

東京電機大学

博士論文

縦型氷蓄熱槽におけるハーベストアイスと空調二次側還水の

直接熱交換プロセスに関する研究

Study on Direct Heat Exchange Process Between Harvest Type Ice and

Return Water from Secondary Side Equipment in Vertical Ice/Water

Thermal Energy Storage Tank

平成 30 年 3 月

東京電機大学大学院

先端科学技術研究科 建築・建設環境工学専攻

南雲 祐輝

目次

1.	諸言	1
1.1.	研究背景	1
1.2.	研究目的	3
2.	直接熱交換プロセスのモデル構築について	6
2.1.	モデル構築にあたり	6
2.2.	縦型氷蓄熱槽内における氷の堆積状態	6
2.3.	固体と流体間の熱交換量について	9
3.	ハーベストアイスと還水との熱伝達率に関する検討	10
3.1.	熱伝達率の同定方法	10
3.2.	解氷時における体積と表面積に関する事前検討	13
3.2.1.	検討目的	13
3.2.2.	実験概要	13
3.2.3.	実験ケース概要	15
3.2.4.	実験結果	16
3.3.	熱伝達率の同定実験	17
3.3.1.	実験概要	17
3.3.2.	実験ケース	21
3.3.3.	還水面速度別の熱伝達率同定実験結果	22
4.	解氷過程におけるハーベストアイスの消失過程を加味したモデルの提案	23
4.1.	解氷過程における縦型氷蓄熱槽内の IPF 分布の概念	23
4.2.	解氷過程のモデル化	24
4.2.1.	HI の堆積具合を確認するための実験	24
4.2.2.	実験結果	27
5.	還水とハーベストアイスの直接熱交換プロセスモデルの検討	28
5.1.	計算方法の概要	28
5.2.	実在の縦型氷蓄熱槽を対象とした計算	35
6.	総括	37
	謝辞	38

1. 諸言

1.1. 研究背景

蓄熱システムの黎明期は、熱源機や受電設備容量縮減によるイニシャルコスト削減効果を意図して発展したが、経済成長にともなって、昼夜間の電力需要格差による電力設備の利用効率改善を発端とした電力負荷平準化が課題となり、昼夜間の電力コスト差に着目した深夜電力活用によるランニングコスト減が注目されるようになった。加えて、蓄熱システムは熱源機の運転効率面から省エネルギー化ひいては地球温暖化対策として普及促進され、さらに非常用水や冷温熱のバックアップとしてBCP/DCP対策にも期待されている。

また、近年では2011年3月11日に発生した東日本大震災により、日本国内における発電力が一時的に低調となり、震災直後には計画停電などが行われたが、一時的に稼動した火力発電などにより電気供給力は保てたが、省CO₂排出量の課題などから、現在においても節電への取り組みが必要とされている。発電所の建設に関しては、用地難等の問題により新規建設が困難であり、短時間の電力ピークに対して発電所を建設するには不経済である。これらの背景を受け、電気供給力に合わせて電気料金を変動させることや、電力会社からの要請により節電を行うことで報酬を受けることが出来るDR（ダイヤモンドリスポンス）の検討が進められており、空調用冷温水を事前に蓄えることの出来る蓄熱技術の需要は今後も高まっていくものと考えられる。

蓄熱方式は多くの種類があるが、氷の潜熱を利用する「氷蓄熱」は高密度な蓄熱が可能であり、水蓄熱と比較してコンパクトなスペースで運用可能なシステムである。また、蓄熱媒体である氷は、熱量の確保・取り出しが容易であり、急激な熱需要に対する即応性も良い。

氷蓄熱槽のオーソドックスな形状としては、地下二重ピットに蓄熱槽を施設する横型水槽のものや、屋上や地表にユニット式の蓄熱槽を施設するパッケージ型のものが挙げられ、冷熱利用方法としては、熱交換器を介しての一般空調用冷水温度（6～8℃）での利用が多い。しかしながら氷蓄熱式空調システムにおいては、よりエネルギー価値が高い低温冷水利用（4℃以下）を目指すことでさらなる導入効果が期待できる。

このように多岐にわたる社会の要請に柔軟に対応できることから、これらの有用性を包括的に享受することを目的として、筆者らは縦型氷蓄熱槽の拡張を提案¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾してきた。同システムを構築するため、2005年より図1.1.1に示す検討を行い、2012年4月に大学施設へ同システムを導入し運用実態の確認を行った。

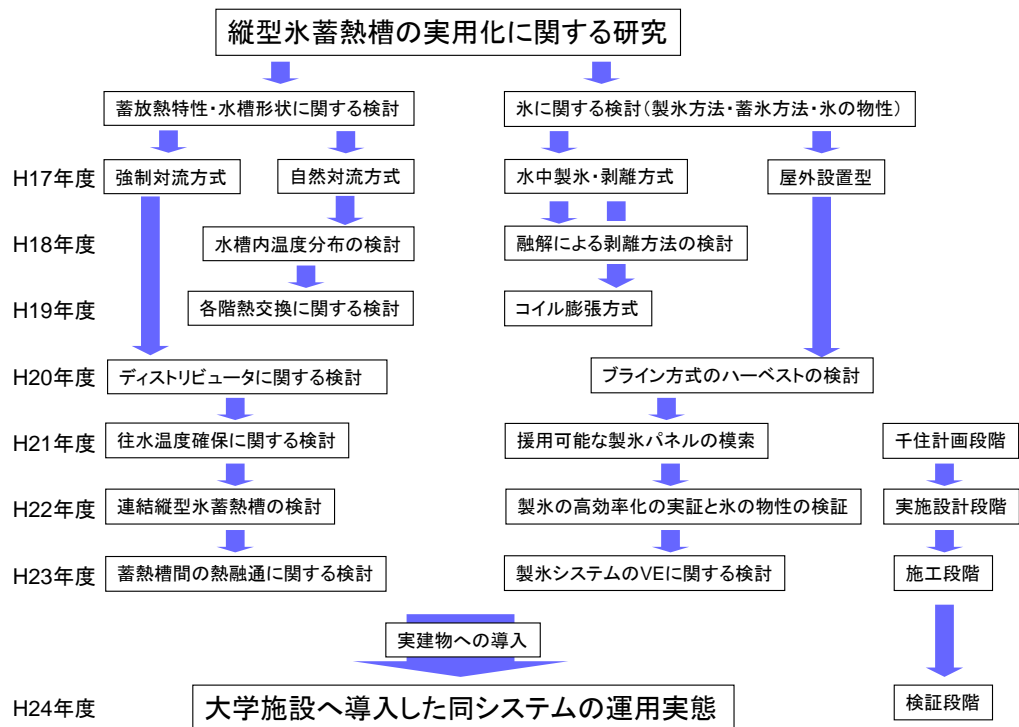


図 1.1.1 縦型氷蓄熱槽構築に関する検討項目一覧

1.2. 研究目的

図 1.2.1 に連結式縦型氷蓄熱槽を用いた空調システムの概念図を示す。縦型氷蓄熱槽は、一般的な二重スラブ利用による現場築造型ではなく、建物の高さ相当に図 1.2.2 に示す蓄熱槽（タンク状）を上下連結した温度成層型蓄熱槽下部から氷を投入可能としたもので、各階に小型ポンプを分散配置することで搬送動力の縮減を実現するとともに、個別空調同様にきめ細かい冷房要求に常時対応が可能である。また、プリファブリケーションした蓄熱槽を建物の梁に懸垂することで蓄熱槽専用の地下スペースを不要とし、地下土壌掘削量低減による工期短縮とコスト削減を見込むことができる。実際に導入された縦型氷蓄熱槽では、ハーベストアイス（以降 HI と略称）と空調二次側還水（以降、還水と略称）との直接熱交換を行う氷蓄熱槽が最上部に追加されており、蓄熱容量の増大と短時間での高負荷対応を試行したシステム⁸⁾となっている。また、ピーク時期における運用実態把握により、図 1.2.3 に示すように蓄熱槽上部に堆積した HI を還水により解氷させた後においても、蓄熱槽内の温度成層が乱れることはなく、中間期の温度成層型水蓄熱槽と同様に放熱運転が可能であることを確認⁹⁾¹⁰⁾している。

しかしながら、これらの結果は当該システムにおいてのみ実証された知見であり、解氷時の還水と HI との直接熱交換プロセスについては検討が不足しているため、同様のシステムの水平展開に向けては、再現性・確実性の担保に向けた検討が必要と考える。そこで、本研究においては、縦型氷蓄熱槽における還水と HI の直接熱交換プロセスに関する検討を行った。具体的には、直接熱交換プロセスのモデル構築について考察（2章）し、HI の解氷にともなう表面積の減少傾向の把握に基づき、蓄熱槽のカットモデル実験により堆積状態にある HI と還水との熱伝達率の同定を行った（3章）。また、解氷時における HI の消失過程を加味した単位体積あたりの表面積を、実験結果に基づいてモデル化した（4章）。さらに、3章と4章の結果を用いて還水と HI の直接熱交換プロセスをモデル化し、HI 堆積厚さと槽内温度変化の関係を推定した（5章）。

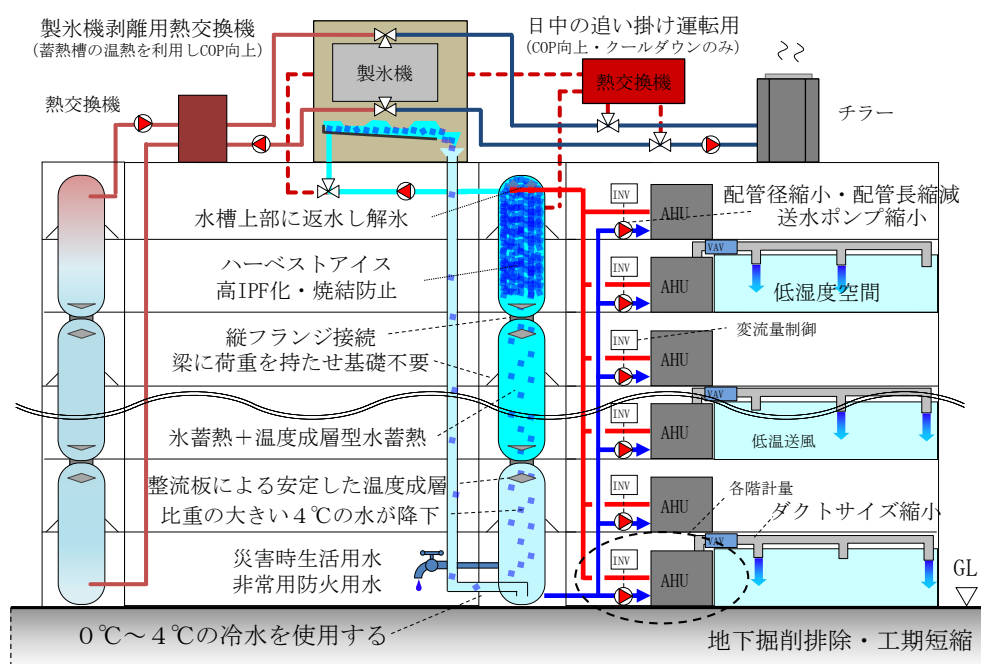


図 1.2.1 連結式縦型氷蓄熱槽概要



図 1.2.2 縦型氷蓄熱槽に用いるタンクー基の全景

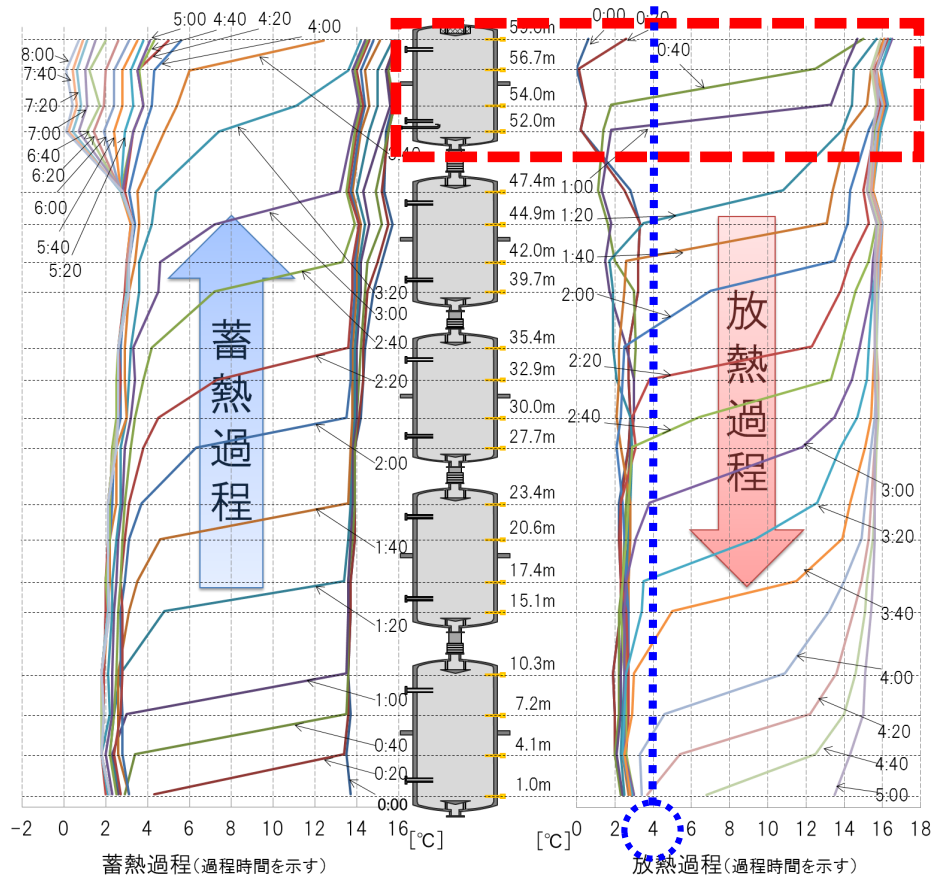


図 1.2.3 大学施設に導入した縦型氷蓄熱槽の蓄熱時・放熱時の温度プロフィール

2. 直接熱交換プロセスのモデル構築について

2.1. モデル構築にあたり

HI と還水における直接熱交換プロセスのモデルを構築するにあたり、HI と還水との熱交換量の算出が必須となる。固体 (HI) と流体 (還水) との熱交換量はニュートンの冷却法則から求めることができる。ニュートンの冷却法則を用いて計算を行う場合、熱伝達率・固体の表面積・固体の表面温度・流体の代表温度が必要となる。

