿器は、三菱電機製産業用除湿機 RFH-P5A である。シミュレーションに必要な性能特性について、実証プラントで検証を行った。

図 4-4 の折れ線は、メーカー技術資料に記載されている除湿特性である。実験においては、より低湿度域で運用されている時間帯があったため、低湿度域における実測データを追加した上で、室内吸込み空気乾球温度を変数とする除湿量の近似式を作成した。

図 4-5 は消費電力の測定例である。消費電力は、除湿運転時、冷却運転時、送風のみ運転時の 3 パターンに分けられる。除湿運転時の消費電力は吸込空気の温湿度のほか、除湿運転開始からの経過時間によっても変動するが、一定の傾向を見出せなかったため、平均値（一定の値）を用いた。

以上の除湿機の特性を表 4-1 にまとめて示す。

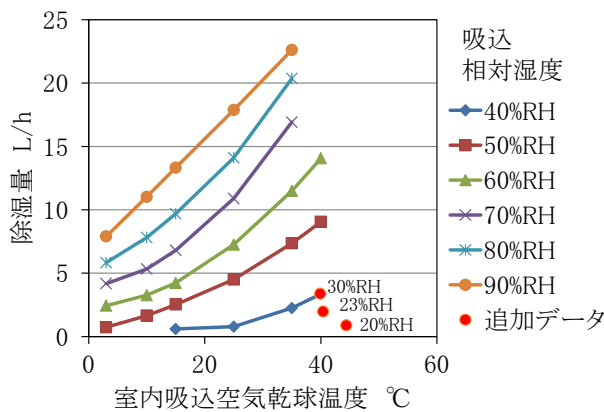


図 4-4 除湿量

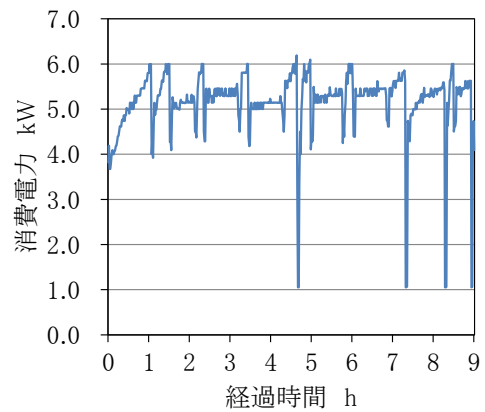


図 4-5 消費電力

表 4-1 除湿器特性の設定

項目	値の設定	根拠	
除湿量	$-0.78 \theta_{1db} + 1.16 \theta_{1wb} + 3.32$ [kW]	メーカー技術資料と実測データより (図 4-4)	
冷却熱量	$-0.12 \theta_{odb} + 0.38 \theta_{1wb} + 9.64$ [kW]	メーカー技術資料からの近似式	
消費電力	除湿運転時	5.4kW	実測データ (図 4-5)
	送風運転時	0.64kW	機器仕様
	冷却運転時	$0.053 \theta_{odb} + 0.022 \theta_{1wb} + 2.87$ [kW]	メーカー技術資料からの近似式
循環風量	70m ³ /min	機器仕様	

θ_{1db} : 室内吸込乾球温度 [°C]、 θ_{1wb} : 室内吸込湿球温度 [°C]、 θ_{odb} : 室外吸込乾球温度 [°C]

(3) コンプの乾燥特性

実証プラントにおける試験結果から求めたコンプの乾燥特性を図4-6に示す。図3-5と比較すると、実験室実験におけるファン停止時よりも、乾燥速度が遅い結果となった。これは、コンプの実入りや、実験室実験ではコンプを一度冷凍していること、実験室実験では周囲の放射温度が空気温度とほぼ同じになるが、実証プラントでは対面するコンプの表面温度となる（湿球温度に近い値になると考えられる）ことなどが影響していると考えられる。

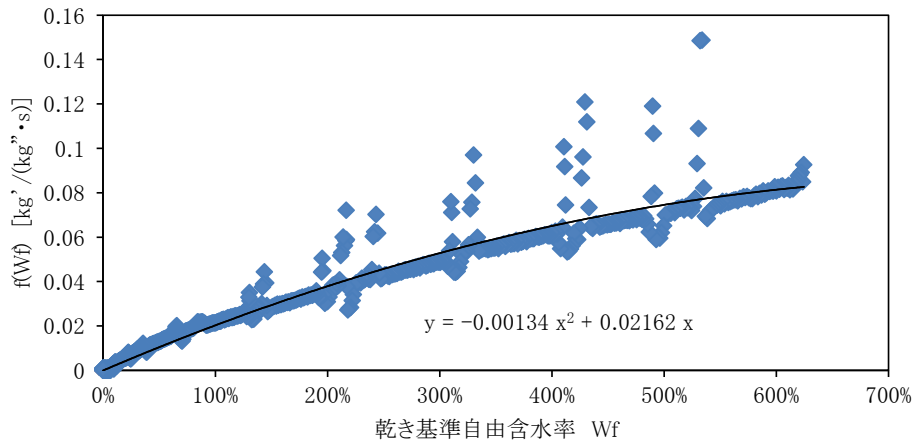


図4-6 実証プラントにおけるコンプの乾燥特性（平成27年8月17日の試験結果より）

(4) 密度試験

1) 実験の目的と方法

棒にコンプを掛ける際、コンプの間隔を大きく確保することで風まわりが良くなり乾燥速度が速まると考えられる。一方、建屋の建設コストを考慮すると、可能な範囲でコンプのかけ密度を大きくすることも望まれる。掛け密度が大きい場合でも、強制的に気流を与えることで、乾燥速度が向上する可能性もある。そこで、コンプをかける棒の間隔と、棒に干すコンプの本数、ファンの有無をパラメータとして、乾燥速度の比較実験を行った。

写真4-2に、密度試験に使用した装置を示す。棒の間隔は3種類で、気流に平行な面は上部を除き対象境界面と考えて風防で囲った。風防の高さは1,000mm、奥行きは508mmである。表4-2に実験のパラメータを示す。実証プラントにおけるコンプのかけ密度と同等の「標準密度」と、そのおよそ倍の本数のコンプを掛けた「倍密度ファンなし」、さらに倍密度の場合はヒートポンプの吹き出し気流と平行に、乾燥枠の上流側からファンで送風を行った「倍密度ファンあり」の3条件で実験を行った。



(a) 枠（棒間隔は左から80mm、120mm、160mm）



(b) 実験状況（倍密度）

写真4-2 密度試験装置

表 4-2 実験条件

実験条件	棒間隔(芯々)	実測掛け密度 kg''/m^3
標準密度	80mm間隔	3.4
	120mm間隔	2.5
	160mm間隔	2.1
倍密度ファンなし	80mm間隔	8.1
	120mm間隔	5.4
	160mm間隔	4.5
倍密度ファンあり	80mm間隔	8.4
	120mm間隔	5.4
	160mm間隔	4.7

kg'' はコンブの絶乾質量

2) 実験結果

各条件における含水率の段階ごとの $f(W_f)$ の値を図 4-7 に示す。120mm 間隔で $f(W_f)$ が大きい（乾燥が速い）傾向があるが、120mm 間隔の棒を乾燥室中央に配置したため、除湿機からの吹出し気流の影響を受けやすいことが原因として考えられる。また、倍密度としても、棒間隔 120mm 以上の条件では、ファンで気流を与えることで標準密度の場合と同等以上の乾燥速度を確保できることがわかる。

各条件において、熱線風速計を用いて、コンブ間の風速を測定した。倍密度条件におけるコンブ周辺風速と $f(W_f)$ （自由含水率 100% d. b. -500% d. b. の区間の平均値）の関係を図 4-8 に示す。風速と $f(W_f)$ の間には直線的関係が見られる。

シミュレーションにおいては、風速とコンブの含水率に応じて、 $f(W_f)$ の値を仮定する必要がある。図 4-6 における自由含水率 100% d. b. -500% d. b. の区間における $f(W_f)$ の平均値は $0.050 [\text{kg}''/(\text{kg}'' \cdot \text{s})]$ であるので、 $f(W_f)$ は次式で表現する。

$$f(W_f) = (-0.00134W_f^2 + 0.02162 \times W_f) \times (0.159 \times V + 0.0132) / 0.050 \quad (4-1)$$

V : コンブ周囲の風速[m/s]

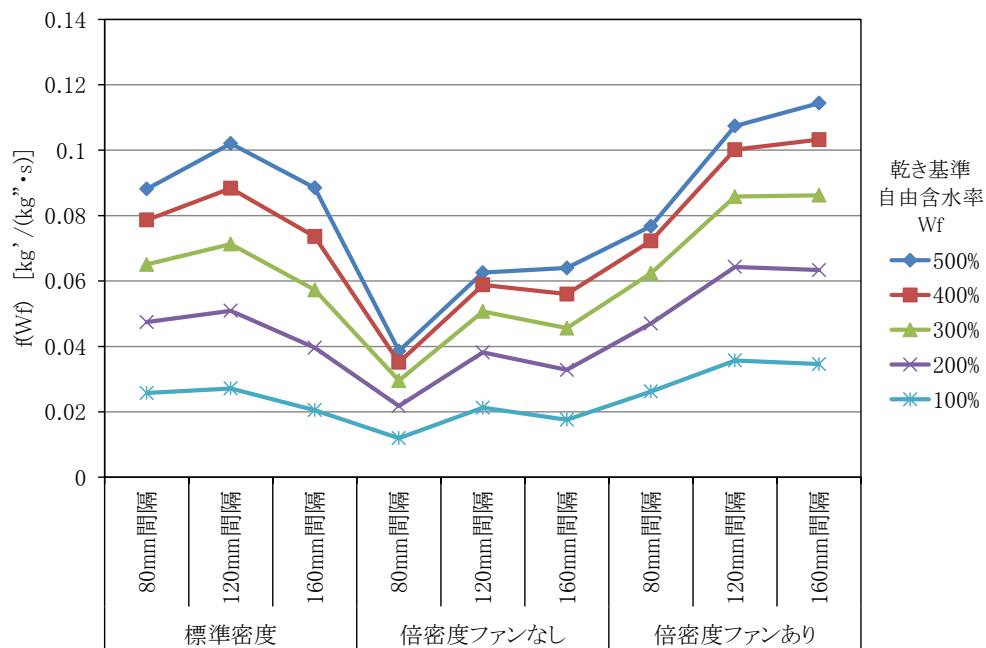


図 4-7 各条件の $f(W_f)$

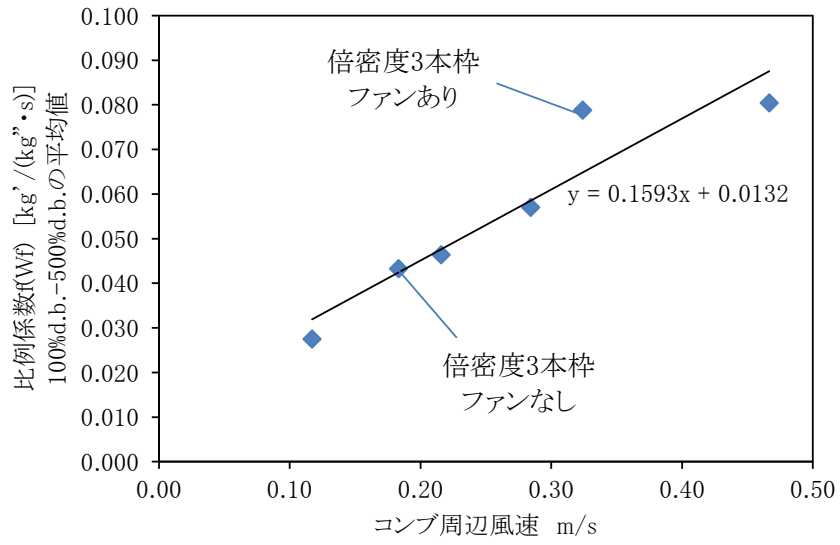


図 4-8 倍密度条件におけるコンブ周辺風速と $f(W_f)$ の関係

5. シミュレーションによる性能試算

(1) 計算モデルの構築

除湿機の必要能力の算定、省エネルギー化のための要素技術の検討、エネルギー消費量や従来型システムからの削減率の算定などのため、コンブ乾燥施設のシミュレーションモデルを構築する。

