

日本における雪エネルギー有効利用の実態調査と今後の可能性に関する研究

内田敦子・佐野武仁・山品 恵

A Fact-Finding Survey on the Effectiveness of Snow Energy and Its Future Usability

Atsuko UCHIDA, Takehito SANNO and Megumi YAMASHINA

The Tohoku district facing the Sea of Japan, and Hokkaido, are famous as one of the heaviest snow areas in the world. The deep snow often causes traffic jams and other daily inconveniences. People are forced to remove it spending huge amounts of money, labor and energy. However, on the other hand, the snow and ice have been utilized effectively for cryopreservation of crops like grains or vegetables since ancient times.

Recently local governments have started to cope with the idea of storing the snow to convert its energy for air conditioning of public facilities. Along with the need to save fossil fuels like petroleum to control CO₂ and prevent global warming, the alternative natural sources of energy like sunlight, water and snow attract attention.

The authors also believe that the use of the snow cold thermal energy can be effective for energy-saving, resource-saving and environmental protection, hence conducted the basic survey in an attempt to fathom its usability.

Key words: natural energy (自然エネルギー), snow (雪), snow cold thermal energy (雪冷熱エネルギー), quantity assumed to be able to use (賦存量), conveyance of snow (雪の搬送), energy-saving (省エネルギー)

1. はじめに

日本では、日本海に面した東北・北海道などの地方で、豪雪に見まわれる地域が多い。雪は交通や人々の暮らしを阻害し、雪の排除にも膨大な費用と労力、エネルギーを費やすことを余儀なくされてきた。しかし一方で雪や氷は昔から農作物の冷蔵保存などに、有効利用されている¹⁾。さらに近年では自治体などが中心となって、冬期に貯蔵した雪水を利用し、公共施設などの冷房用冷熱源として夏期に利用する取り組みがおこなわれている。また、地球温暖化の主な原因となっているCO₂を抑制するために、石油などの化石燃料への依存を低減する必要があるが、それに替わる新エネルギーとして、太陽光、水、そして、雪などの自然エネルギーが注目されている。自然エネルギーである雪を利用することにより、省エネ、省資源が図られ、環境保全に資することができる。本報では雪や氷の冷熱エネルギーについて、その利用の可能性について基礎研究をおこなった。また、2002年には「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法(新エネルギー法)」²⁾で

「雪水冷熱エネルギー」をバイオマスエネルギーとともに新エネルギーとして位置付ける政令改正がなされている。

2. 雪冷熱エネルギーについて

2.1 雪冷熱エネルギーの利用形態

現在の雪冷熱エネルギーの利用形態³⁾について、図1に示した。

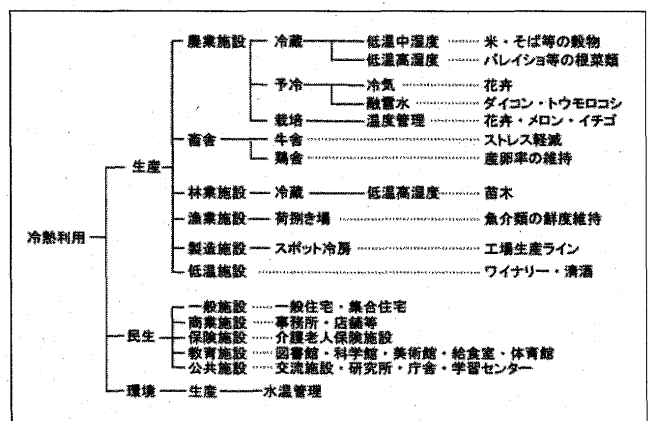


図1 雪冷熱エネルギーの利用形態 (利雪技術協会)³⁾

2.2 雪冷熱エネルギーシステム

雪冷熱エネルギーシステムの分類³⁾についてまとめ、下記に示した。

- ①融解水直接循環方式
- ②融解水熱交換冷水循環方式
- ③融解水熱交換冷風循環方式
- ④直接熱交換冷風循環方式
- ⑤直接熱交換冷風・融解水直接併用循環方式
- ⑥自然対流システム氷室

2.3 雪冷熱エネルギーの特徴

次に雪冷熱エネルギーの特徴³⁾をまとめ、下記に示した。

- ①積雪寒冷地に限定されるが賦存量（雪エネルギーとして利用可能と想定される雪量）が多い
- ②豪雪地帯、特別豪雪地帯では雪が身近なものである
- ③密度が水の1/10~1/3程度である
- ④容積が大きく、かさ張る
- ⑤貯蔵して夏期に利用できる
- ⑥融解潜熱（80000 kcal/t）を利用できる
- ⑦融雪水（3℃~10℃）を利用できる
- ⑧0℃以下にならず、誤作動による凍結の心配がない
- ⑨湿度が高く、制御可能である
- ⑩雪の表面に空気中の塵、水溶性ガスを吸収させ、空気を浄化することからクリーンルームへの応用が期待できる（直接熱交換冷風循環方式）
- ⑪省エネルギーである

3. 雪冷熱エネルギー利用施設の実施例と現状について

既存する雪冷熱エネルギーを利用した実施例を挙げ、また、それらがどのようなシステムでどのように利用されているか、その効果と問題点についてまとめた。

3.1 既存する雪冷熱エネルギー利用施設の実施例

実施例

モエレ沼公園「ガラスのピラミッド (HIDAMARI)」
(北海道札幌市) について (写真1)

