

雪貯蔵庫に蓄えられた冷熱量に関する実験的研究

野田 英彦*・河村 一郎**

Experimental Study on the Amount of Cold Heat Stored in the Snow Storehouse

Hidehiko NODA* and Ichiro KAWAMURA**

Abstract

Study on the amount of cold heat stored in the snow storehouse and the heat transfer to the ambient are conducted experimentally, using the snow storehouse of Shinjo Kamuro Industrial high school. The results show that the amount of the stored snow may be estimated by assuming the density of the snow 0.613 kg/m^3 . And it is shown that the most of heat flows from the surrounding soil and the ambient air transferred by the heat radiation. So, the surface of the inside wall of the house would be coated by the low emissive materials.

Key words: snow storehouse, cold heat, natural energy, heat loss, thermal conductivity, snow density

1. 緒 言

近年化石燃料の消費に伴う二酸化炭素排出による環境問題が深刻になっており、環境負荷が小さく、クリーンなエネルギーである新エネルギーへの期待が高まっている。新エネルギーには、主に太陽光発電や風力発電などがあるが、最近になり雪氷冷熱エネルギーも新エネルギーの指定を受けた。雪氷を利用した空調システムは、地球温暖化ガスを排出しないので環境保全に有効であること、従来の空調機に比べ湿度が高いことなどの特長がある。しかし、今後普及を進めるためには、現在割高となっている初期投資額の低減が不可欠となっている。

本研究では新庄神室産業高校の雪貯蔵庫を利用して、蓄冷熱量の予測、および周囲への熱移動現象について検討し、経済性の高い雪貯蔵庫の設計基準を導出することを目的としている。

2. 新庄神室産業高校への雪貯蔵庫設置の背景

新庄神室産業高等学校は、山形県の最北にある最上地域に位置し、農業学科と工業学科が併設された新しいタイプの専門高校として平成15年度に開校された。新庄神室産業高校に雪貯蔵庫を設置することになった背景を、Fig. 1に示す。最上地域は、県内有数の豪雪地帯として有名であるが、豪雪を逆に自然エネルギーとし

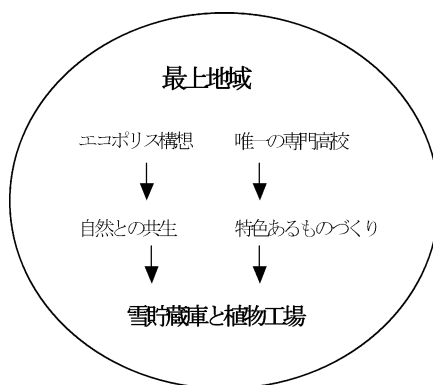


Fig. 1 雪貯蔵庫設置の背景

平成16年12月17日受理

* 大学院工学研究科機械システム工学専攻・教授

** 山形県立新庄神室産業高校・教諭

て利用し、「自然との共生」を目指した街作り(最上エコポリス構想)を進めている地域として注目されている。このような地域で開校した新庄神室産業高校は、最上地域の唯一の専門高校として、特色あるものづくりを目指して、植物工場による、農産物生産の研究を開始した。

植物工場とは外部から遮断された環境で、その土地の季節や気候に左右されずに植物を生産するための工場であり、工業技術と農業技術が融合されたものである。植物工場の人工光源には、ナトリウムランプを用いているが、大量の熱を放出することから、空調設備が必要となる。これからの専門高校での「ものづくり」においては、地球温暖化などの世界規模の環境問題への配慮や、地球に優しい自然エネルギーの有効な活用法について学ぶことも必要である。そこで、植物工場の空調用冷熱源として、地域に大量に存在する雪を貯蔵し、季節間蓄熱することとした。雪貯蔵庫と植物工場の連携を教材化する事ができれば、他の専門高校にはない新庄神室産業高校を象徴する設備となるだけでなく、今後の最上地域の産業を支える人材育成を目指し、地域に根ざした教育を行うことができると考えられる。

3. 雪貯蔵庫の構造および物性

実験に用いた雪貯蔵庫を Fig. 2 に示す。庫内の大きさは、地上高さ 2 m、地下 3 m、奥行き 9 m、幅約 7 m であり、庫内容積 196 m^3 の半地下設置型である。また、雪入れ、あるいは内部観

