

人工製雪機を導入した冷熱供給システムの実験と解析

Development of cool energy supply system by using snow cannon

長田 勉 (国策建設) 正会員 佐藤 貴季 (北海道大学) *
 学生会員 〇井村 祐介 (北海道大学) 正会員 濱田 靖弘 (北海道大学)
 小野 孝之 (国策建設) 橋本 良明 (国策建設)
 正会員 窪田 英樹 (北海道大学)
 *現: ドーコン

Tsutomu NAGATA*² Takaki SATOH*¹ Yusuke IMURA*¹
 Yasuhiro HAMADA*¹ Takayuki ONO*²
 Yoshiaki HASHIMOTO*² Hideki KUBOTA*¹
 *¹Hokkaido University *²KOKUSAKU Kensetu Corporation

Synopsis: If snow and ice can be kept and utilized as cooling sources for space cooling and food storage, they will have possibility of energy conservation and CO₂ reduction. Thermal utilizations of snow and ice have been noticeable since the Law Concerning Special Measures to Promote the Use of New Energy was amended to add the use of them. This paper proposes cool energy supply system by using snow cannon. First, we analyze the characteristic of snow which snow cannon made. Second, we evaluate the introduction possibility of snow cannon to Hokkaido.

はじめに

現在普及している雪冷房技術は、自然に降った雪を利用するのが前提条件である。そのため、雪冷房技術を普及させる上で、十分な降雪のある地域に限定されることや、雪の搬送コストが高いこと、さらに、降雪量が少ない年には十分な雪が得られないという不安定な要素があること、などの制約と問題を抱えていた。本研究では、これらの問題の解決策として、人工製雪機の雪冷房への導入を取り上げた。

人工製雪機は通常スキー場などで使用されているが、その人工製雪機を利用して雪冷房用の雪を作ろうとするものである。十分な水と電源があれば、寒冷地域で雪を作ることができる。大きな特徴の一つは雪製造コストが安いことである。また、大量の雪を必要とする大型雪冷房事業に関しても、人工製雪機を設置することによって自然降雪量に大きく影響されずに稼

動できるので、雪冷房の信頼性を格段に高めることができるのも大きな利点である。移動式の人工製雪機を開発すれば、人工製雪機のさらなる有効活用が期待できると考えられる。中でも期待されるのが、雪冷房を利用できる地域の拡大である。北海道に限っても、海岸部や日高、帯広、釧路、根室などの東部地域へ雪冷房を拡大できる意義は大きいものと思われる。

本報は、人工製雪機の雪冷房への有効活用のための実務上の知見を得ると同時に、雪冷房に適した人工製雪機を開発することを目的として、人工製雪機の実証実験を実施するとともに、特性把握のための解析・評価、及び、導入可能性評価を行ったものである。

1. 実験概要

人工製雪機の特性を把握するための実証実験を行った。実験機器の仕様を表-1に示す。人工製雪機(図

表-1 人工製雪機概要

人工製雪機	
最大水量	600 L/min
最大降雪量	65.5 m ³ /h
ファン	18.5 kW
コンプレッサー	7.5 kW
降雪時消費電力	30~32 kW
ノズルヒーター	4.0 kW~6.0 kW
ウォーターノズル	375個 (75×5)
ニュークリエイターノズル	20個
水量調節	バルブ5段+水圧調節式
実験使用機器	
給水ポンプ	200 L/min, 200 V, 15kW
揚水ポンプ	100 L/min, 200 V, 3kW
発電機 (降雪機用)	3相, 400 V, 32 kW
発電機 (ポンプ用)	3相, 200 V, 20 kW
発電機 (投光機等用)	単相, 200 V, 5 kW
水槽 (FRP)	10 m ³