モエレ沼公園⁴⁾は、札幌の市街地を公園や緑地の帯で包み込もうとする、「環状グリーンベルト構想」における北部平地系緑地の拠点となる公園として計画され、約100haの内陸部分の周りを取り囲むモエレ沼の水面を合わせた189haを公園区域としている。札幌市では水の要素をもつ、数少ない公園である。また、彫刻家イサム・ノグチが計画に参画し、モエレ沼公園の基本設計が策定された。

公園内のシンボリックな建物であるガラスのピラミッドは

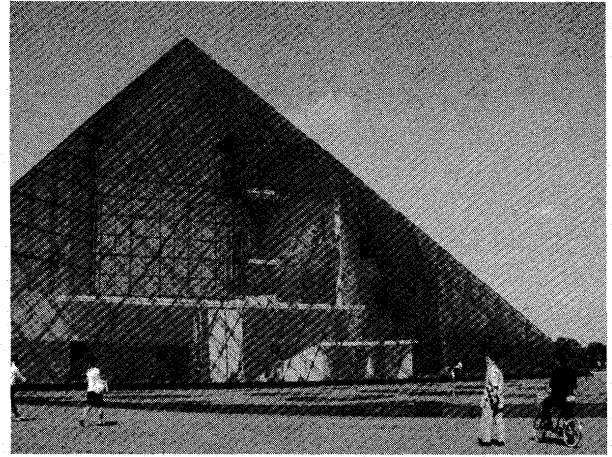


写真1 モエレ沼公園「ガラスのピラミッド (HIDAMARI)」
設計: アーキテクトファイブ

透明な面の集合体のアトリウム空間となっている。館内は休憩所となるアトリウムの他、ギャラリー、レストラン、ショップ、管理事務所等をもつ複合施設である。アトリウム空間は、冬期には「日だまり」となり、快適な空間であるが、夏期には日射による温室効果で高温になる。そのため冷房負荷が大きく、CO₂の排出量も多いため、空調システムのエネルギーについて検証する必要がある。

■施設の概要^{5),6)}

- ①ガラスのピラミッド規模: 鉄骨造・SRC造・RC造
地上4階 塔屋1階
延べ床面積 5,322 m²

ガラスのピラミッドは、高さ31m、底辺51mのピラミッド型アトリウムと、高さ20m、幅18×22.6mの付属建物からなる。アトリウムは非整形で、2層で構成され、合計床面積は1450 m²である。

- ②貯雪庫規模: RC造
地下1階
延べ床面積 693 m²
階高 6.2 m
実質貯雪量 3,160 m³

次に、ガラスのピラミッドの雪冷熱エネルギーシステムを図27)に示したが、2.2の②融解水熱交換冷水循環方式を採用している。このシステムは、雪の溶けた冷水を利用した方式で、館内を巡って温められた水によって強制的に雪を溶かし、その融水、つまり冷水(3℃位)を循環させ、熱交換器を介して2次系統に冷熱を伝え、その配管によってファンコイルユニットで冷房をおこなう。2次系統を循環する不凍液(冷却水が凍結するのを防ぐため、氷点降下剤として加える液: アルコール・グリセリン・エチレングリコールなど)を温めることにより冬期の暖房への使用も可能となる。齊藤氏による実証データの収集および分析⁶⁾