計算モデルを図 5-1 に示す。シミュレーションは熱と水分の平衡式を連立させ、蓄熱を考慮した非定常計算により行う。熱平衡式は次のとおりである。

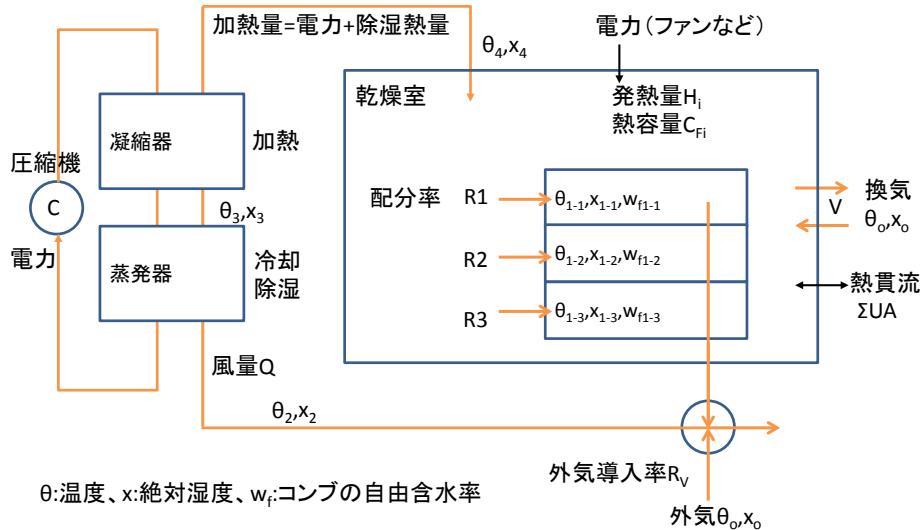


図 5-1 計算モデル

$$\left(\sum U_i A_i + c_a \gamma_a V_i\right) (\theta_i - \theta_o) + c_a \gamma_a Q_i (\theta_i - \theta_m) + \frac{C_{Fi}}{\tau} (\theta_i - \theta_i^{p-1}) - H_i - l E_i = 0 \quad (5-1)$$

$\sum U_i A_i$: 対象部位の単位温度差あたり外皮熱損失量[W/K]

c_a : 湿り空気比熱[J/kgK]

γ_a : 空気の比重量[kg/m³]

V_i : 隙間換気量[m³/s]

Q_i : 空気の流入量[m³/s]

θ_i : 空気温度[°C]

θ_o : 外気温[°C]

θ_m : 対象部位への流入空気の温度[°C]

C_{Fi} : 熱容量[J/K]

H_i : 室内発生熱[W]

τ : 計算間隔[s]

l : 水の蒸発潜熱[J/kg]

E_i : 蒸発量[kg/s]

i は計算位置の番号、添え字 $p-1$ は 1 ステップ前の数値を示す。 $\sum U_i A_i$ は 3 層モデルの場合 $\sum UA/3$ とする。 V_i は次式による。

$$V_i = \alpha_i A_i \sqrt{2gh \frac{(\theta_m^{p-1} + \theta_i^{p-1})/2 - \theta_o}{(\theta_m^{p-1} + \theta_i^{p-1})/2 + 273.15}} \quad (5-2)$$

$\alpha_i A_i$ は 3 層モデルの場合 $\alpha A/3$ とする。 g は重力加速度である。

熱容量 C_{Fi} は、躯体ほかの熱容量とコンブの水分の熱容量の和とする。 H_i は対象部位における発熱量(乾燥機の発熱量、ファンなどの消費電力)であり、対象部位へ流入する熱を正の値として扱う。蒸発量 E_i [kg/s] は、式(5-3)、(5-4)のいずれか小さいほうの値とする。

$$E_i = R_{Ci} \times m_{si} \quad (5-3)$$

$$E_i = (x_{si}' - x_{in}) \times Q_i \times \gamma_a \quad (5-4)$$

- R_{Ci} : 乾燥速度[kg/kg's]
- m_{si} : コンブ絶乾質量[kg']
- x_{si}' : 室内温度における飽和絶対湿度[kg/kg']
- x_{in} : 流入空気の絶対湿度[kg/kg']

なお、 $\Sigma U_i A_i$ 、 $\alpha_i A_i$ 、 C_{Fi} 、 E_i は乾燥室についてのみ考慮する。

次に、水分に関する平衡式は以下のとおりである。

$$\gamma_a V_i (x_i - x_o) + \gamma_a Q_i (x_i - x_{in}) - E_i = 0 \quad (5-5)$$

- x_i : 空気絶対湿度[kg/kg']
- x_o : 外気絶対湿度[kg/kg']
- E_i : コンブからの蒸発量または乾燥機による除湿量

式(5-1)、(5-5)をそれぞれ計算対象の室温、絶対湿度について解くと、次のようになる。

$$\theta_i^p = \left(\frac{(\Sigma U_i A_i + c_a \gamma_a V_i) \theta_o + c_a \gamma_a Q_i \theta_{in} + \frac{C_{Fi}}{\tau} \theta_i^{p-1} + H_i + I E_i}{\Sigma U_i A_i + c_a \gamma_a Q_i + \frac{C_{Fi}}{\tau}} \right) \quad (5-6)$$

$$x_i^p = \frac{\gamma_a V_i x_o + \gamma_a Q_i x_{in} + E_i}{\gamma_a V_i + \gamma_a Q_i} \quad (5-7)$$

ただし、 $x_i < x_{si}'$

(2) 実証プラントにおける実測値とシミュレーション値の整合性

シミュレーションの妥当性を確認するため、コンブの生がけ乾燥を行った平成27年8月17日の実測データを用いて、実験値と計算値の比較を行った。計算条件は、表4-1に示すほか、吹出し空気の配分率 $R1=0.25$ 、 $R2=0.4$ 、 $R3=0.35$ 、外皮熱損失量 $\Sigma UA=150W/K$ 、有効開口 $\alpha A=0.01m^2$ 、有効開口高さ $h=1.8m$ 、熱容量 $C_{Fi}=500kJ/K$ とし、消費電力は有効消費電力の実測値を用いた。

実験値と計算値はよく一致している。また乾燥終了条件を、15%d. b. (13%w. b.) とすると、乾燥所要時間は実験値10時間25分に対し、計算値10時間55分(実験より+4.8%)と概ねの一致を見た。

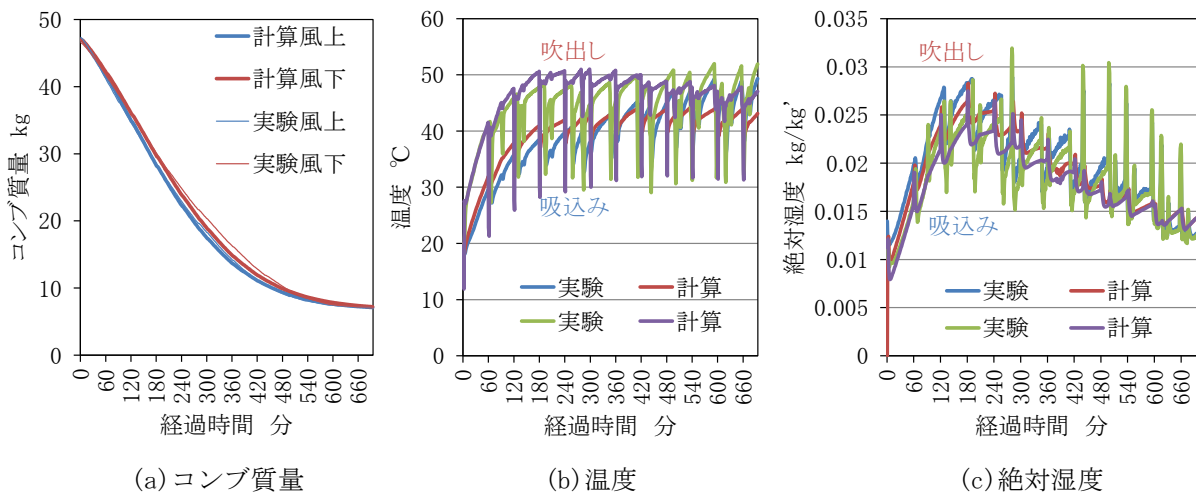


図5-2 実験値と計算値の比較

(3) シミュレーションによる乾燥条件の検討

1) 外気導入の検討

実証プラントで用いた除湿機は、吸込み温度の条件が 40℃以下であるため、乾燥後半に乾燥室内の温度が上昇した際に、除湿運転が停止して送風のみとなり、乾燥が遅滞する状況が見られた。そこで、吸込み空気に外気を混入させることにより、除湿運転の停止を回避する効果をシミュレーションした。

計算は実証プラントのスケールを想定して行った。外気は 20℃70%RH とし、蒸発器手前で導入する設定とした。外気導入条件は、「外気導入なし」「常時外気導入」「外気導入制御（吸込み空気 40℃以上で 20%外気導入）」の 3 条件とした。

シミュレーションの結果を図 5-3 に示す。(a)外気導入なしの場合、運転開始後 3 時間半程度で除湿運転の停止が生じている（吹き出し温度が低下していることで確認できる。なお、運転開始直後から 1 時間おきに吹き出し温度が低下しているのは冷却運転の影響である）。(b)常時外気導入の場合、除湿運転の停止は回避できているが、外気負荷が大きくなるため吹き出し温度が上がらず、所要時間が延びる。その結果、消費電力量も大きくなっている。(c)外気導入制御の場合は、外気負荷により消費電力量は若干増加するが、除湿運転の停止回避により所要時間は短縮されている。

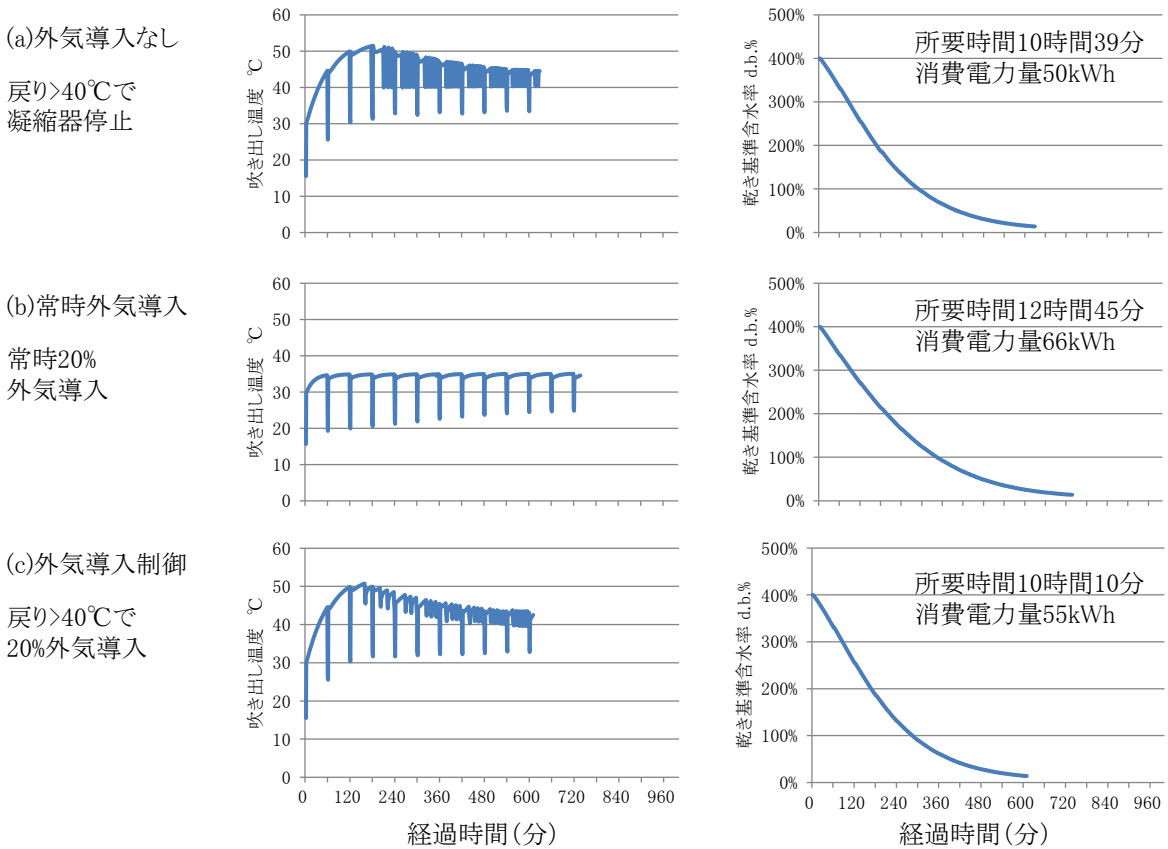


図 5-3 外気導入条件による比較

2) 三軒協業化の検討

コンブの乾燥施設の利用は基本的に夏季に限られる。一方、電気の基本料金はまったく電気を使用しない月についても、所定の基本料金の半額が請求される。そのため、電気をエネルギー源とするヒートポンプ除湿乾燥では、基本料金をいかに抑えるかが重要である。また、基本料金は、最大消費電力をもとに算定されるため、乾燥時間が長くなったとしても、なるべく消費電力の小さな除湿機を用いることが電気代の面では望ましい。

そこで、実証プラント 3 つ分の容積の乾燥室に対し、実証プラントで用いた除湿乾燥機 1 台を用いて乾燥を行う場合の、乾燥方法をシミュレーションで検討した。条件は、吹き出し空気を 3 軒に均等に分配する「3 軒並列」、3 軒を直列につなぐ「3 軒直列」、1 軒ずつ順番に乾燥を行う「3 軒切り換え」の 3 パターンとした。結果として、「3 軒並列」が最も所要時間が短くなった。

