

# 「氷スラリーによる冷蔵・冷却のための手引書」

日本冷凍空調学会調査研究プロジェクト（2013.4.1～20.16.3.31）  
「機能性氷スラリーによる冷蔵・冷却」発行

## はじめに

氷スラリーは、高い蓄熱能力、高い流動性及び速い熱負荷追従性等の優れた特徴がある。そのため、氷スラリーによる冷蔵・冷却によって、食品を始めとする様々な物を対象として多様な温度域で、かつ、高度な温度制御が可能となる。それ故、氷スラリーを利用した冷蔵・冷却は極めて適応範囲が広く、その対象としては、例えば、鮮魚、野菜、果物、生花、加工食品、発酵食品、バイオ関連商品、薬品、化学製品の製造や輸送プロセス等が想定される。一方、2011年3月の東日本大震災以来、日本にとって極めて重要な命題となった電力負荷平準化を促進するために、冷熱を氷として蓄えることで、冷熱利用を時間的・空間的にシフトできるという氷スラリーの持つ優位性を利用して、冷蔵・冷却で使用するために氷スラリーを深夜電力利用により生成し、得られた冷熱を昼間に利用することも極めて重要なことである。

以上を踏まえ、氷スラリーによる冷蔵・冷却という考え方を取り入れた新たなモデルシフト、即ち、従来のトラックでの冷蔵輸送から大量輸送が可能な鉄道/船舶による冷蔵・冷却輸送への転換を計ることができれば、大幅なCO<sub>2</sub>排出抑制と併せて日本の物流の大きな変革をもたらすことも期待される。そして、この氷スラリーを利用した冷蔵・冷却によるモデルシフトを中心にした冷蔵・冷却によるコールドチェーンは、今後我々が目指すべき社会において、極めて重要な役割を果たすと考えられる。そこで、日本冷凍空調学会 調査・研究プロジェクト「機能性氷スラリーによる冷蔵・冷却」では、冷蔵・冷却に有効な氷スラリーの利用を広く世間に普及・促進するために二部構成の「氷スラリーによる冷蔵・冷却のための手引書」を発行した。

本手引書では、氷スラリーの利用を考えている全ての人を対象に、第一部の第0章として「氷スラリーとは？」を氷スラリー初心者にも分かり易く解説した。次に、第1章～第3章では氷スラリーをより深く理解してもらうために、「氷スラリーの特徴」、「氷スラリーの製造システム」及び「氷スラリーの利用の現状と近い将来の氷スラリー利用が期待される事例」を紹介した。そして、第4章～第5章では、氷スラリーを「利用する」を主眼として、「送る」、「生成する」という視点も併せて、「氷スラリーの優位性」と「氷スラリーの用途別の優位性」を解説し、最後に「氷スラリー利用の問題点」についても言及した。第一部最終章の第6章では、「期待される未来社会」の中で、モデルシフトやコールドチェーンを含む様々な氷スラリーの冷熱ネットワーク利用の事例を示しながら、氷スラリーの冷熱ネットワーク利用が普及した未来社会を提案した。なお、第一部の巻末には、氷スラリーの利用Q&Aを付録として掲載した。第二部では、現場技術者が氷スラリーについてより深く理解するための一助として、学問的立場からのより専門的な知見を基に、第7章～第9章に「氷スラリー生成方法」、「氷スラリー生成システム」及び「氷スラリーの物性」をそれぞれ掲載した。

現在、氷スラリーを利用した鮮魚等の長距離輸送の試験的実施も行われるようになってきたが、その中には科学的根拠の全くない事象を氷スラリーの優位性と称し、それを基に“氷スラリーによる物流革命”などと喧伝をする企業もあり、その喧伝にのせられた物流大手の企業もあるようである。しかし、本書にも示したように、氷スラリーには科学的根拠に基づいた多くの優位性があり、それらの優位性は生鮮食品を含む様々な対象の冷蔵・冷却に対して極めて有効であるが、そ

の一方で、デメリットもある。このことを良く理解したうえで、氷スラリーを利用されることを本プロジェクトとしては強く望む。

日本冷凍空調学会 調査・研究プロジェクト

主査 中央大学 松本 浩二

## 目次

### 第一部

0. 氷スラリーとは？	1
a) 定義	
b) 優位性と問題点	
c) 氷スラリー生成システム	
1. 氷スラリーについて	5
1.1 氷スラリーの特徴	5
1.2 高効率冷却	5
1.3 温度維持機能	6
1.4 流動性とその制御	6
1.5 冷却対象物へのダメージフリーな接触	7
2. 氷スラリー製造システム	9
2.1 循環製氷方式	9
2.2 氷スラリーの貯蔵	9
2.3 ダイレクト方式	10
2.4 現在稼働している氷スラリー製造システムとその利点	10
3. 氷スラリーの用途	13
3.1 氷スラリー利用の現状	13
3.2 水産業における氷スラリーの利用例	13
3.2.1 氷スラリーの氷充填率(IPF)	13
3.2.2 氷スラリーの温度と塩分濃度	14
3.2.3 船上での活用例①急冷	15
a) バッチシステム	
b) 連続供給システム	
c) ダイレクト貯蔵システム	
d) 冷海水/スラリー共用システム	
e) 陸上設置システム	
f) 砕氷と置き換えた使用	
3.2.4 船上での活用例②予冷	17
a) 大型魚類の凍結前予冷	
b) 中小型魚の凍結前予冷	



c)	食塩ブライン凍結の予冷	
d)	大型運搬船の予冷	
3.2.5	船上での活用例③その他	17
3.2.6	船上以外の利用例	17
a)	水産市場での利用例とメリット	
b)	水産加工場での利用例とメリット	
3.3	水産分野以外での氷スラリーの利用例	18
3.3.1	物流冷蔵庫荷捌室の0℃空調	18
3.3.2	氷スラリーから生成されたチルド水利用の乳業、飲料プラントへの導入事例	19
a)	新菱冷熱	
b)	高砂熱学	
3.3.3	氷スラリーでの直接冷却による温度管理	19
3.3.4	野菜・果実・ブロイラーの急速冷却	20
3.3.5	チーズ工場での導入事例	20
3.3.6	醸造所での導入事例	22
3.4	近い将来の氷スラリー利用が期待される事例	23
3.4.1	氷スラリーによる凍結	23
a)	低温氷スラリー	
b)	氷スラリー凍結の特徴	
c)	アルコール氷スラリー凍結の検討例	
3.4.2	氷スラリーの微生物制御機能に基づく利用	27
3.4.3	氷スラリーによる水産物の急冷による超高鮮度保持	30
3.4.4	その他の事例	30
a)	小売店舗	
b)	低温輸送	
c)	消火	
d)	アイスピグ	
e)	人工雪	
4.	氷スラリーを利用すると何が優位か	37
4.1	氷スラリーの熱輸送性・伝熱特性と優位性	37
4.1.1	熱輸送特性の優位性	37
4.1.2	伝熱特性の優位性	39
4.1.3	新規設備と既存設備で得られる効果の違い	41
4.2	氷スラリーによる一定温度維持特性による優位性	42

4.2.1	一定温度維持特性のための氷スラリーの仕様の決め方	42
4.2.2	一定温度維持特性の応用分野	43
	a) 醸造分野	
	b) アイススケートリンク	
	c) 食物の低温熟成	
4.3	その他の氷スラリーの特性と優位性	45
4.3.1	氷粒子の付着性と産業利用システム	45
	a) 食品や水産物などへの氷スラリーの利用	
	b) 生体・医療への氷スラリーの利用	
4.3.2	氷粒子による壁面固着物の洗浄性と産業利用システム	48
	a) アイスピグ洗浄	
	b) CIPP洗浄	
4.4	氷スラリーを利用した場合の問題点	50
5.	用途別の氷スラリーの優位性	51
5.1	食品製造過程での氷スラリーの利用の優位性	51
5.1.1	冷却時間に対する優位性	51
5.1.2	静菌に対する優位性	54
	a) 微生物の発育可能温度域	
	b) 生食用食品加工時の活用	
5.1.3	負荷変動に対する優位性	57
5.1.4	システム小型化に対する優位性	57
5.2	食品流通での氷スラリーの利用の優位性	59
5.2.1	品質向上	59
	a) 保存期間の延長	
	b) 変色防止	
	c) 傷つき防止	
	d) 価格の向上	
	e) その他	
5.2.2	作業効率改善	60
5.3	水産物冷却での氷スラリーの氷水及び冷却海水に対する優位性	60
5.3.1	氷水との比較	60
5.3.2	冷却海水との比較	60
6.	氷スラリー冷熱ネットワークによる未来社会	61
6.1	氷スラリー冷熱ネットワークとは？	62

6.2	氷スラリー冷熱ネットワーク利用の具体例	62
6.2.1	モーダルシフト	62
6.2.2	モーダルシフトと新しいコールドチェーンシステム	67
	a) モーダルシフトと輸送時間	
	b) 個別保冷による鮮度維持の向上と輸送時間の延長	
	c) 氷スラリー保冷車およびコンテナの有用性	
	d) 新しいコールドチェーンシステムの提案	
6.2.3	店舗	72
6.2.4	火災などの災害	75
6.2.5	医療	77
6.3	期待される未来社会	78
付録	氷スラリーの利用 Q&A	83
第二部		
7.	氷スラリーの生成方法	89
7.1	過冷却方式	89
7.2	かき取り方式	90
7.3	ハーベスト方式	91
7.4	その他の試験的製氷方式	92
7.4.1	直接接触冷却方式	92
7.4.2	浮力, 流れせん断剥離	92
7.4.3	エマルジョン	93
7.4.4	減圧, 吸収式	93
7.4.5	加圧による融点上昇	94
7.5	まとめ	94
8.	システム	97
8.1	システムの構成	97
8.2	貯蔵部	97
8.2.1	貯蔵部概略	97
8.2.2	貯蔵時の氷スラリーの特性	98
8.2.3	氷スラリー・冷水の取り出し	101
8.3	配管部	104
8.3.1	流れの様相	104
8.3.2	圧力損失の傾向	104

8.3.3	非ニュートン流体としての特性	107
8.3.4	様々な系での圧力損失	110
8.4	熱交換部	110
8.4.1	熱伝達の傾向	110
8.4.2	Nu (ヌセルト数) の実験式	113
8.4.3	様々な系での熱伝達特性	113
9.	物性	117
9.1	氷スラリーの見かけの物性値の評価方法	117
9.1.1	IPF (Ice Packing Factor:氷充填率)	117
	a) IPF の定義	
	b) IPF の簡易な推算方法	
9.1.2	見かけの融解潜熱	117
9.1.3	見かけの熱伝導率	119
9.1.4	氷スラリーの液相の物性	120
9.1.5	見かけのレイノルス数	120
9.2	氷および水の物性	122
9.3	氷スラリーの母液となる水溶液の物性	122
9.3.1	凝固点	123
9.3.2	比熱	123
9.3.3	比重	125
9.3.4	粘性係数, 動粘性係数	127
9.3.5	熱伝導率	128
9.3.6	混合熱, 無限希釈熱	128

執筆者



# 第一部



## 0. 氷スラリーとは?

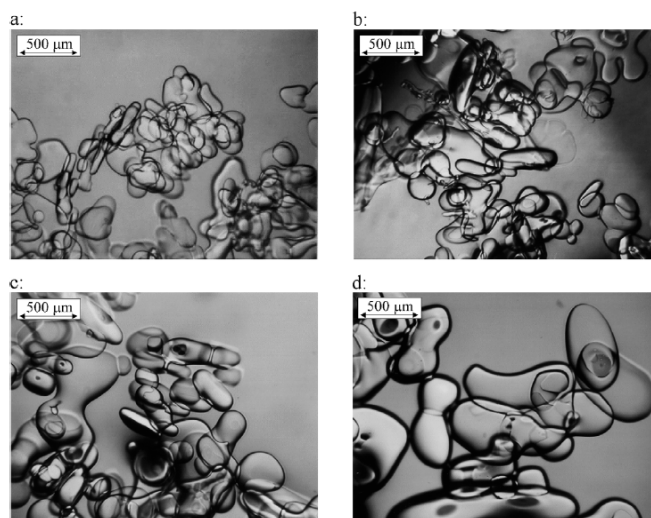
本章では、氷スラリーの概要や特徴について述べる。また、代表的な製氷方式や、システムとしての利用方法を紹介する。

### a) 定義

氷スラリー（アイススラリー）は、微細な氷と液体の固液二相混合物と定義される。また、リキッドアイス、シャーベットアイス、ジャムアイス、スラリーアイスなどの別称がある。Fig.0-1, Fig.0-2に氷スラリーの写真を示す。液体の種類は、一般に、水や水溶液であり、水溶液の溶質として代表的なものは、エチレングリコール、プロピレングリコール、エタノール、塩化ナトリウム、尿素が挙げられる。生成方法や条件により氷の形状は異なり、へん平形状のフラジルアイスから粒形状までである。氷の大きさ（氷粒子径）は数百 $\mu\text{m}$ 程度である。また、貯蔵時間とともに、氷粒子径は増加する。



Fig.0-1 氷スラリー（過冷却方式，I P F 10%弱，エチレングリコール水溶液から生成）



(a) 生成直後 (b) 2h 貯蔵後 (c) 6h 貯蔵後 (d) 22h 貯蔵後

Fig.0-2 氷スラリーの顕微鏡写真



b) 優位性と問題点

- Fig.0-3 に示すように、水に比べて単位質量（体積）当たりの蓄熱量が大きいので、貯氷部や配管径のスケールダウンが可能となる。
- 流動性をもつため、配管輸送が可能である。
- Fig.0-4 に示すように、製氷部と貯氷部を分離できるので、設計の自由度が高くなる。
- 小さな氷粒が分散しているため、氷粒の比表面積が大きくなることで、熱負荷追従性が高く一定温度での冷却が可能となる。
- 水溶液の場合、凝固点降下に伴う固相と液相のエンタルピー差の変化により、融解潜熱が低下する。さらに、グリコール系やアルコール系水溶液では、希釈熱の影響でさらに見かけの融解潜熱が低下する。
- 氷スラリー中では、浮力や自重、粒子同士の凝集やオストワルド熟成により氷粒径は増大し、また、Fig.0-5 に示すように氷スラリーの全体の見かけの体積が減少する。その凝集力は大きく、採冷熱には大きな阻害因子となる。

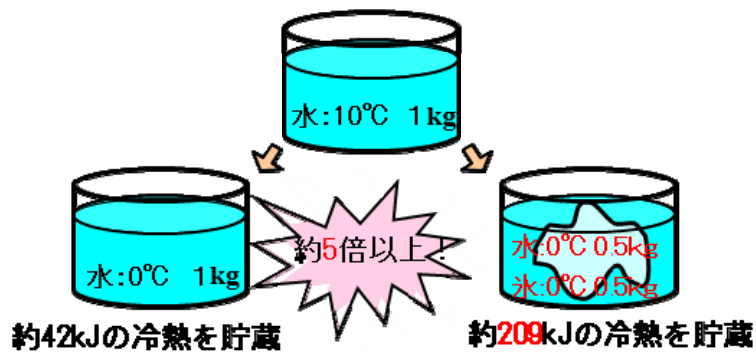


Fig.0-3 氷による蓄熱と水による蓄熱の比較

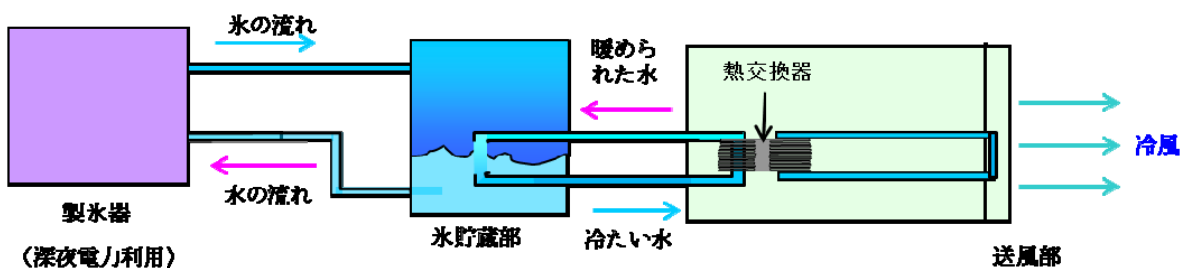
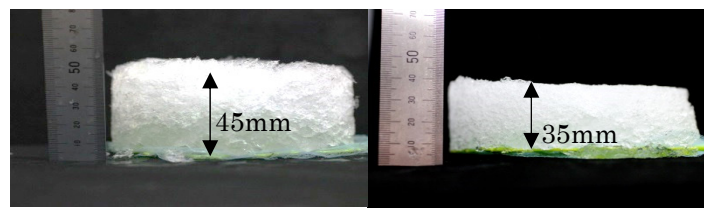


Fig.0-4 ダイナミック型氷蓄熱システム概要



(a)貯氷 1 時間

(b)貯氷 6 時間

Fig.0-5 凝集による氷スラリーの全体の見かけの体積の減少 (IPF=10%, 過冷度=3K)

### c) 氷スラリー生成システム

氷スラリーを生成・利用するシステムは、その用途に合わせて構成が異なる。詳細については2章で説明するが、概略は以下のとおりである。

実用化されている3種類の氷スラリー生成方法の特徴をTable 0-1に示す。各製氷方法はそれぞれ長所短所を有するため、その用途・目的に応じて選択しなければならない。特に、流動性の高い氷スラリーが必要な場合ではハーベスト方式は除外され、中・大規模で清水を用いる場合は過冷却方式、その他はかき取り方式を採用することが多い。

Table 0-1 各種製氷方式の特徴

	氷粒子径	コスト	清水使用	装置規模	備考
過冷却方式	数 100 $\mu\text{m}$	高	可	大	小規模不向き
かき取り方式	50 $\mu\text{m}$ ～	中	不可	小～	要水溶液
ハーベスト方式	10 mm～	中	可	小～	粒子径大

氷スラリーシステムの構成例をFig.0-6に示す。(a)の直接冷却型は、生成した氷スラリーを直接活用する場合のシステムであり、氷スラリーの生成部、配管部から構成される。主に、漁港などで漁船に供給する場合や、水揚げされた水産物を直接冷却する場合などに利用される。そのため、熱交換部を有していない。(b)の貯蔵・直接冷却型は、氷スラリーを生成後、貯蔵部で貯蔵し、必要ときに貯蔵部から取り出して、対象物を直接冷却する。そのため、基本的な構成は、生成部、貯蔵部、配管部となり、熱交換部は有していない。(c)の循環型は、生成した氷スラリーを貯蔵部で貯蔵後、配管部、熱交換部にスラリーを流入させることにより、対象物を間接的に冷却し、再度貯蔵部に戻る構成となっている。氷スラリーを対象物に直接接触させない場合で、水産物以外の冷却において、広く活用されるシステム構成と考えられる。

以上のように、氷スラリーを活用するシステムは、その用途に応じて必要な要素が異なる。以下に、各構成要素における氷スラリーの特徴などについて整理する。

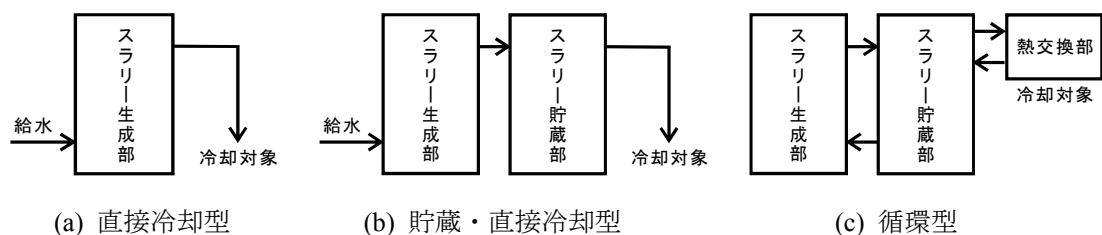


Fig.0-6 氷スラリーシステム全体像の概略図



## 1. 氷スラリーについて

燃料が石炭から石油に代わり生活環境が一変したが、氷スラリー（アイススラリー）はそれに相当するような変化を、近い将来もたらず可能性を秘めていると言っても過言ではない。各種の冷却技術の中で、氷スラリーによる冷却は扱い易く、環境にやさしいなどの多くの利点がある。しかし、現状では氷スラリーの認知度が低く、採用されている業態は物流の一部、水産加工業や水産競り市場などの一部に限られている。

本章では、氷スラリーの冷媒としての一般的特徴と、それらから考えられる有効な用途について概説する。

### 1.1 氷スラリーの特徴

氷スラリーは、微細な氷と液体の固液二相混合物と定義される。氷(固体)のメリットと水または水溶液(液体)のメリットを併せ持つため、冷媒として以下の4つの特徴を有する。

- ・ 高効率冷却
- ・ 温度維持機能
- ・ 流動性とその制御
- ・ 冷却対象物へのダメージフリーな接触

以下、これらについてより詳しく説明する。

### 1.2 高効率冷却

氷スラリーは、流動性を持つ氷であると言えるので、水または水溶液(液体)の伝熱性能と氷(固体)の熱容量を併せ持つ。すなわち、冷却における伝熱式  $Q=KA\Delta T$  の熱貫流率（熱通過率） $K$  と温度差  $\Delta T$  が高くなるため、高効率な冷却が可能なのである。

具体的には、液体と同様の性質をもちながら、氷の冷却能力を利用することができる。氷の冷却能力とは以下のように整理できる。

- ・ 氷は冷却能力が非常に高く、例えば、氷または水と被冷却物との間の熱交換が完全に行われるとすると、被冷却物を  $1^{\circ}\text{C}$  に冷却するためには、図 1-1 に示すように、 $0^{\circ}\text{C}$  の氷の質量は水の質量の約  $1/80$  で良い。
- ・ 冷却水に氷粒が混在すると、従来の冷却水の使用量を大幅に削減可能。
- ・ 氷は融解するときに熱を奪う。すなわち、氷が細かくなれば比表面積（単位質量あたりの表面積）が大きくなり、融解しやすくなるため、素早く熱を奪うことができる。氷スラリー中の氷は、最大長さが  $1$  ミリ以下の微細氷であり熱交換性能が高い。なお、氷スラリー生成時の過冷度の増加や攪拌により氷形状は球形となる。

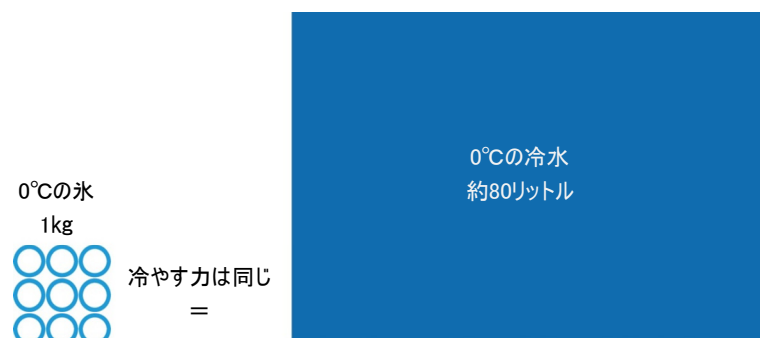


図 1-1 氷の冷却能力(被冷却物を  $1^{\circ}\text{C}$  以下にする場合) (1-1)

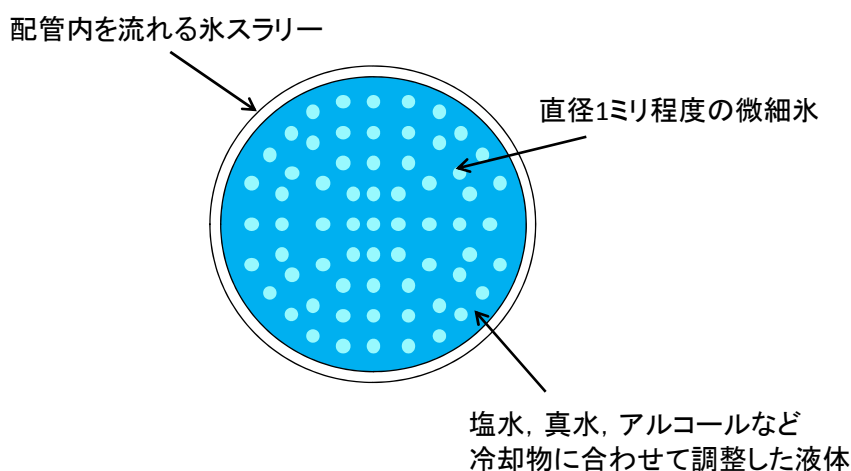


図 1-2 流動性氷スラリーのイメージ

また、氷スラリーは安全(水、アルコール系水溶液、塩化 Na 系水溶液 etc.)な冷媒なので、熱交換器を介さずに被冷却物を直接冷却することで更なる高効率化を図ることができる。

### 1.3 温度維持機能

氷スラリーは氷の大きな融解潜熱のために、高い温度維持機能を有する。すなわち、多少の熱の出入りがあっても氷スラリー中に氷粒子が存在する限りは、その高い熱負荷追従性により温度は変わらないため、被冷却物を氷の凝固温度近傍に安定して保持することができる。

### 1.4 流動性とその制御

水または水溶液(液体)の流動性を有するため、ポンプによる管内輸送が可能である。これにより、目的地への自動搬送や、冷凍サイクルの 2 次冷媒としての利用が可能となる。

氷スラリーの流動性のイメージを図 1-2 に示す。流動性は氷スラリーの大きな特長であるが、氷の液体への混合比率を高めることで意図的に流動性を無くし、別の特性を得ることもできる。これも氷スラリーの大きな特長である。通常の水スラリー生成では、その氷粒子の混合比をある程度調整可能であることから、大きく次の 5 種の形態を一つの装置で選択することが可能である。

- ① 冷水 (15℃～0℃) : 氷粒子を生成しないで冷水のみを供給した形態
- ② スラリー冷水 (溶質濃度 5mass%以下) (0℃～-0.5℃) : 水または水溶液に氷粒子が少量混じった形態
- ③ 低 IPF (氷充填率) スラリー (氷分 20%以下) : 流動性の高い氷スラリー
- ④ 高 IPF スラリー (氷分 20%～80%) : 温度保持能力の高い氷スラリー
- ⑤ ドライ氷 (氷分 70%～80%以上) : 多用途に使用可能な氷粒子

それぞれの形態の具体的な用途は以下のようになる。

#### ①冷水 (15℃～0℃)

冷却能力を下げる、または、水の流量を上げるなどで、水、海水、調味液などを希望の温度にまで冷却、供給することで容易に得られる。

使用例：活魚水槽の温度管理、加工、選別作業中の掛け流しおよび温度管理

野菜の初期冷却、カット野菜の洗浄、ブロイラーでの冷却作業

#### ②スラリー冷水

水分を少量 (数%) 含み、確実に 0℃以下を維持した状態。0.5%以内の塩分を含むことで、氷点下

域の温度を維持.

使用例：中心部の熱が奪いにくい野菜類の冷却，加工中の止め置き工程の管理

### ③低 IPF スラリー（氷分 20%以下）

流動性の高い氷スラリーで，魚倉や容器内に入っている魚体の隅々まで氷が行き通るので，温度ムラなく冷却塩分濃度制御することで，各魚体に最適な塩分濃度管理が可能.

使用例：船上や魚倉内での魚体冷却，魚体締め後の血抜用漬込み活魚車で素早い温度管理（瞬時に 25℃→15℃）凍結品の凍結前予備冷却，および解凍

### ④高 IPF スラリー（氷分 20%～80%）

氷分を多く含み冷熱量が，長時間の氷点下の温度保持が可能.氷の粒が緩衝材も兼ねるので，長時間の輸送中にも魚体を傷付けない.

使用例：鮮魚留置，鮮魚出荷，鮮魚加工フィレ真空パック出荷

### ⑤ドライ氷（氷分 70%～80%以上）

直径 1 ミリ程度の氷粒子のみを分離した状態. 野菜の梱包，輸送時の蓄冷剤として使用可能. 従来の氷同様に，自動計量販売可能で，一般用の氷同様の使い勝手.

使用例：カット野菜出荷用，野菜出荷用，果物保管用，鮮魚真空パック品出荷用，一般販売用

## 1.5 冷却対象物へのダメージフリーな接触

水での食品冷却には一般的に砕氷が使用される. 水と砕氷を混合したものを水氷といい，魚介類の冷却には多用されている. 水氷のメリットは，氷の潜熱を利用できるため冷却初期の高い熱負荷に対応でき，また保冷能力もある点があげられ，氷スラリーと同じような特徴をもつ. しかし，砕氷を利用した水氷では，氷が角ばった形状になっており，寸法は 3～4cm 程度のものとなる（図 1-3）. このような氷が食品と接触した場合，部分的に大きな荷重がかかることにより食品表面に凹みを生じさせるだけでなく，裂傷のような亀裂損傷が発生し，大きな物理的ダメージをあたえる場合がある.

氷スラリー（スラリーアイス）に含有されている氷は直径が 0.1～0.2mm 程度の微細な氷であるため，荷重は食品表面に均等にかかり，表面の凹みや亀裂損傷が生じにくい（図 1-4，図 1-5）.

このダメージフリーの特性は，外表面が傷みやすい生鮮食品の冷却や保冷に威力を発揮する. 図 1-6 と図 1-7 は，キビナゴを生産地から消費地までスラリーアイス保冷と砕氷保冷で輸送した際の，消費地での外観確認の写真である. スラリーアイス保冷品は外傷がほとんどなく良好であったが，砕氷保冷品は凹みが見られ，一部表皮が裂けているものもあった. 但し，被冷却物が氷スラリー中で激しく振動するような環境下で長時間保冷をおこなうと，微細氷が研磨剤のような作用を起こし，被冷却物表面にスレを発生させることがあるため（図 1-8），保冷中の氷スラリーと被冷却物の割合や振動防止対策などを十分に検討する必要がある.



図 1-3 砕氷の外観(1-2)

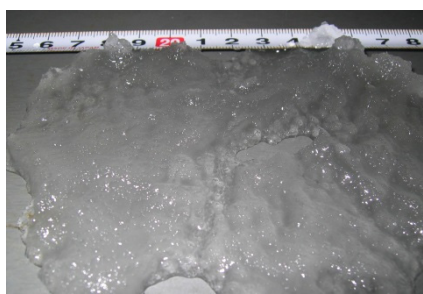


図 1-4 氷スラリーの外観(1-2)

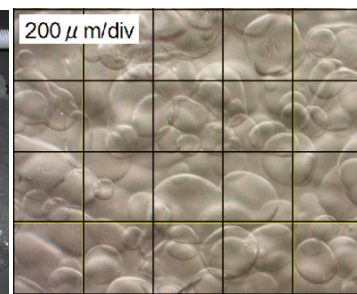


図 1-5 氷スラリー中の微細氷



図 1-6 氷スラリー保冷品の外観(1-3)



図 1-7 砕氷保冷品の外観(1-3)



図 1-8 スレが発生した鯖

参考文献

- (1-1) スラリー21(株)カタログ
- (1-2) スラリーアイス保蔵試験報告書：日新興業(株),(2005)
- (1-3) シャキットミニカタログ：日新興業(株),(2013)



## 2. 氷スラリー製造システム

氷スラリーの製氷方法は、原理的に循環製氷方式（図 2-1）とダイレクト方式（図 2-5）に分けられる。ただし、ここでの分類は漁船搭載用の機器を想定しているため、序章 c) における分類と多少異なっている。

### 2.1 循環製氷方式

予め必要量の原水を貯氷魚倉（又は貯氷タンク）に貯めておき、原水を貯氷魚倉と氷スラリー製造装置間で循環させながら徐々に必要氷濃度とする方式である（図 2-1）。

氷スラリー製造装置を小型化することができるが、必要氷濃度とするまでに長時間必要となる。また、氷スラリー製造後に氷スラリーを移送する場合には魚倉に攪拌装置が必要となる。

### 2.2 氷スラリーの貯蔵

氷スラリーを貯蔵すると、氷と液部が分離し、氷が上部に層状に溜まる。この現象は、氷スラリーの攪拌を行っていない状態では IPF(氷濃度)に関係なく発生する。氷スラリー中の氷は微細な氷粒子なので、液部を分離した後もスポンジのように氷粒子同志の隙間に多量の液を保持する。この状態で、底部からポンプで吸込み移送をおこなうと、図 2-2 のようになるため、移送がおこなえない。

氷スラリーを静な状態で長時間貯蔵すると、上記に加え、水面の空気に露出している面が薄い板状氷に変わってくる。これは、空気と接している氷が空気温度によって溶け、それが氷によって再び凍結するためである（図 2-3）。また、逆に空気の温度が低すぎる場合も表面が薄い板状氷に変わってくる。これは、空気と接している面の液部が凍るためである（図 2-4）。従って、氷スラリーを静な状態で単純に長期間貯蔵すると表面に薄い板状氷が生成され、移送時に以下の事象が発生する。

- ・表面の板状氷により氷スラリーの塊がさらに崩れにくくなる。
- ・表面の板状氷を砕いたとしても、砕いた氷は大きな砕氷となるため、配管のエルボ部分で氷が詰まり、閉塞等の現象が発生し、良好な移送ができなくなる。

以上の理由により、氷スラリーを貯蔵するには、常時攪拌しておく必要がある。最も有効な攪拌方法は攪拌機によるものであるが、ケースによってはポンプで液を噴出させて攪拌をおこなうポンプ攪拌も可能となる。

氷スラリーの移送に使用するポンプは、IPF(氷濃度)が 30%程度までであれば通常の遠心式ポンプで移送可能であり、また全てが微細な球状氷であれば配管途中で氷が詰まるトラブルも発生しない。

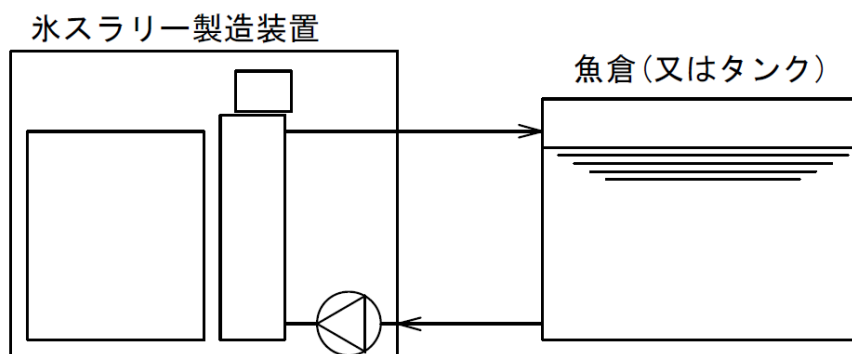


図 2-1 循環方式概要 (2-1)



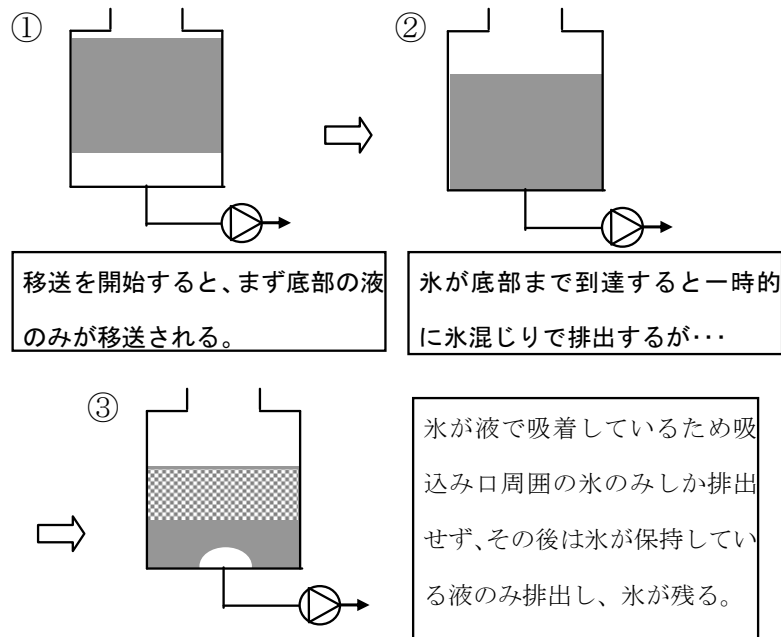


図 2-2 攪拌無しでの移送状態 (2-1)

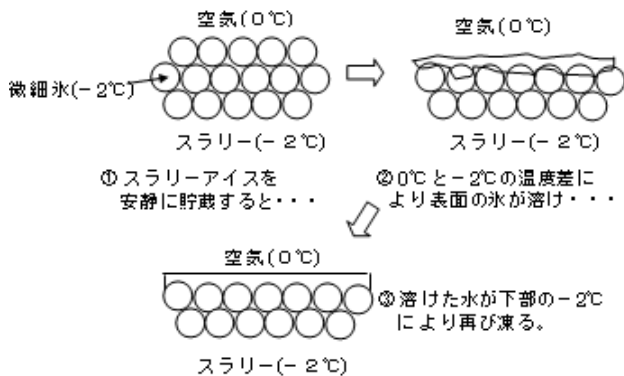


図 2-3 氷スラリーの表面再凍結(その 1) (2-1)

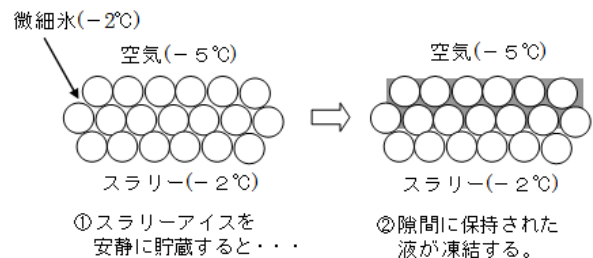


図 2-4 氷スラリーの表面再凍結(その 2) (2-1)

### 2.3 ダイレクト方式

氷スラリー製造装置に供給された原水を製造装置から排出された時点で必要 IPF(氷濃度)の氷スラリーとする方式である。(図 2-5)。

必要な IPF(氷濃度)の氷スラリーを短時間(製氷能力によって異なるが、15 分程度のシステムもある)で供給開始することができ、運用方法によっては原水魚倉(又はタンク)が不要となるが、製造装置が循環方式より大きくなるデメリットもある。但し、供給するラインを予冷することにより、製造装置の小型化や、供給量の増加も可能となる。

### 2.4 現在稼働している氷スラリー製造システムとその利点

実際に用いられている氷スラリー製造システムの一例を図 2-6 に示す。これは、水産市場等での使用を想定したシステムで、直径 1 ミリの球状の氷を連続生産、連続払出しを行う。ドライ氷の生成も可能なシステムである。

本スラリー製氷設備の利点

- ①完全自動化により，製氷，貯氷，販売時に立会い不要.
- ②製氷量，貯氷量の追加可能.
- ③冷海水，氷スラリー，ドライ氷の同時使用可能.
- ④試験用小型設備（2 トン/日）から，100 トン/日以上 of 船積み用の大型設備まで，現場の使用量，使用時間に合わせて，柔軟に対応.
- ⑤製氷システムの貸出，氷販売契約など，初期投資を最小限に抑え，魚体出荷量に合わせた氷使用分のみの支払いプランにも対応.

参考文献

- (2-1) スラリーアイスとその冷却システム：日新興業(株),(2013)
- (2-2) スラリー21(株)カタログ

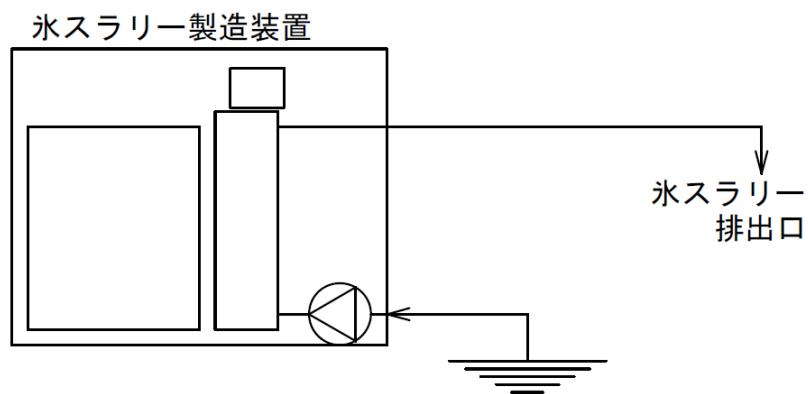


図 2-5 ダイレクト方式概要(2-1)

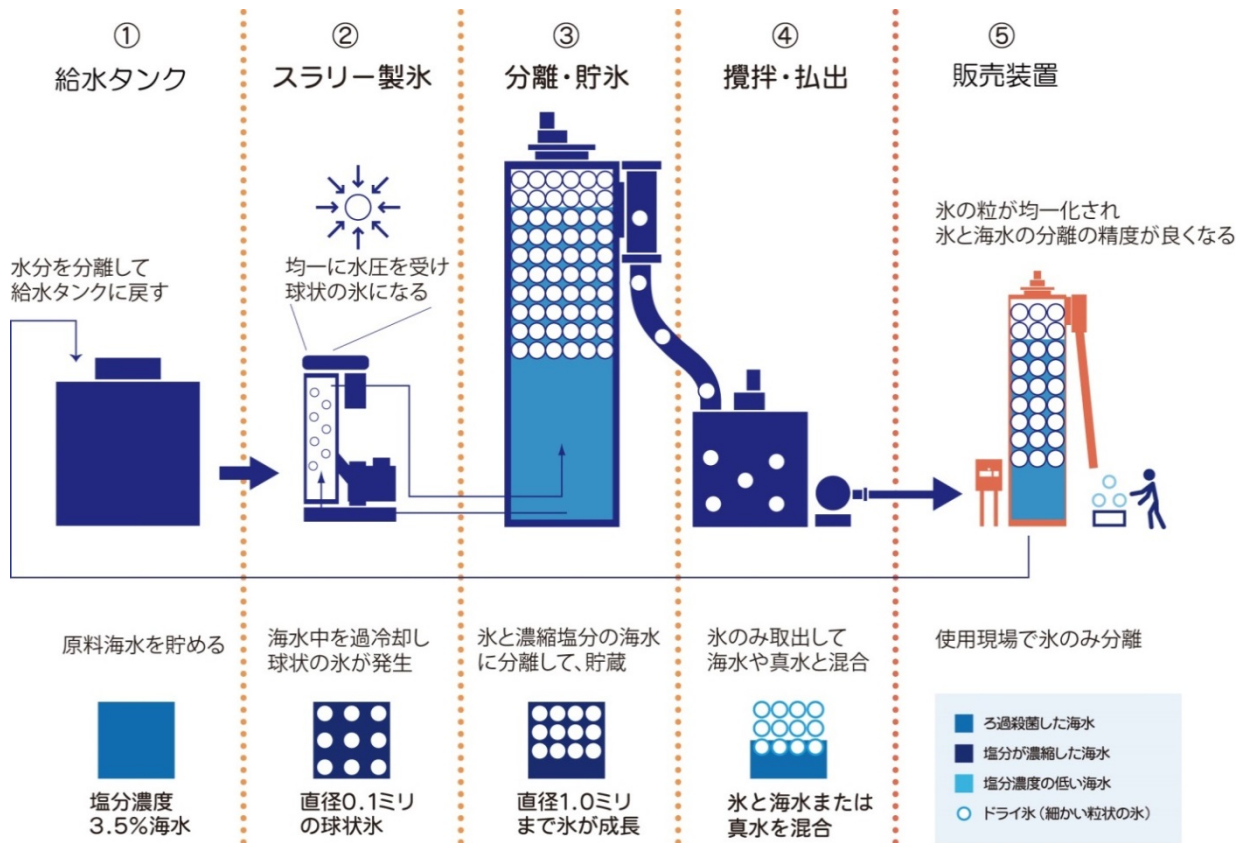


図 2-6 実際の氷スラリー製造システムの例(2-2)

### 3.氷スラリーの用途

#### 3.1 氷スラリー利用の現状

氷スラリーの4つの特徴を軸とした氷スラリー市場の現状を図3-1に示す。市場規模は、特徴を多く利用している程大きくなる傾向がある。最も代表的な例は”鮮魚輸送”で、収穫した魚介類を「流動性」により直接搬送された氷スラリーで「高効率冷却」して鮮度維持し、凍結しない適温で「温度維持(保温)」しながら、同時に魚を傷つけない「ダメージフリーな接触」で長距離輸送している。このように、ニーズとシーズがよく一致する市場ほど今後も氷スラリーが普及していく可能性が高い。

#### 3.2 水産業における氷スラリーの利用例

現状、氷スラリーによる食品の冷却が広く利用されているのは水産業のみである。この理由は、水産業では大量の氷を用いることが普通であることと、海水が得やすいことの2点であると思われる。水産業で氷スラリーを使用する場合、多くは海水から製造した氷スラリーを使用する。海水の塩分濃度は3.4%であるため、-1.9~-2.9℃程度の温度の氷スラリーを製造することができる。

本節では、海水から製造した氷スラリーの水産業における利用例を解説する。なお、実際にシステムを導入する場合には、今回記載した内容以外に各所に留意すべき点があるので、メーカーとの詳細打ち合わせをおこない、最善のシステムとする必要がある。

##### 3.2.1 氷スラリーの氷充填率(IPF)

氷スラリーはIPF(氷濃度)によりその状態が変わる。通常、氷スラリーの氷充填率は5~30%の範囲で使用される。海水から製造した氷スラリーの、各IPF(氷濃度)での氷スラリーの状態と主な使用目的は表3-1の通りである(3-1)。

市場		活用できる特長			
		高効率冷却	温度維持	流動性	ダメージフリーな接触(+衛生的)
鮮魚輸送	鮮魚の急冷・予冷(船上・港)	○	○	○	○
	鮮魚貯蔵(市場・加工)		○	○	○
	マグロ凍結	○	○	○	○
	凍結温度付近冷却・維持		○		○
野菜輸送	野菜・果実の急冷・予冷	○	○		○
	野菜・果実輸送		○		○
食品加工	プロセス冷却	○	○	○	○
空調	2次冷媒利用	○	○	○	
	氷蓄熱(既設水槽改修)	○		○	
	微生物制御	○	○	○	○
	冷蔵輸送		○	○	
	アイスピグ			○	
	消火	○		○	
	医療分野		○	○	○
	人工雪				
	薬品輸送		○		
	冷凍システム高効率化			○	

図3-1 現在の氷スラリー市場

表 3-1 IPF(氷濃度)毎の状態と使用内容

IPF (氷濃度)	状態	主な使用目的
0~5%	若干白濁した液体状	0℃以下の冷海水として使用
6~19%	シャブシャブの氷スラリー	短時間の冷却用
20~30%	流動性のある氷スラリー	完全な冷却用
31%以上	水分を含んだ微細氷ではあるが、流動性はない	保冷用

表 3-2 海水と清水の各混合割合における原水と氷スラリーの温度と塩分濃度

混合割合	製氷前		氷濃度=10%		氷濃度=20%		氷濃度=30%	
	温度(℃)	濃度(%)	温度(℃)	濃度(%)	温度(℃)	濃度(%)	温度(℃)	濃度(%)
10 : 0	-1.9	3.4	-2.1	3.8	-2.4	4.3	-2.9	4.9
9 : 1	-1.6	3.0	-1.8	3.3	-2.1	3.8	-2.5	4.3
8 : 2	-1.5	2.7	-1.6	3.0	-1.9	3.4	-2.2	3.9
7 : 3	-1.3	2.4	-1.4	2.7	-1.6	3.0	-1.9	3.4
6 : 4	-1.1	2.0	-1.2	2.2	-1.3	2.5	-1.5	2.9
5 : 5	-0.9	1.7	-1.0	1.9	-1.1	2.1	-1.3	2.4
4 : 6	-0.7	1.4	-0.8	1.6	-0.9	1.8	-1.1	2.0
3 : 7	-0.5	1.0	-0.6	1.1	-0.7	1.3	-0.8	1.4

氷濃度=IPF(氷充填率)

氷スラリーは、IPF(氷濃度)が31%以上になると流動性がなくなってくるため移送性が悪くなり、また漁獲物を投入しても沈みにくくなるため、通常は30%以下での使用を検討する。また、同じ能力の装置で製氷する場合、氷充填率が高いほど時間当たりの氷スラリー製造量が少なくなるため、最適なIPF(氷濃度)を検討する必要がある。

### 3.2.2 氷スラリーの温度と塩分濃度

氷スラリー（スラリーアイス）は液体の一部を氷にすることで製造しているが、できる氷には塩分が含まれないため、液体中の氷の割合が増えるに従って残った液の部分の塩分濃度は高くなる。また、塩水の凝固点は塩分濃度によって決まり、塩分濃度が高くなるに従って低くなる。その具体的な状態変化を表3-2に示す(3-1)。これらのことから、氷スラリーは下記の特徴をもつ。

- ① 氷スラリーの製造に使用する原水の塩分濃度が決まると氷スラリーの温度が決まる。
- ② 氷スラリーの温度は、IPF(氷濃度)が高くなるにつれて低くなる。

上記②の特徴は、海水に砕氷を入れる水氷法の、氷を入れる前より後の塩分濃度のほうが低くなる特徴とは逆の現象であり、注意が必要となる。

生鮮漁獲物を冷却する場合、冷却しすぎると外観が悪くなったり、目が白濁したりし、最悪の場合は表面が微凍結することもあるので、温度管理が重要となる。従来から行なわれている、冷却した海水を使用する冷海水法や、海水に砕氷を投入して氷混じりの冷海水とする水氷法でも、塩分濃度調整による温度管理は経験的に行なわれており、海水に清水を混合して塩分濃度調整をおこなっている。この調合は各船のノウハウとなっているが、多くの場合は海水6：清水4から海水4：清水6程度の混合をおこなっているようで、この場合の最低温度は-0.7~-1.1℃となる。平均的な魚介類の凍結温度

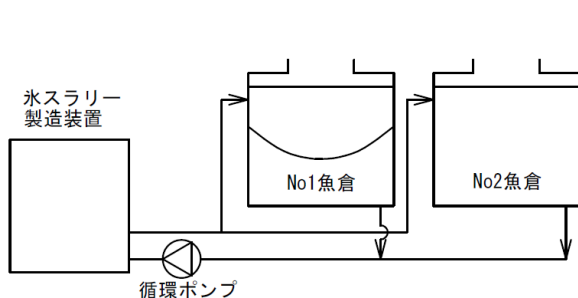


図 3-2 バッチシステムの概要 (3-2)

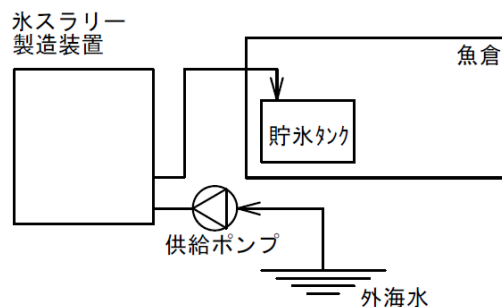


図 3-3 連続供給システムの概要 (3-2)

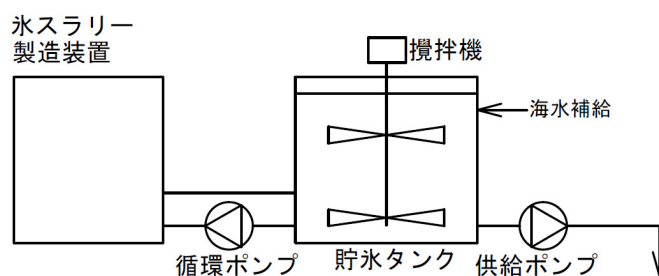


図 3-4 ダイレクト貯蔵システムの概要 (3-2)

は-1.5℃であるので、この調合であれば漁獲物表面が微凍結をおこすことはなく、理にかなった調合となっている。

氷スラリーを製造する場合、表 3-2 でわかるように、製造した IPF(氷濃度)により塩分濃度が濃くなり、氷スラリーの温度も低下していく。漁獲物を氷スラリーに含まれる氷のみで冷却しようとした場合、IPF(氷濃度)は 30%程度必要となるが、この氷充填率の氷スラリーの温度を漁獲物の凍結点以下の温度とするためには、海水と清水を 6:4 で混合しておく必要がある。但し、現在実用化されている製氷機では製氷可能な最も低い塩分濃度は 2.0~2.5%であるので、初期の温度は若干低めとなる。しかしながら、漁獲物を投入すると氷が溶け塩分濃度が低くなるため、多くの場合はある程度の塩分調整で良いようである。

### 3.2.3 船上での活用例①急冷

前述したとおり、氷スラリーは微細な氷を含む液体であるので、高効率冷却が可能となり、その結果、漁獲物を急速に冷却でき、高品質な冷却が可能となる。実際のシステムは、魚体のサイズや操業形態によって多少異なったものとなる。

a) バッチシステム マグロ、カジキなどの大型生鮮魚類の急冷に活用できる。システム概要を図 3-2 に示す。通常、大型魚介類は 1 日に 1 回の網揚げ（縄揚げ）であるので、急冷魚倉を 2 倉用意し、1 魚倉に 1 日かけて循環方式で氷スラリーを製造する。氷スラリーが準備できた魚倉で漁獲物を急冷している間に、他方の魚倉に氷スラリーを製造することで、連日の急冷を可能とする。本方式は、東北地区で実施されている。

b) 連続供給システム 現在冷海水で急冷をおこなっている場合、IPF(氷濃度)の低い氷スラリーを 0℃以下の超低温冷海水として活用することで、従来 2~5℃の冷海水の顕熱のみでの冷却を、高い潜熱を有する微細氷を含んだ-2℃の冷海水で冷却することとなり、高鮮度とすることが可能となる。このシステム概要を図 3-3 に示す。

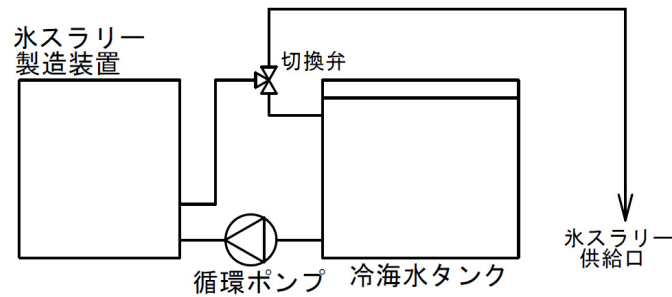


図 3-5 冷海水/氷スラリー共用システムの概要 (3-2)

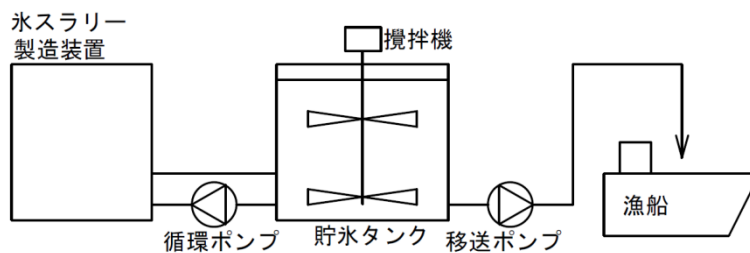


図 3-6 陸上設置システムの概要 (3-2)

氷スラリーは外海水を使用したダイレクト方式で製造し、一定 IPF(氷濃度)の状態ですりタンクに貯めていくことで、常時氷スラリーを使用できるシステムとなっている。急冷に使用する際には、すりタンクからポンプにより 0℃以下の冷海水を排出させるか、すりタンク上部からバケツで汲み出して使用する。本方式も東北地区で実施されている。

c) **ダイレクト貯蔵システム** 底曳き網のように、網揚げされた大量の漁獲物を甲板上で選別・箱詰めして冷蔵する場合、甲板上での作業中に品質が低下する場合がある。この選別待機中に漁獲物を低温保持する場合のシステム概要を図 3-4 に示す。

氷スラリーは循環方式によりすりタンクに製造する。網揚げされた漁獲物を甲板上の予冷タンクの中に入れ、ここに氷スラリーを供給ポンプで移送し、選別待機中の魚介類の急冷を行う。減った氷スラリーの量だけ海水をすりタンクに補給し、再び氷スラリーを製造する。補給海水を他の装置で製造した冷海水とすることで、氷スラリーの製造量を増やすこともできる。本方式は、山陰地区で実施されている。

d) **冷海水/スラリー共用システム** 冷海水タンクに入れた海水を、操業を行っていない夜間等に氷スラリー製造装置で 0℃まで予冷しておき、操業中は切換弁で系統を切換え、ダイレクト方式で氷スラリーを製造し、甲板上の漁獲物に供給する。この方式であれば、海水予冷用の冷却装置が不要となり、操業中の氷スラリー供給量も増やすことができる。また、攪拌機を設置する必要もなくなり、冷海水としての使用も可能となる。本方式も、山陰地区で実施されている。

カニ漁船のように、少量の漁獲物が断続的に揚げられる場合、選別を行う際に各サイズの漁獲物が一定量になるまで甲板上に放置されることになり、この間の品質低下が問題となる。この場合にも、氷スラリーを活用することで品質低下を防止できる。システム概要を図 3-5 に示す。

e) **陸上設置システム** 養殖漁業や定置網漁業では、連日短時間の移動で大量の漁獲物を水揚げするため、漁船に搭載されている発電機容量では製造不可能な量の氷スラリーが必要となる、この場合は、陸上で氷スラリーを製造し、出港直前に魚倉に氷スラリーを移送するシステムとなる。このシステム

概要を図 3-6 に示す。このシステムは漁船の仕様に関係なく氷スラリーを供給できるが、陸上設備の設置場所の確保が必要となる。また、一旦漁船に移送した氷スラリーを別の魚倉に移送することが難しい点も考慮する必要がある。本方式は日本海沿岸で実施されている。

f) 砕氷と置き換えた使用 イカナゴ、キビナゴ、ホタルイカ、ドンコなどは、漁獲後即座に急冷する必要がある。この急冷に、従来の砕氷（1 章図 1-3 参照）にかえて氷スラリーを使用することで急速な冷却が可能となる。また、漁獲直後から選別、箱詰めまでの全ての工程で氷スラリーを使用し、鮮度維持の問題から実施されていなかった大消費地への出荷も試験的におこなわれたケースがある。