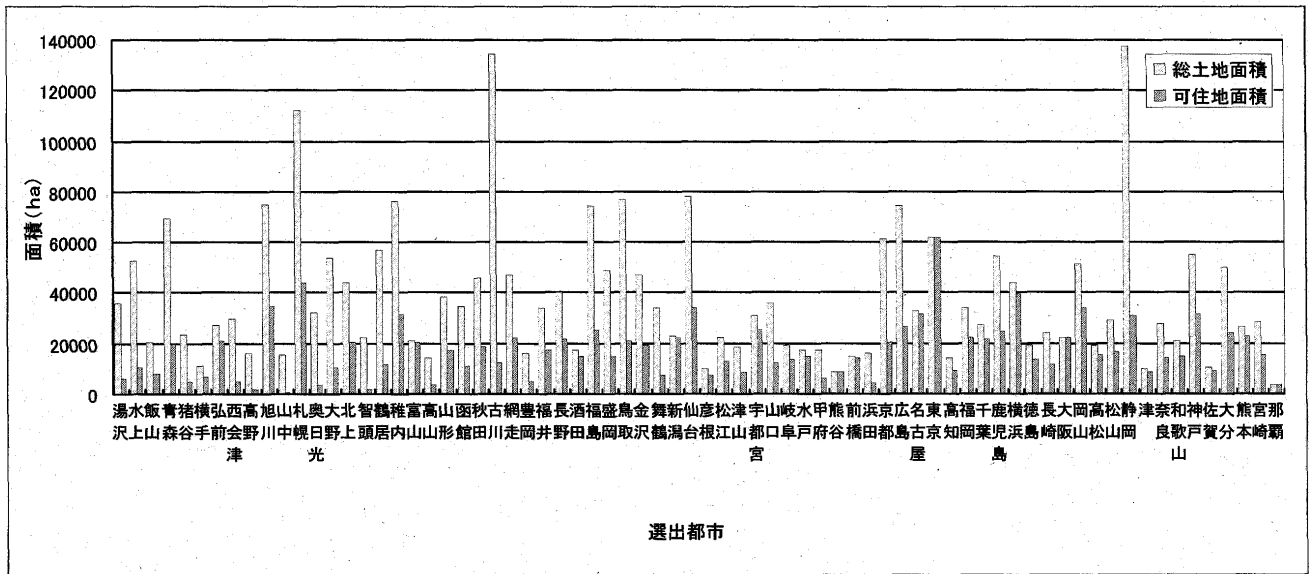


図3 総土地面積と可住地面積の関係

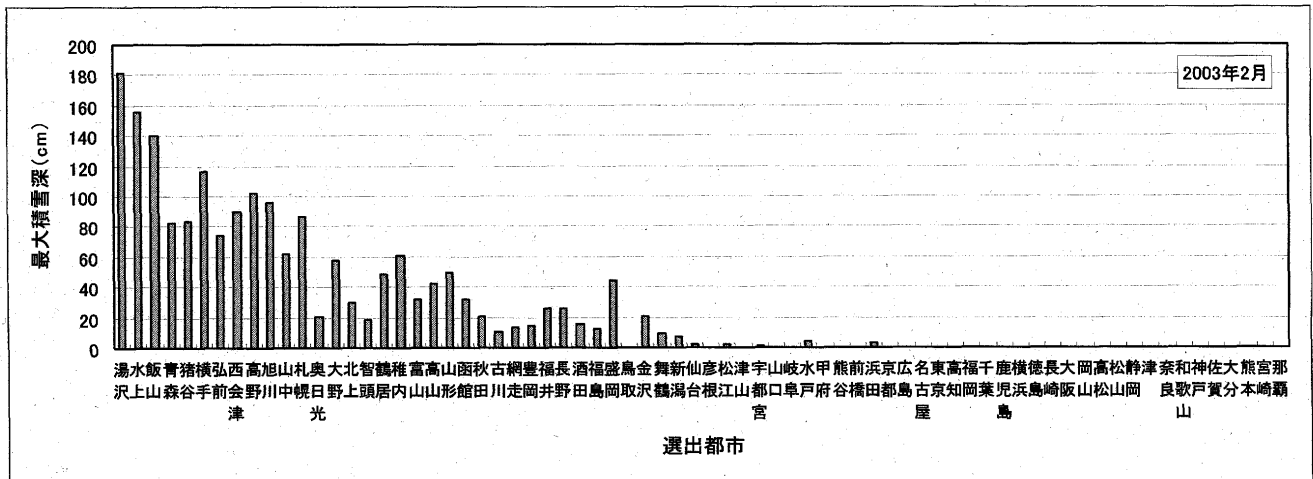


図4 各地の最大積雪深 —2003年2月—

4.2 調査対象地域の気象データの解析

2003年～2005年までの各月（冬期：1～4月，夏期：6～9月）の下記に示した項目の気象データについて，気象庁⁹⁾のデータを用い，集計および解析をおこなった。

■冬期

- ①平均気温 [°C]
- ②冬日（日最低気温が0°C未満の日）[日数]
- ③真冬日（日最高気温が0°C未満の日）[日数]
- ④日照時間 [時間]
- ⑤最大積雪深 [cm]

■夏期

- ①平均気温 [°C]
- ②夏日（日最高気温が25°C以上の日）[日数]
- ③真夏日（日最高気温が30°C以上の日）[日数]

④猛暑日（日最高気温35°C以上の日）[日数]

⑤日照時間 [時間]

図4に選出した各都市の2月の最大積雪深を示した。新潟県の最南端に位置する湯沢町では，1日で180cmを越える積雪深を記録している。

次に，解析したグラフの項目は以下に示す。

■冬期

- ①平均気温と冬日の関係
- ②平均気温と真冬日の関係
- ③真冬日と日照時間の関係
- ④平均気温と日照時間の関係（沖繩除く）
- ⑤平均気温と最大積雪深の関係（沖繩除く）
- ⑥日照時間と最大積雪深の関係

■夏期

- ①平均気温と夏日の関係
- ②平均気温と真夏日の関係
- ③平均気温と日照時間の関係
- ④夏日と日照時間の関係

データを解析した結果、2003～2005年の3年間を通し、ほぼ同じような結果が得られた。平均気温と冬日(図5-1)・真冬日(図5-2)、平均気温と夏日(図5-3)・真夏日(図5-4)との間に関係性が見られた。この結果から、それぞれの間には一方に影響を与える要因があると考えられる。また、平均気温と日照時間、平均気温と最大積雪深、真冬日と日照時間、日照時間と最大積雪深、夏日と日照時間との間には関係性が見られなかった。以上より、冷房負荷を考える上で、平均気温のデータの選出に付随して必要となるデータは冬日や真冬日、夏日や真夏日のデータであるとする。

4.3 冷房負荷と冷房電力量とそれらを補うために必要な雪量の算出

①冷房負荷、冷房電力量の算出方法

冷房使用日数については、夏期に外気が25℃以上のときに冷房を使用すると仮定し、夏日、真夏日、猛暑日の合計を対象日数とした。各地の冷房使用面積について、式①に示したが、住宅延べ面積は各都市の平均延べ面積とし、うち70%を冷房使用面積として、これに各地の総世帯数を乗じて算出した。次に、各地の1日の冷房負荷を式②に示したが、常時運転面積を冷房使用面積の40%とし、単位面積あたりの熱負荷を125 kcal/m²h、1日の稼働時間を9時間として算出した。また、冷房負荷と電力量の関係において用いるCOP(Coefficient of performance: エネルギー消費効率)の値を3とし、各地の1日の冷房電力量について、式③に示したように、各地の1日の冷房負荷×1/3として算出した。

各地の冷房使用面積 [m²]

$$= \text{各都市の世帯数} \times \text{住宅延べ面積 [m}^2\text{]} \times 0.7 \quad \cdots \text{式①}$$

各地の1日の冷房負荷 [kcal・h]

$$= \text{冷房使用面積 [m}^2\text{]} \times 0.4 \times 125 \text{ [kcal/m}^2\text{h]} \times 9 \text{ [h]} \quad \cdots \text{式②}$$