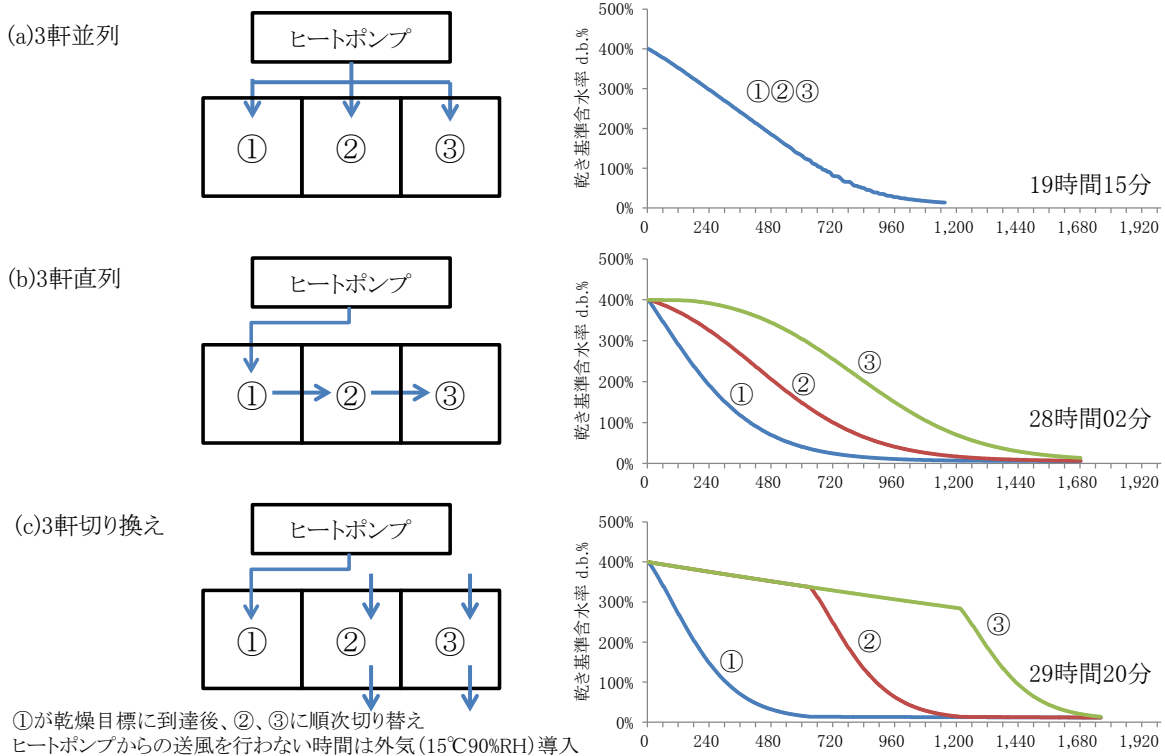


図 5-4 3 軒協業方式の検討

6. スケールアップシステムの基本設計

(1) 配置および各部寸法

実証プラントは歯舞 A 乾燥施設の 1/9 スケールであったが、ここでは実大スケールのシステムをシミュレーションをもとに検討する。基本的な方針として、釧路および根室地域のコンブ乾燥方法を想定し、現状のやり方を大きく変えずに、即導入可能なシステムとする。また、漁家 3 軒による協業化を想定するが、当面は個別の運用が考えられるため、建屋を共有しつつ乾燥室を 3 室設け、3 軒の漁家が同時に使用することを可能とする。

平成 25 年度に実態調査を行った既存乾燥施設の規模およびコンブ処理量を表 6-1 に示す。歯舞 B は 1 軒の漁家で 2 棟の乾燥施設を所有しているうちの 1 棟である。1 回当たりのコンブの処理量の推定結果を表 6-2 に示す。歯舞 A については 2 通りの手法で推定を行ったが、両者の推定結果はおおむね一致している。

表 6-1 既存乾燥施設の規模およびコンブ処理量

			昆布森A	歯舞A	歯舞B	
乾燥施設	奥行	m	9.10	11.34	8.19	
	間口	m	4.55	4.55	3.64	
	軒高	m	4.92	2.73	3.22	推定
	棟高	m	5.83	3.64	3.89	推定
	床面積	m ²	41.4	51.6	29.8	
	坪		12.5	15.6	9.0	
乾燥室 (乾燥機室含まず)	奥行	m	3.64	9.52	5.46	
	間口	m	4.55	4.55	3.64	
	室数	室	2	1	1	
	床面積	m ²	33.1	43.3	19.9	
	坪		10.0	13.1	6.0	
乾燥枠	短辺	m	1.62	1.82	1.82	
	長辺	m	4.43	4.43	3.52	
	枠数	枠	4	5	3	
	枠面積	m ²	28.7	40.3	19.2	
	枠高さ	m	3.40	2.00	1.80	
	枠下容積	m ³	112.6	86.6	35.8	
	棒間隔	棒本数		30	25	
	棒間隔	mm		0.148	0.141	
乾燥機	出力	kW	174	233		
	消費電力		4,400	6,400		
	給気ファン風量	m ³ /h	21,600	30,600	22,860	
	給気ファン消費電力	W	2,730	4,500	2,250	
建屋排気ファン	風量	m ³ /h	14,880	10,080	9,600	
	消費電力	W	540	500	470	
コンブ処理量	絶乾質量W	kg [〃]	208.3	212.5	125.0	表6-2より
	かけ密度	kg [〃] /m ³	1.8	2.5	3.5	乾燥枠下容積当たり
	かけ面密度	kg [〃] /m ²	7.3	5.3	6.5	乾燥枠面積当たり
	コンブ生質量	kg	2,083	2,125	1,250	900%db.
	乾燥枠最大吊り荷重	kg/m ²	73	53	65	初期含水率900%db.

kg[〃]は絶乾時のコンブ重さ

表 6-2 コンブ処理量の推定

			昆布森A	歯舞A	歯舞B	
1回当たり製品質量より	聞き取りによる製品質量	kg/回	245	250	250	15%w.b.(17.6%db.)
	絶乾質量	kg [〃] /回	208.3	212.5	125.0	0%db.(歯舞Bは2棟のうち1棟分)
本数より	棒本数	本		120		一次乾燥後処理の場合
	コンブ質量	kg/棒		2.7		kg/回 72%db.(80%RH平衡含水率)
	絶乾質量	kg [〃] /回		190.5		kg [〃] /回 0%db.

推定の根拠としたヒアリング事項は次のとおりである。

○昆布森 A

- ・ 1 日のコンブ採取量は製品重量で 240～250kg

○歯舞 A

- ・ 棒は 30 本/列×5 列=150 本収容

- ・棒1本にかけるコンブの本数は、水切りの状態により12～13本（生に近い場合）～20～30本（水切り後の乾燥状態が良い場合）。乾燥施設内で通常は4列に収まる。昆布を1日に採取する量は変わらない。
- ・1回の乾燥処理量は製品で12～13駄（駄：出荷単位、乾燥重量20kg）

○歯舞B

- ・7/23はほとんど生からの機械乾燥で、棒1本に干したコンブは11～12本。
- ・小束結束後の重さで棒1本当たり2～3.46kg（当日実測）。重さはかなりばらつきがある。
- ・棒の収容量は旧乾燥施設100本、新乾燥施設75本。
- ・1回の乾燥処理量は製品で12～13駄。

既存乾燥施設の実態を踏まえ、スケールアップシステムの設計条件を表6-3のとおり設定する。コンブの処理量は絶乾で212.5kg（製品で12.5駄）とする。乾燥枠の高さは、昆布森A同等の3,400mmとする。コンブのかけ密度、かけ面密度についても昆布森A同等となるよう、乾燥枠の見付け面積を約30㎡とする。乾燥枠にかかる荷重は、生がけのコンブ初期含水率を900% d. b.として、72kg/㎡となる。なお実証プラントにおける試験では、生がけのコンブ初期含水率が700% d. b.であったので、余裕を見込んだ荷重設定となっている。

表6-3 スケールアップシステム設計条件（漁家1軒当たり）

乾燥室(1室あたり) (乾燥機室含まず)	奥行	m	10.92	例示(枠収納スペースを含む)
	間口	m	3.64	例示
	床面積	m ²	39.7	
	坪	坪	12.0	
乾燥枠	短辺	m	1.72	例示
	長辺	m	3.44	例示
	枠数	枠	5	
	枠面積	m ²	29.6	
	枠高さ	m	3.4	
	枠下容積	m ³	100.6	
	コンブ処理量	絶乾質量	kg"/回	212.5
かけ密度		kg"/m ³	2.1	0% d. b.
かけ面密度		kg"/m ²	7.2	0% d. b.
乾燥枠最大吊り荷重		kg/m ²	72	初期含水率900% d. b.

(2) 建築仕様

ヒートポンプ除湿乾燥においては、外皮の貫流による顕熱損失と隙間換気による熱損失（潜熱含む）が熱負荷となることから、これらをなるべく低減する必要がある。建屋の断熱性能は、北海道における住宅の省エネルギー基準と同等の、外皮平均熱貫流率 $U_A \leq 0.46 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ とする。断熱材は分別解体が容易な繊維系断熱材を使用する。また、防湿シートや気密性のあるシャッターの採用により、可能な限りの気密化を行う。床は、乾燥室内での作業性を考慮し、土間コンクリートとする。

コンブの乾燥枠は、掛け外しの省力化を考慮し、南茅部地区の乾燥施設を参考に、上下および水平方向に移動可能な台車方式を採用する。

(3) 設備仕様

1) 除湿機

電気式ヒートポンプを用いた除湿乾燥では、電力料金のうち基本料金を低く抑えるため、最大負荷を抑えることが有効である。そのため、可能な限り消費電力の小さい機器を用いて、一定の出力で長時間運転することが望ましい。

原則として天日による一次乾燥を行っている昆布森地区における現状の乾燥運転時間は4時間程度、同様に歯舞地区は7～8時間程度である。一方、生がけ乾燥を行う羅臼地区では20時間～22時間に及ぶ乾燥運転を行いながらほぼ毎日操業を行っている。したがって、20時間程度で乾燥処理を完了することができれば、24時間サイクルでの作業が可能であると考えられる。そのためスケールアップシス

テムにおいては、生がけ乾燥の場合に、機械乾燥開始後、搬出前の軟化処理を含めて 20 時間以内に乾燥処理を完了できるように、乾燥設備の能力を設定する。

実証プラントで用いた除湿機 RFH-P5A の性能特性を相似的に拡大することにより、シミュレーションで必要な能力を求めた結果、除湿機の性能特性を次のとおり設定する。

- ・除湿能力 170L/h 以上（室内吸込空気乾球温度 25℃、相対湿度 80%において）

※上記は RFH-P5A の 12 倍の値である。

外気温が高い日には吸込み温度が除湿機の上限を越えることも考えられるため、還気と外気を混合できるように、流量の調整が可能な外気取入れ口を、除湿機の回路内に設ける。

また、乾燥終了後のコンブ撤去時には、コンブの割れを防ぐため、コンブに水分を与える必要がある。既存の乾燥施設では外気導入により室内の相対湿度を 80%程度以上に上昇させる方法や、水分噴霧による方法が取られている。「3.（2）軟化特性」で検証したように、朝方の相対湿度が高い条件では、外気導入による 2 時間以内の軟化処理が可能と考えられるので、スケールアップシステムでは、除湿機の送風機を利用して外気を強制的に導入する方法を採用する。そのため、除湿機は、除湿機能を停止した上で、全量外気導入運転を可能とする。

なお、本研究の研究項目の一つとして、温湿度分布センシング技術の開発により、除湿運転への移行や運転停止を自動化することを工業試験場において検討した。

（4）吹出し、吸込み方式および天井扇の配置について

1) 概要

実証プラントにおいては、天井チャンバーと二重壁による吹き出し方式で室内の乾燥速度の均一化を図った。一方、天井チャンバーや二重壁による吹き出し方式は、天井扇の気流と干渉するほか、屋根、壁からの貫流熱損失が大きくなり、完成後は風量の調整が難しいなどの欠点もある。また、実証プラントでは吸込み口が 1 か所だったが、スケールアップする場合は、吸込み口も分散して配置することが望ましい。

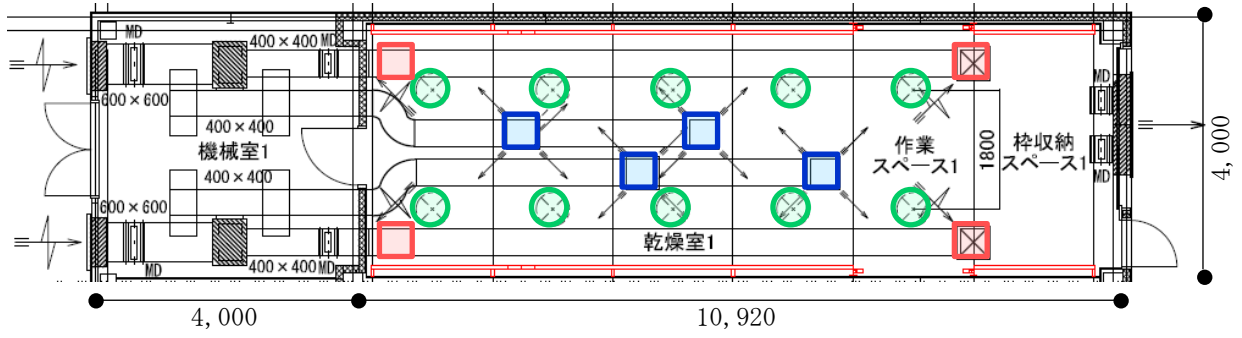
そこで、スケールアップシステムでは、ダクトによる吹出し・吸込み口を 4 か所に分散して配置する。まず吸込み口を乾燥室の平面上の四隅上部に配置し、吹出し口は乾燥室を長手方向に 4 等分した各領域で、吸込み口から見て上流側に配置する。吹出し、吸込みの風量は個別の調整を可能とする。