### 3.2.4 船上での活用例②予冷

a) 大型魚類の凍結前予冷 遠洋マグロはえ縄漁船での鮪凍結は、現在漁獲された状態でいきなり超低温凍結装置に搬入して凍結されているが、その凍結前に海水氷スラリーで 0℃ 近辺まで予冷して凍結をおこなうと凍結処理にかかる総動力を節約することができる。本方法は過去に遠洋マグロはえ縄漁船で品質保持の意味合いで冷海水を用いておこなわれていたが、近年は行なわれていない。しかし昨今漁船の省エネ問題がクローズアップされている点から考えると有力な方法の一つと思われる。

b) 中小型魚の凍結前予冷 トロール漁船などは、網揚げされた魚介類を選別後に凍結しているが、選別中に待機している漁獲物の品質が低下し、一部廃棄せざるを得ない状況がある。この待機している漁獲物を氷スラリーで予冷することで、廃棄する量を減らすことができる。氷スラリーはダイレクト方式に必要な時間帯に必要量を供給するシステムとしている。本方式は、東北、北海道地区で実施されている。

c) 食塩ブライン凍結の予冷 魚介類によっては、漁獲後いきなり食塩ブラインに浸漬して凍結をおこなうと塩分が魚体に浸透する場合がある。ブラインの浸透は凍結前に発生するため、凍結前に氷スラリーで 0℃ 近辺まで予冷することで、食塩ブラインに浸漬直後に表面が凍結し、塩分の浸透を防ぐことができる。この予冷に海水氷スラリーが最適となる。

d) 大型運搬船の予冷 まき網漁業の大型運搬船での氷スラリーの活用を検討した事例がある。大型運搬船は数日間で網船と市場を往復するが、搭載する砕氷は 100 トンを越すため、この砕氷代のコストダウンの手段として検討されたもので、この時の試算では数年間で設備投資コストを回収できる結果がでた。但し、使用する水量が極端に多いため、現在使用している水量の全てを氷スラリーとするとかなり大規模な装置となることから実施は見送られた。本件については、装置の設置方法や、購入砕氷の一部を氷スラリーとするなど、運用方法でさらに検討が必要であるが、コストダウンの面からは有効である。

### 3.2.5 船上での活用例③その他

冷海水を使用している船で、現状の冷凍設備の能力が漁獲量に対して不足している場合、冷海水製造装置を氷スラリー製造装置に置き換えることで能力不足を補うことができる。冷海水を使用している場合で能力が不足するのは、漁獲物を冷海水に投入直後の最も負荷が大きくなる時であるが、氷スラリーを使用すると漁獲前に氷の状態で冷熱を魚倉内に蓄えることができるため、漁獲物投入時の一時的な負荷増大に対応することができる。

また、海水に砕氷を加えて海水氷をつくっているケースでも、船上に氷スラリー製造装置を搭載できる仕様であれば、氷代の節約となる。氷スラリーを設置するコストは、通年操業であれば数年の氷代で償却できるケースが多い。

### 3.2.6 船上以外の利用例

a) 水産市場での利用例とメリット 導入設置された水産市場は高度衛生管理市場として運営されている。

- ・八戸市館鼻地区荷捌き所 A 棟
- ・大船渡市魚市場

等がある。水揚げされた魚を衛生的に処理し、魚価を維持することを目的として採用されているが、



採用された市場の管理者からの評価は、以下のとおり高い。

- ・配管で氷スラリーが運ばれるので、氷準備作業が楽になり、早出作業が皆無になった。
- ・市場内でのフォーク作業の混在化が無くなり、作業環境が良くなった。
- ・安全作業になった。
- ・水氷の単価が 1/3 になった。

b) 水産加工場での利用例とメリット 導入設置された以下に示す魚加工場は高度衛生管理加工場として運営されている。

- ・鹿児島県長島町東町漁業協同組合 加工場。
- ・熊本県天草市 株式会社 ブリミー
- ・宮城県女川町 株式会社 ヤマホン
- ・和歌山県海南市 株式会社 ダイニチ
- ・鳥取県境港市 株式会社 オーク

主に養殖漁の加工場に採用されている。採用時の主な目的は衛生管理基準の維持であるが、採用された加工業者から以下のような高い評価を得ている。

- ・配管で氷スラリーが運ばれるので、氷準備作業が楽になり、早出作業が皆無になった。氷の搬送は力仕事なので、男性の仕事だったが、女性でもできるようになった。
- ・水道のよう、氷スラリーの利用時に蛇口をひねれば必要量の氷スラリーを得られるので、以前のように氷をため置きしなくてよくなり、氷の使用が効率的にできる。
- ・以前の水氷より温度帯が 5 度程低いため、魚の鮮度保持期間が約一週間程度長持ちしている。
- ・従来に比べて氷を運ぶことが無くなり、フォークリフトなどの燃料費用が、約 150 万円/月減少している。
- ・製品のクレームが皆無になった。魚および包装に傷つかないなどを挙げている。特に夏場でも冬と変わらない鮮度保持ができる。

### 3.3 水産分野以外での氷スラリーの利用例

#### 3.3.1 物流冷蔵庫荷捌室の 0℃空調

氷スラリーは、ほぼ 0℃一定の状態を保ちながらポンプで流動させることができる。そこで、これをフィンアンドチューブ型熱交換器のチューブ側（管内側）に循環させ、フィン側（管外側）で空気を冷却し、その空気でトレイやコンベアに並べた野菜を冷却することが行われている。実プラントの一例が英国のポストン・リンカーンシャーにある (3-3)。プラントは、88 kW の氷スラリー製造機および 10 m<sup>3</sup> の貯蔵タンクから成り、180 kW のピーク負荷用に設計されている(3-4)。

氷スラリーを直接、冷却に用いているわけではないが、直膨式のクーラではどうしても温度変動が避けられないため、青果物等の決して凍結させてはならない商品の場合、数℃のマーゲンを取って平均設定温度を上げざるを得ない。その点、スラリーを用いれば、温度変動が極めて小さいため、0℃ギリギリまで設定温度を低下させることができ、それだけ商品の冷却速度を高めることができる。ただし、メーカーの website には蓄冷熱による省エネルギー性が主要なメリットと書かれている。

我が国でも、東洋製作所と関西電力の共同開発による「ブラインエコル」(3-5) というシステムが実用されている。製氷ユニットにより生成された 0℃以下の氷スラリーを、蓄熱槽もしくは荷捌室へ搬送し、物流冷蔵庫荷捌室の 0℃空調を可能とする。荷捌室から高温となって戻ってきたブラインは蓄熱槽の水で予冷し、再び製氷機に還る。ブラインにはプロピレングリコール系水溶液を採用しており、また高効率運転を実現するために、製氷にはダイナミック型（過冷却解除方式）を採用するとともに、冷媒の凝縮に水の蒸発潜熱を利用する蒸発式凝縮器（エバコン）を採用した。

氷スラリーの冷却特性を考えれば、“0℃空調”が可能である。仮に荷捌室を 0℃に保つことができれば、青果物など、決して凍結させてはいけない食品を、できるだけ低温に保ち、鮮度低下を抑え

ることができるものと推測される。他の特徴としては、高効率、凍結温度に追従した蒸発温度制御、設置の自在性が記されている。

### 3.3.2 氷スラリーから生成されたチルド水利用の乳業、飲料プラントへの導入事例

a) 新菱冷熱 乳業および飲料メーカー等の工場では、製品の殺菌後の冷却や、その後の保冷のために、低温のチルド水が使用されるが、その熱負荷が平均的でなく、高温負荷が短時間に加わるという特徴がある(3-6)。このため、設備設計においては、この高温負荷を賄い得るだけの容量を確保する必要があるが、それは短時間なので、かなりの時間に渡ってオーバースペックということになる。ここに氷蓄熱を適用すれば、負荷が平準化して、設備容量を低減することが可能となる。特に食品の場合、加工工程中に少しでも、規定の温度を超えることがあれば、品質保証の観点からロットごと廃棄となることが多い。これを避けるため、食品加工設備では最大容量の安全率を大きくとっているものと思われるが、氷蓄熱を導入することによって、このマージンを確保することも容易となるため、食品加工工程に蓄熱を導入することは有効であると考えられる。さらに、蓄冷槽からの冷熱の取出しも素早く行う必要があるため、スラリーによる蓄熱はより有効である。

以上のような背景から、新菱冷熱がこれまでに空調設備用として多く納入してきたシステムを、食品加工場のチルド水供給装置として導入したという事例が報告されている(3-6)。導入後の試験から、あらゆる負荷条件下でも2℃以下のチルド水が安定して供給できることが確かめられたということである。

b) 高砂熱学 乳製品加工工場へのチルド水供給にダイナミック型氷蓄熱システムを導入した事例が、2012年度日本冷凍空調学会年次大会において高砂熱学より発表されている(3-7)。本システムは、製氷装置、氷蓄熱槽、チルド水送水ポンプ設備からなる。氷蓄熱槽を冷熱のバッファとして機能させることで、チルド水の安定供給を保証しながら、冷凍機の容量低減と高効率運転を図るというものである。特にこの加工工場では、一般的な空調用途とは違って、チルド水使用の冷熱需要が24時間にわたって続くため、蓄氷運転と解氷運転が24時間ほぼ並行して行われる。さらにチルド水温度は1℃前後で、高い温度安定性が求められる。なぜそのような性能が求められるか、については記述されていないが、恐らく乳製品なので、加工中の品質低下を防ぐために低温に維持する必要があるものと推察する。また、前項で紹介した事例にもあった通り、食品加工工場の一般的な特徴として冷熱負荷が不安定になり易い。特に生乳、鮮魚など劣化の速い食材を原材料とする場合、搾乳、水揚げから最終製品に仕上げるまでの時間が限られているため、工場設備容量は、考え得る最大処理速度に合わせた設計としなければならない。

氷スラリーは、凍結点（凝固点）付近においては温度が非常に安定しており、また蓄熱作用があるため、このような用途に適用することは有効であると考えられる。

### 3.3.3 氷スラリーでの直接冷却による温度管理

海外および国産のブロッコリーの品質維持のため、収穫時から冷却が必要で流通時には水で直接冷却して運ぶ方式が一般的に行われている。一例として、野菜を雪氷状の氷で閉じ込め、野菜の鮮度保持、長距離輸送を可能にするシステムを図3-7に紹介する。

砕氷と水とを混合した流動水（氷スラリー）を容器につめた野菜に行き渡らせ、水を抜くことにより野菜を雪氷状の氷に閉じ込める。このシステムには以下のような特徴がある。

- ・低温状態を維持でき、エチレングスの発生を抑制できる。
- ・野菜が凍結しない。
- ・氷を流動状態で供給するため、隙間まで氷を行き渡らせることができ、野菜の冷却時間を短縮できる。
- ・氷が解けにくい
- ・低温度のため、菌の増殖を抑制できる
- ・高湿度のため、乾燥を防止できる。

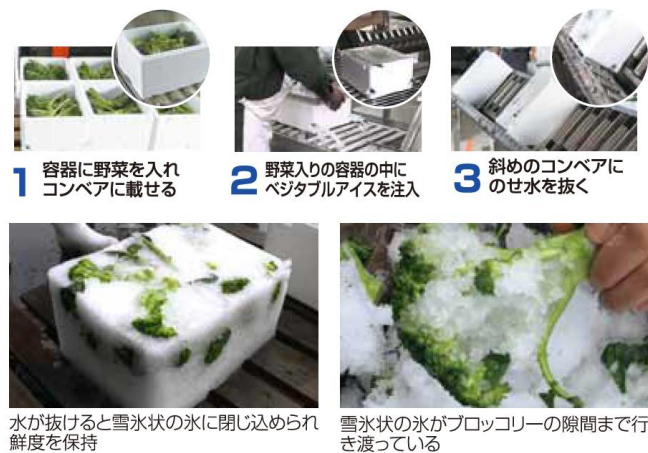


図 3-7 野菜の個別保冷方法の一例(3-8)

今後、野菜、果物の輸出などの流通にも氷を使うことにより、甘さを向上させるというだけでなく、品質管理の上からも大きなメリットが得られると考えられる。

### 3.3.4 野菜・果実・ブロイラーの急速冷却

野菜、果物は収穫すると同時に 4℃以下に冷却すれば、呼吸が 70%減少するといわれている。呼吸が少なくなれば栄養分の自己消費が抑えられるため、鮮度保持とともに栄養素が確保できる。

スラリーを冷却材に用いて野菜や果実を急速冷却することを目的とした FoodiCE なる商品が、Environmental Process Systems Ltd. 社により作られている(3-9)。これは、EU 認可の食品添加物である E340 (リン酸カリウム)、E501 (炭酸カリウム)、E339 (リン酸ナトリウム) の溶液から作ったスラリーであり、食品を直接冷却できる安全性をセールスポイントとした商品であると考えられる。冷却テストのデータが図 3-8、3-9 に載せられている (著作権の関係で掲載できず)。

キャベツ、レタスなどの結球型葉物野菜は、いかに表面の熱伝達率が高くても、内部は葉と空隙の層状構造となっているため、どうしても内部まで冷却するには長時間を要する。しかし、それ以外のものについては、野菜、果物ともおおむね 1 時間程度で 5℃程度以下まで冷却されている。冷媒温度はほぼコンスタントに -1℃程度に保たれており、これならば被冷却物が凍結してしまうことはまずないと考えられる。凍結のリスクが無く、比較的急速な冷却が可能ということがメリットである。

同じように、カット野菜工場、カットフルーツ工場でのコールドチェーン化にも適用できる。

また、ブロイラー加工場において、使用する水(冷水)を機能性氷スラリーに変えれば、産業廃液の量を軽減することになる。鶏肉処理の品質向上と衛生的な管理ができるようになり、チルドでの製品輸送も可能になると思われる。

### 3.3.5 チーズ工場での導入事例

Gladi(1997)(3-7)は、ハンフォード、CA、USA にあるチーズ工場に導入された氷スラリーブランドについて報告している。この工場ではチェダーチーズを 90 t/day 生産する。用途は、チーズス

ターター冷却, 乳清タンパク質の濃縮, ろ過を行う容器などで, 緩慢/急速の両方の冷却工程の冷凍負荷は 2546 kWh/day と推定される. 冷却負荷のピークは午前 7 時, チーズスターターを 85 °C から 25.5 °C まで冷却する工程で発生する. この冷却工程が 265 kW を必要とし, 工場内で必要となるその他の冷熱負荷を合わせると, 工場全体の総ピークロードは 396 kW となる. このピークロードは 1 日のうちわずか 1 時間で, 残りの 23 時間では冷却負荷は 56~148 kW であり, これはピークロードの 40% 未満である. このピークロードを低減するために, 763 kWh の蓄冷熱が可能となる 106 kW のアイスジェネレータと 24.6 m<sup>3</sup> の貯蔵タンクからなる, 図 3-10 のような氷スラリーシステムを設置した. また, この工場の負荷プロファイルを図 3-11 に示す.

著作権の関係で削除 ([http://www.epsltd.co.uk/files/slurry\\_foodice.pdf](http://www.epsltd.co.uk/files/slurry_foodice.pdf) 参照)

図 3-8 野菜の冷却曲線

著作権の関係で削除 ([http://www.epsltd.co.uk/files/slurry\\_foodice.pdf](http://www.epsltd.co.uk/files/slurry_foodice.pdf) 参照)

図 3-9 果物の冷却曲線

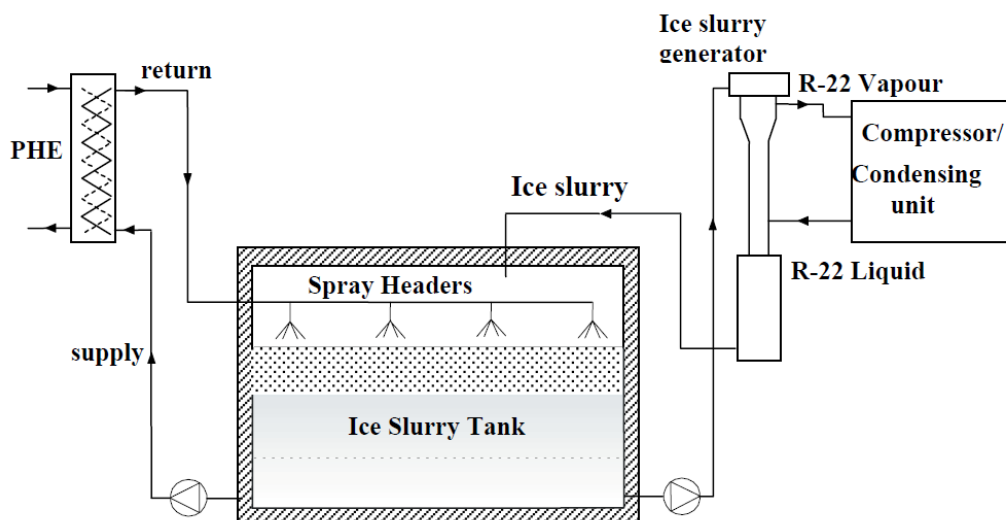


図 3-10 チーズ工場に導入された氷スラリーシステムの概要図(3-10)

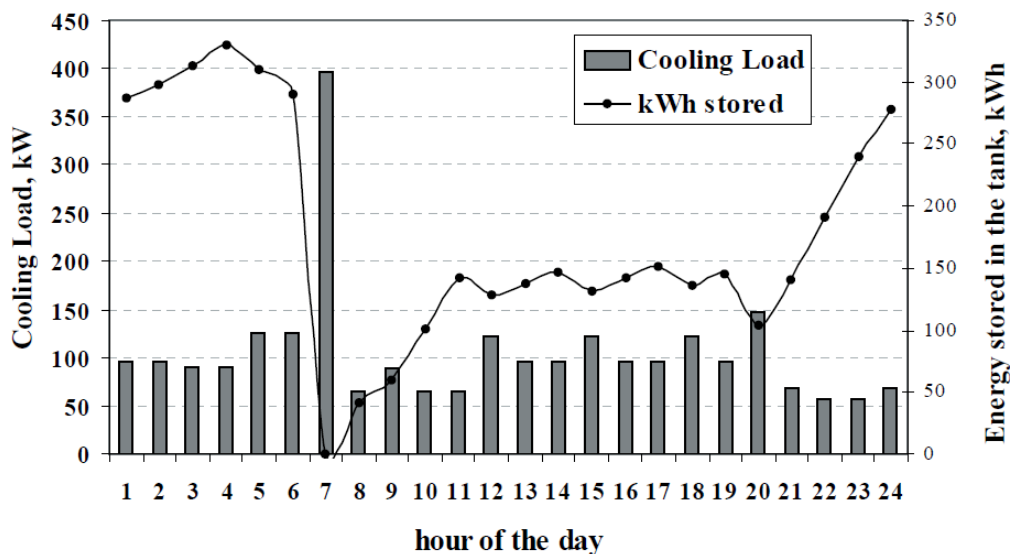


図 3-11 24 時間におけるプラントの冷熱負荷および冷熱蓄熱量の変動(3-10)

氷スラリー装置は連続運転し、7%のプロピレングリコール溶液から、5~10%の氷充填率となるように氷スラリーを製造する。製造された氷スラリーは貯蔵タンクへポンプ移送され、ここで密度差により氷相と冷溶液に分離し、それぞれタンクの上と下に貯まる。約 0 °C の冷溶液はタンクの底から熱交換器に送られ、そこで温まった溶液はスプレーノズルを介して、タンク上層の氷の上に散布される。

本実施例はチーズ工場に導入されたケースであるが、氷スラリーを利用してもチーズの品質向上に対しては特筆すべきメリットは無いようである。しかし、氷スラリー利用の効果は、ピークカットによる設備容量の低減としては明確に得られている。食品工場、特に乳製品のような微生物の繁殖が速い製品の加工場においては、食品の安全性を保障するため温度管理が非常に厳しく成されており、冷却能力不足によるトラブルを避けるため設備容量が過剰になりやすい。よって、氷スラリーを導入する効果は大きいものと思われる。

### 3.3.6 醸造所での導入事例

ドイツのケンプテンに、プロセス冷却とビールのボトリング工程に氷スラリープラントを導入した事例がある(3-11)。ドイツではほぼ全ての工場で、ビールの製造時、保管時の冷蔵にアンモニア冷媒を使用しているが、この工場は市街地中央に立地するため、安全性や市の環境要求の観点から、アンモニア使用量を削減することが求められており、そのために氷スラリープラントを導入したという事例である。

ビール醸造プラントの系統図を図 3-12 に示す。氷スラリーを用いることにより、アンモニア冷媒を機械室のみに封じ込めることができ、使用量も削減された。トラブルに備えた安全装置もまた、機械室のみに装備すればよくなった。貯氷タンクは機械室から 50 m 隔てた位置に置かれ、図 3-12 に示すように、2 系統の回路が、氷製造、輸送のために設けられている。

冷却ラインは 3 系統あり、それぞれ独立のラインポンプで送液されており、このプラントではそれぞれ異なる熱交換器で冷却が行われている。中間生成物である麦汁の冷却にはプレート熱交換器が使われる。麦汁の冷却には、短時間で冷却することと温度変動が小さいことが求められる。この熱交換器の出口ライン温度は高く、氷は残存していない。麦汁の温度を目標温度域に保つために、出口ラインの一部を 3 方弁を介して入口の冷ラインに混合できるようになっている。これより麦汁クーラは独自の戻り流路をもっていることになる。ビールの発酵と貯蔵にはそれぞれ専用の容器を用い、

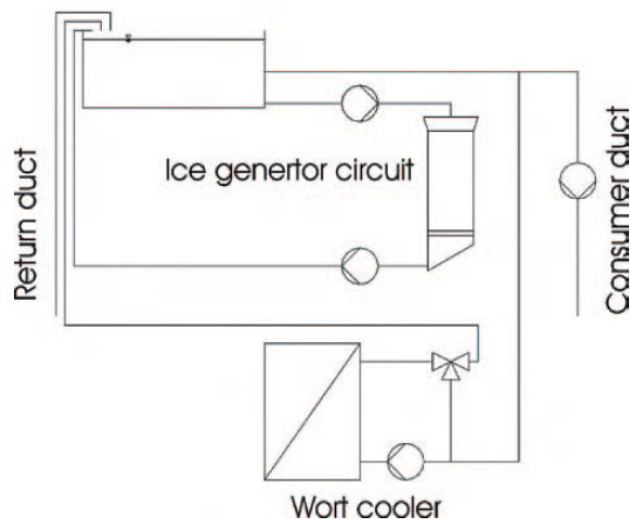


図 3-12 ビール醸造プラントの系統図(3-11)

半分に切った円管を溶接したジャケットにより冷却が行われる。これらは独立にブライン供給装置に接続されている。

冷凍機も含めたプラントの制御は、シーメンス社の SPS で行われる。貯氷タンクと冷却ラインの氷充填率は、温度測定により推算される。このように、温度で氷充填率を制御する場合、初期溶質濃度に大きく影響を受ける。貯氷タンクの温度が設定温度よりも低ければ、それは氷充填率が設定値よりも高いことを表すため、氷の製造は止まる。このような制御が有効であることが実験で確かめられた。

以上をまとめると、ビール工場に氷スラリーシステムを導入する利点は、麦汁の急速冷却および温度制御に有効であることと、アンモニアを 1 次冷媒としての使用に限定することで使用量を削減し、安全性を向上させる、ということである。

### 3.4 近い将来の氷スラリー利用が期待される事例

#### 3.4.1 氷スラリーによる凍結

氷スラリーは対象物を冷却する分野での活用がほとんどである。例えば食品では、生鮮食品の急冷や保冷で活用される。これらは、対象物を未凍結の状態で長期間高鮮度維持をおこなう目的で使用される。一方、空調分野などで氷蓄熱の媒体として使用されることもあるが、いずれにしても 0℃付近の温度帯での活用が多い。しかし、氷スラリーの温度は原液の凍結点（凝固点）に依存するため、凍結点の低い原液から氷スラリーを製造すると凍結する分野での活用も可能となる。本項では、-10℃以下の低温氷スラリーについて、その概要を解説する。

a) 低温氷スラリー 前記の通り、氷スラリーの温度は原液の凍結点となる。例えば、海水から氷スラリーを製造する場合、海水は 3.4%の塩水であるので、その凍結点である-1.9℃に達した時点で液中に氷が発生する。氷になるのは純粋な水のみであるため、液中に混在する氷の量が増えるほど液相の塩分濃度が高くなり、それに従い凍結点も低下する。このため、海水から氷充填率 30%の氷スラリーを製造すると、その温度は-2.9℃となる。

したがって、低温の氷スラリーを製造するには、凍結点の低い（濃度の高い）原液を使用すればよい。凍結点が 0℃よりも低い液体を、冷凍空調分野では「ブライン」と呼ぶ。現在使用されている代表的ブラインの凍結点は図 3-13 の通りとなる（砂糖はブラインとして使用しないが、参考として含めている）。ブラインの種類と濃度を選定することで、いろいろな温度の氷スラリーを製造できることが



わかる。

氷スラリーの温度を決定する際に注意が必要となるのは、前項で記載した通り、氷充填率が高くなると凍結点の下がる点である。これについて、エタノールブラインで $-30^{\circ}\text{C}$ の氷スラリーを製造する例で説明する。氷スラリー製造前のブライン濃度と IPF(氷濃度)毎の氷スラリー温度の関係を表 3-3 に示す。表中の楕円で囲った範囲が $-30^{\circ}\text{C}$ の範囲になる。したがって、 $-30^{\circ}\text{C}$ にするには表中の範囲に入るようにブラインの濃度と IPF を調整する必要がある。

#### b) 氷スラリー凍結の特徴

b-1) アイスバンク効果 氷スラリーは氷の形で冷熱を蓄えているため、通常の流体よりも冷却熱量が多い。 $-30^{\circ}\text{C}$ のエタノール水溶液から生成した氷スラリー（氷充填率 30%）と液体のエタノールを比較すると、約 20 倍の冷熱を保有している。これによって、凍結中の液温上昇や冷熱製造の平準化をおこなうことができる。

70kg の鮪を同じ温度の氷スラリーとブラインで凍結した場合の凍結速度のシミュレーション結果を図 3-14 に示す(3-14)。ブライン凍結の場合、凍結品を投入した直後にブライン温度が上昇するため、凍結速度が遅くなる。

b-2) 液体接触による急速凍結 氷を含みながら通常の液体とほぼ同等の熱伝達能力を有しているため、空気凍結する場合よりも対象物から速く熱を奪うことができる。これによって、冷却媒体が同じ温度であれば空気よりも速く凍結することができ、また同じ凍結時間で比較すると冷却媒体の温度を高くすることができる。

50kg 鮪の凍結速度の例を図 3-15 に示す。氷スラリー凍結は $-30^{\circ}\text{C}$ のエタノール水溶液から生成した氷スラリーを使用、空気凍結は $-60^{\circ}\text{C}$ セミエアブラスト凍結（管棚）を使用した場合の比較である。冷却媒体温度が氷スラリーは空気よりも  $30^{\circ}\text{C}$  高いため魚体中心温度が $-20^{\circ}\text{C}$ の時点で凍結時間が同じとなるが、それまでの凍結速度が速いことがわかる。

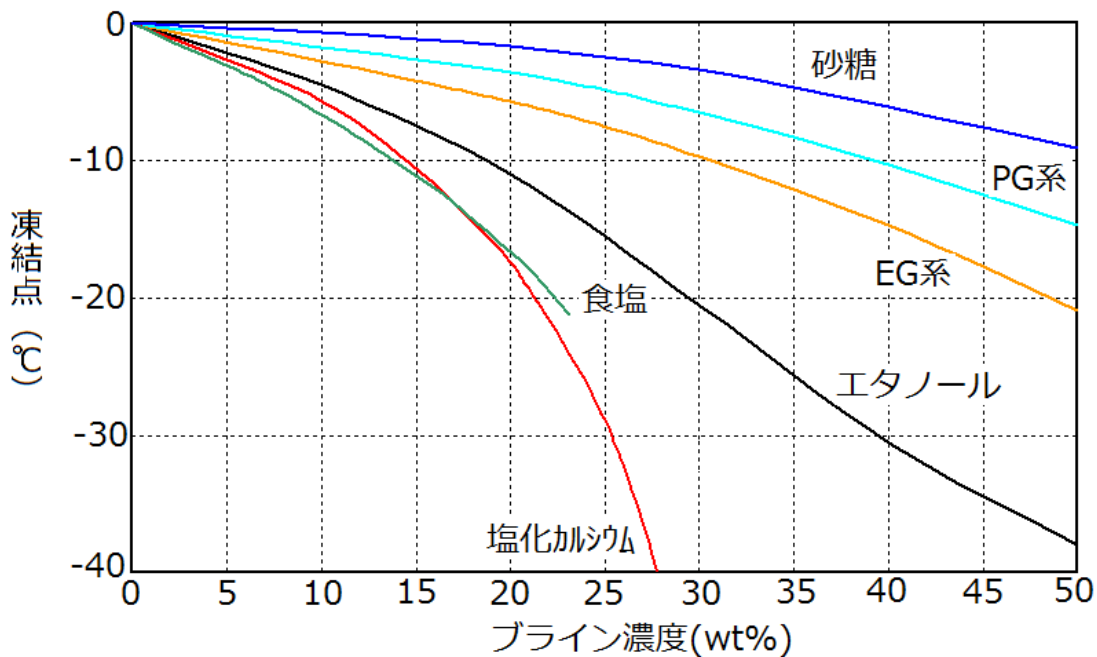


図 3-13 各ブラインの濃度と凍結点(3-12)

表 3-3 IPF (氷濃度) とエタノールブライン温度の関係(3-13)

氷濃度 (wt%)	エタノール濃度(wt%)										
	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
0	-21.0	-22.1	-23.1	-24.2	-25.2	-26.3	-27.3	-28.2	-29.2	-30.1	-31.0
1	-21.3	-22.4	-23.5	-24.5	-25.6	-26.6	-27.6	-28.6	-29.6	-30.5	-31.4
2	-21.6	-22.7	-23.8	-24.9	-25.9	-27.0	-28.0	-29.0	-29.9	-30.8	-31.7
3	-22.0	-23.1	-24.2	-25.2	-26.3	-27.3	-28.4	-29.3	-30.3	-31.2	-32.1
4	-22.3	-23.4	-24.5	-25.6	-26.7	-27.7	-28.7	-29.7	-30.6	-31.5	-32.4
5	-22.7	-23.8	-24.9	-26.0	-27.1	-28.1	-29.1	-30.1	-31.0	-31.9	-32.8
6	-23.0	-24.2	-25.3	-26.4	-27.4	-28.5	-29.5	-30.4	-31.4	-32.3	-33.1
7	-23.4	-24.5	-25.7	-26.7	-27.8	-28.9	-29.9	-30.8	-31.7	-32.6	-33.5
8	-23.8	-24.9	-26.0	-27.1	-28.2	-29.2	-30.2	-31.2	-32.1	-33.0	-33.8
9	-24.1	-25.3	-26.4	-27.5	-28.6	-29.6	-30.6	-31.6	-32.5	-33.4	-34.2
10	-24.5	-25.7	-26.8	-27.9	-29.0	-30.0	-31.0	-32.0	-32.9	-33.7	-34.5
11	-24.9	-26.1	-27.2	-28.3	-29.4	-30.4	-31.4	-32.3	-33.2	-34.1	-34.9
12	-25.3	-26.5	-27.6	-28.7	-29.8	-30.8	-31.8	-32.7	-33.6	-34.4	-35.2
13	-25.7	-26.9	-28.0	-29.1	-30.2	-31.2	-32.2	-33.1	-34.0	-34.8	-35.6
14	-26.1	-27.3	-28.4	-29.5	-30.6	-31.6	-32.6	-33.5	-34.3	-35.2	-35.9
15	-26.6	-27.7	-28.9	-30.0	-31.0	-32.0	-33.0	-33.9	-34.7	-35.5	-36.3
16	-27.0	-28.2	-29.3	-30.4	-31.4	-32.4	-33.4	-34.2	-35.1	-35.9	-36.6
17	-27.4	-28.6	-29.7	-30.8	-31.8	-32.8	-33.7	-34.6	-35.4	-36.2	-37.0
18	-27.8	-29.0	-30.1	-31.2	-32.2	-33.2	-34.1	-35.0	-35.8	-36.6	-37.3
19	-28.3	-29.4	-30.6	-31.6	-32.7	-33.6	-34.5	-35.4	-36.2	-36.9	-37.6
20	-28.7	-29.9	-31.0	-32.1	-33.1	-34.0	-34.9	-35.8	-36.5	-37.3	-38.0
21	-29.2	-30.3	-31.4	-32.5	-33.5	-34.4	-35.3	-36.1	-36.9	-37.6	-38.3
22	-29.6	-30.8	-31.9	-32.9	-33.9	-34.8	-35.7	-36.5	-37.3	-38.0	-38.7
23	-30.1	-31.2	-32.3	-33.4	-34.3	-35.2	-36.1	-36.9	-37.6	-38.4	-39.1
24	-30.5	-31.7	-32.8	-33.8	-34.7	-35.6	-36.5	-37.2	-38.0	-38.7	-39.4
25	-31.0	-32.1	-33.2	-34.2	-35.1	-36.0	-36.8	-37.6	-38.4	-39.1	-39.8
26	-31.5	-32.6	-33.6	-34.6	-35.6	-36.4	-37.2	-38.0	-38.7	-39.5	-40.2
27	-31.9	-33.0	-34.1	-35.1	-36.0	-36.8	-37.6	-38.4	-39.1	-39.9	-40.7
28	-32.4	-33.5	-34.5	-35.5	-36.4	-37.2	-38.0	-38.8	-39.5	-40.3	-41.1
29	-32.9	-34.0	-35.0	-35.9	-36.8	-37.6	-38.4	-39.2	-39.9	-40.7	-41.6
30	-33.4	-34.4	-35.4	-36.3	-37.2	-38.0	-38.8	-39.6	-40.4	-41.2	-42.2

液温-30℃の範囲

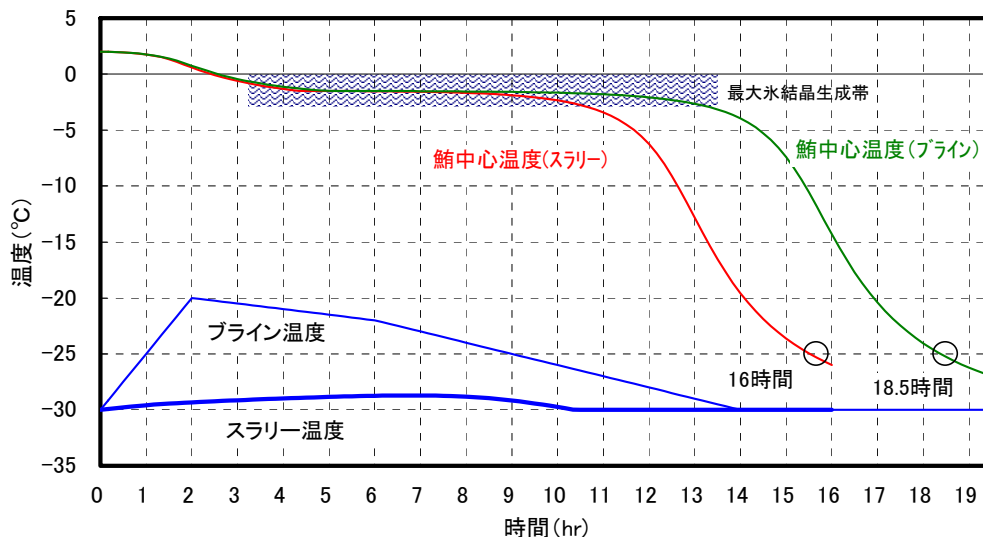


図 3-14 鮭の凍結曲線例(氷スラリーVS ブライン) (3-14)

c) アルコール氷スラリー凍結の検討例 日新興業(株)はアルコール水溶液から生成した氷スラリー(以下、アルコール氷スラリーと記述)を使用したマグロ凍結装置の納入実績を持つ。低温の氷スラリーは各種ブラインで製造できるが、ブラインの種類によって氷スラリーの特性が若干異なる。

c-1) アルコールの優位点 生鮮品を浸漬凍結する場合、安全性から食品添加物のブラインを選択す



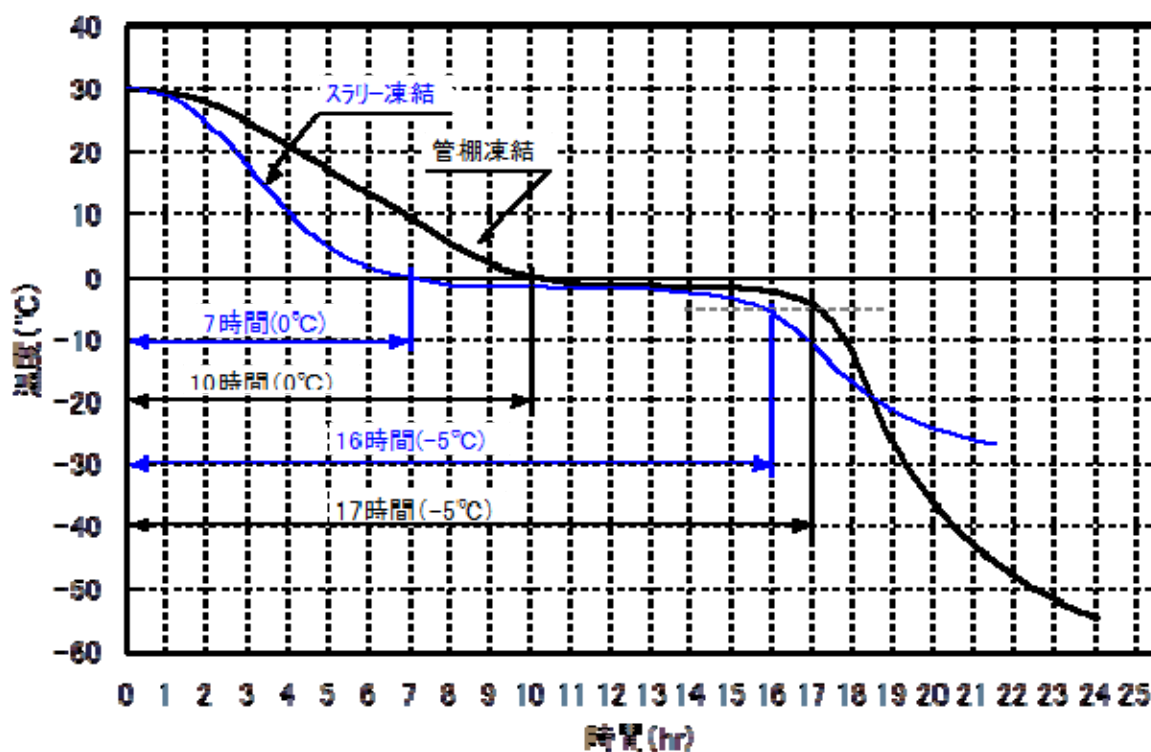


図 3-15 鮭の凍結曲線例(氷スラリーVS 空気)(3-15)

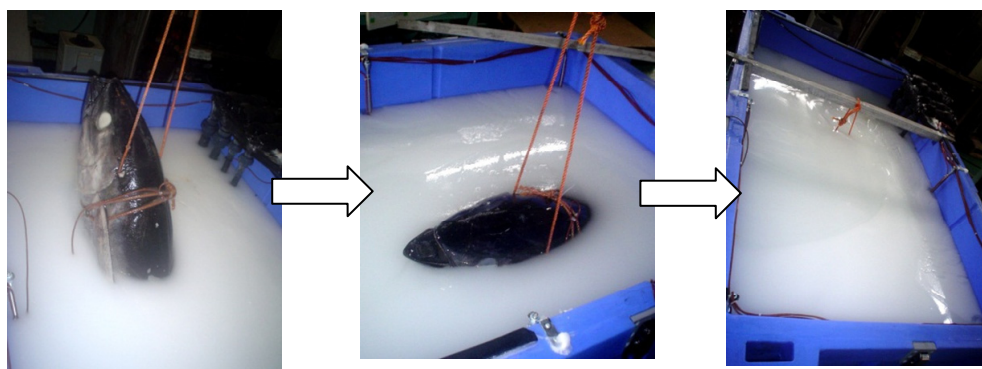


図 3-16 アルコール水溶液から生成された氷スラリーでの鮭の浸漬状態(3-14)

るため、通常は塩化ナトリウム、塩化カルシウム、アルコールの何れかとなる。それぞれの水溶液密度は、アルコール水溶液以外は凍結品よりもはるかに密度が大きいため、浸漬した際に凍結品がアルコール氷スラリー中で浮いてしまい、凍結作業に支障をきたす。一方、アルコール氷スラリーの場合は、凍結品に比べてアルコール水溶液の密度が小さいため、凍結品がアルコール氷スラリー中に沈み、良好に凍結できる（図 3-16）。

氷スラリーを貯めた場合、より密度の軽い氷が上部に分離し、氷スラリー表面での氷の割合が高くなり、凍結品を投入しにくくなるだけでなく、底部に氷が存在しなくなるため著しい温度差を生じる。アルコール氷スラリーの場合、氷との密度差が著しく少なくなるため、分離しにくくなり、また分離後も僅かな動力での攪拌で再び均一なアルコール氷スラリーとすることが可能となる。

図 3-17 に 3.4wt%塩化ナトリウム水溶液から生成された氷スラリー（液相密度  $1025 \text{ kg/m}^3$ ）と 40wt%アルコール水溶液から生成された氷スラリー（液相密度  $969 \text{ kg/m}^3$ ）の氷分離状態を示す。塩化ナトリ

ウム水溶液から生成した氷スラリーを透明容器に投入した直後から分離が始まり、1分後には下部4割程度が氷のない状態にまで分離したが、アルコール水溶液から生成した氷スラリーの場合は分離が遅く、投入から1分経過しても下部に僅かに液相が見える程度であり、投入から5分後でも氷がない相は下部2割程度であった

c-2) マグロ凍結漁船に搭載する場合のシステム検討例 本システムを既存の遠洋鮪はえ縄漁船に装備するための構造を検討した。検討の基本条件は下記の通りである。

- ・マグロ処理量 1凍結槽あたり1.5Ton.
- ・設置場所 現状の管棚凍結装置を設置している凍結庫と、その下部の魚倉を使用。
- ・凍結槽寸法 内寸：L4.4m×W1.6m×H0.9m
- ・冷凍機 既存の冷凍機を使用。

本システムを漁船に搭載する場合のシステム案を図3-18に示す。

アルコールブラインは高い揮発性により引火の危険性があるため、凍結作業中以外では常に密閉型ブライン貯蔵タンクに回収できるようになっており、ブラインが-10℃以下に予冷されなければ凍結槽に送液されない。凍結槽は上部に鮪を投入する開放部があるため、凍結作業室も-10℃に維持し安全を図る。マグロを投入した際のオーバーフロー液も自動的に貯蔵タンクに回収できるシステムとなっている。なお、アルコールの氷スラリー凍結装置は実際に遠洋マグロはえ縄漁船に搭載されている。システム構成は上記とは異なっているが、製氷能力は試験装置の2倍であり、また凍結槽への鮪の搬入はリフターによる昇降方式とし省力化をおこなっている。

### 3.4.2 氷スラリーの微生物制御機能に基づく利用

加熱調理を行った食品は加熱による殺菌がなされるため直後の微生物数は極めて少ない状態になるが、家庭や店舗での調理と異なり直後に喫食しない加工場や給食調理などでは調理後速やかに冷却することが必要になる。これは残存微生物や二次汚染により付着した微生物あるいは芽胞菌など加熱により発芽する微生物などが増殖する温度帯にあるため、冷却までに時間を要すると微生物によっては著しく増殖してしまうためである。

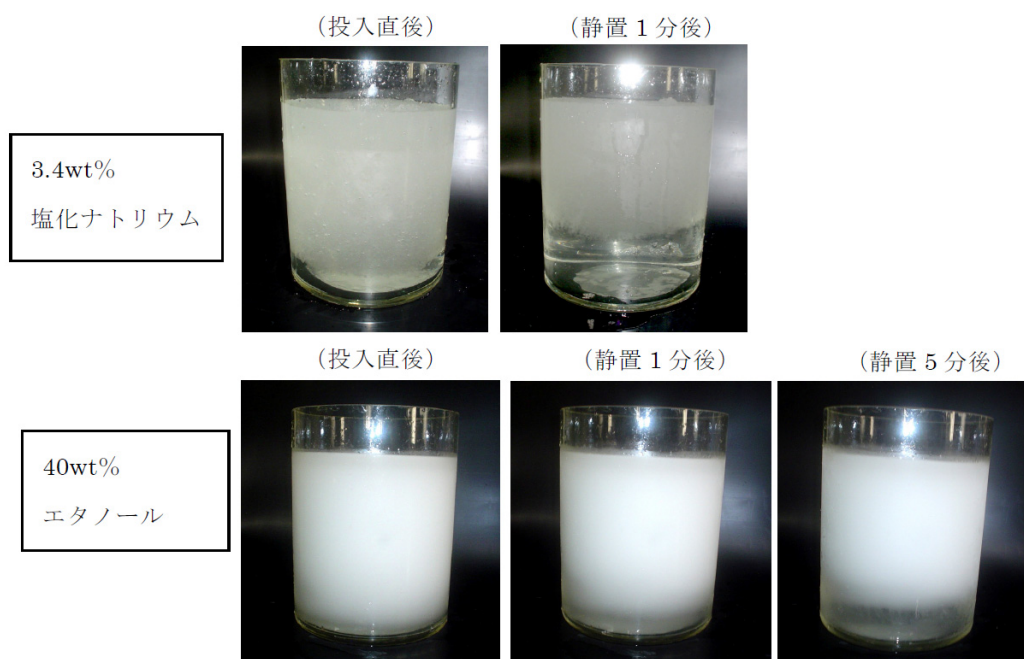


図 3-17 2種類の水溶液から生成された氷スラリー中の氷分離状況(3-16)

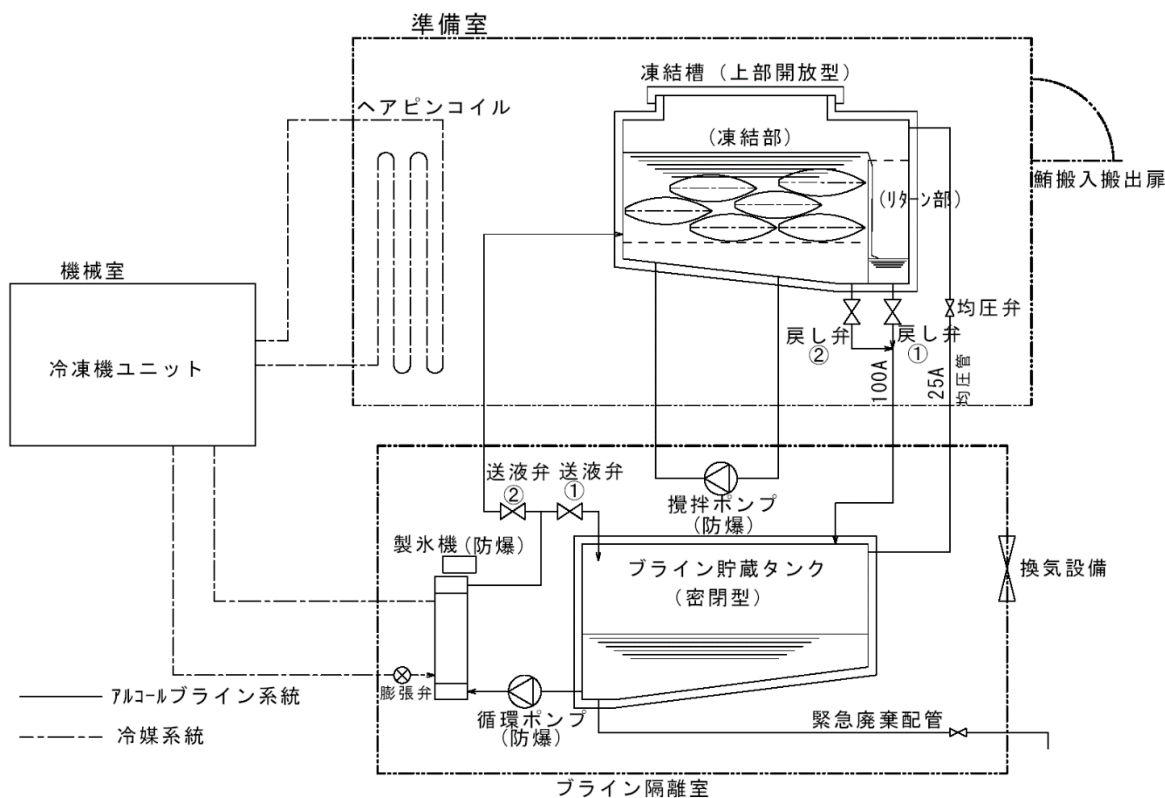


図 3-18 漁船搭載システム系統図(3-17)

図 3-19 は、鶏肉と培地をサンプルに用いて、加熱直後に相当する 75℃程度から、緩慢に冷却した場合と急速に冷却した場合で、ウェルシュ菌 (*Clostridium perfringens*) の生菌数にどれほどの違いがあるかを調べた実験の結果である。図 3-19 上の図は自然放冷を模擬した条件で、加熱後徐々に温度を下げ 6 時間後に 25℃になっているが、この場合保存後 5 時間で生菌数は 106/g にまで増殖している。一方、図 3-19 下の図のように加熱後 2 時間で 25℃まで急冷すれば、生菌数の増加はほとんど見られない。これより、加熱後に急冷することによりウェルシュ菌の増殖が抑制されることが明らかとなった。学校給食では和え物などに使う加熱野菜は 30 分以内に 20℃以下または 60 分以内に 10℃以下まで冷却することになっており、真空冷却機が推奨され、やむを得ない場合流水冷却（残留塩素 0.1ppm 以上）とされている(3-18)。

真空冷却機は加熱後の食品を容器に分けて移し替える手間があり、一回の処理量が限られるため冷却処理量に合わせた加熱調理を繰り返すことになる。更に真空になるので水分の蒸発を伴う。一方流水冷却は加熱野菜や麺類など対象物が限定され、冷蔵庫での冷却も行われるが通常の保管用冷蔵庫では冷凍能力が不足し庫内温度が上昇するため相当の冷凍能力を備える必要がある。

加熱調理食品の冷却への氷スラリーの活用は直接使用する場合は流水冷却と同様に対象物が限定されるが、潜熱利用と流動性という利点を活かし攪拌機付のジャケットタンクあるいはシェルアンドチューブ式熱交換器での冷却媒体として組み合わせることで、連続冷却と乾燥しない冷却装置の実現や、蓄熱機能を活かし既存の保管用冷蔵庫に冷却時負荷に追従する付加装置として追加するなどの可能性が考えられる。

以上のように、氷スラリーの特徴である「高効率冷却」による急冷機能により、加工設備の省スペース化、加工食品の安全性向上、さらには冷却過程での微生物増殖のリスクが無ければ、従来のような殺菌を目的とした過加熱が不要となり、加工食品の美味しさを向上させられるという可能性も考

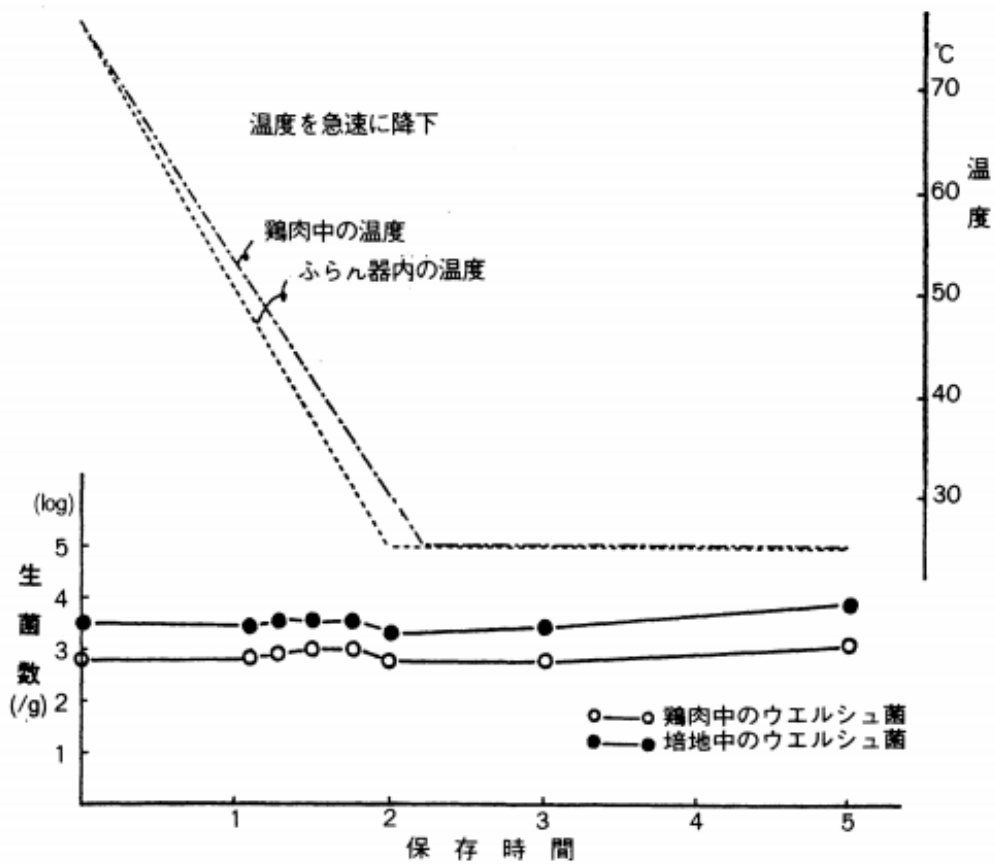
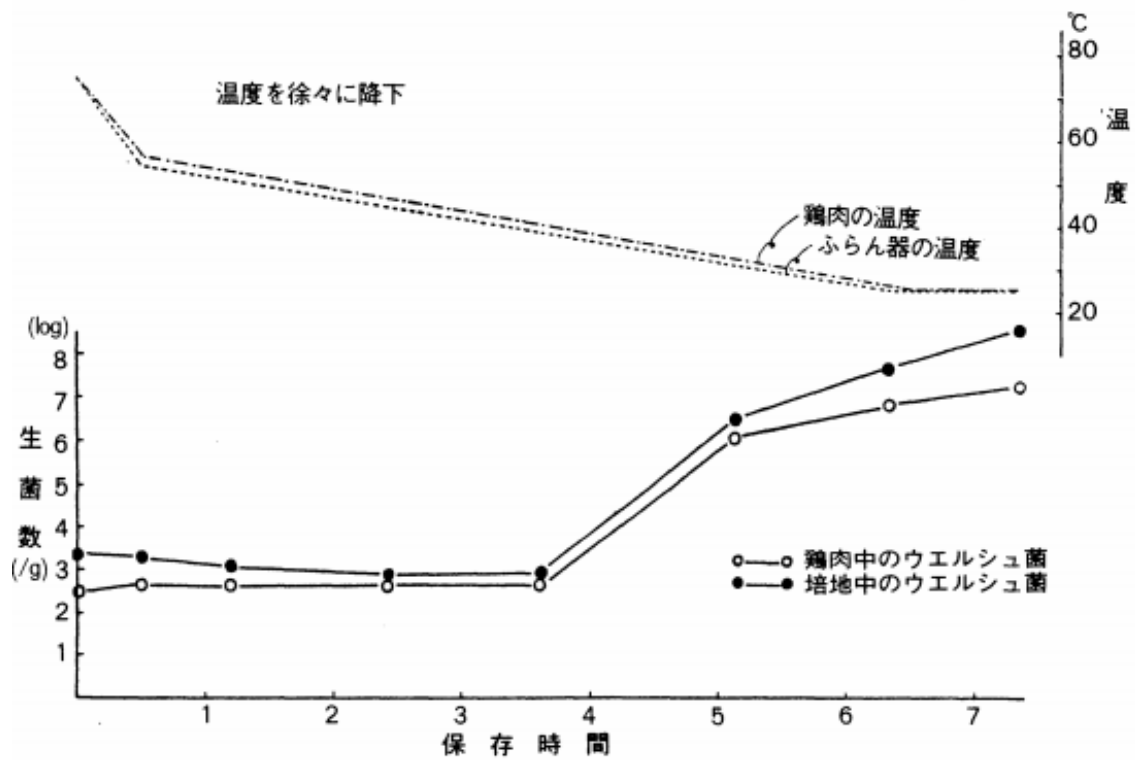


図 3-19 冷却速度とウエルシュ菌の増殖の関係(3-18)

えられ、様々な付加価値が期待できるものと考えられる。

#### 3.4.3 氷スラリーによる水産物の急冷による超高鮮度保持

ATP（アデノシン 3 リン酸）は、生体内に広く存在し、エネルギーの放出と貯蔵などの重要な役割を果たしている。生体が活着しているときは、リン酸 1 分子が結合・分離することにより ATP と ADP（アデノシン 2 リン酸）の状態を行き来しているが、生命活動が停止すると、もはや ATP は分解する一方となり、 $ATP \rightarrow ADP \rightarrow AMP$ （アデニル酸） $\rightarrow IMP$ （イノシン酸） $\rightarrow HxR$ （イノシン） $\rightarrow Hx$ （ヒポキサンチン）という経路で分解が進む。これらの ATP 関連化合物の総量のうち、 $HxR$  と  $Hx$  の占める質量割合を  $K$  値と定義すれば、これが魚類の鮮度と良く対応するため、 $K$  値は魚肉の鮮度指標として良く使われる。

冷蔵すれば、魚類の鮮度低下が抑えられることは良く知られているが、これは魚肉の温度を低下させることにより、魚肉の鮮度低下に関係するほとんどの化学反応の速度が低下するためである。もちろん ATP の分解反応速度も低下するため、 $K$  値も高くなりにくい。しかし、温度が低過ぎると、むしろ ATP の分解速度が非常に高くなり、早く死後硬直がおきることがある。この現象はコールドショートニングと呼ばれ、鮮魚の保存においてはこれを避けることが肝要である。