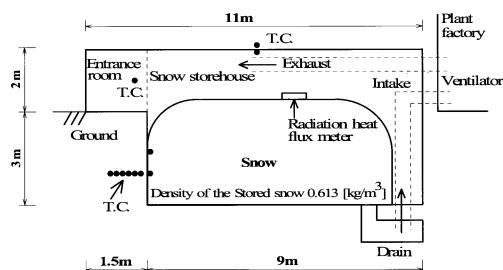


Fig. 2 雪貯蔵庫

察のための前室も設置している。貯蔵した雪と熱交換して得られる冷たい空気は、隣接する植物工場の空調用空気として利用され、温まった空気が庫内に戻り、循環が形成される。融解した雪は、排水口より排水ポンプで外部へ排水される構造になっている。

雪貯蔵庫建設時の状況を Fig. 3 に示す。床や壁は、厚さ方向に 250 mm の鉄筋コンクリート、50 mm の断熱用スタイロフォーム、200 mm の鉄筋コンクリートの 3 層構造で形成されている。庫内表面はコンクリートが露出している状態であり、コンクリート表面の赤外線放射率を、放射率計で計測した結果、0.93 であった。

周囲土壤への熱移動を評価するために、Fig. 4 に示すように、建設途中に土壌サンプリングを行った。また、後述するように、周囲土壤の熱伝導率を計測した。



Fig. 3 雪貯蔵庫建設時の状況



Fig. 4 土壌サンプリング

周囲土壌の温度経時変化測定用熱電対を Fig. 5 に示す。前室の地表下 1.8 m の深さに、貯蔵庫外壁から 200 mm おきに 6 本のシース型 K 熱電対を設置した。庫内壁表面、外壁表面、前



Fig. 5 前室地中の熱電対



Fig. 6 放射センサー



Fig. 7 貯雪

室内にも、それぞれ温度経時変化測定用 J 型熱電対を設置し、温度の経時変化を計測した。さらに、Fig. 6 に示すように雪表面に放射熱流束センサーを設置し、雪と庫内壁の放射伝熱量を計測した。

雪貯蔵時の様子を Fig. 7 に示す。雪は、雪密度が高い 2 月下旬に、貯蔵庫前室から除雪機で投入し、庫内に隙間無く天井まで貯蔵した。雪投入後に庫内でサンプリング計測した雪密度は 610 kg/m^3 であった。庫内容積が 196 m^3 であるので、120 ton の雪を貯蔵したことになる。

4. 周囲土壌の熱伝導率

貯蔵庫周りの土壌の熱伝導率を測定するために、貯蔵庫建設時に深さごとに周囲の土壌をサンプリングした。代表的なサンプル土壌を Fig. 8 に示す。土壌は水分を含んでいる。そこで、サンプルの水分率を計測するために、土壌を乾燥機で乾燥した。乾燥状態の代表的なサンプル土壌を Fig. 9 に示す。

乾燥前後の重量から算出した土壌の水分率を Table 1 に示す。計 19 箇所からサンプリングを行い、水分率を計測した結果、水分率の平均値は 26% であった。



Fig. 8 採取時のサンプル土壌



Fig. 9 乾燥後のサンプル土壌

サンプル土壌の熱伝導率 λ を, Fig. 10 に示す実験装置を用いて, 定常法で測定した。実験は乾燥した土壌に蒸留水を加えることで水分率を変化させ, シリコンヒーターの加熱量一定で加熱し, 各部の温度差が一定となった準定常状態の土壌上下面の温度差 $\Delta\theta$ と, その時の熱流束センサー値 q から, 次式で算出した。