コンブの周囲風速は図 4-8 を参考に、棒間隔 150mm で実現可能な値として、乾燥室内の各部位で最低 0.4m/s 以上確保することを目標とし、天井扇の配置を検討する。以下に、CFD (Computational Fluid Dynamics：数値流体解析) により、天井扇の高さおよび天井扇台数について検討した結果を示す。

2) 計算方法と計算条件

計算には SIEMENS 社の CFD プログラム、STAR-CCM+を用いた。乾燥施設概要を図 6-1 に示す。解析対象エリアを図 6-2 に示す。乾燥室は厳密には対称形を成していない箇所もあるが、CFD モデル構築エリアを 1/4 とし、対称面は摩擦抵抗を有しない境界とした。

CFD モデルを図 6-3 に示す。CFD では、吹出し管、吸込み管、天井扇、コンブをモデル化した。各種寸法を表 6-4 に示す。本来、吹出し管は 4 本あるが、モデルの簡略化として 1 本と見なしている。天井扇はソーワテクニカ PF-50JQK2 同等品とし、仕様を表 6-5 に示す。天井扇直下の風速はおおよそ 10m/s である。コンブは計算負荷低減のために、幅の広いコンブ 1 枚を折り返して棒にかけている（隣り合うコンブの間にすき間は設定）という条件（図 6-3(a)）で計算した。コンブ表面の摩擦抵抗は滑らかな管と同等と考え、摩擦抵抗係数 λ は 0.015 程度である。



○ : 天井扇、□ : 吹出し口、□ : 吸込み口

図 6-1 乾燥施設概要 (天井扇 10 台の場合)

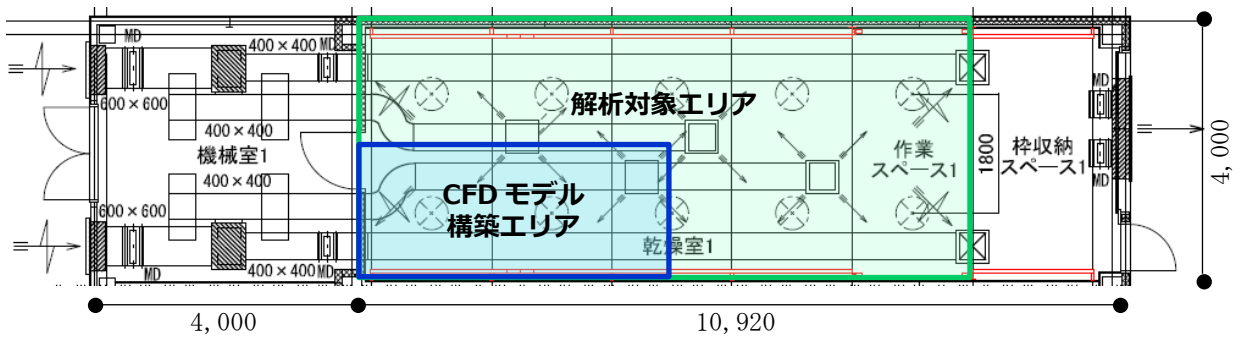
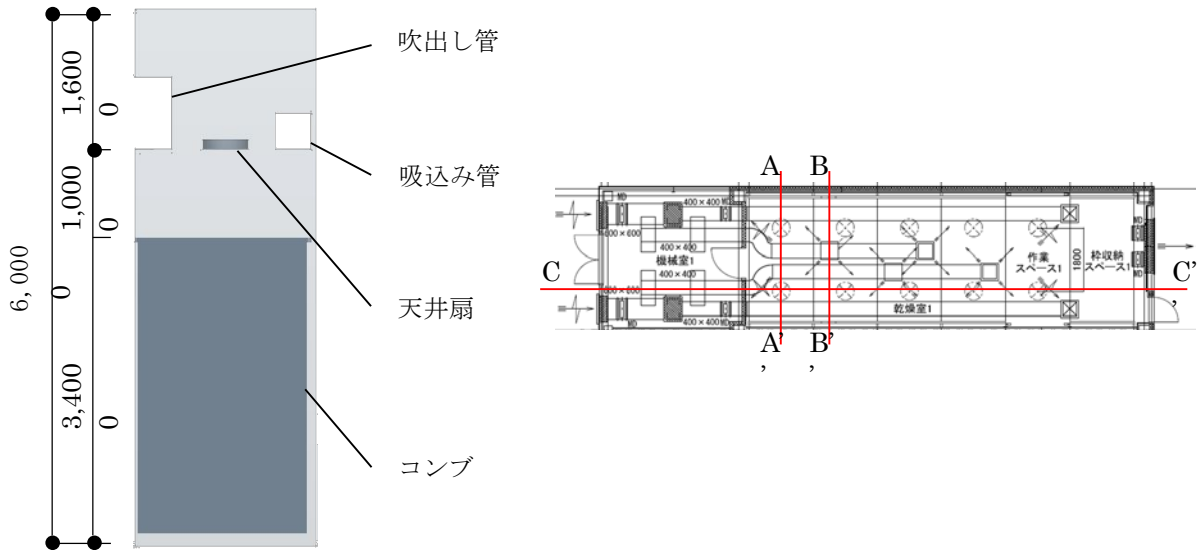


図 6-2 解析対象エリア



(a) CFD モデル

(b) 断面位置

図 6-3 CFD モデル

表 6-4 各種寸法

【 単位mm】

吹出し管	□-800×800	
吸込み管	□-400×400	
天井高	6,000	
コンブ 枠上端～吹出し管	1,000	
コンブ 枠上端～吸込み管	1,000	
コンブ長さ	6,800	※二つ折りで3,400

表 6-5 天井扇仕様

電源	50Hz			本体重量 [kg]	首ふり角度	
	消費電力[W]	風速[m/min]	風量[m ³ /min]		左 [°]	右 [°]
単相100V	230	460	315	12.4	45	45

3) 天井扇高さの検討

コンブ 枠上端から天井扇までの距離（以下、天井扇高さ）の検討を行う。0.5m、1.0m、1.5m での検討を行った。ここでは、天井扇 10 台を想定している。

天井扇高さの違いによる風速分布を図 6-4 に示す。0.5m の場合、天井扇直下とその他の部位で風速に大きな違いが生じている。1.0m の場合、天井扇の風が若干ではあるが、拡散されている様子が C-C' 断面図から読み取れる。1.5m の場合、さらに拡散され、乾燥ムラが緩和されることが考えられるが、天井扇の首ふりを想定すると吹出し管および吸込み管に干渉されることが A-A'断面図から予想できる。そのため、天井扇高さ 1.0m を選択する。

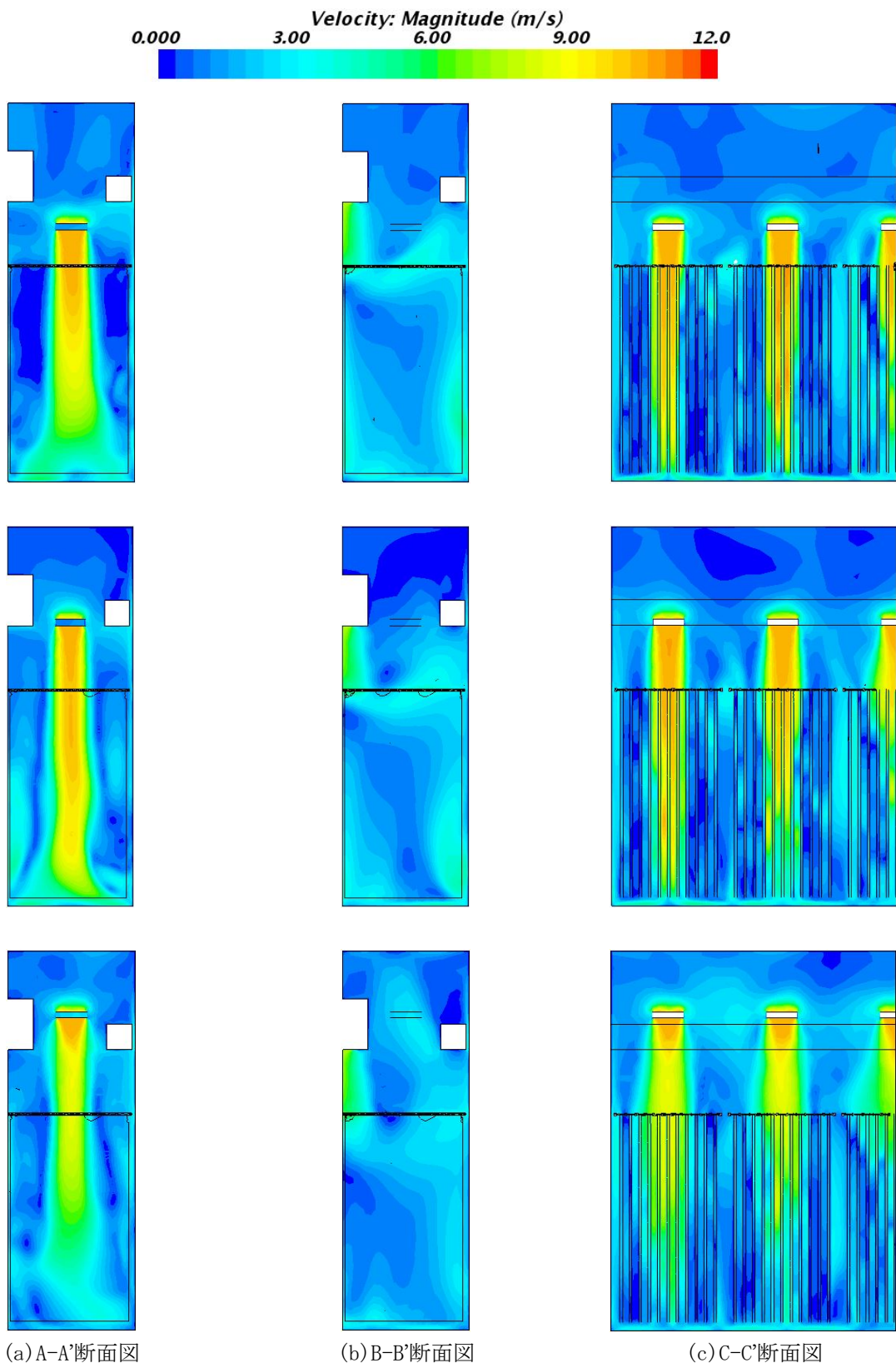


図 6-4 天井扇高さ（上：0.5m、中：1.0m、下：1.5m）の違いによる風速分布

4) 天井扇台数の検討

天井扇高さを 1.0m と固定した条件で天井扇台数の検討を行う。図 6-5 に示す位置で、天井扇 4 台と 6 台の場合の検討を行った。天井扇台数の違いによる風速分布を図 6-6 に示す。天井扇 4 台、6 台の場合、天井扇のない位置で目標風速 0.4m/s を確保できない恐れがある。したがって、天井扇については、天井扇は 10 台設置とする。

