

論文

貯雪用断熱被覆材としての籾殻の伝熱過程 第1報：露天雪保存実験および物性測定

上村靖司¹⁾，庄山武志²⁾，星野真吾²⁾

要 旨

低コストで雪を長期貯蔵できる技術として雪山が有望視されている。本論文では、籾殻について、露天での雪保存実験および実験室における物性測定から、その断熱被覆材としての熱特性の定量的把握を試みた。450 tの雪山による露天での雪保存実験の結果、平均の雪山高さの減少率は、15 cm被覆部で 1.5 cm d^{-1} 、30 cm被覆部で 1.2 cm d^{-1} 、夏季日中でも 2.0 cm d^{-1} 程度と良好な保存性を示した。また雪山高さの減少は、積算気温と良い直線関係があることがわかった。室内実験から、籾殻の乾燥密度 104 kg m^{-3} 、飽和含水密度（含水比 0.54） 226 kg m^{-3} が得られた。熱伝導率は乾燥状態で $0.215 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、飽和含水状態では $0.309 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であり、その間は含水比に比例して増加した。籾殻層に雨を模擬する散水をした結果、籾殻の撥水性により上部に滞留した後、層内に水みちを形成して一気に流下した。そのため、表層・下層および中間層の水みち部以外では、乾燥状態を保つ様子が見られた。上部・底部吸水層および水みち部をモデル化し、全層の平均熱伝導率を計算したところ、籾殻層厚さが 20 cm 以上になると変化が小さくなり、30 cm を越えると $0.23 \sim 0.24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ とほぼ一定値となることがわかった。

キーワード：雪山，籾殻，物性測定，雪保存，長期蓄熱

Key words: snow pile, rice husk, property measurement, snow storage, long-term thermal storage

1. はじめに

雪氷冷熱エネルギーが 2002 年 1 月に新エネ法（電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法）で定められる新エネルギーに追加されたことを受け、雪を冷房や冷蔵に利用する施設の導入またはその検討が本格化している（北海道経済産業局，2005）。

雪氷冷熱を利用することは、冬期の自然の降雪（あるいは寒さ）によって供給される負のエネルギー（常温を基準として見た場合）をそれ以外の季節に利用することであり、雪氷そのものを蓄熱体とする長期蓄熱の一形態といえる。従って供給

と需要の時間差を埋める必要があり、これが雪氷貯蔵ということになる。

雪氷貯蔵の形態は、大きく ① 専用雪（または氷）貯蔵庫，② 簡易断熱露天保存に分けられる。一般に前者を雪室（または氷室），後者を雪山と呼ぶ。雪室は、断熱措置を施した専用倉庫であるから、その建設費が必要である。しかし一旦作ってしまえば、清掃等の維持費以外はほとんどかからないため、既に建設されている雪利用施設の大半はこの方式を採用している。一方雪山は、農産物倉庫そのものをすっぽりと雪で覆いその上に断熱被覆を施すもの、夏のイベント用に築造するもの、夏期需要量に対し容量が不足する雪室のバックアップとして、など限られたケースでの利用にとどまっている。

さて、古くから山の北側の斜面のほら穴に雪を

1) 長岡技術科学大学機械系
〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1
2) 長岡技術科学大学大学院工学研究科
〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1

入れ, わらをかけておくなどして広く雪の保存が行われており (池上, 1999), 日射と風を防ぎ所定の断熱効果のある素材を被せておくことで, 雪の長期保存が可能であることは知られていた. 1996 年に北海道沼田町で実施された実験によって, 数 10 cm の籾殻, あるいはバークチップを単に雪山上にのせるだけで, 高い保存性能を発揮することが示され, 「沼田式」と名付けられた (伊東ら, 2000). これまで, 日射, 風, 雨によりもち込まれる熱をいかに遮断するかが, 雪保存の断熱被覆に求められる要件であったが, 沼田式の登場はこれをくつがえし, 雨の浸透を許容しても, 必要量を初期に堆積させておけば問題がないことを実証した.

