

雪氷水の長距離管輸送に関する研究*

(理論的検討)

媚山政良*¹, 松本尚雄*², 小林茂*³
佐藤雄一*⁴, 村上忠幸*⁴

The Long Distance Transportation of Natural Ice and Water Mixture Through a Pipe (Theoretical Investigation)

Masayoshi KOBIYAMA, Hisao MATSUMOTO, Shigeru KOBAYASHI,
Yuichi SATOH, and Tadayuki MURAKAMI

The utilization of natural snow and ice was investigated and the conserving of them for a long term period was found to be possible with simple means. The authors thought that if they could transport natural snow or ice from the highlands to living quarters using simple means, it might be of benefit to people living in dry or massed regions nearby the highlands to obtain not only cold heat but also water. In this paper, the possibility of long distance transportation of ice and water mixture through a pipe using only gravity drive was investigated. The theoretical analysis cleared the possibility of transportation for few hundred kilometers and some characteristic features.

Key Words: Transportation, Highlands, Ice and Water Mixture, Pipe, Gravity

1. 緒言

地域特有のエネルギーを有効に、そして、積極的に利用することはゆとりのある地域社会をつくるうえで重要である。このような観点に立ち、著者らは、天然の雪氷の貯蔵、輸送、利用に関する一連の研究、技術開発を「氷室計画」と称し、いくつかの実用的な研究を進めてきている⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。こうしたなかで、近年、冬期間の天然の雪あるいは氷の比較的簡単な断熱構造による長期貯蔵の可能性が著者ら⁽¹⁾あるいは他の研究者⁽²⁾により明らかとされ、いわゆる克雪から利雪への道がひらかれつつある。

本報では利雪の立場から雪氷水の長距離管輸送について検討を行う。すなわち、雪氷を長期間貯蔵する場所はいくつか考えられるが、その代表的な場所は山間部のダムであり、また、夏期などにおける貯蔵雪氷の利用には冷水のみならず一部雪氷をも含むほうがより熱的、経済的に合理的であるため、特別な補助機械を

必要としない重力による雪氷水の管輸送についての検討を行う。

雪氷水の長距離管輸送の適応の可能性を考えるならわが国の豪雪地帯のみならず乾燥地帯の近くの高山を例に採ることができる。乾燥地域においては、雪氷水の長距離管輸送により冷熱の利用のみならず水資源の確保も可能となり益するところは大きく、さらに人口密集地帯あるいは工業、農漁業地帯など所によってもまたその益するところは大きいものと考えられる。

本研究では、上記構想のもとに、水平距離にして数100 km 程度までの長距離間の雪氷水の重力のみによる管輸送について理論的な検討を行い、その可能性が明らかとなったので報告する。

2. 解析モデル

高地における雪氷を河川、ダムなどを利用して集積あるいは貯蔵し、雪氷と水をかくはん、混合したのち、低地に重力のみにより管輸送することを考える。

図1に解析モデルを示す。位置1は位置2よりも高度 h_0 高いところに位置し、両者の間を雪氷水輸送管でつなぎ、位置1において雪氷水を投入後、水平距離で L_0 離れた位置2まで重力のみにより輸送する。

図2に導管の断面を示す。内径 d_0 [m]の鉄管の中を

* 昭和63年3月12日 北海道支部第29期総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年7月11日。

*¹ 正員、室蘭工業大学 (〒050 室蘭市水元町27-1)。

*² 南北海道ザーゼル工業(株) (〒050 室蘭市寿町2-19)。

*³ (株)グリーンクロス (〒050 室蘭市宮の森町4-2)。

*⁴ 学生員、室蘭工業大学大学院。

流れる雪氷水の水面の高さを h' [m] とし、 d_0 との比を $\xi (=h'/d_0)$ と表す。なお、鉄管はその周りを厚さ δ [m] の断熱材によりおおい、外部はアルミニウムペイントにより塗装を施すものとする。