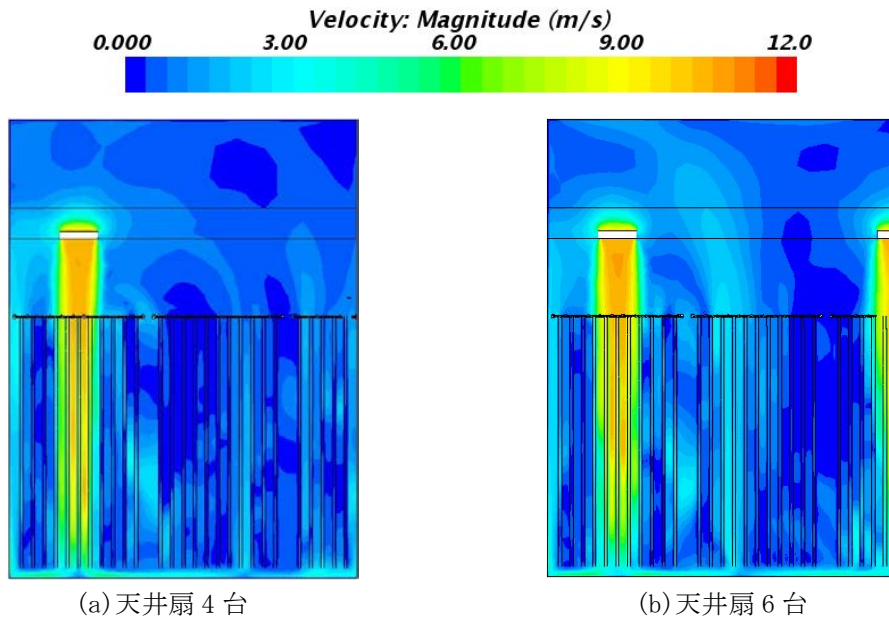
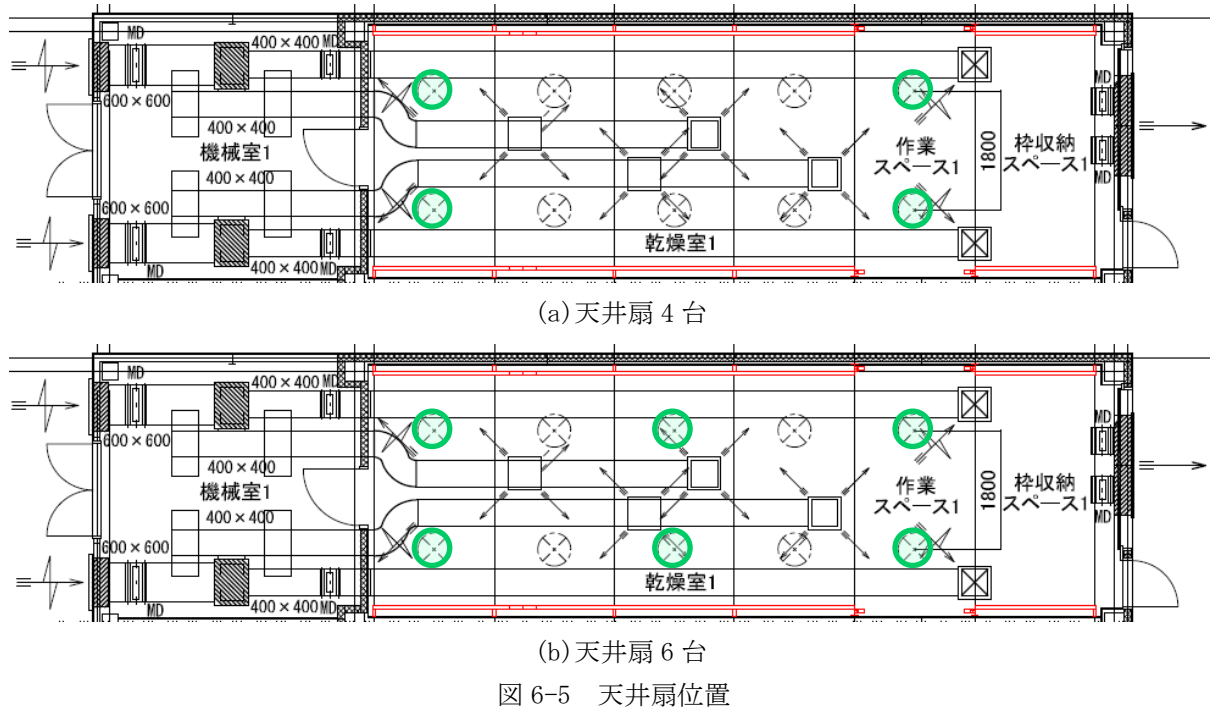


図 6-6 天井扇台数の違いによる風速分布

(5) 基本設計

以上の検討をもとに、本研究で提案するスケールアップシステムのイメージを図 6-7 に示す。また、このイメージに基づき、委託（委託先：北電総合設計株式会社）により作成したスケールアップシステムの基本設計図を付録に示す。

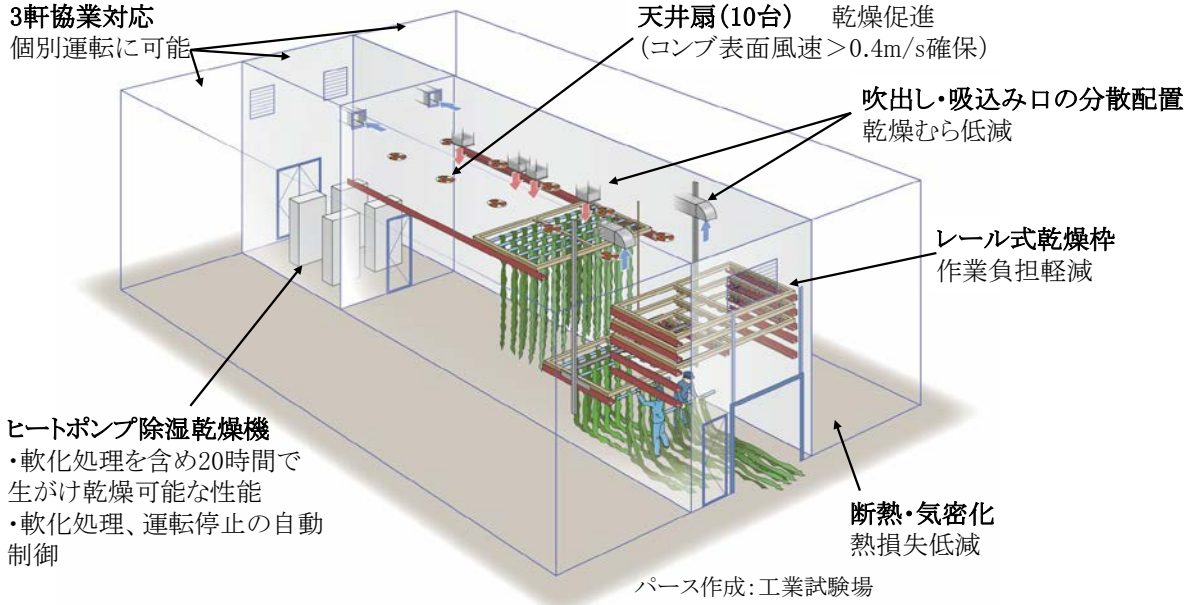


図 6-7 スケールアップシステムのイメージ図

(6) 性能試算

従来型の熱風乾燥と比較したスケールアップシステムの省エネ、省コスト効果を試算する。計算条件は以上に示したもののほか、表 6-6 に示すとおりとする。

表 6-6 計算条件

※①,②,③,④は表 6-7 および図 6-8 に対応

	従来型	スケールアップシステム
外皮熱損失量 ΣUA	1,149W/K ※歯舞 A の 3 棟分の計算値	268W/K (②③④) ※ $U_A=0.46W/(m^2K)$ 相当
換気開口、隙間	$\alpha A=2.1m^2$ 、 $h=2.73m$	$\alpha A=0.1m^2$ 、 $h=3.4m$ (①②③④)
躯体ほか熱容量 C_{Fi}	33,389,000J/K (内装材、土間コンクリート、架台) ※歯舞 A の 3 棟分の計算値	
発熱量 H_i	<p>[乾燥室] 天井扇 230[W/台]×15[台] 3層モデルでは 1/3 の値とする。</p> <p>[機械室] 乾燥機燃焼分 206,064[W]/a ただし、 $\theta_{1.3} > 60^\circ C$ のとき 0 乾燥機消費電力 6,400[W] /a a は縮率 乾燥機熱効率：85%</p>	<p>[乾燥室] (③④) 天井扇 230[W/台]×30[台] (③④) 3層モデルでは 1/3 の値とする。</p> <p>[機械室] (①②③④) ・冷却運転時（運転開始時および 60 分間連続運転時に 2 分間実施） {$0.053 \theta_0 + 0.022 \theta_{wb2} + 2.9$ $- (-0.12 \theta_0 + 0.38 \theta_{wb2} + 9.6)$} × 1000 × 12[W] ・$\theta_{1.3} < 45^\circ C$ のとき（除湿運転） 5,400[W/台] × 12[台] ・その他の場合（送風のみ） 640[W/台] × 12[台]</p>
除湿量 E_i	0	$(-0.78 \theta_2 + 1.16 \theta_{wb2} + 3.32) / l$ × 1000 × 12[kg/s] (①②③④)
配分率	R1=1、R2=0、R3=0	R1=1/3、R2=1/3、R3=1/3 (④)
コンブ乾燥特性	$-0.00130W_f^2 + 0.0210 \times W_f$ ※歯舞 A の実態調査からの推定	$-0.00231W_f^2 + 0.0373 \times W_f$ (③④)

計算結果を表 6-7、図 6-8 に示す。従来型の乾燥機出力は、乾燥所要時間がスケールアップシステムの条件④と同じになるよう、表 6-6 の縮率 $a=0.68$ とした場合の計算値をもとに、従来型システムからの一次エネルギー削減率を算出している。一次エネルギーとは、二次エネルギーである電気を使用する場合に、発電所の発電効率や送電による損失を考慮して化石燃料の熱量に換算したものである。換算係数は、 $9,760\text{kJ/kWh}$ (省エネ法における全日平均の値) とする。なお、図表中の丸数字は表 6-6 の計算条件と対応しており、従来型の計算条件をベースとして、スケールアップシステムの計算条件を段階的に適用して、改善効果を検証する。

まず、①ヒートポンプ除湿乾燥の採用により、排気による熱損失がなくなるため、一次エネルギーが 42% 減と、大幅に削減される。ただし、目標とした 50% 削減には達しない。次に②建屋の高断熱化を行うことで、建屋外周からの貫流熱損失が減少し一次エネルギーが目標の 50% 減に達するが、乾燥室内の温度が上昇して除湿運転の停止が生じることにより、所要時間が延びる。以上の試算ではコンブの乾燥特性を表 6-6 の従来型の設定として計算したが、③天井扇の適正配置により、表 6-6 のスケールアップシステムの式を用いることとし、その結果所要時間が短縮する。以上では乾燥室各部位への吹出し空気の配分率を $R1=1, R2=0, R3=0$ としたが、④吹出し・吸込み口の適正配置により、スケールアップシステムにおける配分率を $R1=1/3, R2=1/3, R3=1/3$ とすることで乾燥むらが改善され、所要時間が約 18 時間となる。乾燥後 2 時間以内で行う軟化処理と合わせ、目標とした 20 時間以内を到達できることになる。

表 6-7 スケールアップシステムの改善効果 (生がけ乾燥の場合)

改善項目	一次エネルギー消費量 [MJ/kg ^干]	一次エネルギー削減率	所要時間
①ヒートポンプ除湿乾燥の採用	24.5	42%	23:48
② (上記に加え) 建屋の高断熱化	21.3	50%	25:10
③ (上記に加え) 天井扇の適正配置	18.7	56%	19:45
④ (上記に加え) 吹出し・吸込み口の適正配置	17.2	59%	18:01
従来型	42.3	-	18:01

一次エネルギー消費量は絶乾コンブ 1kg 当たり

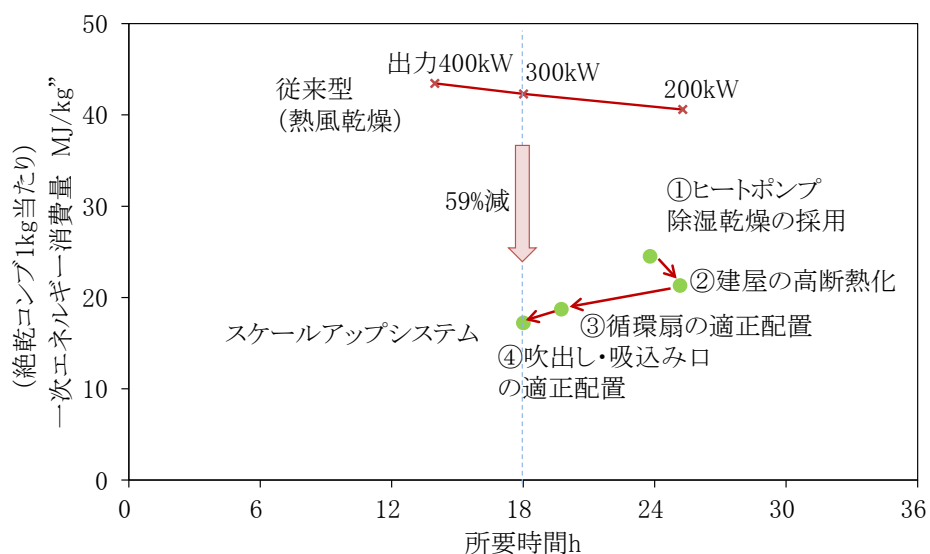


図 6-8 スケールアップシステムの改善効果 (生がけ乾燥の場合)

図 6-9 に従来型システムとスケールアップシステムの吹出し・吸込み温度、コンブ含水率、熱損失の内訳を示す。また、図 6-10 に、エネルギー（積算値）の流れを模式的に示す。スケールアップシステムは排気による損失がないため、省エネルギー効果が大いことがわかる。