図-1 人工製雪機外概



図-2 人工製雪機（前面）

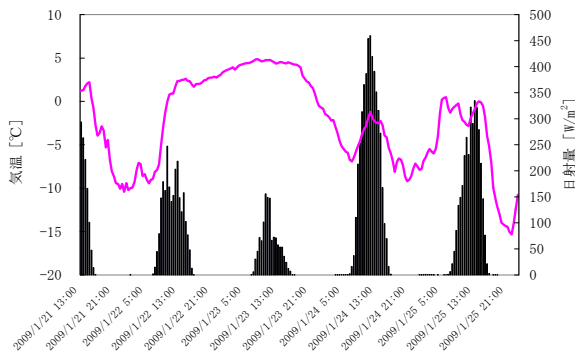


図-3 外界気象条件



図-4 製雪状況（1/24）

-1, 2) はバルブ 5 段, 水圧調整式であり, 人工製雪機先端に同心円状に並んだウォーターノズル (75 個×5) から水を, 外側のニュークリエーターノズル (20 個) から圧縮空気を噴き出し、外気を利用して製雪を行う。最大水量 600 L/min, 降雪時消費電力は 30~32 kW である。実験期間は 2009 年 1 月 21 から 1 月 25 日であり, 実験地は北海道苫小牧市弁天, 取水池は 5000 m³ (実験使用水量 500~1000 t) で, ポンプで汲み出した水を水槽に貯め製雪に利用している。

2. 実験結果

2. 1 外界気象条件, および製雪状況

製雪期間中の外界気象条件として外気温, 日射量, について図-3 に示す。実験期間中の平均外気温は -2.8°C, 最低気温は -15.4°C, 最高気温は 4.9°C, 平均風速は 1.96 m/s であった。1 月 23 日については天候が雨であり, 製雪は行っていない。また, 1 月 23 日以外は晴天であり, 実験期間中は自然降雪はほとんど無かった。

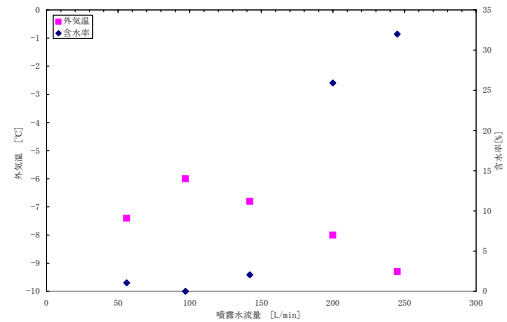


図-5 含水率, 外気温, 噴霧水量の関係

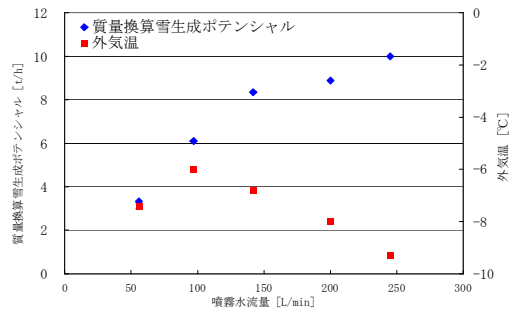


図-6 質量換算雪生成ポテンシャル, 噴霧水流量, 外気温の関係

表-2 システム成績係数 (SCOP)

質量換算雪生成ポテンシャル (t/h)	SCOP
3.3	10.3
6.1	18.8
8.3	25.8
8.9	27.5
10.0	30.9

図-4 に製雪状況を示す。人工製雪機噴出流方向に吹出し口から約 7 m~25 m 程度にかけて雪山が形成され, 1 月 25 日の時点で約 500 m³ の製雪が行われた。

2. 2 人工製雪機特性

人工製雪機の特長把握のため騒音, 吹出・吸込風速, 生成雪含水率, 製雪能力などについて測定を行った。

(1) 騒音

人工製雪機の騒音レベルの測定を行った。人工製雪機側面では 90 dB, 吹出口, 吸込口では 100 dB 程度であった。

(2) 風速

人工製雪機吹出口, 吸込口における風速の測定を行った。吹出口の平均は約 35 m/s, 最大風速は 37 m/s であり, 吸込口では平均は約 11.2 m/s であった。

