

国際貿易理論による雪エネルギー 有効利用に関する研究 ～ 未利用エネルギーによるグローバルな地方創生 ～

松林 賢司¹・松田 雄大²

¹正会員 金沢工業大学教授 経営情報学科 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1)

E-mail:kenji.matsubayashi@neptune.kanazawa-it.ac.jp

²金沢工業大学 経営情報学科

日本の北部日本海側を中心に冬季に大量に降り積もる雪。地方創生の一環としてその雪を資源として有効利用する方法の確立が期待されている。これまでも降雪地域の自治体、または研究者を中心に雪の冷熱を利用しようとする研究が実施されているが、試験レベルに留まり大規模な実用化に至っている事例は少ない。かかる中、発表者は国際貿易理論の適用¹⁾により需給ギャップを解消する方法を見出しており、本研究では雪の輸出にこれらの知見を応用するものである。今回は、現地調査により最適な日本側の雪資源供給元、積荷港、海上輸送方法（船種、輸送規模、輸送ロス対策等）、及び需要地の荷揚港、雪資源使用者の選定を技術的、及び経済的な観点より実施して総合的バリューチェーン構築の事業可能性に関して得られた成果を報告する。

Key Words : Snow, Unutilized energy, International trade, Cold heat system

1. 背景

「国際貿易理論による雪エネルギー有効利用に関する研究」は日本の未使用エネルギーである雪資源をインドネシアやオーストラリアなどの需要地(南半球)へ輸出し、再生可能冷熱エネルギーとして利用するために技術的問題の解決、並びに経済性の評価に取り組み、その上で得られた成果に基づいた実証試験を目指すことを目的としている。日本の雪を東南アジアや豪州などの南半球の地域に運搬する理由は北半球と南半球では同時期でも季節が逆であるからである。北半球では冬季で雪が大量に降り積もっている同時期に南半球は夏季であり冷熱の需要がある。日本の降雪量は500～900億t/年にも上り、この資源を1%でも有効利用するだけでも日本の2012年の石油輸入量1.8億tの2倍以上の規模となる。

従来の資源としての雪の活用法は冬場の雪を保存して同地域で夏場の冷熱源として利用する方法が試験的に実用化されている。具体例²⁾としては、札幌市のモエレ沼公園のガラスのピラミッド（館内の空気を冷やす）、山口斎場の灌水利用（灌水・・・かんすい、植物に水を

撒くこと）、円山動物園の館内冷房の補助（レッサーパンダの部屋を一定の気温に保つ）などがある。また日本では江戸時代より伝統的に雪を冷熱資源として利用していた事例、氷室（図1）がある。



図-1 金沢・氷室の内部写真

氷室とは予め地中を掘って空いた空間に冬季の日本に降った雪氷を投入し、その上に蓋をすることで夏季まで雪

氷を保存する方法である。本学所在地の金沢でも氷室は伝統保存されており、前田家が徳川家へ氷室の雪を献上したというエピソードも残っている。このように、冷熱資源としての雪の利用は古くから行われていたが、大規模なエネルギーとしての利用や雪の供給地とは異なる場所で冷熱資源としての雪を活用する事例は存在しない。その理由としては夏場の冷熱資源としての利用が限定的であるという需要ギャップと呼ばれる問題と夏まで雪を保存するための施設が必要であるという季節ギャップと呼ばれる問題があるからである。季節ギャップについては温度差発電³⁾ 向けの熱源を一般的な化石エネルギーの燃焼によって供給する必要がある為、温暖化ガスを排出する問題があり、その利用法は小規模な地産地消に留まっている。またスケールメリットによる経済性の確保が困難であることもあり、需要ギャップ解消のためのコストが極めて大きい為、実用化の難易度は高い。そこで本研究では、雪を南半球に運ぶ際の運搬方法としてドライバルク船に着目した。ドライバルク船は石炭や鉱石などを日本に輸送するために使われている船であり、鉄製の戦争を持つ。従来のドライバルク船は海外から石炭や鉱石を日本に輸入する際に使用されている。ドライバルク船は貨物室に重量のある荷物を積載し運搬することを目的として造られているため、貨物室を空にすると船体のバランスが崩れる。日本に向かう時は石炭や鉱石を貨物室に入れているが、日本から出航する際は運搬するものがなく、貨物室に入れるものがないため、港周辺の海水を貨物室に入れて船体のバランスを保っている⁴⁾。海水の代わりに雪を貨物室に入れて南半球に運ぶ発想は、これまでに報告例がない。本研究では雪資源の活用方法として定常的に日本の発電所に南半球から石炭を輸送している石炭バラ積み船の南半球への帰路は積荷が無い状態で運行されていることに着目し、石炭輸送船のバックカーゴとしての雪の輸出、即ち図2の様に日本の雪資源を降雪期間と同時期に国際的な需要と供給のアンバランスを解消する為の国際貿易理論に基づき冷熱資源を必要とする常夏地域である東南アジア、並びに夏季地域である南半球の豪州に輸出し、有効利用することに関する技術的問題の解決、並びに経済性の有無を明らかにする。