$$\lambda = q \frac{t}{\Delta\theta} \quad (1)$$

ここで, t は土壌厚さであり, ノギスを用いて土壌上下面を圧迫する板の間隔を計測して与えた。

代表的な3種類の土壌サンプルの熱伝導率に

Table 1 サンプル土壌の水分率

採取位置	重量(水分含) [g]	重量(乾燥時) [g]	水分量 [g]	体積 [cm ³]	水分率 [%]
雪室底土(植物工場側) 1	200.25	161.32	38.93	51	19.4
雪室底土(植物工場側) 2	198.91	150.94	47.97	65	24.1
雪室底土(入口側) 1	158.61	135.87	22.74	60	14.3
雪室底土(入口側) 2	167.82	145.77	22.05	64	13.1
センサ上方部 1	165.4	125.44	39.96	57	24.2
センサ上方部 2	133.08	103.03	30.05	41	22.6
センサ上方部 3	169.97	127.23	42.74	49	25.1
雪室右上方部 1	154.44	121.54	32.9	50	21.3
雪室右上方部 2	187.72	144.7	43.02	60	22.9
地下 1.8 m 壁より 0.2 m	151.24	100.49	50.75	43	33.6
地下 1.8 m 壁より 0.3 m	141.39	84.2	57.19	33	40.4
地下 1.8 m 壁より 0.4 m	111.19	84.31	26.88	35	24.2
地下 1.8 m 壁より 0.5 m	215.06	162.31	52.75	69	24.5
地下 1.8 m 壁より 0.6 m	186.56	122.15	64.41	55	34.5
地下 1.8 m 壁より 0.7 m	308.81	229.87	78.94	87	25.6
地下 1.8 m 壁より 0.8 m	171.07	107.08	63.99	47	37.4
地下 1.8 m 壁より 1 m	200.7	159.94	40.76	66	20.3
地下 1.8 m 壁より 2 m(1)	142.11	96.95	45.16	42	31.8
地下 1.8 m 壁より 2 m(2)	172.76	115.51	57.25	48	33.1

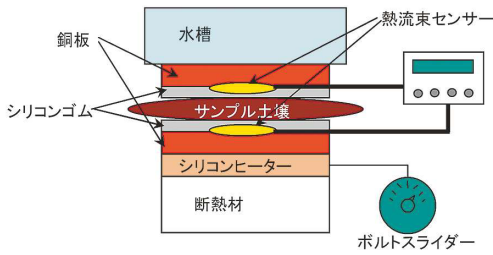


Fig. 10 熱伝導率測定装置

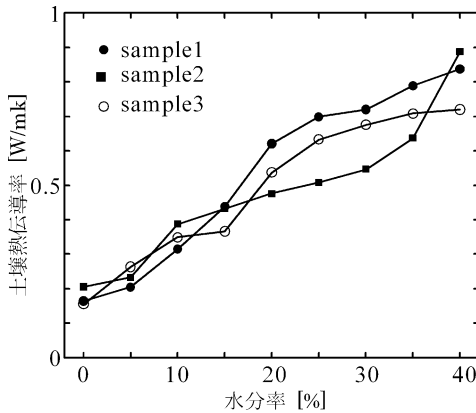


Fig. 11 土壌の熱伝導率に及ぼす水分率の影響

及ぼす水分率の影響を Fig. 11 に示す。土壌は乾燥時には粉末状になっているので、空気を多く含み、熱伝導率は 0.2 W/mK となる。水分率が上昇するとともに、熱伝導率も上昇し、水分率 25% では $0.5 \sim 0.7 \text{ W/mK}$ であった。サンプルによる熱伝導率の違いは土壌粉末の粒径および形状の違いによると考えている。貯蔵庫周囲は常に湿っていると考えられ、サンプル土壌の水分率が 20% から 30% であることを考慮すると、貯蔵庫周囲の土の熱伝導率は 0.6 W/mK であろうと推測できる。

5. 融雪状況と蓄冷熱量

毎月の融雪量を排水ポンプの稼働記録から算出し、Fig. 12 に示す。融雪量は外気温が上昇する夏季まで増加し、外気温に依存していることが分かる。総排水量は 120.108 m^3 であった。こ

の値はサンプル雪密度から推算される貯雪量 120 ton とほぼ同値であり、除雪機を用いた貯雪では、雪密度は 0.613 kg/m^3 になることが分かった。したがって、本貯蔵庫の蓄冷熱量は 40.27 GJ であった。

雪を2月下旬に投入して3ヶ月経過した5月30日の貯雪状況を前室より観察した結果を Fig. 13 に、6ヶ月経過した8月29日の貯雪状況を貯蔵庫内部より観測した結果を Fig. 14 に示す。当初の貯雪量 120 m^3 に対して、排水ポンプ稼働記録から算出される融雪量は、5月末までで 21.4 m^3 (全体の 17.5%)、8月末までで 80.3 m^3 (66.9%) であった。一方、貯雪されている雪の減少高さは、庫内高さ 5 m に対して、それぞれ 0.9 m (18%)、2.6 m (52%) であった。