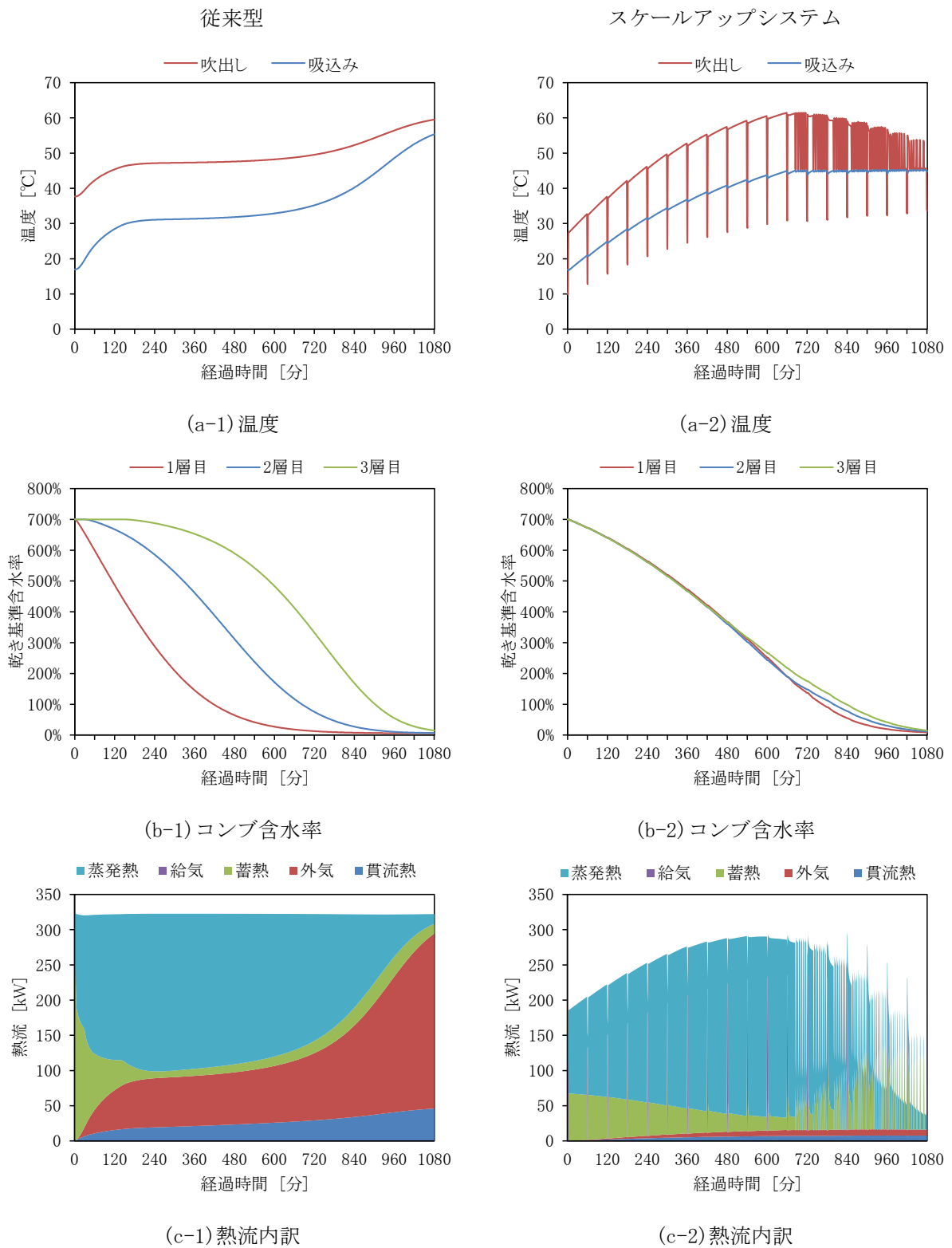


図 6-9 乾燥中の吹出し・吸込み温度、コンブ含水率、熱損失の内訳

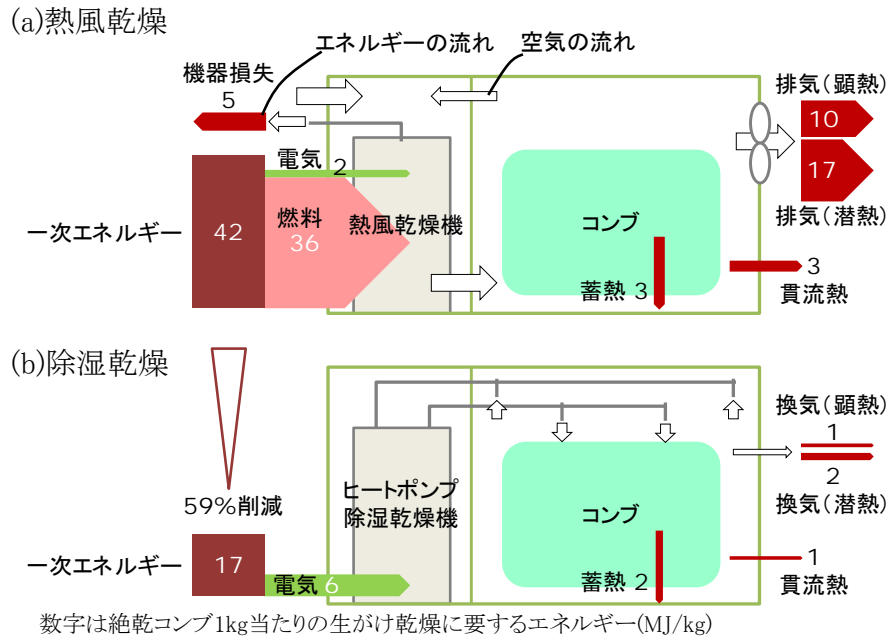


図 6-10 エネルギーの流れの比較

以上は生がけ乾燥の場合であるが、水切り後乾燥の場合の計算結果と、コスト（燃料代、電気代）を含めた比較を表 6-8 に示す。電気代のうち基本料金は年間の使用回数と使用時期により、乾燥 1 回当たりの額が変わるため、6 月～10 月の期間に 40 回使用するとして計算した。その他の月は電気供給約款に基づき基本料金を半額として、乾燥 1 回当たりの基本料金に加えている。

従来型システムに対するスケールアップシステムの一次エネルギー削減率は、生がけ乾燥、水切り後乾燥とも 59%であったが、コスト削減率は生がけ乾燥で 34%、水切り後乾燥では運転時間が短くなるため 18%となった。ただし、燃料価格や電気料金は将来変動すると考えられる。参考として、生がけ乾燥の場合についての比較のグラフを図 6-11 に示す。

表 6-8 従来型システムとスケールアップシステムの比較

項目	生がけ乾燥(初期含水率700d.b.)		水切り後乾燥(初期含水率400d.b.)		単位
	従来型システム	スケールアップシステム	従来型システム	スケールアップシステム	
最大消費電力	23.0	79.0	23.0	79.0	kW
契約種別	低圧電力	業務用電力	低圧電力	業務用電力	
基本料金	1,263.6	1,836.0	1,263.6	1,836.0	円/kW・月
電力量料金	17.4	18.1	17.4	18.1	円/kWh
力率	0.85	0.97	0.85	0.97	
力率割引後基本料金	1,263.6	1,615.7	1,263.6	1,615.7	円/kW・月
消費電力量		1,123.6	266.7	741.3	kWh
操業回数	40	40	40	40	回/年
使用期間	6-10月	6-10月	6-10月	6-10月	
1回あたり基本料金	6,176	27,123	6,176	27,123	円/回
電力量料金	7,054	20,359	4,627	13,433	円/回
電気料金	13,230	47,482	10,803	40,556	円/回
A重油消費量	23,014		15,172		MJ/回
燃料代(100円/L)	58,860		38,804		円/回
乾燥所要時間	18:00:00	18:01:00	11:52:00	11:58:00	
一次E	26,981	10,961	17,774	7,232	MJ/回
絶乾1kgあたり一次E	42.3	17.2	27.9	11.3	MJ/kg
絶乾1kgあたり乾燥コスト	113.1	74.5	77.8	63.6	円/kg
一次エネルギー削減率		59%		59%	
コスト削減率		34%		18%	

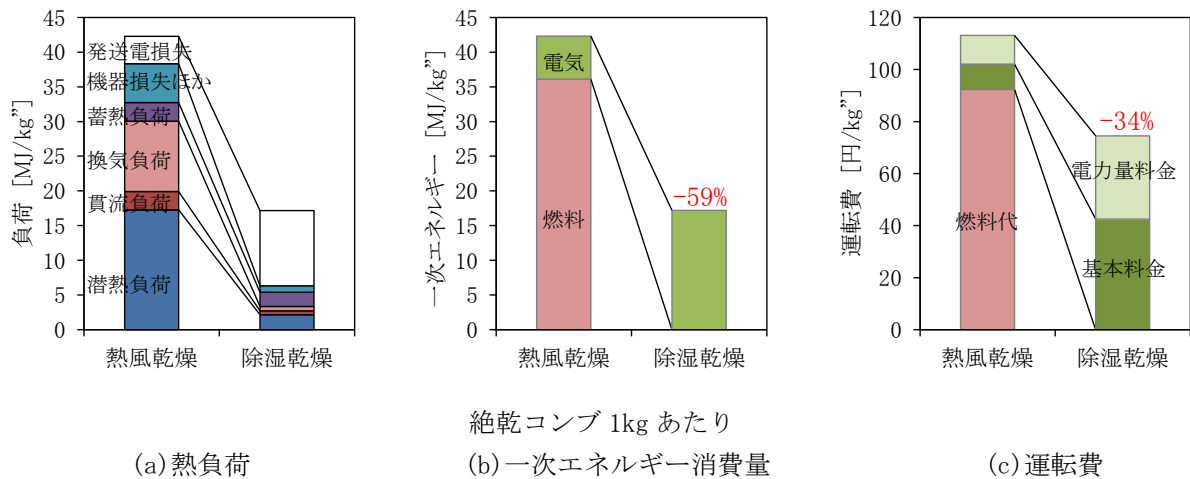


図 6-11 熱風乾燥と除湿乾燥の比較 (生がけ)

7. まとめ

本報告書は、平成 25 年度～28 年度に北海道立総合研究機構の重点研究「道産コブの生産安定化に関する研究」のうち、北方建築総合研究所分担分の成果をとりまとめたものである。主な成果は次のとおりである。

- ①既存コブ乾燥施設の実態調査により、地域により異なるコブの乾燥方法や、コブ乾燥に関わる課題を把握した。既存の乾燥方式は、すべて熱風乾燥であり、排気の損失が大きいこと、暑熱環境や深夜における作業負担が大きいことがわかった。
- ②実験室実験において、シミュレーションに必要となるコブの乾燥特性を把握した。また、乾燥後の外気導入による軟化処理の条件を明らかとするため、軟化試験を行い、20°C80%RH 以上または 15°C 90%RH 以上の条件であれば、概ね 2 時間以内で軟化することを明らかにした。
- ③実証プラントにおいて、除湿乾燥機の実際の使用条件における除湿能力、消費電力を明らかにした。また、コブの乾燥特性や、コブのかけ密度と風速と乾燥速度の関係を明らかにした。
- ④除湿機の必要能力、乾燥所要時間、エネルギー、運転コストの算出を可能とするシミュレーションモデルを構築した。シミュレーションにより、外気導入を行うことで過熱による除湿運転の停止は回避できるが、外気導入量を最低限としなければエネルギー消費量が増大することを示した。また、複数の漁家で乾燥機を共有する場合、少しずつでも同時並行で乾燥するほうが、全体としては時間短縮かつ省エネルギーになることを示した。
- ⑤一次エネルギー削減量 50%以上、軟化処理を含めた乾燥時間を 20 時間以内とすることを目標として、スケールアップシステムの基本設計を行った。ヒートポンプ除湿乾燥の採用、建屋の高断熱化、天井扇の適正配置、吹出し・吸込み口の適正配置により、一次エネルギー消費量で 59%削減が見込まれることを示した。

[謝辞]