雪が大量に降り積もっている冬季の北半球から冷熱の大きな需要が存在する夏季の南半球に赤道を超えて雪を運搬するプロジェクトが今まで存在しなかったのは雪を北半球から南半球に運搬する際に雪が融けるのではないかとという先入観が非常に強く存在するためである。確かに、雪を北半球から南半球に運搬する際に赤道を通ことは避けては通れない航路である。また、仮に北半球から南半球に雪を何の工夫もなしに運搬して、その道中で雪が全て融けたとしてもその融解挙動が分かれば雪が融けない工夫を施し、雪を融かさずに南半球まで運搬する

方法を調査・評価することにより、雪が融けない運搬方法に関する考察が可能になる。

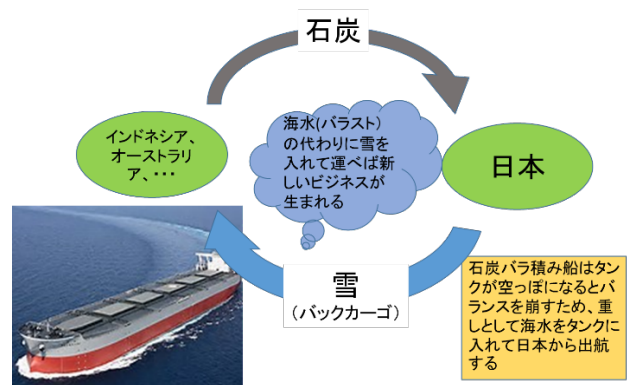


図2 石炭船の雪輸出のイメージ

2. 雪利用のバリューチェーン

従来の雪資源の利用に関しては降雪地域における利用、即ち冬場の雪を同地域で保存して、同地域で夏場の冷熱源⁵⁾ として利用する方法や、雪とほかの熱源の温度差を利用した同地域での発電利用などの研究が実地されており、小規模な地産地消が原則であった。雪資源の大規模な輸出は新規再生可能エネルギーの研究分野の構築に向けた非常に斬新なアイデアであり、その技術的問題の有無、並びに経済性評価は日本を資源輸入国から輸出国に変換する可能性を内包しており、国益に大きく貢献する研究でもある。「国際貿易理論による雪エネルギー有効利用に関する研究」における総合的バリューチェーンを図3に示す。



図3 雪資源有効利用の総合的バリューチェーン

バリューチェーンの1つ目の要素である降雪地区は日本で雪が大量に降り積もる地域を調査することである。バリューチェーンの2つ目の要素である積出港は1つ目のバリューチェーンの降雪地区で集めた雪を国内で効果的に集めることが可能であり、なおかつその雪を南半球の

港に運ぶために適切な港の経済的・地理的な選定である。3つ目のバリューチェーンの要素である輸送船は雪の状態を可能な限り保ったまま、揚陸港まで届けるためには雪の融解量を推測し、どのような保存方法で雪を保管すれば融解量を最小限に留めることができるのかを調査・評価する。4つ目のバリューチェーンである陸揚港は北半球からの雪を南半球のどの港で受け取れば経済的・物理的に効果的なのかを選定する。バリューチェーンの5つ目の要素である冷熱需要者は冷熱資源としての雪を使用することで従来の化石燃料による冷熱の調達と比較してどの程度環境や経済的に効果があるかを評価する要素である。本発表ではバリューチェーンの1から3のに関して具体的に調査、研究を実施した成果を報告する。

