

地域冷房用氷水搬送システムの開発（その1）

——圧力損失特性の把握と要素技術の開発——

武 元 和 治 小野島 一
宮 川 保 之

Development of Ice/Water Transportation System for District Cooling (Part 1)

——Evaluation of Pressure Drop and Development of Elemental Technique——

Kazuharu Takemoto Hajime Onojima
Yasuyuki Miyagawa

Abstract

The “Ice/Water Transportation System” using the Harvest Ice Heat Storage System developed by Obayashi is a new system which is capable of supplying cooling energy for air conditioning of a wide area. This system consists of transporting water mixed with a specified amount of ice in piping. This study was made to experimentally grasp the characteristics of pressure drop of the ice/water mixture. Further, as an elemental technique required for composition of the system, results of evaluation by model tests were obtained through measurements of ice packing factor and the method of taking out ice from a tank. It was confirmed that this system has good performance, high reliability, and a good possibility of being applied to a practical plant.

概 要

氷水搬送システムとは、当社が開発したハーベスト式氷蓄熱システムを利用するもので、生成された氷を水と混合して配管で輸送し、広範囲の空調用冷熱エネルギー供給に活用するものである。そこで、本研究では、このシステムを実用化するために、配管内を流れる氷水の圧力損失状況を実験的に把握し、それと共に損失特性の解明を行った。さらに、システムを構築する上で必要となる要素技術として、水量計測法と水槽内氷の取り出し法および混合法について、模型実験による性能評価結果を得ている。実験結果からは、本システムは技術的に十分実用性があり、実施プラントへの適用が可能であることが確認できた。

1. はじめに

近年、都市部におけるビルのインテリジェント化が進むに連れて、特に空調用冷熱エネルギーの需要が増大する傾向が見られる。都市の再開発に伴い、地域冷暖房システムの導入が盛んに検討される中、従来の水方式では輸送設備に大きなコストがかかることになり、より高密度なエネルギー輸送方式の開発が必要となっている。

そこで今回、それに代わる画期的な冷熱輸送方式として「氷水搬送システム」を開発した。これは、当社が実用化したハーベスト式氷蓄熱システム¹⁾を利用するもので、生成された薄板状の氷を適当な大きさに粉碎して、水と混合して配管にて輸送し、氷の潜熱を直接ビル側へと供給するものである。

これにより、一般冷水に比べ単位流量当たりの冷熱輸送能力が格段に増大（約2～8倍）するため、冷熱供給が少ない流量で済むことになる。そのため、配管径が小さくでき、しかも搬送動力も大幅に削減できる。

しかし、この「氷水搬送システム」を実用化するに当たり数多くの諸問題を解決する必要がある。その主な項目として、以下の内容が挙げられる。

- ① 氷水配管内の圧力損失と氷の分岐特性の実状把握
 - ② 水槽内および配管内の水量計測法の開発
 - ③ 水槽からの氷取り出しと氷と水の混合技術の開発
- 今回の所報では、これらの項目について実状把握実験および模型実験等を行い、その結果を示すと共に、当システムの実用性について検討する。

2. 圧力損失と分岐特性の実状把握実験

配管計画を行う上で、水と混合された氷が管内を流れると、直管部および継手類で、圧力損失が水だけの場合に比べていかに変化するかを実験的に把握する必要がある。今回の実験では、水平および垂直配管、90°エルボにて、それぞれの圧力損失を実測し、さらに90°・45°分岐管における分岐特性を把握した。

2.1 実験方法

図一1に実験装置系統図を示す。生成されたハーベスト氷は、クラッシャにて粉碎し20mmふるいにて選別を行った後、氷水混合機に投入し水と混合させて配管内を流す。流量はポンプの回転数制御により変化させ、電磁流量計を用いて測定する。また、圧力損失は差圧変換器にて測定する。この時の配管内氷充填率(IPF)は、吐出バルブ1を開け氷水を取り出し、氷と水を分離し、各々の重量を計り求めた。配管材は透明塩ビ管を用い、氷の流れる様子が観察できるようにした(写真一1参照)。