輸送可能な雪氷あるいは雪氷水 (冷熱) の量を安全に、かつ、より一般的に推定するため、解析に際し次のモデルの設定条件を置く。

- (1) 輸送管は位置 1 と位置 2 との間を直線的につながれており、導管内での流速の変化はない。
- (2) 雪氷と水の混合率は輸送中変化せず、入口状態を保ち、また、輸送管外部との熱交換は雪氷の潜熱による。
- (3) 管外壁温度は全域、位置 2 における日射温度に保持される。
- (4) 輸送は通年行い、温度、日射量は年平均値を用いる。
- (5) 位置エネルギーはすべて摩擦熱に変換される。
- (6) 雪氷水の圧力損失および管内の熱伝達量はぬれ縁に比例する。
- (7) 管路断面に空気の空間のある場合には、空気の流動抵抗および熱伝達は無視する。

3. 基礎式

大気温度 T [k] の高度 h [m] による降下率を次式により表す。

$$dT/dh = -9.743 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (1)$$

大気温度と気圧 p [Pa] の関係を次とおく。

$$T/p^{1/3.5} = \text{一定} \dots\dots\dots (2)$$

図 1 に示すように位置 1 と 2 の高度差を h_0 [m]、水平

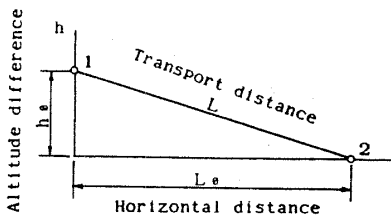


図 1 解析モデル

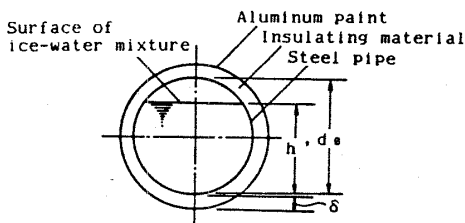


図 2 輸送管の断面

距離を L_0 [m] とすると、両者をつなぐ輸送管の長さ L [m] は次式により表される。

$$L = \sqrt{h_0^2 + L_0^2} \dots\dots\dots (3)$$

管断面における雪氷水の平均流速 v_0 [m/s] は輸送管全域に渡り同一の値であるとする、 v_0 はベルヌーイの定理から次式により求められる。

$$f \cdot L \cdot v_0^2 / 2d_0 = (p_1 - p_2) + [\beta \rho_1 + (1 - \beta) \rho_w] \cdot g \cdot h_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 β は雪氷の雪氷水に対する体積分率であり、 ρ_1 [kg/m³]、 ρ_w は各々氷および水の密度である。 f^* は雪氷の混入に伴う付加圧力損失係数 f_s を満液状態での実験式、式(6)⁽³⁾を用い、また、清水の圧力損失係数 f_w に溶接管に良く適応できるとされているランダウの式(7)を用いるとすると、圧力損失係数はぬれ縁 w [m] に比例させるとする近似から次のように表される。

$$f^* = (f_s \cdot e_1 + f_w \cdot e_w) \Gamma^* \dots\dots\dots (5)$$

$$f_s = 0.024 Fr^{-1.6} \dots\dots\dots (6)$$

$$f_w = 0.016 + 1.13 Re^{-0.44} \dots\dots\dots (7)$$

$$\Gamma^* = w / \pi d_0 \dots\dots\dots (8)$$

また、ここで、 $Fr (=v_0 / \sqrt{gd_0/\beta})$ 、 $Re (=d_0 v_0 / \nu_w)$ は動粘性係数を ν_w [m²/s]、 g [m/s²] を重力の加速度としたとき、おのおのフルード数、レイノルズ数である。