本調査の実施に当たり、ご協力をいただきました関係漁協、コブ生産者の皆様に、厚くお礼申し上げます。

コンブ乾燥モデル施設基本設計図

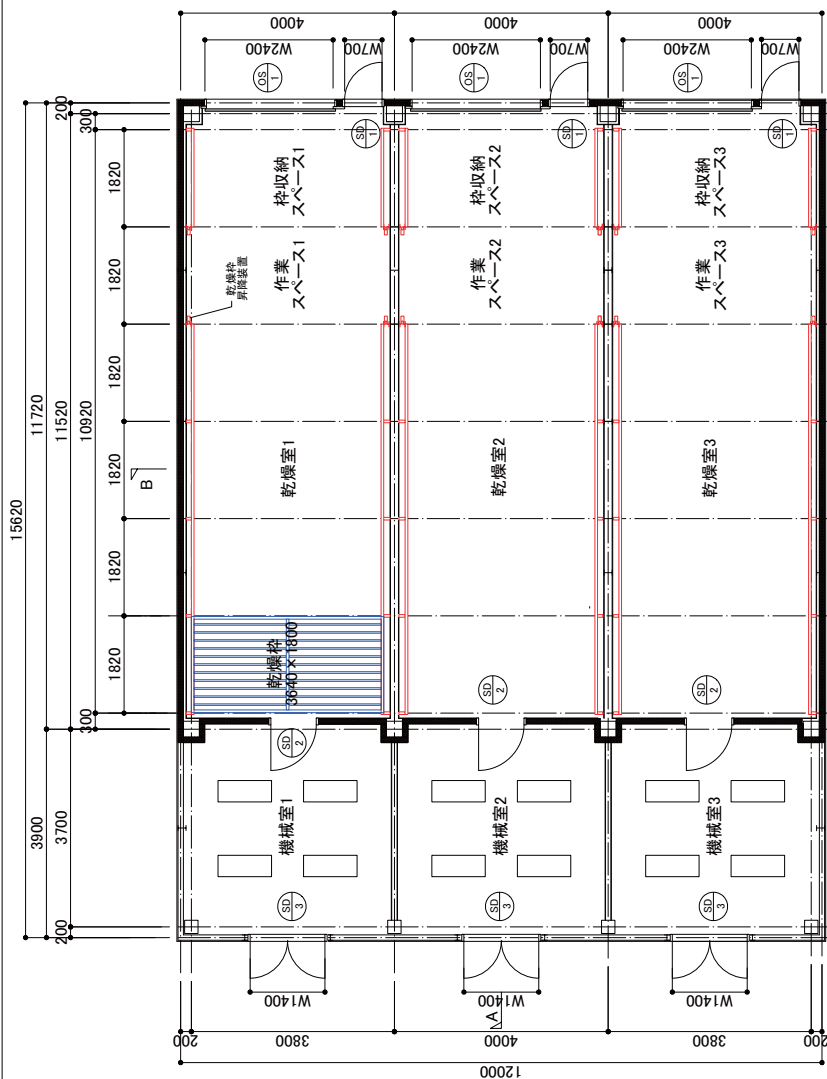
図面番号	図面名	備考
A 01	平面図・断面図・仕上表	
A 02	立面図	
A 03	コンブ乾燥支持架台図	
A 04	平面比較検査台図(a,b,c)	
S 01	伏図・軸組図・假定断面リスト	
M 01	機器一覽表、ダクト系統図	
M 02	乾燥・送風・換気設備、照印プロット図	

仕上表

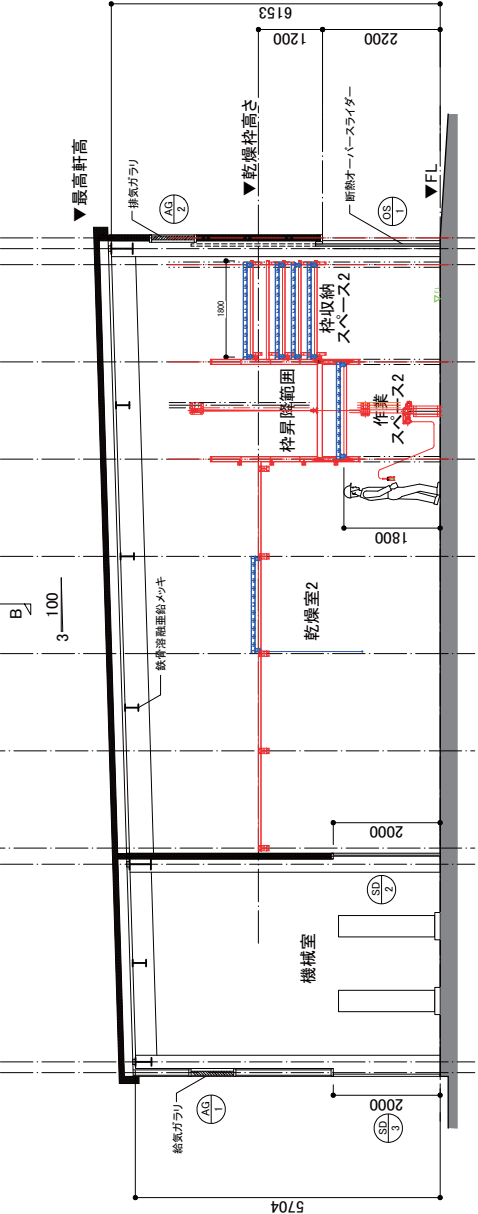
外部仕上表				
屋根	断熱2重折板 ガルバリウム鋼板t0.8 グラスウール6kg/m ³ (f=45) t100充填			
外壁	カラーガルバリウム鋼板 t0.35 角波 縦張り 撥水グラスウールボード t50+t50 32kg/m ³ (32-36) 防湿シート貼り			
内部仕上表				
室名	床	巾木	壁	天井
乾燥室1、2、3	コンクリート金ゴテ仕上	コンクリート打放し	フレキシブルボード t6.0	折板表し
機械室1、2、3	コンクリート金ゴテ仕上	コンクリート打放し	GB-R t12.5	折板表し
建具仕様				

OS-1 断熱オーバーライドー:W2400×H2200 建具厚 45 ウレタンフォーム充填 3か所
 SD-1 断熱鋼製片開き戸:W700×H2000 建具厚 40 ウレタンフォーム充填 3か所
 SD-2 断熱鋼製片開き戸:W850×H2000 建具厚 40 ウレタンフォーム充填 3か所
 SD-3 鋼製片開き戸:W1400×H2000 3か所
 AG-1 アルミ製防水ガタリ:W600×H800 6か所
 AG-2 アルミ製防水ガタリ:W1600×H800 3か所

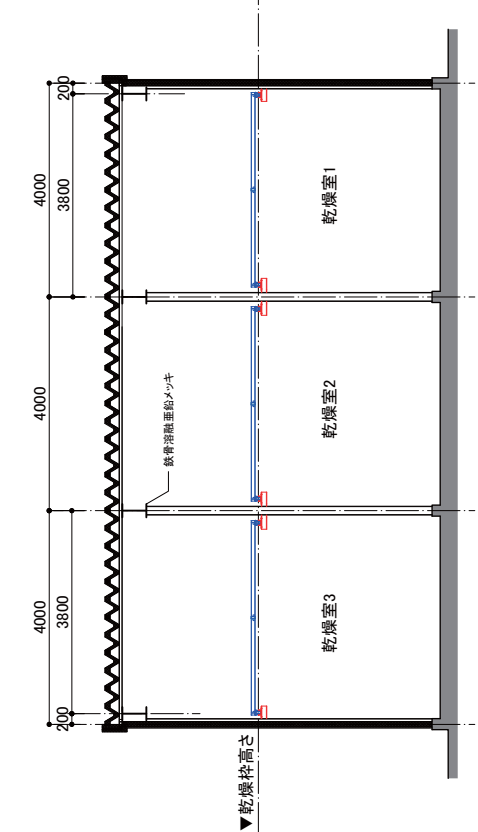
平面図



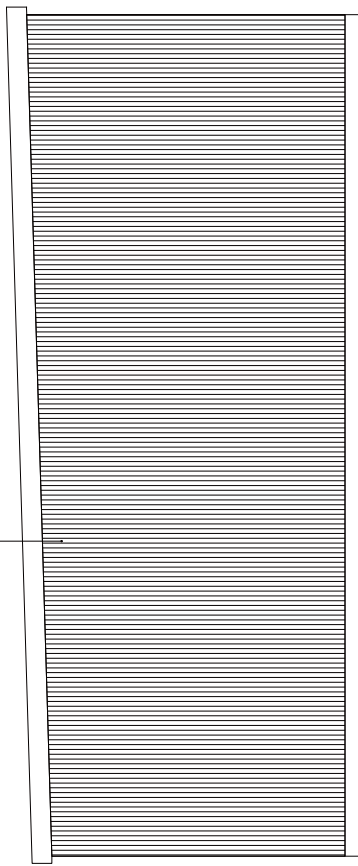
A-A 断面図



B-B 断面図

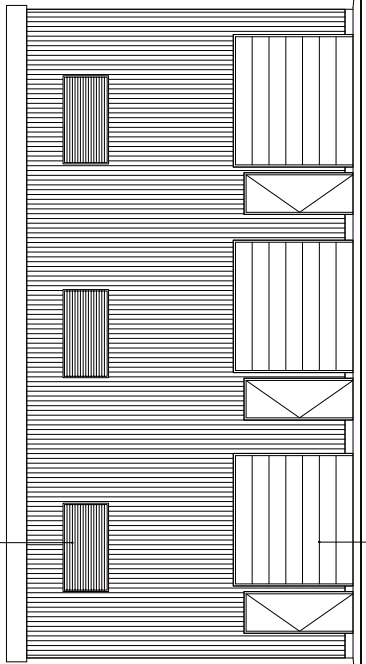


カラーガルバリウム鋼板 t0.35 角波 縦張り



立面図1

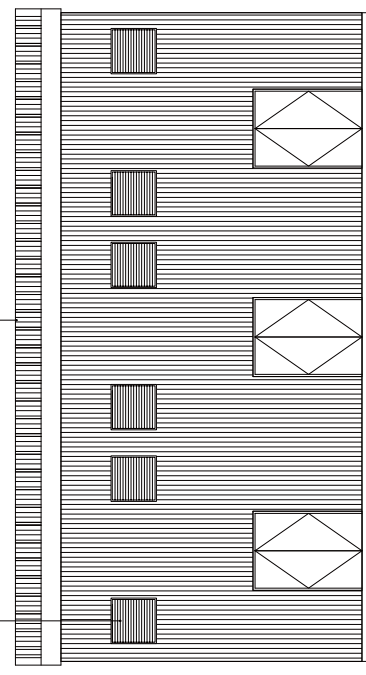
排気ガラリ



断熱オーバースライダー

立面図2

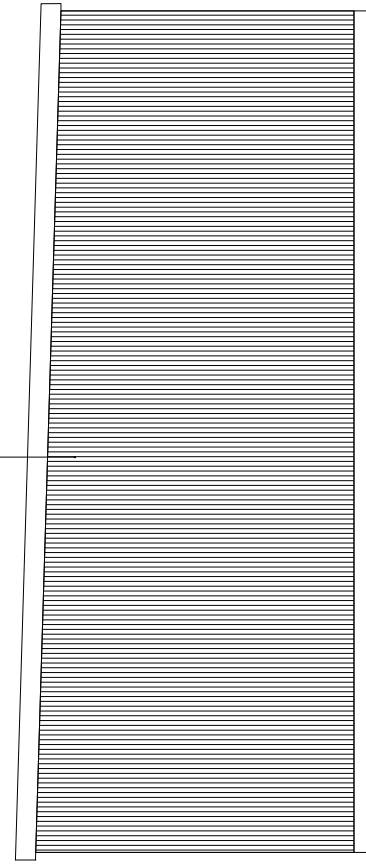
断熱2重折板 ガルバリウム鋼板t0.8
グラスウール16kg/m3 t100充填



給気ガラリ

立面図3

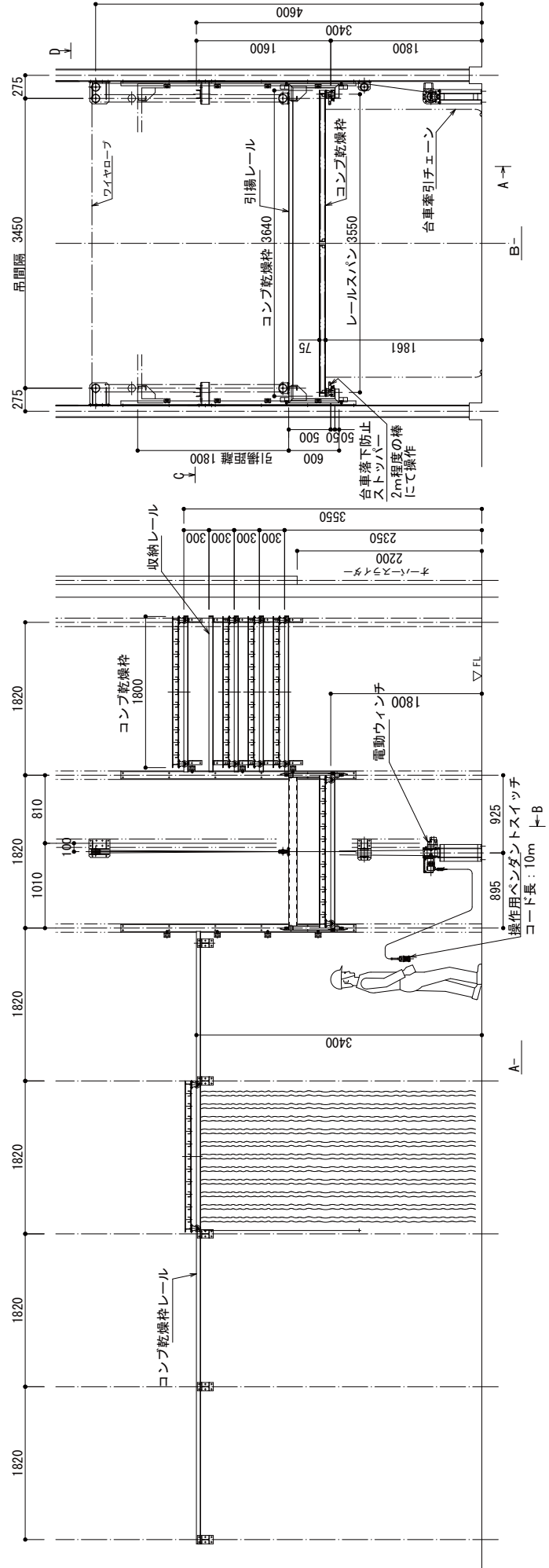
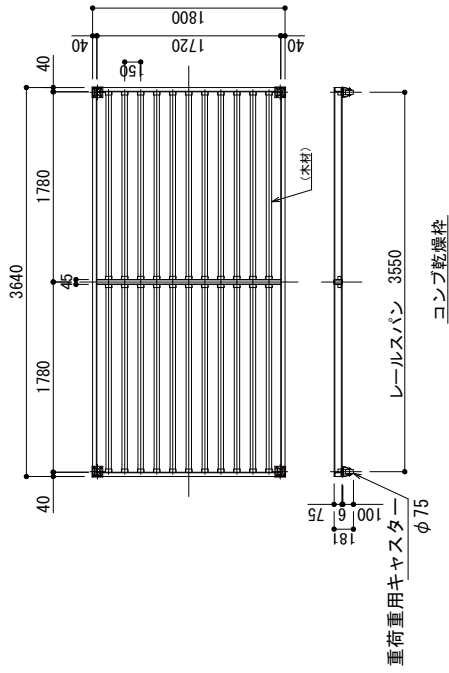
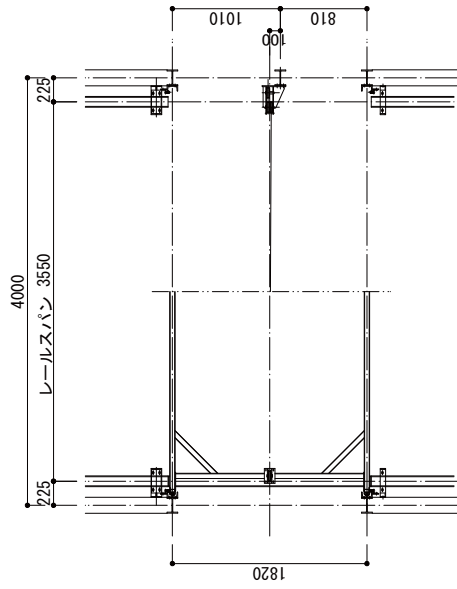
カラーガルバリウム鋼板 t0.35 角波 縦張り