(3) 含水率・密度, 及び, 製雪能力

人工製雪機で製雪された雪の含水率の測定を行った。試料の質量を測定後, 水温を同様にした二つの断熱容器の片方に入れ, 水温差から式 (1) を用い実質雪質量を算定し, 含水率 (質量%) を求めた。

$$m_{xt} = \frac{c_w \left[(T_1 - T_1') - (T_2 - T_2') \right] m_w - m_s (T_1' - 0)}{\gamma - c_s (0 - T_s)} \quad (1)$$

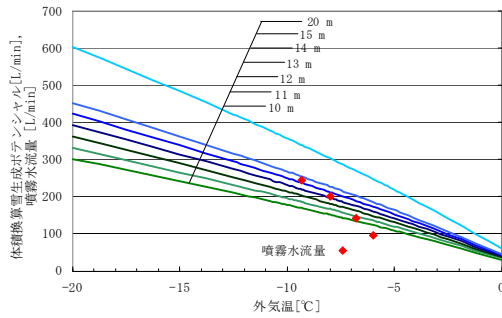


図-7 体積換算雪生成ポテンシャルと噴霧水流量

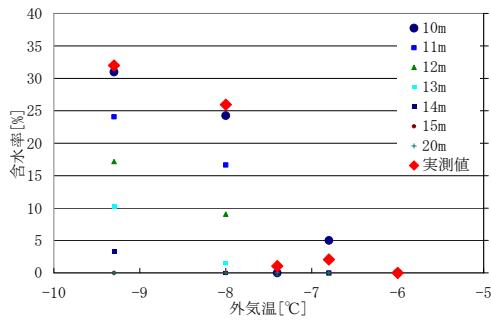


図-8 含水率の実測値と解析値の比較

人工製雪機から 10~15m 付近に降下した雪を対象とした。含水率の実測結果を図-5 に、含水率を考慮した質量換算雪生成ポテンシャルを図-6 に、各噴霧水流量時の質量換算雪生成ポテンシャル [t/h] 及び、SCOP [=生成された雪の保有冷熱/電力消費量]、について表-4 に示す。含水率は、数%~20%程度と新雪に近い値^{1, 2, 3}、雪密度は平均で 0.47 t/m³ であり、しまり雪^{4, 5}に近い結果となった。質量換算雪生成ポテンシャル [t/h] は最小で 56 L/min 時に 3.3 t/h, 最大で噴出水流量 245 L/min 時に 10 t/h, SCOP は最大で 30.9 であった。

3. 解析

水滴結氷に係わるエネルギー的側面と伝熱的側面から、結氷可能な噴霧水量を求めた。

$$Q_{fp} \cdot CF = Q_{mx} \cdot (i_e - i_{fx}) \cdot CF$$

$$= c_w \cdot Q_{mx} \cdot t_{win} + \gamma \cdot m_w \quad (2)$$

Q_{fp} (式 (2)) は距離 x における噴流が保有する雪生成ポテンシャル、また、噴流空気の中で結氷過程にある水滴に対して氷点に達する空気量の割合を CF (コンタクトファクター) とした。以上の式から算出される噴出口からの距離 x における雪生成ポテンシャルと、実測した各外気温に対する噴霧水流量の関係を図-5 に、また、吹出口からの距離と含水率について計算値と実測値の比較を図-6 に示す。ここで含水

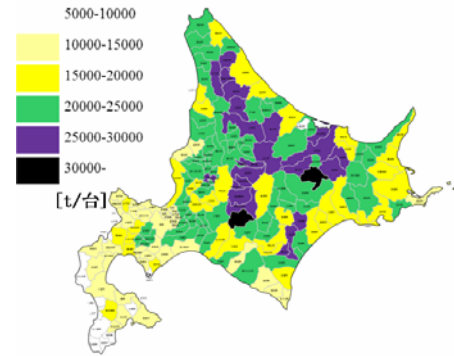


図-9 期間製雪質量 (北海道)