2.2. 縦型氷蓄熱槽内における氷の堆積状態

縦型氷蓄熱槽に用いられる氷は、図 2.2.1 に示す HI である。図 2.2.2 に示すように、2012 年 4 月に大学施設へ導入された縦型氷蓄熱槽においては、HI 製氷装置を屋上に施設している。

縦型氷蓄熱槽における HI の製氷・蓄氷工程を示す。インバータターボ冷凍機の予冷により縦型氷蓄熱槽内の冷水を 2℃まで冷却し、その後ブラインヒートポンプチラーから-5℃のブラインをハーベスト式製氷機内の製氷プレートへ送り、同時に製氷機下部に施設した水槽から散水用ポンプ(3 台)を用いて水を汲み上げ、製氷上部水槽から製氷プレートへ向けて散水して製氷を行う。この時の製氷時間は 20 分間である。この時間については、事前に検討を行い決定した。製氷した氷の剥離については、冷温水槽の水と剥離用ブライン(以後、温ブライン)を熱交換させて剥離用温ブラインを 5℃まで上昇させ、製氷ユニットへ送水し氷の剥離を行う。製氷プレートから剥離した氷は、製氷プレート直下のスクリーコンベヤへ落下し、氷落込配管内を閉塞することなく通過できる大きさまで破氷し、氷投入槽へ移氷する。そのため、図 2.2.1 に示すように、氷片ごとに形状が異なる。その後、氷投入槽へ氷が落ち込むと、オーバーフロー管から製氷機下部水槽へオーバーフロー分の水が移動し、水位変化する。その結果、氷投入槽へ移氷した氷は縦蓄循環ポンプにより氷落込配管内を通り連結槽内へ蓄氷される。なお、移氷中の氷の融解を可能な限り抑えるため、最上部の連結槽直下から移氷する。図 2.2.3 に縦型氷蓄熱槽内に堆積する HI のイメージを示す。蓄熱槽下部から槽内に投入された HI は浮上し、蓄熱槽最上部から下側に堆積し始め、HI 堆積層が形成される。

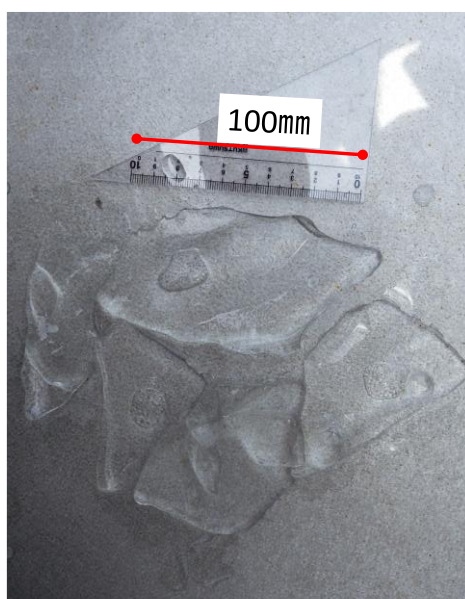


図 2.2.1 縦型氷蓄熱槽内における HI の一例

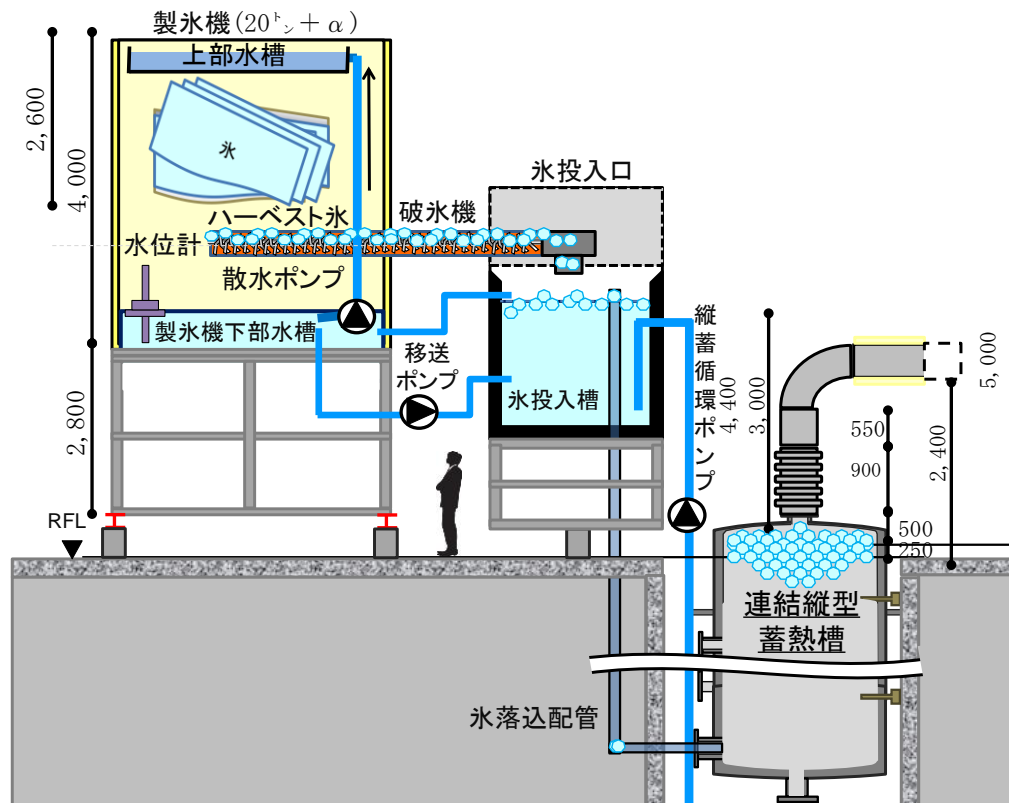


図 2.2.2 HI 製氷機概要

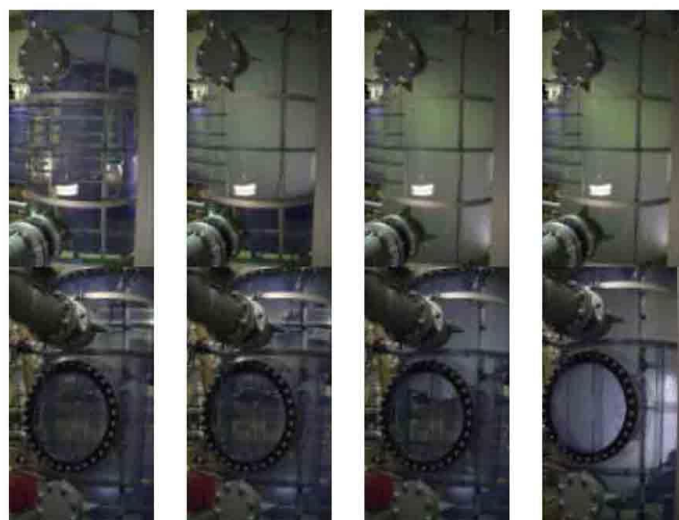
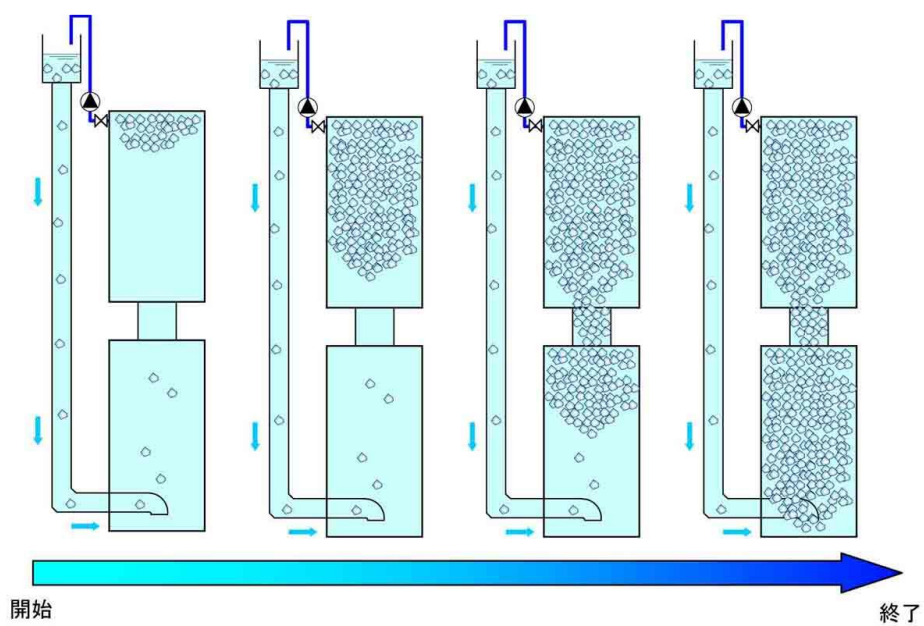


図 2.2.3 HI が堆積する様子

2.3. 固体と流体間の熱交換量について

ニュートンの冷却法則にて熱交換量を計算する場合、固体（HI）の表面温度は 0°C とし、流体の代表温度を縦型氷蓄熱槽へ入力する還水温度と仮定すると、未知数は熱伝達率と固体の表面積である。

図 2.3.1 に示すように、不定形な HI が蓄熱槽内に堆積した場合、HI 同士の間隔は堆積の度に異なり、その間を通過する還水の流速・流れ方向も一定では無いと考えられる。堆積した HI と還水における熱伝達率について、図 2.2.3、図 2.3.1 のような状況を再現する熱伝達率の実験式について既往の研究¹¹⁾¹²⁾を調査したが、適用可能な知見を見出すことができなかった。