3. 降雪地域と積出港

日本では特別降雪量が多い地域が豪雪地帯対策特別措置法⁶⁾によって豪雪地域と特別豪雪地域に指定されている。豪雪地帯と特別豪雪地帯は日本海側に偏在して国土の約51%に及ぶ広大な面積を占め、また、総人口の約15%を擁し、毎年の恒常的な降積雪によって、住民の生活水準の向上や産業の発展が阻害されている。本研究では輸出の為の雪の供給が可能な地域を豪雪地帯と特別豪雪地帯とする。豪雪地帯と特別豪雪地帯の過去10年間の冬季間累計降雪量 (cm) の推移⁷⁾を図4に示す。

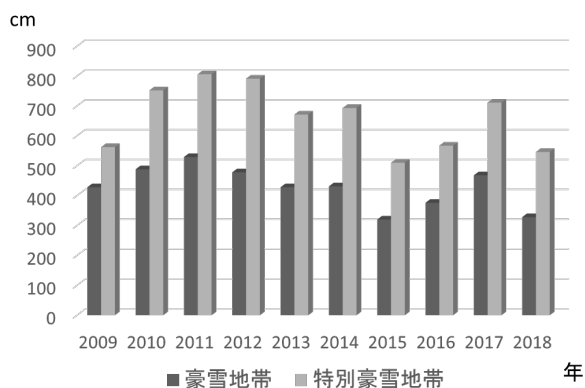


図4 冬期間累計降雪量

これより平均冬季間累計降雪量の10年間の平均は、豪雪地帯で427cm、特別豪雪地帯で660cmとなるのが分かる。また過去10年間にて降雪量が少ない年でも豪雪地帯で300cmを下回る年はなく今後の地球温暖化の影響は考慮すべきではあるが、豪雪地帯、特別豪雪地帯に於いて概ね雪輸出に必要な積雪量は確保できると推察される。

積出港の選定においては石炭船のバックカーゴとしての輸出を想定した利便性を考慮して対象を豪雪地帯と特

別豪雪地帯の石炭火力発電所とする。現在、日本海側の豪雪地帯で運転中の石炭火力発電所⁸⁾は、南から舞鶴発電所1800MW (関西電力)、敦賀発電所1200MW (北陸電力)、七尾大田発電所1200MW、富山新港発電所500MW (北陸電力)、酒田発電所700MW (東北電力)、能代発電所1800MW (東北電力)の6つである。雪輸出の最適積出港としての条件である①定期的に石炭船が寄港する。②積出港付近に雪を貯留できるスペースがある。③除雪作業による雪が入手しやすい。現地調査による情報と関西電力、北陸電力、並びに東北電力に聴取した結果を表1にまとめる。

表-1 対象6発電所の雪輸出に必要な条件の調査結果

	①定期的に石炭船が寄港する。	②積出雪を貯留できるスペースがある。	③除雪作業による雪が入手しやすい。
舞鶴	○	×	×
敦賀	○	△	○
七尾	○	○	△
富山	○	○	○
酒田	○	○	△
能代	○	○	×

これより3つの条件全てを満たす発電所は北陸電力の富山新港火力発電所であることが分かった。同発電所には毎年約290万トンの石炭が輸入されており、パナマックスサイズの石炭輸送船 (積載量: 82000トン) が平均月3回寄港しているので定期的に雪を大規模に輸出することが可能である。雪の貯留スペースに関しては同発電所の石炭バース近辺には約25万m²の発電所拡張用の未使用地がある為、地権者の了解が得られれば最大375千トン (貯留面積: 25万m²、高さ3m、雪の比重: 0.5) の輸出向けの雪が貯留できる。雪の集荷に関しては都市部で除雪した雪を対象とする。同発電所は人口41万人の富山県の県庁所在地・中核市である富山市の港湾部に位置しており、富山市中心部の富山市役所への距離も13kmで除雪作業対象となる都市部に近く除雪された雪を輸出用に同発電所の貯留地に輸送するのも容易である。また雪の輸送費に関しては富山市が道幅6m以上の市道を中心に機械除雪⁹⁾を行う予算を毎年計上している。除雪作業により溜まった雪は適宜、1級河川の河川敷に輸送貯留して融雪する為、雪の貯留先を1級河川の河川敷から同発電所に変更することにより域内輸送コストを低く抑えることも検討可能である。