これに関して、2014 年度日本冷凍空調学会年次大会にて発表された、中澤らによる研究 (3-19) では、活サバを用いて、即殺後に急速冷却を行うことにより、コールドショートニングを避けながら超高鮮度を保ち得る可能性が示された。魚肉の死後変化のうち、最初に起こるのはフォスファータンとグリコーゲンの分解であると言われるが、グリコーゲンが嫌気条件で分解すると乳酸を生じるため、魚肉の pH が低下する。このため、pH の低下は魚の死後変化の中でも速く起こる。すなわち、pH が高く保たれていれば、死後の生化学変化がかなり抑制されていると考えられ、判りやすい言葉で言えば「非常に鮮度が高い」ということになる。

実験によれば、ATP 含量は、 $0 \sim -3^{\circ}\text{C}$  で冷却すれば冷却開始から 6~8 時間程度、死直後と同じくらいに高く保たれ、その後は徐々に低下して約 20 時間後にはゼロとなった。一方 pH は、ATP よりも減少速度が大きく、 $0 \sim -3^{\circ}\text{C}$  で冷却すれば、冷却開始から 4 時間程度までは死直後と同じくらいに高く保たれたが、その後は低下し、8 時間程度で最低値に到達した。実験の結果より、サバを即殺後、1.2 時間以内に  $0^{\circ}\text{C}$  以下に、4.4 時間以内に  $-5^{\circ}\text{C}$  以下に、6.2 時間以内に  $-10^{\circ}\text{C}$  となり、最終的に  $-15^{\circ}\text{C}$  以下で保存する、というパターンの冷却を行えば、ATP、pH が生存時と同様に高い、すなわち生存時と同等の肉質を保つことができる可能性がある。この実験ではブラインを用いたとあるが、このような急速冷却は氷スラリーの得意とするところであり、氷スラリーの非常に有効な使用方法であると言える。また、氷スラリーを水産物の冷却に利用するというは既に広く行われているが、前述したように氷スラリーによる冷却によって実現できる「生存時とほぼ同等のクオリティを保つ」という特性は、氷スラリーが次世代の用途として十分なインパクトを持っていると考える。

#### 3.4.4 その他の事例

a) 小売店舗 大規模な食料品小売店における従来の中央集中型の冷却システムでは非常に大量の冷媒が必要である。また、配管や接続部からの漏れも多い。食品小売店での二次冷媒として氷スラリーを利用すると、従来のブラインを利用した単相二次システムに比べ、二次側に供給されるスラリーの量が非常に少なくなるため、全体の消費電力を増加させることなく、一次側の冷媒量を減らすことができる。

Tassou ら(2001)(3-20) は、氷スラリーと R22 のそれぞれについて refrigerated display cabinet evaporator coil の性能を比較した。その結果、氷スラリーのコイル入口温度が R22 より少なくとも  $2^{\circ}\text{C}$  高かったにもかかわらず、氷スラリーの熱伝達性能は R22 より少し良かった。Lueders (1999)(3-21) はスーパーマーケットを対象に、中・高温冷凍負荷と店舗の HVAC 用途に氷スラリー蓄冷熱システムを採用した場合のフィージビリティスタディを発表した。直接膨張 (DX) システムは低温冷凍食品陳列ケース ( $-23^{\circ}\text{C}$ ) にのみ使用されるが、この冷媒システムから熱を取り除くことは氷スラリーシステムの水冷コンデ



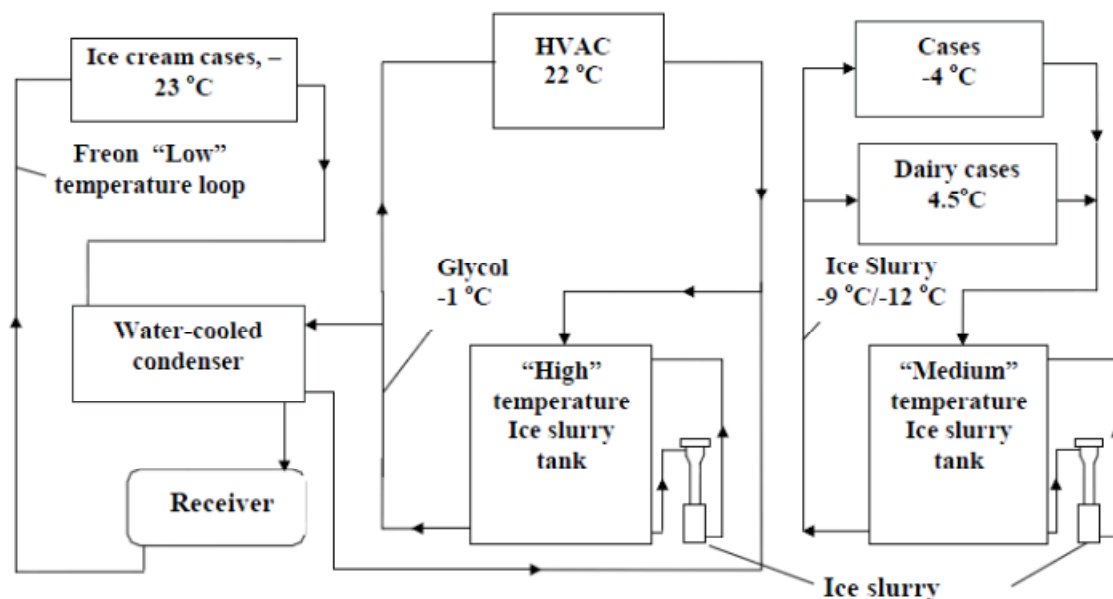


図 3-20 スーパーマーケットにおける氷スラリー蓄冷熱システムプラントの系統図(3-21)

ンサーで行われる。ここで考えているプラントは、一次冷媒にアンモニアを用い、個別の氷スラリートankを有する2系統の氷スラリー系で構成されている。最初の系統では「高温」氷スラリートankに接続され、建物の冷暖房空調設備の要件と、 $-1^{\circ}\text{C}$ でタンク下部からくみ上げられる液体を利用した低温 DX システムの凝縮要件を満たす。第2の系統では「中温」氷スラリートankに接続され、15%氷充填率のスラリーを利用して、 $-9^{\circ}\text{C}$ から $-12^{\circ}\text{C}$ の間で、媒体の負荷と高温のショーケース(それぞれ $-4^{\circ}\text{C}$ と $4.5^{\circ}\text{C}$ )に対応する。氷スラリー蓄冷熱システムプラントの系統図を図 3-20 に示す。この氷スラリーシステムと、熱媒体として単相2流体システムを利用したシステムの、ポンプ動力、流量および配管コストの比較を行った結果、氷スラリーシステムは2流体システムと比べて、流量で82% ( $55.4\text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 10.2\text{ m}^3/\text{h}$ )、ポンピングコスト82%、配管コスト51%削減できることがわかった。

氷スラリーシステムの建設費は従来の DX システムと比べて89%高くなる (195840 USD に対して369751 USD) と予測される。また、氷スラリーシステムはプラントのエネルギー消費量を3.5%増大させることが明らかになったが、ピーク時のエネルギー消費量の80%をオフピークの時間帯にシフトすることができるため電気代を49%節約でき、その結果、4.4年で回収が可能であると考えられる。同様のシステムが Davies and Lowes (2002a)(3-22) によって提案されている。彼らは氷スラリーを利用して、冷媒の凝縮を行い、さらに液相冷媒を冷却して従来システムで一般的な $0^{\circ}\text{C}$ よりも低い温度にすることによって、蒸気圧縮式冷凍システムのCOPを増大させ、ランニングコストを20%程度削減できることを示した。凝縮器内の氷スラリーの流量を制御することによって冷凍システムの凝縮圧力を制御し、オフピーク電力を氷スラリーの蓄熱に利用した場合、従来の外気による冷却の場合と比較して、エネルギーコストが30%以上削減できる可能性がある。氷スラリーを $-10^{\circ}\text{C}$ 以下で製造した場合、同様のシステムは店内の中高温の陳列ケースの冷凍負荷を満足する。世界中の $400\text{ m}^2$ 以上の床面積がある120,000軒のスーパーマーケットでは、このようなシステムを利用することにより大幅にエネルギー消費量を削減できる可能性がある(3-22)。

以上、小売店舗の冷凍、空調にスラリーシステムを適用する事例を2件紹介したが、前者は単相ブラインシステムからの換装を想定した例であり、蓄熱性によるピークカットと潜熱利用による冷媒流量削減によりランニングコストが効果的に低減するというものであった。対して後者は、氷スラリー

を組み合わせることによって、凝縮後の冷媒のサブクール度を増大させてやることで、トータルの省エネルギーを実現するものである。特に後者はユニークな利用法であるが、どちらにしても、食品の品質向上に直接関与するものとは言い難い。

b) 低温輸送 Paul (2002)(3-23) は、冷凍車の冷媒として氷スラリーを利用することを提案している。氷スラリーで効率的な冷却ができることは十分に検証されているため、2重壁を持つ冷凍車を作って壁の隙間に氷スラリーを充填すれば、これまでとは違う冷凍車が実現するであろう。これを実用するためには、氷スラリーの補給ステーションネットワークが必要であるが、著者が行ったフィージビリティスタディによって、これは実現可能であることが示されている。この技術は既に、1994年から中国の鉄道車両に使用されており、ここでは各車両の屋根下のスペースに氷スラリーを充填していた。類似の事例として、2重壁のコンテナにサービスステーションで氷スラリーを充填することで移動中の冷却を行う鉄道車両が、スイス鉄道会社で数台、運用されている。

オーストリアでは、2004年秋からバンタイプの氷スラリー宅配車を実験的に運用している。この試験は、1999年に既存システムの問題点がエンドユーザから指摘され、それから幾つかのシステムが検討されてきたうちの一つである。

- ・ サービスコスト、メンテナンスコストの削減
- ・ 宅配車重量の軽量化
- ・ 取扱いが容易であること
- ・ 可能な限り既存の冷凍プラントを利用できること
- ・ 環境親和性、持続可能性のある技術（可能であればノンフロン）
- ・ 冷熱の急速利用手法
- ・ 冷蔵温度帯が変えられること
- ・ 既存の冷凍車より軽量化して、その分だけ積載重量を増大すること
- ・ 既存の冷凍車へ機器を追加しない(コンプレッサ、バルブ、ポンプなど)

氷スラリーは上記項目に対し、多くの利点を持つ。メインアイデアはガソリンスタンドでの給油のような、再充填可能な氷スラリーである。

オーストリアで最初に行われたテストは、冷凍品輸送用の小型バンであった。小型バンは頻繁に停車してドアの開閉と荷物の出し入れがあるため、 $-18^{\circ}\text{C}$ 以下の温度管理を実現するためには、最も冷却能力が必要なためである。この試験によって以下の興味深い事実が明らかになった。

- ・ 熱交換器のデザインは実際の要求に即したものに適応させるべきである。加えて、アイスジェネレータやポンプなども改良するべき。
- ・ 氷スラリーの最低温度は $-39^{\circ}\text{C}$ に達した。
- ・ 氷スラリーを使用した凍結品の輸送( $-18^{\circ}\text{C}$ 以下)が可能であることがわかった。この結果を受けて、今後のテストは凍結温度にまで拡張する予定である。

これまでと違う、特別な熱交換器が必要であると判ったため、現在、その開発も進められている。

国内においても、安留(2007)(3-24)は、蓄熱材(氷スラリー)を用いた車載冷凍機を必要としない低温輸送システムを提案している。車載冷凍機の駆動動力分のエンジン負荷の減少と、品物の積降時や待機時のアイドリングストップを可能とすることで、以下の効果を期待できる。

- ・ アイドリングストップおよび冷却効率の高効率化による、燃料消費量の削減

低減効果：10～25%(文献値)

- ・ CO<sub>2</sub>排出量の削減

低減効果：8.7～20%(文献値)

- ・ 冷却に氷スラリーを用いることによる、荷室温度の安定化
- ・ 冷凍システムのノンフロン化

c) 消火 火災現場における現状の消火は、大量の水を燃焼物体に放水する方法である。水による

消火機能は、燃焼物を冷却する方法である。水は熱容量が大きく、蒸発時の蒸発潜熱も大きいので強い冷却作用がある。また、水が燃焼物を包み込み酸素の供給を断つ効果もある。しかし、この方法は放水した水の大部分が流下・流出し燃焼物体に留まらないため、非効率な放水であるとともに、水損（器物の破損、階下への漏水）の影響が大きい。また、消火後の燃焼物体の温度が下がりきっていないときには、物体内部から燃焼ガスが発生して燃焼(再発火)する現象があるため、消火の確実性にも問題がある。そのため、各種の消火方法が検討されている。

消火のための方法を大別すると、冷却消火・窒息消火・除去消火・負触媒消火(抑制消火)などの方法があるが、氷スラリーを燃焼物に放水すると、氷粒子が対象物に付着して残ることになるので、付着氷による効率的冷却効果と積極的な窒息効果による消火が期待できる。また、燃焼物の周囲への類焼を防止するため、周囲の未燃焼物へ放水して氷粒子で表面を被覆しておくことで類焼を防ぐ除去消火法にもなる可能性がある。

図 3-21 に含水した氷微粒子を放射したストーブへの氷粒子の付着した状態を示す。氷粒子は縦面など構造体に沿った状態で被覆されている。図 3-22 に消火器の技術上の規格の省令で定められた 2 単位クリブ(3cm×3.5cm×90cm のスギ材 144 本の 26 段積みの井桁に組まれた 90cm 立方体)を利用した消火実験を示す(3-25)。170kg/min の氷粒子を 3min 噴射した実験結果であり、水同様の消火効果が示された。

d) アイスピグ(配管洗浄) 配管内を流れる氷スラリーはその物理的な洗浄性を持っている。配管中の氷微粒子は流動する液体の境界層内の壁面まで達することができるので、内壁面に付着している固着物に対してせん断力を作用させることができる。この現象は、排水管の管内洗浄法や、食品工場や医薬品工場の CIP 洗浄法などで、効果が期待できる。

老朽化が進んだ排水管の内面には多くの堆積物が付着している。管内を洗浄することは、本来の機能性確保や圧力損失の回復の点で重要である。従来の配管内の洗浄法としては、洗浄剤を利用した化学的な洗浄、ワイヤーブラシによる機械的洗浄、高圧水による洗浄、スポンジなどを利用するピグ洗浄などがある。しかし、いずれの方法も除去した付着物を完全には排出することができない。このときアイススラリーを管内に流すアイスピグ管内洗浄法では、塩水を基にした氷充填率の高い(80%前後)氷スラリーを配管に注入し、氷微粒子のせん断力による固着物(赤さび・汚れ等)の剥離とともに、流動する氷微粒子と水溶液の混合状態の氷スラリーにより排出が可能である。このことにより、管内面の管壁を傷めることなく洗浄し、複雑な配管径路に関係なく排出が可能である(3-26)。

アイスピグは、英国発祥の技術でまだ日本では導入から日が浅い一方、現状主な適用先である国内の水道管の総延長は 64 万kmを超え、水道管以外への適用も含め、今後の発展が見込まれる(3-27)。

アイスピグの主な特徴は以下のとおりである。

- ・複雑な配管形状にも対応できる
- ・配管詰まりが発生しない(仮に発生したとしても融けて解消される)
- ・無害
- ・配管を傷付ける事が無い
- ・長距離(最大 2 km)を短時間で洗浄可能(但し露出配管の場合は外気条件要注意)
- ・フラッシング時間が短くて済み(約 1.5 時間)、水の使用量が節約できる

e) 人工雪 Paul (2002) は氷スラリーが、室内スキー場のための優れた人工雪として利用できる可能性を指摘した(3-23)。従来の人工雪よりも良質な滑走面を、より省エネルギーで実現できるであろう。この技術を用いて、30,000 m<sup>2</sup> の屋内スキー場を建設する大型プロジェクトがドイツで進められている。建物の全ての冷熱需要(雪の製造から空調まで)がアイススラリープラントから提供されるようになる予定である。





図 3-21 氷粒子が付着したストーブの例(3-25)



図 3-22 2 単位クリブへの氷粒子による消火実験(3-25)

#### 参考文献

- (3-1) 漁船分野でのスラリーアイス製造装置 解説書：日新興業(株)(2009)
- (3-2) スラリーアイスとその冷却システム：日新興業(株),(2013)
- (3-3) IIF-IIR Handbook on Ice Slurries (2005), p. 302.
- (3-4) [http://www.epsltd.co.uk/files/slurry\\_rapidcooling.pdf](http://www.epsltd.co.uk/files/slurry_rapidcooling.pdf), 2014.10.19
- (3-5) 相川慶輔, 高効率な 0°C空調を実現した氷蓄熱システム, ヒートポンプとその応用, 67, 2005-7, pp. 52-53.
- (3-6) 塩尻一海, 雨宮満, 蓄熱装置による低温チルド水の供給 氷蓄熱システムを用いた実施例, 建築設備士, 2003-6, pp. 13-16.
- (3-7) 三戸大介, 万尾達徳, 本郷大, 若佐和夫, ダイナミック型氷蓄熱システムの食品冷却プロセスへの適用 一乳製品加工工場チルド水供給設備への導入一, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, F211, (2012,9,12-14, 札幌).
- (3-8) 株式会社ニッコー, ベジタブルアイスインジェクションシステム製品パンフレット, 2013.9
- (3-9) [http://www.epsltd.co.uk/files/slurry\\_rapidcooling.pdf](http://www.epsltd.co.uk/files/slurry_rapidcooling.pdf), 2014.10.19
- (3-10) Gladis, S. Ice Slurry Thermal Energy Storage for Cheese Process Cooling, ASHRAE Trans. Vol. 103, Part 2, 1997.

- (3-11) IIF-IIR Handbook on Ice Slurries (2005), pp. 306-308.
- (3-12) 漁業分野でのスラリーアイス製造装置 解説書：日新興業(株)(2009)
- (3-13) 宇野光世：平成 20 年度水産省エネルギー技術開発事業のうち水産技術実用化事業報告書,p16(2009)
- (3-14) 境港地区近海鮪漁業向けアルコールスラリーアイス鮪凍結システム提案書：日新興業(株),(2009)
- (3-15) 遠洋鮪はえ縄漁船アルコールスラリーによる新凍結システム概要：日新興業(株),(2010)
- (3-16) 宇野光世：平成 20 年度水産省エネルギー技術開発事業のうち水産技術実用化事業報告書,p15(2009)
- (3-17) 宇野光世：「海洋水産エンジニアリング」,91号,p54(2010)
- (3-18) 北海道教育委員会 学校給食衛生管理マニュアル p.120  
<http://www.dokyoi.pref.hokkaido.lg.jp/hk/ktk/kyusyoku/eiseikanri-m3.htm>
- (3-19) 中澤菜穂, 前田俊道, 福島英登, 和田律子, 田中竜介, 岡崎恵美子, 福田裕, 冷却速度が速ければ Cold Shortening は起こらない, 2014 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, D143, (2014.9.10- 13, 佐賀) .
- (3-20) Tassou, S.A., Chaer, I., Bellas, J., Terzis, G., Comparison of the performance of Ice Slurry and Traditional Primary and Secondary Refrigerants in Refrigerated Food Display Cabinet Cooling Coil, 4th IIR Workshop on Ice Slurries, pp. 87-95, 2001.
- (3-21) Lueders, D., Proc. 21th annual Meeting of the International Meeting of Ammonia Refrigeration, pp. 301-326, 1999.
- (3-22) Davies, T.W. and Lowes, A.R., A high efficiency refrigeration system, Proc. Conference on New Technologies in Commercial Refrigeration, IIR, Urbana, USA, pp. 93-100, 2002.
- (3-23) Paul, J., Innovative Application of Pumpable Ice Slurry, Presented before the Institute of Refrigeration at London, UK, 2002.
- (3-24) 安留哲, 物流用蓄熱式保冷システム, 冷凍, 2007.5, 38-43.
- (3-25) 松尾一哉, 遠藤浩司, 関光雄, 尾花秀晃, 森尻宏, 玉越孝一, 根本昌平, 飯田明彦：2006 年度冷空講論, A312, (2006)
- (3-26) アイスピグ研究会 HP : <http://www.icepig.org/> : (2015)
- (3-27) <http://www.jwrc-net.or.jp/hotnews/pdf/HotNews433.pdf>



## 4. 氷スラリーを利用すると何が優位か

### 4.1 氷スラリーの熱輸送性・伝熱特性と優位性

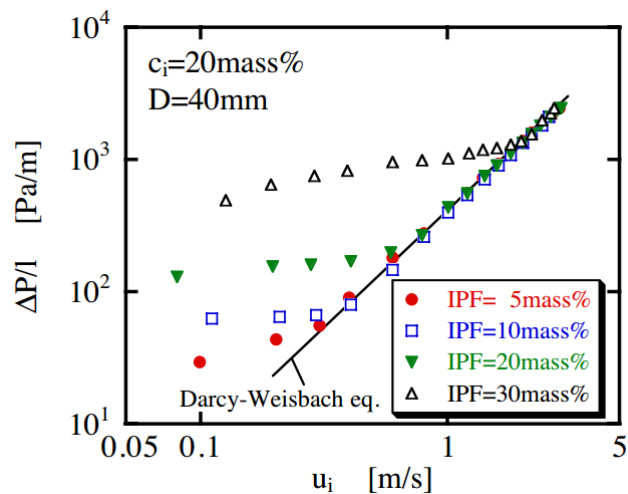
潜熱を有する氷粒子が水や水溶液の媒体に混入された氷スラリーを熱輸送媒体として利用する場合、高い熱輸送密度（単位流量あたりの輸送熱量）、優れた伝熱特性、温度維持性の観点で、水や水溶液単体を熱輸送媒体として利用する場合と比較して大きな優位性がある。ここではこれらの優位性について具体的な実験例や試算例に基づいて説明する。

#### 4.1.1 熱輸送特性の優位性

図 4-1 に、氷スラリーの流動特性の一例として、川南ら(4-1)が行った、水平円管内を流動する氷スラリーの管内流速と圧力損失の実験結果を示す。この実験では、エチレングリコール水溶液から生成した氷スラリーを用いている。なお、図中には、ダルシーワイスバッハの式およびブラジウスの管摩擦係数の式から求めた水溶液単相の圧力損失の値を示してある。ここで、 $c_i$ は IPF、 $D$ は円管直径を示している。図 4-1 から、管内流速が 0.2m/s 未満では、IPF の増加とともに圧力損失は大幅に増大するが、同一 IPF での管内流速と圧力損失の関係に着目すると、水溶液単相と同等の圧力損失になる管内流速が存在することがわかる。例えば IPF が 30% の場合では、管内流速が 1.0 m/s 未満での圧力損失は水溶液単相の場合と比較して著しく大きい、管内流速が約 2.0 m/s 以上になると、水溶液単相の場合と同等の圧力損失となることがわかる。

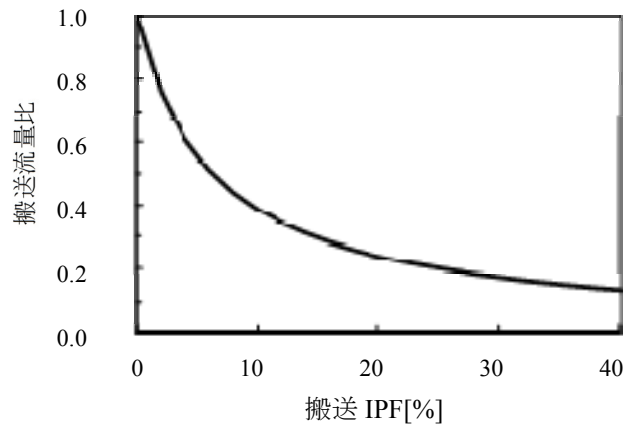
これは、氷粒子が浮力によって管上部に堆積するような低流速の流れでは、氷粒子と管壁との摩擦力の影響により圧力損失が増大し、流速が増加するに従い流れが均質浮遊流となるため、高流速域における圧力損失は、水溶液単相の値と同様の傾向を示す。なお、IPF の増加に伴いより高い流速域で勾配が変わる傾向が読み取れるが、これは、氷充填率が高いほど摺動流から浮遊流に遷移する流速が大きくなるためと考えられる(4-1)。

一方で、氷スラリーは、氷粒子の大きな潜熱を利用する潜熱輸送媒体として利用できるため、同一流量の水やブラインでの顕熱輸送に比べて大きな熱量輸送することができる。換言すると、単位熱量を輸送するための氷スラリーでの搬送流量は、水や水溶液単相の場合に比べて少ない。図 4-2 に、氷スラリーの搬送 IPF と搬送流量比を示す。ここでの搬送流量比は、単位熱量を輸送するために必要な水単相での流量と氷スラリーの流量の比である。なお、水単相と氷スラリーともに、顕熱利用温度差は 5℃とした。



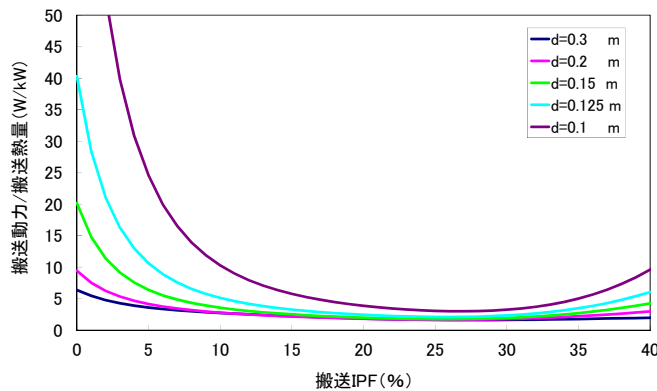
U<sub>i</sub>(横軸) : 管内を流れる氷スラリーの平均流速    ΔP/l(縦軸) : 単位長さあたりの圧力損失

図 4-1 水平円管内の氷スラリーの圧力損失(4-1)



搬送 IPF (横軸) : 搬送する氷スラリーに占める水の質量割合  
 搬送流量比 (縦軸) : 単位熱量を輸送するために必要な水単相での流量と氷スラリーの流量の比

図 4-2 搬送 IPF と搬送流量比



搬送 IPF (横軸) : 搬送する氷スラリーに占める水の質量割合  
 搬送動力/搬送熱量 (縦軸) : 単位搬送熱量あたりに必要なポンプ動力

図 4-3 搬送 IPF と単位搬送熱量あたりの搬送動力比

図 4-2 のように、搬送 IPF が増加するほど、水単相の場合と比較した単位輸送熱量あたりの氷スラリーの流量を低減でき、搬送 IPF が 15%以上では 1/3 以下に、搬送 IPF が 25%以上では 1/5 以下まで低減できる。すなわち、単位熱量を輸送するための氷スラリーの搬送動力は、水溶液単相の場合と比較して低減できることになる。

図 4-1 で示した氷スラリーの流速と圧力損失の関係の試算例と、図 4-2 に示した氷スラリーの熱輸送特性を考慮して試算した、搬送 IPF と単位搬送熱量あたりの搬送動力の試算結果を図 4-3 に示す。図中の  $d$  は管直径を示している。試算条件を表 4-1 に示す。この試算では、搬送熱量が 1.3MW 一定で、直管相当長さが 400m(往管 200m, 還管 200m)のループ配管を計算対象とした。ここでは、顕熱利用温度差を 5.0°Cとして、まず搬送熱量と搬送 IPF から搬送体積流量を求め、種々の配管径について氷スラリーの往管(熱利用端までの距離 200m)と水単相の還管(200m)の圧力損失からループ配管全体の圧力損失求めた。次に搬送体積流量と圧力損失、およびポンプ効率とモーター効率から搬送動力を算出した。

表 4-1 試算条件

搬送熱量	kW	1300
搬送 IPF	wt%	0~40
顕熱利用温度差	℃	5.0
相当配管長	m	往：200 還：200
高低差	m	10
配管径	m	0.1~0.3

図 4-3 のように、当然のことながら同一の搬送 IPF では配管径が大きいほど搬送動力は低減できる。また、何れの搬送配管口径についても、搬送 IPF が約 27% で搬送動力が最小となり、そこでの搬送動力は水単相と比較して大幅に低減できる。例えば、搬送配管口径  $d=0.15\text{m}$  の搬送動力は、搬送 IPF が 27% の場合では  $1.8\text{W/kW}$  であり、水単相（搬送 IPF が 0%）の場合の約  $20\text{W/kW}$  と比較して、1/10 以下まで圧倒的に低減できることがわかる。

さらに着目すべき点として、同一の搬送 IPF での配管径の違いによる搬送動力の差が、搬送 IPF が大きくなるほど小さくなっていることである。例えば配管口径  $d$  を  $0.15\text{m}$  から  $0.1\text{m}$  に縮小すると、搬送 IPF が 10% の場合では、搬送動力は  $3.6\text{W/kW}$  から  $10.3\text{W/kW}$  へと  $6.7\text{W/kW}$  増大するが、搬送 IPF が 20% 以上の場合では、搬送動力の増加は  $2\text{W/kW}$  以下となる。このように、単位搬送熱量あたりの搬送動力に及ぼす配管口径の影響は、最適搬送 IPF までは搬送 IPF が大きくなるほど小さくなることわかる。

ここまで説明してきた熱搬送媒体として利用する氷スラリーの熱輸送特性としての優位性をまとめると、以下ようになる。

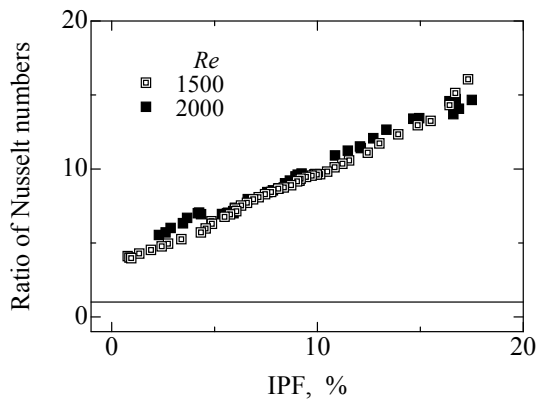
- ① 搬送配管内での圧力損失は、管内流速が大きいほど水や水溶液単相の場合との差異が小さくなる。
- ② 搬送 IPF が大きいほど、搬送流量を低減できる。
- ③ 単位熱量を輸送するために要する搬送動力が最小となる搬送 IPF の最適値が存在し、水や水溶液単相の場合と比較して圧倒的に低減できる。
- ④ 最適搬送 IPF までは、搬送 IPF が大きいほど搬送動力に及ぼす配管口径の影響が小さい。

#### 4.1.2 伝熱特性の優位性

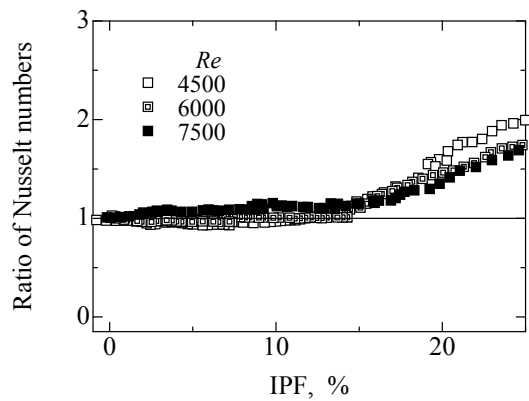
図 4-4(a), (b) に Kumano ら(4-2)が行った氷スラリーの水平円管内熱伝達の実験結果として、IPF と  $Nu$  数比（水溶液単体での理論値と熱伝達率の測定結果から算出した  $Nu$  数の比）を示す。この実験では、エタノール水溶液から生成した氷スラリーを用いている。なお、 $Nu$  数は、管内径  $d[\text{m}]$ 、熱伝導率  $\lambda[\text{kW}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 、熱伝達率  $h[\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$  を用いて、式(4-1)で表すことができることから、管内径  $d$  が一定での実験結果を示す図 4-4 では、 $Nu$  数比が大きいほど、エタノール水溶液単相と比較した氷スラリーの熱伝達率が大きいことになる。

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad (4-1)$$

図 4-4(a) のように  $Re \leq 2000$  で管内の氷スラリーの流動が層流状態では、IPF の増加とともに  $Nu$  数比が増大し、IPF が約 15% 以上での  $Nu$  数比は 10 以上になっている。つまり、流動が層流状態の IPF 15% 以上の氷スラリーの熱伝達率は、エタノール水溶液単相の場合と比較して 10 倍以上大きいことがわかる。



(a)  $Re=1500, 2000$

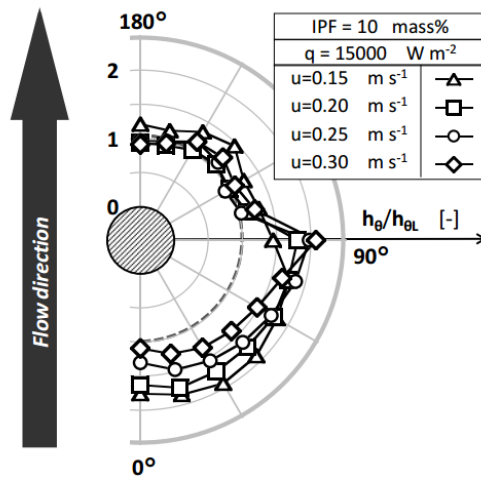


(b)  $Re=4500, 6000, 7500$

IPF (横軸) : 管内を流れる氷スラリー中の氷の質量割合

$Nu$  数比 (縦軸) : 氷スラリーの熱伝達率と水溶液単体での熱伝達率の比

図 4-4 水平円管内での IPF と  $Nu$  数(4-2)



$h/h_L$  : 水溶液単体での局所熱伝達率  $h_L$  と氷スラリーの場合での局所熱伝達率  $h$  の比

図 4-5 円管表面での氷スラリーの伝熱促進率(4-3)

また、図 4-4(b)のように  $Re \geq 4500$  で管内の氷スラリーの流動が乱流状態では、IPF が約 15%までは、 $Nu$  数比は概ね 1 であり、IPF が約 15%以上で  $Nu$  数比が増大している。特に IPF が約 20%以上での  $Nu$  数比は 1.5~2 程度まで増大している。これは、IPF の増加に伴い、氷スラリーの見かけの粘度が増加し、層流状態に移行することによって生じた現象と考えられる。

このように、エタノール水溶液単相の場合と比較した氷スラリーの熱伝達率は、流動が層流状態では大幅に向上し、流動が乱流状態においては、単相流と大きな違いは見られないことがわかる。

図 4-5 には、富樫ら(4-3)が行った、水平加熱円管周りを流れる氷スラリーの強制対流熱伝達の実験結果として、円管表面の伝熱促進率  $h/h_L$  (水溶液単体での局所熱伝達率  $h_L$  と氷スラリーの場合での局所熱伝達率  $h$  の比)を示す。図 4-5 のように、 $\theta = 0^\circ$ から  $90^\circ$ までの円管前方で熱伝達が促進され、 $\theta$  が  $90^\circ$ 近傍での熱伝達率は水溶液単体と比較して、1.5~2 倍程度促進されている。

以上のような、水平円管内や水平円管周りの氷スラリーの熱伝達特性から、例えばシェル&チューブ型の熱交換器の冷却媒体として氷スラリーの利用を想定すると、氷スラリーを熱交換器のチューブ（管）側に流す場合とシェル（胴）側に流す場合の何れについても、熱交換性能を高めることができることになる。

ここで、氷スラリーの熱交換器内での温度変化に着目すると、氷スラリーは、氷の融解潜熱で被冷却流体を冷却するため、熱交換器の入口から出口までの熱交換過程での温度変化が小さい温度維持性を有している。この温度維持性は熱交換器の小型化や交換熱量増大に寄与できる。熱交換器の交換熱量  $Q$  [kW]は式(4-2)で表すことができ伝熱面積  $A$  [m<sup>2</sup>]が一定の場合、交換熱量は、熱通過率(熱貫流率) $K$ [kW/(m<sup>2</sup>K)]と平均温度差 $\Delta T$  [K]の積に比例して増加する。

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T \quad (4-2)$$

例えば前述のようなシェル&チューブ型の熱交換器を水-水熱交換器の形態で使用し、一次側冷却媒体の顕熱変化量が 5°C (0°C→5°C)、二次側被冷却媒体との顕熱変化量が 5°C (10°C→5°C) の場合、熱交換時の平均温度差を 5°C とした場合の $\Delta T$  は 5°C となる。このシェル&チューブ型の熱交換器の一次側冷却流体として 0°Cの氷水スラリーを導入する場合を考えると、熱交換器内での氷水スラリーの温度が 0°Cで一定となるため、 $\Delta T$  は 7.5°Cとなり、式(4-2)での $\Delta T$  は 1.5 倍増加する。

また、式(4-2)の熱通過率  $K$  は、一次側冷却媒体と二次側冷却媒体の熱伝達率  $h_1$ [kW/(m<sup>2</sup>K)],  $h_2$ [kW/(m<sup>2</sup>K)], およびチューブの肉厚と熱伝導率  $\delta$ [m],  $\lambda$ [kW/mK]を用いて式(4-3)で表すことができる。

$$K = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right)^{-1} \quad (4-3)$$

ここで、上記の水-水熱交換器の形態でのシェル&チューブ型の熱交換器の利用において、 $h_1$  と  $h_2$  が同程度の大きさと仮定すると、IPF20%以上の氷スラリーを一次側冷却流体として利用することで、図 4-4(b)で説明したように  $h_1$  が 2 倍程度大きくなり、式(4-3)から熱通過率  $K$  は約 1.3 倍になる。

このような一次側冷却流体への氷スラリー利用による 1.5 倍の平均温度差の拡大と、1.3 倍の熱通過率の向上から、式(4-2)で表されるように、同一熱交換器で一次側冷却流体が水の場合と比較して、約 2 倍の交換熱量が得られることになる。また、交換熱量一定では伝熱面積（熱交換器の大きさ）を約 1/2 まで低減できることになる。

以上のように、円管内や円管周りでの氷スラリーの強制対流熱伝達の実験結果や熱交換過程での温度維持性から、熱交換器での冷却媒体として氷スラリーを直接利用することで、ブラインや水などの液単相の冷却媒体と比較して、優れた熱交換器の性能が得られることがわかる。

#### 4.1.3 新規設備と既存設備で得られる効果の違い

ここでは、前述した氷スラリーの流動・伝熱特性の優位性の活用方法は、導入対象が新規設備と既設設備の場合で異なることになる。ここでは、新規設備と既存設備に氷スラリーを導入する場合に分けて、その熱輸送・伝熱特性の活用について説明する。

新たに氷スラリーを熱搬送媒体として利用する設備を構築する場合は、下に記す効果が期待できる。

##### ①熱搬送動力の大幅な低減と搬送配管の小口径化

図 4-3 で説明したように、最適搬送 IPF までは氷スラリーの搬送 IPF が大きくなるほど、単位熱輸送量あたりの搬送動力が低下し、また単位熱輸送量あたりの搬送動力におよぼす配管口径の影響が小さくなる。図 4-3 の試算結果に基づくと、例えば氷スラリーの搬送 IPF を約 20%以上で設計すれば、



搬送動力を大幅に低減できるとともに、わずかな搬送動力増加の許容で搬送配管の大幅な小口径化が実現できることになる。

## ②熱利用機器の小型化

前述のように、氷スラリーの熱伝達率は水やブライン単体と比較して高く、また氷スラリーの温度維持性によって熱交換器での二次側被冷却流体との平均温度差を拡大できることから、所定の交換熱量に対して熱交換器を大幅に小型化できる。

このように新規設備への氷スラリーの導入では、従来の水やブラインを熱媒体として利用する設備と比較して、熱搬送設備（ポンプ、配管）や小容量化や熱交換機器の小型化を実現する設備を構築することができる。

既存の設備の熱搬送媒体に氷スラリー導入する場合には、下に記す効果が期待できる。

### ①熱輸送量の増強

前述のように、氷スラリーの単位流量あたりの熱輸送量は、水やブライン単相の場合と比較して大幅に多く、また搬送 IPF に応じた適切な配管流速を維持できるように氷スラリーの搬送流量を設計することで、搬送動力（ポンプ動力）を増大させることなく、設備容量を増強できる。

### ②熱利用端での交換熱量の増強

前述のように、氷スラリーの熱伝達率は水やブライン単体と比較して高く、また氷スラリーの温度維持性によって熱交換器での二次側被冷却流体との平均温度差を拡大できることから、既存熱交換器の伝熱性能が大幅に向上して、交換熱量を増強することができる。

このような既存設備への氷スラリー導入効果によって、設備運用の経年的な変化で設備負荷が増大した場合などには、主には熱源機容量の増強のみで、既設の熱搬送設備（ポンプ、配管）や熱交換機器の大幅な更新を要することなく、設備容量を増強することができる。

## 4.2 氷スラリーによる一定温度維持特性による優位性

### 4.2.1 一定温度維持特性のための氷スラリーの仕様の決め方

上述したような氷スラリーの温度維持性は、高密度熱輸送媒体としての熱交換特性である。しかし、氷スラリーの基本特性は、混在する氷粒子の示す潜熱交換特性である。熱交換器の小型化や交換熱量の増大に寄与するだけでなく、混在する氷粒子が融解するときの融解潜熱による「一定温度での熱交換」の一定温度維持特性が、対象商品の品質改善に活用できる場合がある。

例えばビール等醸造製品の醸造過程での発酵熱除去や、熟成過程での低温維持のために冷却を行う場合、低温発酵や低温熟成での温度一定性が商品の品質に著しく影響するため、冷却流体として温度維持性を有する氷スラリーを利用することで、商品の品質向上や、品質向上のための設備構築と運用のコスト低減に繋がる可能性がある。

ここでは、このような温度維持性を応用して活用する氷スラリーの利用方法での氷スラリーの搬送 IPF と搬送流量の決定方法について概説する。

まず、氷スラリーとして熱交換過程に搬送する、氷のみの流量を決定する。

氷スラリーの温度維持性を利用するためには、熱交換過程において氷スラリーに含まれる氷の全てが融解した後の顕熱は利用できない。したがって、熱交換過程に搬送する氷スラリー中の氷の質量流量  $G_i$  [kg/min] は、交換熱量  $Q$  [kW] が決まれば融解潜熱  $L$  [kJ/kg] を用いて式(4-4)で決定できる。ただし、実運用では、搬送配管表面からの熱流入や配管圧力損失による熱損失は生じるため、それらを適切に見積もった上で交換熱量  $Q$  に加える必要がある。

$$G_i = 60 \frac{Q}{L} \quad (4-4)$$

この氷スラリー中の氷の質量流量 $G_i$ が決まれば、図4-3に示したような搬送IPFの最適値 $IPF_{opt}[\%]$ から搬送流量 $G_s[\text{kg}/\text{min}]$ は式(4-5)で求めることができる。

$$G_s = \frac{G_i}{IPF_{opt}/100} \quad (4-5)$$

例えば熱損失を含む交換熱量 $Q$ が2,000kWの場合、氷の融解潜熱 $L$ を333kJ/kgとすると、氷のみの流量 $Q_i$ は式(4-4)から360kg/minとなる。このとき $IPF_{opt}$ を25%とすると搬送流量 $G_s$ は、式(4-5)から1,440kg/minとして求めることができる。

以上のように、商品の品質向上のために氷スラリーの温度維持性を応用する場合には、氷スラリーの搬送IPFを最適設定し搬送流量を最小化することで、商品の品質向上だけでなく設備運用コストを低減できる冷却システムを構築できる。

#### 4.2.2 一定温度維持特性の応用分野

a)醸造分野 醸造とは、発酵作用を利用してアルコール飲料（酒類）やその他の食品（醤油・味噌・お酢など）を製造することをいう。また、醸造の生化学的な作用が研究され、様々な応用技術が開発され、医学や食品の製造・加工（発酵食品/加工食品）で幅広く活用されているようである。

酒類は糖類を含んでいるワインのような果汁に酵母を添加して発酵・熟成させる直接醸造法と、清酒やビールのように原料となる米や麦芽を一度糖化させてから酵母を加えて発酵させる糖化醸造法などにより製造される。

発酵させるときの環境温度は酒類により異なる。清酒は6～15℃、焼酎は25～30℃、赤ワインは20～27℃、白ワインは12～18℃、ウイスキーは25～33℃、日本のビール（下面発酵ビール）は5～10℃、イギリスやドイツに見られるビール（上面発酵ビール）は15～20℃である。氷スラリーの利用は、発酵や熟成温度の低い清酒や下面発酵ビールなどが対象となるが、ここでは、ラガービールの製造工程での利用について記述する。

ビールの発酵方法は、使用する酵母の種類により、上面発酵、下面発酵、自然発酵に分けることができる。上面発酵ビールは、発酵がすすむと泡とともに液面に酵母が浮かび上がる性質の酵母を使用し、常温に近い温度（15～20℃）で発酵させ、糖分がアルコールと炭酸ガスに分解されて、苦みと香りの強いビールを造る。この方法は、古くから利用されている発酵方法である。一方、下面発酵ビールは、発酵が進むにしたがって酵母が沈下していくタイプのもので、比較的低温（5～10℃）で7～10日程度かけて発酵させる。発酵後のビールは若ビールと呼ばれるが、この中にはジアセチル前駆体、アセトアルデヒド、硫化水素などの未熟性物質が含まれている。そのため、さらに低温の状態、5℃程度の温度から最終的には-2℃程度まで、種類によって異なるが2週間から半年ほどかけてゆっくりと温度変化をさせて熟成させ完成させる。この熟成過程で残存物質のさらなる発酵が進み、これらの物質が分解され、発酵時に発生する炭酸ガスによって液外に運び出される。ビールの混濁の原因となるタンパク質は、温度を0℃前後にすることにより析出させ、一部の酵母と共に沈降する。このように発酵時間を長くして熟成の終了したビールは、香りが弱めで、すっきりした味が穏やかなものを造ることができる。低温技術が発達してくると、温度管理によるビールの品質の安定化が可能で大量に製造できるようになり、世界の主流となった製造方法である(4-4, 4-5, 4-6, 4-7)。

この醸造過程では10%前後の初期糖分割合を3%前後まで発酵によって低下させるのが発酵過程である。その期間とこの糖度の変化量により発酵熱量がきまるが、この発酵熱の冷却除去を通して安定した温度管理を行い、約85%分の発酵性糖分が変化したことになる。残りの15%の発酵性糖分は、糖分割合3%を2%程度まで熟成過程で低下させて発酵は終了する。発酵糖分量と熟成期間により熟成時の発酵熱量は決まるが、熟成過程の発酵熱量は発酵過程の1/10程度であるが、熟成過程では、長期間の変化の少ない熟成温度の制御が重要である。

表 4-2 スケートと氷の間の動摩擦係数  $\mu_k$  (4-8) : 初速 1.5m/s

場所 温度	-0.5 °C	-2 °C	-5 °C	-10 °C
たての海	0.0031	0.0042	0.0066	0.0102
瑞浪リンク	0.0078	0.0042	0.0066	0.0102

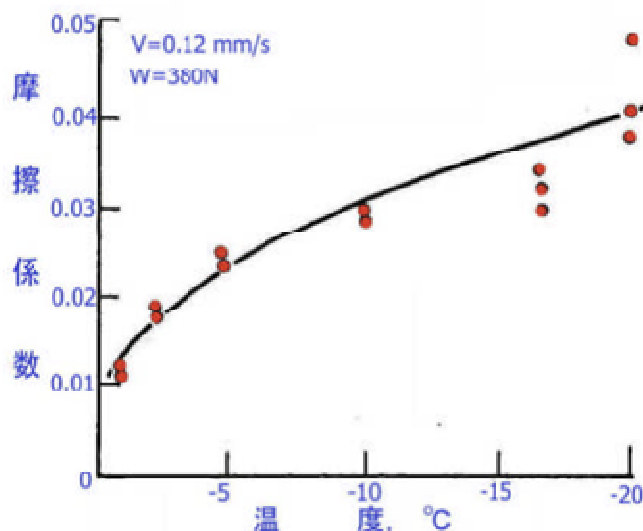


図 4-6 低速度摩擦における氷温度の効果

醸造過程における温度管理とビールの品質は密接な相関があり，毎日のビールの品質状態をみて，醸造過程での発酵熱除去や，熟成過程での熟成温度制御を実施している．このように低温発酵や低温熟成の温度が品質に顕著な影響がある場合には，氷スラリーの一定温度維持特性は，ビールや清酒などの品質向上に寄与できるものと考えられる．さらに氷スラリーは，高密度輸送媒体なので，設備コストや運用コストの低減が可能となる．

b)アイススケートリンク アイススケートリンクにおけるスケートと氷の摩擦係数は，金属などの摩擦係数 0.5 程度の値に比べ，0.005 程度である．地球上の固体物質間の摩擦としては，最も小さい．スケートが何故滑るかという問題は，諸説ある．圧力融解・水潤滑説，摩擦融解・水潤滑説，水蒸気潤滑説，水分子回転説，藤岡の低温癒着説，疑似液体膜潤滑説，そして，単結晶氷の摩擦の異方性の定量的説明のために導入された凝着説(adhesion theory)などであるが，明確にはなっていない．

しかし，アイススケートリンクの氷温度は滑走性能に強く影響することが知られている．測定条件で滑走性能は変化するので，相対的な実験条件を合わせたスケートと氷の間の動摩擦係数の実験結果を二例示す．

表 4-2 には，競技用スケートをカタパルト装置から氷のリンクに 1.4m/s で発射させて動摩擦係数を求めたものである．また，図 4-6 には，一本刃のスケートをステンレスワイヤで 0.12mm/s の速度で引っ張り，ロードセルでワイヤにかかる力を測定したもので，低速度摩擦における氷温度の影響を動摩擦係数で整理したものである．ともに，氷の温度が高くなるほど動摩擦係数が極端に小さくなる現象が現れている．(4-9)

スピードスケート・アイスホッケー・フィギュアスケート・ショートトラック・ボブスレー・リュージュ・カーリングなどの競技の場合，その競技により氷温をその競技に合わせた適温とする．アイ

スホッケーなどは氷が削られないように、特に滑走性にこだわらないので比較的低い温度とする。また、スピードスケートなどの滑走性を第一にする競技では、氷温度は高めに設定する。

温度が1℃異なると動摩擦係数が極端に変化することを上図に示したが、氷温度をその競技に適した温度に均一にすることは、競技の公平性から重要なことである。通常のラインを利用した冷却システムでは、どうしても氷温の微妙な温度差は発生してしまうことになるものとする。氷スラリーの一定温度維持特性による冷却効果は、その競技の公平性に大きく寄与するものとする。

レジャー施設の屋外スケートリンクにおいて、日射などが当たる場所があって氷が融解している場所もあるが、逆に日陰で氷温度は低くなる場合などもあり、リンク全体で見ると、場合により氷上に氷が発生していることがある。このような熱負荷が偏在するような場合でも、氷スラリーを熱媒体として利用する場合は、広いリンク全体を均一の氷温度にでき、融解するような場所がない快適な遊戯施設を提供できる。氷スラリーの持つ一定温度維持と高密度輸送媒体という特性により設備コスト、運用コスト低減が可能である。

c)食物の低温熟成(4-10, 4-11, 4-12) 魚介類や肉、野菜、果実などの生きた細胞をもつ食物は、0℃前後の温度から氷点下のその食物の凍結する温度直前の温度環境に保持すると、凍結の危険から身を守るために、低温ストレスに対する生体反応として、タンパク質や多糖類の分解現象が起こり、タンパク質はアミノ酸になり、デンプンは糖に変化して、食物の旨味、甘味成分であるアミノ酸やブドウ糖、果糖などが増加する。このようなプロセスを「低温熟成」という。

特に 0℃～氷点下の凍結温度までの温度帯を「氷温」といい、食物をこの温度環境に長時間保持して旨味を引き出す「氷温熟成」というプロセスが広く普及しだしている。(4-10, 4-11)

梨、柿、ブドウなどの農産物を氷温貯蔵することにより、とれたての鮮度とおいしさを長期間保つことができる。氷温熟成米では、脂肪の酸化が抑えられ、糖質量が増加し、アミノ酸が増加して、旨味や甘味が増した貯蔵米になる。ホッケ、サンマなどの水産物では氷温乾燥することにより、旨味であるイノシン酸などが増加する。牛肉、豚肉などの肉類は、ドライエイジング（乾燥熟成）やウェットエイジングにより熟成され、肉中にある酵素などの働きでタンパク質をアミノ酸やペプチドに変化させ、旨味が増すとともに、肉が柔らかくなる。パン、納豆や漬け物などでは氷温発酵をおこなうと、例えばパン生地では、もっちりした食感と小麦の美味しさが引き立つと言われている。

このような凍結の危険性がある凍結直前の温度に長期間温度変化なく維持することに対して、氷スラリーの一定温度維持特性は、十分利用できる。凍結の心配のない安定した一定温度状態で、食物の旨味などの官能品質の向上に寄与し、しかも氷スラリーの高密度輸送媒体という特性による設備コスト、運用コスト低減が可能である。

### 4.3 その他の氷スラリーの特性と優位性

#### 4.3.1 氷粒子の付着性と産業利用システム

氷スラリーを高密度熱輸送し熱交換利用するとき、氷スラリーを対象物に供給して直接接触させると、熱交換器を介しての熱交換とは違う機能が発生する。

自然界における氷点下の水分を含まない乾き雪は、交通標識への着雪、電線着雪、アンテナ着雪など、乾き雪が対象物へよく付着する災害現象である。また、水分を含む湿り雪では、さらに付着性が高まることが知られている。この湿り雪の付着性は、氷と固体表面の接触部に介在する水膜による毛管負圧(=水の表面張力/水膜の曲率半径)によるもので、接着剤のように作用すると考えられている(4-13)。

氷スラリーも、氷粒子間に水または水溶液があると湿り雪のように付着性が作用すると考えられるので、このような氷粒子の付着性と各種産業で利用するシステムについて、以下に、その一例を示す。

a) 食品や水産物などへの氷スラリーの利用 加熱加工、加熱殺菌など高温になった製造食品類には、微生物の増殖防止(静菌)や急速冷却などによる保存性の向上、消費期限の延長、生産量の増加な

どの目的のために氷スラリーを利用する。また、設備的には氷スラリーの高密度熱輸送による搬送動力削減での電気代、水道代の削減ができる。さらに、氷スラリーの一定温度維持特性は、負荷変動に対応でき最大負荷に合わせなくても良いので、過剰設備が不要となる等の効果もある。

食品加工や水産物加工などで労働環境や経済性の点で環境の低温化ができないことが多い。このようにときに、氷スラリーを直接対象物に供給することにより氷粒子が対象物に付着することで、対象物の周囲は氷粒子で覆われることになる。この氷粒子の被覆性により、対象物の低温化が可能となる。

氷スラリーは氷粒子と水または水溶液の混合している冷熱媒体である。対象物に氷スラリーを接触させると、氷粒子は対象物に水分を介して付着する性質がある。一方、穴あきトレーに対象物を入れた場合には、液体のみが穴から流下する。このことにより、対象物には氷粒子とわずかな水分だけが残ることになる。このように氷スラリーによる対象物の直接冷却により、対象物周りだけが低温環境に保持されることで、対象物の環境低温化ができると共に、労働環境の低温化による労働性の低下も防止できる。

野菜・果実や魚介類、切り花などでは、収穫後の初期状態から急激に化学的に細胞状態が変化して劣化が始まる。この劣化を防止するためには対象物を凍結直前の低温状態にすることで、化学反応の抑制をすることが重要である。生きている野菜類では、呼吸代謝が抑制され、魚や肉などの場合には、生体反応の酵素類の働きが抑制される。氷スラリーは、対象物に直接接触させることにより、凍結直前の低温状態にすることが簡単にできるという性質を持つ。上記に示したように対象物に氷スラリーを直接供給すると、対象物周囲が氷粒子層で覆われるので、急速冷却して、しかも凍結直前の温度環境下に対象物を維持できる。また、氷粒子層内には水分が含まれるため高湿度環境にもあり対象物の水分量の低下も防止できる。このことにより得られる最大の効果は、対象物の高鮮度維持である。

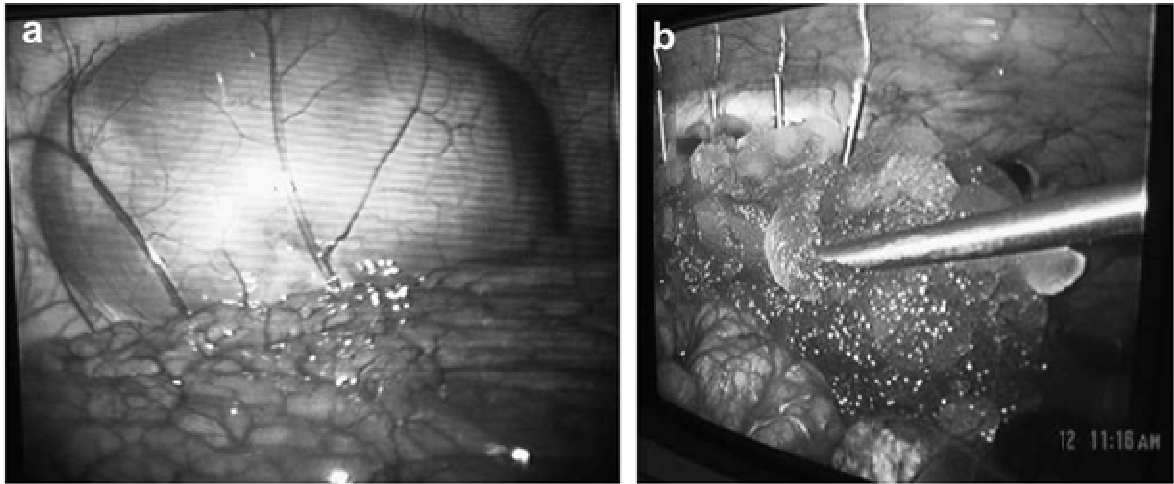
また、氷粒子層で包まれた対象物の環境は、氷粒子の示す温度であることが明確であるため、収穫場所から消費場所までの本質的な「コールドチェーンの見える化」が実現できる。通常のコールドチェーンでは、対象物の環境は空気環境であるため、空気環境と対象物の保持温度とは直接的には関係しない。そのため、対象物の温度記録をすることにより品質保持を実施している。氷スラリーによるコールドチェーンでは、対象物に氷粒子層が残存していれば、対象物表面温度は概ね 0℃に維持されているので、対象物のコールドチェーンが実現できているのは一目瞭然であり、本質的な品質保持が可能である。この氷スラリーを利用したコールドチェーンは、熱交換特性、動力削減性などと共に、食の安全を消費者に届ける必要のある産業の根幹となる低温での一定温度維持管理という本質的改善に寄与できる。

b) 生体・医療への氷スラリーの利用 生体は 70%前後の水分から成り立っている。水分の凍結しない状態、すなわち低温の状態に維持できると、低温体麻酔などに利用できる。体温を 20℃以下に低下させることにより生体の代謝を減少させ、手術にともなう低酸素症への耐性を増加させることができる。このことにより、心臓や脳などの臓器の手術時の血流遮断に耐えられるようにできる。