各地の1日の冷房電力量 [kWh]

$$= \text{各地の1日の冷房負荷 [kWh]} / 3 \quad \cdots \text{式③}$$

ただし1kWh=860kcal, COP=3とする。

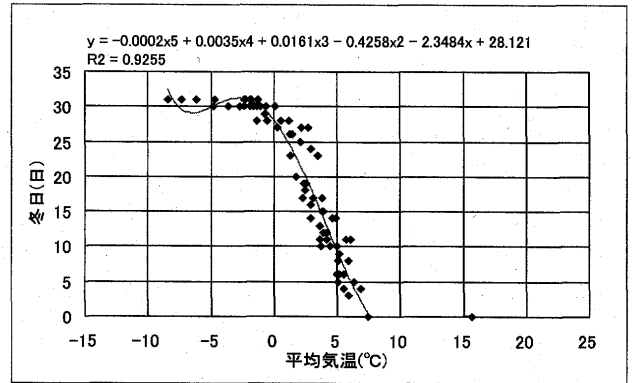


図5-1 2003年1月の平均気温と冬日の関係

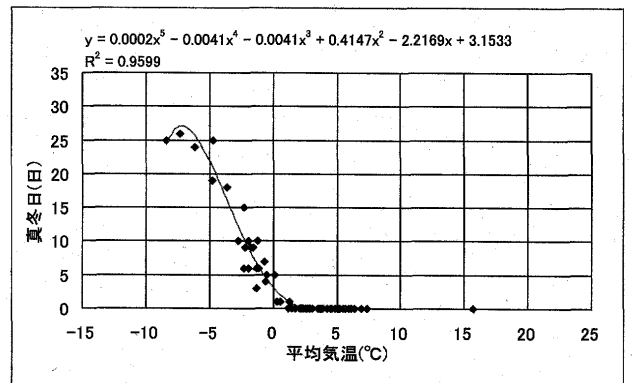


図5-2 2003年1月の平均気温と真冬日の関係

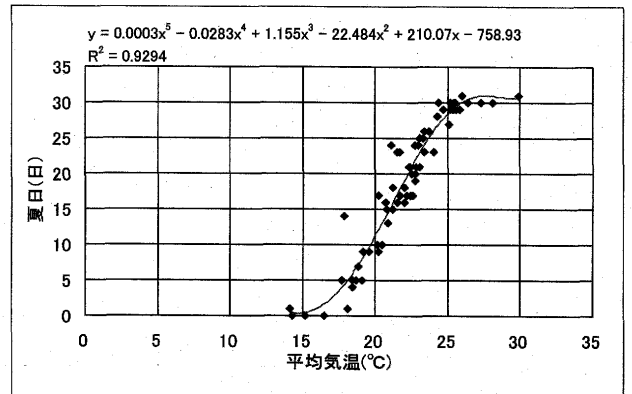


図5-3 2003年7月の平均気温と夏日の関係

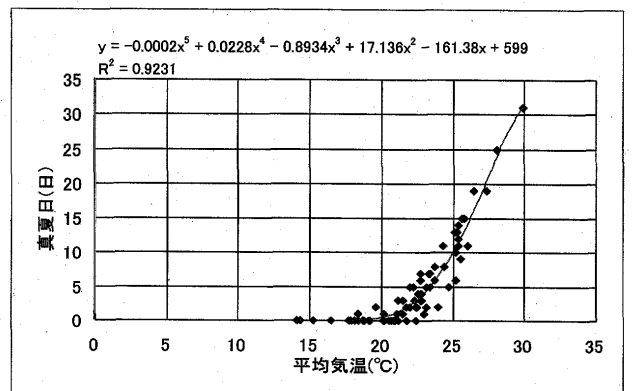


図5-4 2003年7月の平均気温と真夏日の関係

②雪エネルギー賦存量の算出方法

冷房負荷・冷房電力量に利用される雪のエネルギーとして雪の融解潜熱（0℃の水1kgを0℃の水1kgに換えるために必要なエネルギー）のみを対象とした。雪1t=80000 kcal=93 kWh=335 MJとし、冷房負荷、冷房電力量のエネルギーを雪量に変換した。雪量については、冬期の積雪の多い時期として各年2月の最大積雪深をもとにした。式⑤に示したように、各地の最大積雪深に各地の可住地面積の10%、20%、30%を対象面積とした場合の値を乗じ、利用可能量（期待可採量）を算出した。次に雪冷熱エネルギー賦存量について、式⑥に示したが、式⑤より算出した利用可能量（期待可採量）に雪エネルギー賦存量の標準係数 k （式④）を乗じ、賦存量を算出した。

$$\begin{aligned} \text{雪冷熱エネルギー賦存量の標準係数 } k \text{ [MJ/m}^3\text{]} \\ &= 0.5[\text{t/m}^2] \times (2.093[\text{MJ/t}^\circ\text{C}] \times |1-1^\circ\text{C}| \\ &\quad \text{雪の比重} \quad \text{雪の比熱} \quad \text{雪温} \\ &\quad + 4.186[\text{MJ/t}^\circ\text{C}] \times 5[^\circ\text{C}] \times 335[\text{MJ/t}]) \quad \dots\text{式④} \\ &\quad \text{融解水の比熱} \quad \text{放流水温} \quad \text{融解潜熱} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{利用可能量 (期待可採量) [t]} \\ &= \text{最大積雪深[m]} \times \text{可住地面積[m}^2\text{]} \quad \dots\text{式⑤} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{雪冷熱エネルギー賦存量 [MJ]} \\ &= \text{利用可能量 (期待可採量)} \times k \quad \dots\text{式⑥} \end{aligned}$$