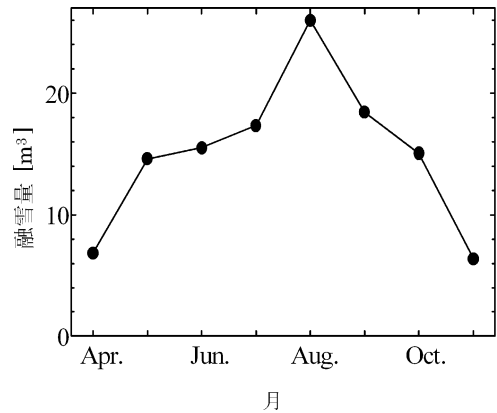


Fig. 12 融雪量

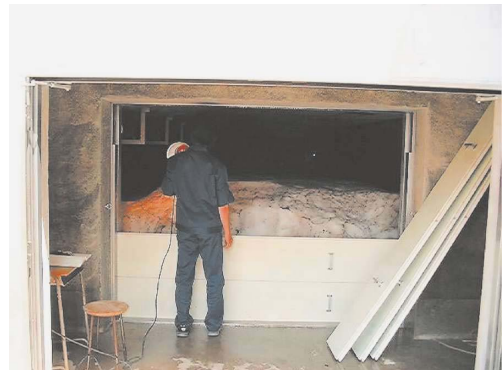


Fig. 13 貯雪状況 (5月30日)

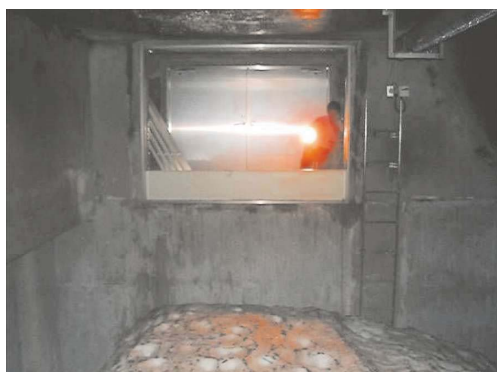


Fig. 14 貯雪状況 (8月29日)

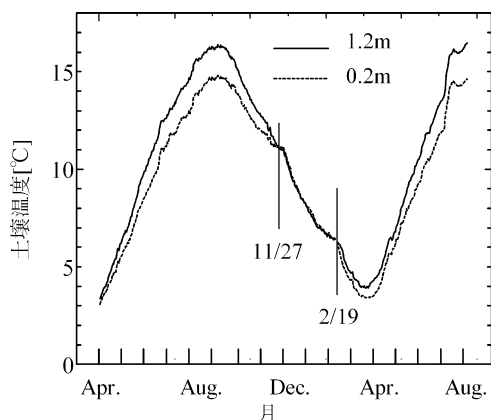


Fig. 15 周囲土壌の温度経時変化

このことから、貯雪された雪は、上部が融解し、側面の融解が少ないことが分かる。なお、この間、貯蔵庫の性能を検証するために、隣接植物工場への冷氣供給は行わなかった。

前室地下の土壌中の温度経時変化を Fig. 15 に示す。実線は貯蔵庫外壁から 1.2 m、破線は 0.2 m の位置の地中温度を示している。4 月はいずれも 3°C であったが、春から夏にかけて地中温度はいずれも上昇し、9 月には 16.3°C (1.2 m)、14.7°C (0.2 m) に到達し、その後温度低下している。また、庫内の雪が全て融解してしまった 11 月 27 日まで、貯蔵庫外壁から遠いところの温度が高く、貯蔵庫に土壌から熱が流入していることがわかる。

雪が無くなった 11 月 27 日から、再び貯雪し

た 2 月 19 日までは、土壌温度に差が無く、熱の流入流出が無いことが分かる。しかし、2 月 19 日から再び熱流入が開始している。

貯雪が無い期間の 1.2 m、0.2 m 位置の土壌温度が同じ温度であり、同じように温度低下していること、および、4 月に現れる土壌最低温度が、いずれも 4°C であることから、周囲土壌温度は 1 年で回復していることが分かる。