低温保存では、生体細胞や組織、臓器などを約 4℃の状態 で保存する単純低温保存と、臓器を約 4～7℃にして栄養素や酸素を供給して代謝を維持する低温灌流保存などの方法がある(4-14)。

氷スラリーの医療分野への応用として、心停止時の脳と心臓の保護、腎臓の腹腔鏡手術中での保護、心臓手術、脊髄や脳細胞の損傷の最小化、および移植手術での臓器回復の向上などを目的とした、氷スラリーによる臓器冷却に関する研究(4-15)が行われている。ここでは、具体的事例として腎臓手術への応用について説明する。

腎臓の手術では、手術中の出血量を最小化するために、腎臓の動脈と静脈を器具で挟むことで腎臓に流入する血液を遮断する。この血流の遮断を 30 分以上行くと虚血による腎臓の損傷が生じることになる。氷を用いた冷却による低温療法では、腎臓の損傷低減と 30 分を超える手術時間の拡大が可能となる。



(a)氷スラリーで覆う前 (b)氷スラリーによる外表面冷却後  
 図 4-7 腎臓の内視鏡写真(4-15)

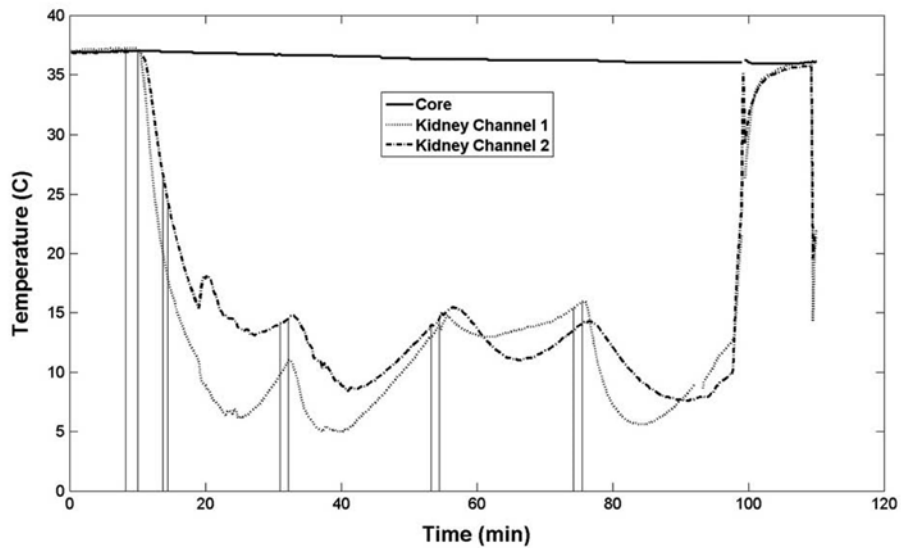


図 4-8 90 分間の手術中での腎臓の温度変化(4-15)

図 4-7 に腹腔鏡手術中での氷スラリーによる腎臓の冷却状況の写真を示す。図 4-7(a), (b)はそれぞれ、氷スラリーで覆う前と外表面を氷スラリーで覆った後の腎臓の写真を示す。また、図 4-3-2 に氷スラリーを用いて冷却する手術中の腎臓温度の時間変化を示す。図 4-7(b) のように腎臓表面を氷スラリーで覆うことで、図 4-8 のように腎臓が急激に冷却され 90 分以上 15°C 以下に保たれている。

c) 消火への氷スラリーの利用 氷粒子の付着性は、火災の消火へも利用可能である。火災現場における現状の消火は、大量の水を燃焼物体に放水する方法であるが、水は火災対象物から流下して持続的効果がない。一方、氷粒子は火災対象物に付着するので、そこにとどまり、まったく異なる消火の機能を発揮する。

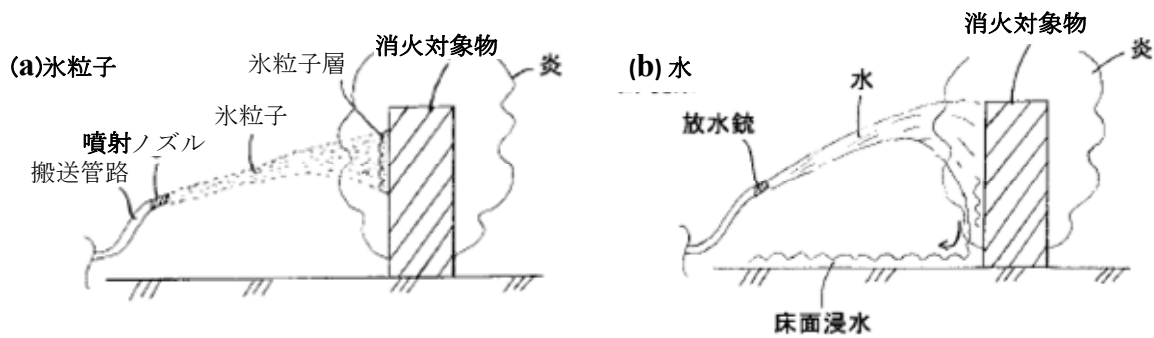


図 4-9 氷粒子と水による消火法のイメージ比較 (4-16)

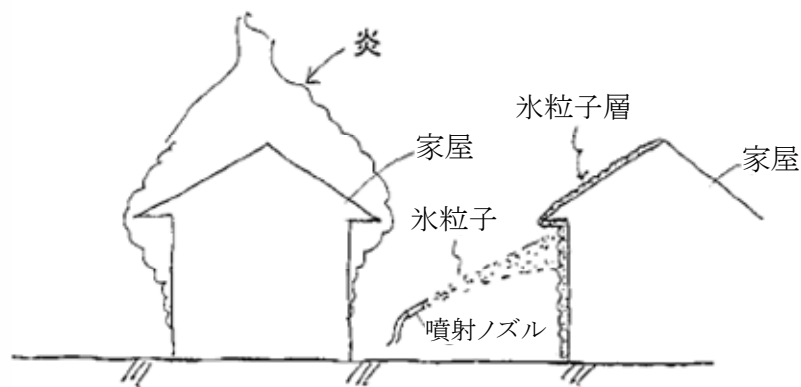


図 4-10 壁面に付着した氷粒子層による延焼防止(4-16)

水による消火機能は、燃焼物を冷却する方法である。水は熱容量が大きいので、蒸発時の蒸発潜熱も大きく、強い冷却作用がある。また、水が燃焼物を包み込み酸素の供給を断つ効果もある。しかし、この方法は放水した水の大分が流下・流出し燃焼物体に留まらないため、非効率な放水であるとともに、水損（器物の破損、階下への漏水）の影響が大きい。また、消火後の燃焼物体の温度が下がりがきっていないときには、物体内部から燃焼ガスが発生して燃焼(再発火)する現象があるため、消火の確実性にも問題がある。

図 4-9 に従来の水による消火と氷粒子による消火のイメージ図を示す。氷粒子が対象物に付着して残ることになるので、氷粒子層による効率的な冷却効果と積極的な窒息効果による消火が期待できる。また、燃焼物の周囲への類焼を防ぐため、図 4-10 に示すように、周囲の未燃焼物へ放水して氷粒子で表面を被覆しておくことで類焼を防ぐ除去消火法にもなる可能性がある。(4-16)

図 4-11 に井桁に組まれた木材(0.5 単位クリブ)の燃焼状態と、その後に 1 分 30 秒氷粒子を噴射した消火状態を示す。井桁に組まれた内部への氷粒子の到達し、消火後に氷粒子層が木材表面に残っていることが確認できる(4-17)。

氷スラリーの付着性の利用法として、前述の a)食品や水産物や b) 生体・医療などへの氷スラリーの利用に示したように直接接触させることにより、このような産業利用が可能になる。

#### 4.3.2 氷粒子による壁面固着物の洗浄性と産業利用システム

配管内を流れる氷スラリーは、その固体としての氷粒子の流動運動による物理的な作用が期待できる。氷スラリーの IPF を増加させていくと、配管中の氷粒子は流動する液体の境界層内の管壁面まで達することができるので、内壁面に付着している固着物に対してせん断力を作用させることができる。この現象は、排水管の管内洗浄法や、食品工場や医薬品工場の CIP 洗浄法などで、効果が期待できる。





図 4-11 0.5 単位クリブの燃焼実験(左図)と消火後のクリブへの氷粒子層の残留状態(4-17)

a) アイスピグ洗浄 老朽化が進んだ排水管の内面には多くの堆積物や赤さびが付着している。排水管内を洗浄することは、本来の機能性確保や圧力損失の回復の点で重要である。従来の配管内の洗浄法としては、洗浄剤を利用した化学的な洗浄、ワイヤーブラシによる機械的洗浄、高圧水による洗浄、スポンジなどを利用するピグ洗浄などがある。しかし、いずれの方法も除去した付着物を完全には排出することができない。このときアイスラリーを管内に流すアイスピグ管内洗浄法では、氷粒子のせん断力による固着物の剥離を行うとともに、流動する氷粒子と水溶液の混合状態のアイスラリーにより固着物の排出が可能である。このことにより、管内面の管壁を傷めることなく洗浄し、複雑な配管径路に関係なく排出が可能である(4-18)。図 4-12 に伊賀市での水道配水管の洗浄状態を示す。最初は赤さびを含む赤褐色の氷ラリーが排出されるが、徐々に白色に変化していく様子が観察された(4-19)。

b) CIP 洗浄 食品工場や医薬品工場などでは、その製造設備の衛生管理上、品質管理上、常に配管内を清潔に保つことが義務づけられ、定期的に配管を分解して管内面を清浄に保つ COP 洗浄 (Cleaning Out Place ; 分解洗浄)がおこなわれている。近年では配管やタンク類を分解しないで、洗浄溶液を管内に流すことにより内部を洗浄する CIP 洗浄法(Cleaning In Place ; 定置洗浄)が行われる。設備の分解、再組み立てをする必要がないので経済的メリットの大きい方法である。しかし、この方法は化学的な洗浄方法で、水洗浄→アルカリ洗浄剤での洗浄→水洗浄→酸洗浄剤での洗浄→水洗浄→次亜塩素酸ナトリウム洗浄→水洗浄などの多くの工程を順次行うが、強固な固着汚れがあると、加温処理を含めて長時間の洗浄が必要になり、経済的な効率性が失われるケースがある。これらの場合に、予め氷ラリーを管内流動させ、氷粒子による管壁固着物へのせん断作用で剥離させ、氷ラリーと共に管外へ流動排出することで、大幅な洗浄時間の短縮による CIP 洗浄の可能性はある。



図 4-12 アイスピグ工法による排水管の初期排水(左)と経過後の排水(右)の状態(4-19)



#### 4.4 氷スラリーを利用した場合の問題点

4.1 には高密度熱輸送媒体である氷スラリーの特長である搬送動力の低減、熱交換量の増大、機器・装置のコンパクト化、一定温度での熱交換特性などの効果を示した。また、氷スラリーのその他の特性として、4.2 には氷スラリーの潜熱による一定温度維持特性による、醸造産業やスケートリンク産業への利用や食物の熟成への利用などを示した。さらに 4.3 では、氷スラリーに含まれる氷粒子の付着性による、食品工業・水産業、生体・医療分野への利用、消火への利用や、氷粒子の壁面洗浄性による配管内洗浄への利用など、多くの産業利用方法を示した。

しかしながら、高密度熱輸送媒体利用では、氷スラリーの生成過程で発生する過冷却による冷媒の蒸発温度の低下や管内閉塞、氷の冷却面への強固な付着等による製氷効率の低下や、貯氷では高 IPF・凝集性・IPF の計測管理の困難さなどや、輸送や熱交換では、凝集による閉塞・熱伝達特性の低下などに多くの課題がある。また、今回氷スラリーによる多くの物理的特性を示したが、体系的な課題が明確にはなっていない状況であり、不明確なことがまだ多い。

流動性のある氷スラリーとは云うが、技術的な扱いとして冷水と同じように扱える実用的な課題解決を、今後に期待したい。

#### 参考文献

- (4-1) 川南ら、氷スラリーの流動特性と熱伝達、第40回伝熱シンポジウム講演論文集, pp.423-424
- (4-2) H. Kumano et al., Experimental study on heat transfer characteristics of ice-slurry, Int. J. of Ref., No.33, pp.1540-1549 (2010).
- (4-3) 富樫ら、加熱円管周りを流れる氷スラリーの流動および熱伝達特性, Thermal Science & Engineering, Vol.21, No.1, pp.21-29 (2013).
- (4-4) 醸造-Wikipedia (2014.10.19)
- (4-5) ベルギービール博物館HP : <http://www.geocities.jp/beerforum/> (2015.3)
- (4-6) ビール酒造組合HP : <http://www.brewers.or.jp/> (2015.3)
- (4-7) ビール-Wikipedia (2015.3.2)
- (4-8) 小林禎作, 中尾正義, 北原武道, 進士, 康信, テストスケートによるリンク氷の動摩擦係数の測定 : スケートリンクの氷質調査 III, 低温化学. 物理編, 28, pp.243-259(1971)
- (4-9) 対馬勝年 : 氷雪のトライボロジー(2013)
- (4-10) 氷温協会HP : <http://www.hyo-on.or.jp/> (2015.3)
- (4-11) 乾燥熟成肉-Wikipedia (2014.8.30)
- (4-12) 鮮魚, 焼酎・・・「うま味」引き出す熟成ビジネス, 日本経済新聞 (2013.11.18)
- (4-13) 水野由紀子, 若浜五郎 : 湿雪の付着強度, 低温科学 物理編, Vol 35, pp133-145(1977)
- (4-14) 平田哲夫 : 「低温環境利用技術ハンドブック」(関信弘編), 森北出版, pp.188-190 (2001.3)
- (4-15) M.Kauffeld et al., Ice slurry applications, Int. J. of Ref., No.33, pp.1491-1505 (2010)
- (4-16) 関光雄, 遠藤浩司, 尾花秀晃 : 消火装置および消火方法, 特許第4986102号, 登録(2012.5.11)
- (4-17) 遠藤浩司, 関光雄 : 雪氷による消火の研究(付着性氷粒子の消火効果), 第32回日本熱物性シンポジウム, B303, (2011)
- (4-18) アイスピグ研究会HP : <http://www.icepig.org/> (2015)
- (4-19) アイスピグ研究会HPのニュース : <http://www.icepig.org/blog/news/2015/03/post-32.php> (2015.3.27)

## 5. 用途別の氷スラリーの優位性

### 5.1 食品製造過程での氷スラリーの利用の優位性

食品製造過程における氷スラリー利用の優位性を表 5-1 に示す。加熱加工，加熱殺菌など高温処理を行う食品製造には，主に静菌や熱による劣化の防止などの目的で冷却が行われている。氷スラリーは冷水に比べて，含まれる氷の融解潜熱による低温維持性の高さや，冷却速度の速さが特長であり，冷水を用いた場合より様々な面で優位であると考えられる。

#### 5.1.1 冷却時間に対する優位性

食品加工後の冷却に際して，冷水を用いた場合にはその温度は 0℃より高い温度であり，食品との熱交換によって周囲の冷水温度が上昇すると予想される。次に冷却源として挙げられるのが氷であるが，例えば砕氷を用いた場合には氷と食品の間に空隙ができ，接触面積が少なくなる。氷に接触していない面は冷却され難いため，冷却速度が遅くなると予想される。氷スラリーは，食品との空隙の発生を防止し，氷の潜熱により温度を一定に保ち 0℃以下でも冷却できるため冷却速度を向上させることが可能と考えられる。

氷スラリーの冷却速度については，日新興業による鮮魚に対する冷却の実例(5-1)がある(図 5-1)。保冷ボックスに砕氷，砕氷と海水を混合した海水氷，氷スラリー(スラリーアイス)をそれぞれ鰯とともに入れ，魚体の温度と冷却時間を測定している。約 16℃の魚体が 2℃まで冷却される時間は，砕氷で 46 分，海水氷で 36 分，氷スラリーで 22 分であり，氷スラリーを用いた冷却では，砕氷のみと比べて冷却速度は 2 倍以上であり，優れた冷却性能をもっている。

レトルト食品など包装された食品については，食品製造ラインに冷却水槽を設け，コンベアで一定時間冷却水槽に製品を浸漬させることにより，冷却を行なうことがある。製造効率向上のためコンベアの速度を上げたり，冷却水槽の大きさを小さくして省スペース化を図るケースが考えられるが，冷却水槽の条件を変えなければ，製品の温度が上がってしまう。これを改善する方法として，冷却水の循環水量を増加させる場合と，氷スラリーを適用する場合について比較を行なった。

温度 100℃～20℃，直径 5cm，10cm，15cm の肉の球体を想定し，冷却水が 0℃から 10℃に変化して冷却する場合(チルド水冷却を想定)，0℃から 5℃に変化して冷却する場合(循環流量 2 倍増を想定)，および 0℃一定で冷却する場合(氷スラリーで冷却することを想定：図 5-2 を参照)について，製品の中心温度が 1℃になるまでの冷却時間を試算した。計算結果の一例を図 5-3，各条件の必要冷却時間を図 5-4，冷却時間の比較を図 5-5 に示す。試算結果から，氷スラリーにより冷却槽の冷却水の温度を 0℃に保てれば，冷却時間は最大 29%程度短縮できることが分かる。さらに，循環水量を 2 倍にするには，搬送設備や冷却水槽の大幅な変更を伴うが，氷スラリーを用いれば，ホース等で冷却水槽に氷を投入することが可能となるため，設備費の削減や工期の短縮も期待できる。

表 5-1 食品製造過程における氷スラリー利用の優位性

氷スラリーの特長	得られる効果	メリット
急速冷却	微生物の増殖速度低下	保存性の向上，消費期限の延長
	冷却時間の減少	生産効率の向上
交換熱量の増加	搬送動力の削減	電気代，水道代の削減
一定温度冷水	負荷変動対応	負荷変動用の過剰設備が不要

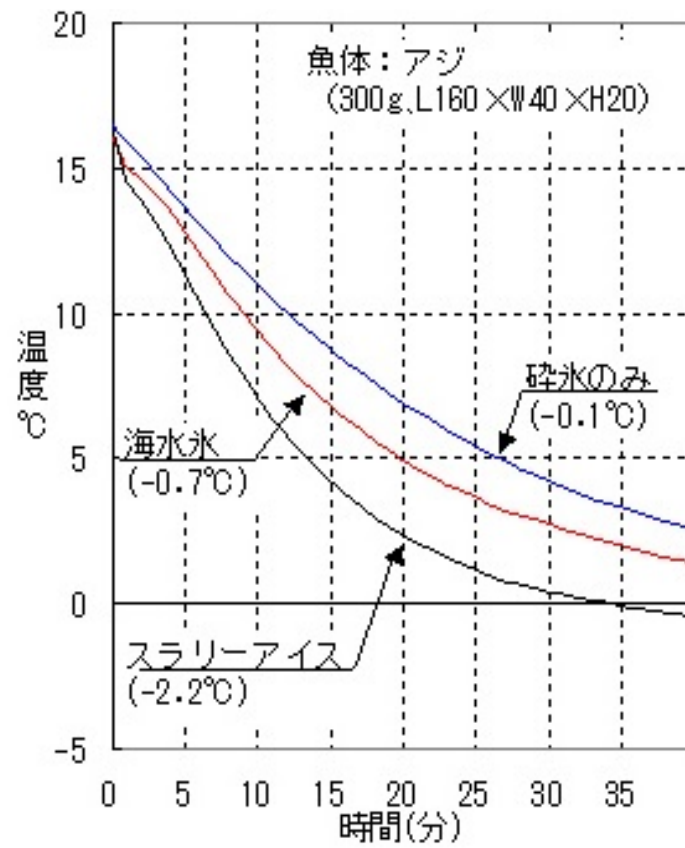


図 5-1 鮮魚に対する冷却速度の比較(5-1)

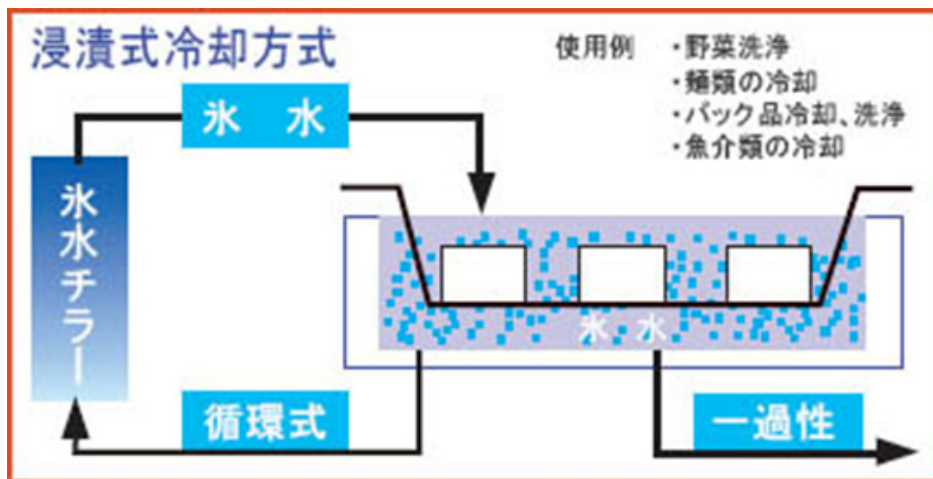


図 5-2 浸漬式冷却方式の例 (5-2)

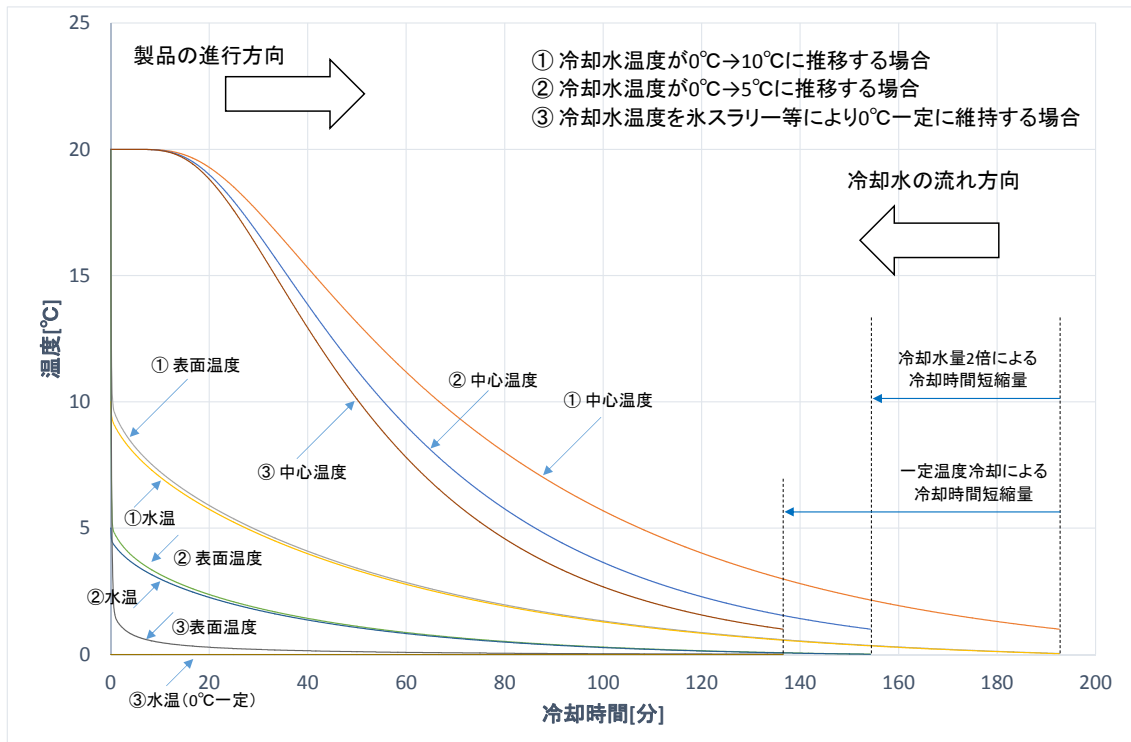


図 5-3 計算結果の一例（製品初期温度 20°C，直径 15cm）

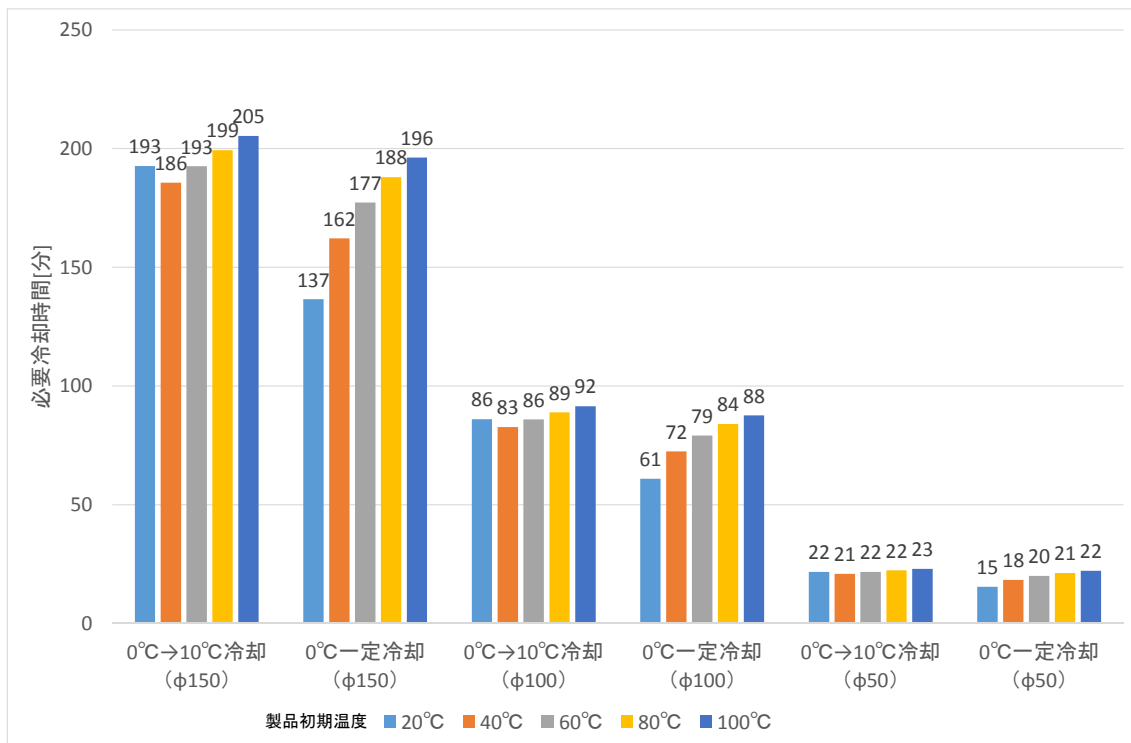


図 5-4 各条件の必要冷却時間

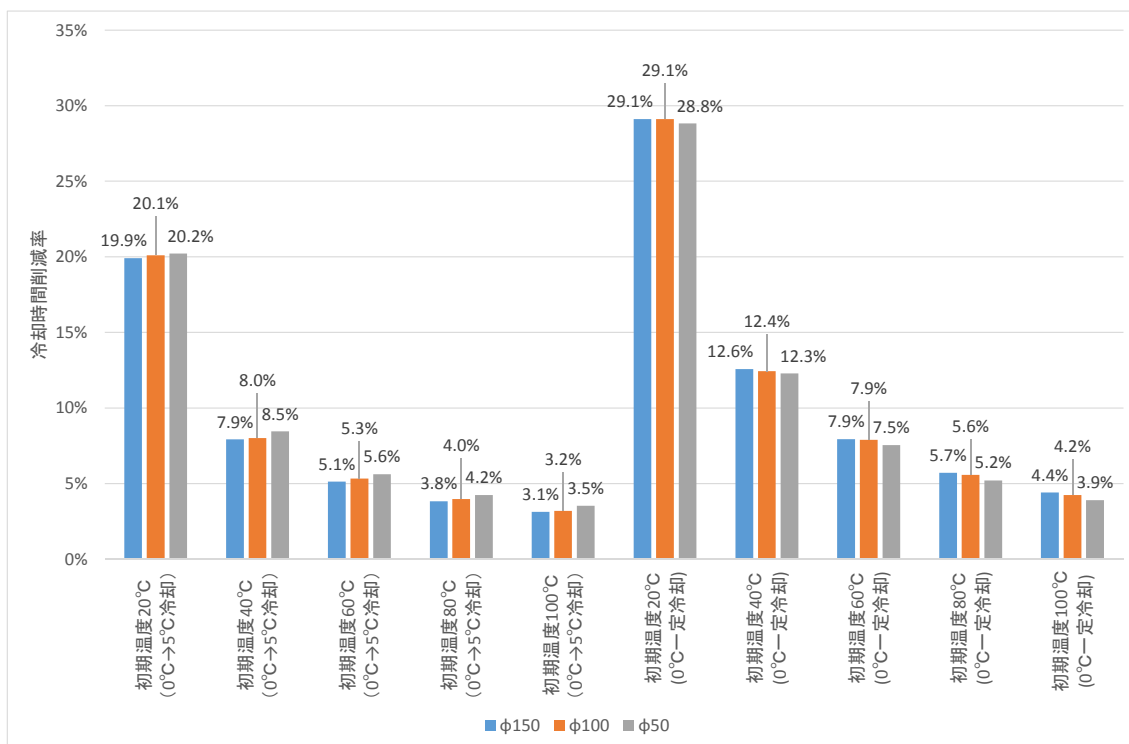


図 5-5 0°C→10°C冷却に対する冷却時間削減率

表 5-2 微生物の発育温度

種類	最低温度	最適温度	最高温度
低温微生物	0°C	20~30°C	30°C
中温微生物	10°C	30~40°C	45°C
高温微生物	40°C	50~60°C	70°C

### 5.1.2 静菌に対する優位性

食品の微生物制御には汚染防止・殺菌とともに増殖抑制が重要な要素であり対象食品の温度を発育可能温度域以下に保つ、あるいは速やかに冷却することが肝要である。食品の工程には大別して「収穫」「加工」「保管」があるが、微生物制御の観点から「加工時の冷却」に着目し、氷スラリー活用の可能性について考察を試みた。

a) 微生物の発育可能温度域 食品の温度条件は、微生物が発育する要因の一つである。微生物の発育温度を表 5-2 に示す。微生物の種類により、発育に適する温度（最適温度）、発育が抑制される温度（最低温度）、死滅する温度（最高温度）は異なる。そのうち、食品の腐敗や食中毒に関する細菌やカビなどの大部分は中温微生物、低温微生物に属する。

主な食中毒起因細菌の発育可能温度域を表 5-3 に示す。多くの微生物は 10°C以下の温度では発育ができないことから「学校給食衛生管理マニュアル（第 3 次改訂版）」(5-4)では多くの食品について 10°C以下での管理が示されている。但し、微生物（細菌）の種類によっては、より低い温度が必要な場合があり、例えば、鮮魚介や液卵はより低い温度基準が求められている。

表 5-3 主な食中毒起因細菌の発育条件(5-3)

菌 種	発育可能 温度域 (°C)	発育可能 pH (発育可能最低)	発育可能 最高 食塩(%)	発育可能 最低 水分活性
<i>Salmonella</i>	5.2~45	4.0~9.6	8.0	0.95
<i>Campylobacter jejuni</i>	31~45 <sup>a)</sup>	5.5~9.5	2.0	NT
<i>Clostridium perfringens</i>	10~52 <sup>b)</sup>	5.0~8.5	6.0	0.95~0.97
<i>Clostridium botulinum</i>				
Type A, B	10~48 <sup>b)</sup>	4.6	8.0	0.93~0.96
Type E	3.3~45 <sup>b)</sup>	5.0	4.0	0.96~0.97
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	5~44	4.8~11	10	0.94
<i>Yersinia enterocolitica</i>	0~44	4.6~9	5.0	NT
<i>Bacillus cereus</i>	7~49	4.3~9.3	7.5	0.95
<i>Staphylococcus aureus</i>				
発 育 (+O <sub>2</sub> )	6.7~46	4.0	16~18	0.83~0.86
(-O <sub>2</sub> )		4.6	14~16	0.9
毒素産生 (+O <sub>2</sub> )	10~45	4.0	10	0.86
(-O <sub>2</sub> )		5.3	9.5	0.94

NT: 未検討, <sup>a)</sup> 微好気条件, <sup>b)</sup> 嫌気条件

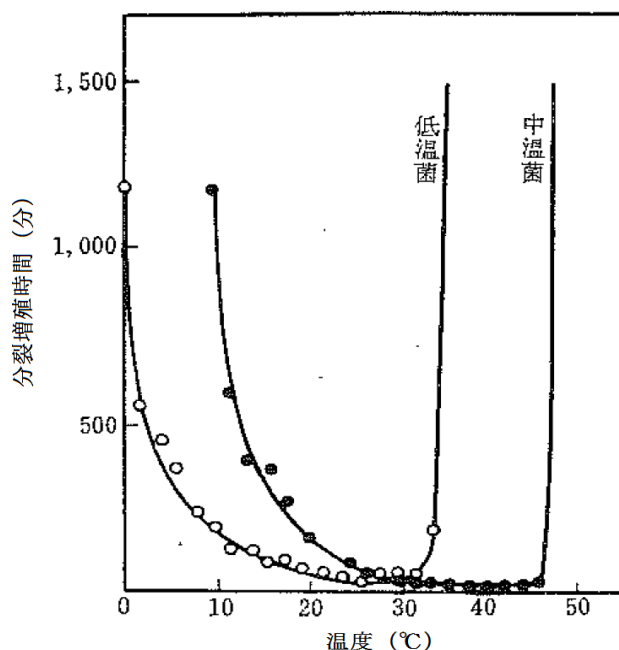


図 5-6 低温, 中温微生物の世代時間におよぼす温度の影響(5-5)

次に低温微生物と中温微生物の世代時間と温度の関係を図 5-6 に示す. 30~45°Cでは数十分以内で分裂増殖するのに対し, 30°Cより下がるに従って指数関数的に増殖時間が増加し, 中温微生物では10°C付近, 低温微生物では0°C付近で殆ど増加しなくなることが分かる. これらのことから, 食品製造過程における冷却は, 早急に0°C付近まで冷却することが望ましい. チラーによる冷水製造では5°C程度の冷却が一般的であるのに対し, 氷スラリーでは0°C付近まで冷却することが可能である.

b) 生食用食品加工時の活用 刺身やカット野菜など生で喫食する食品についてはその性質上加工には十分な配慮がなされ、調理器具の洗浄殺菌や処理室の温度管理および原料・製品自体の温度管理も徹底されているため、「保冷」が原則であり「冷却」を要する工程は限定される。よってここでは生鳥の処理工程での「冷却」への活用可能性を紹介する。

鶏肉処理工程は他の畜肉処理と同様に低温化での処理が原則ではあるが作業者が作業できる環境であるため処理場の室温は15℃程度までしか下げることができない。また「脱羽」工程では羽を除去し易くするため蒸気で蒸す工程があるため一時的に表面温度が上昇する。よってその後速やかな冷却を要するが現状では冷水のシャワーによる冷却が一般的であり、その後の部位解体も長時間の工程を要するため室温レベルまでの温度上昇が懸念される。

鶏肉に存在する代表的な微生物にサルモネラ菌があるが、その発育可能温度域は表 5-3 のように5.2℃～45℃である。また、温度ごとの発育態度(図 5-7)を見ても5℃以上の温度帯では増殖が見られ、特に30℃以上の温度帯では急激に増殖することがわかっている。

このため、処理工程を通して5℃以下に保つことが好ましく、実際の設備での工程の途中でスピッチャーと呼ばれるスクリーによる送り機構を持つ大型冷却装置に冷水および氷を投入しての冷却を行っているが、氷スラリーの高効率冷却の特徴を活かして、工程での温度上昇に応じて必要箇所に氷スラリーでの冷却工程を追加することにより、鶏肉温度をより効率的に低温に保つことができる可能性がある。

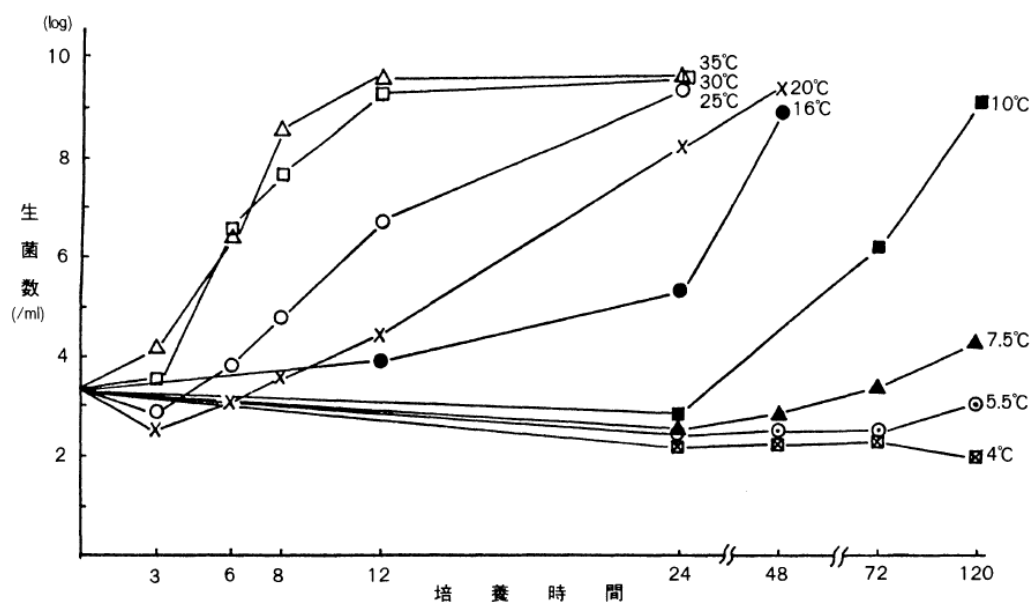


図 5-7 各種温度における HI ブイヨン中の Salmonella typhimurium の発育態度(5-3)

表 5-4 チルド水供給方式の比較

	氷蓄熱 (氷スラリー, アイスオンコイル) 方式	冷水チラー
負荷変動への追従	大きな負荷変動に追従できる (流動性がありサラサラした氷で、速やかに熱交換を行い、チルド水を安定供給できる)	大きな負荷変動に追従できない (供給冷水温度が上がってしまう)
冷水温度	0℃に近いチルド水	5℃程度の冷水

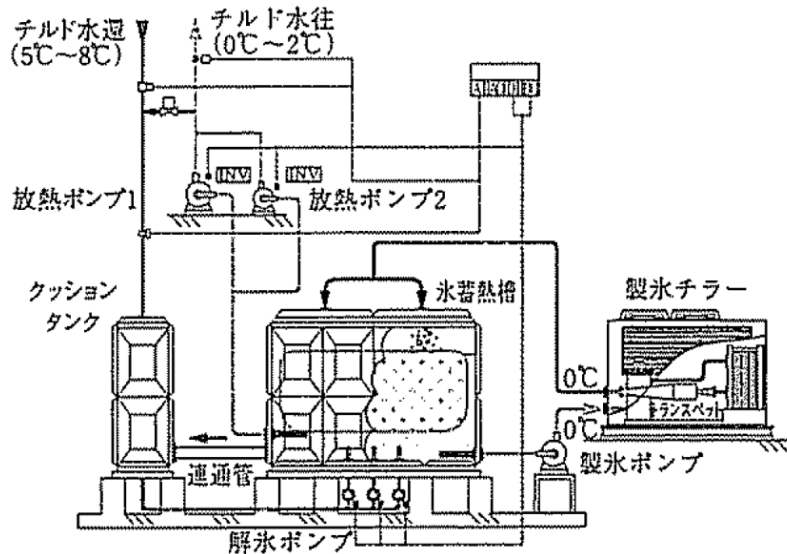


図 5-8 チルド水供給装置フロー

### 5.1.3 負荷変動に対する優位性

乳業や飲料，また豆腐などの一部の食品製造過程の冷却には，低温のチルド水が使用される．その熱負荷パターンには間欠的に高負荷状態が発生するという特徴があり，高負荷条件でも安定して低温チルド水を供給可能なシステムが必要となる．

表 5-4 に氷蓄熱と，冷水チラーによるチルド水供給方式の比較を示す．チラーによる冷水供給においては冷水温度が 5°C 程度であり，急激な負荷変動による低負荷停止やロードアップに追従できないことにより冷水温度が上昇するなどの問題がある．氷蓄熱方式においては，氷と水の接触により速やかに熱交換を行うことが可能であり，安定的にチルド水を供給できるという特長がある．氷蓄熱方式によるチルド水供給には，スタティック方式（アイスオンコイル）と，ダイナミック方式（氷スラリー）があるが，アイスオンコイルでは，ブリッジングにより供給水温が上昇するため対策が必要である．氷スラリーでは，氷に流動性があるためブリッジングの問題がない．

氷スラリーを用いた氷蓄熱によるチルド水供給については，塩尻ら(5-6)の実例がある．チルド水供給装置のフローを図 5-8 に，チルド水供給の実測データを図 5-9 に示す．供給回路は蓄熱槽から生産装置へ直接接続されており，生産装置からの還水は一旦クッションタンクを介して蓄熱槽へ戻される．実測データに関しては，生産において短時間で高負荷がかかり，生産装置からの還水温度が急激に変動しているのが分かる．このような大きな負荷変動を繰り返している場合でも，安定して 1°C 以下のチルド水が供給できている．

さらに熱交換器に直接氷スラリーを送り込むことにより，顕熱のみの場合に比べて，被冷却側の出口温度変動はさらに小さくすることが可能と考えられる．熱交換器に氷スラリーを送水した事例として，富山ら(5-7)は，プレート式熱交換器に送水できる氷スラリーの IPF を 15~20% としており，IPF20% の氷スラリーを安定して搬送している．

### 5.1.4 システム小型化に対する優位性

食品工場は，他の工場とは異なり活用できる残存スペースが少ない傾向があり，配管口径の縮小や機器の小型化等，システムを小型化することは，残存スペースの拡大につながり大きなメリットとなる．また，氷スラリーは搬送可能であるため，製造設備は工場の外に設置でき工場内のスペースを損ねることが無い．



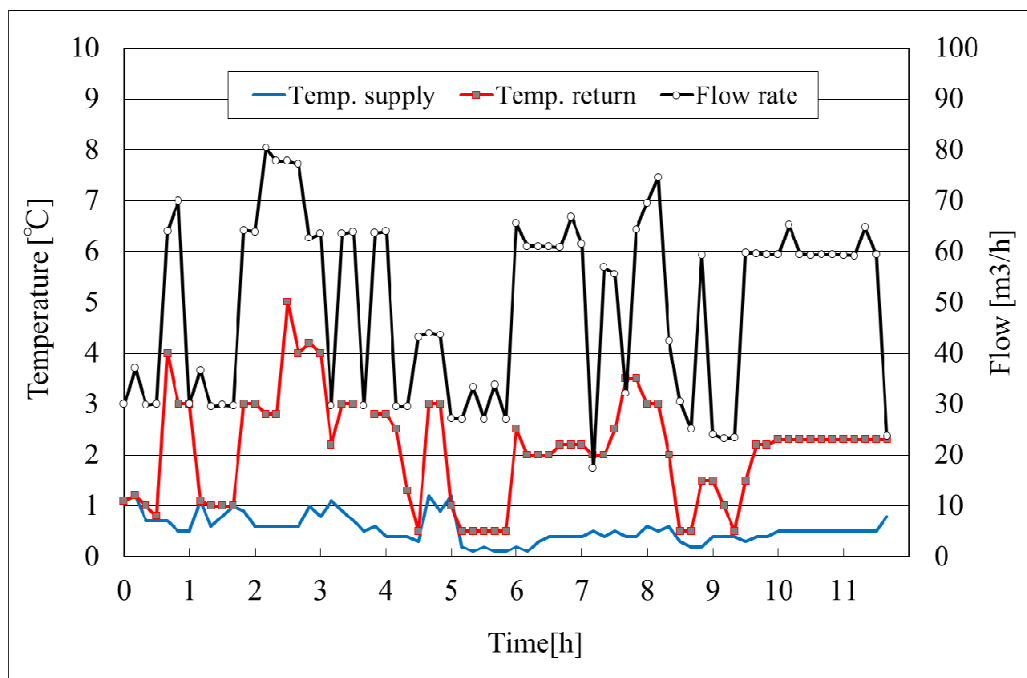


図 5-9 実生産における負荷変動とチルド水供給温度

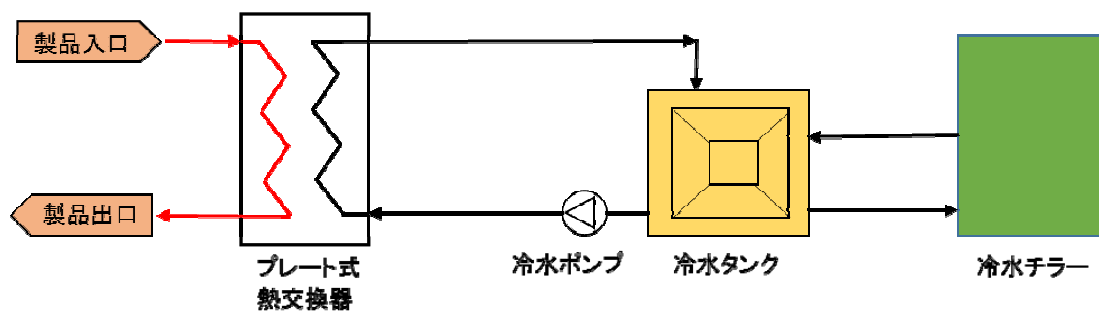


図 5-10 冷水による冷熱輸送

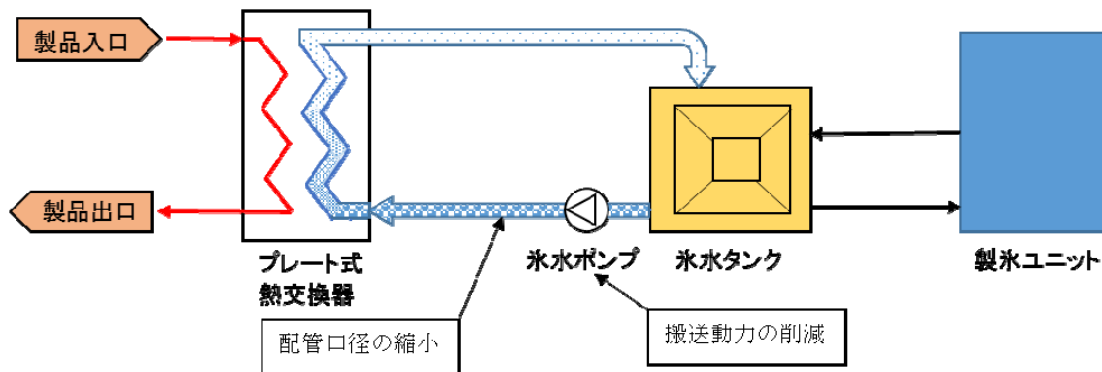


図 5-11 氷スラリーを用いた冷熱輸送

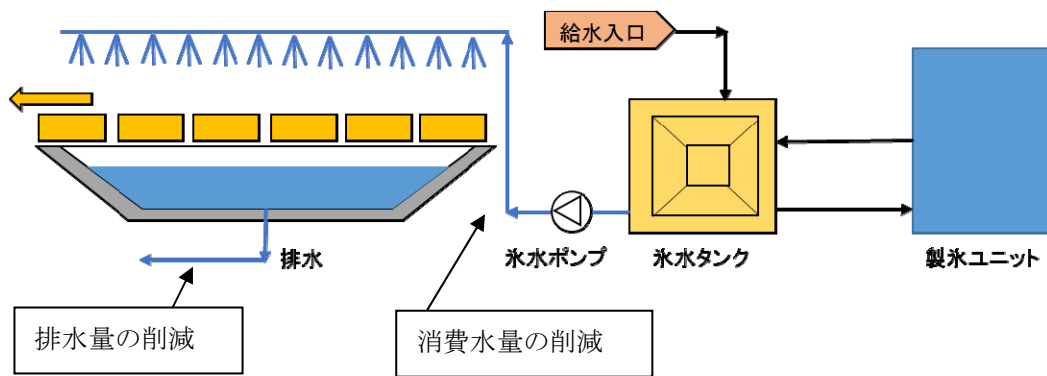


図 5-12 一過性の冷却に対して氷スラリーを用いた場合

冷水を配管で搬送する例を図 5-10、氷スラリーを配管で冷熱需要先に搬送する例を図 5-11 に示す。氷の潜熱と低温冷水の顕熱を利用できる高密度熱搬送システムとして、冷水のみを用いた場合(図 5-10)と比較して非常に効率的に冷熱輸送が可能となり、搬送動力の削減と配管設備(口径)の縮小を図ることができる。また、冷却水を一過性で利用する場合においても、氷スラリーを用いることで冷却水量を削減することができ、水道などの冷却媒体の消費量、排水量を減らすことが可能となる(図 5-12)。

氷スラリーによる搬送動力の削減効果については、富山ら(5-7)の実例がある。文献では、ダイナミック方式の氷スラリーを冷水コイルに直接搬送するシステムにおいて、配管口径が従来と比較して 1/2 になり、また、ポンプ動力は 1/3~1/5 にまで低減した実績が紹介されている。

## 5.2 食品流通での氷スラリーの利用の優位性

本章では、食品流通に対し氷スラリーを利用する場合の効果について記述する。

液体には殺菌した海水(塩水)を用い、基本的には食品の冷却・加工・輸送工程等において、現状使用している砕氷(クラッシュアイス)やプレートアイス、ブロックアスを氷スラリーに置き換える形で使用する。直接対象物に氷スラリーを接触させて冷却する事等から、冷却設備への導入と比較して、より多様な効果を得る事ができる。

### 5.2.1 品質向上

海水氷スラリーを利用する事で、砕氷やブロックアイス等と比較して、食品の a) 保存期間の延長、b) 変色防止(水産物)、c) 傷付き防止、d) 価格の向上などの品質向上につながる効果を得ることができる。

a) 保存期間の延長 氷粒子が細かいことによる対象物との接触面積の増大や、塩分濃度による温度調整により、急速かつ均一、そして氷点下で最適な温度で対象物を冷却・保存(温度維持)することが可能となる。さらに、低温輸送に際して十分な熱容量があり、これらの結果として保存期間の延長を図ることができる。例えば、魚については漁獲直後に氷スラリーに浸漬し冷却する事で、最大限の効果を得られる。

b) 変色防止 氷スラリーが塩分を含むなどのことから、水産物の冷却・加工における変色を抑えることができる。実際に氷スラリーの導入前後で変色による不良率が減少した養殖加工場の実績がある。

c) 傷付き防止 砕氷等と比較して氷粒子径が小さく、また塩分を含む事によりいわゆる「滑らか」な状態となるため、対象物と氷との接触により対象物が損傷することが無い。

d) 価格の向上 氷スラリーを継続使用することで、上記の品質、特に鮮度の向上が認められ、実際に魚価が向上した漁協の実績も有る。

e) その他 氷スラリーは密閉系での生成が可能のため、HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) への対応も可能となる。

#### 5.2.2 作業効率改善

氷スラリーはブロックアイス等とは異なりポンプによる搬送が可能である。さらに、そのシステムは半自動化されており、その中で氷スラリー製造は自動で行われ、作業場所でスイッチを入れれば氷スラリーをその場で利用することができる。

そのため、例えばこれまで氷を作業現場までフォークリフト等で運んでいた場合は、その分の労務費及び燃料費が減少し、比較的負担の大きい氷運搬作業が不要になることで労務環境の著しい改善も図れる。

#### 5.3 水産物冷却での氷スラリーの水氷及び冷却海水に対する優位性

従来から冷却用途に用いられている水氷と冷海水と、氷スラリーを比較すると以下のようなになる。

##### 5.3.1 水氷との比較

温度を比較すると従来の水氷の場合には攪拌が十分でないため温度分布が形成され、取り出し温度が5℃程度となってしまふ場合がある。そのため、0℃付近まで温度を均一にするためには、貯蔵槽の大きさによって異なるものの、条件によっては、冷却・攪拌のための数時間を必要とする。一方、スラリーは微細な氷粒子を含んでいるため、温度は均一であり、0℃付近に保たれている。これは、角氷1kgと1mmの球状の氷粒子を含んだ氷スラリーで比較すると、同じ1kgの氷で考えた場合、氷スラリーの方が表面積が100倍程度大きいため、素早く冷却できることになる。

氷スラリー中の微細な球状の氷は配管で搬送が可能である。現在、大船渡魚市場の600mが最大の搬送距離となっている。

従来の水氷は氷をエア圧送で搬送しているため、空気での細菌感染は避けられない一方、氷スラリーは空気に触れずに氷を搬送できるので衛生的である。

##### 5.3.2 冷却海水との比較

冷海水はバッチ式と言われ、大きなタンクに海水を張り、冷却して必要な温度で使うようになっているが、氷スラリーで作る冷海水は氷と海水を混合・攪拌することによって、冷海水を必要な温度で生産することができ、氷が無くなるまで連続的に生産供給できる。

冷海水は海水を冷却するだけなので、塩分は海水と同じ(約3.5%)である。しかし氷スラリーで生産する冷海水は、真水の氷であるスラリーと混合されるため、海水の温度によるが元の海水より塩分が薄められる。これは魚の血抜きを早くすることにつながり、また色とびの状態も回避することができる。

#### 参考文献

- (5-1) 日新興業株式会社：冷却用スラリーアイスシステム、[http://www.nissin-ref.co.jp/product\\_blog/2-2.html](http://www.nissin-ref.co.jp/product_blog/2-2.html)、アクセス日：2014/08/26
- (5-2) <http://www.h.toyo-ew.co.jp/product/catalog/dynamic-ice.html>
- (5-3) 伊藤武、坂井千三、主な食中毒起因細菌の食品中における増殖について、食品衛生学雑誌、30(2)、1989、pp.123-137.
- (5-4) 北海道教育委員会 学校給食衛生管理マニュアル p.106  
<http://www.dokyoai.pref.hokkaido.lg.jp/hk/ktk/kyusyoku/eiseikanri-m3.htm>
- (5-5) 河端 俊治・辻 薦：食品工場における微生物制御、第1版(1975)、p.99~101
- (5-6) 塩尻 一海・雨宮 満：建築設備技術者協会会誌 建築設備士 Vol.35(6)、p.13-16、(2003)
- (5-7) 富山 靖司：日本冷凍空調学会誌 冷凍 Vol.82、p.379-383、(2007)

## 6. 氷スラリー冷熱ネットワークによる未来社会

研究分野の動向を調べることは、将来の市場動向を予測する上で有用である。以下に、氷スラリーに関連する論文の掲載数の推移について述べる。図 6-1 は、“ice slurry”をキーワードとして検索し、ヒットした論文件数の過去 20 年の推移である。2005, 2006 年の特異点を除けばほぼ増加傾向にある。さらに、これらの論文に関し、直近 10 年を前半後半に分け、掲載された雑誌によって分野を分類した結果を図 6-2 に示す。[冷凍]分野は多様な分野が混在しているためこれを除いて議論すれば、[エネルギー・熱工学]分野は主に氷蓄熱を扱ったものが多いものの、この分野が減少傾向にあるのに比べて、[食品]および[医療・バイオ]分野は増加傾向にある。つまり、氷蓄熱はその重要度はいまだ大きいものの技術的に成熟期に入りつつ、食品分野への多様な活用がなされると予測される。また、医療に関してはまだその応用対象は少ないが、今後多くの試みがなされると見込まれる。

本章では、省エネ、生活の質、安全性の向上を実現するために将来的に期待される氷スラリーの利用方法について幾つか紹介または提案する。

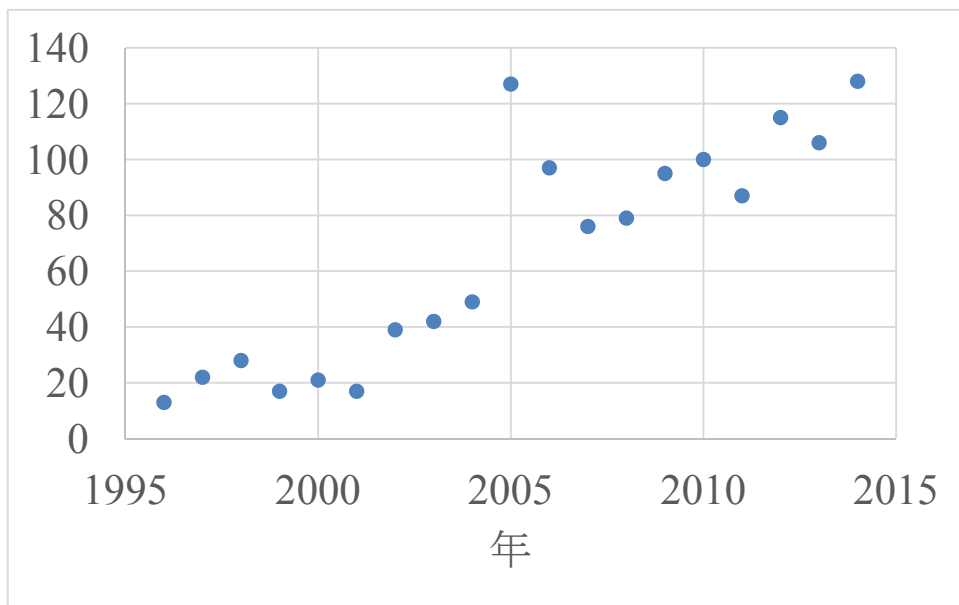


図 6-1 氷スラリー関連論文件数の推移 (Science Direct search)