4.4 雪冷房可能地域の選出結果と考察

冷房負荷、冷房電力量に必要な雪量と賦存量と比較し（雪冷房が可能と見込まれる地域は賦存量が冷房負荷・冷房電力量を上回る地域とする）、雪冷房可能地域を選出し

た。2003年～2005年の3年間の結果から、期待可採量が可住地10%の場合は22～26地域、20%の場合は27～32地域、30%の場合は29～34地域となった。図6に3年間の平均値から算出した可住地20%の場合の雪冷房可能地域と不可能地域を示した。また、賦存量の増加により雪冷房可能地域も増えるが、その割合は冷房負荷の大きさにも密接に関係していることが分かった。図7に、期待可採量が可住地20%の場合の（但し賦存量が少なかった地域を除く47都市）賦存量と冷房負荷・冷房電力量に必要な雪量の関係について3年間の平均値を用いたものを示した。

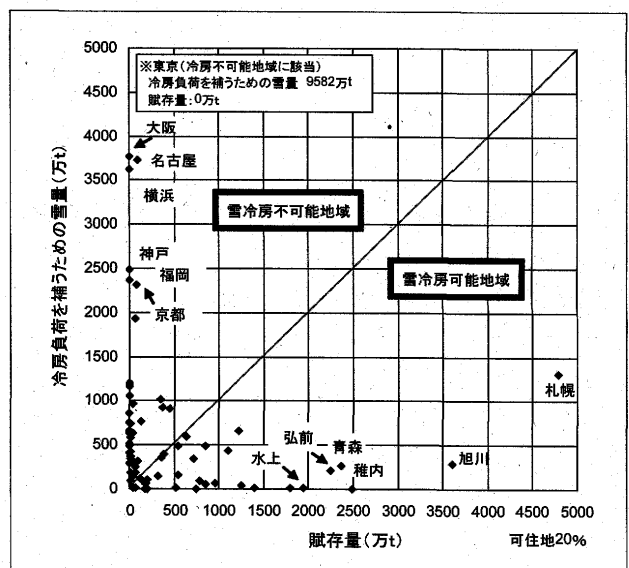


図6 雪冷房可能地域と不可能地域（可住地20%）

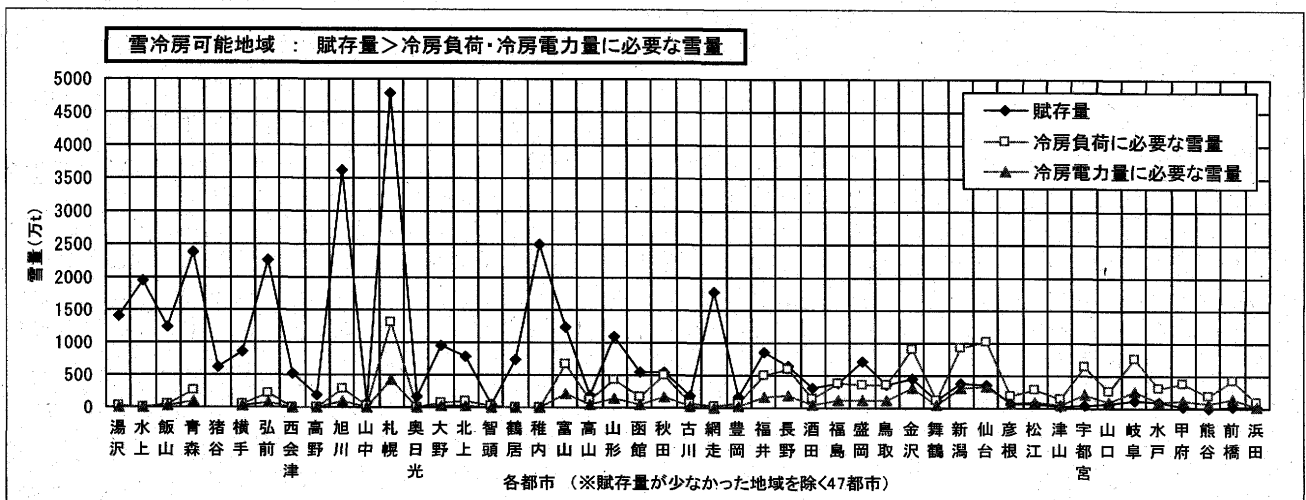


図7 貯存量と冷房負荷・冷房電力量に必要な雪量の関係 —2003年～2005年の3年間の平均値—（可住地20%）

5. 雪の搬送の可能性

雪冷熱エネルギーの賦存量が多く見込まれている地域から、賦存量が不足し、雪冷房が不可能で冷房負荷の大きい地域への雪の搬送の可能性について調査した。搬送先の都市の電気冷房コストと雪冷房を利用したと想定した場合に軽減される電力量コストと搬送コストを比較し、有効利用の可能性について検証した。

5.1 算出方法について

雪冷房導入を仮定した場合のコスト軽減の可能性について算出する。電力量1kwの料金を25円と仮定し、雪冷房の不可能地域において、賦存量となる雪量を雪冷房に利用した場合の電力料金の軽減コストを求め、不足する雪の搬送にかかるコストと比較して検証する。搬送コストにおいては、賦存量が多く、雪冷房不可能地域に1番近い稚内

からの搬送と仮定し、長岡市における実例をもとに、トラック搬送として、搬送距離1kmあたり1000円/tとして算出した。(図8~10)