6. エネルギー収支

貯蔵庫の効果的断熱を施すには、庫内に流入する熱量を、熱移動形態、周囲環境に分けて考察することが必要である。そこで、貯蔵庫周囲のエネルギー収支を、貯蔵庫内壁の対流伝熱および放射伝熱について、地中部と地上部に分けて検討した。なお、地中部の熱流入量は、土壌熱伝導率を 0.6 W/mK とし、土壌の温度差から評価した。また、地上部の熱流入量は、貯蔵庫天井の内外壁に設置した熱電対の温度差から、コンクリートの熱伝導率を 1.2 W/mK⁽¹⁾ として評価した。一方、放射伝熱量は、コンクリート表面の放射率を 0.93、雪表面の放射率を 1 とし、形態係数を 1 として算出した。

貯蔵庫に流入する熱量の経時変化を Fig. 16 に示す。流入する熱量は春から夏にかけて増加し、7 月にピークを示した後、減少している。こ

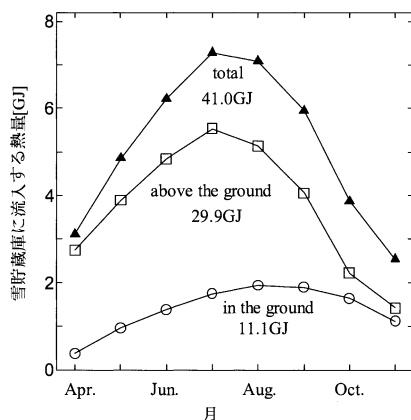


Fig. 16 熱流入量の経時変化

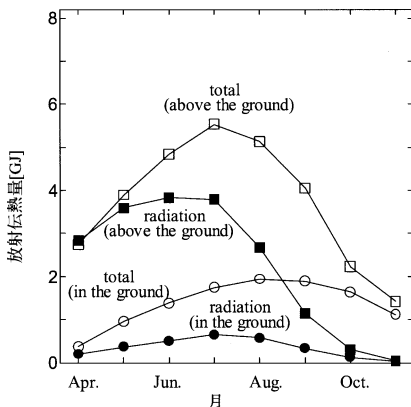


Fig. 17 放射伝熱量

これは、庫内温度がほぼ一定であるのに対して、周囲気温や降雨温度が季節によって異なることに起因している。

全期間を通して、地上部の熱流入量が、地中部より多い。4月から11月までの、地中部の流入熱量の積分値は 11.1 GJ、地上部の流入熱量の積分値は 29.9 GJ であり、全流入熱量の 70% 以上が地上部から流入していることがわかる。したがって、地上部の断熱を強化することによって、貯蔵した雪が有効利用できることが分かる。

放射伝熱による熱流入量を Fig. 17 に示す。雪が多く残っている 8 月までは、雪の表面積が大きいので、流入熱量は放射伝熱が主となる。4月から11月までの放射伝熱による熱流入量の積分値は、地中部側壁から 2.8 GJ、地上部から 18.2 GJ である。したがって、地上部の放射伝熱に対処することが熱損失に対して有効であることが分かる。地上部に着目すると、貯雪量の減

少とともに、放射伝熱の全熱流入量に対する割合が減少している。対流熱伝達で流入する熱量は、天井付近の空気加熱に用いられると推察され、放射伝熱による熱流入が、融雪に対して支配的であると推察できる。したがって、雪貯蔵庫の地上部表面に放射率の小さい物質で塗布あるいは貼り付けることによって、効果的断熱を行えると推察できる。

7. 結 言

雪氷エネルギーを季節間蓄熱するための効果的断熱手法解明を目的に、新庄神室産業高校に設置された雪貯蔵庫を用いて、周囲からの熱移動に関する検討を行った。その結果以下の事柄が判明した。

- (1) 除雪機を用いた貯雪時の雪の密度は 610 kg/m^3 である。
- (2) 雪貯蔵庫周囲の土壤の熱伝導率は、水分率 25% とすると、 0.6 W/mK である。
- (3) 雪貯蔵庫に流入する熱量の 70% 以上が地上部から流入し、その多くが放射伝熱による。したがって、地上部からの放射伝熱に対処することで、貯蔵した雪を有効利用できる。

文 献

- (1) 日本機械学会編：伝熱工学資料（改訂第 4 版），p. 322，1986 年，丸善