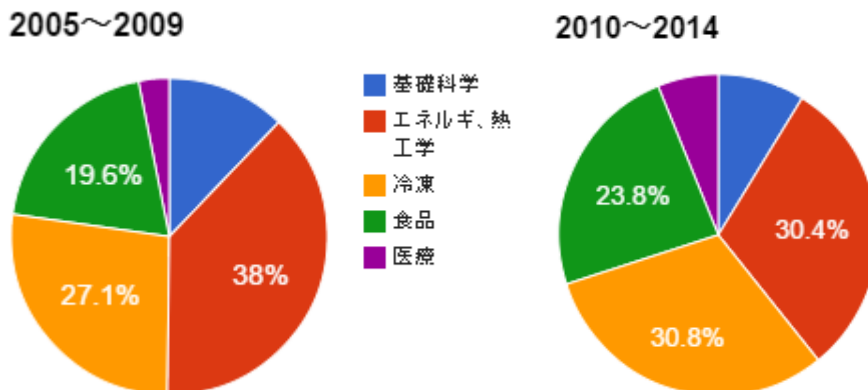


図 6-2 氷スラリー関連論文の分野 (上位 20 雑誌対象, 雑誌による分類)

## 6.1 氷スラリー冷熱ネットワークとは？

現在、主に氷蓄熱として利用されている氷スラリーは、その生成・貯蔵を地域集約的に行うことで、効率化および冷熱需要変動への柔軟性の向上を図ることが可能である。また、熱源として地下水、河川、下水等を利用することで、更なる効率化およびヒートアイランドの抑制等にも資することが出来る。

氷スラリー冷熱ネットワークとは、「地域集約的に生成・貯蔵する氷スラリーを、地域の冷熱供給媒体としてあらゆる分野で適材適所に活用すること」である。氷スラリー冷熱ネットワークの構築によって環境負荷の低減、省エネルギー、安全性の向上等様々なメリットを得ることができ、ひいては社会全体の生活の質の向上をもたらすことができる。

あらゆる分野で適材適所に活用するため、本書で取り上げた氷スラリーの適用例・優位性から、活用できる氷スラリーの特長を以下の①～⑩のように整理する。また、各々の事例について、活用されている特長を表 6-1 にまとめる。

- |           |                             |
|-----------|-----------------------------|
| ①急冷が可能    | : 対象物を急速に冷却でき、熱負荷の変動にも対応できる |
| ②温度維持性が高い | : 対象物を一定温度に保持できる            |
| ③蓄熱量が大きい  | : 体積あたりの熱容量が大きく、ピークシフト等にも有用 |
| ④流動性が高い   | : 対象物までポンプ搬送できる             |
| ⑤柔軟性がある   | : 対象物を傷つけない                 |
| ⑥衛生的である   | : 人の手、外気に触れずに生成、供給が可能       |
| ⑦被覆性がある   | : 形状をある程度維持できるため、対象物を覆うのが容易 |
| ⑧無害である    | : 基本的には無害（混合物質による）          |
| ⑨保湿度が高い   | : 氷の水分により、高湿度状態を維持できる       |
| ⑩消失する粒子   | : 研磨材等として利用後、環境負荷なく消失する     |

## 6.2 氷スラリー冷熱ネットワーク利用の具体例

### 6.2.1 モーダルシフト

1997年12月に京都で開催された第3回締約国会議（COP3）において、法的拘束力のある二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）などの温室効果ガス削減のための議定書が採択され、2008年から2012年までの期間中に、温室効果ガス6種の合計排出量を、1990年比5%削減すること、日本に関しては、同6%の削減を目標とすることが定められた。その後のCOP18やCMP8で、京都議定書の第2約束期間に参加する国の排出量削減目標や、議定書に参加していないが最大の排出国である米国や中国も含め、2020年以降にスタート予定の新たな枠組みの議論が行われることになっている。一方で、近年、地球温暖化に伴い著しい気候変動が起こり、全世界規模の異常気象が毎年起こっている。このような異常気象は、CO<sub>2</sub>などの大気中の濃度が増加することで起ると考えられる。人間の活動によるCO<sub>2</sub>排出量は72億トン/年であり、一方、自然界のCO<sub>2</sub>吸収量は31億トン/年にすぎず、結果として、毎年大気中には41億トン/年のCO<sub>2</sub>が増え続け、毎年1.9%の割合で大気中のCO<sub>2</sub>濃度が上昇している。

以上のように、CO<sub>2</sub>などによる地球温暖化は、もはや人類を含めた地球上の全ての生物の存亡の危機といっても過言ではない。故に、温暖化ガス排出抑制は、人類にとっては必ず解決しなければならない極めて緊急性の高い命題となっている。

そこで、我が国のCO<sub>2</sub>の排出量の内の約2割を占める運輸部門、その中の物流分野においてCO<sub>2</sub>の著しい排出抑制が期待される、モーダルシフトについて言及する。

モーダルシフトとは、トラックによる貨物輸送から、大量輸送が可能な鉄道や海運輸送に転換することである。モーダルシフトにより、鉄道輸送ではCO<sub>2</sub>排出量が営業用トラックと比べて約6分の1、海運輸送では約3分の1の低減が可能となる。一方、別の側面でのトラック輸送の現状としては、2012年の関越道バス事故により国土交通省は、バス・トラックの運転手の長距離運転に関して、連続運転

表 6-1 適用事例・分野と活用できる氷スラリーの特長

適用事例・分野	活用できる特長										参考箇所・文献
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
	急冷	温度維持	蓄熱量	流動性	柔軟性	衛生的	被覆性	無害	保湿度	粒子	
鮮魚の急冷・予冷（船上・港）	○	○	○	○	○	○		○	○		3. 2. 3, 3. 2. 4
鮮魚貯蔵（市場・加工）		○		○	○	○		○	○		3. 2. 6
マグロ凍結	○	○		○	○			○			3. 4. 1
凍結温度付近冷却・維持		○	○			○		○			6. 2. 2
野菜・果実の急冷・予冷	○	○	○			○		○	○		3. 3. 4
野菜・果実輸送		○	○			○	○	○	○		3. 3. 3
廃液量の低減		○	○			○					3. 3. 4
プロセス冷却	○	○		○							3. 3. 2, 3. 3. 5, 5. 1. 1, 5. 1. 3
低温空調	○	○	○								3. 3. 1
アンモニア冷媒対応			○	○							3. 3. 6
氷蓄熱（既設水槽改修）	○		○	○							
微生物制御	○	○		○		○					3. 4. 2, 5. 1. 2
低温輸送		○	○	○							3. 4. 5. b)
アイスピグ				○				○		○	6. 2. 4
消火	○		○	○			○				6. 2. 5
医療分野		○		○		○		○			6. 2. 6
人工雪											6. 2. 7
薬品輸送		○									
冷凍システム高効率化			○	○							3. 4. 5. a)
一次冷媒（ブライン）量削減			○	○							3. 4. 5. a)
システムの小型化			○	○							5. 1. 4

距離を 400 km（条件によっては 500 km）に規制する条例を施行した。その結果、運転手不足の問題が発生し社会問題化している。特に、中小の物流会社ではその影響が一層深刻となった。現在物流ネットワークにも甚大な影響が出始め、その影響がさらに大きくなる可能性が高い。このことから、モーダルシフトの促進が急務となっている。例えば、貨物輸送では、1名の運転手で最大 650 トンの荷物の輸送が可能となり、これは、大型トラック（10t 車両）65 台分に相当する。よって、モーダルシフトによる CO<sub>2</sub> の排出抑制効果はもとより、貨物輸送と同等の荷物（650 トン）をトラックで輸送した場合、最低 65 名の運転手が必要となり、運転距離が 400km を超える場合は、130 人必要になることを考慮すると、物流ネットワークに影響を及ぼすトラック運転手不足を解決する有効な手段としてもモーダルシフトは有効となる。

#### モーダルシフトの現状と各輸送機関の特性

2005 年の閣議決定で、鉄道コンテナ輸送量を 2010 年度までに 217 億トンキロに、フェリー等国内貨物輸送コスト低減率を 2007 年度までに、2002 年度比 4% 減とすることをそれぞれ目標として、モ

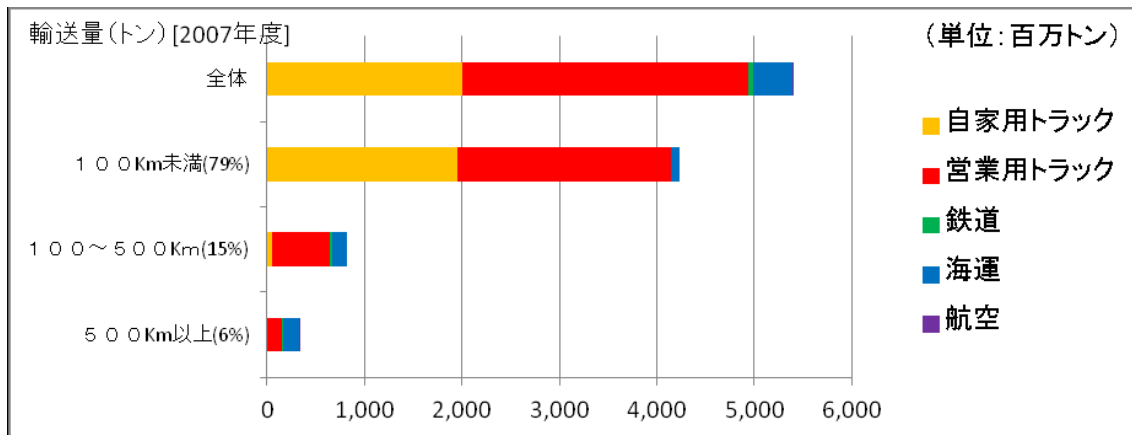


図 6-3 距離帯別輸送機関別輸送量(6-2)

ードルシフトの推進を図ることとしている(6-1)。モーダルシフト化率は、1990年代には増加傾向にあり、1998年度をピークに減少傾向にあったが、2004年度以降は再度、増加傾向にある(6-1)。

図 6-3 に距離帯別輸送機関別輸送量を示す(6-2)。図より、全体では、自家用/営業用トラックが全体の90%以上を占めていることが分かる。輸送量全体の大半(79%)が100km未満であり、輸送距離が長くなるほど全体に占める割合が小さくなる。さらに、輸送距離が長くなるほど、自家用トラックの割合は低下し、500km以上の場合、営業用トラックと海運の割合が概ね等しくなるが、一方で、鉄道輸送の割合は極めて小さいことが分かる。このことから、まずは500km以上の長距離輸送を鉄道に早急に転換することが課題となっている。その中で、鉄道によるモーダルシフトに関しては、2013年度から特に増加傾向にあり、複数企業での共同利用が始まっている。しかし、JR路線の過密ダイヤにより、現状は土日での貨物輸送の実施が主体となっており、その点も鉄道によるモーダルシフト化の妨げになっている。

次に、各輸送機関の特性の比較を表 6-2 に示す。表 6-2 示したような様々な問題点を解決しなければ、鉄道によるモーダルシフトのさらなる普及の大きな障害となる。そこで、官民一体となって、運賃等のコスト低減、結節点の時間短縮、積載率向上・運行ダイヤとの調整、輸送力増強のためのインフラ整備や財政支援・優遇税制等の実施(6-1)や、民間企業参入促進のインセンティブとして補助金制度の導入などの様々な取り組みも始まっている。

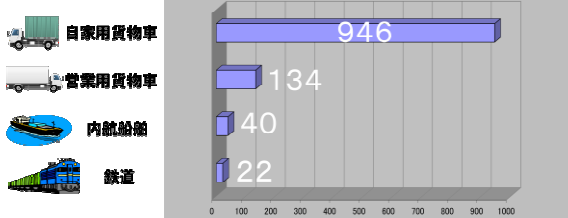
以上より、モーダルシフトも現状では、未だ解決すべき問題点もあるが、昨今の異常気象を考えると、それらの問題点を官民一体となり早急に解決したうえでモーダルシフトを実現し、CO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの大幅削減に寄与すべきである。

#### モーダルシフトによる冷蔵輸送の未来

現在、鉄道/船舶輸送における輸送対象は、常温から冷蔵・冷凍状態での輸送が可能である。そこで、本項では、氷スラリーを利用したモーダルシフトを提案する。氷スラリーは鉄道/船舶輸送で利用する場合、例えば、以下のような優位性がある。

- (1) 小さな氷粒が分散しているため、氷粒の比表面積が大きいことで熱負荷追従性に優れているので、一定温度の冷却が可能となる。
- (2) 高い流動性により配管輸送が可能となる。
- (3) 単位体積当たりの蓄熱量が大きいので、貯氷部や配管径のスケールダウンが可能となる。
- (4) 氷スラリーにより直接空気を冷やす場合、湿度が100%近くなり、特に、果物、野菜、や生花の冷蔵輸送に有効である。

表 6-2 各輸送機関の特性の比較(6-2)

	トラック	鉄道・船舶										
運賃	<ul style="list-style-type: none"> <li>車両の大きさ別（2t, 4t, 10t 車等）に時間制, 距離制コストが設定される</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>輸送距離が長い場合にコスト競争力が高い</li> </ul>										
ロット	<ul style="list-style-type: none"> <li>車両の大きさによりさまざまなロットを選択可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>キャリアの設定する輸送ロットに依存する</li> <li>鉄道12ftコンテナ：積載重量 5 t, 容積約 18~20m<sup>3</sup></li> <li>31ftコンテナ：積載重量10~13 t, 容積約 47~55 m<sup>3</sup></li> <li>船舶 ISO20ft コンテナ：積載重量 24t, 容積約33m<sup>3</sup></li> <li>ISO40ft コンテナ：積載重量 30t, 容積約 67m<sup>3</sup></li> <li>シャーシ(フェラー含む)：シャーシサイズによる</li> <li>大量の荷物を運ぶことができる（鉄道は1列車（最長）で10tトラック65台分の輸送が可能）</li> </ul>										
立地	<ul style="list-style-type: none"> <li>立地による制約はなく，ドアツードアの対応が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>多くの場合, 両端でトラック輸送が必要</li> <li>駅, 港湾などのインフラが近隣に必要となる（インフラが近隣にない場合は, 近隣にある場合と比べてトラック輸送の距離が長くなるため, 環境効果減少, コスト増を招く）</li> </ul>										
時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>輸送ルートごとの輸送時間を設定しや</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>決められたダイヤで運行されるため定時性が高い</li> <li>拠点間の輸送に関しては高速輸送が可能である</li> <li>結節点での接続などの諸条件により, 所要時間が長くなることもある</li> <li>発着ダイヤの影響を受け, 利用したい時間帯で利用できない可能性がある</li> </ul>										
環境負	<ul style="list-style-type: none"> <li>営業用トラックは, 混載や帰り荷, 共同輸配送等を行うことにより, 自家用トラックよりも CO<sub>2</sub> 排出量原単位が小さくなる（自家用トラックの約 1/7）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>営業用トラックよりもCO<sub>2</sub> 排出量原単位が小さい（鉄道約 1/6, 船舶約 1/3）</li> </ul>  <table border="1"> <caption>CO<sub>2</sub> 排出量原単位比較</caption> <thead> <tr> <th>輸送機関</th> <th>CO<sub>2</sub> 排出量原単位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>自家用貨物車</td> <td>946</td> </tr> <tr> <td>営業用貨物車</td> <td>134</td> </tr> <tr> <td>内航船舶</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>鉄道</td> <td>22</td> </tr> </tbody> </table>	輸送機関	CO <sub>2</sub> 排出量原単位	自家用貨物車	946	営業用貨物車	134	内航船舶	40	鉄道	22
輸送機関	CO <sub>2</sub> 排出量原単位											
自家用貨物車	946											
営業用貨物車	134											
内航船舶	40											
鉄道	22											
リスク	<ul style="list-style-type: none"> <li>交通事故発生リスクは鉄道・船舶よりも高いが, 代替輸送の手配が比較的容易である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>交通事故発生リスクはトラックよりも低い</li> <li>トラックに比べ災害や天候による遅延への対応や代替輸送の手配が求められる(鉄道)</li> </ul>										
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>長距離ドライバーの労働条件の悪化や不足, 高齢化が深刻な課題である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大量輸送機関である鉄道, 船舶（無人シャーシ等）輸送は, 将来の労働力不足への対応方策になりうる</li> <li>高速道路料金設定に影響を受ける</li> </ul>										



これまで、J R 貨物の貨車に 2 t n 水槽×3 を設置し、九州から東京を經由して北海道まで高濃度の不凍液（主成分はエチレングリコール）の顕熱を利用して水槽内の活魚を冷蔵輸送する企業の取り組みが試験的に実施されている。ここで得られたデータから、同等の活魚をトラック輸送した場合に比べ、CO<sub>2</sub> の排出量を 1/7 にできたとの結果が報告されている。そして、この取り組みは、将来的には、国内だけにとどまらず、J R 貨物や地方自治体とも協力し、フェリーを介して日本の様々な高付加価値の食品を中国やその先のヨーロッパまで運び、帰りには、ヨーロッパの高付加価値の物品を日本まで輸送するという壮大な構想も含まれている。その中で、現在、冷蔵手段として利用している極低温に冷却された不凍液（主成分はエチレングリコール）の顕熱による冷却から氷スラリーの（潜熱＋顕熱）による冷却に転換が進められている。

そこで、まず、第一段階としては、氷スラリーではなくブロック氷の利用が検討されている。その場合、例えば、不凍液をエチレングリコールとし、九州-東京間での不凍液の温度変化を実際の使用条件である-25℃から 5℃までとすると、その顕熱は、エチレングリコール 1 t で約 70MJ となる。一方、（0℃の水 0.5t と 0℃の水 0.5 t）が 5℃まで温度上昇する場合の（潜熱＋顕熱）は約（水＋氷）1t で約 360MJ となり、その比は 5 倍以上となる。そして、このことは、理論上は九州-東京間を 2.5 往復できることになる。また、不凍液を使用する場合、氷生成に比べ蒸発温度を大幅に下げる必要があるので、COP（成績係数）の低下を引き起こす。また、必要な蒸発温度を実現するためには、より定格動力の大きい冷凍機を必要とする。さらに、不凍液の初期温度が-25℃であることを考慮すると、その高粘性による伝熱特性の低下も考えられる。以上より、氷や氷スラリーを利用した方が現行の冷却方式より省エネ効果が期待され、CO<sub>2</sub> 排出量の低減割合も前述の 1/7 よりさらに改善できることも考えられる。

現在、貨物に別途設置する水槽内の複数の円管表面にブロック氷を生成するシステムの作成が検討されている。そのシステムにおいて全体の 50～60%程度の氷を生成し、その氷を解かすことで生成される安定した温度の冷却水を水槽内に循環させた場合、九州-東京間の貨物列車での移動時間に相当する時間での水槽内の温度変化を測定することになっており、その後は、実際の活魚輸送による氷の効果の検証が実施される予定である。

上記の取り組みでは、1 両の貨車に 2 t の水槽×3 台を設置して予め生成されたブロック氷を利用した活魚輸送であるが、将来的には、ある程度まとまった数の貨車、場合によっては、連結されている全ての貨車を利用した上で、1 台又は複数台の貨車に氷スラリー生成システムを設置することで輸送中にも氷スラリーの生成を可能にして、氷スラリーの高い流動性を利用して配管により氷スラリー各貨車のコンテナ内に搬送する。そして、冷蔵対象も現在の活魚のみに限定せず、様々な高付加価値なものを対象に冷蔵輸送を目指す。このことが実現すれば、より多種のものをより長距離での冷蔵輸送が可能となる。そのことでこれまで出来なかった、例えば、北海道の新鮮な様々な食品を鹿児島/沖縄の人々が産地と同じ鮮度で比較的安価で食べることができるという利便性をもたらす。そして、さらに長距離冷蔵輸送が可能となれば、将来的には、国内だけにとどまらず、J R 貨物や地方自治体とも協力し、フェリーを介して日本の様々な高品質で高付加価値の食品等を中国やその先のヨーロッパまで鉄道で運び、帰路には空いた貨車を利用してヨーロッパの高付加価値の物品を日本まで輸送するということが夢ではなくなり、日本にとっても大量の高品質で付加価値の高い物品の輸出が促進され、一方で、個人にとってもヨーロッパの高付加価値の物品を大量に輸入できるので、それらをより手に入れ易くなる。つまり、たとえ日本から遠く離れたヨーロッパの国々であろうとも、あたかも国内と同じように鉄道を利用して大量の高付加価値の物品の輸送ができるようになる。この場合、特に食品の冷蔵輸送においては、例えば、氷スラリー自体にオゾンにより殺菌・消臭効果という機能を付加すれば、食品の鮮度保持期間がさらに延長可能となり、鮮度を維持したままで高付加価値の食品をより遠くの外国へ輸送が可能となるであろう。

近い将来必ず実現するであろう本格的な水素社会と同様に、氷スラリーを社会インフラと位置付け

たとき、その中で人々に様々な利便性をもたらすことが可能となる。6.2.2 項でもより詳しく説明するが、例えば、前述のモーダルシフトに関連させ、貨物列車が運行される主要ターミナル駅や港湾や空港に、氷スラリー生成装置と一体となった氷スラリースタンドを設置することで、あたかも水道で蛇口をひねると水が出るように、蛇口をひねると氷スラリーがでてくるようにすることも考えられる。氷スラリー生成装置の製作・設置コストは、水素スタンド設置コストより格段に低価格で実現できると考えられる。そして、貨物列車や船舶・航空機による氷スラリーを利用した冷蔵輸送を幹として、ターミナル駅や港湾や空港から枝葉のように張り巡らされるトラックによる冷蔵輸送にも、冷凍機を利用した冷蔵の代わりに氷スラリースタンドから供給される氷スラリーを利用することで、氷スラリーをベースとした切れ目のない冷蔵によるコールドチェーンというのが実現可能となる。

以上の議論より、我が国での本格的モーダルシフトを早急に実現すべきであり、このことが人々の生活をより便利にする流通革命と大幅な CO<sub>2</sub> 排出抑制を同時に実現し、結果として将来の異常気象の抑制に資すると考えられる。

### 6.2.2 モーダルシフトと新しいコールドチェーンシステム

a) モーダルシフトと輸送時間 前述したモーダルシフトの実施例(6-3)における輸送時間の増減率を図 6-4、平均速度を図 6-5、モーダルシフト後の CO<sub>2</sub> 排出原単位および CO<sub>2</sub> 排出量の削減率を試算した結果を図 6-6 に示す。これらの試算結果から、トラックのみの輸送から、トラックと鉄道あるいは海運を組み合わせたインターモーダル輸送に変更すると、トンキロベースで 8 割程度の CO<sub>2</sub> 排出量の削減が期待できる。しかし、積み替え時間や、運行時間待ち時間の増加により、輸送時間は大幅に増加するため、輸送に十分な余裕時間が設けられている貨物でしか、モーダルシフトの活用を望めない。特に生鮮食品など早く届けることを求められている貨物については、適用が難しい。以上の実情を踏まえると、生鮮食品などへモーダルシフトの対象を拡大させるためには

- ①積み替え時間の短縮
- ②増便
- ③鮮度保持技術の向上

などの施策が必要と考えられる。このうち①・②については、駅、港湾/港の経営方針に関わる事項であり、当研究会が扱うべき対象にならないが、③については、氷スラリーを用いたコールドチェーンの確立、輸送時の温度維持技術の向上・コスト削減が期待される。

b) 個別保冷による鮮度維持の向上と輸送期間の延長 氷スラリーは流動性が高いため、人の手に触れないで衛生的に取り扱えることや、冷却対象に対するダメージが少ない特長があることから、輸送品等の個別保冷に適しており、鮮度維持および商品付加価値の向上が図れる。今現在、氷スラリーを用いた、個別保冷による鮮度維持の向上は、水産業(3 章 3.2 参照)、水産業以外(3 章 3.3 参照)を対象に実用化されている。氷スラリーと通常の砕氷との温度保持性能の比較として、ゆうパック(宿毛市～東京)における発泡スチロールクーラー内の温度変化を比較した事例(6-4)を図 6-7 に示す。スラリーアイスは、30 時間以上一定温度を維持しているのに対し、砕氷は時間経過と共に温度変化が見られ、上下に温度差も生じている。

c) 氷スラリー保冷車およびコンテナの有用性 氷スラリーを冷凍車、冷蔵車等に利用することは、3.4.4 b) で述べられている通り、各国で実証・運用されているが、まだ十分に普及が進んでいるとはいえない。将来、冷凍車・冷蔵車および、冷凍冷蔵機付きコンテナに氷スラリー利用が進んだ場合の環境負荷低減効果について以下に検討する。

#### ①冷凍・冷蔵車両による物流量および氷スラリー保冷車の CO<sub>2</sub> 削減賦存量

日本国内の冷凍・冷蔵車による輸送量の統計は存在しないため、冷凍・冷蔵車で輸送すべき品類・品目が含まれる農水産品および食料品・飲料の日本国内の総輸送量と、保冷・冷凍車の保有台数の割合から、冷凍・冷蔵車による輸送量と CO<sub>2</sub> 排出量を推測する。

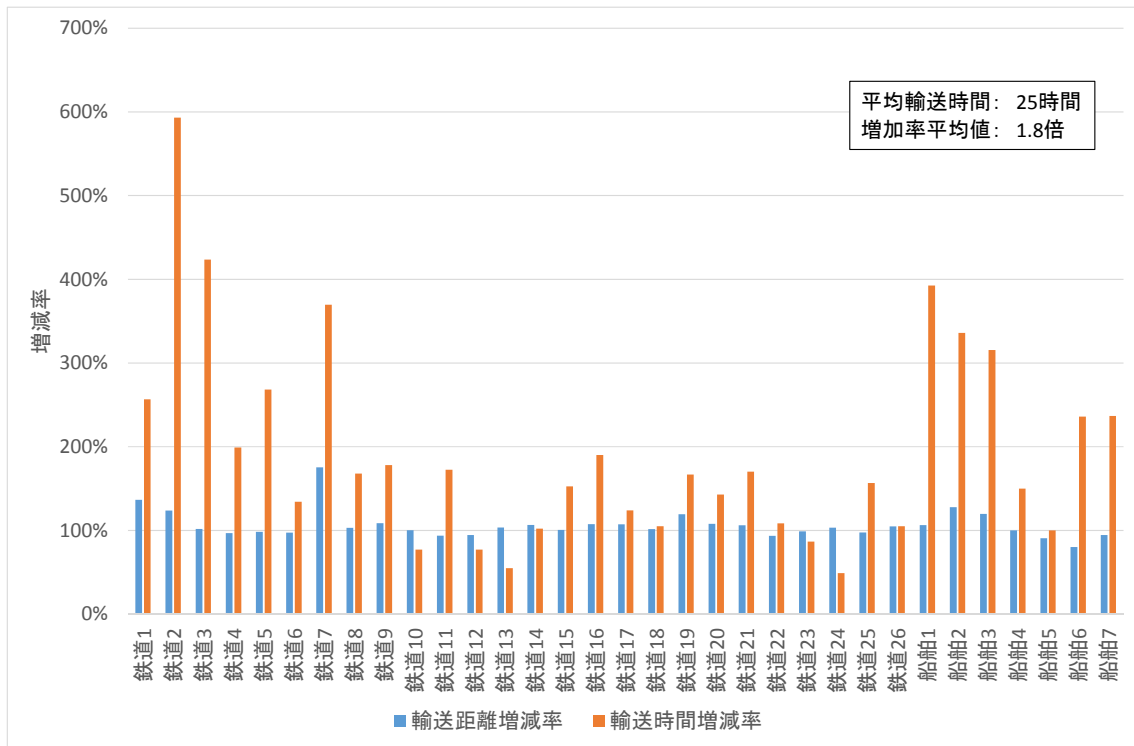


図 6-4 モーダルシフト後の輸送時間の増減率

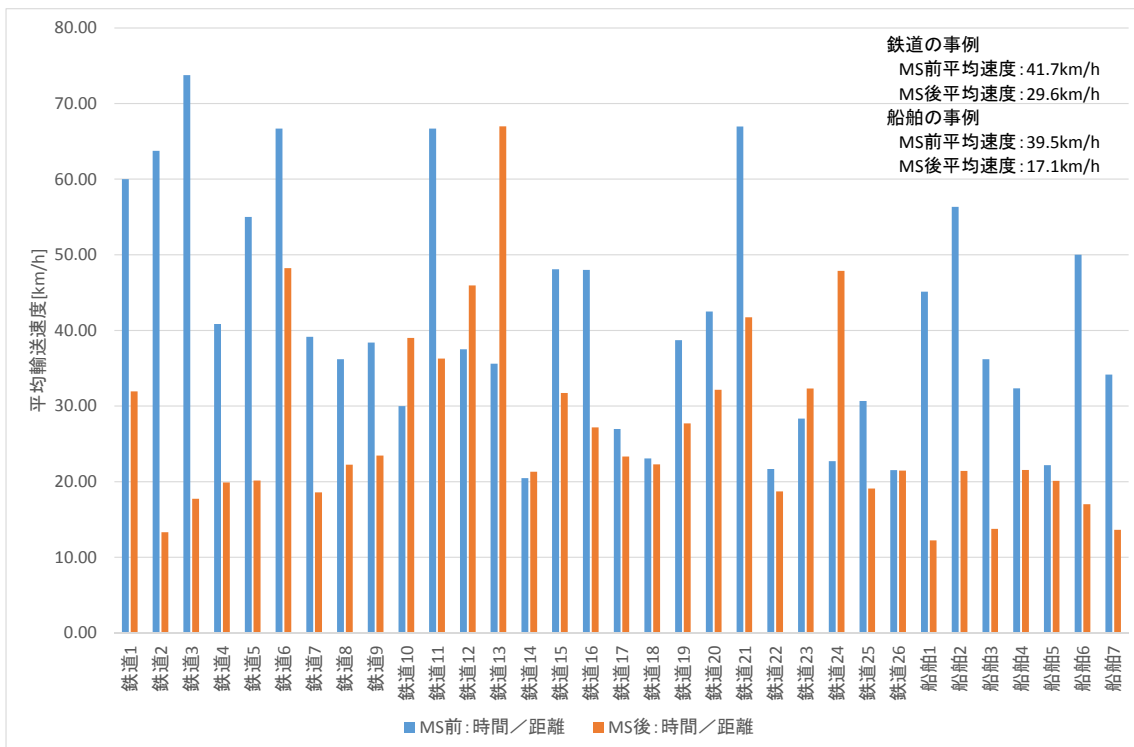


図 6-5 モーダルシフト前後の平均輸送速度

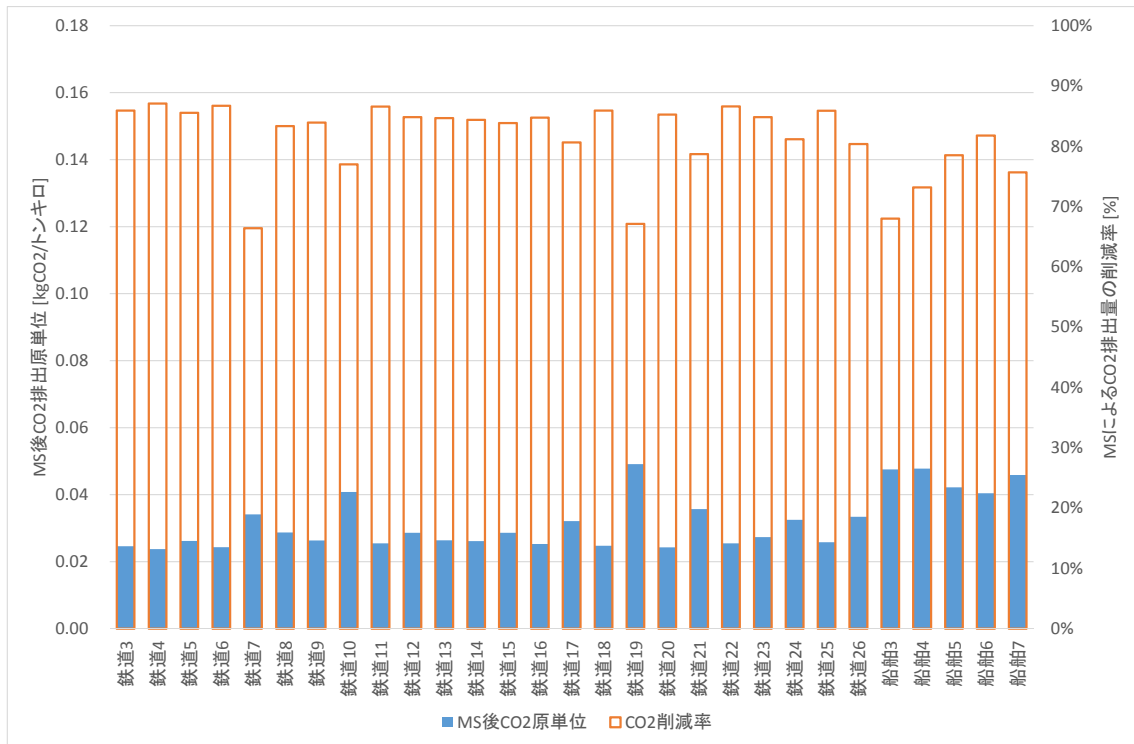


図 6-6 モーダルシフト後の CO2 排出原単位と CO2 排出量の削減率（推定値）

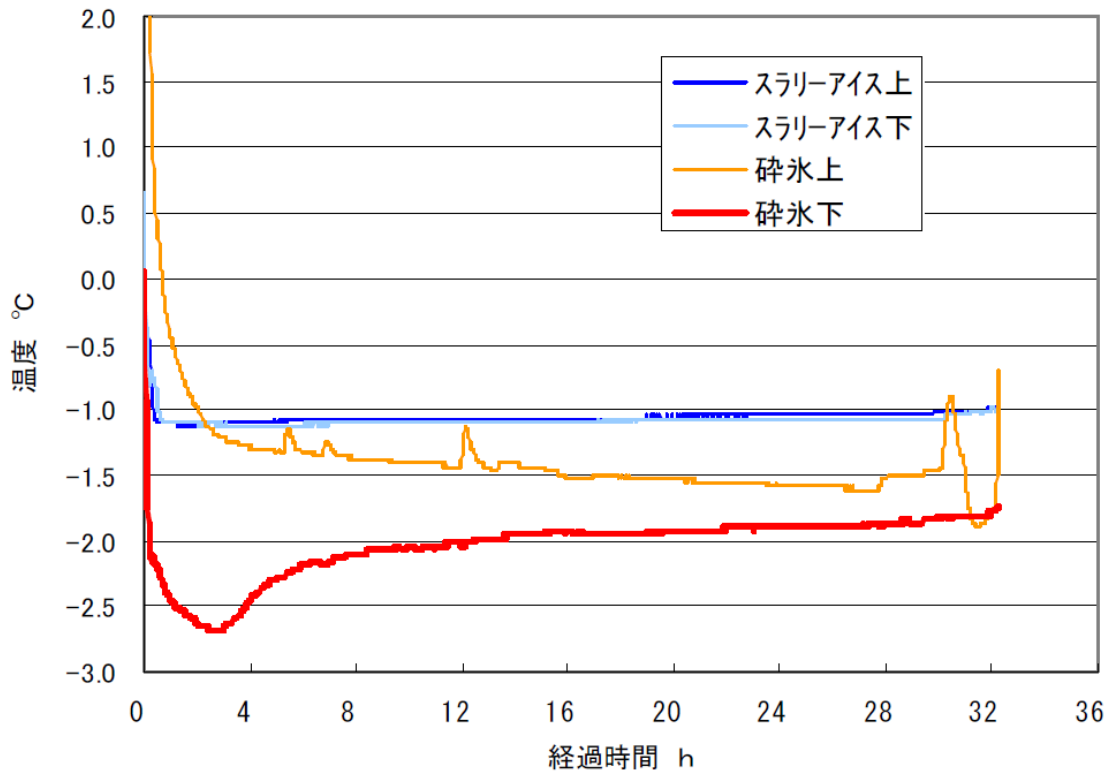


図 6-7 発泡スチロールクーラー内の温度(6-4)

農水産物および食料品・飲料の輸送量は、国土交通省の2010年の統計値(6-5,6-6)から26,185万トン/年と推定され、そのうち営業用トラックによる輸送の割合は、19,988万トン/年となる。また、普通トラック市場動向調査(6-7)から、保冷・冷凍車の輸送能力は、農水産物および食料品・飲料の輸送能力の54%程度(図6-8,6-9参照)と試算され、日本国内の輸送量も同じと仮定すると、冷凍・冷蔵車両による輸送量は $19,988 \text{ 万トン/年} \times 0.54 = 10,800 \text{ 万トン/年}$ となる。1トン当たりの平均輸送距離60km(6-8)から、輸送トンキロは660,000万トンキロ/年となり、冷凍・冷蔵車によるCO<sub>2</sub>排出量は87万トン/年(運輸部門全体の0.4%程度)と推定される。全ての冷蔵・冷凍車を氷スラリー保冷車両に転換したとすると、17万トン/年のCO<sub>2</sub>が削減できるものと試算される。(CO<sub>2</sub>削減率は3.4.4b)の事例で上げたCO<sub>2</sub>低減効果20%を適用)

### ②各種荷台に必要な氷スラリー量の推定

3章3.4.4節b)で紹介した、物流用蓄熱式保冷システムでは、IPF50%の氷スラリーを150kg程度充填することにより、10時間以上の配送が可能である(6-9)。同様のシステムを40フィートコンテナに適用すれば、容積当たりの表面積が小さくなるため、トラックの荷台に適用するより、単位容積当たりの氷スラリー量を少なくできる。夏期外気条件・開閉回数5回の条件で、冷凍・冷蔵コンテナに対する熱負荷計算を実施したところ、表6-3に示すように、1日に必要な氷スラリー量は、0.74トン(積載可能重量の約3%)となった。停留所や市場など物流拠点で氷スラリー供給設備を設置し、供給できるようにすれば、氷スラリーだけで冷凍・冷蔵コンテナを運用することが出来る。また、電源や燃料がなくとも、冷却を継続できるので、モーダルシフト、コールドチェーンの確立に一翼を担うものとなる。

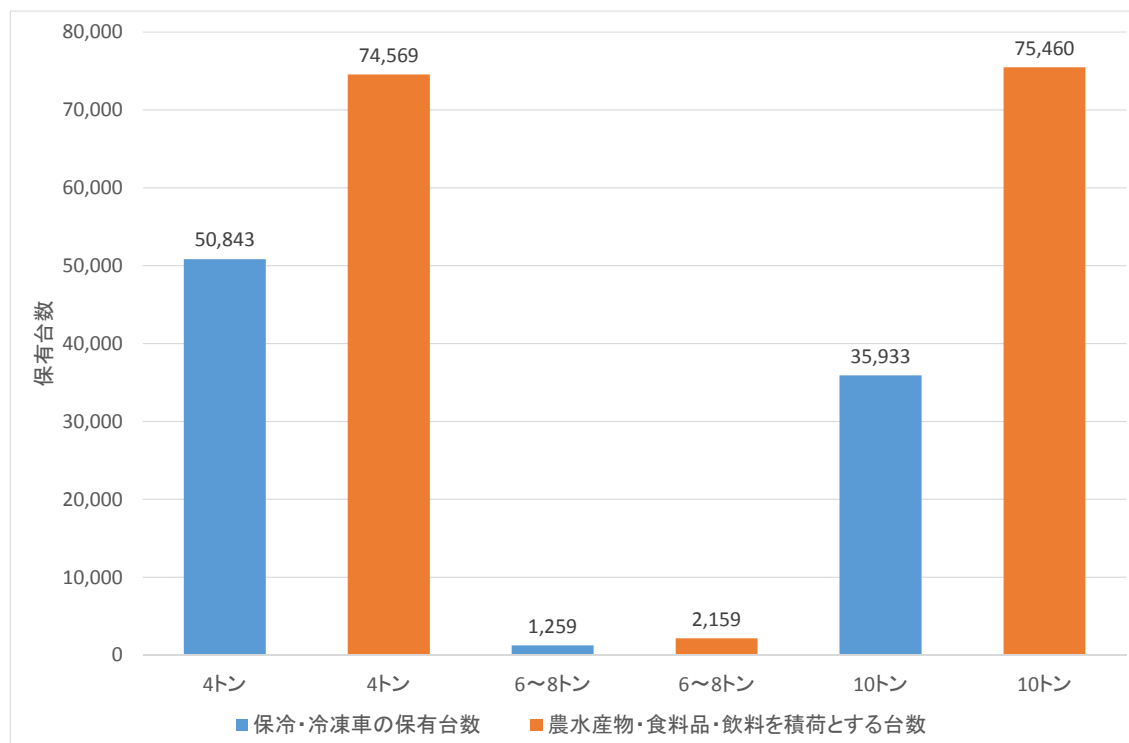


図6-8 保冷・冷凍車および農水産物・食料品・飲料を積荷とする車両の保有台数の比較(6-9)

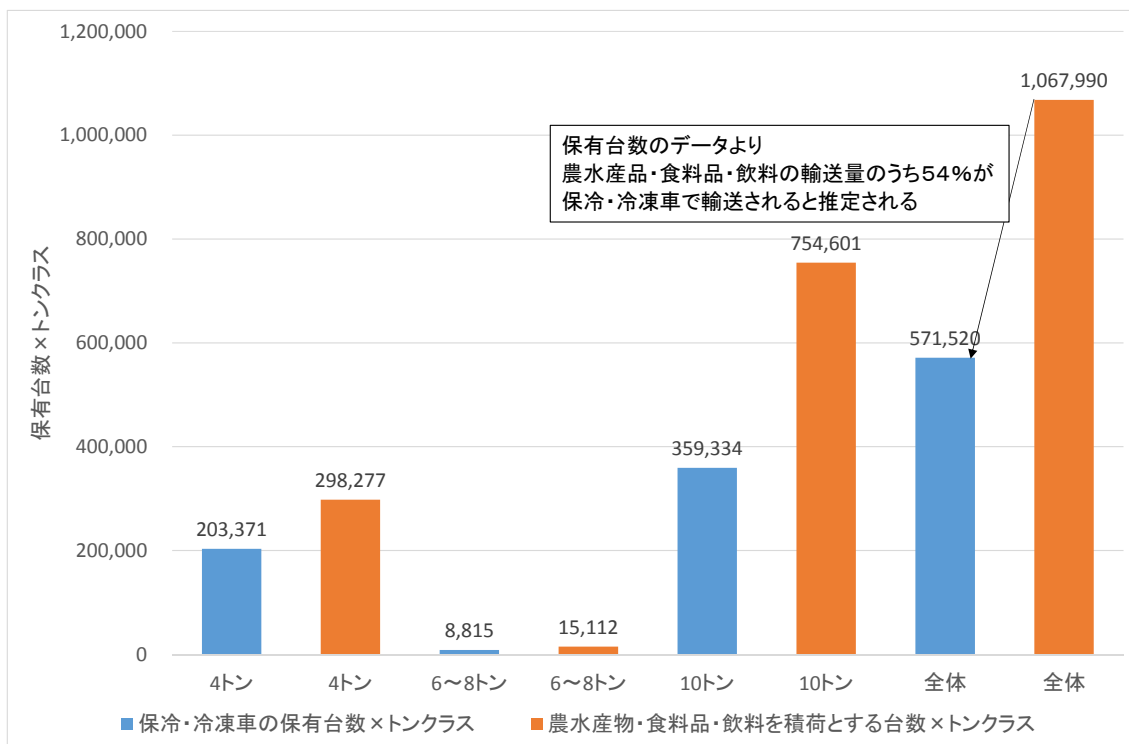


図 6-9 保冷・冷凍車および農水産物・食料品・飲料を積荷とする車両の総積載能力の比較

表 6-3 冷凍冷蔵コンテナを氷スラリーに置き換えた場合の想定値

	冷凍・冷蔵コンテナ	氷スラリーコンテナ
外寸	2,896H×2,438W×12,192D	
内寸	2196H×2286W×11661D	
断熱材	75mm	
庫内温度	5℃	
冷却能力	5.5kW	—
想定負荷 (夏期条件)	—	115MJ/日
氷充填量 (1日分)	—	0.74m <sup>3</sup> (IPF50%)
COP	1.6	3.0
收容能力	26.4m <sup>2</sup> 58.5m <sup>3</sup>	24m <sup>2</sup> 53m <sup>3</sup>
積載可能重量	26 トン	23.6 トン

d) 新しいコールドチェーンシステムの提案 以上を踏まえて本稿で提案する、氷スラリーによるモダルシフトおよび個別保冷を活用した新しいコールドチェーンシステムの概念を図 6-10 に示す。

図 6-10 の左端は生産者からの出荷プロセスである。農業者、漁業者が出荷する時点で、製品は氷スラリーと共に発泡スチロール等の断熱ケースに梱包され、トラックで集配施設に運ばれる。このケースは、最終目的地である小売店もしくはスーパー (図 6-10 の右端) に到着するまで開封されないため個別保冷となり、衛生面も含めて高品質を保つことができる。

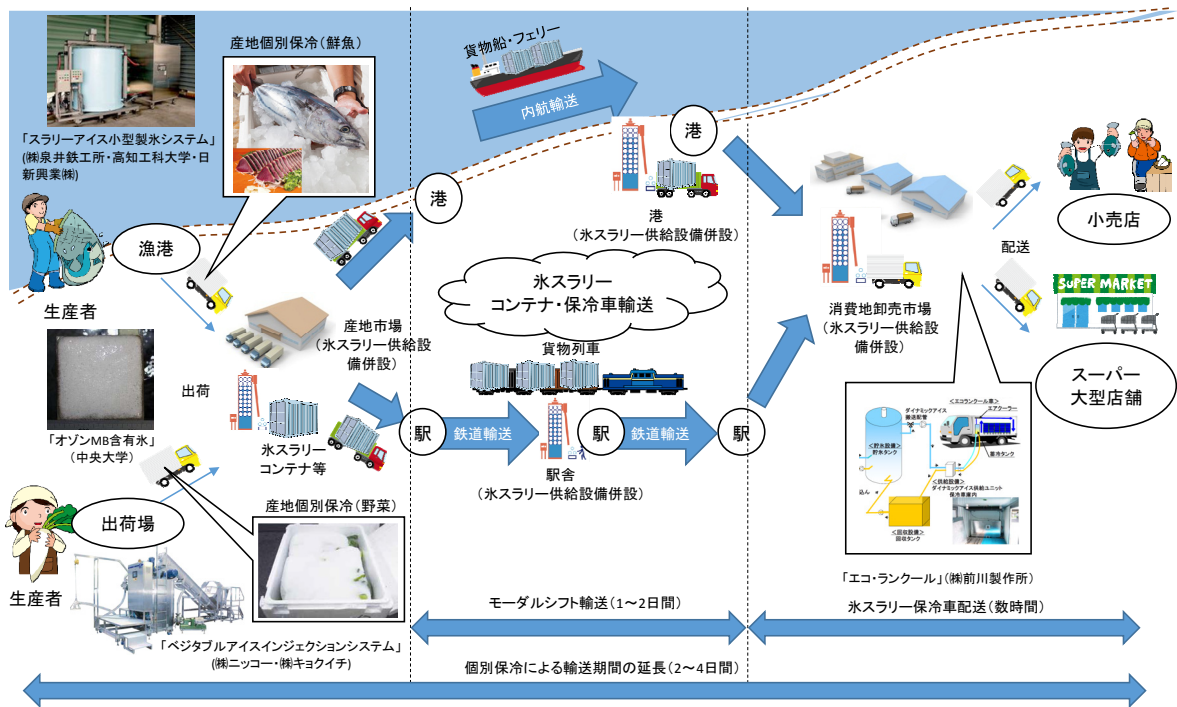


図 6-10 氷スラリーを用いたコールドチェーンのイメージ

集配施設において、ケースは氷スラリーを冷熱源とする保冷コンテナに積み替えられ、最寄りの駅もしくは港に向かう。ここで、コンテナ冷却用の氷スラリーを補充して、輸送の間（図 6-10 の中程）の低温を維持する。そして、目的地近隣の駅もしくは港からコンテナが集配施設に運ばれ、ここで保冷トラックに積み替えて、最終目的地である小売店等に輸送される。

このようなシステムを実現するためには、要所ごとに氷スラリーの補充ができなくてはならず、社会システムとしての氷スラリー生成装置を備えた氷スラリースタンド(製造・貯蔵施設)が必要となる。必要とされる氷スラリー量は、冷凍・冷蔵車量による物流量 10,800 万トン/年および 40 フィートコンテナに必要な水量：368kg-氷/23.6 トン-積荷=156 トン-氷/万トン-積荷から、

$$10,800 \text{ 万トン/年} \times 156 \text{ トン-氷/万トン-積荷} \div 0.5(\text{平均積載率}) \\ = 3,370 \text{ 千トン/年}$$

と見込まれる。これより氷スラリー設備の市場規模は、氷スラリーの製造拠点を主要卸売市場 80 ヶ所とすると、1 設備の冷凍容量は 300RT 程度（生産時間 10 時間×365 日）と見込まれる。

氷スラリー生成装置を備えた氷スラリースタンドによる冷熱ネットワークが張り巡らされれば、上記のような新たなコールドチェーンシステムが実現し、モーダルシフトの拡大による環境負荷低減、氷スラリー保冷車による燃費向上、さらに個別保冷による食品の品質向上が成し遂げられると期待される。

### 6.2.3 店舗

氷スラリー冷却ネットワークによって小型店舗(食料品)の更なる「エネルギー合理化」と「品質の向上」を実現する。

#### ・エネルギー合理化

従来は冷蔵冷却と空調のシステムは異なる冷媒を使用するため冷媒回路が個別分散型となっていた。そのため、3 章で述べた”氷蓄熱”による電力ピークシフトや、”氷スラリー二次冷媒利用”による省エ



ネといった、「エネルギー合理化」の施策をシステム毎に導入する必要がある、店舗全体で十分な効果が得られていなかった。

そこで、氷スラリー冷却ネットワークで冷媒を統一して冷蔵冷却と空調のカスケード利用を行う。これにより、氷スラリーシステムによる「エネルギー合理化」の効果を店舗全体で十分に得ることができる。また、貯氷槽を統合管理することでスケールメリットにより熱ロスを低減して更なる省エネ効果が期待できる。

・品質の向上

国内の小型店舗における氷スラリーの新しい用途として、生鮮品販売時の直接冷却による鮮度保持が挙げられる。これは、アメリカで既に導入されており効果が確認されているが、国内においては未だ認知が不十分で事例が少ない。

氷スラリー冷却網によって氷スラリーが容易に供給可能になれば、直接冷却の導入が普及促進して「品質の向上」が期待できる。

以下に米国での事例を紹介する。



図 6-11 スーパーでの利用例



図 6-12 商品の冷却やディスプレイのための利用例





図 6-13 (冷却+保湿) 効果のための利用例



図 6-14 商品の持ち帰りのための利用例

以上のように米国では、氷スラリーが冷却と同時に保湿などのそれ以外の目的でも使用され、さらには商品のディスプレイや商品の持ち帰りにも利用されている。一方、国内ではまだ実例が少ないが、このような利用例が普及すれば、以下のような様々な利便性をもたらすことが期待される。

- (1) 現状生鮮品はエアによる冷却なので、必然的に、場所毎に鮮度が違う状況が生じてしまう。一方、氷スラリーを利用すれば、生鮮品のより長時間にわたる鮮度保持効果が期待される。
- (2) 氷スラリーは配管で運ばれるので、衛生的な氷を安価で安全に運べて、しかも店舗としては、省人化を図れる。
- (3) 生鮮品のおいてある部屋に氷スラリーの冷却効果が発揮されて、その部屋の冷房が不要となり、店舗の運営経費の削減を図れる。
- (4) 氷スラリーを野外（電力不要）でのイベントでも生鮮品の販売に使うことができるので、イベントの集客力を向上させることができる。
- (5) 大規模な店舗での生鮮品販売に採用すれば、大幅な省エネを実現できる。
- (6) 氷スラリー中の氷が売り場のゲージに残っていれば、消費者にとっては生鮮品が冷却されている状況が一目で確認できるという利便性がある。
- (7) 高い鮮度が長時間維持できるので、商品の売れ残りに伴う廃棄が激減する。

全国に張り巡らされた冷熱ネットワークから供給される氷スラリーを利用すれば、上記利便性とあいまって、全国どこでも、鮮度の良い食品を身近で手軽に、これまでよりは格段に安価に購入することができる。そして、このことが国民の食生活の質を向上させることができる。さらに、廃棄食品が激減すれば、食料自給率の向上にも貢献できる。

#### 6.2.4 火災などの災害

ここでは一例として、火災の消火について言及する。

##### 火災の分類

火災は、可燃物の種類により、消防法により以下のように分類されている。

- ・普通火災 木材、紙などの一般可燃物で一般住宅やビルなどの建築物内部での火災
- ・油火災 ガソリンなどの石油類、食用油、樹脂類などの火災
- ・電気火災 電気室や発電機からの出火で、感電の危険性のある火災
- ・金属火災 マグネシウム、カリウム、ナトリウムなどで引き起こされる火災
- ・ガス火災 都市ガス、プロパンガスなどの可燃性ガスにより引き起こされる火災

また、イギリスにおいても以下のように、同様の分類がなされている。

- ・Class A 木材や布など有機物の固体による火災
- ・Class B 油などの可燃性の液体、固体による火災
- ・Class C LPG、プロパンガスなどの可燃性ガスによる火災
- ・Class D ナトリウム、カリウムなどの金属類による火災
- ・Class E 電気を発火源として、感電の危険性がある火災
- ・Class F 工場などの大規模調理施設における調理油による火災

これらは、火災の種類により消火剤の選定を行う目的で分類されたものであり、それぞれの火災に対して適切な消火剤を使う必要がある。例えば、金属火災の場合には、注水による消火は、火災規模の拡大に繋がり、また、電気火災の場合には、粉末系もしくはガス系消火剤が用いられる。消防庁の統

計によると、火災の半数以上が建築物からであり、さらにそのうち、一般の住宅火災が半数を占めている。一般の住宅火災は、普通火災もしくは Class A の火災に分類され、これらの消火方法としては、放水による消火が一般的である。

#### 消火の原理

火災を消火するための方法として、以下の3つが挙げられる。

- ・ 除去消火 可燃物を取り去って消火する方法
- ・ 窒息消火 酸素の供給を遮断することで消火する方法
- ・ 冷却消火 熱源から熱を奪い、燃焼物を発火点以下にすることで消火する方法
- ・ 抑制消火 燃焼の反応を抑制することにより消火する方法

火災の種類により、適切な消火剤を用いることで、上記のいずれかの作用による消火に至ることとなる。例えば、油火災や電気火災の場合には、二酸化炭素を消火剤としてその窒息効果により消火に至る。また、粉末消火剤やハロゲン化物消火剤では、抑制効果により消火に至ると考えられている。冷却消火に主に用いられる消火剤が水であり、高い比熱と高い気化熱を持ち、入手、供給が容易なことから、普通火災の消火に用いられている。しかしながら、水を消火剤として用いる場合、多量の水を火災源に放射する必要があるため、その水により建築構造物および建物内の設備に被害が生じる。これを水損という。人命救助、火災の延焼防止の観点から、水損が生じることもやむを得ないものと思われるが、消火後の復旧などの観点から、できるだけ放水量を少なく、速やかな消火が望まれている(6-10)。

#### 消火における氷スラリーの優位性

すでに述べたとおり、氷スラリーは、高い蓄熱密度と流動性を持ち合わせている。この特性は、消火剤として優れた性能を発揮するものと考えられる。すなわち、高い蓄熱密度は、水と比較して少ない量で高い冷却作用を有しており、冷却消火の性能が高い。また、同じ熱量を奪うための量が水と比較して少なくなるため、家屋や家財道具などへの水損の低減にも繋がる。これらのことから、氷スラリーは、普通火災、Class A に分類される火災に対して、有効な消火剤になりうるものと考えられる。これらの特徴に着目し、Davies は、氷スラリーを消火剤として利用することを提案している(6-11)。火災の95%以上が、Class A の火災に分類でき、Class A の火災に対して、一般に水が消火剤として利用されている。そこで、氷スラリーを消火剤として用いることにより、消火速度に対して顕著な改善がなされたと述べている。同様に、Bellas も、消火における氷スラリーの優位性を述べている(6-12)。

氷スラリーと同様な形態と考えられる、雪氷を消火剤とする検討が玉越らによって実施されている(6-13)。そこでは、粉碎した氷粒子のみ、氷粒子と水を混合したもの、水を消火剤として消火実験を消火効果について実験的に検討、比較されている。ここでは、氷を含むことによる冷却効果の他、氷粒子が消火対象物に付着することにより、酸素との接触を阻害する遮断効果も期待されている。直径が約0.2mmと1mmの氷粒子と、氷粒子に20%と50%含水させたものを消火剤としている。結果として、氷粒子の対象物への付着に関しては、それほど大きな効果は得られなかったようであるが、冷却効果に対しては、氷のみの場合では、水と比較しても高い消火効果は得られなかった。一方、50%含水させた条件では、水と比較すると急激な温度降下が見られ、氷による冷却効果と水分を含むことによる流動性の高さの相乗効果により、高い消火性能が見られたものと推察できる。すなわち、消火剤としての氷スラリーの優位性を示唆する結果であると考えられる。

将来氷スラリー生成装置を備えた氷スラリースタンドによる冷熱ネットワークが張り巡らされると、現在は、消防車が入ることのできない都市部の密集した地域でも、近くの氷スラリースタンドからその高い流動性により搬送された氷スラリーを既存のポンプなどをそのまま活用して消火に利用できる

ので、氷スラリーが消火活動の主流となる可能性も十分にある。

## 6.2.5 医療

### 氷スラリーの優位性

負傷・疾病に対する応急処置（炎症止め、痛み止め）として氷や水を用いた局部冷却（アイシング）が有効である。例えばスポーツにおける捻挫や打撲に対するアイシングには、ブロック氷の氷水や冷湿布が用いられるが、氷スラリーはこれらに比べ接触性と温度保持性に優れるため、アイシングに氷スラリーを用いることで患部をよりはやく低温まで冷却することができる。脚、手、肘などの患部を浸漬させて冷却する際には、ブロック氷の氷水を用いた場合、患部に触れる部分の水温が下がらず患部が十分に冷えないことがあるが、氷スラリーを用いた場合、氷の比表面積、すなわち水との伝熱面積がブロック氷に比べ格段に大きいため、水温を一様に保ち患部を十分に冷やすことが可能である。