さらに、雪氷水の体積流量 V_0 [m³/h]、質量流量 W_0 [kg/h] および雪氷の初期質量流量 W_{10} は雪氷水の断面積を A [m²] とすると次式により表される。

$$V_0 = A \cdot v_0 \cdot 3.6 \times 10^3 \dots\dots\dots (9)$$

$$W_0 = V_0 [\beta \cdot \rho_1 + (1 - \beta) \cdot \rho_w] \dots\dots\dots (10)$$

$$W_{10} = V_0 \cdot \beta \cdot \rho_1 \dots\dots\dots (11)$$

したがって、雪氷が初期に保有する冷熱量 Q_{10} [kJ/h] は水の潜熱を l_1 [kJ/kg] とすると次式により表される。

$$Q_{10} = W_{10} \cdot l_1 \dots\dots\dots (12)$$

一方、雪氷水の流動中の摩擦による発熱量 Q_f は設定条件により次式により表される。

$$Q_f = W_0 \cdot h_0 \cdot g / 10^3 \dots\dots\dots (13)$$

管内の乱流熱伝達を考えると、ヌッセルト数 Nu は次式により計算される。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \dots\dots\dots (14)$$

ここで Pr はプラントル数である。したがって、熱伝達率 α_p [w/(m²·k)] は次のように表される。

$$\alpha_p = Nu \lambda_w / d_0 \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 λ_w [w/(m·k)] は熱伝導率である。輸送管の外壁表面温度 t_{sol} [°C] を日射温度とし式(16)により計算すると、長さ L の輸送管の受熱量 Q_H [kJ/h] は式

(17)により計算される。

$$t_{sol} = t_2 + \varepsilon \cdot i_p / \alpha_{atm} \dots\dots\dots (16)$$

$$Q_H = K' \cdot \pi \cdot (t_{sol} - 0) \cdot L \cdot 3.6 \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 t_2 [°C]は位置2での大気温度、 ε , i_p [W/m²], α_{atm} [W/(m²·k)]はそれぞれ管外壁の放射率, 全天日射量および大気の熱伝達率である。また、直径 d_i [m]の2層から成る合成内管の式(17)における K' [W/(m·k)]は次式により計算される。

$$1/K' = 1/\alpha_p d_0 \Gamma^* + \sum_{i=1}^2 \ln(d_{i+1}/d_i)/2\lambda_i \dots\dots\dots (18)$$

以上より、輸送管出口において残存する雪氷の有する冷熱量 Q_1 は次式により計算される。

$$Q_1 = Q_{10} - (Q_F + Q_H) \dots\dots\dots (19)$$

また、輸送可能な冷熱量 Q_1 を氷相当質量 W_1 に換算すると(以下、輸送水量と呼ぶ)、 W_1 は次式により表される。

$$W_1 = Q_1 / l_i \dots\dots\dots (20)$$

なお、初期輸送冷熱量 Q_{10} に対する輸送可能な冷熱量 Q の割合を η_1 , 摩擦損失熱量 Q_F の割合を η_F , 熱伝達による損失熱量 Q_H の割合を η_H とし次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= Q_1 / Q_{10} \\ \eta_F &= Q_F / Q_{10} \\ \eta_H &= Q_H / Q_{10} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

4. 結果と検討

計算に用いた諸量を表1に示す。計算条件はわが国におけるよりも熱的環境の厳しい低緯度、乾燥地帯を重視し選んである。大気温度および日射量は低緯度地方の年平均値(わが国においては夏の状態にほぼ相当する)を用い、初期体積割合 β の値は式(6)の成り立つ最大値を用いている。また、大気の熱伝達率 α_{atm} は通常の建物の外壁の熱設計に用いられる値とした。なお、表1中、標準値と書いた値をすべて用いた場合を標準計算条件と呼び、以下の計算においては parameter 以外の値は特別な記述のない限りすべて標準計算条件での値を用いる。

標準計算条件下での流速 v_0 , 流量 W_0 , レイノルズ数 Re , 管内の熱伝達率 α_p および輸送所要時間 τ を図3に示す。雪氷の混入による付加圧力損失係数 f_s は流速 v_0 が低くなるにつれ増加するため、さらに流れを減速させる性質を有している、このため、雪氷水の輸送距離が長くなるにつれ流速の低下が顕著となり、これに伴い輸送所要時間 τ も増加している。なお、レイノルズ数 Re および流量 W_0 は速度 v_0 に比例する。また、管内の熱伝達率 α_p は速度 v_0 に似た傾向を示すが、断熱材の厚さが50 mm以上となると式(18)の K' の値にほとんど影響を与えない。