また、堆積した HI の表面積については、解氷による体積変化にともなって時系列的に変化するため、堆積した不定形な HI 表面積を求めることは困難である。

そこで、HI と還水の直接熱交換量を算出するために必要な要素である、熱伝達率と融解を加味した HI 表面積について検討を行った。

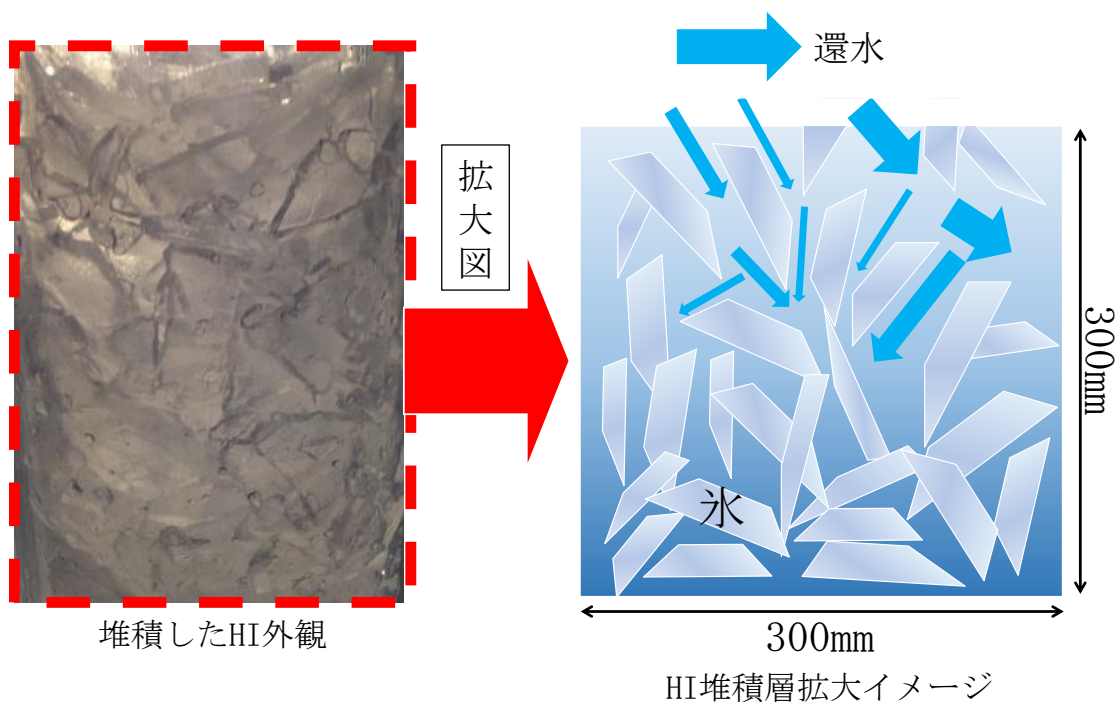


図 2.3.1 蓄熱槽内における HI 堆積層の拡大イメージ

3. ハーベストアイスと還水との熱伝達率に関する検討

3.1. 熱伝達率の同定方法

図 3.1.1 に熱伝達率を同定するための検討概要を示す。HI 堆積層内における熱伝達率を同定するため、蓄熱槽のカットモデルを用いた実験により、HI と還水を模した冷水（疑似還水）との熱交換量を求め、ニュートンの冷却法則を用いて熱伝達率を逆算することとした。縮小モデルを用いた実験の場合、相似則に基づいた流量換算が必要である。しかし、図 3.1.2 に CFD 解析における縦型氷蓄熱槽内の温度変化（蓄熱時）、図 3.1.3 に CFD 解析における縦型氷蓄熱槽内の温度変化（放熱時）に示すように、縦型氷蓄熱槽においてはタンク頭頂部から冷水が入力され、タンク最下部から抜き出しているため（冷房放熱時）、タンク最端部（最上部）から最端部（最下部）へ一次元的に温度変化していることがわかる。また、1 章の図 1.1.4 にも示したように、HI が堆積した実稼働時における縦型氷蓄熱槽の温度プロファイルにおいても、同様の傾向がみられた。そこで、縦型氷蓄熱槽の一部分を抜き出したものとして、カットモデル（実験水槽）を用いた実験を行った。

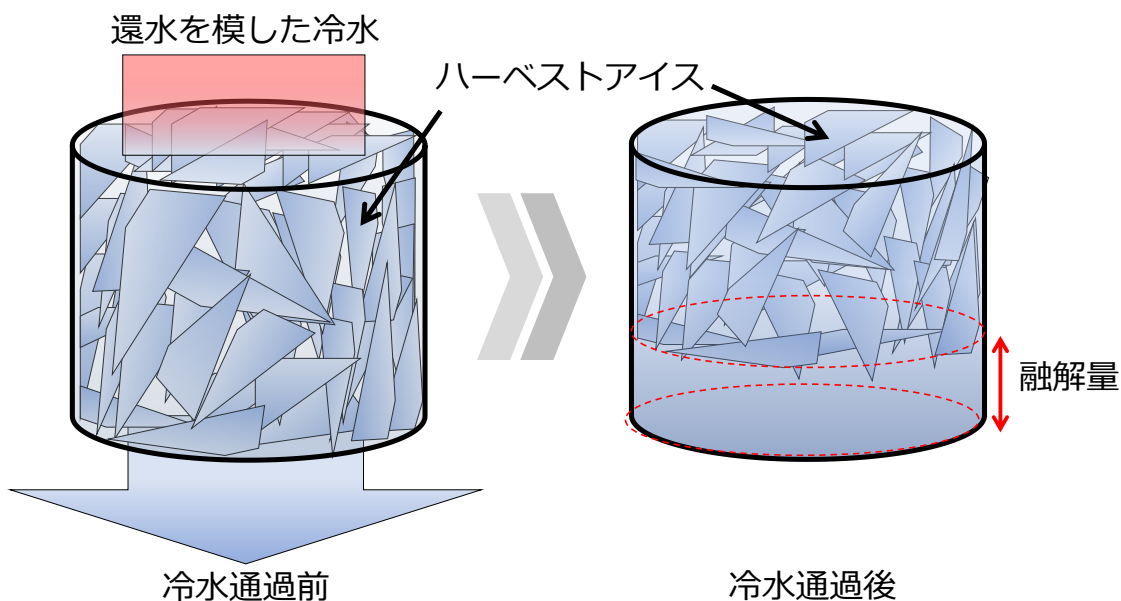


図 3.1.1 熱伝達率同定のための検討概要

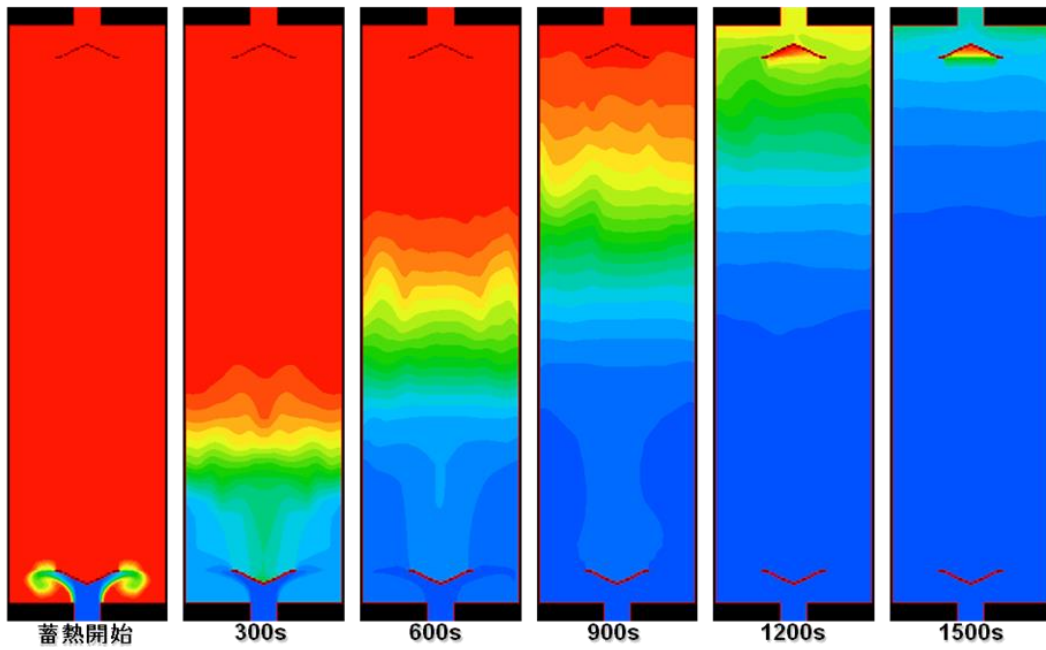


図 3.1.2 CFD 解析における縦型氷蓄熱槽内の温度変化（蓄熱時）

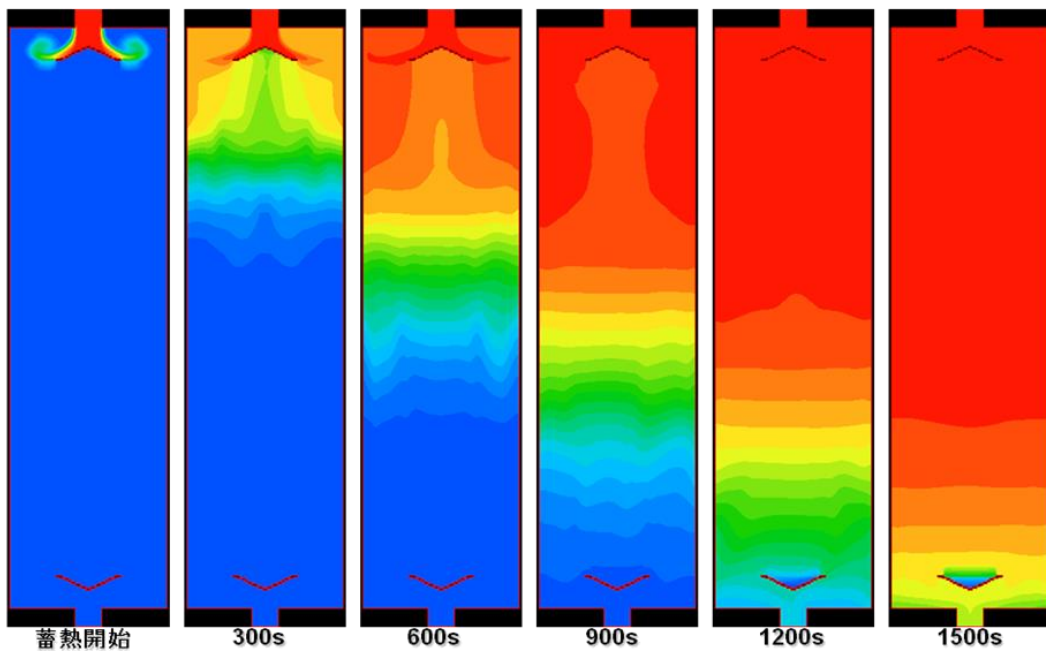


図 3.1.3 CFD 解析における縦型氷蓄熱槽内の温度変化（放熱時）

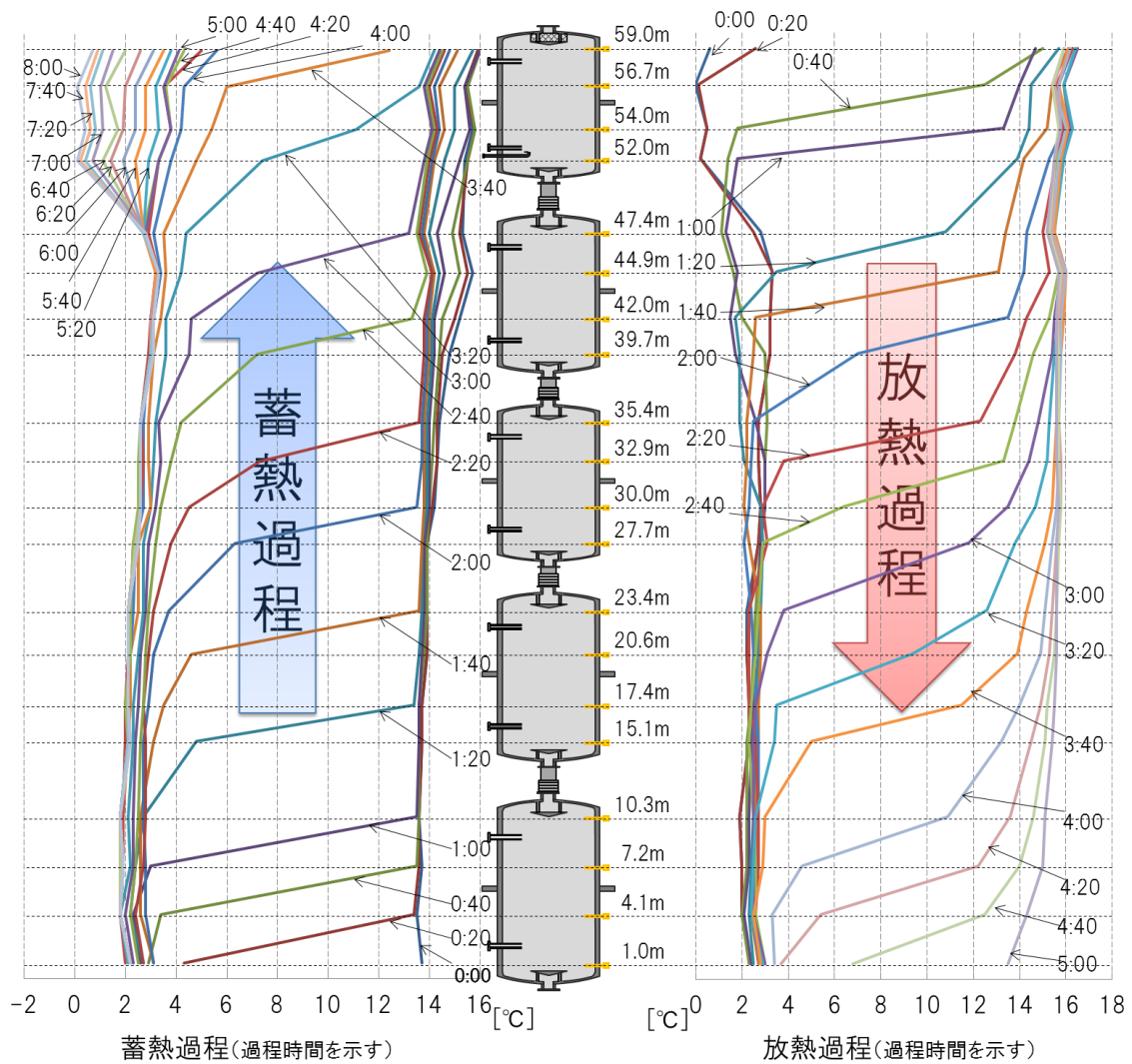


図 3.1.4 実稼働時における縦型氷蓄熱槽温度プロフィール

3.2. 解氷時における体積と表面積に関する事前検討

3.2.1. 検討目的

HI 堆積層内における熱伝達率は、ニュートンの冷却法則から逆算して熱伝達率を同定する。しかし、HI は融解にともない表面積が常に変化するものである。そこで、HI 表面積の減少については、解氷時における体積と表面積の相関の事前検討を実施し、その実験結果を用いて HI の解氷量から解氷途中の HI 表面積を定めた。