4. 雪の輸送方法と輸送中の融解量

(1) 雪輸送に使用する船舶

雪の北半球の富山新港火力発電所から東南アジア、南半球への輸送には富山新港に平均月 3 回寄港しているパナマックスサイズの石炭船（石炭積載量：8 2 0 0 0 トン）を使用する。その一般的な内部構造を図 5 に示す。貨物室の材質は鉄で上部に傾斜をつけたトップサイドタンクという三角形のバラストタンク（船を安定させるための海水＝バラスト水を入れるタンク）があり、貨物や船の偏りを防止している。貨物室の下部は両サイドに傾斜をつけたホッパー形状とし、貨物が隅に溜まって荷役効率率が下がるのを防ぐ工夫がなされている。一般的にパナマックス以上のサイズの船にはクレーンが装備はなく貨物室の上部のハッチカバーの開閉により荷役を行う。1 ハッチの貨物室のサイズは縦 2 0 m、横 2 0 m、高さ 1 0 m である為、4 0 0 0 m³の雪が積載可能である。一般的に除雪処理後の雪の密度として用いられる雪密度 0. 7 5 を用いると 1 ハッチあたり最大 3 0 0 0 トンの雪が積載できる。現状の貿易バランスでは石炭船は石炭を日本に輸送する為の片道利用の船であり、帰りの貨物室は空である。従来から有用なバックカーゴの探索、検討がなされているが、これまで恒常的に積載できる有望な貨物は見つかっていない。本研究では有効利用されていない石炭船のバックカーゴとしての雪に着目している。

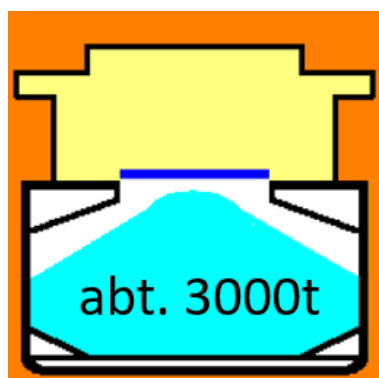


図-5 石炭船の内部構造

(2) 雪輸送の航路

本研究では石炭船のバックカーゴとして雪を東南アジア、或いは北半球に輸送して夏季の冷熱利用を目的とする為、雪の輸出先としては富山新港火力発電所への石炭積出港付近の冷熱需要が大きくパナマックスの石炭船が寄港できる大都市を想定している。図 6 の 2 0 1 1 年の一般炭の荷動き¹⁰⁾ が示すように日本が輸入する一般炭の大部分がインドネシアのカリマンタン島とスマトラ島、及び豪州東海岸のクイーンズランド州とニューサウスウェールズ州から輸出されている。これより、石炭船の航路上でデビエーションを最小限に抑えて、かつインドネシアと豪州で冷熱需要が大きくパナマックスの石炭船が寄港できる大都市としてジ

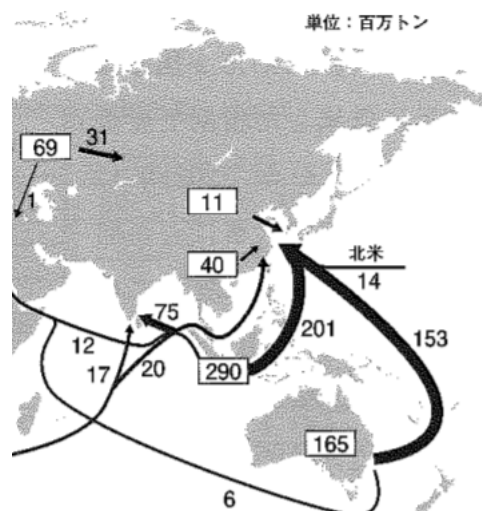


図-6 2011年の一般炭の荷動き

ャカルタ、並びにシドニーを雪の荷揚港として検討する。通常のインドネシアからの石炭の輸送機関は 7 日間、豪州からの輸送期間は 1 4 日間なのでバックカーゴとしての雪の輸送期間に関してもジャカルタ向けは 7 日間、シドニー向けは 1 4 日間とする。富山新港からジャカルタ、シドニーへの航路と北半球が冬である 2 月の航路上の海水温¹¹⁾ を図 7 に示す。航路上の海水温は日本付近で 3 ~ 1 0 °C、南に下るとともに赤道直