表1 計算に用いた諸量

Altitude difference;	
h_0 :	parameter (Standard value = 2000m)
Transport horizontal distance;	
L_0 :	parameter
Temperature at outlet; $t_0 (= t_2) = 35^\circ\text{C}$	
Pressure at outlet; $p_0 (= p_2) = 0.1013 \text{ MPa}$	
Solar radiation; $I_p = 332 \text{ W/m}^2$	
Transportation pipe;	
Diameter; d_0 :parameter (standard value = 1m)	
Components;	
1st layer ; iron, thickness = 5mm	thermal conductivity = 46.5 W/mK
2nd layer ; polystyrene,	
thickness : parameter (standard value = 200mm)	thermal conductivity 0.0279 W/mK
Aluminum paint ; emissivity $\varepsilon = 0.50$	
Heat transfer coefficient of atmosphere;	
	$\alpha_{atm} = 23.3 \text{ W/mK}$
Ice-water mixture;	
height of surface;	
ξ :	parameter (standard value = 2/3)
ice content at inlet; $\beta = 0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$	

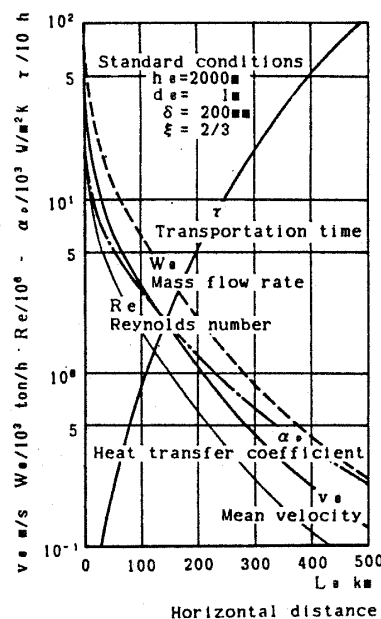


図3 標準計算条件下での諸量

標準計算条件下での初期輸送冷熱量 Q_{10} に対する輸送可能な冷熱量 Q_1 の割合 η_1 、摩擦損失熱量 Q_F の割合 η_F 、熱伝達による損失熱量 Q_H の割合を η_H を図 4 に示す。図 4 においては高度差 h_0 が一定であり、流量は速度 v_0 に比例するため、摩擦による冷熱損失の割合 η_F は輸送水平距離 L_0 によらず一定となる。図 4 より輸送水平距離が 200 km 以下では摩擦による冷熱損失 η_F が支配的であり、300 km 以上では大気および太陽からの受熱による伝熱損失 Q_H が支配的となることがわかる。これは、輸送距離が長距離となるにつれて輸送所要時間が増加し、それに伴い単位流量に対する外気および太陽からの受熱量が増加することによって

いる。

輸送水量 W_1 に及ぼす断熱材の厚さ δ の影響を図 5 に示す。雪氷水の輸送距離 L_0 が長くなるにつれ伝熱損失が支配的となるため、 L_0 が大きくなるほど断熱材の厚さ δ による雪氷の輸送量、あるいは、輸送距離の違いが顕著に表れている。なお、断熱材による熱遮へいを施さない場合には、雪氷は 1.4 km 程度にまでしか輸送できない。

実際の雪氷水の管内輸送を考えると、管入口から出口まで直線により結ばれることはなく、山ぞいに蛇行するのが普通であるから、たとえば、標準計算条件 ($\delta = 200 \text{ mm}$) の場合、毎時 100 t (年 870 000 t) の雪氷を輸送できる水平距離 L_0 は 300 km 程度であると考えられる。この距離は中国テンシャン山脈あるいはアルチン山脈からタクラマカン砂漠の半分を網羅できる距離であり、日本アルプスを挟み富山から静岡までを越えた距離でもある。