3.2.2. 実験概要

図 3.2.1 に氷の形状と解氷割合を確認する実験装置概要を示す。実験は、蓄熱槽内に還水が入力された状況を模擬するため、トルク調整可能な攪拌機により強制的に対流を発生させ、還水を模擬した 15°C で満たされた水槽へ試験体氷を入れ込み、時間経過とともに試験体氷の質量（体積）・表面積を計測し、試験体氷の体積割合と表面積割合を確認した。なお、試験体氷は攪拌機の回転羽根に氷が巻き込まれないよう流出防止網の中に氷を没した。また、用いた氷は、繰り返し実験による信頼性を担保するため別途用意した定形氷（型枠利用）とした。

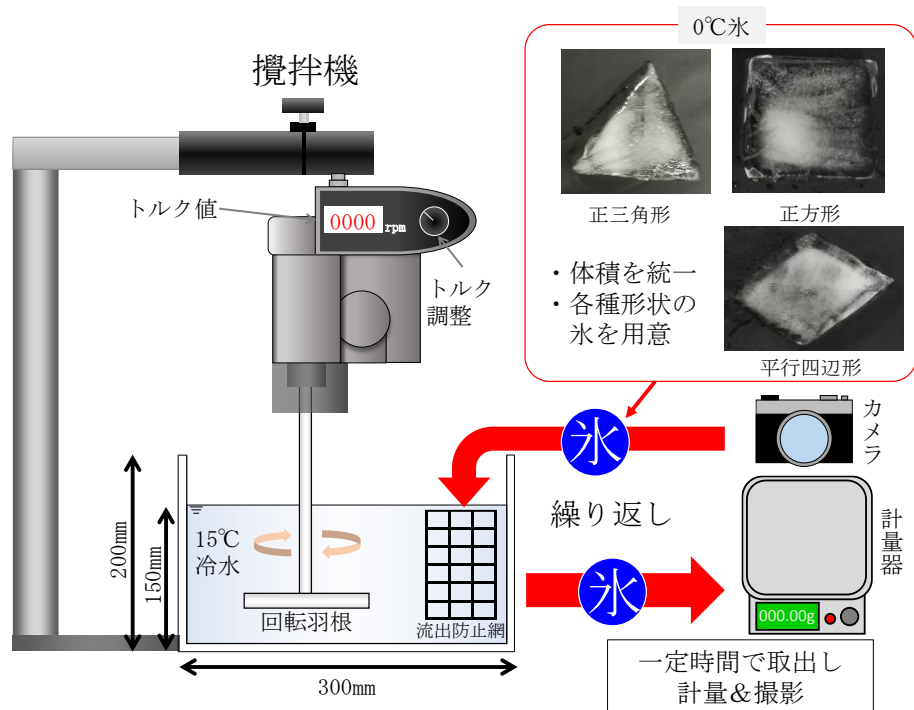


図 3.2.1 氷の形状と解氷割合を確認する実験装置概要

実験は、実験開始前に冷水に投入して 0℃一様にした氷（1 ケースにつき、同形状氷を 3 片）を使用した。実験中は、図 3.2.2 に示すように一定時間ごとに氷を取り出して撮影し、計量器にて質量を計量した。氷の表面積については撮影した画像データに基づいて計測した。以上の工程を実験に用いた全ての氷が完全解氷するまで繰り返し行った。

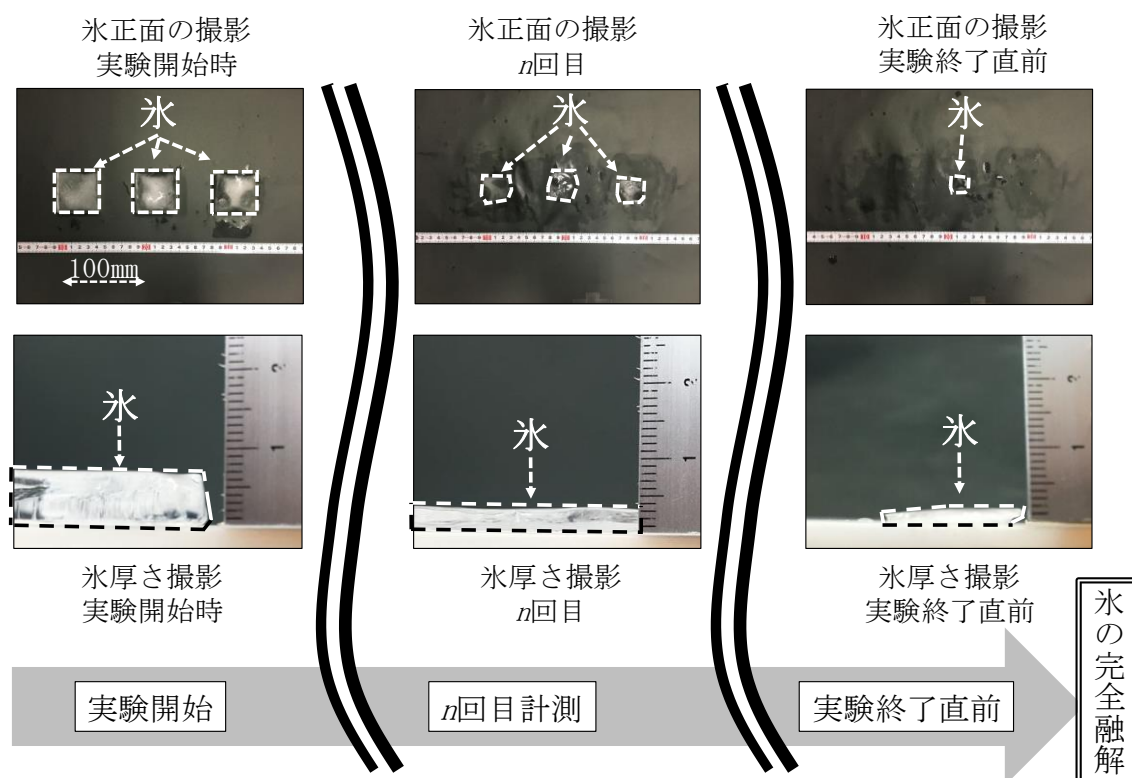


図 3.2.2 氷が完全解氷するまでの氷正面と厚さ撮影の例

3.2.3. 実験ケース概要

表 3.2.1 に実験で使用した試験体氷の概要、表 3.2.2 に実験ケース別の氷完全解氷時間と攪拌速度を示す。実験で用いた氷の形状は、正方形・正三角形・平行四辺形の3種とした。なお、各氷の寸法は、HI 製氷機（実機）で製造した氷の最大長辺と厚さを測定（計 1,000 個）し平均値を参考にした。なお、攪拌速度については、実運用に近い状況を再現するため、後述の実験装置を用いて解氷時間に関する実験を行い、その結果を反映して設定した。実験は、攪拌機の攪拌速度を低速から高速の間で5段階に分けた5ケースと、攪拌機を停止した状態の1ケースとして、攪拌速度別6ケースを氷の形状ごとに行った。

表 3.2.1 実験で使用した氷の概要

氷形状名	縦	横	厚さ	体積	表面積
	[mm]			[mm ³]	[mm ²]
▲：正三角形	77	67	7	18,200	6,600
■：正方形	51	51			7,400
◆：平行四辺形	50	52			6,700

表 3.2.2 実験ケース別の氷完全解氷時間と攪拌速度

実験ケース	完全解氷時間[s]	攪拌速度
ケース1	24	
ケース2	40	
ケース3	100	
ケース4	135	
ケース5	166	
ケース6	240	

3.2.4. 実験結果

図 3.2.3 に解氷開始から完全解氷するまでの氷体積と氷表面積の相関を示す。実験開始時の氷体積と氷表面積を 100% とし、氷が完全解氷（実験終了時）したときを 0% と無次元化して示した。

図中に全実験ケースの実験結果を平均した近似曲線を示す。また、参考として体積あたりの表面積が最も小さい球形の氷が相似形を保ちつつ解氷すると仮定して計算した場合を破線で示す。なお、全方向から均一な水流にさらされることが考えにくい板状氷についてのモデル化は一先ず断念した。

全ケースを平均した近似曲線の相関係数が高いことから、氷体積と氷表面積の減少割合は、攪拌速度や氷の形状に関わらず、形状への依存度は低い範囲内と判断した。

この実験結果により、融解した氷体積から表面積を算定することが可能となった。

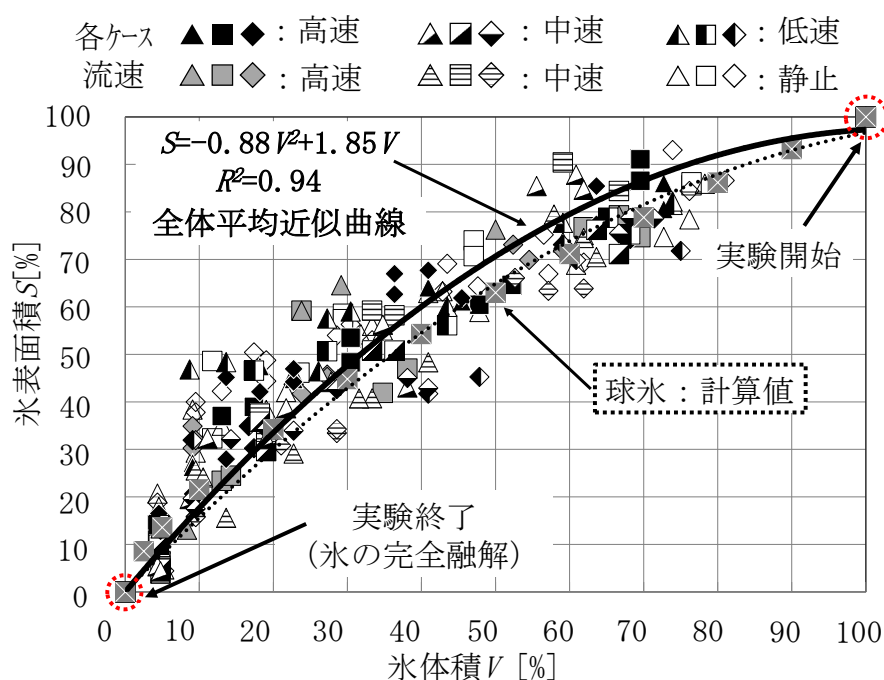


図 3.2.3 氷が完全解氷するまでの氷体積と表面積の割合

3.3. 熱伝達率の同定実験

3.3.1. 実験概要

実験水槽（カットモデル）にHIを充てんし、（擬似）還水を通過させ、融け残ったHIから熱交換量を求めて熱伝達率を逆算することを目的に実験を行った。

図 3.3.1 に実験装置概要を示す。実験は室内気温を 0°C に設定した冷凍庫内で行った。バッファタンクを頭部に持つ透明配管（150A：図 3.3.2）を縦型氷蓄熱槽の一部と見立てた。HI 堆積層の最上部（図 3.3.3）と最下部（図 3.3.4）に熱電対を設置し、熱交換前後の疑似還水温度を計測した。疑似還水の流量調整は、排水管に接続した流量計（図 3.3.5）を確認し、ポンプのインバータと排水管に接続したボールバルブ（図 3.3.6）にて行い、さらにオーバーフローを備えたバッファタンクにて重力落下による流入速度の均整化を図った。実験で使用するHIは、HI製氷機（実機）を用いて製造した氷を使用した。