2.2 氷の流れる様子

氷の流れる様子を観察したところ、以下の特徴が分かった。

- ① 水平直管部では、氷は上部に偏在し、流速は管上面では遅く管軸部では速い。
- ② 管軸部では、時々氷の回転が見られる。

- ③ 氷は管壁面を擦りながら移動する。
- ④ エルボでは、氷水の方が流れの乱れは小さい。
- ⑤ 分岐部では、直進する氷が多く、分岐しにくい。

2.3 圧力損失

それぞれの部位において把握した圧力損失の実測結果を示すと共に、それに基づく損失特性の解明結果について説明する。

今回の実験は直径50mmの配管を用いて行った。配管内の氷充填率(IPF)は次式(1)にて定義する。

$$IPF = V_i / (V_w + V_i \cdot \rho_i) \quad \dots\dots\dots(1)$$

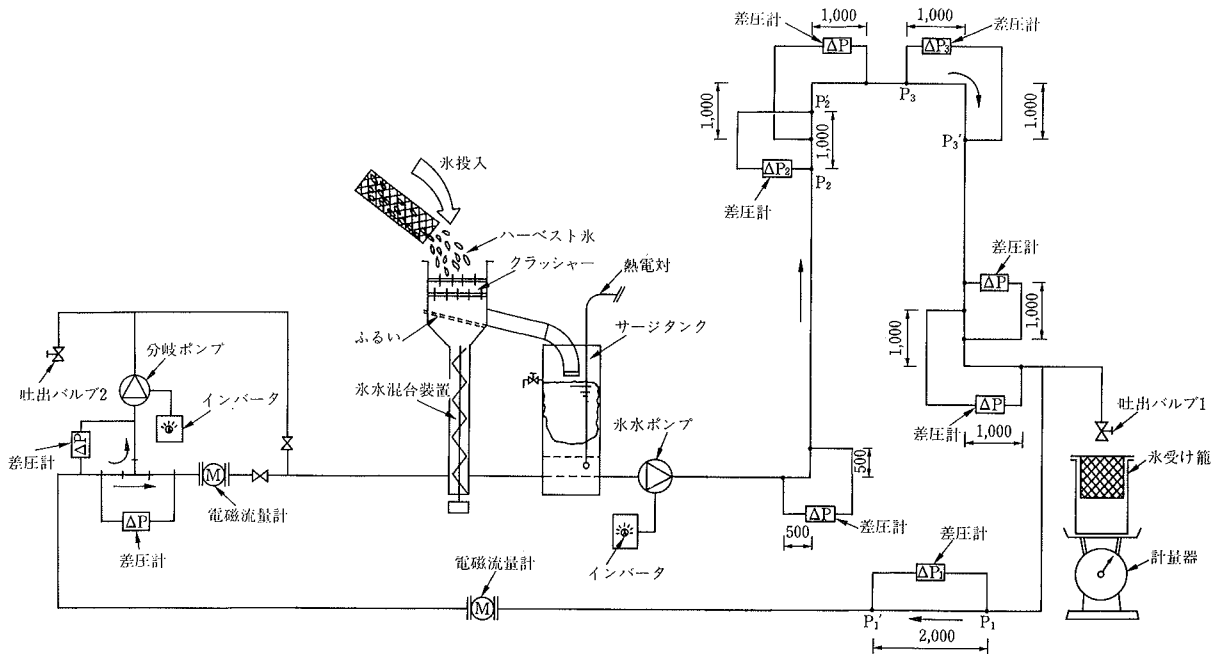
但し、 V_i : 氷の体積流量 (m^3/s)

V_w : 水の体積流量 (m^3/s)

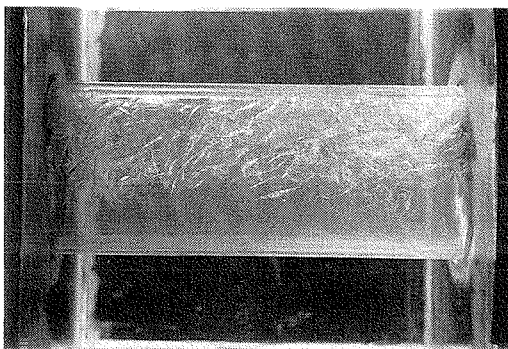
ρ_i : 氷の比重 (0.917)

以下、流量と圧力損失との関係はIPFを10%未満, 10%台, 20%台, 30%以上の4段階に区分して表示した。

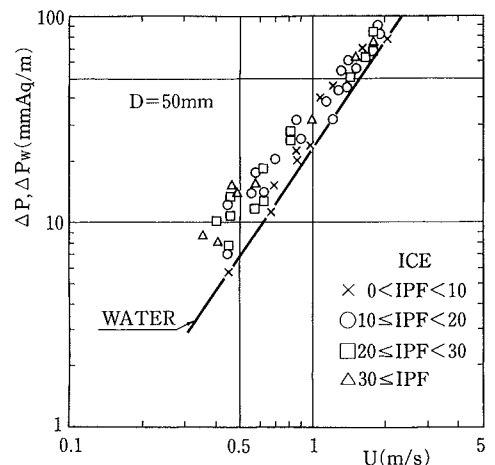
図一2に水平直配管の圧力損失を示す。これによれば、



図一1 実験装置系統図



写真一1 氷水の流れ状況



図一2 水平直管の圧力損失 ($P_1 - P'_1$)

IPF が大きく、流速が遅いほど、水との差は大きくなる
ことが分かる。しかし、流速が 1 m/s を越えると差は小
さくなり、次第に水と変わらなくなる。

ここで、圧力損失の増加は IPF と関係していると考え
られることから、IPF を考慮にいれた付加圧力損失係数
 ϕ を(2)式より定義して求める²⁾。

$$\phi = (\Delta P - \Delta P_w) / (IPF \cdot \Delta P_w) \quad \dots\dots\dots(2)$$

但し、 ΔP : 氷水の圧力損失 (mmAq/m)
 ΔP_w : 水の圧力損失 (mmAq/m)