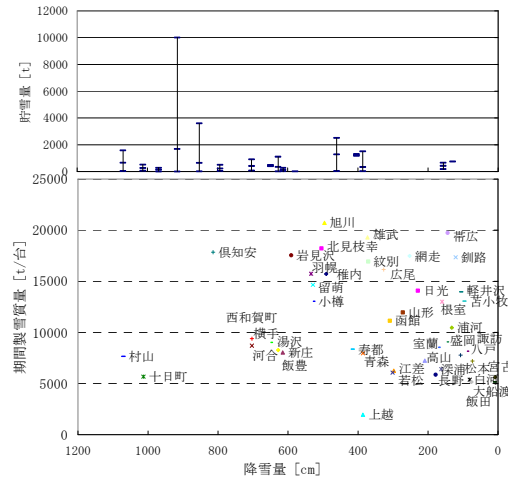


図-10 降雪量、期間製雪質量、および既存雪利用施設貯雪量

率は雪生成ポテンシャルと噴霧水流量から計算しており、CF は 0.7 とした。雪生成ポテンシャルに関しては 10~15m での実測値と計算値、含水率に関しては距離 10m 付近の計算値と実測値が比較的近い結果となった。

4. 人工製雪機導入可能性評価

道内各都市での製雪能力を求め、各都市での人工製雪機導入効果の評価を行った。外気温は拡張アメダス気象データ(標準年)を使用した。人工製雪機の仕様、性能は本実験と同様とし、各都市の一時間ごとの環境空気のエンタルピーから前述のモデル式 (2) を用い計算を行った。ここでは CF=0.7, 吹出口から 10 m の地点に降雪すると仮定して製雪能力を求めている。北海道内各市町村の期間製雪質量[t/台] (12/1~3/31) の分布を図-7 に示す。最大 31000 t/台、約 80%の市町村で 15000 t/台を超える結果となった。また、図-8 に日本の代表都市の降雪量、と製雪能力、及び、既存雪利用施設の貯雪量(最小・最大・平均)の関係を示す。降雪量 400cm を越えている地域で雪利用施設の事例が多くあるが、根室や軽井沢のように降雪量が少なく、