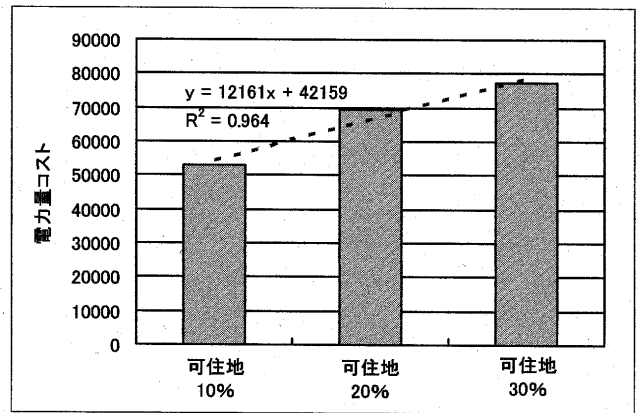


図8 雪冷房導入で軽減できる電力量コスト

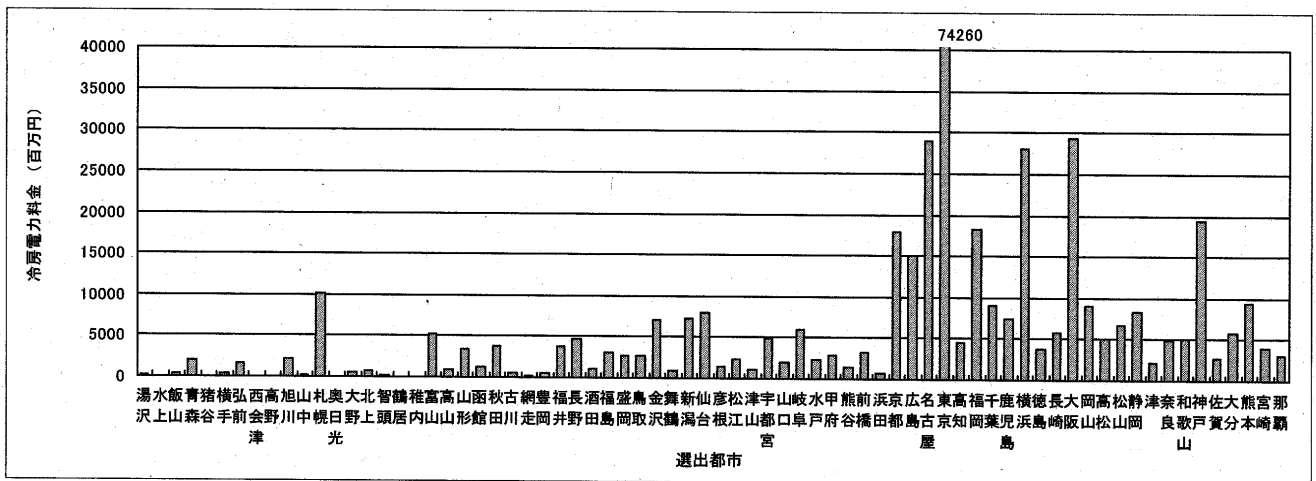


図9 選出都市の6~9月の冷房電力コスト

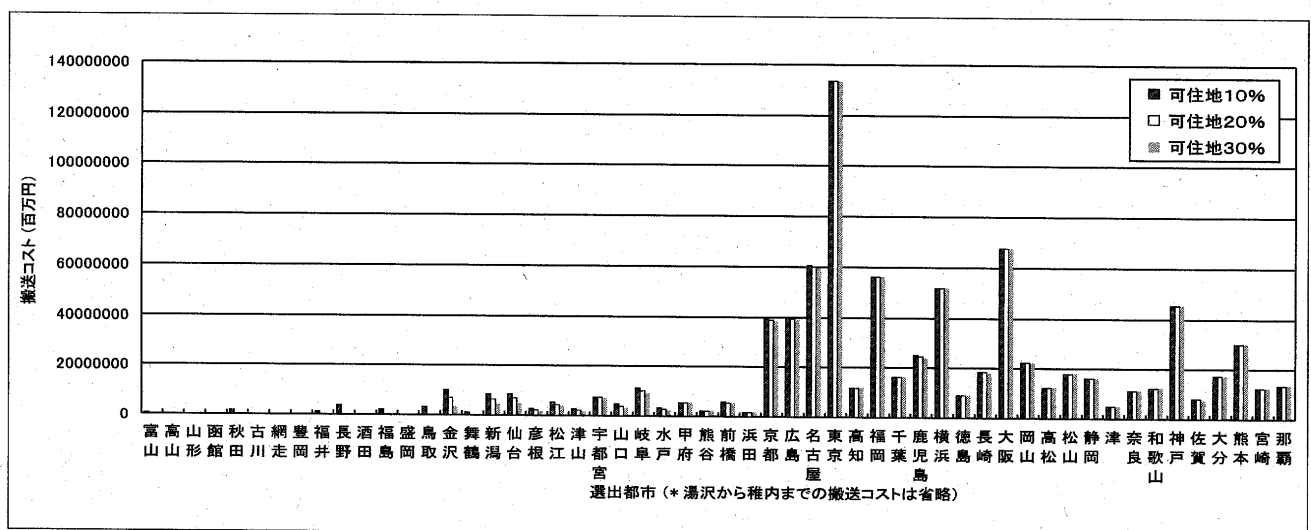


図10 賦存量不足地域への搬送コスト

5.2 算出結果と考察

稚内からの搬送を仮定した結果、距離が大きくなり、コストを考えると雪冷房不可能地域への雪エネルギー搬送は困難であることが分かった。実際問題として、北海道から本土へ、または四国や九州、沖縄へ搬送するにはフェリー等、トラック以外の輸送コストがかかるため、算出したコストより増加し、さらに厳しい結果となった。そこで、必要雪量が少量となる冷房負荷の最小地域へ搬送した場合についても検証をおこなった。雪冷房の使用で軽減される電力量コストが雪の搬送コストを上回る場合、雪冷房導入は有効である(式⑦)といえる。以下の算出結果より、33 km以内への搬送であれば、有効利用できることが分かった。