また、固一液二相流の流れの状態を支配する変数とし
て知られている F を、(3)式より定義して求める³⁾。

$$F = U^2 / (1 - \rho_i) \cdot g \cdot D \quad \dots\dots\dots(3)$$

但し、U : 氷水の流速 (m/s)
g : 重力加速度 (9.8 m/s²)
D : 配管径 (mm)

この F は、白樫らの雪水二相流の研究⁴⁾と同様に、以
下、フルード数 Fr として扱うことにする。

実測値より求めた ϕ , Fr との関係を図-3 に示す。こ
れより、実験範囲内では、付加圧力損失係数 ϕ は管径 D
によらずフルード数 Fr のみの関数として表わせること
が分かる。このことから、この時の実験式を求めること
により、氷水配管の圧力損失の予測は可能になると考え
られる。また、今回の実験により求めた氷水の予測式は、
白樫らの雪水二相流の実験式⁴⁾とほぼ同じであることが
分かった。

垂直配管の実験は、上昇直管および下降直管について
行った。図-4 に上昇直管の流速と圧力損失との関係を
示す。これによれば、圧力損失は氷水の方が水より小さ
く、しかも IPF が大きく、流速が遅いほどその差は大き
い。これは、水の浮力による影響と考えられる。一方、
下降直管では、水平配管と同様の傾向を示した。

エルボの実験は、水平→垂直上昇、垂直上昇→水平、
水平→垂直下降、垂直下降→水平の 4 方向について行っ
た。実測により得られる圧力損失には、(4)式に表わすよ

うにエルボでの曲がり損失 h_e とエルボ前後の直管部で
の摩擦損失 h_s が含まれる⁵⁾。

$$h = h_s + h_e \quad \dots\dots\dots(4)$$

但し、h : 実測による圧力損失 (mmAq)
 h_s : 測定点間の管摩擦損失 (mmAq)
 h_e : エルボの曲がり損失 (mmAq)

ここで、管摩擦損失 h_s は水平および垂直管の付加圧力
損失係数 ϕ を用いた(5)式にて求められる⁵⁾。

$$h_s = L_v \cdot \Delta P_w \cdot (1 + IPF \cdot \phi_v) + L_h \cdot \Delta P_w \cdot (1 + IPF \cdot \phi_h) \quad \dots\dots\dots(5)$$

但し、 L_v : 垂直部の測定点間の距離 (mm)
 L_h : 水平部の測定点間の距離 (mm)
 ΔP_w : 水の圧力損失 (mmAq/m)
 ϕ_v : 垂直直管の付加圧力損失係数 (-)
 ϕ_h : 水平直管の付加圧力損失係数 (-)

図-5 に水平→垂直下降エルボにおける流速と曲がり
損失との関係を示す。IPF が大きいほど曲がり損失は増

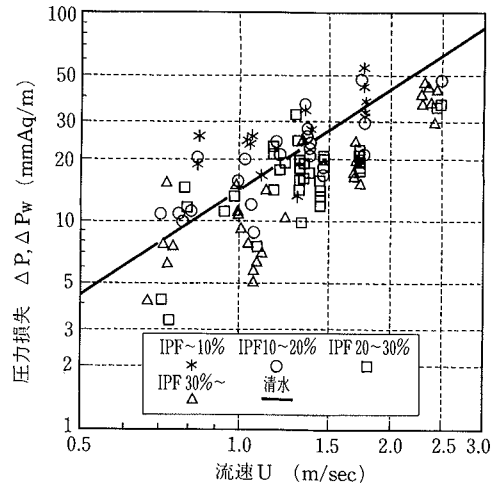


図-4 垂直上昇直管の圧力損失 ($P_2 - P'_2$)

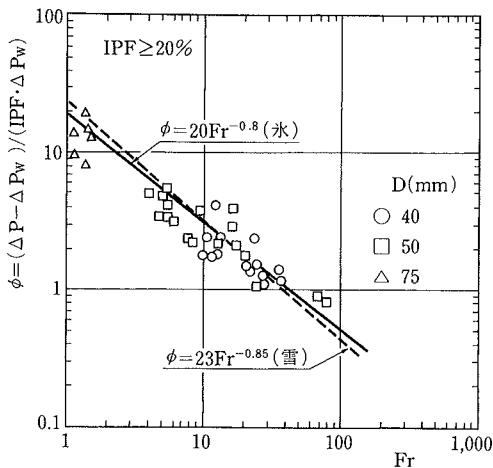


図-3 フルード数 Fr と付加圧力損失係数 ϕ との関係

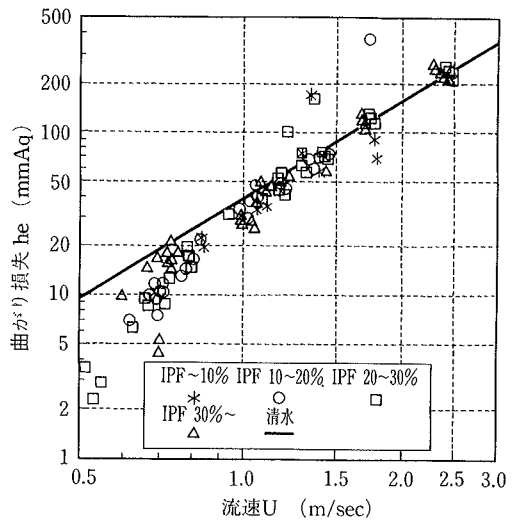


図-5 水平→垂直下降エルボの曲がり損失 ($P_3 - P'_3$)