このように、氷スラリーは人体を冷やす用途においても優れており、医療分野においても今後利用範囲が広がる可能性が十分にある。氷スラリーの高い温度維持機能を伴う冷却能力面での優位性が認められることで、アイシング以外にも、外科手術や臓器の低温保存などの多くの用途において、氷スラリーの利用が普及することが期待され、さらには、この普及が全国に波及すれば、臓器移植を含めた様々な医療での地域格差を低減する一助になる。そのためには、氷スラリー生成装置を備えた氷スラリースタンドによる冷熱ネットワークが全国に張り巡らされることが重要となってくる。

### 外科手術への利用

アルゴンヌ国立研究所の Kasza ら(6-14)は、心不全の治療や腎臓の腹腔鏡手術において、臓器の冷却に氷スラリーの利用が有効であることを報告している。その際、最大限に冷却速度を高めるために、氷スラリーを臓器に直接接触させる方法が有望であるが、その場合、氷スラリーの成分は人体に対して完全に無害でなくてはならないため、生理食塩水や代用血液などが用いられる。

心不全の治療においては、血流の停止後 15 分間の間に体温を 4℃下げることが、脳細胞の死滅を抑制するために有効であると言われる。Kasza らの報告によると、氷スラリーにより冷却した血液を脳に循環させることで、この要求を満たす 0.4℃/min 以上の速度で脳を冷却することが可能である。また、腎臓の手術において、常温で血流を止めると臓器の損傷のため手術を 30 分以上続けることはできないが、氷スラリーにより腎臓を 15℃以下まで冷却することで臓器の損傷を抑え 90 分以上の手術時間が確保できるようになると報告されている(6-15,6-16)。その際、腹部にあけた小さな穴から細い配管で氷スラリーを供給することで、開腹を要しない腹腔鏡手術が可能となり、患者のダメージを減らすことができる。

### 医療用途に適する氷スラリーに関する検討

上記のように、医療用途においても氷スラリーの利用は有望である。しかし、医療分野において、氷スラリーが標準的に用いられるようになるためには、臓器自体にダメージを与えないような小さな球形の氷を含む氷スラリーを連続的に生産し、簡単に所望の場所に供給することができる装置の整備が必要である。

医療用途に適する氷スラリーに関する研究の一例として、麓ら(6-17,6-18)により、生理食塩水を用いて人体に無害な氷スラリーを安定的に生成する検討がなされている。この研究の特徴は、加圧状態からの急激な圧力減少により水溶液の凝固点上がり、凝固しやすくなることを利用した **Pressure shift freezing** により氷スラリーを生成する点である。この方法は、いわゆる過冷却方式であるため、掻き取り方式で懸念される金属刃の氷スラリーへの混入事故の可能性を排除しており安全面に優れる。また、圧力変化による水溶液の凝固点の変化を利用した手法であるため、不安定な過冷却状態をとまなう従来の（圧力変化のない）過冷却方式のように不慮の過冷却解消により運転が停止してしまう事故が生じないことが利点である。

この他にも、氷スラリーの生成、流動、貯蔵などに関する多くの研究がなされており、有用な知見が得られている。しかし、事故の許されない医療分野に応用するためには、氷スラリーの性質をより詳細に理解する必要がある、基礎研究においてもさらなる検討が求められる。

### 6.3 想定される未来社会

図 6-15 に氷スラリーの冷熱ネットワークの構築によって期待される未来社会のイメージを示す。図 6-15 に示すように、氷スラリーを社会インフラと位置付け、様々な場所や目的で容易に氷スラリーを利用することを目的として、ターミナル駅、港湾、空港、市街地等に氷スラリー生成装置を備えた氷スラリースタンド網目のように配置することで構築された氷スラリー冷熱ネットワークのある未来社会では、以下に示すようなこれまでにない多くの利便性を我々にもたらすことが可能となる。

例えば、鉄道/船舶での輸送中に冷蔵・冷却されながらターミナル駅や港湾まで運ばれた氷スラリーで生鮮食品等を、氷スラリーによる冷蔵が可能なトラックにより消費者まで直送するという、モーダルシフトを物流の根幹とした氷スラリーを利用する冷蔵によるコールドチェーンが実現されると、鉄道/船舶が大量輸送が可能のため、高付加価値で多品種の生鮮食品等を大量に消費地に輸送することが可能となる。その結果、たとえ産地から遠く離れた大消費地の消費者も、産地と変わらぬ鮮度で、かつ、比較的安価に産直品を食べることができる。また、生産者も消費者と直接取引ができるので、価格も市場ではなく生産者が決定できるので、日本の第3次産業従事者の生活レベルも格段に向上することが考えられる。いわば、モーダルシフトを物流の根幹とした氷スラリーを利用する冷蔵によるコールドチェーンは、大都市と地方の地理的距離を大幅に縮小できる。つまり、氷スラリーを利用した

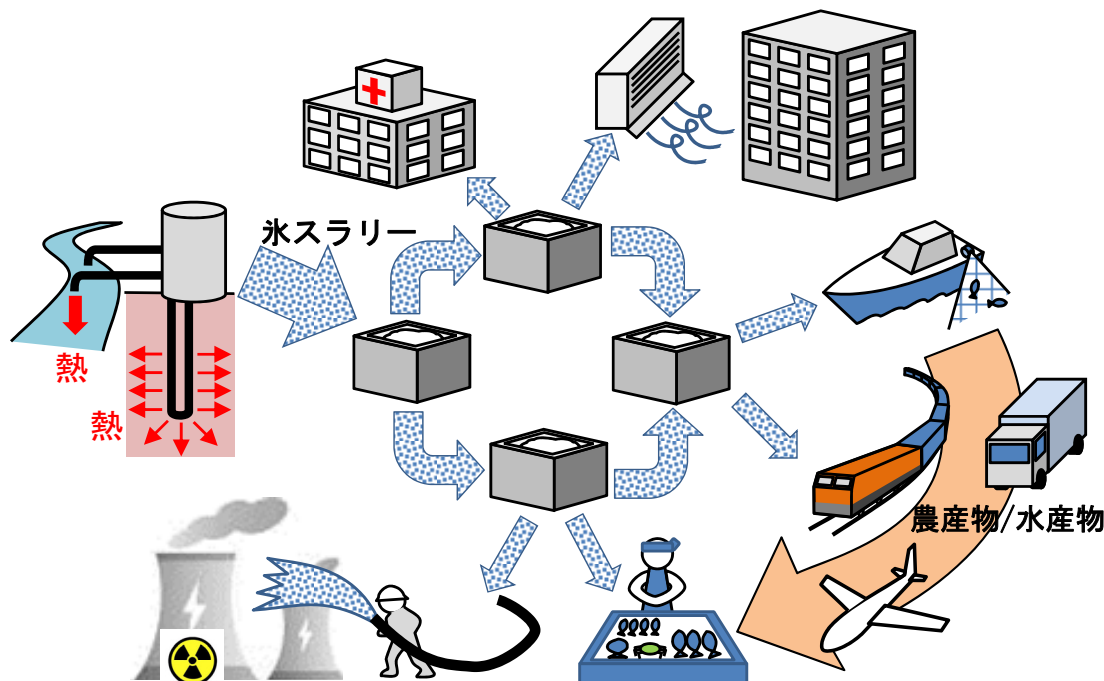


図 6-15 氷スラリーの冷熱ネットワークの構築によって期待される未来社会



冷蔵によるコールドチェーンの実現は、現在の日本の最大の課題である“地方創生”のための有効な手段となる。また、このシステムを諸外国にも展開できれば、外国の各都市にも日本と同様、日本の高付加価値な生鮮食品等を消費者まで直送輸送できる可能性が出てくる。つまり、日本の多くの生産地の高付加価値な生鮮食品等を氷スラリーにより鮮度保持しながら、鉄道/船舶・飛行機・トラックで直接外国の家庭に日本の生産者が価格設定した商品を送ることも夢ではなくなる。また、6.2.1でも述べたが、このことが人々の生活をより便利にしつつ、モーダルシフトによる大幅なCO<sub>2</sub>排出抑制を同時に実現し、結果として将来の異常気象の抑制に大きな貢献できると考えられる。

例えば、コンビニやスーパーの様な小売店で氷スラリーを利用する場合、ヒートポンプと組み合わせた小型の氷スラリー生成システムを設置することが考えられる。氷スラリーの高い蓄熱能力を利用して、電力が比較的low価格な深夜帯に氷スラリーを生成・貯蔵する。夏場には、氷スラリーをポンプにより、飲料や弁当などが入っている陳列ケース内で循環させることで、対象商品の冷蔵を行う。その後、氷スラリーは融解によって低温の水（5~7℃程度）になるので、小売店の冷房空調にカスケード利用する。このようなカスケード利用により、夏場は店舗内の対象商品の全部または一部の冷蔵と室内の冷房空調を氷スラリーの冷熱で賄うことが可能となる。一方、冬場でもヒートポンプの高温熱源を利用してお湯も作り店舗内の暖房に利用し、同時に氷スラリーを店舗内の対象商品の全部または一部の冷蔵に利用する。以上の様な利用方法により、店舗の運営コストの抑制が期待され、さらにヒートポンプを利用するので省エネ効果も高い。店舗の運営コストの抑制効果に加え、地方自治体が省エネ効果の高い店舗に補助金等のインセンティブを与えることができれば、従来よりも、コンビニ過疎地帯への出店がしやすくなり、老人などの地方の買い物難民を減らすことができ、独り暮らしでも健康で暮らせる老人を増やすことも期待される。また、地震等災害時での長期の停電においても、残存している氷スラリーを要冷蔵品の冷蔵を行う陳列ケースのみに循環することで、僅かな電力で食品を低温保持可能となり、廃棄商品の減少にも資する。

現在日本での脳死での臓器移植は、日本人の死生観により欧米より格段に少なく、場合によっては、臓器移植が実現するまで、例えば、腎臓では平均で15年程度かかるのが現状であり、心臓や肺なども平均で2年以上かかり、移植を待ちながら残念ながら死亡する人も数多くいる。そこで、再生医療が確立する前段階として、現在脳死での臓器移植は、臓器の保存期間をできるだけ延ばすことが重要となる。その方法として、臓器の凍結保存も考えられるが、例えば、移植対象の心臓、肺、腎臓や肝臓の様な臓器はその容積に比べ表面積が小さすぎ、細胞内でガラス化するほどの高速冷却は物理的に困難である。そこで、現状では、臓器の冷蔵保存が取り得る唯一の手段である。現段階では、臓器を取り出してから移植までの時間は臓器によるが概ね半日から1日程度が限界であり、時間が長くなるほど臓器へのダメージが大きくなり、その結果、移植できなくなる可能性もある。そこで、氷スラリーを利用することが考えられる。この場合、浸透圧差による細胞収縮を防止するために、その溶液濃度が生理食塩水0.9mass%を用いることが想定される。氷スラリーによる急速冷却と温度変化の抑制効果により、臓器へのダメージを抑制できる可能性がある。また、臓器をある程度の期間いわゆる“鮮度”を保って冷蔵保存できれば、臓器取り出しから移植までの時間を延ばす可能性もある。さらに、氷自体に臓器の劣化をより抑制できる何らかの機能を付加できれば、さらに、臓器の長期保存が可能となり、臓器の有効利用が一層促進され、日本での臓器不足の解消に貢献できる。また、移植のみならず、出血を抑えるため臓器への血流を止めて行う手術においても、臓器の生体反応を抑制するために臓器の低温化を行う場合がある。これにより、術後の予後を格段に改善できる可能性がある。そして、氷粒の径をできるだけ小さく、それらの分布の均一化や粒形状も球形化を促進する氷スラリー製造方法に関する研究も現在進んでおり、そう遠くない将来には、その様な氷スラリーによる冷却をしながらの手術も、現在よりも格段に対象の広がった様々な臓器に対して施されるようになり、より患者への

負担が小さくなると考えられる。

2012.3.11の東日本大震災での福島原発の事故の初期段階では、原子炉内の冷却に大量の海水が長期にわたって使用されたが、結局は炉心内の燃料棒はメルトダウンを起こし、炉心の外まで到達するという世界で初めてのいわゆる“チャイナシンドローム”により、大量の放射線を大気中に放出することになった。しかも、炉心の外にあるメルトダウンした燃料棒(溶解デブリ)の取り出し技術も確立されておらず、その結果、廃炉までの工程さえ明確な見通しが立たないまま、今後長期にわたって、日本国民、特に福島県民にとっては、大変な負担が強いられてことになる。これらの原因の一つに海水による燃料棒の初期冷却に問題があったことが強く推測される。このような場合は、通常の火災消火のような空気遮断ではなく、先ず、対象物の冷却が重要になる。つまり、燃料棒の温度をできるだけ素早く下げることが重要であった。仮に、このような事態に氷スラリーが利用できれば、氷スラリー自体の温度(0℃以下)と氷の大きな融解潜熱の吸熱効果により、海水よりも少量で燃料棒を急速に冷却できたと考えられる。さらに、氷スラリーを使う優位性は、現場より離れた放射線量の低い場所で氷スラリーを生成し、それをポンプで放射線量の高い現場まで搬送し利用できることであり、今回の福島原発での燃料棒の冷却こそ、この優位性は十分に発揮できたはずである。もし、投入された海水と同量の氷スラリーを初期冷却の段階で投入できていれば、燃料棒のメルトダウンは防げた可能性もあり、そうなれば、熔融燃料棒の炉心の外への流出や大量の放射線の大気への放出も抑制できた。その結果、原子炉自体の修復が可能となるか、たとえ廃炉になったとしてもそこまでの工程を格段に短縮でき、国民の負担も大幅に軽減できたと考えられる。また、今回の事故で大量に発生した汚染水を減少させることで、事故後に大きな問題となった汚染水流出による海洋放射能汚染を抑制し、汚染水処理費用を低減することもありえた。これら教訓から、各原発において氷スラリー製造・貯蔵設備の併設や近隣の氷スラリースタンドからの緊急搬送システムの構築は、危機管理の観点から日本国民に安全・安心をもたらすことになる。

#### 参考文献

- (6-1) モーダルシフト化率の動向分析，モーダルシフト促進のための要因分析調査委員会，2007.3，1.
- (6-2) 鉄・道・船舶へのモーダルシフトの推進等に向けた取組，モーダルシフト等推進官民協議会 中間取りまとめ，2011.4，7-9，10-12.
- (6-3) モーダルシフト事例集，国土交通省中国運輸局，2007.1
- (6-4) 平成19年度高知県水産試験場事業報告 P133
- (6-5) 全国貨物純流動調査(物流センサス)報告，国土交通省，2012.3，46
- (6-6) 全国貨物純流動調査(物流センサス)報告書(集計表)，国土交通省，2012.3，22-23
- (6-7) 2010年度普通トラック市場動向調査，一般社団法人日本自動車工業会，2011.3，13，15
- (6-8) 自動車輸送統計年報(平成25年度分)，国土交通省総合政策局交通経済統計調査室，2014.10，12
- (6-9) 特許第4475584【0036】
- (6-10) 保野健治郎，難波義郎，大森豊裕，北条康正，建物火災の消火と水損面積に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，422，135-143，1991
- (6-11) T.W. Davies, Slurry ice as a heat transfer fluid with a large number of application domains, International Journal of Refrigeration, 28, 108-114, 2005
- (6-12) I. Bellas, S.A. Tassou, Present and future applications of ice slurries, International Journal of Refrigeration, 28, 115-121, 2005
- (6-13) 玉越孝一，飯田明彦，根本昌平，菅原洋，雪氷消火システムの調査検証(第1報)，消防技術安全所報，43，28-28，2006
- (6-14) M. Kauffeld, M.J. Wang, V. Goldstein, K.E. Kasza, Ice slurry applications, International Journal of Refrigeration, 33(8), 1491-1505, 2010.
- (6-15) <http://www.anl.gov/articles/ice-slurry-technology-can-save-heart-attack-victims-surgery-patients>, 2015.2.25
- (6-16) <http://www.ne.anl.gov/capabilities/sinde/biomed/>, 2015.2.25

- (6-17) 麓耕二, 佐藤敏貴, 川南剛, 稲村隆夫, 城田農, Pressure shift freezing を利用した氷スラリー連続生成に関する基礎的研究, 日本冷凍空調学会論文集, 30(3), 289-295, (2013).
- (6-18) K. Fumoto, T. Sato, T. Kawanami, T. Inamura, M. Shirota, Ice slurry generator using freezing-point depression by pressurization – Case of low-concentration NaCl aqueous solution, International Journal of Refrigeration, 36 (3), 795-800, 2013.





# 付録



## 氷スラリーの利用 Q&A

- Q1. 氷スラリーとは何ですか  
Q2. 氷スラリーの氷濃度とは何ですか  
Q3. 氷スラリーの濃度による違いは何ですか  
Q4. 氷スラリーは何が良いのですか. 0°Cの冷水とは何が違うのですか  
Q5. どのようなブラインが使用されますか  
Q6. 氷スラリーの貯蔵は可能でしょうか  
Q7. 何°Cの氷まで作れますか  
Q8. どんな分野で活躍していますか. また, どの分野での導入が期待できますか  
Q9. どのような用途で利用できますか  
Q10. 氷スラリーの搬送は可能でしょうか  
Q11. どのような製氷方式がありますか  
Q12. イニシャルコストの回収はどのように考えていますか  
Q13. 氷スラリー利用の応用分野は何ですか

Q1. 氷スラリーとは何ですか

A1. 流動性のある氷水のことで, 用いる水は 2w%以上のブラインなどで, ブライン濃度や含まれる氷の濃度で性質が異なります.

Q2. 氷スラリーの氷濃度とは何ですか

A2. 氷スラリー中に含まれる氷の割合で, 通常重量%で表記します. 氷濃度を IPF とも言います. 例えば, 氷濃度 20%の氷スラリー10kg 中には, 氷が 2kg 含まれています.

Q3. 氷スラリーの濃度による違いは何ですか

A3. 氷濃度と状態は大まかに以下のようになっています.  
通常は流動性のある 30%以下の状態で使用します.

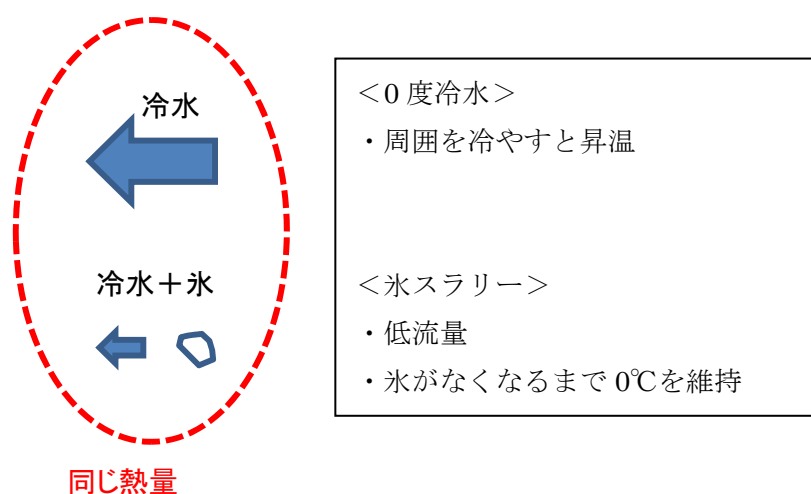
氷濃度	概要
0~20%	白っぽい液。水とほぼ同様の挙動を示す
~30%	流動性のあるシャーベット
~50%	大部分が氷となり、流動性がなくなる

Q4. 氷スラリーは何が良いのですか. 0°Cの冷水とは何が違うのですか

A4. 氷 1kg は融ける際に 333.5KJ の熱を周囲から奪います(清水の場合). これは, 1kg の水を約 80℃冷やす熱に相当します. 氷スラリーは, 氷を含むので大きな冷熱源として機能します.

0℃の冷水は周囲を冷やすと 1℃, 2℃・・・と温度が上昇し冷熱源としての性能が低下しますが, 氷スラリーは冷水中に氷が存在するので, 氷がなくなるまで 0℃の熱媒として機能します. また, 氷が液中に細かく分散しているため, 冷却対象物と多く接触することになり, 対象物を即座に冷却し約 0℃の状態に保つことができます. ブラインを含んだ氷では, 氷になる温度が低下するため, 0℃以下の状態で冷却対象物を保存することが可能となります(※氷生成による濃度変化により一定温度にはなりません).

また, 氷スラリーを用いると, 水だけの場合より少ない量で同じだけ冷やせるので, 運ぶ力が小さくて済み, 初期のポンプ代, 運転費, 配管代, 施工費など, その分だけ費用が小さくなります.



Q5. どのようなブラインが使用されますか

A5. 主に以下のようなものが使用されます.

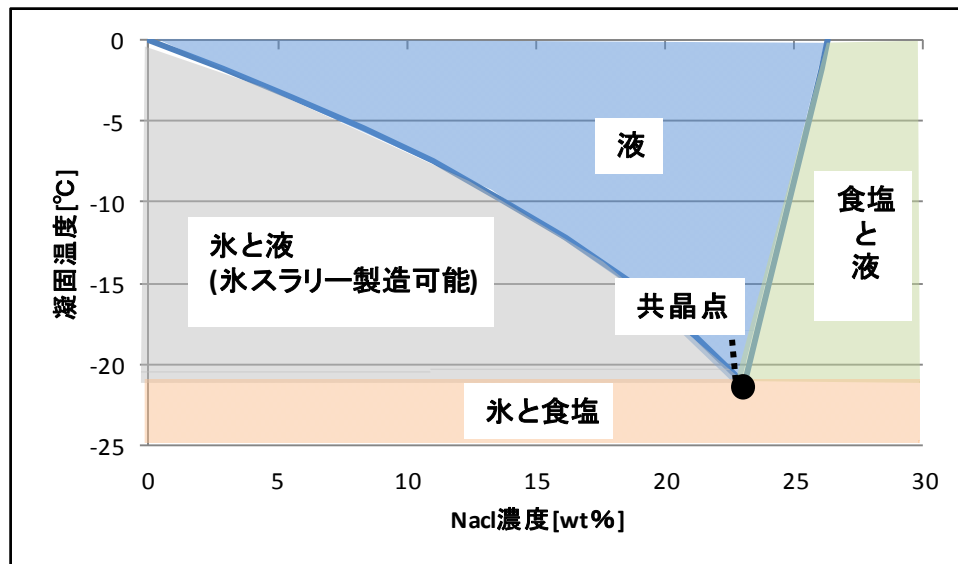
無機ブライン	塩化ナトリウム 塩化カルシウム
有機ブライン	エタノール プロピレングリコール エチレングリコール

Q6. 氷スラリーの貯蔵は可能でしょうか

A6. 可能です. 攪拌しながらの貯蔵等が行われています. 貯蔵タンク容積の 2~3 割程度の氷を貯蔵できます. 攪拌をせずに流れのない状態にしたり, 氷濃度を高くすると氷スラリーの流動性が失われます.

Q7. 何°Cの氷まで作れますか

A7. ブラインと水を混ぜた際の共晶点まで氷スラリーを作ることができます。共晶点温度以下では氷と液ではなく、氷のみの状態になるため流動性を失います。以下の図はブラインに塩化ナトリウムを用いた場合の図ですが、通常では図の「氷と液」の濃度・温度域で氷スラリーを製造します。



Q8. どんな分野で活躍していますか。また、どんな分野での導入が期待できますか

A8. 漁船や漁港での魚の保存に利用されている例があります。低温保存の観点から、食品保存・医薬分野での導入が期待されます。

Q9. どのような用途で利用できますか

A9. あらかじめボックスに氷スラリーを入れておき、生鮮品収穫後の予冷に利用できます。さらに、氷スラリーを追加することで、保冷することができます。また、倉庫などで保存に利用することも可能です。

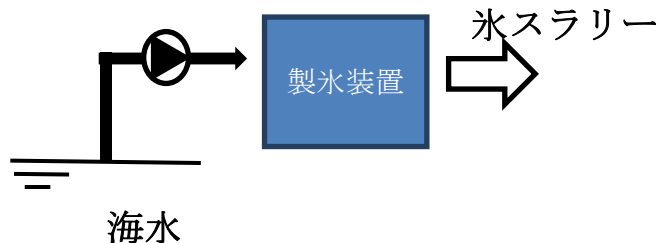
Q10. 氷スラリーの搬送は可能でしょうか

A10. 可能です。ポンプを用いて搬送します。氷濃度が低ければ、ほぼ水と同様の扱いとなります。氷濃度(IPF)が30%程度まで流動性があります。

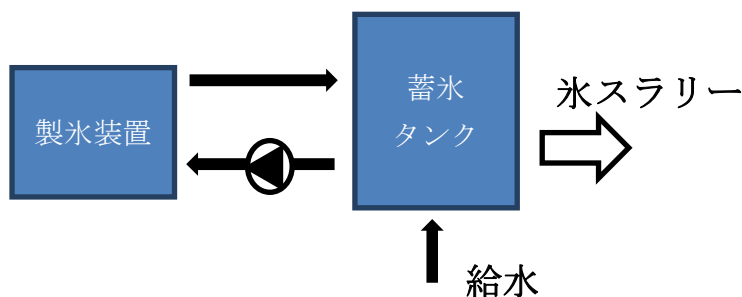
Q11. どのような製氷方式がありますか

A11. 過冷却方式、掻き取り方式、ハーベスト方式など多数の方式があります。それぞれ特徴がありますが、流動性のある氷スラリーを作るには掻き取り方式が適しています。0°Cでの利用や添加物を使用

したくない場合には過冷却方式を用いることも可能です。氷スラリーとして使用する方法は例として以下のようなものが考えられます。



海水から氷スラリーを製造する方式



氷を貯めて使う方式

Q12. イニシャルコストの回収はどのように考えていますか

A12. 例えば砕氷を使用している漁船の場合、その氷の購入金額を1万円/tonと仮定すると、300万円のスラリーアイス製造装置を購入した場合、300tonの氷代と同じになるので300tonの氷を消費する期間がイニシャルコストの回収期間になります。年間150tonの氷を使用している客先であれば、初期イニシャルコストは2年で回収できることになります。上記の例は漁船ですが、氷を購入、運搬している客先であれば、水から氷スラリーを製造でき、配管内を流すことができるので、購入費、運搬費をイニシャルコストに充てて回収するといった具合になります。

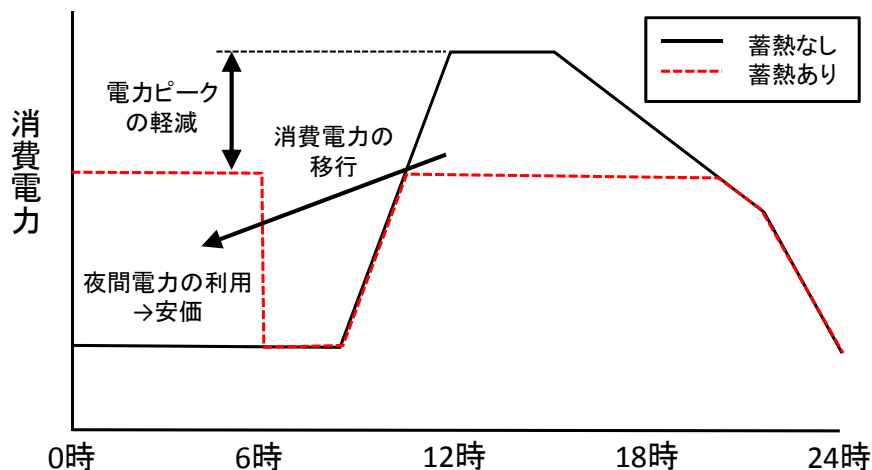
Q13. 氷スラリー利用の応用分野は何ですか

A13. 現在までで発案されている応用分野は下記の通りです。

- ①蓄熱、空調分野での利用
- ②食品等の直接冷却媒体としての利用
- ③冷却が必要な場所への搬送

### ① 蓄熱，空調分野での利用

夜間にスラリーアイスをつタンクの中に貯めて日中に融かして冷熱を取り出すと，電力のピークシフトができます。概略は下図のようであり，電力ピークの軽減と夜間電力を利用することにより，電気代が安価になります。



### ② 食品等の直接冷却媒体としての利用

鮮度が重要な食品などを氷スラリー中に保存する方法が考えられます。漁船に氷スラリー製造装置を搭載し魚介類に直接使用する例や，漁港で水道をひねると氷スラリーが出るといった利用例があります。水産関連の情報では，以下のようなものがあります。

- ・スラリーアイスと清水を混合したもので冷却した魚介類の保持状態が海水氷よりも良好であった。
- ・海水から製造したスラリーアイスから分離した液相が，干物やヒラキに使用する冷塩水として最適であった。

他にも，生鮮品全般への利用が可能と考えられます。

### ③ 冷却が必要な場所への搬送

冷却が必要な場所や配送時の利用が考えられます。具体的には氷スラリーの貯蔵庫を作っておき，必要な場所へホースや配管を伸ばし，利用します。特に，一時的な冷却を行う場合や対象が温まるのを極力避けたい場合に有効です。





## 第二部



## 7. 氷スラリーの生成方法

現在、実用化されているダイナミック型氷蓄熱システムの製氷方法は、過冷却方式、掻き取り方式、ハーベスト方式の3種類に分類される(7-1, 7-2). 本章では、これらの製氷方式を利用する際に考慮すべき特徴について述べる. また、その他の試験的な製氷方式についてもいくつか言及する.

### 7.1 過冷却方式

水を熱交換器により過冷却状態まで冷却し、その過冷却を解除することで微細な氷粒子を生成する方式を過冷却式製氷と呼ぶ. 図 7-1 に開放型過冷却方式製氷の概要を示す(7-3). 蓄氷タンクからの水は、氷粒子を除去するためフィルターを通過し、さらに微細な氷粒子を融解除去するためのヒーターで僅かに加熱される. その後、冷却部(図中の Cooling section)で過冷却状態まで冷却された水は、熱交換器から過冷却解除部(図中の Ice forming section)へ放出された後、壁面への衝突や既生成の氷によって過冷却が解除され、氷スラリーとなる. 一般的に用いられている過冷却水温度は $-2^{\circ}\text{C}$ 程度であり、この場合、氷の質量比が約2.5%の氷スラリーとして得ることができる. 過冷度2Kのエタノール水溶液を過冷却解除後、攪拌して得られる氷粒子を図 7-2 に示す(7-4). 水溶液濃度や攪拌条件に依存するが、低濃度の場合平均粒子径は $500\mu\text{m}$ 程度であり、純水の場合さらに若干大きい粒子径となる.

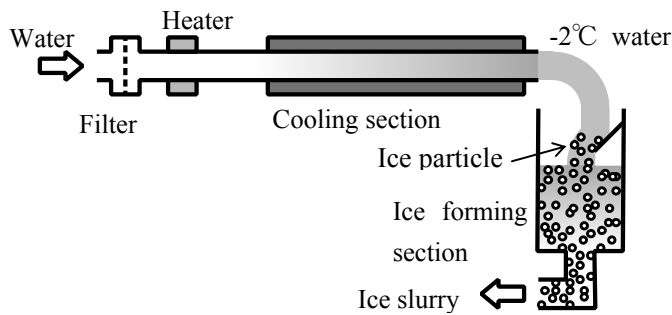


図 7-1 落下式過冷却方式

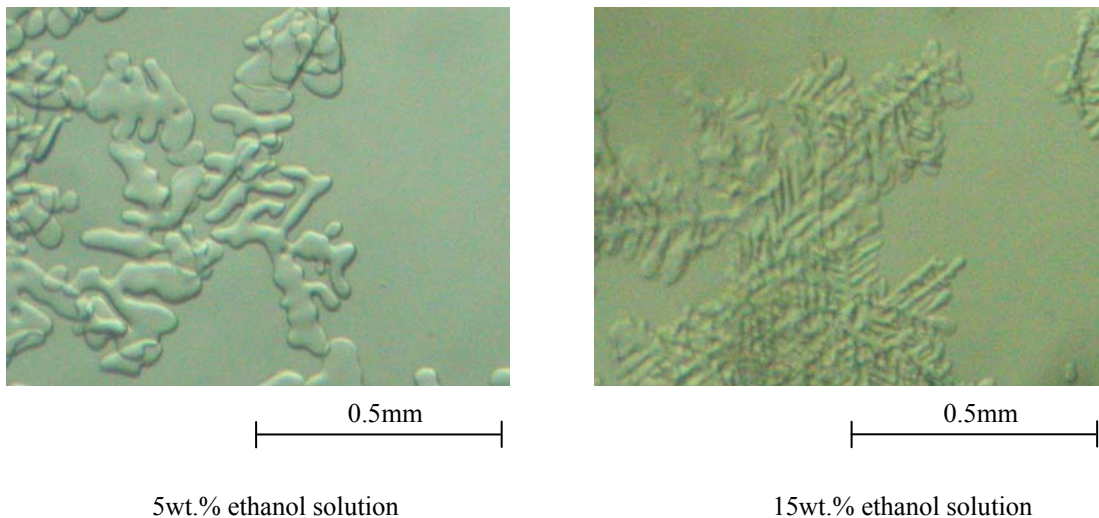


図 7-2 過冷度2Kの水溶液を解除後攪拌した氷結晶(7-4)

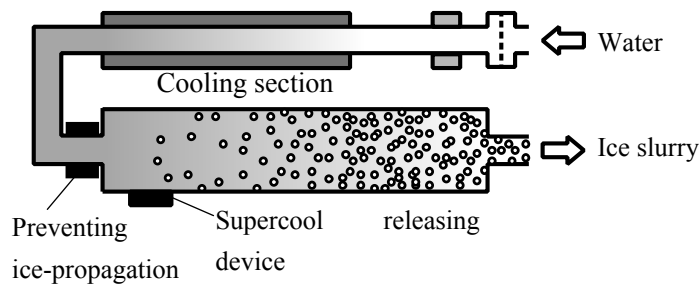


図 7-3 密閉型過冷却方式

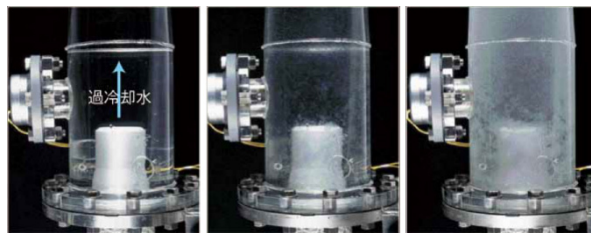


図 7-4 新菱冷熱工業「トランスペット」(7-6)

過冷却の解除は確率的に発生する現象である為(7-5)、熱交換器内に氷粒子や異物が混入または過剰な冷却が行われると熱交換器内で過冷却が解除され氷層が形成され、製氷停止に至る。この為、冷却面の温度管理が重要となる。また、冷却経路並列化による完全停止の回避や熱交換器加熱プロセスによる停止時間短縮が図られる。用いられる水は添加物等が不要であり清水、水溶液いずれでも製氷が可能であるものの、過冷却維持の為に一定程度の異物除去が必要となる。

上述の開放型では冷却部と過冷却解除部間の落差や過冷却解除部で生成されたスラリーの搬送方法が装置設置の自由度を低下させ、酸素溶解による配管腐食などの問題が生じる。そこで、現在では図 7-3 に示すような密閉型といわれるシステムが主に採用されている。商用化されているシステムで氷スラリーが生成されている様子を図 7-4 に示す。

しかし、この密閉型では、冷却部と過冷却解除部間を連結する固体壁面が過冷却水に曝されている為、固体壁面に沿って氷が冷却部へ伝播する可能性が生じる。これを回避するために、壁面材質の選択、壁面加熱(7-7)、温水膜(7-8, 7-9)などの技術が用いられている。

また、過冷却が維持された状態で循環する水が過冷却解除部より下流に達すると、壁面に氷が付着し、場合によっては管閉塞に至る。特に、運転開始直後の過冷却解除部には氷粒子が存在しないためその可能性が高くなる。開放型の場合は壁面への衝突により過冷却が解除されるが、密閉型では確実に氷核を発生させる技術が必要となる。そこで、超音波(7-10)、機械的衝撃(7-11)、気泡混入(7-12)などの手法が用いられている。その他、電場付与(7-13)、氷核生成物質なども有効であるとの報告もある。また、過冷却解除部では、限られたスペースで過冷却水を氷に変換する為、その管形状や流動状態の考慮が必要となる。

このシステムは、主に大規模な氷蓄熱で利用されている。特に、氷蓄熱システムの改修には、既存水槽をそのまま利用して、蓄熱容量を増加することが可能である。

## 7.2 かき取り方式

冷却面上に生成した氷を冷却面に沿って移動する刃などで剥離することで製氷する方法をかき取り式製氷と呼ぶ。リキッドアイス、クリスタルリキッドアイスとも呼ばれている(7-1, 7-2, 7-14, 7-15, 7-16)。従来、食品加工や高粘度の物質の冷却などで用いられていた Scraped surface 式熱交換器を水溶液の凝

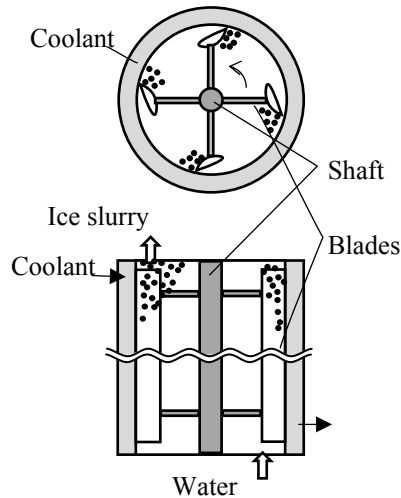


図 7-5 掻き取り式概念図

固に利用した手法である。一般的な構造を図 7-5 に示す。二重管円筒の内管に水溶液を供給し、外管の冷媒によって内管壁を介して冷却する。内管内側の冷却面では微細な氷が形成されるが、直ちに回転刃（図中の **Blades**）によって冷却面から除去される。内管の一端から水溶液を供給することで生成された氷は他端から氷スラリーとして排出される。その氷粒子径は、水溶液濃度に大きく依存するが数 10~数 100 $\mu\text{m}$  程度である(7-17)。水溶液濃度が低い、または、冷却速度が高いと氷粒子が冷却面に固着し、回転刃の駆動負荷が増加する。このため、一定濃度以上の水溶液である必要があり、通常、清水での製氷は不可能である。このような冷却面での水溶液凝固により生成した氷層の剥離力についてはいくつかの報告がなされている(7-18, 7-19)。また、高濃度かつ低冷却速度条件では、回転刃を柔軟な材質または刃ではなく棒形状を用いることも可能であるとの報告がある(7-20)。氷スラリーの用途により、塩化ナトリウム、エタノール、エチレングリコール、プロピレングリコール、尿素などの水溶液が用いられる。溶質の濃度は、後の章で述べる氷スラリー利用温度や氷の生成・融解に伴う濃度変動を考慮に入れて決定しなければならない。上述の過冷却式と比較すると、低濃度の条件でなければ温度管理が容易であり、低コスト化が可能である。

この方式は大規模な氷蓄熱でも利用されるが、鮮魚の冷却・保冷用に塩水の氷スラリーを生成する装置に利用されている。

### 7.3 ハーベスト方式

流下水や散水を冷却面で凍結させ、生成した氷層を冷却面の一時的な加熱により剥落させて板状の氷を得る方法はハーベスト方式と呼ばれている。図 7-6 の左図で示すように垂直なプレート状蒸発器の両面に水を散水し、液膜状として下方に流れる間に氷層を形成する。氷層が所定の厚さになったところで、蒸発器にホットガスを流し、氷層を剥落させる。落下の衝撃で氷層は粉碎し約数 10mm 程度の氷塊となる。純水及び水溶液いずれでも使用することが可能である。前述の 2 つの方式と比較すると、凍結閉塞などのシステムの停止は発生しないため、温度管理が容易で可動部がないことから、低コスト化が可能であり、保守管理も容易である。しかし、生成される氷塊が大きいため、流動搬送が困難である。

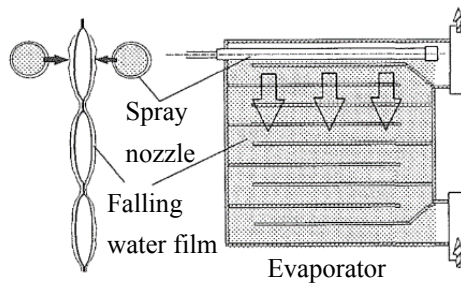
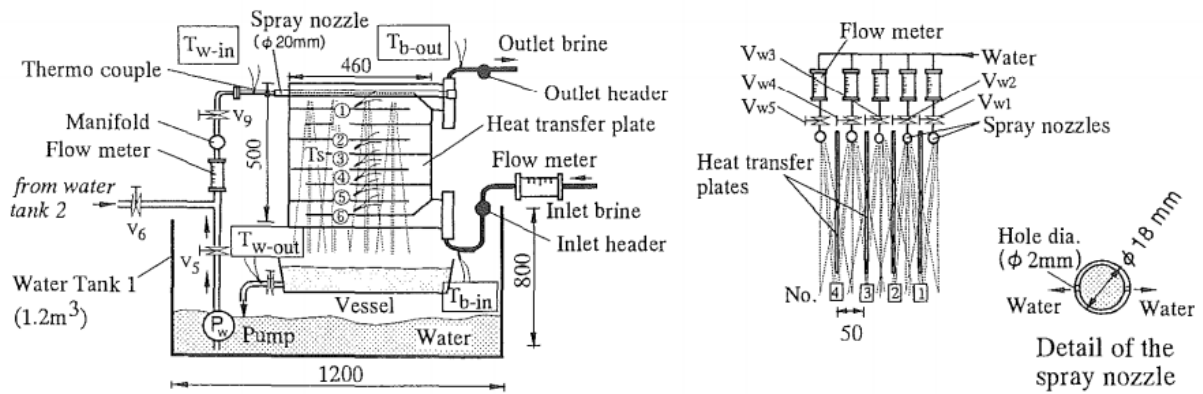


図 7-6 ハーベスト式(7-21)

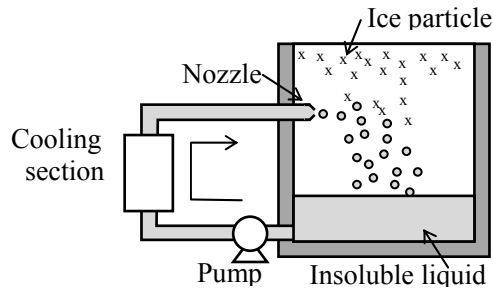


図 7-7 不溶不凍液直接冷却

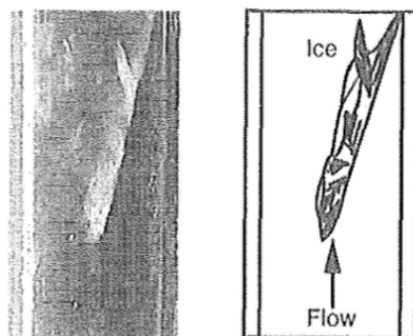
## 7.4 その他の試験的な製氷方法

### 7.4.1 直接接触冷却方式

水に対し不溶な冷媒を  $0^{\circ}\text{C}$ 以下に冷却し、その冷媒を液滴または気泡として水に直接接触させることで冷却し、氷スラリーを得ることが可能である。例えば、水より密度が高い液体であるフロリナートは、図 7-7 のような装置で氷スラリーが得られるとの報告がある(7-22, 7-23)。また、気液相変化を伴うブタンなどの冷媒を下方から供給する方法も検討された(7-24)。しかし、氷への不溶液の付着や取り込みによる氷-冷媒の分離の困難性、閉塞回避のための冷媒流量や温度管理が課題となる。

### 7.4.2 浮力、流れせん断剥離

かき取り式のシステムにおいて、更なる高濃度および低冷却速度の条件では、回転刃が不要となり、



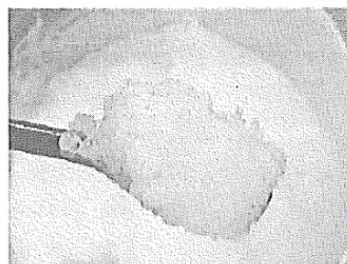
(b) After ice removal

Ice formation and removal phenomena,  $C=10\text{wt}\%$ ,  
 $u_m=0.092\text{m/s}$ ,  $T_w=-14.5^\circ\text{C}$ .

図 7-8 冷却管内で生成された氷層の剥離(7-25)



Ice slurry (W/O Emulsion, Lump oil (9:1),  
 IPF: 23.8%)



Ice slurry (W/O Emulsion, Lump oil (9:1),  
 IPF: 90.0%)

図 7-9 水-油エマルジョンの冷却によって得られた氷スラリー(7-28)

水溶液循環流によるせん断力、さらには氷の浮力のみで冷却面から氷を剥離することが可能となることが確認されている(7-25, 7-26). これらは簡素なシステムである利点を持つが、冷却速度の制限が厳しいため、大規模化が困難である.

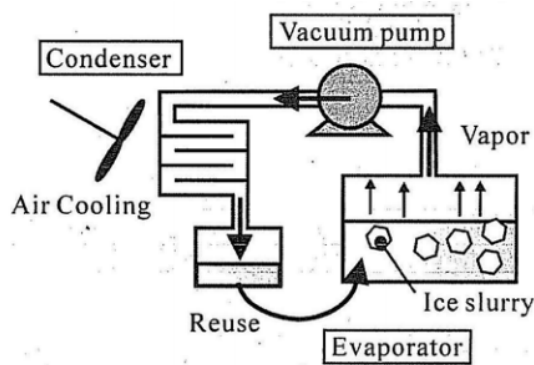
#### 7.4.3 エマルジョン

水や水溶液の代わりに水-油エマルジョンを二重冷却管(7-27)や攪拌冷却水槽(7-28)で冷却すると、冷却面への氷の付着を抑制しつつ、ほぼ  $0^\circ\text{C}$  の凝固点の氷を生成することが可能である. 生成される氷は、 $1\sim 4\text{ mm}$  程度の球形に近い粒子が得られる. 油量が  $10\%$  程度でも製氷が可能であり、氷の含有率が高い条件でも壁面付着が発生しない利点があるものの、油含有により利用範囲が限定され、エマルジョンの安定性などに課題がある.

#### 7.4.4 減圧、吸収式

減圧下で水または水溶液を蒸発させ、蒸発潜熱の放出に伴う冷却により水から微細な氷を生成する手法の検討がいくつかなされている(7-29, 7-30, 7-31). この手法は二次的な冷媒を使用せず水から直接、動力による冷却が可能であり、冷却面への氷の付着が発生しない利点がある. また、吸収式冷凍機(7-32)と組み合わせることにより、廃熱や太陽熱を利用することが可能であるものの、効率やシステムの複





Schematic diagram of a system to produce ice slurry using ethanol solution

図 7-10 減圧式氷スラリー生成システム概念図(7-30)

表 2-1 各種製氷方式の特徴

	氷粒子径	コスト	清水使用	装置規模	備考
過冷却方式	数 100 $\mu\text{m}$	高	可	大	小規模不向き
かき取り方式	50 $\mu\text{m}$ ～	中	不可	小～	要水溶液
ハーベスト方式	10 mm～	中	可	小～	粒子径大

雑さなどの課題が残されている。

#### 7.4.5 加圧による融点上昇

水を加圧すると 1 MPa あたり約 0.076 K の凝固点降下が生じる。この現象を利用し、加圧状態で水を常圧の凝固点以下まで冷却し、大気圧に戻すことで氷スラリーを生成する方法は、冷却面への氷の付着が発生せずに安定なシステムが構築できる可能性がある。15MPa の加圧状態で水溶液を冷却し、常圧に戻すことで氷スラリーを生成したとの報告がなされている(7-33)。

#### 7.5 まとめ

実用化されている 3 種類の製氷方法の特徴を表 2-1 に示す。各製氷方法それぞれ長所短所を有するため、その用途・目的に応じて選択しなければならない。特に、流動性の高い氷スラリーが必要な場合ではハーベスト方式は除外され、中・大規模で清水を用いる場合は過冷却方式、その他はかき取り方式を採用することが推奨される。

#### 参考文献

- (7-1) 大平昭義, 冷論 21(4) 285 (2004)
- (7-2) S. FUKUSAKO Shoichiro, Y. KOZAWA, M. YAMADA, M. TANINO 日本冷凍空調学会論文集 17(4), 1-25, 2000-11-01
- (7-3) 守屋 充, 谷野 正幸, 菊地 栄, 林 利雄, 小此木 時雄, 小澤 由行 日本冷凍協会論文集 12(3), 253-262, 1995-11-01
- (7-4) 熊野 寛之, 斎藤 彬夫, 大河 誠司, 山田 英貴, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 23 (2006) No. 4
- (7-5) 大河 誠司, 斎藤 彬夫, 日本冷凍空調学会論文集 14(3), 293-301, 1997-11-01
- (7-6) 新菱冷熱 ザ・自由雪計氷蓄熱システム パンフレット

- (7-7) 馬場尚一郎, 堀政義, 佐藤建樹, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集, 61-62 (2003).
- (7-8) 三戸 大介 , 谷野 正幸 , 小澤 由行 , 岡村 明彦, 日本機械学会誌 106(1016), 547, 2003-07-05
- (7-9) 特許公開番号 : 2003-106716 号
- (7-10) 三戸大介, 小澤由行, 谷野正幸, 稲田孝明, 冷論 17 (2) 191 (2000).
- (7-11) 特開平 08-110133
- (7-12) 特開 2002-013846
- (7-13) 宝積勉, 齋藤彬夫, 大河誠司, 渡辺和治, 冷論 19 (2) 147 (2002)
- (7-14) 遠藤正雄, 星野誠, 冷凍 62(715), p481 (1987)
- (7-15) 福迫尚一郎, 稲葉英男:機械の研究, 43 (6), 719 (1991)
- (7-16) M.J. Wang, N. Kumusoto, Ice slurry based thermal storage in multifunctional buildings, Heat Mass Trans, 37 (2001), pp. 597-604
- (7-17) Stamatiou, E., Meewisse, J.W., Kawaji, M., 2005) International Journal of Refrigeration, 28 (1), pp. 60-72, 2005
- (7-18) 石川正昭, 平田哲夫, 青山剛士:冷論, 20 (1), 1 (2003)
- (7-19) Matsumoto, K., Akimoto, T., Teraoka, Y. 2010 International Journal of Refrigeration 33 (2) , pp. 419-427
- (7-20) Qin, Frank; Chen, Xiao Dong; Ramachandra, Shashini; Free, Kevin (2006) Separation and Purification Technology vol. 48 (2) p. 150-158.
- (7-21) 大平昭義, 梁取美智雄, 坂野義孝, 三木幸・冷論, 18(4), 79(2001)
- (7-22) 橋口 真仁 , 鎌倉 賢司 , 岡崎 武志 , 渡辺 裕 , 高柳 幹男, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 1995(1), 505-508, 1995-09-01
- (7-23) Wijesundera, N. E., Hawlader, M. N. A., Andy, C. W. B., & Hossain, M. K. International Journal of Refrigeration, 27(5), 511-519 (2004).
- (7-24) Wiegandt, H. F., Madani, A., Harriott, P., & Abdulasia, K. Desalination, 67, 107-126. (1987).
- (7-25) 平田哲夫, 石川正昭, 神原完太:冷論, 18(4), 411 (2001).
- (7-26) 稲葉 英男 , 宮原 里支 , 武谷 健吾 日本機械学会論文集. B 編 61(589), 3296-3303, 1995-09-25
- (7-27) 小山祐嗣, 寺岡喜和, 岡田昌志, 松本浩二, 川越哲男, 日本機械学会論文集. B 編 71(712), 3011-3016, 2005-12-25
- (7-28) 松本浩二, 及川健, 岡田昌志, 寺岡喜和, 川越哲男, 日本冷凍空調学会論文集 Vol. 22 (2005) No. 3 P 237-247
- (7-29) Yoshida, T. and Sasao, H., "Development of Absorption Ice-maker for Ice-slurry, Part I; Experiment of Ice-maker, " Proc. of Annual Conf. of the Soc. of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, (1993), 401-404.
- (7-30) 浅岡龍徳, 齋藤彬夫, 大河誠司, 熊野寛之, 宝積勉, 松永辰三, 一岡順, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 23 (2006) No. 2 P 165-174
- (7-31) 浅岡 龍徳, 齋藤 彬夫, 大河 誠司, 宝積 勉, 泉 直樹, 氏 仁宏, 日本冷凍空調学会論文集 25(2), 149-158, 2008-06-30
- (7-32) Antonio Pralon Ferreira Leitea, Michel Daguenet, Energy Conversion & Management 41 (2000) 1625-1647
- (7-33) K. Fumoto, T. Sato, T. Kawanami, T. Inamura, M. Shirota, International Journal of Refrigeration, Volume 36, Issue 3, May 2013, Pages 795-800



## 8. システム

氷スラリーを空調、食品の冷蔵などに用いる場合、氷スラリーの生成装置のみならず、貯蔵、輸送、熱交換などを行う各構成要素が必要となる。本章では、氷スラリーの生成装置を含むシステム全体の構成について、概説するとともに、各構成要素における、氷スラリーの挙動などについて言及する。

### 8.1 システムの構成

氷スラリーを利用するシステムは、その用途に応じてシステムの構成が異なる。システムの構成例を図8-1に示す。(a)の直接冷却型は、生成した氷スラリーを直接活用する場合のシステムであり、氷スラリーの生成部、配管部から構成される。主に、漁港などで漁船に供給する場合や、水揚げされた水産物を直接冷却する場合などに利用される。そのため、熱交換部を有していない。(b)の貯蔵・直接冷却型は、氷スラリーを生成後、貯蔵部で貯蔵し、必要ときに貯蔵部から取り出して、対象物を直接冷却する。そのため、基本的な構成は、生成部、貯蔵部、配管部となり、熱交換部は有していない。(c)の循環型は、生成した氷スラリーを貯蔵部で貯蔵後、配管部、熱交換部にスラリーを流入させることにより、対象物を間接的に冷却し、再度貯蔵部に戻る構成となっている。氷スラリーを対象物に直接接触させない場合で、水産物以外の冷却において、広く活用されるシステム構成と考えられる。

以上のように、氷スラリーを活用するシステムは、その用途に応じて必要な要素が異なる。本章では、各構成要素における氷スラリーの特徴などについて整理する。

### 8.2 貯蔵部

氷スラリーを利用するシステムにおいて、貯蔵部を活用することにより、冷凍能力の小さな冷凍機を昼夜稼働させることにより、氷スラリーの高い需要にも対応できるシステムの構築が可能となる、などの利点がある。一方、氷スラリーの生成後、貯蔵部で長時間保持することにより、氷スラリー中の氷粒子の凝集や、オストワルド熟成による氷粒子の肥大化などによって、氷スラリーの特性の変化が生じる。これらの特性を制御することができれば、より効率的なシステムの構築が可能となると考えられる。ここでは、貯蔵部の概略、貯蔵時の氷スラリーの特性の変化などについて概説する。

#### 8.2.1 貯蔵部概略

貯蔵部の仕様や大きさ等は、冷却する対象物の種類や、その大きさなどによって決定される。また、貯蔵した氷スラリーをどのように活用するかによっても、貯蔵部の形式は変化することとなる。すなわち、貯蔵部から氷スラリーを直接取り出して利用する形式と、貯蔵部で氷スラリーと熱交換して、冷水を取り出す場合で、貯蔵部の形式は異なる。図8-2に、貯蔵部の断面図の概略を示す。(a)は、氷スラリーを直接取り出して使用する形式であり、(b)は、負荷から戻ってきた温水と氷スラリーを熱交換させて冷水を取り出す形式となっている。(a)の氷スラリーを直接取り出す場合には、氷スラリー中の氷粒子が浮力により、貯蔵槽上部に留まるため、取り出し口を貯蔵槽上部など適切な位置に設ける必要がある。一方、(b)で示した氷スラリーと熱交換させる場合には、氷層内に水道が形成されること

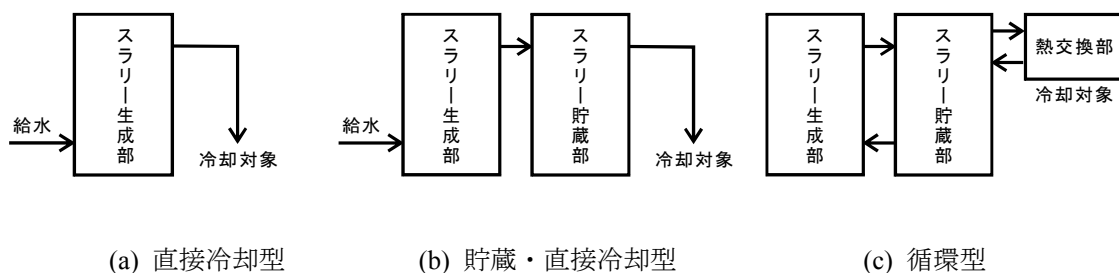


図8-1 システム全体像の概略図

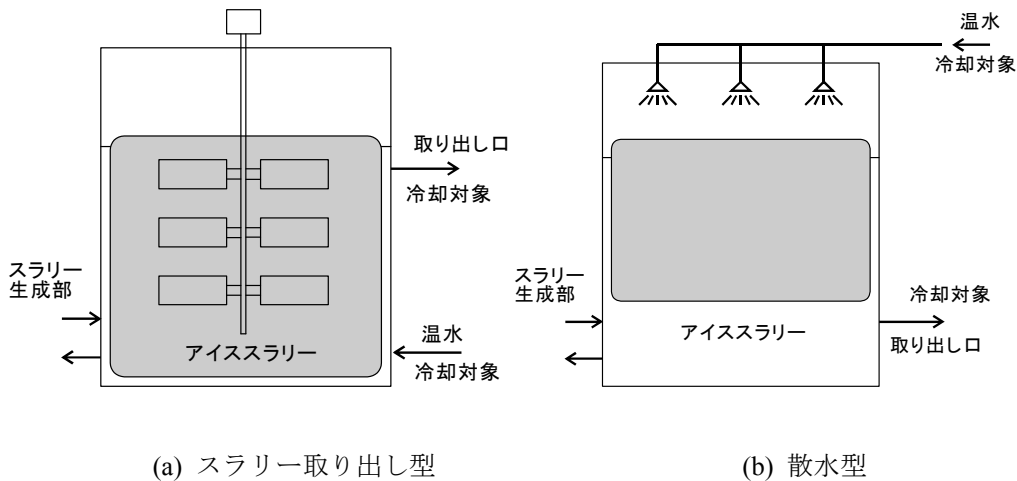


図 8-2 貯蔵部概略断面図

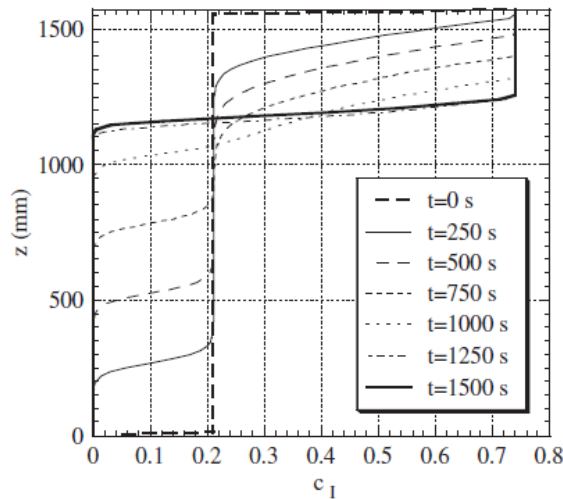


図 8-3 貯蔵槽内の IPF 分布(8-1)