例: 福島(期待可採量が可住地 20% の場合)
 冷房負荷を補うために必要な雪量=約 9 万 t
 軽減される電力量コスト=約 29700 万円
 搬送可能距離 = x
 トラック搬送コスト = 1000 円/t

雪冷房で軽減される電力量コスト > 雪の搬送コスト…式⑦

$$297000000 > 90000 \times x \times 1000$$

$$x < 33$$

しかし、33 km という搬送距離は、冷房負荷を補うために必要な雪量が最も小さいものから算出した結果であり、冷房負荷が大きい地域を想定した場合、周囲 33 km 以内への搬送は、現実的に利益が見込めず、有効的であるとは

いえない。今後、搬送方法やコストの軽減方法を検討していく必要があると考える。

6. 雪冷熱エネルギー利用による省エネルギー効果の検証

全国の冷房電力量の合計について、2003 年～2005 年の平均値は 172 億 6492 万 7518 kWh となり、原油に換算すると 41 億 9883 万 372 l になった。また、CO₂ 排出量は 111 億 2690 万 487 kg となり、さらに CO₂ が排出され続ければ、地球環境はますます悪化すると考える。そこで、雪冷熱エネルギーを利用した場合の省エネルギー効果を、冷房負荷、冷房電力量を原油に換算し、CO₂ 排出抑制量における効果をもとに検証した。

6.1 CO₂ 排出量と抑制量の算出方法と目的

電気冷房を使用した場合の消費電力(図 11)(消費原油量)から省エネルギー量および CO₂ 排出量(図 12)、抑制量を算出する。電力量 1 kWh = 原油 0.2432 l、CO₂ 発生量は原油 1 l あたり 2.65 kg とする。式⑧を用いて、可住地 10%、20%、30%、それぞれの場合で、雪の賦存量がすべて利用された場合の省エネルギー量として、CO₂ 排出可能抑制量を求めた。

電気冷房のみ使用した場合の CO₂ 排出量

$$= \text{賦存量で雪冷房を使用した場合の CO}_2 \text{ 排出量} \\ = \text{CO}_2 \text{ 排出量抑制量} \\ = \text{省エネルギー} \quad \dots \text{式⑧}$$