大する傾向にある。また、低速域ほど、水より曲がり損失は小さく、その差は大きい。しかし、1.0 m/s を越えると、その差は小さくなり、次第に水と変わらなくなる。これは、特に低速域では氷がエルボによる流れの乱れを抑制する効果があるためと考えられる。その他、曲がり損失係数とフルード数との関係を調べたが、双方には相関は見出せなかった。これらの結果は、他の方向についても同様であった。

2.4 分岐特性

分岐管における実験は、90° および45° 分岐にて上方、下方、水平の3方向について行った。分岐流量はポンプの回転数制御により変化させ、電磁流量計より測定した。また、IPF は分岐後の吐出バルブ2 から氷水を取り出して、氷と水の各々の重量を測って求めた。

図-6 に90° 分岐部での、氷水の分岐流量 (Q_b) と主流量 (Q_m) との比 (Q_b/Q_m) と氷流量比 (Q_{ib}/Q_{im}) の関係を示す。ここで、氷流量 Q_i は氷水の流量に IPF を乗じて ($Q_i = Q \cdot IPF$) 求める。これによれば、下方分岐および水平分岐の場合には氷流量比が氷水流量比より下回っている。一方、上方分岐では逆に上回り、分岐後の水量割合が多いことが分かる。すなわち、上方分岐にすると氷が分岐しやすくなり、下方および水平では分岐しにくいことになる。これは、氷の浮力による影響と、流れる氷の慣性力による直進作用のためと考えられる。また、下方の場合、氷の粒径が比較的大きなものが多く分岐していることが実験により確認された。これらの結果は、45° 分岐部でも同様であり、分岐の角度は氷の流動に影響を与えないことが分かった。

3. 水量計測法の開発

「氷水搬送システム」の最適制御運転を実現するためには、水槽内および配管内の水量を計測し、IPF を把握することが重要になる。しかし、水量の計測法はいまだに信頼できるものはない。そこで今回、電導度の変化量を測定することにより水槽内の IPF を推定する方法と、水と氷水との電気抵抗値の比を求めることにより配管内の IPF を推定する方法、について実験的に開発を行った。

3.1 電導度の測定

電導度とは、温度25°C、断面1 cm²、長さ1 cm の溶液の対面間の比抵抗の逆数と定義される。すなわち、電気の通りやすさであり、溶液内のイオンの総量であると言える。よって、純度の高いハーベスト氷が生成され槽内に蓄えられるに従い、不純物(イオン)が水中に濃縮されるため、電導度の変化量を連続的に測定することにより、蓄水量の推定ができると考えられる。

そこで、予備実験により得た電導度と蓄水量の経時変化を図-7 に示す。これより以下のことが読み取れる。

- ① 水槽水温 0°C 以上の場合、水温が下降するに伴い電導度は低下する。
- ② 水槽水温が 0°C になった時点から、蓄水の進行に伴い電導度は上昇する。

- ③ 解氷により、氷が減少すると電導度は低下する。これより、水槽水温が 0°C になった時、すなわち製氷を始めた時の電導度を基準として、変化量を測定して IPF を推定すると良いことが分かる。