により、十分な熱交換ができない場合があるため、負荷から戻ってきた温水を散水するなどの方法により、均一に熱交換する必要がある。

### 8.2.2 貯蔵時の氷スラリーの特性

氷スラリーを貯蔵する貯蔵部では、条件によっては、氷スラリー生成後、10 時間以上貯蔵されることとなる。先にも述べたとおり、貯蔵時にはスラリー中の氷粒子の凝集や肥大化など、スラリーの特性の変化が生じる。ここでは、様々な特性の変化について概説する。

生成部から貯蔵部に搬送された氷スラリー中の氷粒子は、貯蔵槽内で浮力により上部に成層化する。その際の、貯蔵槽内での IPF の分布が Egolf らにより、解析的および実験的に検討がなされている(8-1)。図 8-3 から 8-5 に、貯蔵槽内の IPF の分布などを示す。ここで、 $z$ 、 $c_1$ 、 $t$ 、 $dp$  は、それぞれ、貯蔵槽の高さ、IPF、貯蔵からの時間、氷粒子径を表している。図 8-3 は、数値計算により求められた IPF の分布の時間変化を示す。1500mm の高さを持つ貯蔵槽内部において、時刻 0 で IPF が 20%程度で均一に分散しているのに対し、1500s 経過後には、氷粒子が上部で密な状態になっていることがわかる。また、図 8-4 に、750s 経過後の IPF の分布に対する、氷粒子の大きさの影響を示したものである。氷粒子径は、100 から 500 $\mu\text{m}$  の間で変化させている。氷粒子が大きくなるほど、成層化する時間が短いことがわかる。さらに、図 8-5 に、氷粒子層の下部の位置の時間変化に対する、実験結果と数値計算を

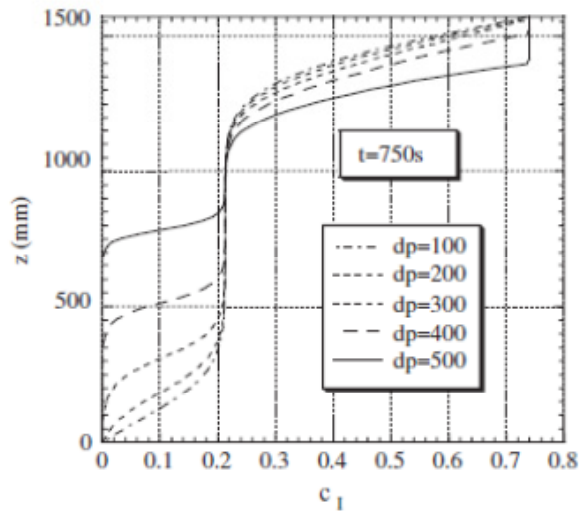


図 8-4 貯蔵槽内の IPF 分布(8-1)

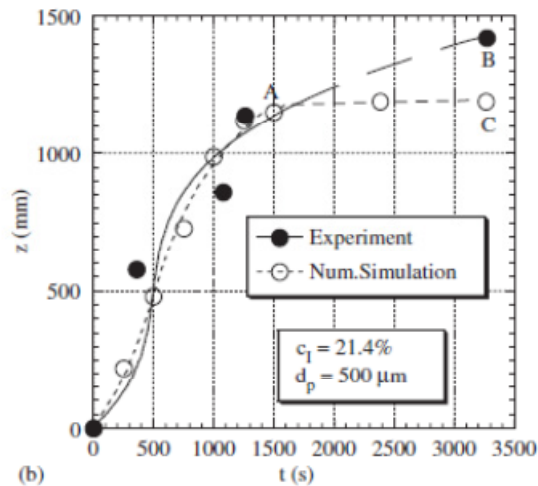


図 8-5 氷粒子層下部の位置の時間変化(8-1)

比較して示す。実験結果と数値計算は概ねよい一致を示しており、数値計算により IPF の分布の時間変化の予測が可能であることがわかる。

液中における氷粒子の貯蔵前後の特性の変化について、大河らは氷粒子層の透過率の変化に着目して検討を行っている。図 8-6 に、24 時間後貯蔵前後の空隙率 $\phi$ と透過率 $K$ の変化を示す(8-2)。実験は、粒子径で選別した氷粒子を直径 80mm、高さ 100mm の容器に入れ、0°Cの水を流入させることにより、透過率の測定を行っている。実験結果より、24 時間貯蔵後は、浮力による圧縮で空隙率が小さくなっているにもかかわらず、透過率が大きくなっていることがわかる。この傾向は、粒子の大きさが変化しても同様である。24 時間の貯蔵により、氷の形状が丸みを帯びることにより、透過率が増加したと考えられる。

貯蔵中の氷粒子は、オストワルド熟成により、肥大化する性質が知られており、氷スラリーを対象として貯蔵中の氷粒子の変化についても検討がなされている。Pronk は、塩化ナトリウム水溶液やプロピレングリコール水溶液から氷スラリーを生成し、貯蔵時の氷粒子の大きさの変化について検討を行っている(8-3)。図 8-7 に、4.9wt%の塩化ナトリウム水溶液から生成した氷スラリー中の氷粒子の変

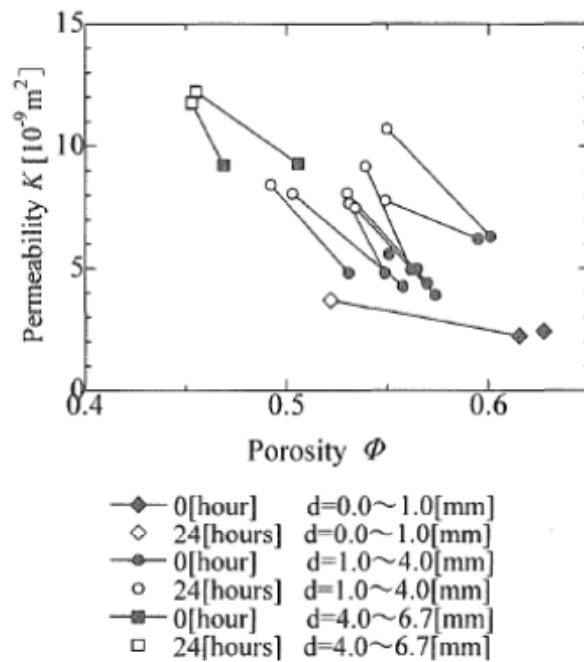
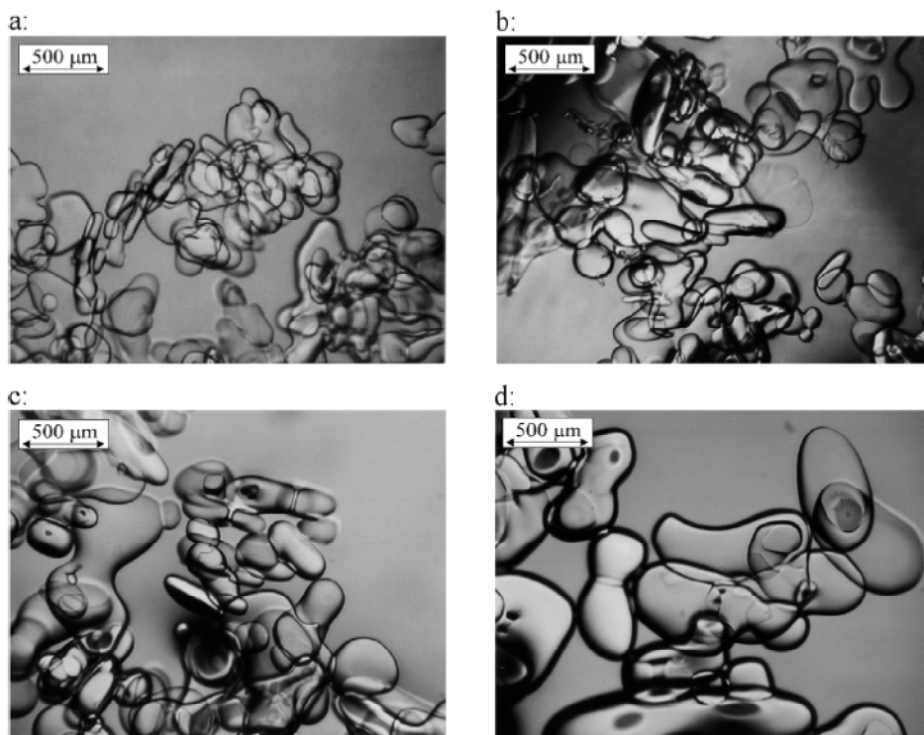


図 8-6 透過率の変化(8-2)



(a) 生成直後 (b) 2h 貯蔵後 (c) 6h 貯蔵後 (d) 22h 貯蔵後

図 8-7 貯蔵時の粒子径の変化(8-3)

化を示す。a から順に、生成直後、貯蔵 2 時間後、6 時間後、22 時間後となっており、時間とともに粒子が大きくなっていることがわかる。図 8-8 には、各水溶液における、氷粒子の平均粒径  $D_{\text{Feret,avg}}$  の時間変化を示す。溶質の種類によらず、時間とともに平均粒径が増加することがわかる。

このオストワルド熟成による氷粒子の肥大化により、流動性や熱交換性の低下が予想される。そこ

で、熊野らは、これを抑制することを目的として、高分子材料の一つである PVA（ポリビニルアルコール）を添加して、その影響について検討を行っている(8-4)。図 8-9 は、重合度が 500 の PVA を濃度を変化させて添加し、24 時間貯蔵後の氷粒子の様子である。氷粒子は、5wt%のエタノール水溶液から、過冷度が 2K の条件で生成したものである。また、図 8-10 に、PVA を添加しない場合と、重合度 500 の PVA を 3wt%添加した場合の平均粒子径の時間変化を示す。これらの図より、PVA を添加することにより、氷粒子の肥大化が抑制できることがわかる。

以上のように、貯蔵時に氷粒子の大きさの変化や凝集などにより、氷スラリーの特性は変化するものと考えられ、貯蔵部、配管部、熱交換部など、所望の条件で使用するためには、これらの特性の変化を十分に把握する必要がある。

### 8.2.3 氷スラリー・冷水の取り出し

貯蔵槽に貯蔵した氷スラリーを利用する場合、氷スラリーを直接取り出して搬送して活用する場合と、貯蔵槽内部で氷スラリーと熱交換を行うことで、冷水を取り出す場合が考えられる。先にも述べたとおり、氷スラリー中の氷は、貯蔵時に浮力により上部で成層することにより、氷スラリーを所望の IPF で取り出すことは難しい。そのため、図 8-11(a)で示すように、攪拌することにより、氷粒子を均一に分散させて氷スラリーを取り出すことが一般的である。また、攪拌で使用する動力を削減することを目的として、図 8-11(b)のように、高 IPF の上部のスラリーと低 IPF の下部のスラリーを混合す

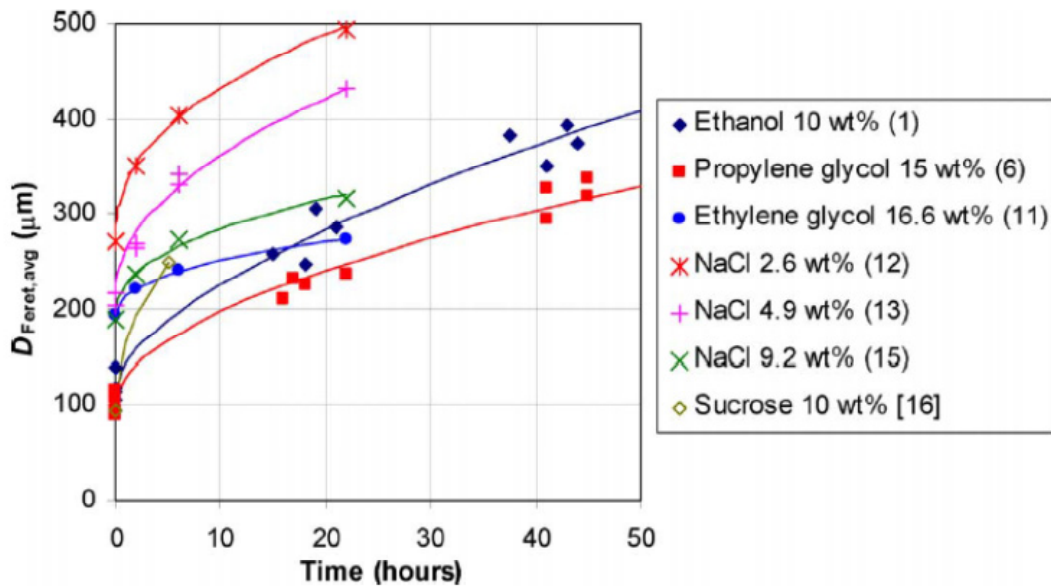


図 8-8 貯蔵時の粒子径の変化(8-3)

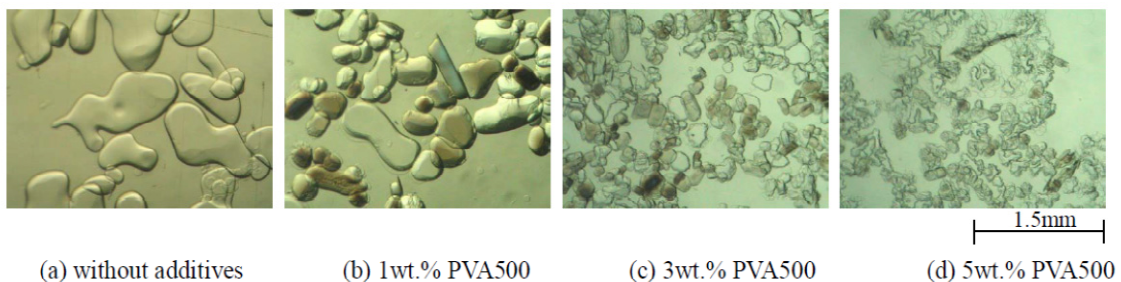


図 8-9 PVA 添加による 24 時間貯蔵後の粒子(8-4)



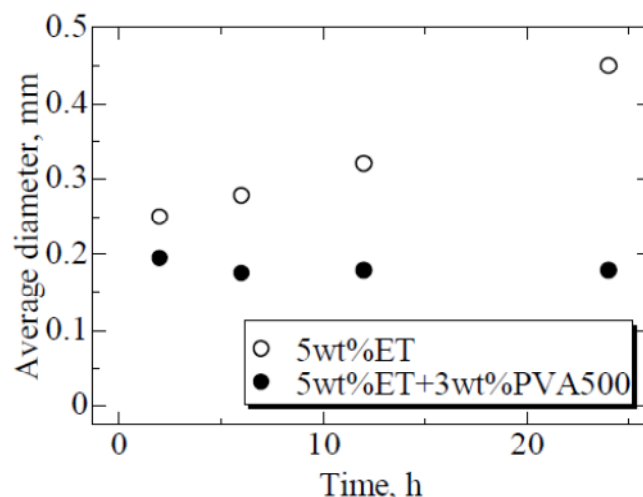


図 8-10 PVA 添加による平均粒子径の時間変化(8-4)

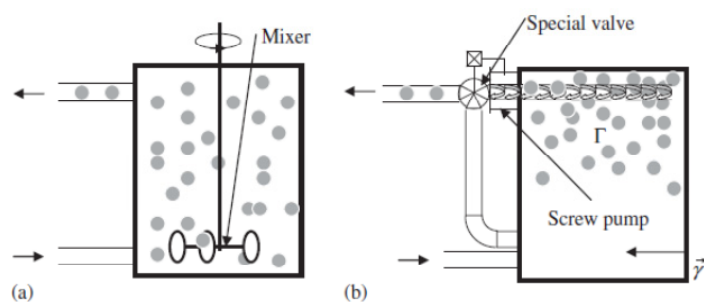


図 8-11 氷スラリーの取り出し方法(8-1)

ることにより、適切な IPF のスラリーを取り出す方法が Egolf らにより提案されている(8-1)。このように、均一な状態でスラリーを取り出すために、工夫が必要となる。

貯蔵槽に貯めた氷スラリーと熱交換することにより冷水を取り出す場合、効果的に貯蔵槽内の氷を融解する方法として、図 8-12 のように、温水を戻すためのノズルの配置方法が提案されている(8-5)。しかしながら、条件によっては、負荷側から戻ってきた温水を貯蔵槽に供給することにより、貯蔵槽内の氷スラリー中に水道が形成されてしまい、十分な熱交換が行われなまま、外部に供給されてしまう。Kang らは、これらの傾向を実験と数値計算を用いて検討を行っている(8-6)。図 8-13 に、0.2mm の氷粒子を直径 138mm、高さ 500mm の容器内に充填し、2wt%のエチレングリコール水溶液を散水したときの下部からの取り出した水溶液の温度  $T_{\text{outlet}}$  を示している。ここで、 $T_{\text{inlet}}$  は、氷層へ流入する水の温度である。凝固点温度は、 $-0.6^{\circ}\text{C}$  であり、取水した温度は、凝固点温度より高くなっていることがわかる。また、散水した水の質量のうち、11%が水道をバイパスしたと仮定したときの温度変化が実線で示してある。この結果から、完全に熱交換せず、出口に到達する水が少なからず存在することがわかる。

一般に、貯蔵槽内に残る氷の量や取水温度を予測することは、システムの運転を管理する上で、必要不可欠である。谷野は、図 8-14 のような予測モデルを構築し、取水温度を精度良く予測できることを示している(8-5)。

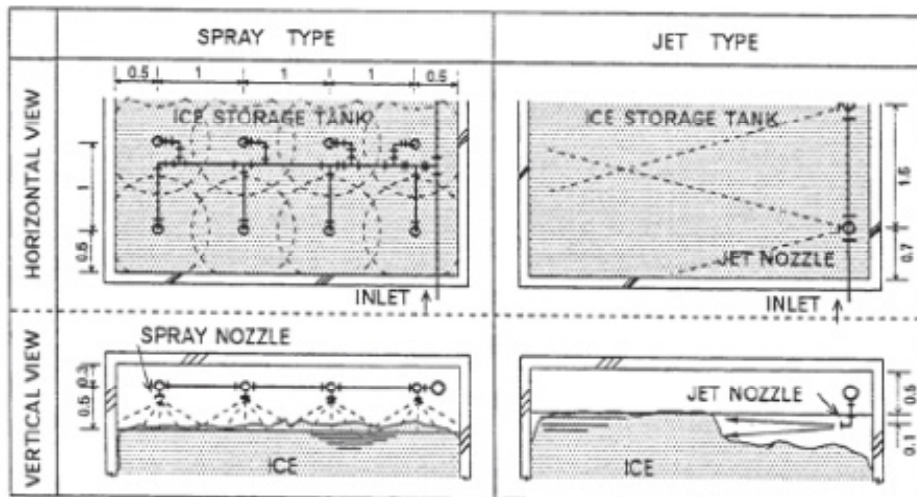


図 8-12 貯蔵槽内のノズルの配置例(8-5)

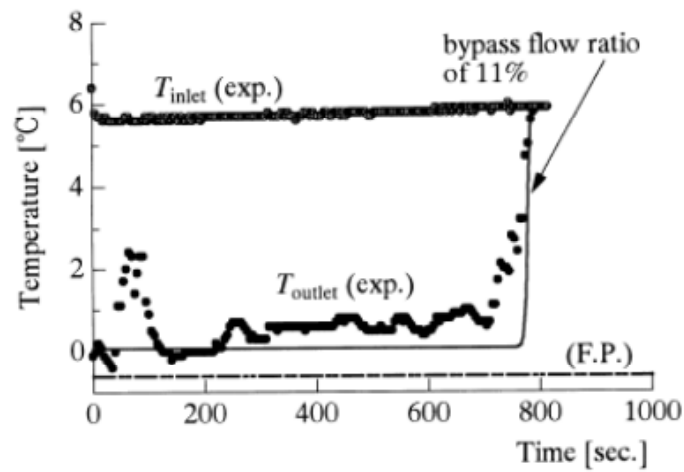


図 8-13 水道の形成時の出口温度の時間変化(8-6)

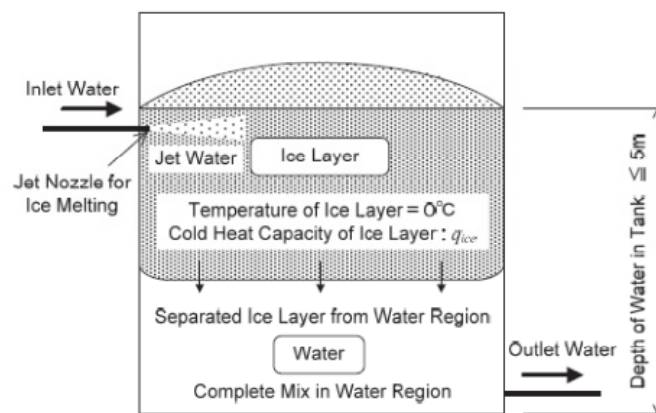


図 8-14 取水温度の予測モデル(8-5)

### 8.3 配管部

貯蔵部で貯蔵された氷スラリーを用いて、対象物を冷却するためには、配管などを用いて氷スラリーを直接対象物まで搬送するか、熱交換部に氷スラリーを輸送する必要がある。これらのシステムを設計し、ポンプなどを選定するためには、氷スラリーの流動特性を把握することが必要となる。これまで、多くの研究者により、氷スラリーの流動特性について実験的、解析的に検討がなされているが、いまだ統一的な見解がなされていないのが現状である。ここでは、氷スラリーを水平円管に流入させた場合の、圧力損失などの流動挙動について概説する。

#### 8.3.1 流れの様相

氷スラリーは、水または水溶液中に氷粒子が分散した状態であり、氷と水または水溶液には密度差が生じるため、氷粒子には浮力が働くこととなる。この際の流動挙動は、水溶液の濃度や氷粒子の大きさなどによっても、その特性が異なることが知られている。稲葉らは、内径 14mm の配管に、平均粒子径が 1.2mm の氷-水スラリーを、IPF が 5 から 15% の範囲で流入させた場合の様子を観察を行っている(8-7)。図 8-15 に各 IPF における様子を示す。流速は、0.15~0.6m/s の範囲であり、流速による顕著な違いは見られないとの報告がなされている。IPF が 5% の場合には、浮力により氷が上部に密集しながら流れている様子がわかる。一方、IPF が 15% の場合には、管内全域に氷粒子が分散して流れている。図 8-16 に、川南らによって得られた、矩形流路内での流速および IPF 分布を示す(8-8)。ここで、 $M_i$ ,  $M_y$ ,  $y$ ,  $u_y$  は、それぞれ平均氷質量割合、局所氷質量割合、流路の高さ方向の位置、流速を表す。氷スラリーは、20% のエチレングリコール水溶液に、平均粒子径が 0.5mm 程度の氷粒子が分散したものである。図より、流速が小さい条件では、流路上部に浮力により氷粒子が密集しているのに対し、流速が速い条件では、ほぼ均一に氷粒子が分散している様子がわかる。また、Kumano らの検討では、5% のエタノール水溶液から生成した氷スラリーの場合、レイノルズ数が 1000 程度の低速条件においても、氷粒子が分散して流動している様子が観察されており、浮力の影響は小さいとの報告がなされている(8-9)。

以上のことから、水溶液の濃度、流速、IPF などによって、浮力が作用する条件は異なり、これらの詳細な条件についてはさらなる検討が必要と考えられる。

#### 8.3.2 圧力損失の傾向

氷スラリーを搬送するシステムの設計のためには、氷スラリーを配管に流入させた場合の圧力損失の把握が重要となる。氷スラリーの圧力損失は、様々な研究者により測定がなされているが、ここで

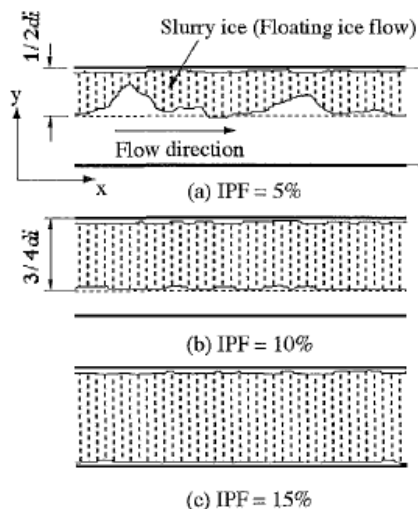


図 8-15 流れの様子(8-7)

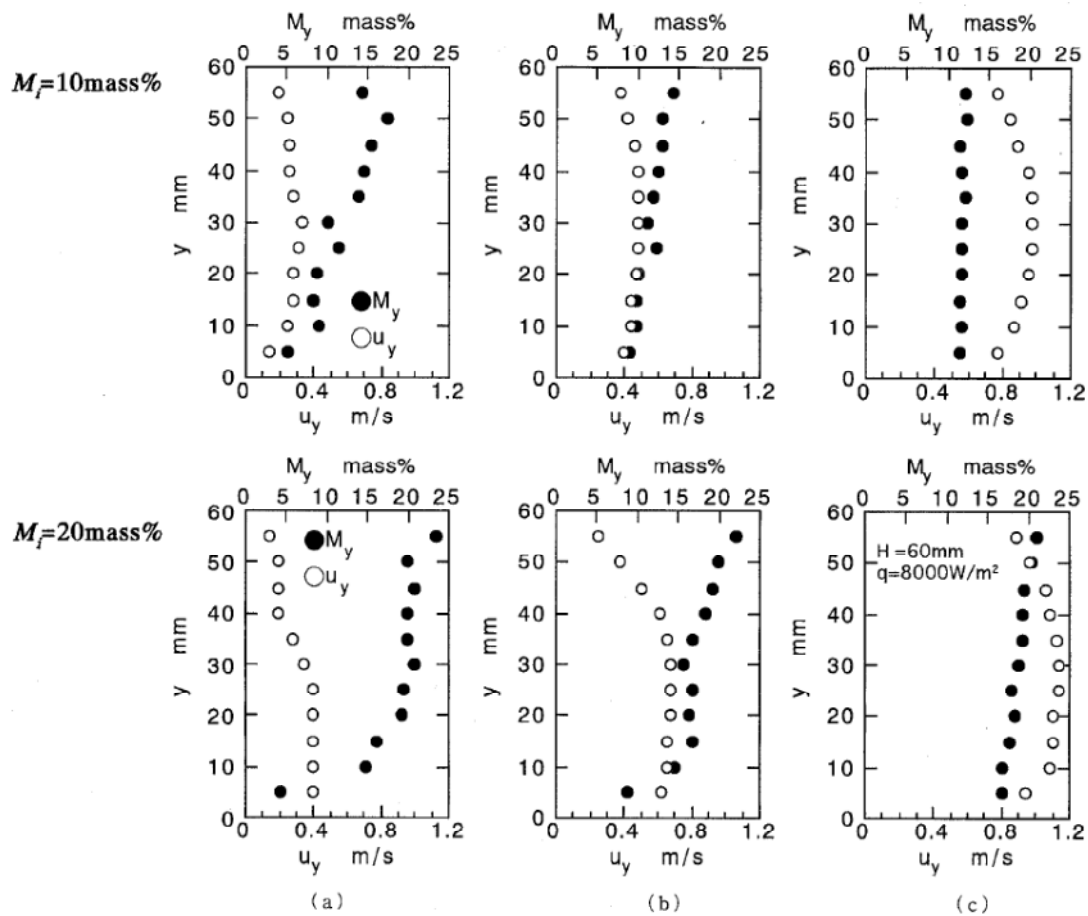


図 8-16 流れの様子(8-8) (IPF と流速分布) (a) 0.2m/s (b) 0.4m/s (c) 0.8m/s

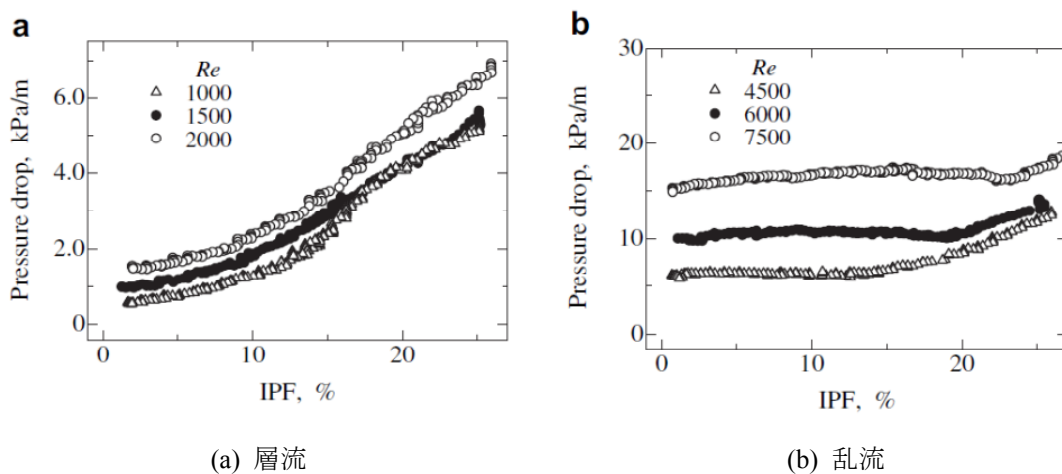


図 8-17 圧力損失(8-9)

は、測定結果の一例として、Kumano らによって得られた実測値を示す(8-9)。図 8-17 に、5%のエタノール水溶液から生成された氷スラリーを内径が 7.5mm の円管に流入させた場合の、圧力損失と IPF の関係を示す。図中の  $Re$  は、 $ud/\nu$  で定義され、 $u$ 、 $d$ 、 $\nu$  は、それぞれ、平均流速、円管直径、氷スラリー中の液相の動粘度である。図 8-17(a) は、層流条件における結果であり、IPF の増加とともに圧力損失が増加していることがわかる。一方、図 8-17(b) で示した乱流条件の場合には、低 IPF 領域において

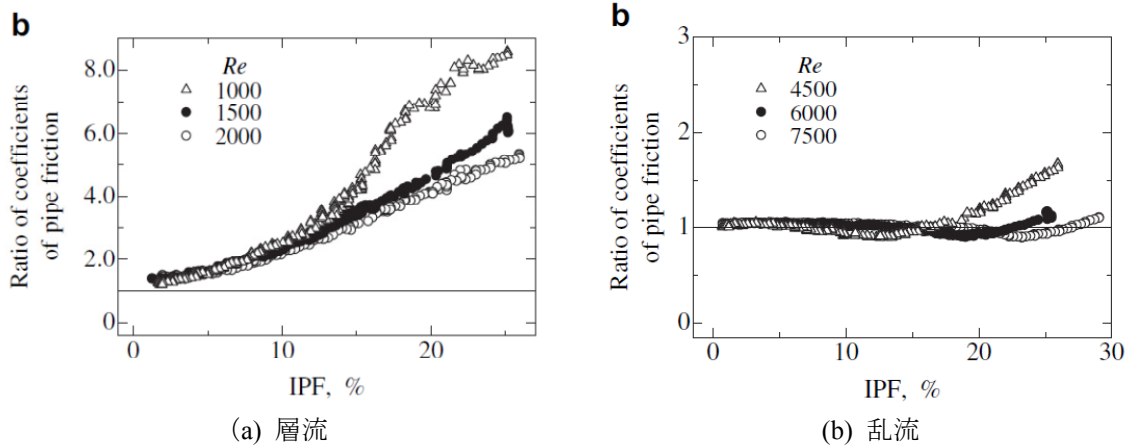


図 8-18 管摩擦係数比による比較(8-9)

は、IPFによらず、一定値を示しており、高IPFの条件下において、IPFの増加とともに圧力損失が増加していることがわかる。ここで、IPFおよび流速の影響を明確にするために、実験的に求められる管摩擦係数と層流および乱流域のそれぞれで与えられる管摩擦係数の式(8-1)および式(8-2)から計算される値との比で結果を整理した。この比を管摩擦係数比と定義する。なお、レイノルズ数は、氷スラリー中の液相の動粘度を用いて算出しており、式(8-1)および式(8-2)で求められる値は、氷スラリー中の水溶液单相流の管摩擦係数となる。

$$\lambda_{\text{lam}} = 64/Re \quad (8-1)$$

$$\lambda_{\text{tur}} = 0.3164Re^{-1/4} \quad (8-2)$$

図 8-18 に、図 8-17 で示した条件における、管摩擦係数比を示す。図より、層流条件においては、エタノール水溶液の单相流と比較して、IPFの増加とともに管摩擦係数が増加し、レイノルズ数が小さいほど、その傾向が顕著になることがわかる。一方、乱流の場合には、低IPF領域では、レイノルズ数によらず管摩擦係数比が1程度であることから、エタノール水溶液の单相流と同等の管摩擦係数となることがわかる。また、高IPF領域では、IPFの増加とともに管摩擦係数が増加傾向にあるが、これはIPFの増加に伴い、見かけの粘度が増加し、再層流化が生じたことによって層流と同様の傾向を示していると考えられる。

同様の検討の例として、図 8-19 に Niezgodna-Zelasko らによって得られた結果を示す(8-10)。図中、 $\Delta P$ ,  $L$ ,  $w_m$ ,  $x_s$ は、それぞれ、圧力損失、配管長さ、平均流速、IPFを表す。10.6%のエタノール水溶液から生成した氷スラリーを、16mmの配管に流入させた場合の、IPFと圧力損失の関係を示している。図より、速度の大きな領域においては、IPFによらず圧力損失はおおよそ一定の値を示しており、低速領域では、IPFの増加とともに圧力損失も増加傾向にあることがわかり、Kumano らによって得られた結果と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。

氷スラリーは、貯蔵槽で貯蔵された後に使用されることが一般的であるため、貯蔵による流動特性の変化を把握する必要がある。図 8-20 に、Kumano らによって得られた、貯蔵時間と管摩擦係数比の関係を示す(8-11)。 $Re$ の定義は、図 8-17の場合と同様であり、また、管摩擦係数比は、図 8-18と同様な方法で求められたものである。実験条件として、内径 7.5mm の円管に、5%のエタノール水溶液から生成された IPF15%の氷スラリーを流入させた場合の結果であり、図には、貯蔵による氷粒子の平均径の変化もあわせて示している。貯蔵とともに、氷粒子は大きくなり、貯蔵とともに管摩擦係数比は小さくなる傾向のあることがわかる。

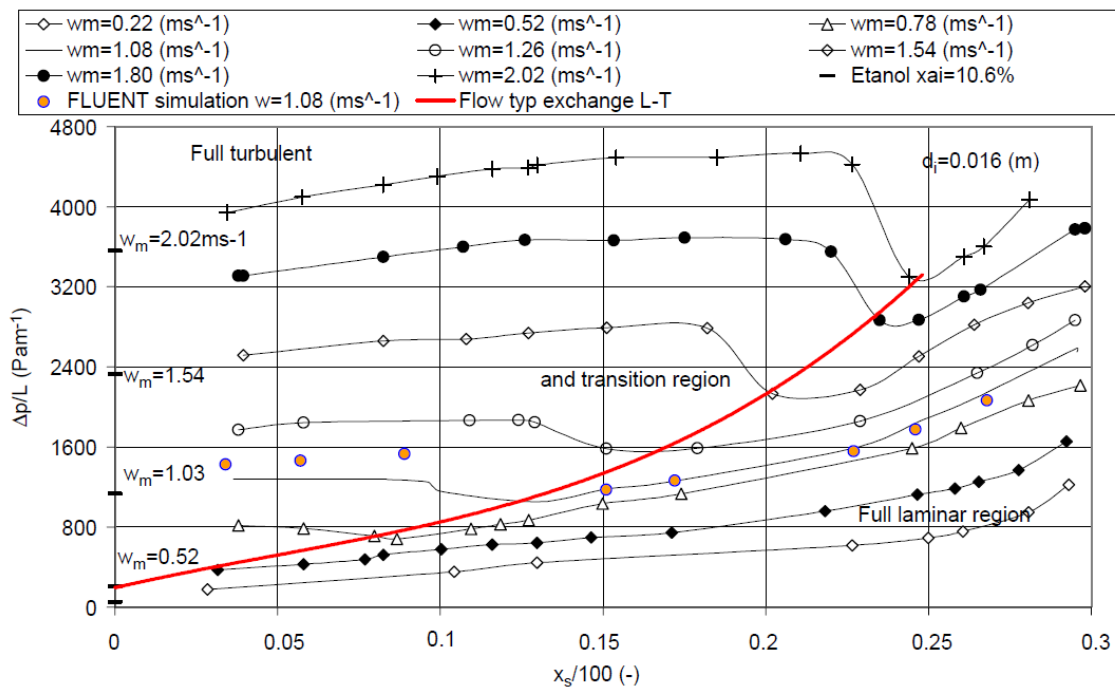


図 8-19 圧力損失と IPF の関係(8-10)

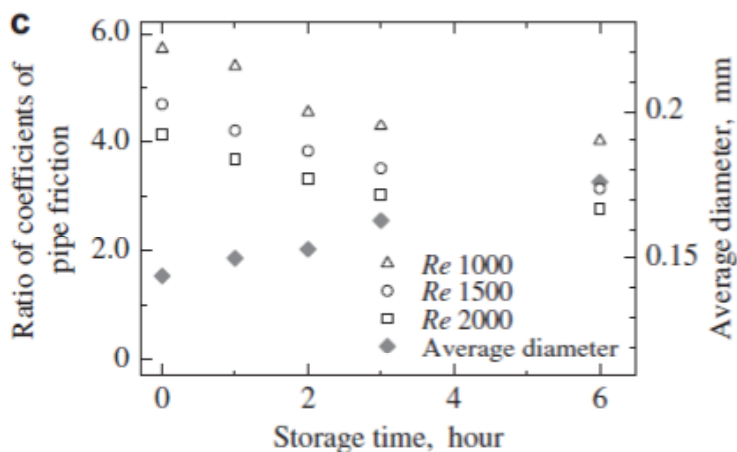


図 8-20 貯蔵時の管摩擦係数比の変化(8-11)

### 8.3.3 非ニュートン流体としての特性把握

氷スラリーの流動特性に関する検討から、氷スラリーの見かけの粘度を単純に IPF のみの関数として取り扱うことはできず、また氷スラリーをニュートン流体とみなすことも難しい。そのため、様々な研究者によって、非ニュートン流体としての扱いが提案されている。ニュートン流体は、粘性係数がせん断速度によらず一定な物性値であり、せん断応力がせん断速度と粘性係数の積で表現できるのに対し、非ニュートン流体は、流体の粘度がせん断速度によって変化する流体など、ニュートン流体とは異なるせん断速度とせん断応力の関係を示す流体のことである。図 8-21 にニュートン流体と各種の非ニュートン流体のせん断速度とせん断応力の関係を示す。研究者によって、氷スラリーをどの非ニュートン流体として扱うかの提案は異なり、擬塑性流体、ビンガム流体、などと言われている。しかしながら、氷スラリーの生成方法や、溶質の種類、濃度などによってこれらの特性は変化するものと考えられ、統一的な見解を示すことは難しい。ここでは、非ニュートン流体の取り扱いの一例とし

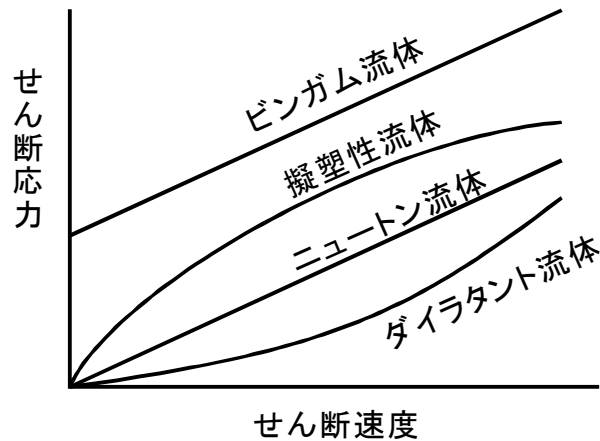


図 8-21 非ニュートン流体の分類

て、氷スラリーを擬塑性流体とする Kumano らの検討方法を示す(8-9).

層流域での管内の壁面せん断速度は、Rabinowitsch により、次のように与えられる(8-12).

$$\dot{\gamma}_R = \frac{1}{\tau_R^2} \frac{d\left(\frac{u_m \tau_R^3}{R}\right)}{d\tau_R} \quad (8-3)$$

ここで、管内壁面のせん断応力は、圧力損失を用いて次のように書ける.

$$\tau_R = \frac{D\Delta p}{4L} \quad (8-4)$$

これより、壁面のせん断速度は次のように書ける. 式(8-3), (8-4)において,  $\dot{\gamma}_R$ ,  $\tau_R$ ,  $u_m$ ,  $R$ ,  $D$ ,  $\Delta p$ ,  $L$  は, それぞれ, 壁面せん断速度, 壁面せん断応力, 平均流速, 円管半径, 円管直径, 圧力損失, 管の長さを表す.

$$\dot{\gamma}_R = \frac{3}{4} \left(\frac{8u_m}{D}\right) + \frac{1}{4} \left(\frac{8u_m}{D}\right) \frac{d\left(\ln \frac{8u_m}{D}\right)}{d\left(\ln \frac{D\Delta p}{4L}\right)} \quad (8-5)$$

ここで,  $n'$ を次のように定義する.

$$n' = \frac{d\left(\ln \frac{D\Delta p}{4L}\right)}{d\left(\ln \frac{8u_m}{D}\right)} \quad (8-6)$$

$n'$ がせん断速度によらず一定値であれば, べき乗則流体として取り扱うことができる. べき乗則流体



とは、せん断速度とせん断応力が次式で表現できる流体である。

$$\tau_R = K \dot{\gamma}_R^n \quad (8-7)$$

ここで、 $n$  が 1 より小さい場合には擬塑性流体、 $n$  が 1 より大きい場合にはダイラタント流体に分類される。さらに、式(8-6)を積分することにより、以下の式が導かれる。

$$\tau_R = \frac{D\Delta p}{4L} = K' \left( \frac{8u_m}{D} \right)^{n'} \quad (8-8)$$

この式により、実験結果から  $n'$  および  $K'$  を決定することができ、べき乗則流体の特性を把握することができる。なお、 $K'$  は、無次元数ではなく、各 IPF によって決定される  $n'$  によって単位が変化する有次元量である。式(8-8)においても式(8-7)同様、 $n'$  が 1 より小さい場合には擬塑性流体、 $n'$  が 1 より大きい場合にはダイラタント流体となる。

ここで、Kumano らによって得られた IPF が変化した場合の  $n'$  と  $K'$  の実測値を図 8-22 に示す。 $n'$  および  $K'$  は、配管内径が異なっても大きな違いは見られないことから、氷スラリーの特性として、 $n'$  および  $K'$  が決定されると考えられる。 $n'$  は、IPF の増加とともに減少しており、1 以下であることから氷スラリーが擬塑性流体として扱えることがわかる。また、 $K'$  は、IPF の増加とともに増加傾向にあることがわかる。また、これらの値を用いて、見かけのレイノルズ数を次式のように定義することができる。

$$Re_M = \frac{D^{n'} u_m^{2-n'} \rho}{8^{n'-1} K'} \quad (8-9)$$

ここで、 $\rho$  は、スラリーの密度を表す。式(8-9)のように定義することで、式(8-1)を用いて層流条件における管摩擦係数を算出することが可能となる。すなわち、氷スラリーの管摩擦係数は、層流領域では、擬塑性流体としてその特性を把握することができ、一方、乱流領域では前述したとおり、スラリー中の水溶液の動粘度を用いたレイノルズ数から式(8-2)により管摩擦係数を求めることが可能である。

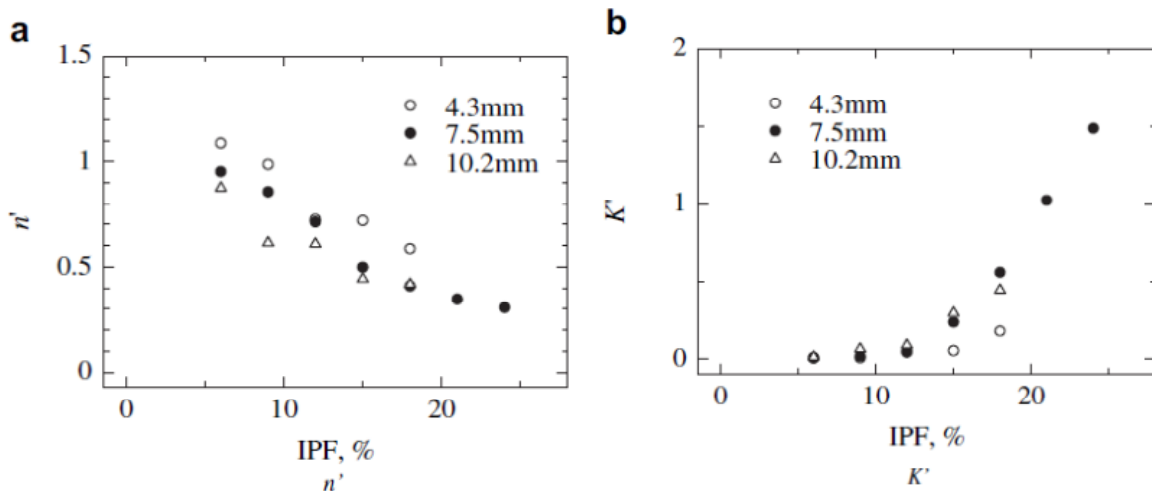


図 8-22  $n'$  と  $K'$  の傾向(8-9)



### 8.3.4 様々な系での圧力損失

8.3.3 節では、氷スラリーの水平円管内での流動挙動について述べたが、実際の運用を考える場合、システムとして熱交換器内での流動挙動や、曲がり管での流動挙動なども把握する必要がある。

図 8-23 は、Bellas らによって得られた、5%のプロピレングリコール水溶液から生成された氷スラリーを、高さ 310mm、幅 112mm のプレートが 24 枚からなるプレート式熱交換器内を流入させた場合の流量と圧力損失の関係を示す(8-13)。水のみの場合と比較して、氷スラリーの場合は圧力損失が大きくなること、IPF の増加とともに圧力損失も増加することがわかる。しかしながら、水のみの場合と比較しても、それほど大きな増加傾向は見られないことがわかる。

Norgaard らは、L 字管や拡大部、収縮部など、乱流条件下で、様々な要素における氷スラリーの損失係数を求めている(8-14)。その一例として、図 8-24 は、L 字管における損失係数と流速  $v$  の関係を示す。氷粒子を含まない場合には、文献値に近い値を示しているのに対し、IPF が 10% および 30% の条件においては、損失係数は大きくなっていることがわかる。また、その傾向は流速が遅いほど顕著になることもわかる。

## 8.4 熱交換部

対象物を冷却する際には、直接もしくは間接的に氷スラリーと熱交換が必要となる。この際、氷粒子を含むため、高い輸送冷熱量が期待できるとともに、伝熱過程ではその融解潜熱により高い熱伝達係数が予想されるが、伝熱特性は、氷スラリー中の氷粒子の割合や流速などの流動条件に依存することとなり、その特性の把握は簡単ではない。氷スラリーの熱伝達特性は、様々な研究者によって、その把握が試みられているが、各研究者によって、スラリーを生成する際の条件や、伝熱条件が異なるために、流動特性と同様、統一的な見解が得られていないのが現状である。ここでは、Kumano らによって得られている、水平円管内に流入させた場合の円管内での伝熱挙動を例として、氷スラリーの伝熱特性を概説する(8-15)。

### 8.4.1 熱伝達の傾向

Kumano らは、5%のエタノール水溶液から氷スラリーを生成し、内径が 7.5mm の円管に流入させ、80cm の加熱区間における熱伝達係数の測定を行っている。円管内の上部、中部、下部の 3 カ所で温度を計測して、その温度から熱伝達係数を算出している。図 8-25 に、加熱開始の位置から 70cm 下流の

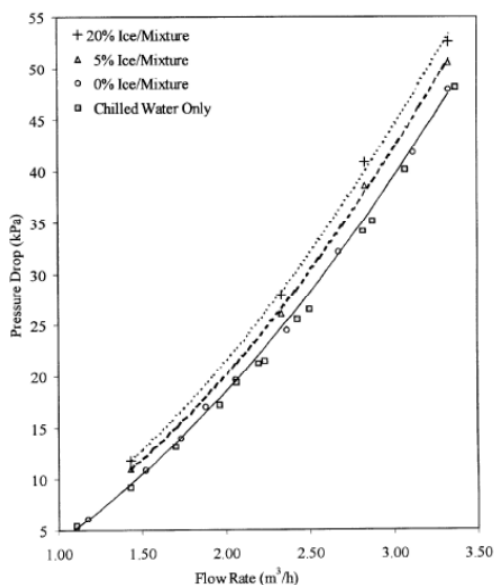


図 8-23 プレート式熱交換器での圧力損失(8-13)

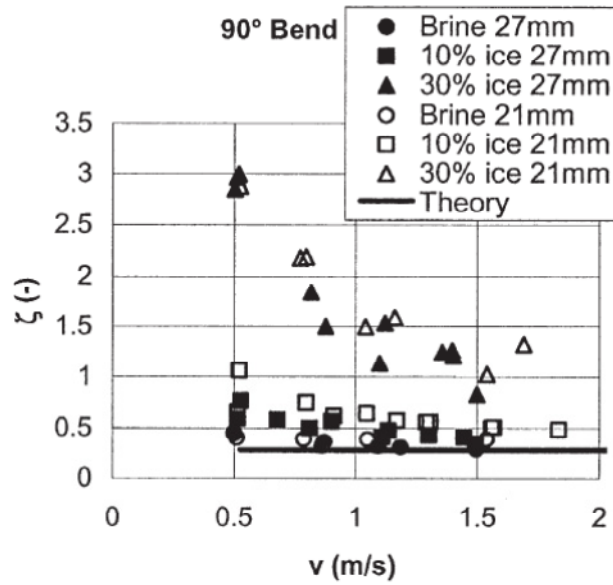
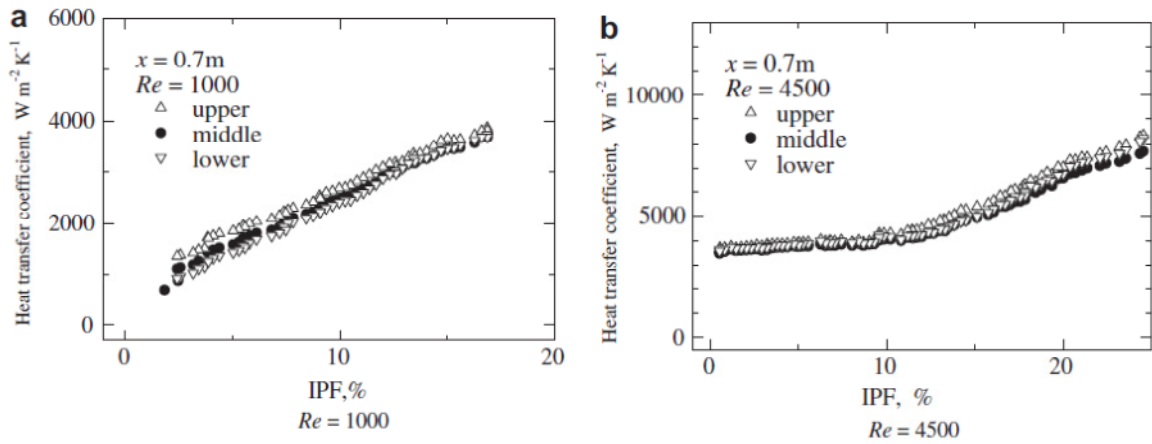


図 8-24 L 字管での圧力損失(8-14)



(a) 層流

(b) 乱流

図 8-25 熱伝達係数と IPF の関係(8-15)

位置における上部、中部、下部の熱伝達係数と IPF の関係を示す。図中の  $Re$  は、 $ud/v$  で定義され、 $u$ 、 $d$ 、 $v$  は、それぞれ、平均流速、円管直径、氷スラリー中の液相の動粘度である。また、熱伝達係数は、配管を加熱する熱流束を、管壁温度とスラリー温度の差で除した値として定義され、熱の移動しやすさを表す係数である。図 8-25(a) は層流条件、(b) は乱流条件における結果である。この図より、(a) および (b) いずれの条件においても、上部、中部、下部による熱伝達係数の違いは顕著ではなく、円管内を氷粒子が十分に分散して流れていることがわかる。また、層流条件では、IPF の増加とともに熱伝達係数が増加していること、乱流条件では、低 IPF 領域では、IPF によらずおおよそ一定となっていること、高 IPF 領域では IPF の増加とともに熱伝達係数が増加している様子がわかる。図 8-26 には、層流条件における加熱区間と熱伝達係数の関係を示す。エタノール水溶液単体の場合の熱伝達係数が実線で示してあり、単相の場合には、加熱区間が大きくなるに従い、熱伝達係数は徐々に小さくなっているのに対し、氷スラリーの場合には、加熱区間によらず熱伝達係数の値は、おおよそ一定値である。これから、氷スラリー内の温度分布の発達が極めて速やかであることがわかる。ここで、氷スラ

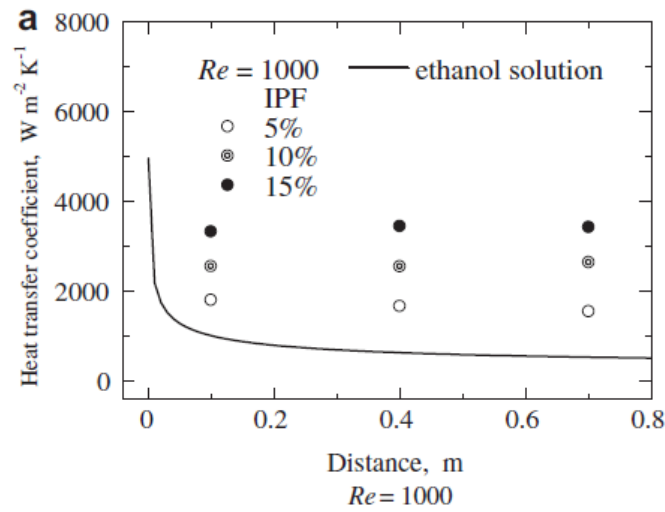


図 8-26 加熱区間の影響(8-15)

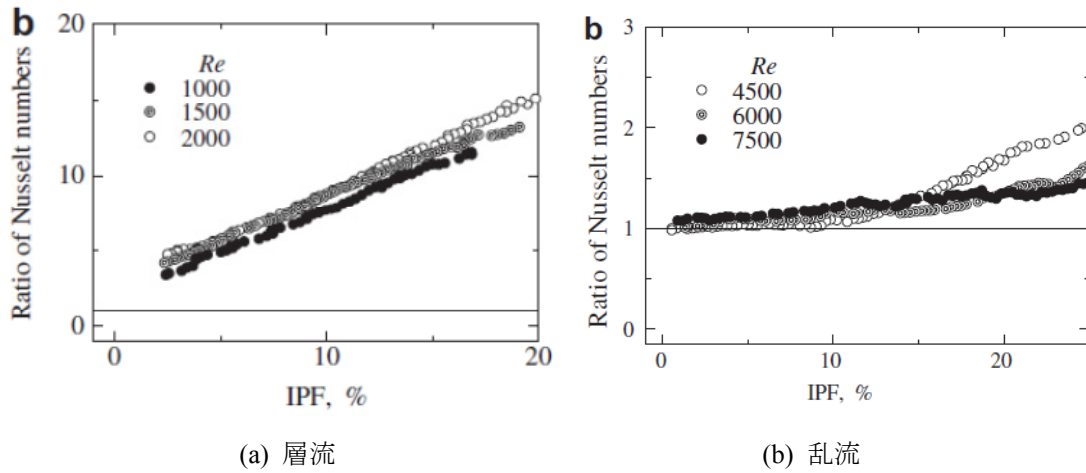


図 8-27  $Nu$  数比の比較(8-15)

リーの特性を把握するために、エタノール水溶液と氷スラリーの伝熱特性を比較する。すでに述べたとおり、層流条件においては、温度分布の発達が速やかであることから、式(8-10)で表される円管における発達した状態のヌセルト数  $Nu$  と、実験から得られたヌセルト数を比較した。また、乱流条件においては、式(8-11)で表現される Colburn の式を用いて実測値と比較した。

$$Nu_{lam} = 4.364 \quad (8-10)$$

$$Nu_{tur} = 0.023Re^{0.8}Pr^{1/3} \quad (8-11)$$

ここで、 $Pr$  はプラントル数であり、 $Re$  は、図 8-25 と同様に定義される。図 8-27 に、層流および乱流条件における  $Nu$  数の比と IPF の関係を示す。 $Nu$  数は、加熱開始位置から 70cm における熱伝達係数を上、中、下部の平均値から算出している。層流条件では、IPF の増加とともに  $Nu$  数比は増加し、IPF が 20% の条件では、単相流と比較して 15 倍程度の熱伝達係数となることがわかる。一方、乱流条件における低 IPF 領域では、比が 1 であることから、熱伝達係数は単相流の場合とほとんど変化せず、単相流として取り扱うことにより予測が可能であることがわかる。また、高 IPF 領域では、8.3 節で述