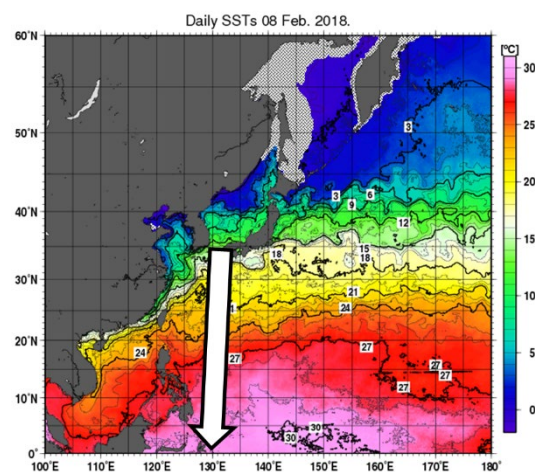


図-7 航路と海水温分布（北半球冬季）

下で最高 3 0 °C にも達する為、輸送中の雪が融解して輸送量が減少する。雪の融解による輸送ロス的大小は本研究の経済性評価に大きく関係するパラメーターである為、予め定量的に推測する必要がある。

(3) 雪輸送中の融解量

雪の融解挙動に関しては参考にできる報告例がない。コンピューターシミュレーションによる予測値に関する

報告はあるが、誤差が実測値と大きく異なることが問題視¹²⁾されている。かかる中、本研究では実際に石炭船の貨物室と同じ材質で雪輸送に使用する貨物室のモデル装置を製作して実験を行い、実際の石炭船による海上輸送における雪の融解量を定量的に予測することとした。

a) 実験装置

雪の石炭船による海上輸送中の雪の融解量を推測する為に製作した実験装置を図8に、実験中の様子を図9に示す。



図-8 雪の融解量を測定する実験装置



図-9 雪の融解量を測定中の実験装置（内部）

鉄板製の実験装置は一辺が20cmの立方体で鉄板の厚さは0.5cmとし、鉄板の側面に貼ってある白色のシールは温度計(鉄板の表面温度を計測するため)が正確に計測するためのマーカーである。雪は冬季に本研究室周辺で収集したものを利用した。石炭船の貨物室は、トップサイドタンクとバラスタンクによる空気の層に囲まれており、底部には排水機能が備えられている。雪が融けた水を装置の中に放置したままにしておくと鉄板と雪との接

触面に水が入り込み、鉄からの熱が伝わり易くなり、実際のデータに誤差が生じる可能性がある為、実験装置にも底部に水を抜く穴設けた。雪が融けた量の計測は水抜き穴から出てきた水の量を計測した。本実験では外気温の管理が重要となるため、厳密な温度管理ができる実験室を使用した。実験変数は室温、雪重量とし、室温変数は10℃・20℃・30℃の3種類、雪の重量変数は100g、200g、500g、1000gの4種類とし、実験は各3回実施してその融解完了時間（分）の平均値を計測結果とした。