輸送水量 W_1 に及ぼす輸送管の直径 d_0 の影響を図 6 に示す。輸送距離 L_0 が 100 km 以下の近距離では雪氷の輸送量はほぼ輸送管の断面積に比例している。しかし、300 km 以上では管直径 d_0 が大きくなるにつれ管の体積に対する管の表面積の比率が相対的に小さくなり、また、雪氷の混入による付加圧力損失係数も相対的に小さくなる。このため、伝熱損失が減少し、管内

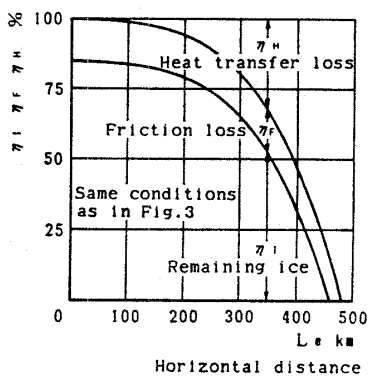


図 4 標準計算条件下での輸送可能な冷熱量、摩擦損失熱量、熱伝達による損失熱量

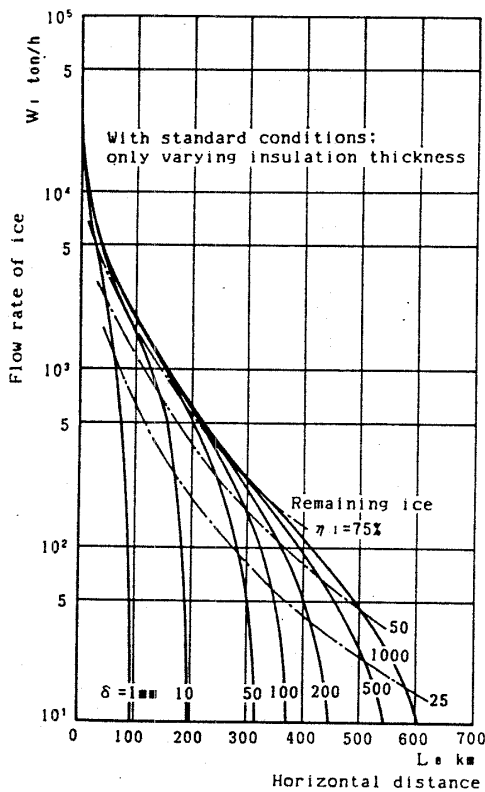


図 5 輸送水量に及ぼす断熱材の厚さ δ の影響

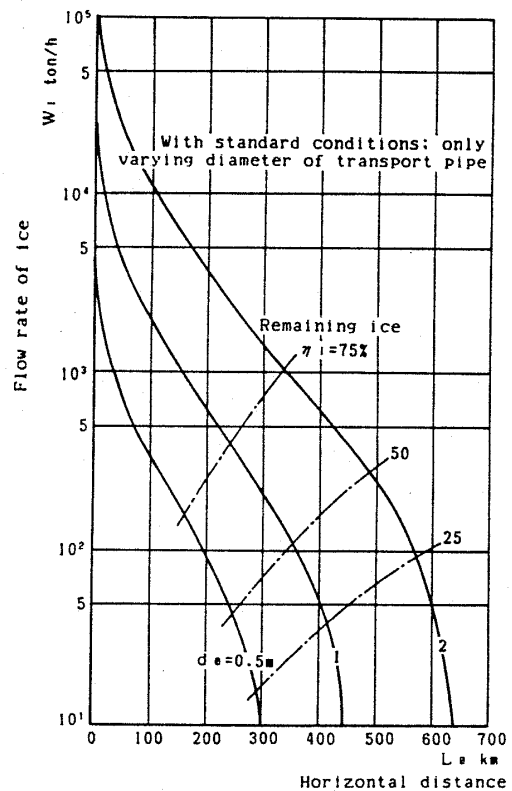


図 6 輸送水量に及ぼす輸送管の直径 d_0 の影響

流速が高くなり、管直径が大きくなるにつれ管断面積の増加以上の雪氷輸送量を得ることができ、寸法効果が顕著となる。

輸送水量 W_i に及ぼす高度差 h_0 の影響を図 7 に示す。一般に高度差 h_0 が大きいほど管内流速を高くできるため、より長距離に雪氷の輸送を行うことが可能となる。高度差 3000 m の場合には実用的に 400 km から 450 km までもの雪氷の長距離輸送が可能となる。なお、高度差が 500 m の低高度差であっても雪氷を毎時 100 t、100 km 程度輸送できる。この距離は北アルプスから富山市、あるいは、夕張山地から札幌市に至る距離以上である。なお、高度差 3000 m の場合の雪氷残存率 $\eta_i = 75\%$ を示す距離 L_0 は 2000 m の場合よりも短い、これは、 L_0 が 200 km 程度までは摩擦による冷熱損失が伝熱損失よりも大きなことに起因している。

輸送水量 W_i に及ぼす管直径に対する雪氷水面の高さの比 ξ の影響を図 8 に示す。管直径に対する水面の高さの比 ξ と雪氷輸送量 W_i との間には特徴的な関係のあることが図 8 よりわかる。これは、 L_0 が 50 km 程度の近距離輸送では流速が 4 m/s 程度となり、雪氷と水の混合状態が均質であり、雪氷の混入による付加圧力損失は清水の圧力損失に比較して小さくなるため ξ の高い状態での雪氷水の管内輸送が適した条件となる

のに対し、この流速以下となる遠距離輸送の場合には雪氷の浮力が顕著に作用し雪氷と管上部壁との間のすべり摩擦、すなわち、雪氷の混入による付加圧力損失が増加するが、この付加圧力損失を軽減するため管上部壁と雪氷水面の間に空間を置く、すなわち、 ξ の値が小さな状態での雪氷水の管内輸送が適した条件となるため生ずる結果である。すなわち、 $\xi = 1$ に対する ξ の補正をすべり摩擦に着目し行った結果であり、比重の軽い固体を低速度で、水力輸送する場合に表れる結果である。