立面図4

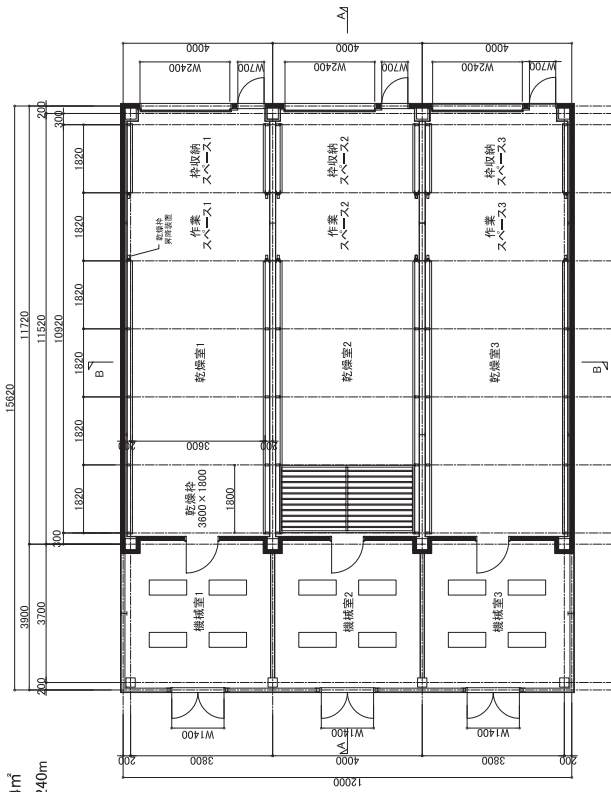
引揚装置要目	
引揚荷重	800 kg (コンブ 470kg) (コンブ乾燥枠 180kg) (引揚レール 150kg)
引揚速度	1.5 m/min (25 mm/s)
引揚距離	1.8 m程度
操作方式	押ボタン (ペンダントスイッチ)
電源	AC100V

引揚装置に上下限リミット及び位置決めリフトはなし
目視にて適切な位置で停止する



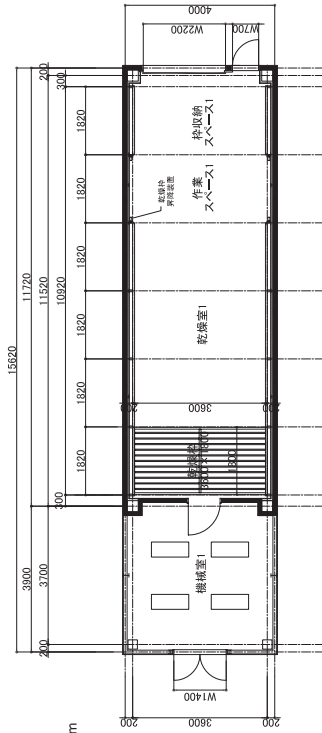
a案

■面積: 187.44㎡
■外壁長: 55.240m



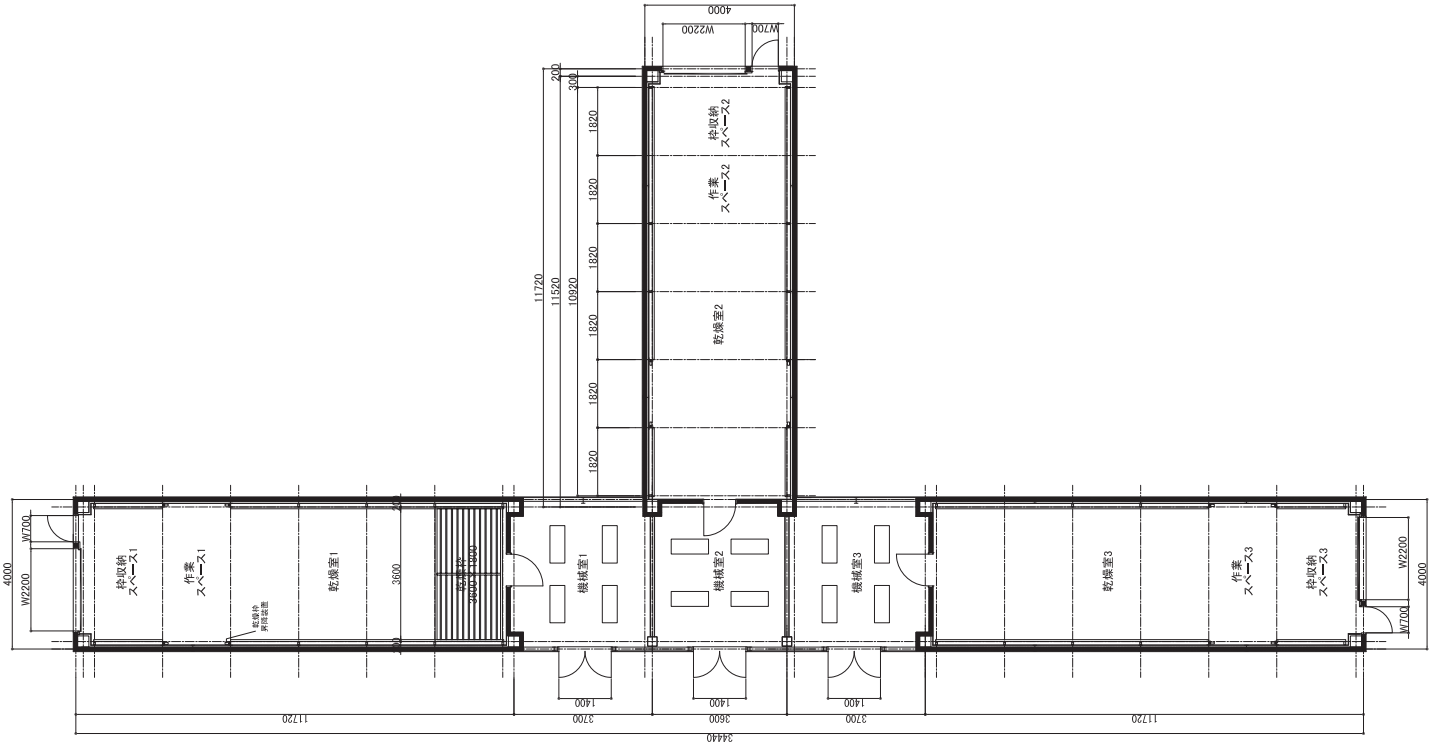
c案

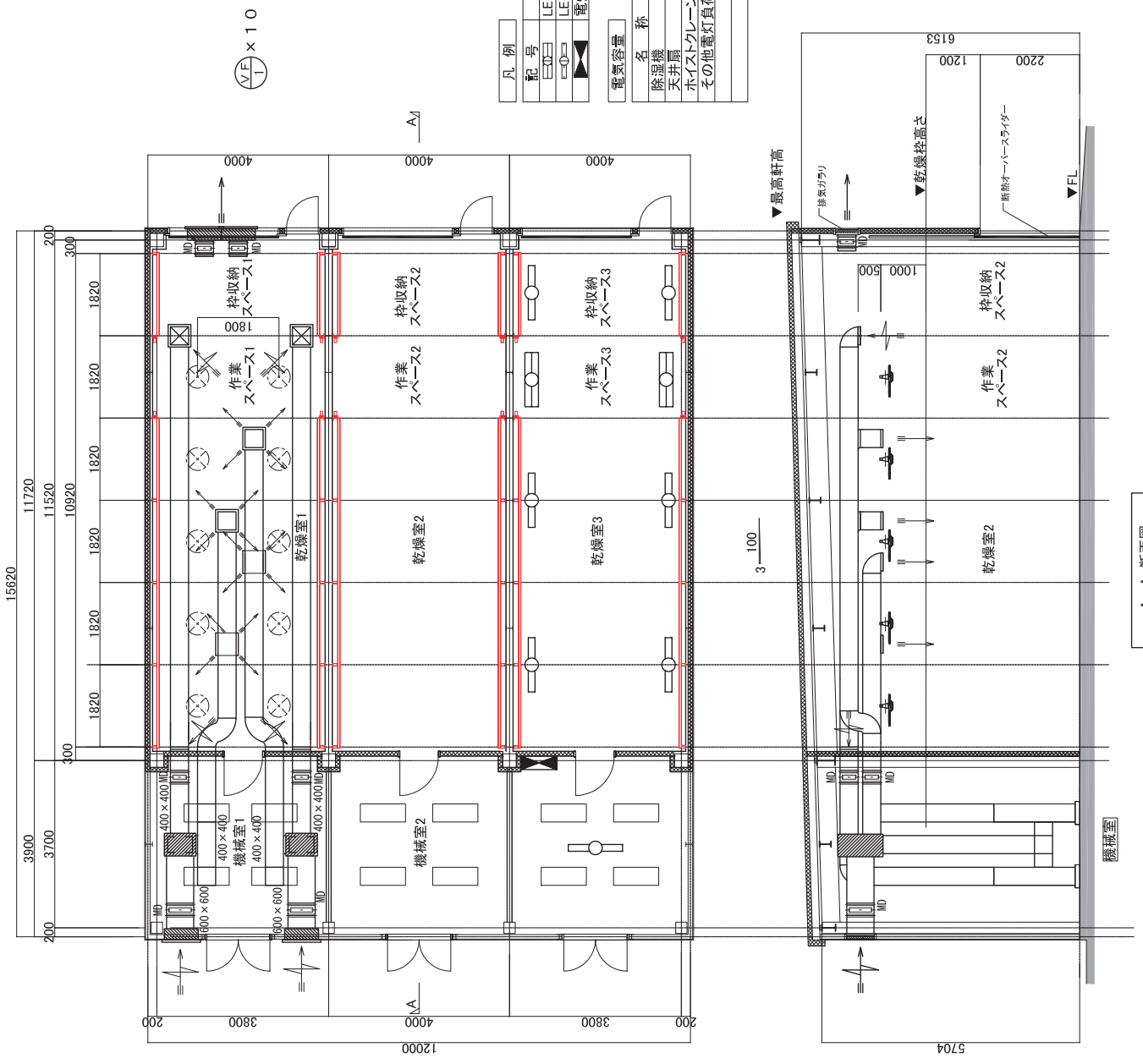
■面積: 62.48㎡
■外壁長: 39.240m



b案

■面積: 183.84㎡
■外壁長: 99.920m





A-A 断面図

凡例	名称
記号	名称
LED	LED照明器具 2灯用相当
LED	LED照明器具 1灯用相当
電灯	電灯・動力盤

電気容量	名称	負荷容量	備考
	除湿機	54.2 kW	
	天井扇	6.9 kW	
	ホイスクレーン	1.2 kW	
	その他電灯負荷	3.0 kW	

※各室電気・機械設備は共通とする。