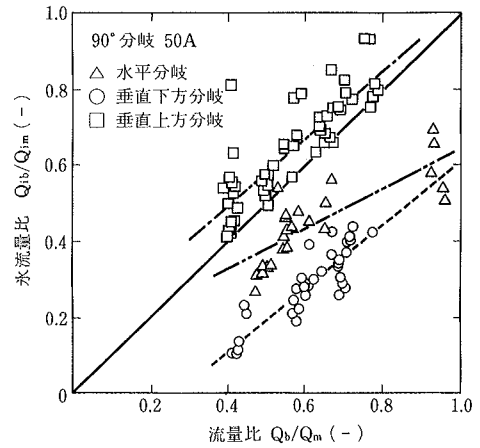


図-6 流量比と氷流量比との関係

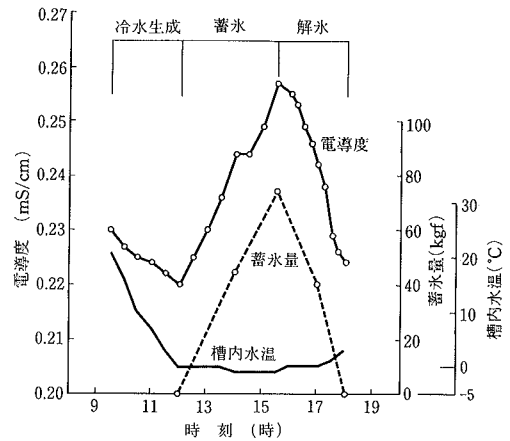


図-7 電導度・蓄水量・槽内水温の経時変化

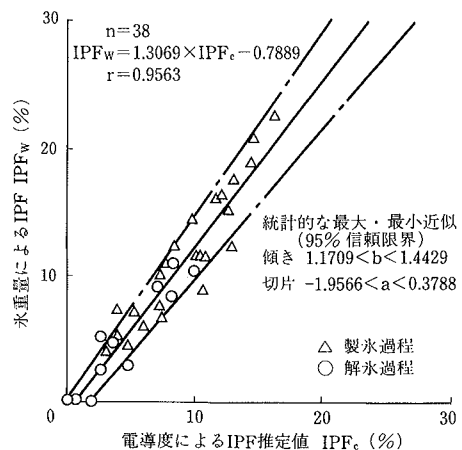


図-8 IPFc と IPFw との相関

3.2 電導度による IPF の推定結果

電導度による推定値 IPF_c は、水槽内の不純物量が不変であると仮定することにより、(6)式で表わされる。

$$IPF_c = (1 - C_0/C) \cdot 100 \quad \dots\dots\dots(6)$$

但し、 C_0 : 蓄水前の電導度 (mS/cm)

C : 蓄水後の電導度 (mS/cm)

ここで、(7)式に定義するように、水槽内の実際の氷重量を計測して体積に換算して求められる IPF_w を正解値として、推定値 IPF_c の精度を確かめることにする。

$$IPF_w = (W_i/\rho_i)/V_t \cdot 100 \quad \dots\dots\dots(7)$$

但し、 W_i : 氷重量 (kgf)

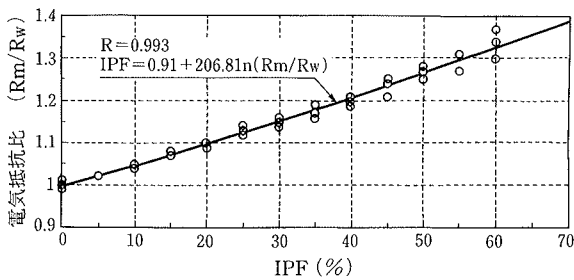
V_t : 水槽有効容量 (ℓ)

図一八に IPF_c と IPF_w の相関を示す。この図から、ほぼ原点を通る回帰式が求められ、また0.956と高い相関係数が得られる。これより、電導度によって高い精度で IPF が推定できることが確認できた。

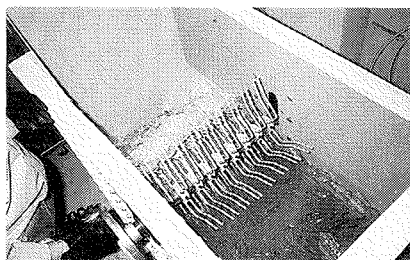
3.3 電気抵抗の測定

電気抵抗値は、電導度の逆数であり、氷の絶縁性を把握するものである。すなわち、氷の比率が増えるに従い電気抵抗値も増えるため、水のみ抵抗値を基準とした比率の変化量を求めることにより、氷量の推定ができると考えられる。

そこでまず、基礎実験により今回の推定法の有用性を確認した。実験は、水槽に側壁に電極板を取り付けた 100 mm×100 mm×150 mm のアクリル製容器を設置し、所定量の水を入れ、攪拌した後に電導度を連続測定する。その時、水のみ電導度も同時に測定する。こうして得られた測定値より電気抵抗値を算出して、水 (R_w) を基準とした氷水 (R_m) の抵抗比を求める。



図一九 IPF と電気抵抗比との関係



写真一2 回転羽根式氷取り出し装置

3.4 電気抵抗比による IPF の推定結果

図一九に IPF と電気抵抗比 (R_m/R_w) との関係を示す。この図によると、0.993と高い相関係数が得られ、精度の高い推定ができることが分かる。ここで、IPF が50%を越えると幾分かバラツキが見られるが、実際必要となる範囲は40%以下であるため、実用上の問題はないと考えられる。今後は、流速の影響を入れた実験を行い、さらなる検討を加える必要がある。

4. 氷の取り出しと氷と水の混合技術の開発

氷には浮力があり、しかも水中では凝集化するため、ポンプ等による吸引作用だけでは氷を配管により搬送することは非常に困難である。そのため、蓄水槽から氷を直接取り出し、水配管へ氷を押し込むようにして混入する機械的な装置の開発が必要となる。そこで今回、幾つか考案した方式の中から、氷の取り出しに関しては、回転羽根を用いた採取装置と槽内の氷を取り出しやすくするための氷流動化装置について、各々のモデルを設計試作し、実験的な開発を行った。また、氷と水の混合は、実大規模の立て型スクリューコンベア装置を採用し、実際の運転上の問題点等を把握した。

4.1 回転羽根式氷取り出し装置の開発

4.1.1 装置概要 本装置は、回転羽根が回転することにより水槽内の氷が羽根部に掛かり、すくい上げられて取り出す仕組みになっている(写真一2参照)。特徴として、取り出す氷の大きさに合わせて羽根の取り付け間隔(以下、羽根間隔と略す)を変え、さらに回転数を変化させることによって氷量が調整できることが考えられる。