実験は次の手順にて行った（文頭の○数字は図 3.3.1 内の番号に紐づく）。

- ①：冷水に投入し 0°C 一様にした HI を実験水槽内に充てん
- ②：実験水槽内を 0°C の冷水で満たす
- ③：還水を想定した 17°C（実験水槽入口までに 15°C 程度まで低下）の冷水（以下、疑似還水）を貯水タンクからバッファタンクへと送水
- ④：バッファタンク内を疑似還水で満たし、オーバーフローさせることで水位を一定に保持
- ⑤：オーバーフロー状態のまま、実験水槽上部の止水板を取り外し、同時に排水管のボールバルブを開き排水を開始
- ⑥：排水量を計量し、想定した排水量に達したことを確認し、実験水槽上部の止水板を戻して冷水の排水を停止
- ⑦：実験水槽内の冷水を全て排水し、残留した HI の質量を計測

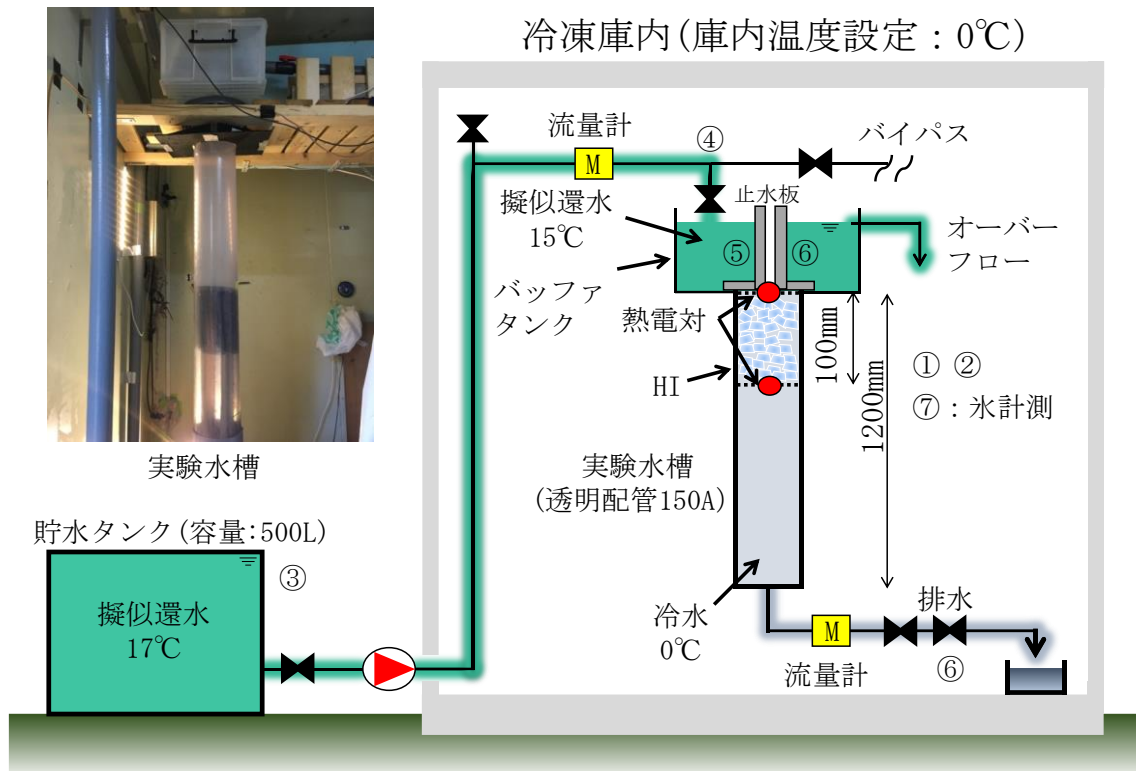


図 3.3.1 熱伝達率を同定するための実験装置概要および実験手順



図 3.3.2 透明配管 (150A)

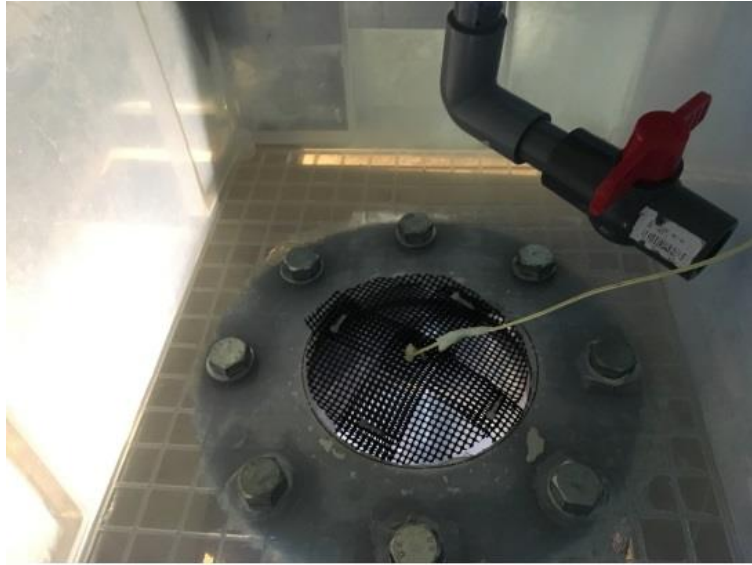


图 3.3.3 計測用 T 型熱電対 (配管入口)

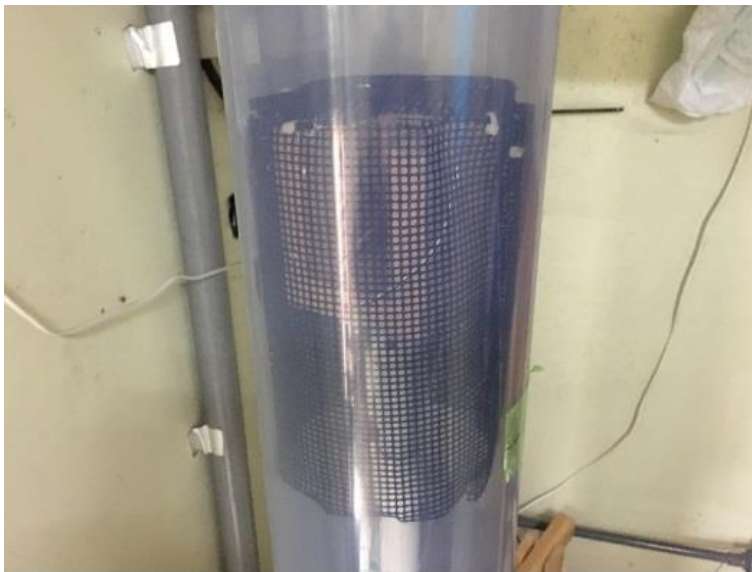


图 3.3.4 計測用 T 型熱電対 (HI 堆積層底部)



図 3.3.5 流量計



図 3.3.6 調整用バルブと排水切り替えバルブ

3.3.2. 実験ケース

図 3.3.7 に還水流量のパラメータ設定に用いた還水面速度の概念図を示す。HI の堆積層内を通過する還水の流速は局所的に異なるが、平面積あたりの速度として取り扱う面速度を用いて簡便化した。

また、HI が満たされた領域の氷充てん率（Ice Packing Factor：以下 IPF と略称）については、HI 製氷機（実機）で製造した氷を用いて事前観察を繰り返し、充てん状態を模擬した結果が約 50%であったことから、その値を実験開始時の IPF とした。また、実験水槽体積の 50%が HI で一様に充てんされていると仮定し、実験水槽断面における擬似還水の通水面積割合を 50%と仮定した。

実験時の HI 堆積層内還水面速度については、温度成層型蓄熱槽（実機）の還水流入口の推奨流速（0.1m/s 以下）と完全混合型蓄熱槽の連通管内における推奨流速（0.1~0.3m/s）を、HI が堆積した縦型氷蓄熱槽（実機）の断面積における還水面速度に再計算し、設定した。また、排水量は HI 堆積層内に占める水量（約 0.9L）とした。

表 3.3.1 に還水面速度ごとの実験ケースを示す。実験は、HI 堆積層内の還水面速度別に行った。HI 堆積層内の還水面速度の調整は、流量計とボールバルブにて行った。

面速度の設定

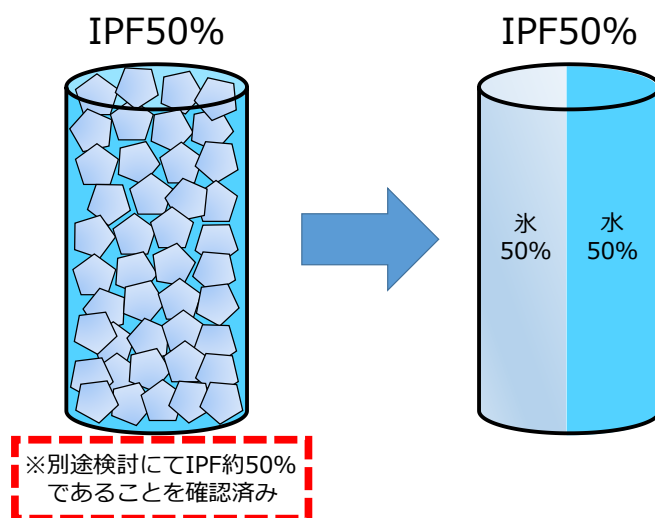


図 3.3.7 還水面速度の概要図

表 3.3.1 熱伝達率同定実験の実験ケース

実験ケース	HI 堆積厚さ [mm]	HI 堆積層内還水面速度 [mm/s]
ケース 1	100	66
ケース 2		50
ケース 3		34
ケース 4		19
ケース 5		3

3.3.3. 還水面速度別の熱伝達率同定実験結果

図 3.3.8 に HI 堆積層内の熱伝達率と還水面速度の相関を示す。HI と擬似還水との交換熱量を、全て HI の融解に要したと仮定し、実験終了後に融け残った HI を計量して熱交換量を算出し、その熱交換量、HI 表面積、擬似還水温度（還水投入前と HI 堆積層通過直後の平均擬似還水温度）、HI 表面温度(0℃)を用いてニュートンの冷却法則から熱伝達率を逆算した。なお、図 3.2.3 を参考に実験終了時の HI 表面積を決定し、実験開始前の HI 表面積との平均とした。

$$h = 0.17u^{0.78} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、

h : 熱伝達率 [kW/m²・K]
 u : 還水面速度 [mm/s]

なお、 h の適用範囲としては、実験装置における還水面速度で 3 mm/s～66 mm/s であり、水蓄熱槽入口の流入速度 0.01m/s～0.2m/s 相当である。

還水面速度の増加割合に対して熱伝達率の増分割合は減少する傾向を示している。HI 堆積層内の熱伝達率を総括的に捉えると、HI の体積、表面積、個数の減少や形状の変化、および還水面速度や還水温度変動等の影響が混在するものの、通常の固体の場合と同様の推移傾向¹³⁾を確認した。以降、熱交換量計算時には、式 (1) を用いて HI と還水の熱交換量を同定することとする。

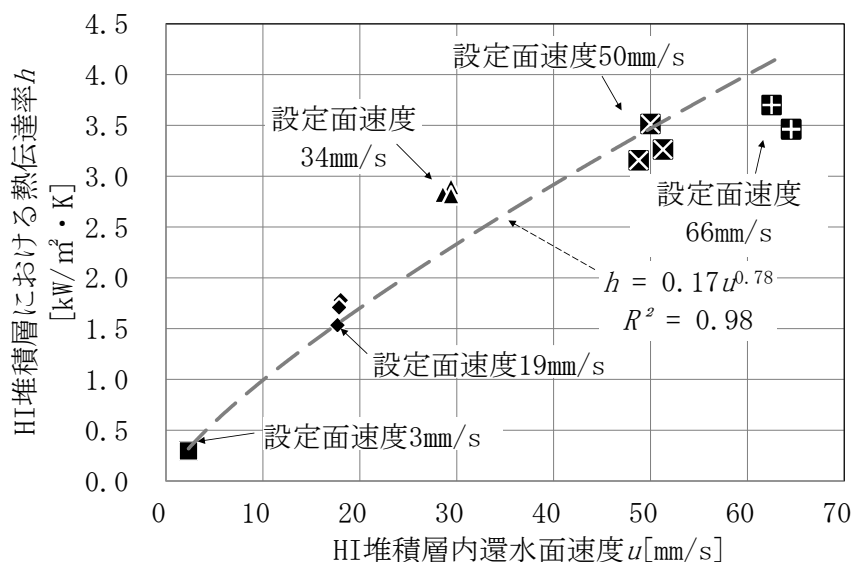


図 3.3.8 HI 堆積層における熱伝達率と還水面速度の相関

4. 解氷過程におけるハーベストアイスの消失過程を加味したモデルの提案

4.1. 解氷過程における縦型氷蓄熱槽内の IPF 分布の概念

図 4.1.1 に解氷過程における縦型氷蓄熱槽内の IPF 分布の概念図を示す。HI 堆積層の上部では、還水と HI との温度差が大きいため熱伝達量は大きく、下部では還水の冷却にともなって温度差が小さくなり熱伝達量は小さくなる。したがって、HI 堆積層の上部ほど、解氷により HI の大きさは小さく、下部に近づくにつれて解氷前の HI の大きさに近いと考えられる。なお、谷野らは実験水槽を利用したシャーベットアイスの解氷実験¹⁴⁾において同様の傾向を提示している。