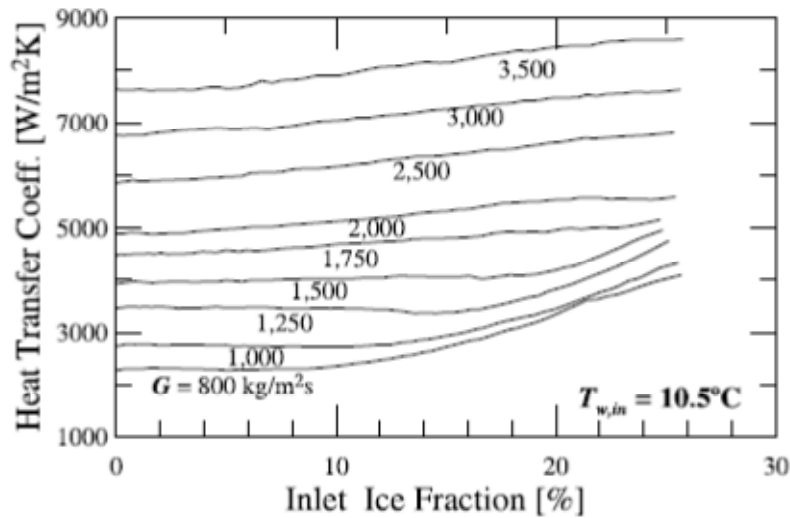


図 8-28 IPF と熱伝達係数の関係(8-16)

べた再層流化によって、層流と同様の挙動を示すために IPF の増加とともに熱伝達係数が増加するものと考えられる。

Kumano らと同様の検討として、Lee らは、内径 13.8mm の銅管に 6.5%のエチレングリコール水溶液から生成した氷スラリーを流入させ、その際の熱伝達係数の計測を行っている(8-16). 図 8-28 には、Lee らによって得られた IPF と熱伝達係数の関係を示す。図中、 $G$ 、 $T_w$  は、それぞれ、管断面積当たりの質量流量、2 重円管の外側に流入する水の温度を表す。図より、流量が大きく、乱流条件と考えられる範囲では、IPF が増加しても顕著な熱伝達係数の増加は見られず、流量が小さい条件では、高 IPF 領域で再層流化に伴う熱伝達係数の向上の様子が見てとれ、Kumano らと定性的に同様の傾向が得られていることがわかる。

#### 8.4.2 $Nu$ (ヌセルト数)の実験式

すでに述べたとおり、乱流条件では、単相流として熱伝達係数の予測が可能である。一方、層流域では、熱伝達係数は IPF に大きく依存し、IPF の増加とともに熱伝達係数が増加する。これらの特性に対して、様々な研究者によって、 $Nu$  数の予測式が提案されている。表 8-1 に、各研究者によって提案された層流条件における  $Nu$  数の予測式を示す。

表からわかるとおり、提案された予測式に用いられる無次元パラメータも統一されておらず、氷スラリーの伝熱特性に対する統一的な理解は未だ得られていない。今後の更なる検討が期待されている。

#### 8.4.3 様々な系での熱伝達

前節までは、水平円管に対する熱伝達挙動を示したが、実際の運用では、熱交換器内での伝熱など、様々な系が考えられ、各条件下での伝熱特性の把握が必要と考えられる。

図 8-29 には、氷スラリーを、高さ 310mm、幅 112mm のプレートが 24 枚からなるプレート式熱交換器内を流入させた場合の、流量と冷却熱量の関係を示す(8-13). IPF の変化による冷却熱量の変化はそれほど大きくないものの、チルド水と比較すると、30%程度の増加が見られることがわかる。また、図 8-30 に、矩形流路の 180° の折り返しバンド部での凸面の局所熱伝達係数の分布を示す(8-20). 図中、 $u$ 、 $C$  は、それぞれ、平均流速、流路高さを表す。また、 $h_{0cv}$  は、折り返しバンド内の凸面での熱伝達率を表す。図より、IPF が 10%の場合には、それほど顕著ではないものの、IPF が 20%の場合には、氷粒子が流路全体に分散することにより、高い局所熱伝達率が得られていることがわかる。

表 8-1 氷スラリーの  $Nu$  数の予測式

著者	条件	予測式
Guilpart et. al. (8-17)	内径 30mm 11%エタノール水溶液	$Nu = 38.3Gz^{0.15} \left( \frac{IPF}{100} \right)^{0.52}$ $Nu = \frac{hD}{\lambda_m} \quad Gz = \frac{\pi RePr}{4 \frac{z}{D}}$ <p> <math>h</math>: 熱伝達係数    <math>D</math>: 配管直径  <math>\lambda_m</math>: スラリー熱伝導率    <math>Re</math>: レイノルズ数  <math>Pr</math>: プラントル数    <math>z</math>: 加熱区間の位置         </p>
Horibe et. al. (8-18)	内径 14mm 水	$Nu = 1.91Re^{0.33} IPF^{0.85} Ste^{0.34}$ $Nu = \frac{Q}{l\Delta T\lambda_w} \quad Re = \frac{u_i d_i}{\nu_w} \quad Ste = \frac{c_{pw}\Delta T}{L}$ <p> <math>Q</math>: 外管と内管の熱通過率    <math>l</math>: 配管長さ  <math>\Delta T</math>: 外管の平均温度と内管の平均温度の差  <math>\lambda_w</math>: 水の熱伝導率    <math>u_i</math>: 内管流速  <math>d_i</math>: 配管直径    <math>\nu_w</math>: 水の粘度  <math>c_p</math>: スラリー比熱    <math>L</math>: 融解潜熱         </p>
Niezgoda-Zelasko et. al. (8-19)	内径 10~20mm 10.6%エタノール水溶液	$Nu = 0.78Re_B^{0.22} Pr_B^{0.22} \left( \frac{\Delta IPF}{100Ste} \right)^{-0.027} \left( \frac{d_s}{d_i} \right)^{-0.29}$ $Nu = \frac{hd_i}{\lambda_B} \quad Re = \frac{ud_i\rho_B}{\mu_p} \quad Pr = \frac{\mu_p c_p}{\lambda_B} \quad Ste = \frac{c_p \Delta T}{L}$ <p> <math>h</math>: 熱伝達係数    <math>d_i</math>: 配管直径    <math>d_s</math>: 粒子直径  <math>\lambda_B</math>: スラリー熱伝導率    <math>\mu_p</math>: スラリー粘度  <math>u</math>: 流速    <math>\rho_B</math>: スラリー密度    <math>c_p</math>: スラリー比熱  <math>\Delta T</math>: 温度変化量    <math>L</math>: 融解潜熱         </p>
Kumano et. al. (8-15)	内径 4.3~10.2mm 5%エタノール水溶液	$Nu = 50.1Re_M^{0.0741} \left( \frac{IPF}{100} \right)^{0.822} \left( \frac{D}{d_s} \right)^{0.292}$ $Nu = \frac{hd_i}{\lambda_w} \quad Re_M = \frac{D^{n'} u_m^{2-n'} \rho}{8^{n'-1} K'}$ <p> <math>h</math>: 熱伝達係数    <math>D</math>: 配管直径    <math>d_s</math>: 粒子直径  <math>\lambda_w</math>: 水の熱伝導率    <math>\mu_w</math>: スラリー粘度  <math>u_m</math>: 流速    <math>\rho</math>: スラリー密度         </p>

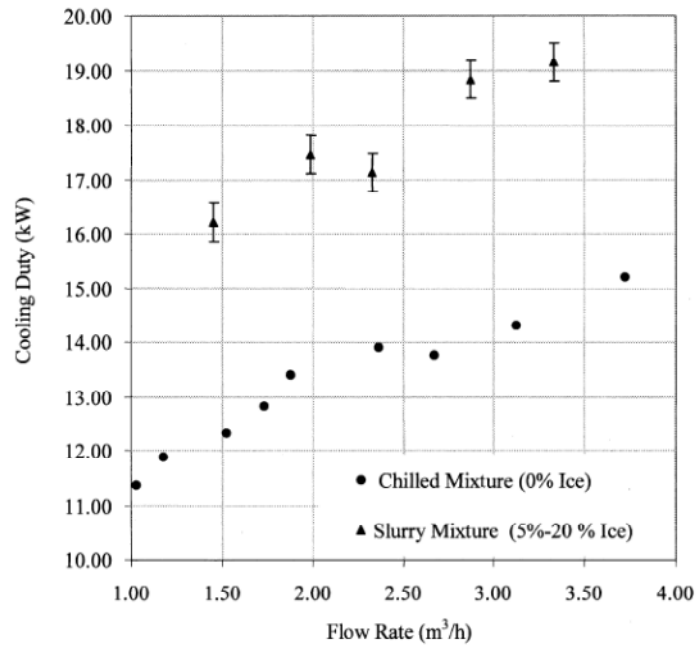


図 8-29 プレート式熱交換器での熱伝達(8-13)

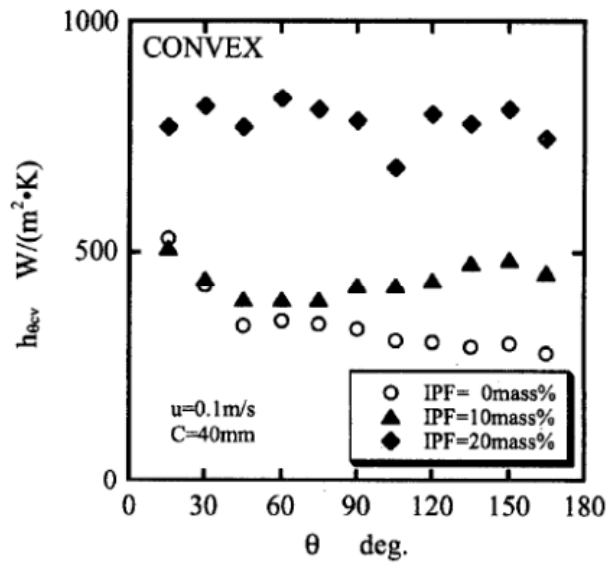


図 8-30 180° 曲がり管の熱伝達(8-20)

参考文献

- (8-1) P. W. Egolf, A. Kitanovski, D. Ata-Caesar, D. Vuarnoz, F. Meili, Cold storage with ice slurries, Int. J. Energy Research, 32, 3, 187-203, 2008
- (8-2) 大河誠司, 斎藤彬夫, Ari EIRIKSSON, 前田祐, 宝積勉, 熊野寛之, 貯蔵による鯛氷充填層の透過率変化, 日本冷凍空調学会論文集, 20, 3, 287-296, 2003
- (8-3) P. Pronk, T. M. Hansen, C. A. Infante Ferreira, G. J. Witkamp, Time-dependent behavior of different ice slurries during storage, Int. J. Refrigeration, 28, 27-36, 2005
- (8-4) 熊野寛之, 斎藤彬夫, 大河誠司, 山田英貴, アイスラリー生成における添加剤の影響, 日本冷凍空調学会論文集, 23, 4, 501-508, 2006
- (8-5) 谷野正幸, ダイナミック型氷蓄熱システムの解氷特性, 日本冷凍空調学会論文集, 29, 1, 1-12,

2012

- (8-6) C. Kang, S. Yano, M. Okada, Non-uniform melting in packed beds of fine ice slurry, *Int. J. Refrigeration*, 24, 338-347, 2001
- (8-7) 稲葉英男, 堀部明彦, 尾崎公一, 横田真希, 管内流動氷水スラリーの採冷熱特性に関する研究, *日本冷凍空調学会論文集*, 14, 3, 265-276, 1997
- (8-8) 川南剛, 福迫尚一郎, 山田雅彦, 水平加熱板間を流れるスラッシュアイスの流動挙動および熱伝達, *日本機械学会論文集(B編)*, 66, 643, 880-887, 2000
- (8-9) H. Kumano, T. Hirata, M. Shirakawa, R. Shouji, Y. Hagiwara, Flow characteristics of ice slurry in narrow tubes, *Int. J. Refrig.* 33, 1513-1522, 2010
- (8-10) B. Niezgoda-Zelasko, W. Zalewski, Momentum transfer of ice slurry flow in tubes, experimental investigations, *International Journal of Refrigeration*, 29, 418-428, 2006
- (8-11) H. Kumano, T. Hirata, Y. Hagiwara, F. Tamura, Effects of Storage on Flow and Heat Transfer Characteristics of Ice Slurry, *Int. Journal of Refrigeration*, 35, 1, 122-129, 2012
- (8-12) B. Rabinowitsch, Über die viscosität und elastizität von solen. *Z. Physik. Chem* 145A, 1-26, 1929
- (8-13) J. Bellas, I. Chaer, S. A. Tassou, Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 22, 721-732, 2002
- (8-14) E. Norgaard, T. A. Sorensen, T. M. Hansen, M. Kauffeld, Performance of components of ice slurry system : pumps, plate heat exchangers, and fittings, *International Journal of Refrigeration*, 28, 83-91, 2005
- (8-15) H. Kumano, T. Hirata, R. Shouji, M. Shirakawa, Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Ice Slurry, *Int. Journal of Refrigeration*, 33, 8, 1540-1549, 2010
- (8-16) D. W. Lee, E. S. Yoon, M. C. Joo, A. Sharma, Heat transfer characteristics of the ice slurry at melting process, *International J. of Refrigeration*, 29, 451-455, 2006
- (8-17) J. Guilpart, L. Fournaison, M. A. Ben Lakhdar, D. Flick, A. Lallemand, Experimental study and calculation method of transport characteristics of ice slurries. *Proc. of the First IIR workshop on Ice Slurries*, 74-82, 1999
- (8-18) A. Horibe, H. Inaba, N. Haruki, K. Park, Melting heat transfer of lowing ice slurry in a pipe, *Proc. of the 4th IIR workshop on Ice Slurries*, 145-152, 2001
- (8-19) B. Niezgoda-Zelasko, Heat transfer of ice slurry flows in tubes, *Int. J. Refrigeration* 29, 437-450, 2006
- (8-20) 川南剛, 福迫尚一郎, 山田雅彦, 矩形断面を有する返しベンド内を流れる氷スラリーの流動および熱伝達, *日本機械学会論文集(B編)*, 69, 678, 422-429, 2003

## 9. 物性

### 9.1 氷スラリーの見かけの物性の評価方法

#### 9.1.1 IPF (Ice Packing Factor:氷充填率)

##### a) IPF の定義

氷スラリーに含まれる氷の割合は氷充填率，または IPF (Ice Packing Factor) とよばれ，以下の式で定義される．

- ・質量分率で表す場合

$$IPF [\text{wt}\%] = [m_i/m] \times 100 \quad (9-1)$$

ここで， $m_i$  [kg]は氷の質量， $m$  [kg]は氷と水溶液の質量の総和を表す．

- ・体積分率で表す場合

$$IPF [\text{vol}\%] = [V_i/V] \times 100 \quad (9-2)$$

ここで， $V_i$  [m<sup>3</sup>]は氷の体積， $V$  [m<sup>3</sup>]は氷と水溶液の体積の総和を表す．

##### b) IPF の簡易的な推算方法

水溶液と氷から成る氷スラリーの IPF は，その温度から算出可能である．

多くの水溶液において，その濃度と凝固点の関係が知られている．氷スラリーでは，水溶液と氷が共存状態にあるため，水溶液の温度は常にその濃度における凝固点に保たれる．また，水溶液が凝固する際には，溶質はほとんど氷に取り込まれない．従って，温度  $T$  [°C]が既知であれば，水溶液の濃度  $c(T)$  [wt%]を算出することができる．氷生成前の水溶液の濃度（初期濃度） $c_i$  [wt%]があらかじめわかっている場合は，IPF は以下の式で計算することができる．

$$IPF [\text{wt}\%] = 100 \times [1 - \{c_i / c(T)\}] \quad (9-3)$$

式(9-3)より，水溶液の初期濃度が既知であれば，氷スラリーの温度から IPF を知ることができる．一例として 10, 20, 30wt%のエタノール水溶液より生成した氷スラリーの温度と IPF の関係を図 9-1 に示す．

#### 9.1.2 見かけの融解潜熱

氷スラリーのように，水溶液中に氷が存在する場合，その氷が融解する際に発生する熱量は，純水中で氷が融解する際の熱量と異なる．以後，前者を有効融解潜熱，後者を融解潜熱と呼んで区別する．熱量が異なる原因としては，凝固点降下に伴い水-氷間のエンタルピー差が減少する影響と，氷の融解に伴い水溶液の濃度が変化することによって生じる熱量の影響がある．Kumano ら(9-2)は，有効融解潜熱を簡便に求めるため，次の式を提案している．

$$L = L_{ice} - \Delta H(x) + \frac{x^2}{100} f'(x) \quad (9-4)$$

$$L = L_{ice} - \Delta H(x) - \frac{x^2}{100} g'(x) \quad (9-5)$$

ここで， $L$  [kJ/kg]は有効融解潜熱， $x$  [wt%]は水溶液の濃度を表す． $L_{ice}$  [kJ/kg]は氷の融解潜熱を表し，334kJ/kg である．



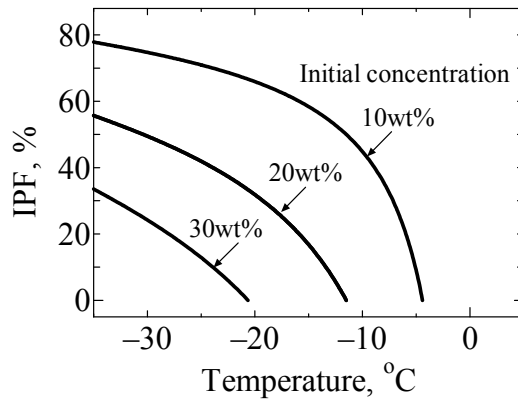


図 9-1 氷スラリーの温度と IPF の関係(9-1)

$\Delta H$  [kJ/kg]は凝固点における水—氷間のエンタルピー差であり，水と氷の比熱の差を，純水の凝固点と水溶液の凝固点の間で積分した値となる．

$$\Delta H = \int_{T_e}^0 (c_w - c_i) dT \quad (9-6)$$

ここで， $c_w, c_i$  [kJ/(kg K)]はそれぞれ水，氷の定圧比熱を表しており，その値は後述する．また， $T_e$  [°C]は水溶液の凝固点を表す．

水溶液の濃度変化に伴う混合熱，無限希釈熱をそれぞれ， $f(x), g(x)$ で表し，その微分係数を $f'(x), g'(x)$ とする．有効融解潜熱の計算には，混合熱が既知である場合は式(9-4)，無限希釈熱が既知である場合は式(9-5)を用いる．なお，氷スラリーの母液となる代表的な水溶液の溶質については，混合熱，無限希釈熱の値を後述する．

エタノール，エチレングリコール，プロピレングリコール，塩化ナトリウム水溶液中の氷の有効融解潜熱を図 9-2 に示す．

図 9-2 中の点は実験値，太線は計算値である．計算値は式(9-4)，(9-5)にそれぞれの水溶液の物性値を代入することで得られたものである．計算値を最小二乗法で近似すると下式を得る．

$$\begin{aligned} \text{エタノール水溶液:} \quad L &= 3.335 \times 10^5 - 6.32 \times 10^2 x \\ &\quad - 71.9x^2 + 1.24 \times 10^{-1} x^3 \end{aligned} \quad (9-7)$$

$$\begin{aligned} \text{エチレングリコール水溶液:} \quad L &= 3.335 \times 10^5 - 6.49 \times 10^2 x \\ &\quad - 16.7x^2 - 3.07 \times 10^{-1} x^3 \end{aligned} \quad (9-8)$$

$$\begin{aligned} \text{プロピレングリコール水溶液:} \quad L &= 3.335 \times 10^5 - 5.77 \times 10^2 x \\ &\quad - 37.9x^2 - 8.95 \times 10^{-2} x^3 \end{aligned} \quad (9-9)$$

$$\begin{aligned} \text{塩化ナトリウム水溶液:} \quad L &= 3.335 \times 10^5 - 1.28 \times 10^3 x \\ &\quad + 29.1x^2 - 2.04x^3 \end{aligned} \quad (9-10)$$

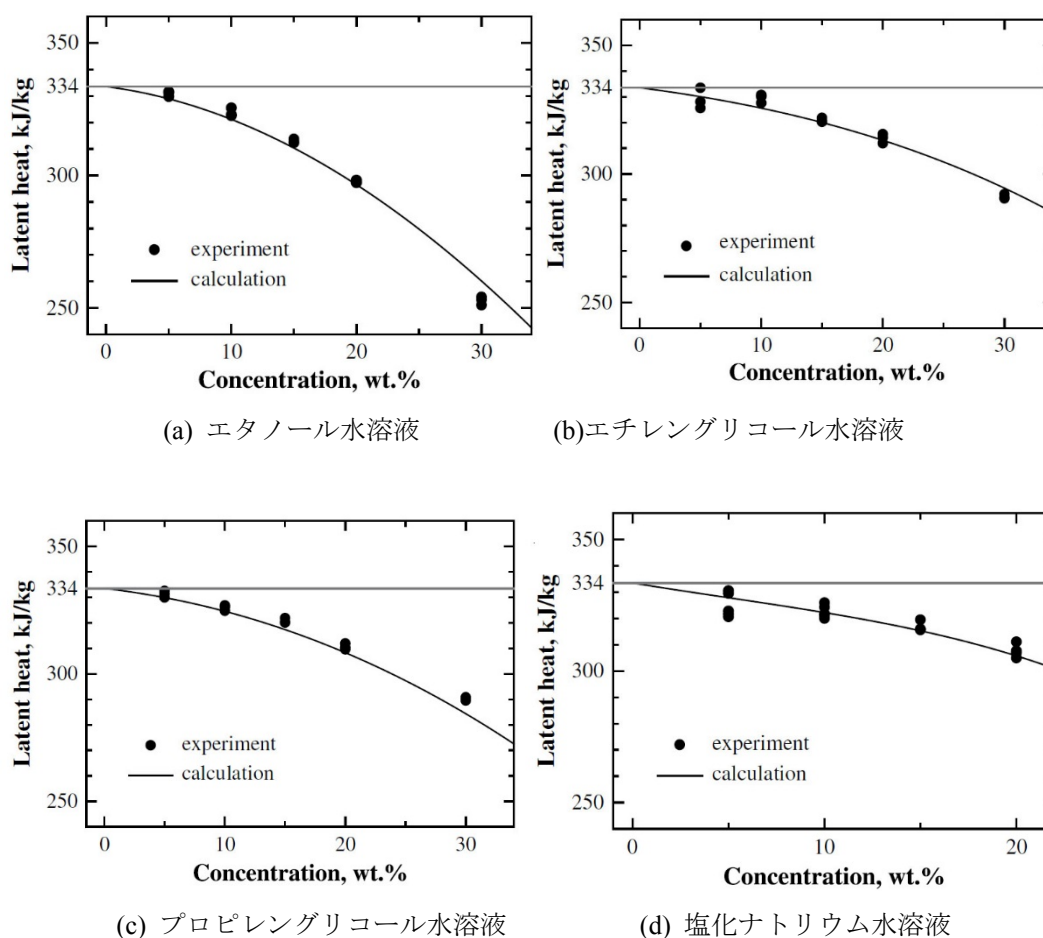


図 9-2 水溶液中の氷の融解潜熱(9-2) (有効融解潜熱)

### 9.1.3 見かけの熱伝導率

Matsumoto ら(9-3)は、非定常線熱源法を用いて氷スラリーの見かけの熱伝導率（氷の融解潜熱の影響を含む熱伝導率）の測定を行った。見かけの熱伝導率に影響するパラメーターとして、例えば、ステファン数、初期 IPF、初期 IPF における液相の濃度、初期 IPF におけるステファン数、液相の体積割合、固液相平衡曲線の傾きなどが挙げられるが、各パラメーターに対して見かけの熱伝導率の経時変化の詳細な数値計算を実行した結果、初期 IPF における液相の濃度の影響が最も大きいことを明らかにした。

数値計算の一例として、図 9-3 にエタノール水溶液、エチレングリコール水溶液、プロピレングリコール水溶液の氷スラリーにおける見かけの熱伝導率 $\lambda_{app}[\text{W/mK}]$ の経時変化を示す。 $\lambda_c[\text{W/mK}]$ は氷を含まない水溶液の熱伝導率である。横軸はフーリエ数 $t^* = a t/r^2$ を表す。 $a [\text{m}^2/\text{s}]$ は水溶液の温度伝導率、 $r [\text{m}]$ は代表長さ、 $t [\text{s}]$ は時間を表す。なお、計算条件として、初期濃度 $C_i$ を 10wt%，氷スラリーの初期 IPF を 10wt%，ステファン数を 0.01 としている。氷スラリーの見かけの熱容量は、融解潜熱の影響がない場合に比べ、水溶液の種類（エタノール水溶液、エチレングリコール水溶液、プロピレングリコール水溶液）に応じてそれぞれ約 32.2, 21.4, 15.9 倍となる。

非定常線熱源法による測定においては、測定開始後 10s 程度で自然対流の影響が現れ始めるといわれている。実時間 $t=10\text{s}$ に対応するフーリエ数 $t^*$ はそれぞれの水溶液について、約 290, 400, 500 となるため、そのときの見かけの熱伝導率を読み取ると、それぞれ約 17%, 9%, 7%の増加が見られた。ただし、最近ではさらに短時間での測定が行われており、その場合は、見かけの熱伝導率の増加はさ

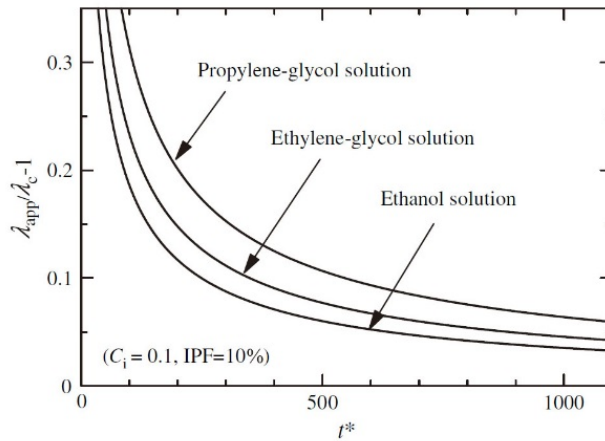


図 9-3 氷スラリー中の見かけの熱伝導率(9-3)

らに顕著になると考えられる。

プロピレングリコール水溶液の氷スラリーにおいて、見かけの熱伝導率の増加が最も著しいが、その理由は、プロピレングリコール水溶液では固液相平衡曲線の傾き（温度に対する濃度勾配）が大きいことにより、氷の融解潜熱が見かけの熱伝導率に及ぼす影響が大きいためであると考えられる。

#### 9.1.4 氷スラリーの液相の物性

氷スラリーの性質は、液相（母液の水溶液）の物性に強く依存している。一般に水溶液の物性は温度と濃度により変化するが、前述のように氷スラリーの場合、IPFにより液相の温度と濃度が変化するため、氷スラリーを扱う際にはIPFの変化による液相の物性の変化を把握しておかなければならない。

Kumano ら(9-4)は、氷スラリーの液相の物性値として、凝固点におけるエタノール水溶液の動粘性係数と密度について以下の近似式を提案している。これらは、氷スラリーの流動現象を扱う上で特に重要となる物性値である

$$\nu_s = 1.792 \times 10^{-6} - 2.590 \times 10^{-7} T_e + 6.908 \times 10^{-8} T_e^2 + 1.995 \times 10^{-9} T_e^3 \quad (9-11)$$

$$\rho_s = 999.7 + 4.118 T_e + 1.256 \times 10^{-1} T_e^2 - 1.89 \times 10^{-2} T_e^3 \quad (9-12)$$

ここで、 $\nu_s$  [m<sup>2</sup>/s]は動粘性係数、 $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>]は密度、 $T_e$  [°C]は氷スラリーの温度、すなわち液相（母液の水溶液）の凝固点を表す。

図 9-4、9-5 は、氷スラリーの液相の物性値を定める過程を図示したものである。はじめに、凝固点付近で氷を含まない水溶液の物性値を測定する。図の細線は氷を含まない水溶液の物性値を表す。図の■印は水溶液の凝固点における値を示す。水溶液の凝固点よりも低い温度における細線の値は、過冷却状態の水溶液の物性値である。■印を最小二乗法で結ぶことで得た、図に太線で示す近似式が式(9-11)、(9-12)である。これにより、水溶液の凝固点における物性値、すなわち、氷スラリーの液相の物性値を知ることができる。

#### 9.1.5 見かけのレイノルズ数

Kumano ら(9-4)の報告により、円管内の氷スラリーの流動現象では、氷スラリーは疑塑性流体として扱うことができることが知られている。Kumano ら(9-3)は、5wt%のエタノール水溶液を用いた実験により、平均流速  $u_m$  [m/s]と圧力損失  $\Delta p$  [Pa]を測定し、疑塑性流体の性質を表す下式に適用して、係数

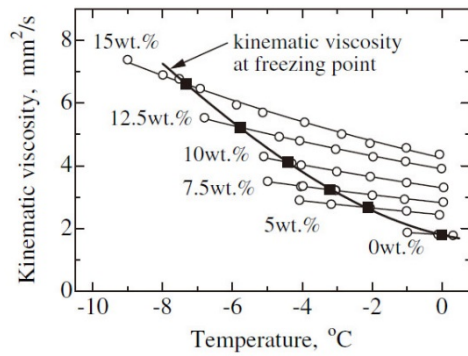


図 9-4 氷スラリーの液相の動粘性係数(9-4)

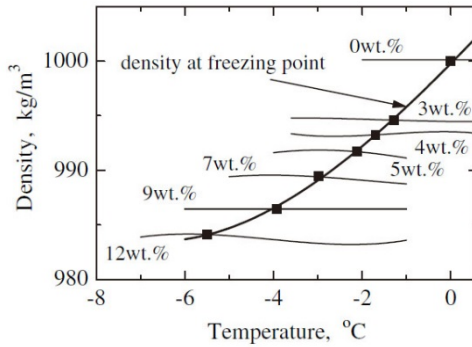


図 9-5 氷スラリーの液相の密度(9-4)

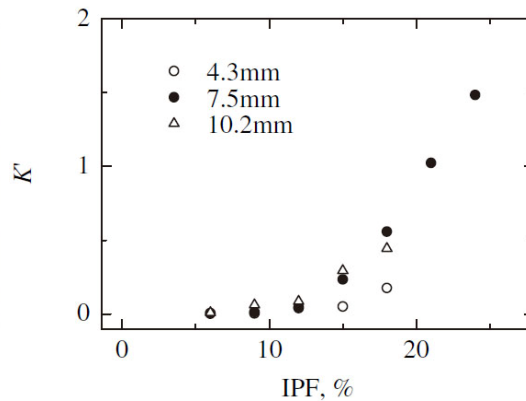
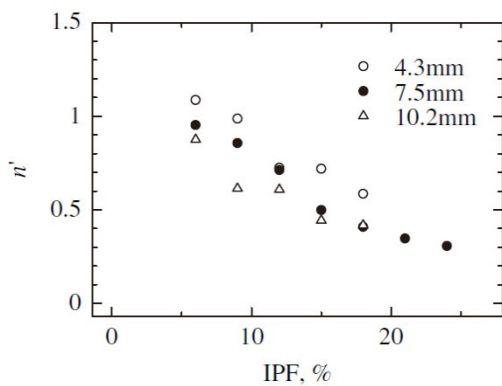


図 9-6 氷スラリーの性質を疑塑性流体として表す式(9-13)における係数  $n'$ ,  $K'$  と IPF の関係(9-4)

$n'$ ,  $K'$ を得た.

$$\frac{D\Delta p}{4L} = K' \left( \frac{8u_m}{D} \right)^{n'} \quad (9-13)$$

ここで,  $L$  [m]は配管長さ,  $D$  [m]は配管内径を表す.

図 9-6 に, 係数  $n'$ ,  $K'$  と IPF の関係を示す.

この係数  $n'$ ,  $K'$ を用いて, 式(9-14)のように, 見かけのレイノルズ数  $Re_M$ を定義する. また, これとは区別して, 式(9-15)で定めるレイノルズ数を水溶液のレイノルズ数  $Re$  とよぶ.

$$Re_M = \frac{D^{n'} u_m^{2-n'} \rho}{8^{n'-1} K'} \quad (9-14)$$

$$Re = \frac{u_m D}{\nu_s} \quad (9-15)$$

Kumano ら(9-4, 9-5)の報告によると, 水溶液のレイノルズ数  $Re$  が小さく層流の条件を満たす場合, 氷スラリーの管摩擦係数, 熱伝達係数は, 見かけのレイノルズ数  $Re_M$ を用いた理論式とよい相関を示す. また, 水溶液のレイノルズ数  $Re$  が十分に大きい場合, 管摩擦係数, 熱伝達係数は見かけのレイノルズ数  $Re_M$ に依存しない傾向を示す. すなわち, 氷スラリーの管摩擦係数, 熱伝達係数は層流では, IPF

表 9-1 氷の物性値(9-9)

温度 [K]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [kJ/(kg K)]	熱伝導率 [W/(m K)]
273	917	2.0	2.2
200	920	1.6	3.1
173	921	1.4	3.5

表 9-2 水の物性値(9-10)

温度 [K]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	定圧比熱 [kJ/(kg K)]	熱伝導率 [W/(m K)]	動粘度 [mm/s <sup>2</sup> ]	表面張力 [N/m]
273.16	999.78	4.217	0.5619	1.792	0.07565
300	996.62	4.179	0.6104	0.8573	0.07169
370	960.37	4.212	0.6761	0.3039	0.05952

に強く依存し、乱流では IPF に依存しないといえる。

また、水溶液のレイノルズ数  $Re$  が大きい条件において、IPF が増加すると、それまで IPF に依存しない乱流の特徴を示していた氷スラリーの管摩擦係数と熱伝達係数が、層流の場合と同様に見かけのレイノルズ数  $Re_M$  とよい相関を示すようになる、すなわち、氷スラリーの流動状態が層流となることが知られている。エタノール水溶液の氷スラリーの場合、IPF が増加するほど、見かけのレイノルズ数  $Re_M$  は低下し、見かけのレイノルズ数  $Re_M$  と水溶液のレイノルズ数  $Re$  との比  $Re_M/Re$  が 0.5 のところで流動状態が層流に変わる。

## 9.2 氷および水の物性

水の凝固点、すなわち氷の融解温度は大気圧下で 0°C (273.15K) であり、融解潜熱（凝固潜熱）は 334 kJ/kg である。氷および水の物性値をそれぞれ表 9-1、9-2 に示す。

特に、氷の比熱については、Dorsey(9-6)、前野ら(9-7)により、以下の近似式が報告されている。

$$c_i = 2117 + 7.8T \quad (9-16)$$

ここで、 $T[^\circ\text{C}]$  は温度を表す。

また、水の比熱については、Angell ら(9-8)の報告した値をもとに Kumano ら(9-2)により以下の近似式が報告されている。

$$c_w = 4217 + 5.43T + 1.48T^2 + 0.0649T^3 + 0.00154T^4 \quad (9-17)$$

ここで、 $T[^\circ\text{C}]$  は温度を表す。

## 9.3 氷スラリーの母液となる水溶液の物性

氷スラリーの母液となる水溶液の代表的なものとして、エタノール、エチレングリコール、プロピレングリコールなどが上げられる。以下にそれぞれの水溶液について、凝固点、比熱、比重、粘性係数（動粘性係数）、熱伝導率、混合熱（無限希釈熱）を示す。

### 9.3.1 凝固点

エタノール(9-10), エチレングリコール(9-11), プロピレングリコール(9-10), 塩化ナトリウム(9-10)を溶媒とする水溶液の凝固点は文献により知ることができるが, 簡便に算出するためには Kumano ら(9-2)による以下の近似式が有効である.

$$\text{エタノール水溶液: } T_e = -0.358x - 0.00814x^2 - 0.0000788x^3 \quad (9-18)$$

$$\text{エチレングリコール水溶液: } T_e = -0.302x - 0.00226x^2 - 0.000125x^3 \quad (9-19)$$

$$\text{プロピレングリコール水溶液: } T_e = -0.267x - 0.00253x^2 - 0.000138x^3 \quad (9-20)$$

$$\text{塩化ナトリウム水溶液: } T_e = -0.599x + 0.000118x^2 - 0.000568x^3 \quad (9-21)$$

ここで,  $T_e$  [°C]は凝固点,  $x$  [wt%]は水溶液の濃度を表す.

### 9.3.2 比熱

各種水溶液の比熱を図 9-7, 9-8 及び表 9-3, 9-4 に示す.

表 9-3 エタノール水溶液の定圧比熱(9-10), kJ/(kg K)

温度 [°C] 濃度 [mol%]	3	23	41
4.16	4.39	4.27	4.27
11.5	4.27	4.31	4.31
37.0	3.37	3.60	3.66
61.0	2.80	3.04	3.13
100.0	2.26	2.42	2.60

表 9-4 塩化ナトリウム水溶液の定圧比熱(9-10), kJ/(kg K)

温度 [°C] 濃度 [mol%]	6	20	33	57
0.249		4.14		
0.99	4.02	4.06	4.06	
2.44	3.81	3.83	3.83	3.86
9.09	3.37	3.39	3.39	3.43

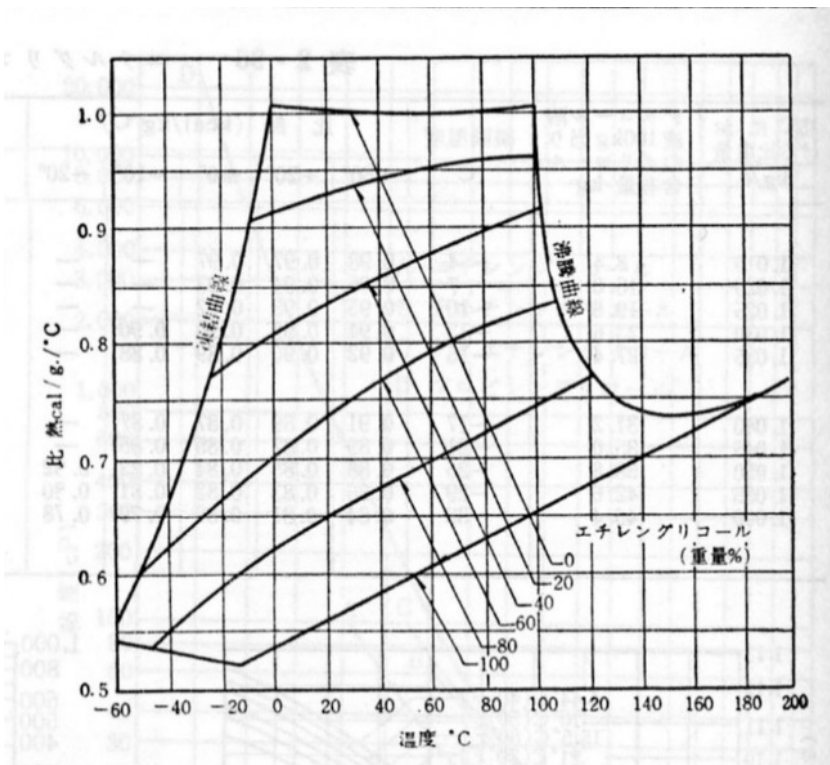


図 9-7 エチレングリコール水溶液の定圧比熱(9-11)

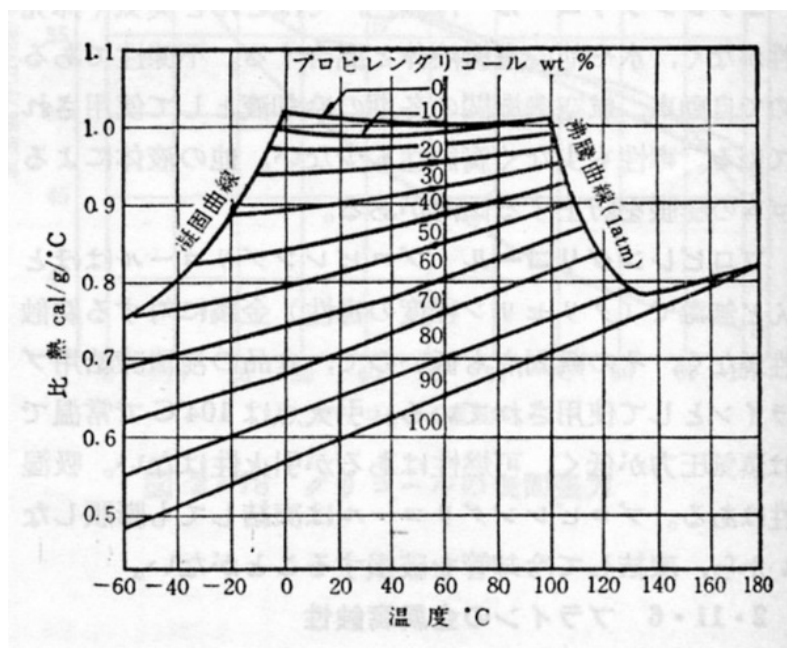


図 9-8 プロピレングリコール水溶液の定圧比熱(9-11)

### 9.3.3 比重

各種水溶液の比重を図 9-9, 9-10 及び表 9-5, 9-6 に示す。

表 9-5 エタノール水溶液の比重 (20°C) (9-10)

濃度, wt%	比重
0	0.9982
10	0.9819
20	0.9687
30	0.9539
40	0.9352

表 9-6 塩化ナトリウム水溶液の比重 (20°C) (9-10)

濃度, wt%	比重
0	0.9982
10	1.0707
20	1.1478

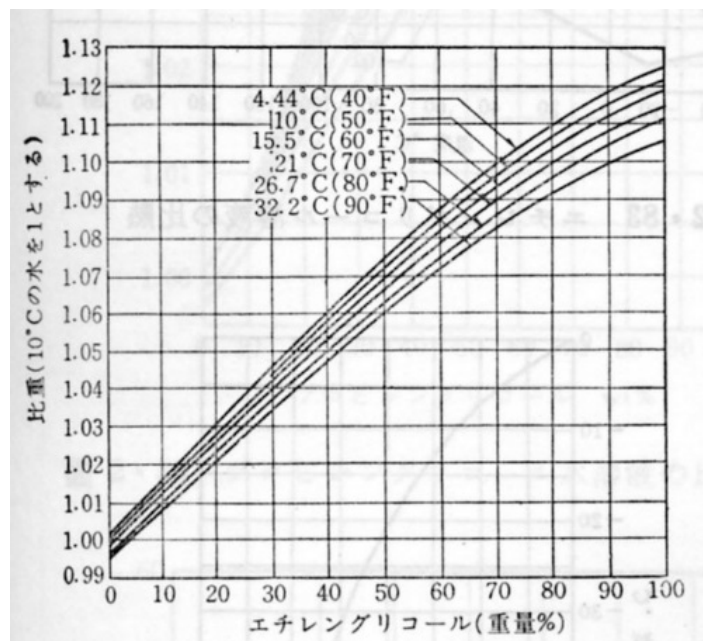


図 9-9 エチレングリコール水溶液の比重(9-11)



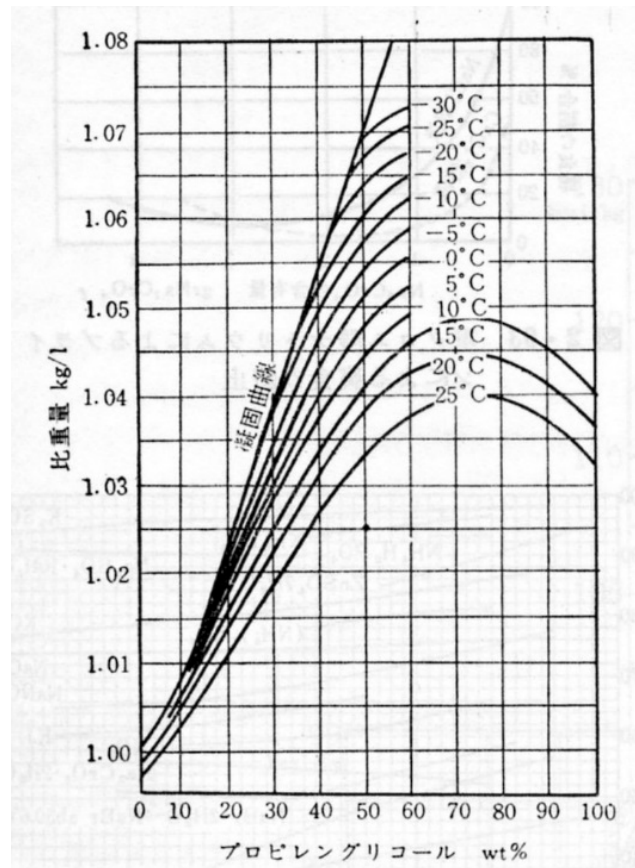


図 9-10 プロピレングリコール水溶液の比重(9-11)

表 9-7 エタノール水溶液の粘性係数(9-10) mPa s

温度 [°C]	0	5	10	15	20	30	80
濃度 [wt%]							
10	3.311	2.577	2.179	1.792	1.538	1.160	0.430
20	5.319	4.065	3.165	2.618	2.183	1.553	0.505
30	6.94	5.29	4.05	3.26	2.17	1.87	0.567
40	7.14	5.59	4.39	3.53	2.91	2.02	0.601

表 9-8 塩化ナトリウム水溶液の粘性係数(9-10) mPa s

温度 [°C]	-10	0	10	30	80
濃度 [wt%]					
5		1.86	1.39	0.87	0.40
10		2.01	1.51	0.95	0.45
15	3.37	2.27	1.69	1.07	0.50
20	4.08	2.67	1.99	1.24	0.57
25	5.19	3.31	2.38		

9.3.4 粘性係数, 動粘性係数

各種水溶液の粘性係数, 動粘性係数を以下の図 9-11, 9-12 及び表 9-7, 9-8 に示す.

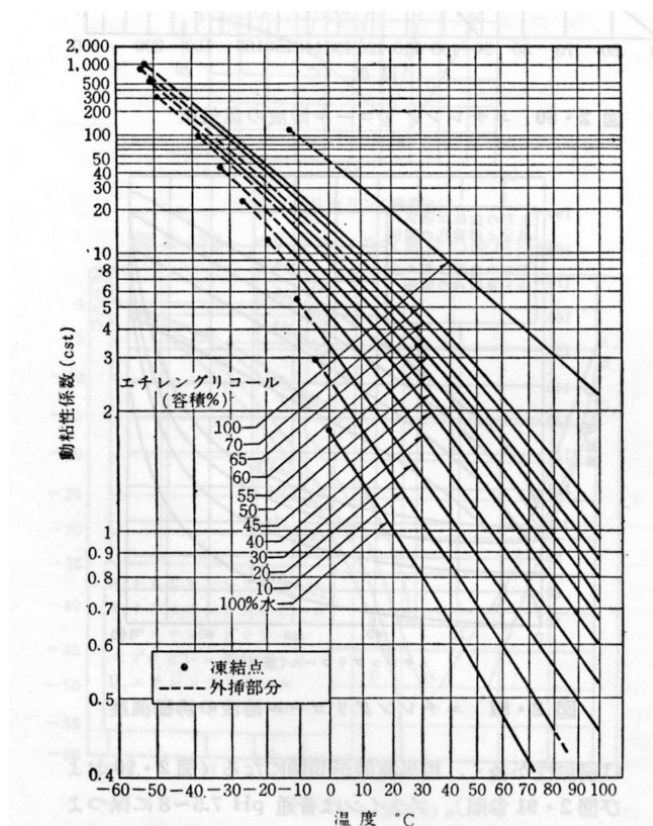


図 9-11 エチレングリコール水溶液の動粘性係数(9-11)

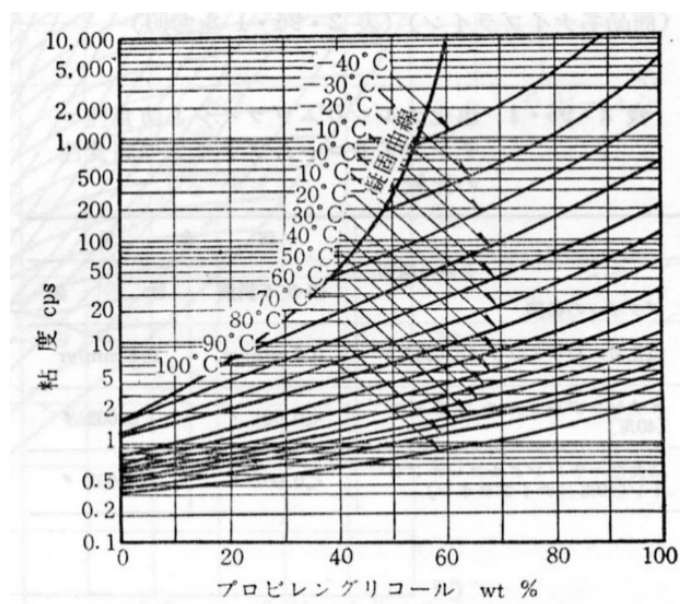


図 9-12 プロピレングリコール水溶液の粘性係数(9-11)

### 9.3.5 熱伝導率

各種水溶液の熱伝導率を以下の図 9-13 及び表 9-9, 9-10, 9-11 に示す.

表 9-9 エタノール水溶液の熱伝導率(9-10), W/(m K)

温度 [°C] 濃度 [wt%]	-40	-20	0	20	40	80
0			0.565	0.599	0.628	0.670
20			0.451	0.471	0.490	0.516
45		0.343	0.352	0.364	0.373	0.386
60	0.266	0.270	0.273	0.276	0.279	0.285
80	0.216	0.214	0.213	0.212	0.209	0.206
100	0.183	0.178	0.172	0.167	0.162	0.152

表 9-10 エチレングリコール水溶液の熱伝導率(9-10), W/(m K)

温度 [°C] 濃度 [wt%]	-40	-20	0	20	40	80
0			0.565	0.599	0.628	0.670
20			0.485	0.508	0.531	0.568
45		0.393	0.408	0.423	0.438	0.469
60	0.328	0.337	0.346	0.356	0.365	0.384
80	0.284	0.288	0.293	0.298	0.302	0.312
100			0.252	0.255	0.257	0.262

表 9-11 塩化ナトリウム水溶液の熱伝導率 (20°C) (9-10)

濃度, wt%	熱伝導率, W/(m K)
0	0.599
10	0.590
20	0.578

### 9.3.6 混合熱, 無限希釈熱

エタノール(9-12), エチレングリコール(9-13), プロピレングリコール(9-13)の 25°Cにおける混合熱は, Friese ら(9-12), Kracht ら(9-13)により報告されている. 簡便に算出するためには Kumano ら(9-2)による以下の近似式が有効である.

$$\begin{aligned} \text{エタノール } Q_m \equiv f(x) = & 2.345 \times 10^5 - 2.998 \times 10^3 x - 64.1x^2 \\ & + 1.35x^3 - 6.44 \times 10^{-3} x^4 \end{aligned} \quad (9-22)$$

$$\text{エチレングリコール } Q_m \equiv f(x) = 1.139 \times 10^5 - 1.414 \times 10^3 x + 2.86x^2 \quad (9-23)$$

$$\text{プロピレングリコール } Q_m \equiv f(x) = 2.006 \times 10^5 - 3.5 \times 10^3 x + 15.25x^2 \quad (9-24)$$

ここで,  $Q_m$ [kJ/kg]は混合熱,  $x$ [wt%]は水溶液の濃度を表す.

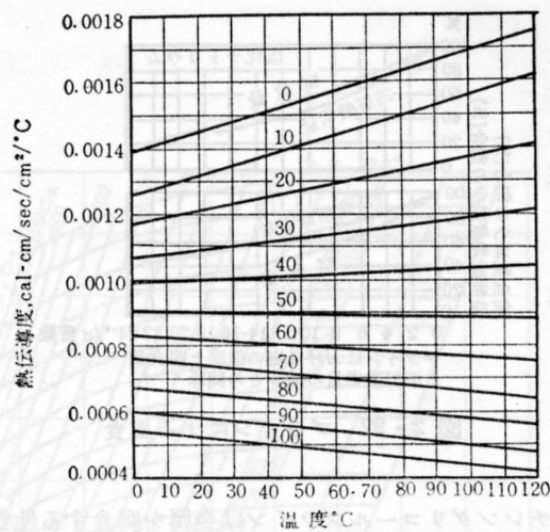


図 9-13 プロピレングリコール水溶液の熱伝導率(9-11)

また、塩化ナトリウムについては、Hubert ら(9-14)により、無限希釈熱が報告されている。同様に、以下の Kumano ら(9-2)による近似式が有効である。

$$\text{塩化ナトリウム } Q_d \equiv g(x) = 1.081 \times 10^4 - 2.34 \times 10^3 x + 20.9 x^2 \quad (9-25)$$

ここで、 $Q_d$ [kJ/kg]は無限希釈熱、 $x$ [wt%]は水溶液の濃度を表す。

なお、エタノール、エチレングリコール、プロピレングリコールの希釈は発熱反応であり、塩化ナトリウム水溶液の希釈は吸熱反応である。

#### 参考文献

- (9-1) 浅岡龍徳, 熊野寛之, 斎藤彬夫, 大河誠司, DSC を用いた水溶液の潜熱測定に関する研究, 日本冷凍空調学会論文集, 24(2), (2007), 117-125.
- (9-2) Hiroyuki Kumano, Tatsunori Asaoka, Akio Saito, Seiji Okawa, Formulation of the latent heat of fusion of ice in aqueous solution, Int. J. Refrig. 32, (2009), 175-182.
- (9-3) Koji MATSUMOTO, Takahiro SUZUKI, Measurement of thermal conductivity of ice slurry made from solution by tansient line heat-source technique (analytical discussion on influence of latent heat of fusion), International Journal of Refrigeration, 30,1(2007), 187-194.
- (9-4) Hiroyuki Kumano, Tetsuo Hirata, Michito Shirakawa, Ryouta Shouji, Yosuke Hagiwara, Flow characteristics of ice slurry in narrow tubes, Int. J. Refrig. 33, (2010) 1513-1522.
- (9-5) Hiroyuki Kumano, Tetsuo Hirata, Ryouta Shouji, Michito Shirakawa, Experimental study on heat transfer characteristics of ice slurry, Int. J. Refrig. 33, (2010), 1540-1549.
- (9-6) Dorsey, N.E., Properties of Ordinary Water Substances..Reinhold, New York, (1940).
- (9-7) 前野紀一, 福田正巳, 基礎雪氷学講座第 I 巻 雪氷の構造と物性, (1986), p.121.
- (9-8) Angell, C.A., Ogunl, M., Slchina, W.J., Heat capacity of water at extremes of supercooling and superheating. J. Phys. Chem.86, (1982), 998-1002.
- (9-9) 伝熱工学試料 改訂第 3 版, 日本機械学会, (2009), p.290.
- (9-10) 技術資料 流体の熱物性値集, 日本機会学会, (1983), pp. 468-477.
- (9-11) 冷凍空調便覧, 再版, 1972, pp. I-165-167.

- (9-12) Friese, T., Ulbig, P., Schulz, S., Wagner, K., Effect of NaCl or KCl on the excess enthalpies of alkanol þ water mixtures at various temperatures and salt concentrations. *J. Chem. Eng. Data* 44, (1999), 701–714.
- (9-13) C. Kracht, P. Ulbig, S. Schulz, Measurement and correlation of excess molar enthalpies for (ethanediol, or 1,2-propanediol, or 1,2-butanediol þ water) at the temperatures (285.65, 298.15, 308.15, 323.15, and 338.15) K, *J. Chem. Thermodyn.* 31, (1999), 1113-1127.
- (9-14) Hubert, N., Solimando, R., Pere, A., Schuffenecker, L., Dissolution enthalpy of NaCl in water at 25C, 45C and 60C, determination of the Pitzer's parameters of the {H<sub>2</sub>O–NaCl} system and the molar dissolution enthalpy at infinite dilution of NaCl in water between 25C and 100C, *Thermochimica Acta* 294, (1997), 157–163.

本プロジェクトの委員であり、本手引書の執筆者は以下のとおりである。

主査	松本 浩二	中央大学工学部精密機械工学科
幹事	熊野 寛之	青山学院大学工学部機械創造工学科
委員	浅岡 龍徳	信州大学工学部機械システム工学科
委員	阿部 浩之	(株) 大気社 技術開発センター
委員	大石 聡	(株) ニチレイフーズ生産本部
委員	嘉村 幸長	日新興業(株)東京支店 営業部
委員	宇野 光世	日新興業株式会社 工務本部・開発部
委員	工藤 謙一	青森県産業技術センター 弘前地域研究所
委員	黒田 尚紀	新日本空調(株) 技術開発研究所
委員	田添 正人	スラリー21(株) 営業部
委員	田村 記秀	新菱冷熱工業(株) 中央研究所
委員	寺岡 喜和	金沢大学 理工研究域 機械工学系
委員	中村 新吾	富士電機(株)技術開発本部先端技術研究所
委員	万尾 達徳	高砂熱学工業(株) 総合研究所
委員	山田 育弘	新菱冷熱工業(株) 中央研究所
委員	吉村 育大	(株)ダイキンアプライドシステムズ 技術開発部
委員	渡辺 学	東京海洋大学海洋科学部食品生産科学科
顧問	岡田 昌志	青山学院大学名誉教授
顧問	斎藤 彬夫	東京工業大学名誉教授
顧問	関 光雄	(株) NATOMICS

敬称略

## 謝辞

本プロジェクトの遂行と本手引書を発行するにあたり、日本冷凍空調学会西口 章事務局長並びに職員の皆様には大変お世話になりました。ここに謝意を表します。

なお、本手引書及び手引書と参考文献等を併せて集録したDVDのコピーおよび配布を堅く禁ずる。

日本冷凍空調学会  
「機能性氷スラリーによる冷蔵・冷却」調査研究プロジェクト