表一1 組合わせ条件

【影響要因】		
羽根形状	羽根間隔	一回転に要する時間
(A TYPE)	60mm	5sec(12rpm)
(B TYPE)	40mm	10sec(6rpm)
		15sec(4rpm)
(C TYPE)	20mm	20sec(3rpm)
(D TYPE)	40mm	5sec(12rpm)
		15sec(4rpm)

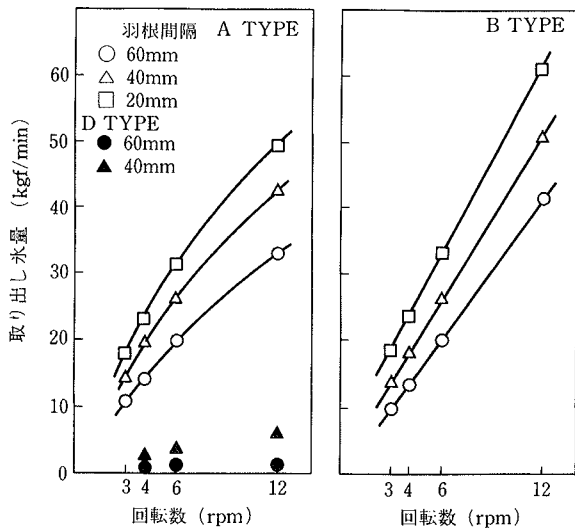
4.1.2 実験方法 取り出し水量に影響する要因として、(1)回転羽根の形状、(2)羽根間隔、(3)回転方向および回転数 (rpm) があげられる。これらの要因による効果を、それぞれの組み合わせを変えた条件により、実験的に把握する。

表一に組み合わせ条件を示す。実験では、ハンドル式の回転羽根を手動にて一回転させた時の水のみを取り出し重量 (kgf) を計測する。ここでの水量は、回転数当たりの量の代りに、回転数の逆数 (60/rpm) により求まる時間 (sec) で一回転した時の量としている。なお、回転方向はDタイプのみ反時計回りとする。

4.1.3 実験結果 羽根形状別に取り出し状況を把握したところ、以下のことが分かった。

- ① フラットな羽根を取り付けたAタイプでは、水を取り出した後、羽根中心部に幾分か氷が残った。
- ② 羽根の取り付け角度に勾配の付いたB、Cタイプでは羽根部に掛かった氷はほとんど取り出せた。
- ③ 反時計回りのDタイプでは、爪付きの羽根部に掛かった氷が取り出される前に、羽根の隙間から氷が多くこぼれ落ちた。

次に、条件に基づき取り出した水量と羽根の回転数との関係を図一10に示す。この時の水量は、実験データが比較的少なかったことから、データのバラツキによる実験誤差の影響を小さくする必要があり、統計的手法によりその母平均の推定値を求め、それを回転数当たりに換算している。これより、それぞれの取り出し水量を比較すると、羽根間隔の違いは端的に出ており、形状別ではDタイプがかなり少ない。この羽根間隔と水量との間には、予備実験より、比例関係が見られた。また、回転数と水量との間には、Bタイプにて比例関係があり、ほぼ直線的に近似できることが分かる。Cタイプも、Bと同様の結果が得られた。これは、羽根の勾配が、定量的な氷の取り出しを可能にするためと考えられる。



図一10 取り出し水量と回転数との関係

以上の結果をまとめると、B、Cタイプのように羽根形状に工夫を加えることにより取り出し水量は回転数で調整でき、羽根間隔により必要水量の設定ができることになる。但し、これは、羽根部の周辺に氷が常時存在すると仮定した条件で成り立つものと考えられる。

4.2 水流動化装置

水中に蓄えられる氷は凝集化により氷塊を形成し固着するため、氷の取り出しを容易にする工夫が必要となる。そこで今回、凝集化した氷に気泡により流動性をもたせ、取り出し装置側へと水流にて移動させる方法を考案し、その装置開発を行った。

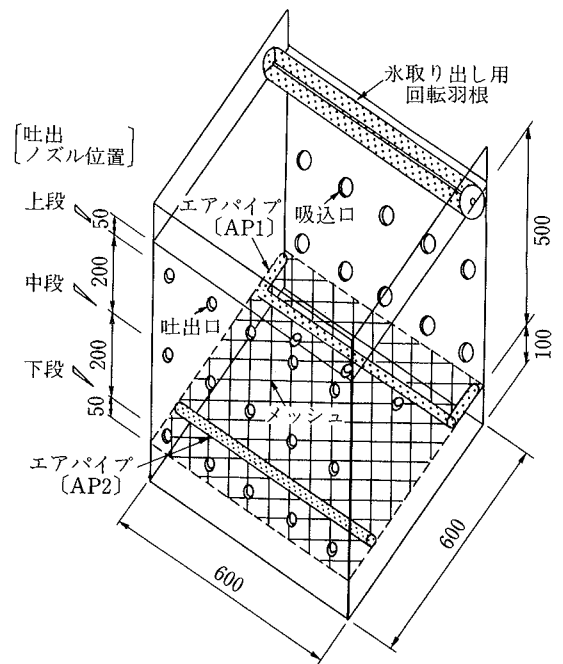
4.2.1 装置概要 設計試作した装置を図一11に示す。この装置は1/5縮尺の模型とし、氷取り出し部は簡略化した回転羽根とした。気泡は、水の吐出側と吸込側の2箇所設けた多孔型エアパイプより、プロワにて発生させた。水流は、ポンプにて水槽の水を循環させ、流速は吐出口に取り付けたノズルの口径により調整できるようにした。