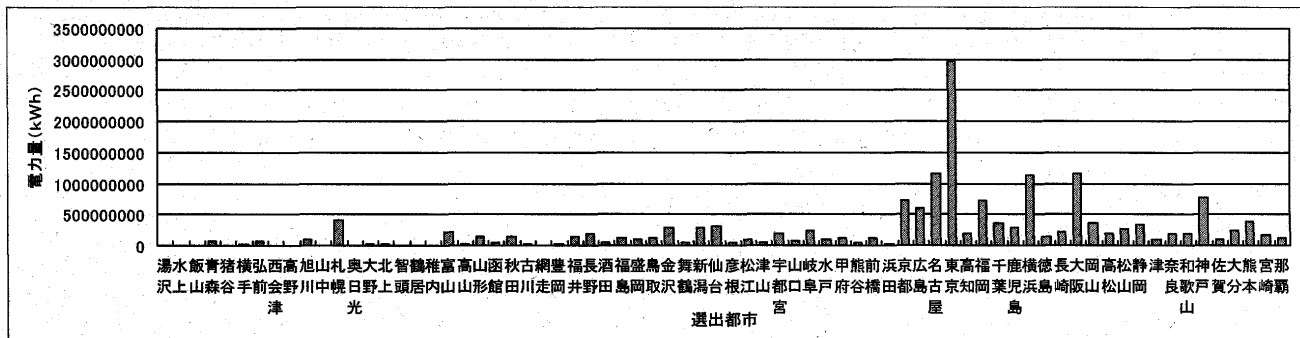


図 11 選出都市の電力量

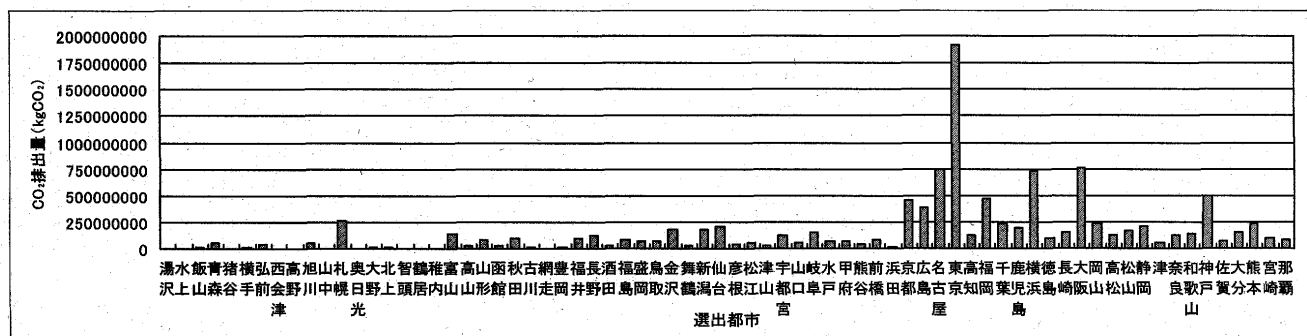


図 12 選出都市の CO₂ 排出量

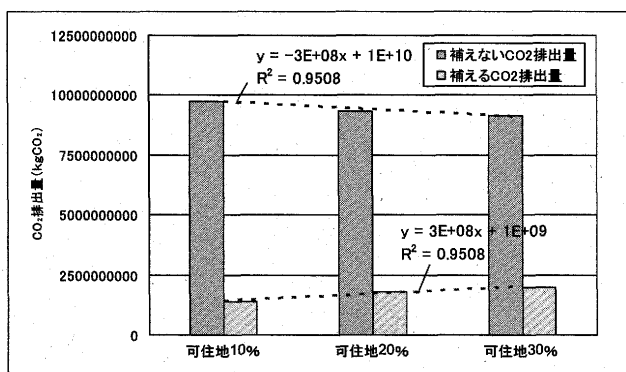


図13 雪冷房 CO₂ 排出可能抑制量

6.2 算出結果と考察

期待可採量が可住地 20% の場合、選出した地域全体の電気冷房による CO₂ 排出量に対し 16% を抑制することが可能であるが、選出した地域全体の冷房電力量が大きく、雪で補うことが可能な割合は極めて低かった。期待可採量の対象の可住地が 30% の場合は、約半数の地域で、冷房電力量が 100% 抑制可能となるが、冷房電力量を補うことが不可能な割合、原油換算値、CO₂ 抑制可能な排出量は地域数に比べ極めて小さい。(図13) これは、多くの賦存量が見込まれる地域の冷房電力量より、賦存量が見込まれない地域の冷房電力量がはるかに大きいためであると考えられる。

7. まとめと将来の展望について

以上の調査、想定、算出、検証をもとに、今後の雪冷熱エネルギー利用への問題点や可能性についてまとめた。

雪冷熱エネルギーの効率は気象状況に大きく左右される。冬期の積雪深における賦存量が多くても、その年の夏期(6~9月)の冷房負荷が大きければ、雪冷房可能な地域も少なくなり、気象によって雪冷房可能地域が変化する。変化する気象に対応できる貯蔵、または効率的な利用方法を見出すことが、今後、住宅への雪冷熱エネルギー導入増加の可能性につながると考える。

賦存量の多い地域ならば、冷房負荷や冷房電力量を補い、有効利用となるが、実際、賦存量の多い地域では、冷房負荷、冷房電力量が小さく、余剰な雪冷熱エネルギーが発生してしまう。そこで、余剰エネルギーを、賦存量が少ない地域へ搬送し有効利用できるかを検討したが、今回得たデータより、賦存量が見込まれない地域ほど世帯数が多く、冷房負荷、冷房電力量が大きくなり、搬送コストからも、搬送可能範囲は有効的・現実的な結果が得られなかった。また、今回、選出した地域の市町村データから賦存量が多い地域で、財政指数が 0.3 を下回る財政力の低い地域があった。このような地域は他の地域へ雪冷熱エネルギー供給

(搬送) することができれば、財政力を上げることができるのではないかと考える。

省エネルギー効果に関して、選出した地域全体の冷房電力量が予想を超えており、雪冷熱エネルギーで補うことが可能となる割合は低かった。しかし、小さい割合ではあるが住宅での雪冷熱エネルギー利用における CO₂ 排出量が抑制されることが立証できた。雪の搬送が可能になると、冷房電力量の多い地域へ搬送することで、今回の算出結果以上の CO₂ 排出抑制量が見込まれる。

以上の結果から、雪冷熱エネルギーの今後の可能性についてまとめると、搬送コスト軽減が重要な課題であることが分かったが、天候に追従できる雪冷熱エネルギーの技術開発や市場拡大によるコスト軽減をすすめることも重要であると考えられる。また、今回の算出結果より得られた雪の搬送可能範囲内(周囲 33 km 以内)でいかにコスト軽減できるか、本報ではあまり触れていなかった雪の貯蔵についても重要であると考えられる。その貯蔵方法についてはもちろんであるが、変化する天候に対応できる雪の貯蔵施設の建設および設備費のコスト軽減など、検討すべき点は多く、今後の主たる研究テーマとして、本報での基礎研究の結果も踏まえ、研究に着手している。

〈参考文献〉

- 1) 理科年表読本「雪の話・氷の話」、木下誠一著、丸善、1984
- 2) <http://www.nedo.go.jp/index.html>, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 2005. 9. 9
- 3) <http://www.risetu.jp/>, 利雪技術協会, 2005. 8. 1
- 4) <http://www.sapporo-park.or.jp/moere/>, モエレ沼公園, 2005. 8. 1
- 5) 新建築 2003 年 8 月号, pp. 92-101, 224, 新建築社, 2003. 8
- 6) 齊藤晶夫, 札幌市ガラスのピラミッド 雪冷房システムの検証について ~実証データに基づく定量的評価~, 第 17 回ふゆトピア・フェア研究発表会, 2005. 2
- 7) http://www.nedo.go.jp/nedohokkaido/kitanodaichi/jirei/sn_05.html#, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 北海道支部, 2005. 9. 9
- 8) <http://www.toukei.maff.go.jp/shityoson/index.html>, わがマチ・わがムラ市町村の姿ーグラフと統計でみる農林水産業, 2005. 11. 10
- 9) <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, 気象庁, 2005.10.30

付記

図1は参考文献3)を引用して作成したものである。

本文中の「ガラスのピラミッド (HIDAMARI)」の雪冷熱エネルギーシステムの詳細および、検証結果については参考文献6)によった。

図2は参考文献7)を引用して作成したものである。

(うちだ あつこ 生活環境学科)
 (さの たけひと 生活環境学科)
 (やましな めぐみ 生活環境学科平成 17 年度卒業生)