籾殻による断熱被覆について見ると, 対馬・谷井 (1994) の先行研究によって, 籾殻の熱伝導率は $0.2 \sim 0.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 程度で, 断熱材としてみたときそれほど性能の良いものではないことがわっている. そのため, 所定の断熱性能を確保するために厚さ h を大きくし h/λ (λ は熱伝導率) を高め, さらに日射, 風雨による入熱をシルバーシートで覆うことが多い. その場合, シートが太陽熱を吸収してシートと籾殻上面の温度が高くなり, 融雪を促進するという問題もあった.

夏季日中には日射だけで数 100 W m^{-2} もの入熱があるにも関わらず, シートをかけずに保存した場合でも, 雪山の融解速度から推定される入熱量はわずか $20 \sim 40 \text{ W m}^{-2}$ 程度である. その差の理由と伝熱過程の解明は, 必ずしも十分に進んでいるとは言いがたい.

本論文では, まず 2002 年に新潟県魚沼市で実施した露天雪保存実験の結果を述べ, 次に雪山被覆断熱材としての籾殻の諸物性の測定結果を述べる.

2. 露天雪保存実験

2.1 雪山施工および計測

2002 年 4 月から 9 月にかけて, 新潟県魚沼市 (旧小出町) において露天雪保存実験を行った. 雪山は, 図 1 に示すような, 底面の一辺が 20 m のピラミッド型とした (雪の平均密度を 500 kg m^{-3} とすると総量は 450 t). 底面の周囲には排水のための溝を掘った. ロータリ除雪車で雪を積み上げ

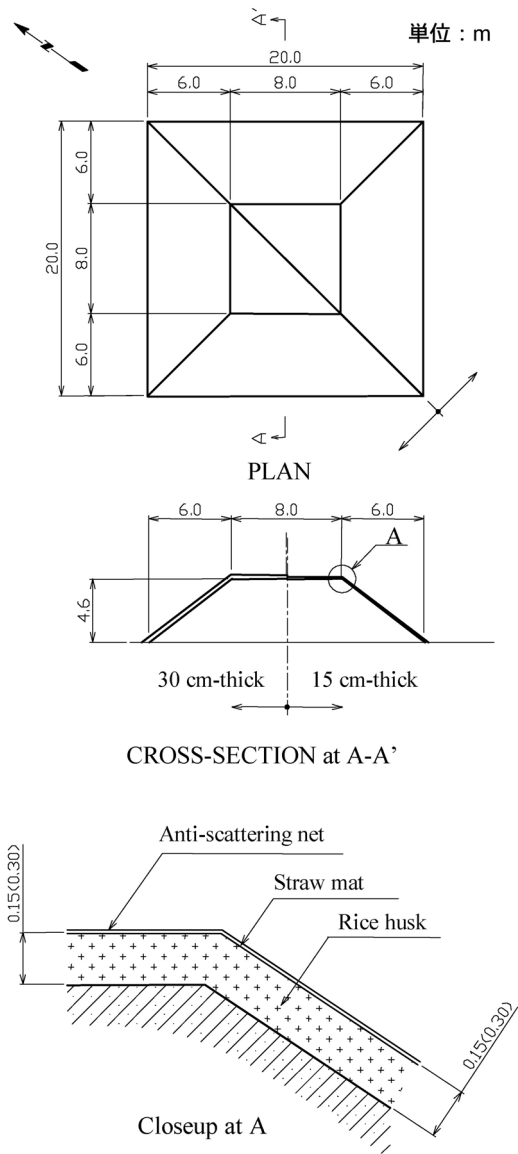


図 1 雪山外形.

バックホーで成形した後, 断熱材として籾殻を載せ, その上に飛散防止のためのゴザとネットを被せた. 籾殻被覆厚さは, 南北対角線東側を 15 cm, 西側を 30 cm とした.

計測項目を表 1 に示す. 雪山は, 週一回程度の頻度で高さ・形状を測定するとともに, 孔の発生, 被覆材 (籾殻) のはがれ・飛散などを観察し, 異常がある場合には随時修復した. 15 cm 被覆の内部に 2 箇所, 30 cm 被覆内部に 3 箇所, 熱電対