ノズルからの吐出特性は軸対称噴流の理論に基づき把握される。ノズルからの距離とその中心軸上における最大流速との関係は、流れが確立した領域にて、実験定数の関数式で表わされることが知られている⁹⁾。そこで実際に、装置の定数を実験的に求め(図一12参照)、実験式(8)を得た。

$$U_m/U_o = 6.2 \cdot (2 \cdot r_o/x) \dots\dots\dots(8)$$

U_m : x 点の最大流速 U_o : 吐出時の流速
 r_o : ノズル口の半径 x : ノズルからの距離

これより、ノズル中心軸上の任意点の流速は、吐出流速を設定すれば予測できることになり、水中に浮遊する



図一11 実験装置

氷塊が受ける力が求められ、氷の移動量を把握する手掛かりになると考えられる。

4.2.2 実験方法 気泡風量と吐出流速が取り出し水量に与える影響を把握するための実験条件を表-2に示す。実験では、この条件に基づき、気泡もしくは水流を一定時間(10秒)発生させた後に回転羽根の運転で水を取り出すのを一工程とし、その時の水量と槽内の全ての水を取り出すまでの工程回数を把握する。ここで、回転

羽根の回転数は一定(30rpm)とし、運転は氷が取り出せる限り行うものとする。なお、水量はカゴで水のみを受けて重量(kgf)を計測する。また、実験時の外気温度も連続的に計測する。

4.2.3 実験結果 気泡風量の少ない条件(No.111, No.211~2)では、全ての氷を取り出すことができなかった。図-13に代表的な取り出し状況を示す。これによると、気泡もしくは水流を発生させた時の一工程目は多

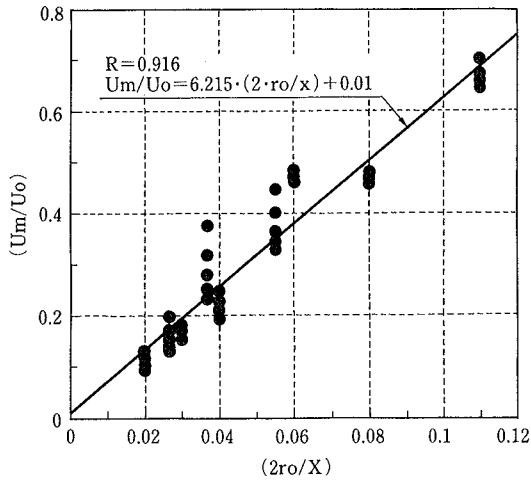


図-12 ノズル中心軸上の流速分布

表-2 実験条件

実験 NO.	吐出流速(m/s)			気泡(1/min)		IPF(%) MIN~MAX
	上	中	下	(AP1)	(AP2)	
111	0.7	2.4	2.4	22.0	30.0	38
211~2	1.4	2.4	2.4			28,31
221	1.4	2.4	2.4	30.0	30.0	28
311~5	2.4	2.4	2.4			28~35
411~5	2.4	2.4	0			29~35
511~2	2.4	1.4	0			30,30