雪氷輸送量 W_i に対し最長の輸送距離を与える ξ を

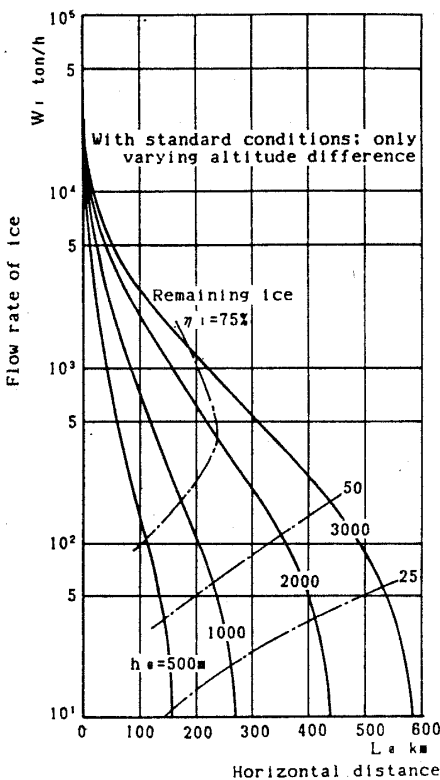


図 7 輸送水量に及ぼす高度差 h_0 の影響

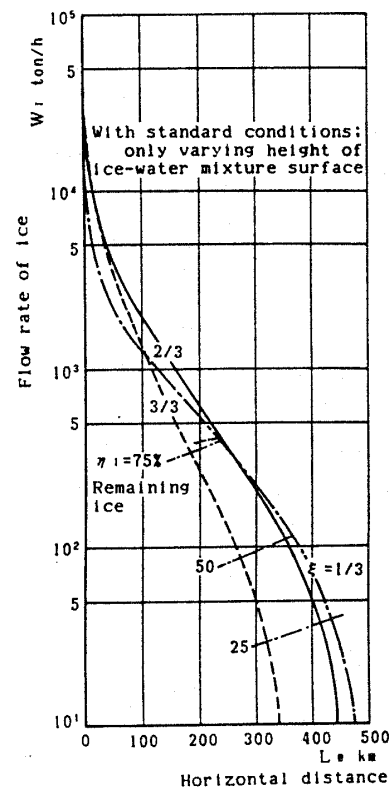


図 8 輸送水量に及ぼす雪氷水面の高さの比 ξ の影響

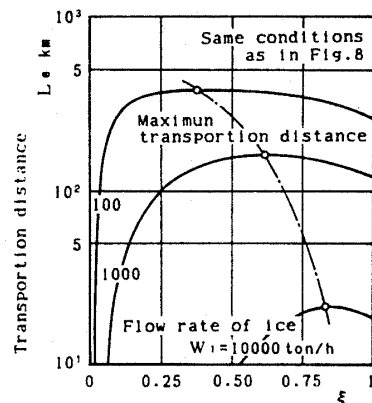


図 9 雪氷輸送量に対し最長の輸送距離を与える ξ

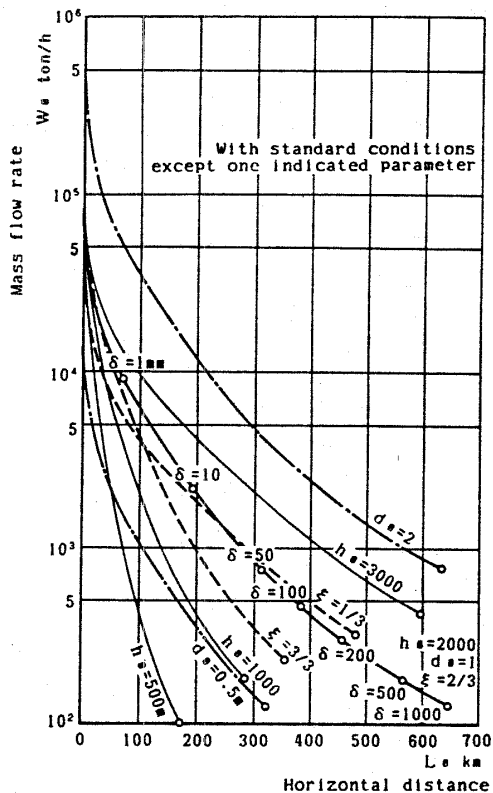


図 10 雪氷水の全輸送量

調べたのが図9である。雪氷輸送量 W_1 が少なくなるにつれ(すなわち、遠距離輸送となるにつれ)最大の輸送距離を示す管直径に対する水面の高さの比は小さい値となっている。

雪氷水の全輸送量 W_0 を図10に示す。図10において○印は雪氷がすべて融解した状態、すなわち、初期に投入した雪氷水がすべて 0°C の水となった状態を示している。固体の雪氷は大量の潜熱を有するため、貯蔵、利用に有利ではあるが、 0°C の冷水もまた冷熱あるいは水として有効に利用できる。標準計算条件を例にとると、輸送可能な距離は450 kmにも及んでいる。また、例えば、 $h_0=3000\text{ m}$ 、 $d_0=2\text{ m}$ 、 $\delta=500\text{ mm}$ 、 $\xi=1/3$ とすると、 $L_0=1000\text{ km}$ の遠距離に毎時770 t (年6700000 t) もの 0°C の冷水を輸送することが可能である。

5. 結 言

高地における天然の雪氷水を管を通し、重力のみで遠隔地にまで輸送することができると冷熱の利用のみならず水資源の確保も可能となり、乾燥地帯のみなら

ず人口密度地帯あるいは工業、農漁業地帯など地域によってはその益するところは大きいものと考え、本報では、水平距離にして数百 km 程度までの長距離間の雪氷水の重力のみによる管輸送について理論的な検討を行い、その可能性を明らかとした。得られた結果の主なものは次のとおりである。

(1) 高度差2000 m、輸送管の内径1 m、断熱材の厚さ200 mm、雪氷水の管内高さの比率2/3の場合(標準計算条件と称す)、輸送水平距離が200 km以下では摩擦による冷熱損失が支配的であり、300 km以上では大気および太陽からの受熱による伝熱損失が支配的となる。