b) 実験結果

図10に室温20℃で100g、200g、500g、1000gの4種類の雪が融け切る時間を計測した結果を示す。

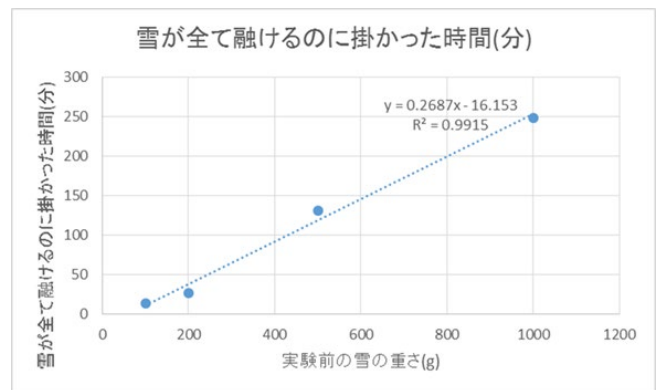


図-10 室温20℃における雪の融解挙動

雪の融解量（x）と時間（y）に線形相関がみられたことから一次近似したところ良好な相関性（ $R^2 = 0.9915$ ）を示す以下の近似式が得られた。

$$y \text{ (分)} = 0.2687x \text{ (g)} - 16.153$$

$$x \text{ (g)} = 3.7216y \text{ (分)} + 60.115$$

$$\Rightarrow X \text{ (トン)} \div 0.005367Y \text{ (日)} \quad (1)$$

次に表2に室温を10℃、20℃、30℃と変化させてそれぞれで200gの雪が融解する時間を計測した結果を示す。

表-2 対象発電所の雪輸送に必要な条件の調査結果

	10℃	20℃	30℃
雪200gが融解する時間(分)	82	27	15

表2の結果より、予想通り雪は温度が高いほど短い時間で融解することが分かった。その速度に関して本実験での融解速度は室温のみに関係し、測定対象サンプルの雪の重さに関係しないと仮定した。即ち前述の実験室温である20℃を基準とすると10℃では0.33倍、30℃では1.80倍融けやすいと推測できた。前述の計算式(1)と本結果より、輸送期間中の雪の融解量の雪の輸送量全体に対する融解損失率は、以下の式で表すことができる。

$$R = 0.005367(0.33T_1 + T_2 + 1.80T_3) / Q * 1000000 \quad (2)$$

R : 雪の輸送中の融解損失率 (ppm)

T1 : 海水温10℃の航海日数 (日)

T2 : 海水温20℃の航海日数 (日)

T3 : 海水温30℃の航海日数 (日)

Q : 雪の輸送量 (トン)

計算式(2)に前述で設定した本研究の前提条件である富山新港からジャカルタまでの輸送日数の7日、及びシドニーまでの輸送日数14日と石炭船1ハッチ当たりの積載量3000トンを代入して雪輸送の融解損失率を計算した結果を表3に示す。

表3 雪輸送の融解損失率

雪の融解損失率		
富山新港	— ジャカルタ	4.13～22.54ppm
富山新港	— シドニー	8.27～45.08ppm

表3で得られた融解損失率より、本研究が対象とする雪輸送における融解損失は富山新港 - ジャカルタで4.13～22.54ppm (1ハッチの融解量: 0.012～0.068トン)、富山新港 - シドニーで8.27～45.08ppm (1ハッチの融解量: 0.025～0.135トン) となり、北半球まで輸送しても石炭船の1ハッチの積載量0.01%にも満たないと推測できることが分かった。以上より、本研究における輸送中の雪の融解損失は経済的に考慮する必要がない程、少量であること、その為、雪の輸送に当たって石炭船に特別な設備投資が必要ないという重要な知見を得ることができた。

5. 結論

本研究では「国際貿易理論による雪エネルギー有効利用に関する研究」におけるバリューチェーンの5つの要

素の内、1～3の要素に関して調査、研究を実施した。

1つ目の要素である降雪地区に関しては日本で雪が大量に降り積もる地域として政府が指定する豪雪地帯と特別豪雪地帯と設定し、2つ目の要素である積出港に関しては必要と思われる3つの条件、即ち①定期的に石炭船が寄港する。②積出港付近に雪を貯留できるスペースがある。③除雪作業による雪が入手しやすい。を豪雪地帯と特別豪雪地帯に立地する6つの石炭火力発電所を比較検討した結果、北陸電力の富山新港火力発電所が積出港として最も適切であることを見出した。加えて3つ目のバリューチェーンの要素である輸送船は雪の状態を可能な限り保ったまま、揚陸港まで届けるために必要な情報である雪の融解量を推測する実験設備を製作して実際に雪の融解実験を行い、実測値から予測される雪輸送中の融解損失率を推測する計算式を導いた。今回得られた計算式に関してはサンプル量をスケールアップしてその精度を更に向上させる必要性はあるが、導き出された計算式より、富山新港から東南アジアのジャカルタ、並びに富山新港から北半球のシドニーまでの雪の輸送損失がシドニーまで運んでも石炭船の1ハッチの積載量0.01%にも満たないと推測されることが明らかになった。これにより最高30℃にもなる海水温の海域を輸送するにも関わらず、雪の輸送中の損失は経済的に考慮する必要がないほど少量であること、その為、使用予定の石炭船に雪の融解量を減少させるために特別な設備投資が必要ないことが分かった。