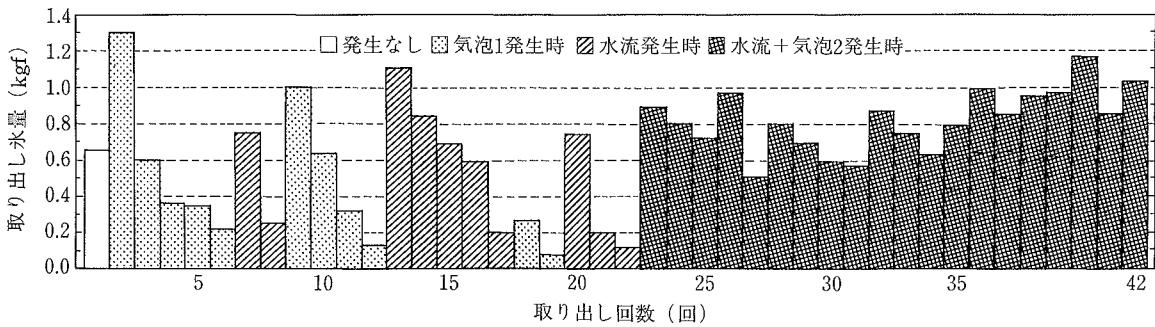


図-13 氷の取り出し状況

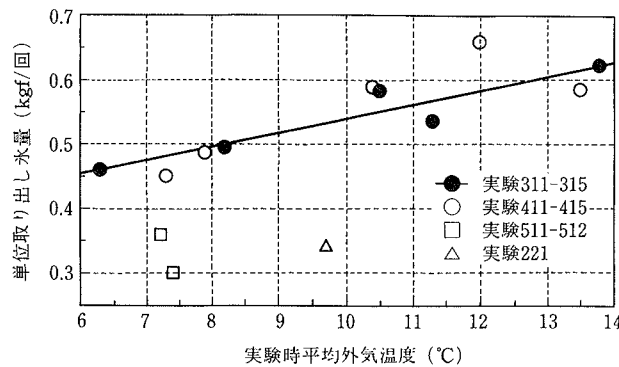


図-14 外気温度と取り出し水量の関係

くの水量が得られ、二工程目から急に減衰する傾向が前半に見られる。しかし、後半は比較的安定した水量が得られながら全ての氷を取り出している。

次に、図-14に外気温度と単位取り出し水量との関係を示す。これより、取り出し水量は外気温度が高まるにつれて多くなることが分かる。また、上段、中段の吐出流速が少ない条件 (NO.221, NO.511~2) では、外気温度が変わらない他の条件と比べると水量が少ないが、下段の流速が0 m/sの条件 (NO.411~5) では、水量に余り影響しないことが分かる (NO.311~5との比較より)。

以上の結果をもとに、今後は、水槽内の全ての氷を取り出す場合、外界条件に応じて水流の吐出流速を変えることによって単位取り出し水量を制御するシステムを開発していく予定である。

4.3 氷水混合装置

取り出した氷を水と混合するには、氷を配管内に押し込むような機械的手法が必要と考え、粉粒体の輸送等に用いられるスクリーコンベア方式を応用した氷水混合装置 (写真-3参照) を開発した。

実大規模でこの装置を設計試作したところ、氷の混合において大きなトラブルは生じていないが、装置内の水位を調整するためにサージタンクが必要となる。また、この装置を採用する場合には、配管系統がオープン回路となるため最上位に設置することになり、場所が限定されてしまう。

制御システムに関しては、まだ確立されていない。しかし、粉体をスクリーコンベアにて輸送する場合、その輸送量はスクリーの回転数で制御できることが知られている⁷⁾。このことから、氷の場合も同様に回転数により制御できると考えられるが、装置が運転される時には混合部を流れる氷水の流速がさらなる要因として加わることになるため、実験的な開発に基づく検討が今後必要となる。

5. おわりに

「氷水搬送システム」に関する一連の研究開発を行い、実施物件に向けての実用化が十分期待されることが確認できた。今後の展開として、地域プラントを想定し、氷生成、蓄水、搬送、二次側空調を統合させたトータルシステムを構築し、特に運転制御方式の最適化を重点に置き、実大規模に近いレベルでの開発を行う必要がある。

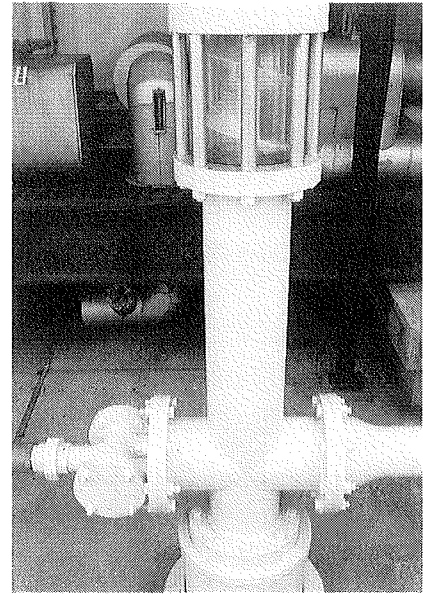


写真-3 氷水混合装置

謝 辞

この開発を遂行するに当たり、当初、業務に携わっていた福島正之氏 (元 環境研究室副主研) にはご尽力を頂き、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 福島, 他: ハーベスト式氷蓄熱空調方式に関する研究(その2~その4), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, p. 973~984, (1988. 10)
- 2) 森川: 液体-固体二相流, 空気輸送と水力輸送, 日刊工業新聞社, (1979)
- 3) 寺田: 固体混合液の管路輸送, 流動理論と抵抗計算法, 理工図書, (1973)
- 4) 白樫: 雪の水力輸送における流体工学的諸問題, 混相流の流動機構・流動特性, 第六回 混相流シンポジウム講演論文集, p. 59~74, (1988. 1)
- 5) 白樫, 他: 雪の水力輸送に関する研究, 第6報 雪水二相流のエルボにおける圧力損失, 日本雪氷学会誌, p. 105~110, (1985. 9)
- 6) 玉井: 新体系土木工学 22 密度流, 土木学会編, p. 73~76, (1980)
- 7) 日本粉体工業技術協会編: 粉粒体のバルクハンドリング技術, 日刊工業新聞社, p. 235~241, (1985)