また、HI 堆積層の単位体積あたりの HI 総表面積は IPF が高いほど多くなる。あわせて、蓄熱槽に入力する還水の流量・温度の条件にともなって、IPF の分布も変化する。

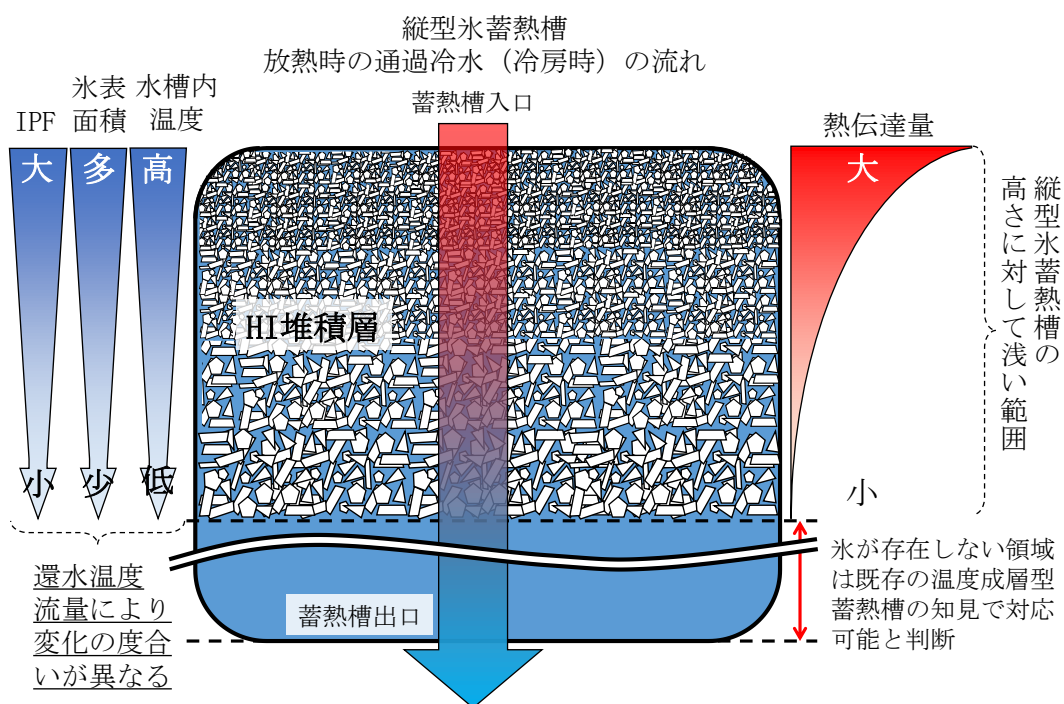


図 4.1.1 解氷過程の縦型氷蓄熱槽内の IPF 分布の概念図

4.2. 解氷過程のモデル化

解氷過程における単位体積あたりの HI 総表面積を求めるには、HI 堆積層内における HI 体積の総和を、IPF と HI の総数から求める必要がある。しかしながら、実際の HI 総数を求めることは現実的ではない。そのため、解氷開始前の HI の形状・大きさ、および IPF の変化を含む解氷過程をモデル化する必要がある。

3 章で示したように解氷過程における HI の体積と表面積の形状に依拠する相関は低いことから、本検討の範囲内において解氷開始前の HI の形状を特定する必要度は大きくない。したがって、解氷前の HI 堆積層は、3 章の実験で用いた直方体相当の HI（実氷平均:W51 mm×V51 mm×H7 mm）で満たされているとし、解氷過程における HI の形状変化は 2 章で確認した実験にて再現できると考えた。しかしながら、解氷による HI の大きさ減少にともなう IPF の増加傾向については、HI 同士の堆積具合を確認する必要があるため、以下の検討を行った。

4.2.1. HI の堆積具合を確認するための実験

HI の堆積具合は、解氷にともなって連続的に変化するため、実氷を用いた検討では瞬間的なデータ取得が困難である。また、直方体 HI を整列配置することによる理論上の想定値では、浮力による自然な堆積を再現することはできない。そこで、疑似氷を用いた解氷過程の堆積具合を段階的に確認する実験を行った。

実験は、大型の実験水槽（図 4.2.1）を水で満たし、その中へ小型のガラス水槽（図 4.2.2、W295 mm×V250 mm×H260 mm）を設置し、ガラス水槽へ自然な堆積状態となるように擬似氷を投入し、疑似氷の個数から IPF を算出して、IPF から単位体積あたりの HI 表面積を同定した。

表 4.2.1 と図 4.2.3 に使用した疑似氷の大きさを示す。なお、疑似氷の大きさは、2 章の実験で用いた直方体 HI の減少過程データを反映させ、解氷前の体積を 1.0 として、体積比で 0.05～1.0 の範囲で設定した。また、疑似氷はスタイロフォームを加工して作成した。



図 4.2.1 大型水槽（500L）



図 4.2.2 ガラス水槽

表 4.2.1 解氷過程を模擬した疑似氷の大きさ

解氷前を 1.0 とした解氷中の HI 一片の体積比	HI 寸法 (W・V・H) [mm]
①0.05	38.0×38.0×0.7
②0.10	39.0×39.0×1.0
③0.20	40.0×40.0×2.0
④0.30	41.0×41.0×3.0
⑤0.40	42.0×42.0×4.0
⑥0.60	44.0×44.0×6.0
⑦0.80	48.0×48.0×6.0
⑧1.00 (解氷前)	51.0×51.0×7.0

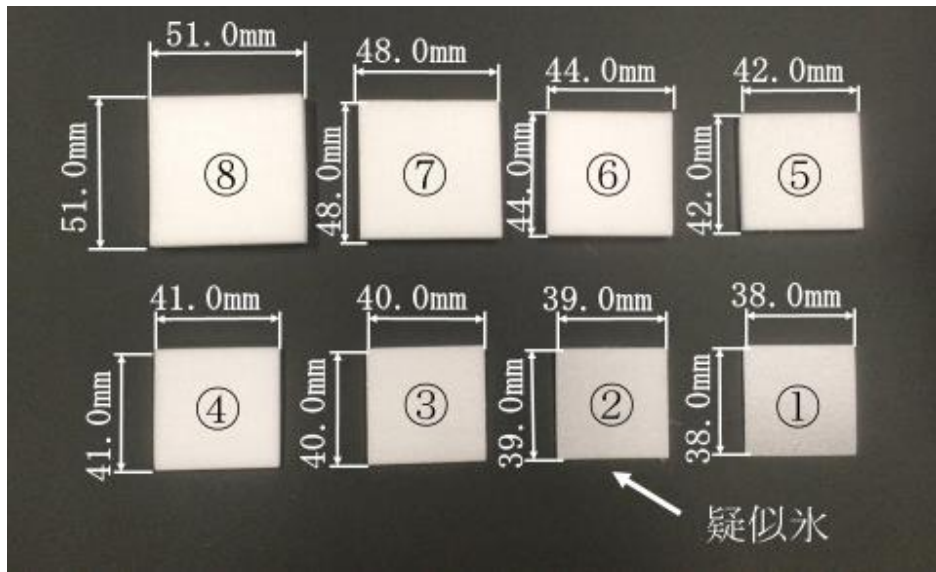


図 4.2.3 疑似氷の大きさ

4.2.2. 実験結果

図 4.2.4 に疑似氷の大きさ（一片の体積比）別の IPF と、単位体積あたりの HI 総表面積を示す。IPF に関する実験式 (2)、HI 総表面積に関する実験式 (3) を以降のモデルに適用する。

$$IPF_{HI} = 0.49 V_R^{-0.11} \quad \dots\dots (2)$$

$$A_{HI} = 156.03 V_R^{-0.86} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、

IPF_{HI} : HI 堆積層内の氷充てん率 [-]

V_R : 解氷前の HI 体積を 1.0 とした場合の HI 体積比 [-]

A_{HI} : 単位体積あたりの HI 総表面積 [m^2/m^3]

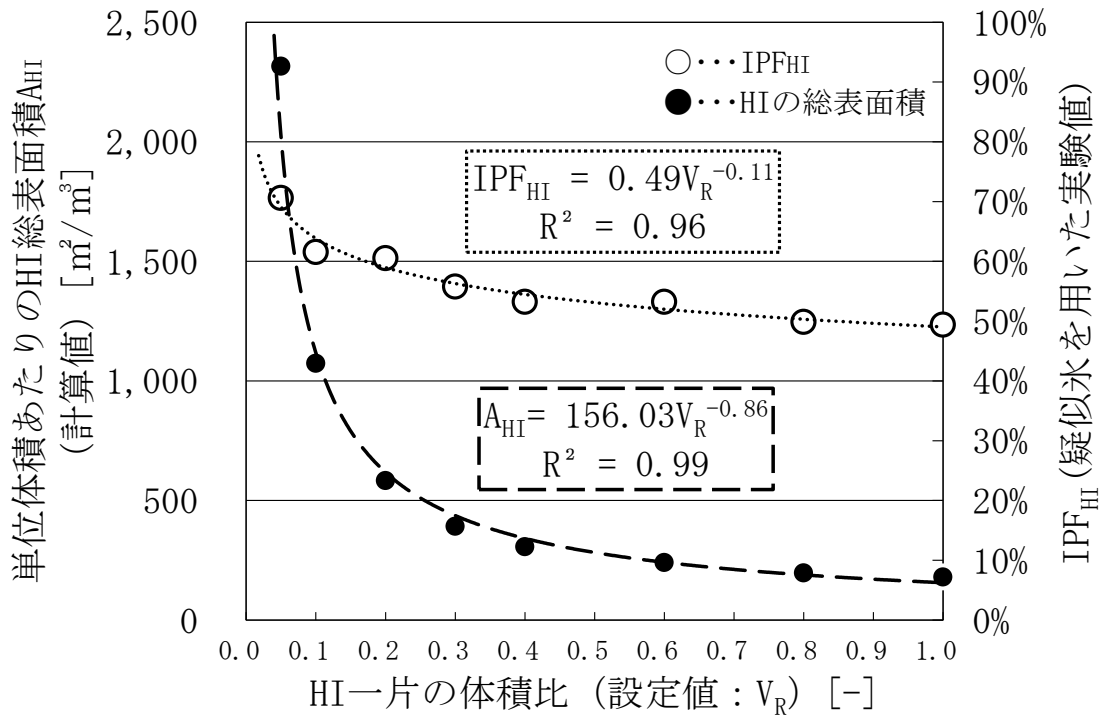


図 4.2.4 HI 一片の体積比と IPF・総表面積の相関

5. 還水とハーベストアイスの直接熱交換プロセスモデルの検討

5.1. 計算方法の概要

HI 堆積層内の還水面速度と熱伝達率の相関、また、HI 一片の体積比と単位体積あたりの HI 総表面積の相関を前述した。これらの結果を用い、還水と HI の直接熱交換プロセスを以下の仮定の下に計算し、熱交換過程の還水温度を推定した。

図 5.1.1～図 5.1.6 に蓄熱槽内の熱交換プロセス経過概念図を示す。以降に計算過程を①～⑭に示す。(文頭の○数字は図内の番号に紐づく)

- ①：蓄熱槽内の HI 堆積層を n 分割する
- ②：入力前還水温度を θ_1 [°C] (初期値 15°C) とし、還水流量と蓄熱槽断面積 (空塔状態) から還水面速度 u_1 [mm/s] および還水量の相当厚さ D_1 [mm] を定める