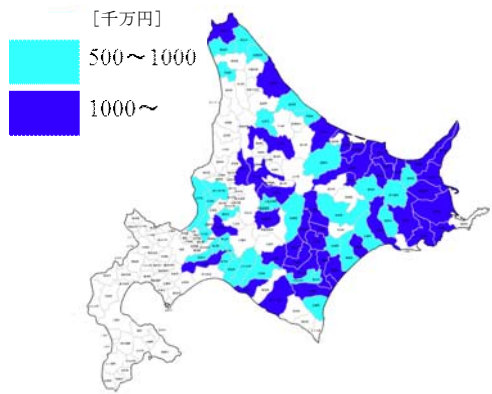


図-11 漁業・農業分野への導入可能性

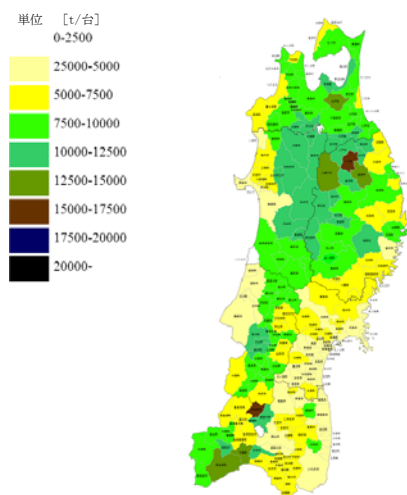


図-12 期間製雪質量（東北）

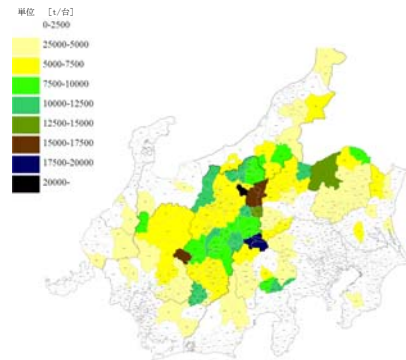


図-13 期間製雪質量（関東・中部・北陸）

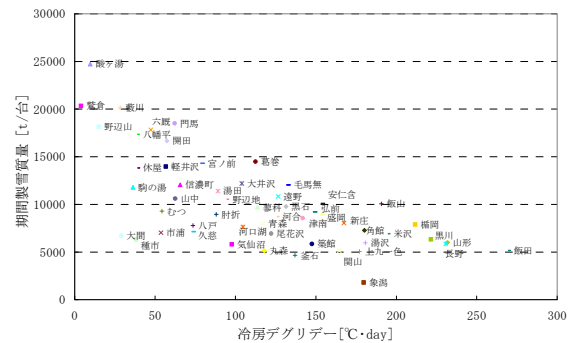


図-14 冷房デグリデー（ D_{22-22} ）と期間製雪質量

製雪能力が高い地域での導入効果が高いといえる。さらに、漁獲高と農業産出額の合計値が 50 億円を超え、かつ期間製雪質量が 15000 t/ha を超える市町村を図-9 に示す。釧路や、帯広になどで、農業・水産分野での導入可能性が高いと考えられる。

同様に日本全国の市町村の期間製雪質量計算も行った。結果を図-11,12,13 に、代表都市の冷房デグリデーと製雪能力の関係を図-14 に示す。本州においても期間製雪質量が 5000 t/ha（既存雪利用施設平均貯雪量は 500 t）を超えている地域が多く見られ、雪冷房などの導入が期待される。

まとめ

1) 雪冷房利用時の制約である雪搬送コスト、気候リスクなどの解決策として人工製雪機の雪冷房への導入の有用性について示した。

2) 雪冷房に利用するための雪を人工製雪機で製造するに際しての実務上の知見を得るための製雪実験を行った。外界気象条件、製雪状況について示し、人工製雪機の特長として騒音、風速、含水率、製雪能力、製雪エネルギーコストなどについて評価を行った。製

雪能力は最大で 10 t/h であった。

3) 結氷に係わるエネルギー的側面を考慮した雪生成ポテンシャルの計算を行い、製雪能力、含水率の実測結果との比較を行った。

4) 雪生成ポテンシャルの計算結果を元に、道内各都市、及び、日本各地の製雪能力を求め人工製雪機導入効果の評価を行った。道東、道央、本州の多くの地域で導入効果が高いという結果が得られた。

参考文献

- 1) 河島克久・遠藤徹・竹内由香里：熱量式による簡易積雪含水率計の試作，防災科学技術研究所研究報告第57号 1996年12月
- 2) 雪の話・氷の話（理科年表読本）P66，木下 誠一 著
- 3) 雪氷防災—明るい雪国を創るために P88 高橋 博，中村 勉 著[kJ/(kg·K)]
- 4) 新防雪工学ハンドブック 日本建設機械化協会編 P28
- 5) 水環境の気象学 近藤純正編著 P241

記号一覧

CF : コンタクトファクター[-], C_s : 雪の比熱[kJ/(kg·K)], c_w : 水の比熱[kJ/(kg·K)], i_e : 環境空気のエントルピー[kJ/kg], i_x : 氷点における空気のエントルピー[kJ/kg], m_s : 投入雪質量[kg], m_w : 水質量[kg], t_{win} : 噴霧水量 [kg/s], Q_{fp} : 雪生成ポテンシャル[kJ/s], Q_{mw} : 噴霧水流量[kg/s], Q_{mx} : 距離 x における噴流の空気流量[kg/s], T_1 : 初期水温[°C], T_1' : 雪投入後の水温[°C], T_2 : 初期水温 (= T_1) [°C], T_2' : 雪投入無しの断熱容器の水温[°C], T_s : 雪内部温度[°C], t_{win} : 噴霧水温[°C], γ : 雪の融解潜熱[kJ/kg]