今後は、既に実施済の現地調査結果に基づいてジャカルタ、及びシドニーの陸揚港として適正と経済合理性がある実際の荷役方法に関して更なる調査・考察を行うとともに両港での雪の冷熱利用方法に関する事業性評価を行い雪の収集から輸出、輸送、輸入、利用までの雪エネルギー利用の総合的バリューチェーン全体の経済性を明らかにして、その優位性・事業性を提言したい。提言に当たっては雪資源の有効利用が未利用の再生可能エネルギーの利用であり、温室効果ガスの削減に寄与するものであるため、炭素税や排出権取引などの環境価値も輸出国や輸入国の政策に沿って研究し、石炭・石油・天然ガスなどの一般的な既存化石エネルギーを使用した従来の冷熱利用施設と比較する。

謝辞: 本研究は平成28年度科学研究費助成事業挑戦萌芽(1602-16K12652-0001)採択研究)に採択頂き実施できたことに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Kenji, Matsubayashi, "Feasibility Study on a Regional Carbon Trading System between China and Japan", Tsinghua University MBA Thesis, pp25-35, 2010.

- [2] 札幌市札幌市環境局環境都市推進部環境エネルギー課,『雪氷熱利用の導入事例』,2016.
- [3] 能登文敏,『雪をエネルギーに変える--雪を利用した温度差発電システム(自然エネルギー-最前線<特集>)』,日本の科学と技術 27(239), pp62-67, 1986.
- [4] 鈴木暁,『国際物流の理論と実務』, pp77-95, 2017.
- [5] 牛場五郎,「洞爺湖サミット国際メディアセンターの雪冷房システム」, 建築設備士, pp23-26, 2009.
- [6] 国土交通省国土政策局地方振興課 豪雪地帯担当,『豪雪地帯対策の推進』, 2020, (2020 年 12 月 03 日取得, https://www.mlit.go.jp/kokudosei-saku/chisei/crd_chisei_tk_000010.html).
- [7] 国土交通省 国土政策局,『豪雪地帯対策における施策の実施状況等』, 2019.
- [8] 資源エネルギー庁,『石炭火力発電所一覧』, 2020. (2020 年 12 月 03 日取得, https://www.meti.go.jp/shin-gikai/enecho/denryoku_gas/den-ryoku_gas/pdf/026_s01_00.pdf).
- [9] 富山市,『地域ぐるみの除排雪にご協力をお願いします』, 広報とやま 11 月号, 2017.
- [10] 池田陽彦,『東南アジア地域における洋上貯炭・混炭施設としてのメガフロート活用可能性基礎調査』, ジェトロ・シンガポール事務所船舶部, 2013.
- [11] 気象庁,『北西太平洋 日別海面水温』, 2020, (2020 年 12 月 03 日取得, https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/sst_wnp.html).
- [12] 橋爪健一,「空気中に置かれた垂直氷層の自然対流による融解」, 広島工業大学紀要研究編, 44, pp.25-30, 2010.

2020年?月?日 受稿

2020年?月?日 受理

STUDY ON EFFECTIVE USE OF SNOW ENERGY BASED ON INTERNATIONAL TRADE THEORY

Kenji Matsubayashi, Yudai Matsuda

A large amount of snow accumulates in winter, mainly on the Sea of Japan side in northern Japan. It is expected that a method for effectively using the snow as a resource will be established as part of regional revitalization. Until now, research has been conducted mainly by local governments or researchers in snowy areas to utilize the cold heat of snow, but there are few cases where it has remained at the test level and has reached practical use on a large scale. Under these circumstances, the presenter has found a way to close the output gap by applying international trade theory, and in this research, we will apply these results to snow exports. This time, based on the field survey, we will select the most suitable snow resource supplier, loading port, marine transportation method (ship type, transportation scale, transportation loss countermeasures, etc.) on the Japanese side, unloading port of demand area, and snow resource user. We will report on the results obtained regarding the feasibility of building a comprehensive value chain by implementing it from an objective and economic perspective.