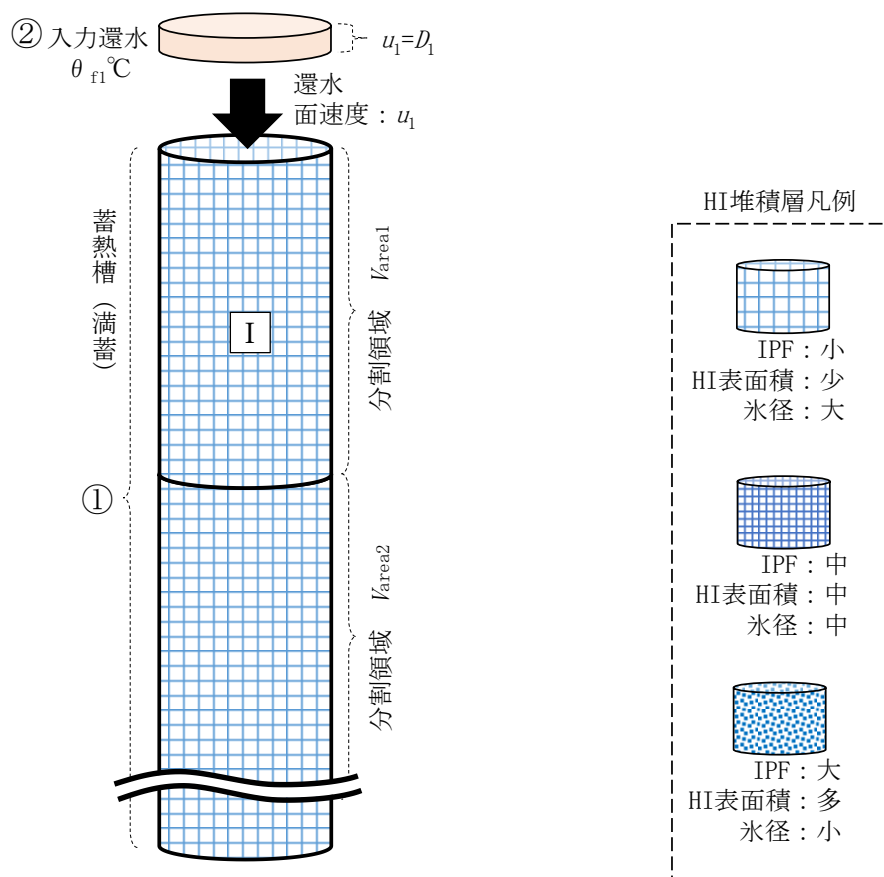


図 5.1.1 蓄熱槽内の熱交換プロセス経過概念図①～②

③：HI 堆積層へ投入した還水は、 V_{areal} の水領域へ熱交換されずに置換充てんされるとし、置換領域の容量は V_{areal} の IPF (初期値は 2 章の検討から約 50%) から逆算する。このとき、還水量の相当厚さは D_1' 、還水面速度 u_1 は、HI の体積を考慮した HI 堆積層内還水面速度 u_1' となる

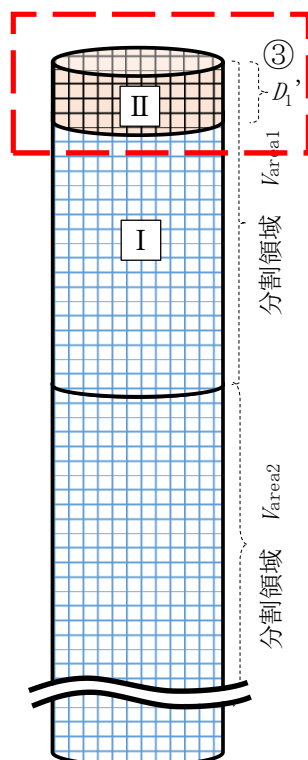


図 5.1.2 蓄熱槽内の熱交換プロセス経過概念図③

- ④：還水とHIとの熱交換量は、 u_1' を用い、式(1)から熱伝達率 h を採用するとともに、HI一片の体積比 V_R (還水入力開始時のHI一片の体積との比率)から D_1' のHI総表面積 $A_{HI}[\text{m}^2/\text{m}^3]$ を式(3)より決定する
- ⑤：還水とHIとの熱交換は全て解氷に要されると仮定し、④および(入力還水温度 θ_1 [°C] - HI表面温度 0°C)から、ニュートンの冷却法則にて熱交換量およびHI解氷量を算出する
- ⑥：⑤で求められた熱交換量(式(4)より算出)は全て還水の顕熱変化に用いられたと仮定し、顕熱変化に要した熱量(式(5)より算出)より、顕熱変化後の還水温度について式(6)を用いて還水温度 θ_1' [°C]を算出する

$$Q_{f \leftrightarrow ice} = h A_{HI} (\theta_f - \theta_{ice}) \quad \dots\dots (4)$$

$$Q_{f \leftrightarrow f'} = (\theta_f - \theta_{f'}) C_f F \rho_f \quad \dots\dots (5)$$

$$\theta_{f'} = \theta_f \left(1 - \frac{h A_{HI}}{C_f F \rho_f} \right) \quad \dots\dots (6)$$

ここに、

$Q_{f \leftrightarrow ice}$: HI と還水との熱交換量	[kJ]
θ_f : 還水入力温度	[°C]
θ_{ice} : HI 表面温度	[°C]
$Q_{f \leftrightarrow f'}$: 還水温度変化に要した熱交換量	[°C]
$\theta_{f'}$: 熱交換後還水温度	[°C]
C_f : 水の比熱	[kJ/kg・°C]
F : 還水流量	[m ³]
ρ_f : 水の比重	[kg/m ³]

⑦： V_{areal} のHI総体積 V_t から⑤で求めたHI解氷量を差し引き、 V_{areal} のHI総体積 V_t' を求める。この間、 V_{areal} のHI個数 N は不変とし、 (V_t' / N) から平均HI体積 V_a' を計算し、熱交換後におけるHIの平均体積と仮定する

⑧： V_a' と還水入力前の平均HI体積 V_a から、解氷後HIの V_R を計算し、熱交換後におけるHI堆積層内のIPFを式(3)より決定する

⑨：HI解氷分の 0°C 冷水と、 V_{areal} 内で降温した還水温度

θ_1' が瞬時に混合すると仮定し、還水温度 θ_1'' [°C]を計算する

$$(\theta_{f''} - \theta_m) C_f F_m = (\theta_{f'} - \theta_{f''}) C_f F \quad \dots\dots (7)$$

式(7)を $\theta_{f''}$ について整理すると、

$$\theta_{f''} = \frac{\theta_{f'} F}{(F_m + F)} \quad \dots\dots (8)$$

ここで、

$\theta_{f''}$: 解氷で発生した 0°C 冷水と熱交換した還水温度	[°C]
F_m : 解氷で発生した 0°C 冷水量	[m ³]
θ_m : 解氷により発生した冷水温度 (0°C)	[°C]

⑩：HI解氷分の冷水が D_1' の還水に追加され、解氷後のHIは V_{areal} 内を浮上し再充電され D_1'' となる。また、 D_1'' より下層にあるHIも蓄熱槽内を上方へ移動する。なお、浮力によるHIの移動は瞬時に完了すると仮定する。 V_{areal} の厚さについては、熱交換後におけるIPFと

配管断面積から算出する。具体的には、配管断面積を $IPF \alpha$ [%] の氷が占めていると仮定し、 V_{areal} 内の HI 体積にて厚さを逆算した

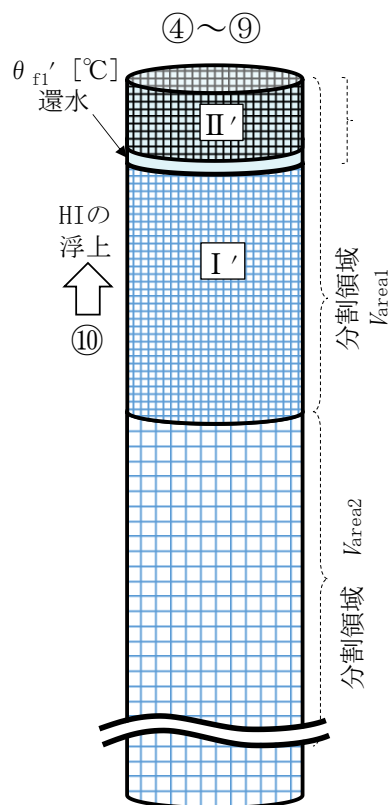


図 5.1.3 蓄熱槽内の熱交換プロセス経過概念図④～⑩

- ⑪：次の時点として、②と同様の還水 D_2 （同量・同温度）を投入する
 ⑫：新たに投入された還水 D_2 により、従前の D_1'' は押し出されて降下する

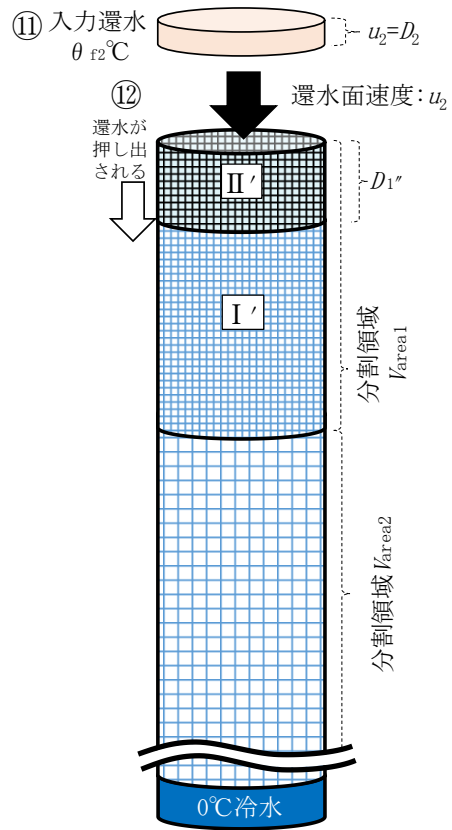


図 5.1.4 蓄熱槽内の熱交換プロセス経過概念図⑪～⑫

⑬：降下した D_1'' はHI 堆積層内の冷水とは混合せず、 θ_{f1}'' [°C] のまま瞬時に置換充填される

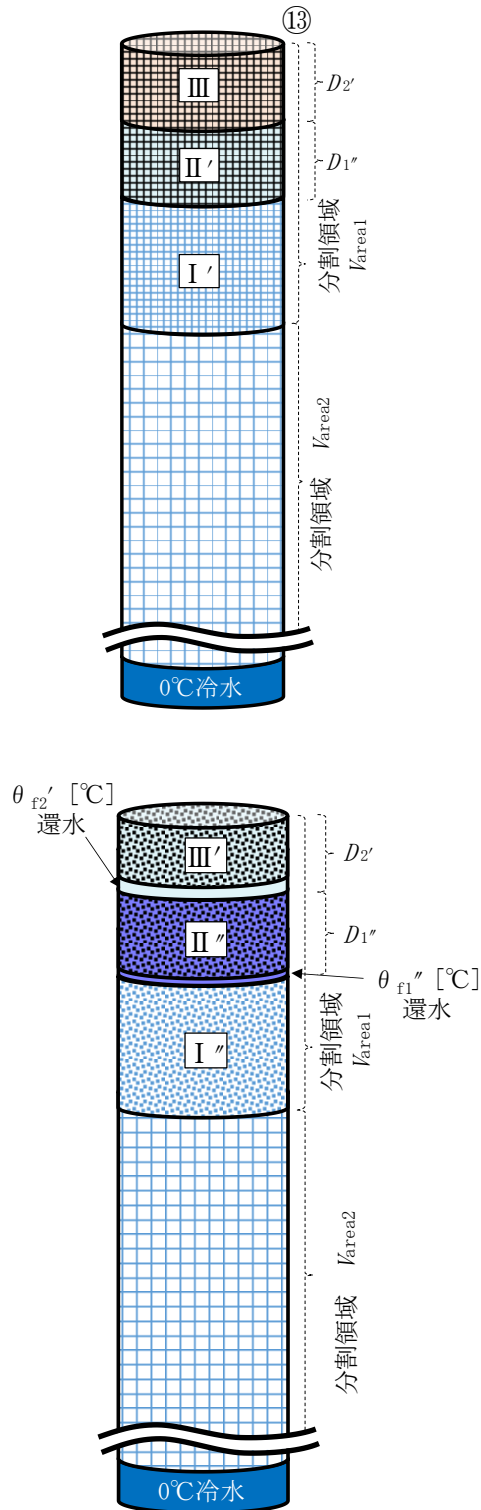


図 5.1.5 蓄熱槽内の熱交換プロセス経過概念図⑬

⑭：手順④～⑩と同様の手順を進め、以降は②～⑭までの手順を繰り返すことで、熱交換後の還水温度を推定した

還水の計算終了条件は、計算対象還水の温度が1℃を下回るか、計算対象還水がHI堆積層を通過しきるまでとした。なお、温度が1℃を下回った還水とHIにおける熱交換量は、微小なものであるとし、熱交換は行われぬものとした。また、氷が無い領域では、既存の水蓄熱槽における知見で対応可能と考えた。