(2) 標準計算条件の場合、毎時100 t (年870000 t) の雪氷を輸送できる水平距離は300 km程度である。

(3) 高度差3000 m (他の条件は標準計算条件と同じ) の場合には実用的に400 kmから450 kmまでの雪氷の長距離輸送が可能となる。なお、高度差が500 mの低高度差であっても雪氷を毎時100 t、100 km程度輸送できる。

(4) 輸送距離が遠距離となるにつれ雪氷水面を低くし、管上部壁と雪氷水面の間に空間を置き、雪氷の混入による付加圧力損失を軽減した状態での雪氷水の管内輸送が適した条件となる。

(5) 固体の雪氷は潜熱を有するため、貯蔵、利用に有利ではあるが、 0°C の冷水もまた冷熱あるいは水として有効に利用できる。標準計算条件を例にとると、輸送可能な距離は450 kmにも及んでいる。

本研究を進めるのにあたり数多くの方々のご教示、ご討論を賜った。とくに室蘭ヒートパイプ研究会の名を代表して記し、多くの方々への謝意に代えさせて戴く次第である。

文 献

- (1) 媚山, 機論, 53-495, B (昭62), 3358.
- (2) 福田・本山, 寒地技術シンポジウム'86 講論集, (昭61), 429.
- (3) 栗山・ほか2名, 土木学会新潟会研究調査発表会論文集, (昭60), 116.
- (4) 川本・ほか2名, 寒地技術シンポジウム'86 講論集, (昭61), 423.
- (5) 媚山, 寒地環境工学合同シンポジウム講論集, (昭62), 167.

討 論

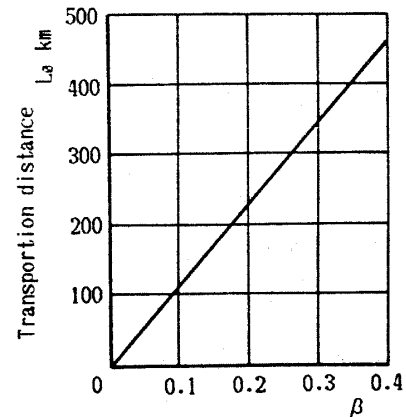
〔質問〕 谷口 博〔北海道大学工学部〕

(1) 都市における冷熱利用を対象とするとき、雪氷水の輸送方式と、雪氷のみの貯蔵方式を比較した場合の経済的な優劣をお教え願いたい。

(2) 雪氷の体積率 β をパラメータとするならば、 $\beta=0$ では熱輸送効果は当然少なく、 β とともに増加すると思われるが、 $\beta=1$ に近づくに従い、再び熱輸送効果は減少するのではないか。この点に関する検討結果があれば、定性的でもよろしいのでご説明願いたい。

〔回答〕 (1) 本研究では、貯蔵施設に関しては、雪氷水の輸送能力の検討を行っているため、ご質問には直接お答えしにくい。しかし、都市において、山間部の既設のダムから雪氷水を管輸送する場合を想定するならば、ダムの取水管を雪氷水の輸送管として併用することは可能であり、すでに提案した都市の地下部に設ける貯雪氷施設(付1)に経済的に劣らないシステムを組み、運用できるものと考えられる。なお、雪氷水の管輸送を取り込んだシステムあるいは貯雪氷施設のいずれもが、設置する場所の地形、気象、冷熱の利用形態などにより、経済性に大きな影響を受けることは周知のとおりである。

(2) 雪氷の雪氷水に対する体積割合 β の冷熱輸送に及ぼす影響の例として、雪氷が完全に融解する距



付図 1

離と β の関係を付図 1 に示す。付図 1 より β に比例して完全に融解する距離が長くなっており、それに伴い輸送できる冷熱の量も多くなることがわかる。なお、2012 ページ右欄 7 行めに記載したように、雪氷の混入に伴う付加圧力損失係数を示す式の適応範囲の制約により $\beta=0.4$ を β の上限としている。したがって、この値以上での β による影響についての検討は、今後の課題であろうと考えている。

(付1) 媚山・ほか5名, 機講論, No. 870-10 (昭62), 52.