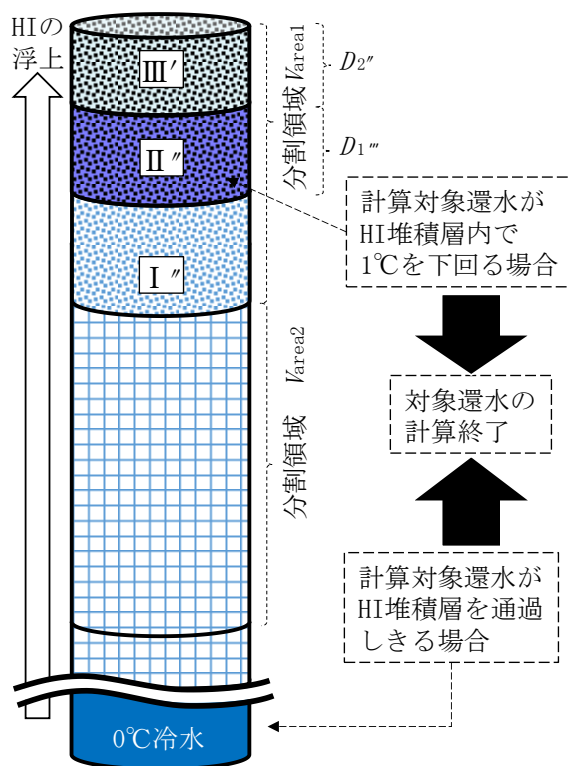


図 5.1.6 蓄熱槽内の熱交換プロセス経過概念図⑭

5.2. 実在の縦型氷蓄熱槽を対象とした計算

提案した熱交換プロセスモデルを用いて、図 5.2.1 に実規模の連結式縦型氷蓄熱槽（連結した蓄熱槽一基につき、内径 2.424m・高さ 9.0m）に入力した還水と HI の直接熱交換後における還水温度を、還水面速度別に計算した。還水面速度は表 2.3.1 の実験ケースにおける還水面速度とした。入力する還水温度は大温度差送水を想定した 15℃固定とし、計算対象である還水の温度が 1℃を下回るまで繰り返し計算を行った。なお、還水は継続的な入力、また蓄熱槽周辺気温は蓄熱槽内温度に影響を与えないものとした。蓄熱槽内は HI で満たされているものとし（満蓄）、還水入力開始前の V_{area} は 100 mm ごとに分割し、計算間隔は 1 秒毎とした。

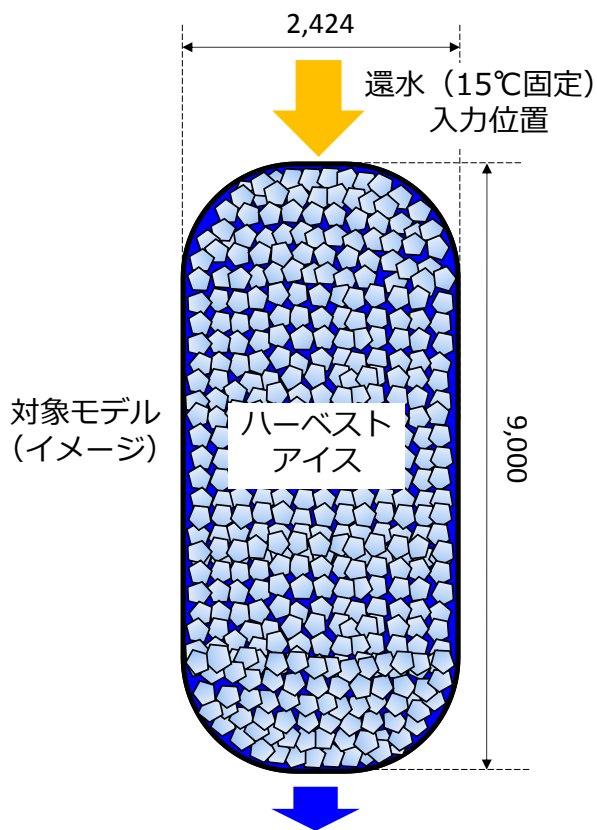


図 5.2.1 計算対象蓄熱槽イメージ

図 5.2.2 に還水面速度別の蓄熱槽内温度（試算値）を示す。グラフは、入力開始当初の還水が HI との熱交換により 1℃以下に低下した冷水部分（蓄熱槽入口から HI 堆積厚さ 500 mm の位置まで）の温度を示している。全ての計算ケースにおいて、蓄熱槽入口から HI 堆積厚さ 500 mm の位置までに還水温度が 1℃以下に低下した。机上計算における還水は、大温度差送水の温度を想定し、かつ完全混合型蓄熱槽の推奨流速である還水面速度を模したケースも含んでいる。実運用時においては、HI 堆積厚さが縦型氷蓄熱槽の高さに対して極薄い状態であっても、還水を二次側機器に供給可能な温度にまで十分に冷却可能と推定した。

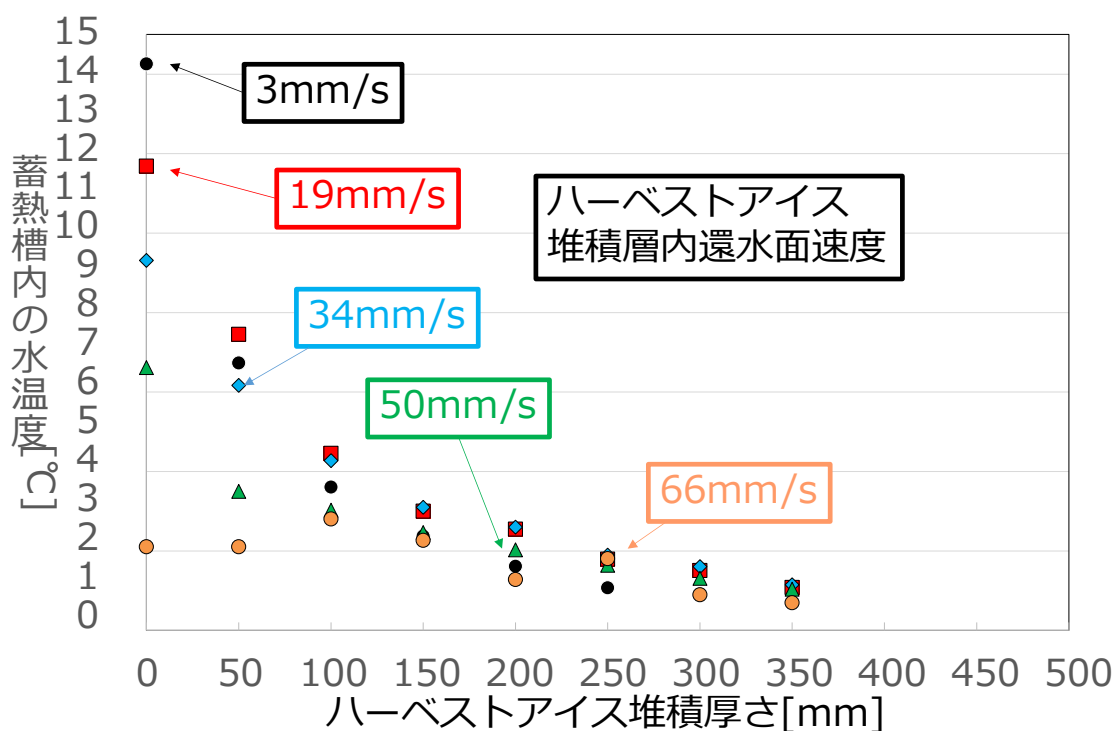


図 5.2.2 還水面速度別の蓄熱槽内温度（試算値）

6. 総括

本研究においては、HI を投入可能とした縦型氷蓄熱槽を対象とし、堆積状態にある HI の熱伝達率に関する実験、および解氷時における HI の消失過程に関する実験を行い、還水と HI の直接熱交換プロセスのモデル構築について検討した。

その結果を以下に示す。

- 1) 蓄熱槽のカットモデル実験を行い、解氷時における HI の表面積と体積との相関関係は、当該システムにおいて形状に依存しないことを確認した。
- 2) 還水面速度を変化させた場合の熱伝達率の変化量に関する実験を行い、熱伝達率の同定方法を提案した。
- 3) 直接熱交換時の HI の大きさ減少にともなう IPF の変化に関する実験を行い、粒径の減少に伴う IPF の増加モデルを提案した。
- 4) 1)～3)の結果を用いて、還水と HI の熱交換プロセスモデルの提案を行った。
- 5) 4)の結果を用いて、実規模を想定した連結式縦型氷蓄熱槽を対象に、還水と HI の直接熱交換後における還水温度を試算した。
- 6) 実規模レベルの蓄熱槽に対し、相対的に HI 堆積層厚さが小さな領域においても、十分な熱交換能力を有する試算結果が得られていることから、本モデルが実設計における一助になると考える。

謝辞

本論文は、私が東京電機大学大学院の博士課程において研究した内容を整理し、得られた知見を含め、研究成果として取り纏めたものです。研究を進めるにあたり、御教示、御助力を頂いた東京電機大学 射場本 忠彦 教授に心より感謝の意を表します。

実験を行うにあたり、実験空間の提供、実験設備の設置、計測機器の手配など様々な面で多くの方々にご協力いただきました。また、庫内温度 -5°C 設定の冷凍庫のなか、ある時は気温が 0°C を下回る寒空の下での過酷な実験・データ解析等を行った東京電機大学 建築学科 射場本研究室・百田研究室・柳原研究室の卒業生、在学生在に心より感謝いたします。

東京電機大学 柳原隆司 特任教授
東京電機大学 百田真史 准教授
東京電機大学 釦持尚紀 非常勤講師

(順不同)

射場本研究室、百田研究室、柳原研究室 卒業生・在学生在
中里 壮一氏、稲田 雄大氏、小沼 禎侑氏、坂上 将大氏、長谷川 貴史氏、
池田 一輝氏、林 勇輔氏、石久保 祐人氏、大熊 宏和氏、古賀 拓海氏、
上野 友嗣氏、上村 勇樹氏、海老原 一輝氏、栗田 祥平氏、富田 達也氏、
木村 洸介氏、福田 勇樹氏、岸山 和司氏、的場 亮太氏

最後に、本論文の副査を務めて頂いた東京電機大学 柳原 隆司 特任教授、秋田 剛教授、百田 真史准教授、中部大学 山羽 基 教授に厚く御礼申し上げます。

ここに記して、皆様に感謝の意を表させて頂きたいと思います。

2018年2月 南雲 祐輝

参 考 文 献

- 1) 柴田亮・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究（第1報）水槽内における氷／水直接熱交換に関する実験的検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P101-104, 2007年
- 2) 中里壮一・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究（第2報）水中内におけるダイナミックアイスの製氷手法に関する実験的検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P105-108, 2007年
- 3) 南雲祐輝・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究（第3報）セパレータを利用した水槽内における直接熱交換の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P129-132, 2008年
- 4) 西井尊文・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究（第4報）蓄氷手法の提案と要素技術のまとめ, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P887-890, 2009年
- 5) 南雲祐輝・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究（第5報）ディストリビュータを用いた水槽内における氷／水の直接熱交換に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P891-894, 2009年
- 6) 西井尊文・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究（第6報）連結槽を用いた蓄放熱特性の確認と満蓄検知手法に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P157-160, 2010年
- 7) 井上健太郎・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究（第7報）連結縦型氷蓄熱槽の放熱時における移氷と温度変動に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P2609-2612, 2012年
- 8) 中村弘和・射場本忠彦・百田真史他：東京電機大学東京千住キャンパスの省CO2実現に向けた取組み その2 空調設備概要, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P1623-1626, 2012年
- 9) 小沼禎侑・射場本忠彦・百田真史他：東京電機大学東京千住キャンパスの省CO2実現に向けた取組み その14 熱源システムの運用実態②, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P301-304, 2014年
- 10) Y. Nagumo ・ T. Ibamoto ・ R. Yanagihara ・ M. Momota : Study on Practical Use of the Vertical Ice/Water Thermal Energy Storage Tank for University Campus in Japan, GREENSTOCK2015, (2015-5)
- 11) 山羽基：空気調和における氷蓄熱の熱特性と容量設計法に関する研究, 名古屋大学, p121-138, 1995年
- 12) 大平昭義：ハーベスト式氷蓄熱システムの熱工学的研究, 東京工業大学 p. 104-179, 2003年

- 13) 一色尚次・北山直方：伝熱工学 改訂・新装版, p. 82, 2014 年, 森北出版
- 14) 谷野正幸・小澤由行他：ダイナミック型氷蓄熱システムの解氷予測, 日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集, P57-60, 1997 年
- 15) 南雲祐輝・射場本忠彦・百田真史他：縦型氷蓄熱槽の実用化に関する基礎的研究
(第 8 報) ハーベストアイスを利用した蓄熱槽における解氷特性の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, P245-248, 2017 年