を設置し、連続的に籾殻層内部の温度を測定した。

2.2 気象条件と雪山の形状変化

最寄りの AMeDAS 観測地点 (小出) における実験期間中の降水量 P 、日平均気温 T_{avg} 、日最高気温 T_{max} を図 2 に示す。7、8 月のほとんどの日に最高気温が 30°C を超え、平均気温、日照時間共に、平年値 (1979~2000 年) より高かった。また、7、8 月の降水量は約 25 mm と平年より少なめであり、雪の保存期間中 (4 月 1 日~9 月 30 日) の総降水量は 833.5 mm であった。なお、籾殻を覆っていたゴザは、夏までに風化が進み、至る所が破れたが、飛散防止ネットによって籾殻の飛散が抑止できていたことから修復はしなかった。

雪山形状の変化を図 3 に示す。3 月 22 日に 4.5 m の高さで施工した雪山は、半年後の 8 月 25 日に約 3 m の高さ (被覆上部で計測) で残っていた。断熱被覆をはがした 9 月 30 日の時点での雪の高さは、15 cm 被覆部で約 2.7 m、30 cm 被覆部で約 3.1 m であった。

図 4 に被覆上部で計測した雪山頂部の高さの変化を示す。図より、猛暑となった 7、8 月に急速に

融解が進み、雪山高さが低くなったことがわかる。平均の雪山高さの減少率は被覆厚さ 15 cm の部分で 1.5 cm d^{-1} 、30 cm 厚さの部分で 1.2 cm d^{-1} であり、夏季日中でも 2.0 cm d^{-1} 程度と良好な保存性を示した。

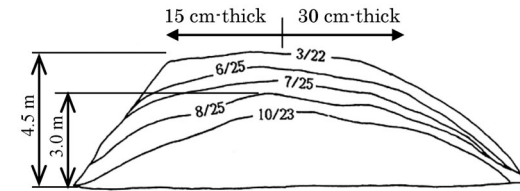
次に、横軸に積算気温 (日平均気温の積算値)、縦軸に雪山高さの減少 (初期高さと測定時高さの



(a) 2002年4月1日



(b) 2002年9月30日



(c) 測量結果

図 3 雪山形状の変化。

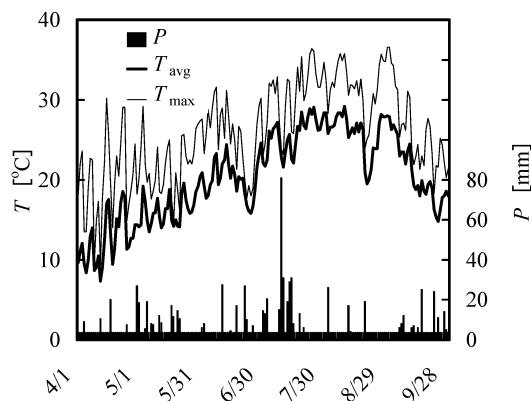


図 2 実験期間中の降水量と気温。

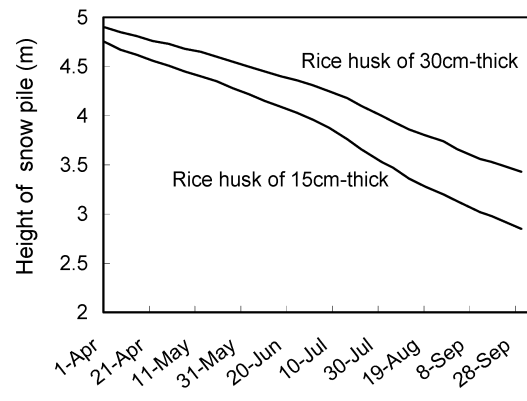


図 4 雪山頂部高さの変化 (被覆上端を計測)。

差)をとったグラフを図5に示す. また特徴的な4期間に分けて, 高さの減少率を検討した結果を表2に示す. 図5から, 雪山高さの減少は, 積算気温に良く比例していることがわかる. 表2に示すように, 1日当りの高さの減少率(MR)で見ると, 30 cm被覆で $0.7 \sim 1.2 \text{ cm d}^{-1}$, 15 cm被覆で $0.9 \sim 1.5 \text{ cm d}^{-1}$ であるのに対し, 気温 25°C 当りの高さ減少率(MT)で見ると, 30 cm被覆で $1.0 \sim 1.1 \text{ cm}/25^\circ\text{C}$, 15 cm被覆で $1.1 \sim 1.4 \text{ cm}/25^\circ\text{C}$ と, 変化の幅が小さい. 参考として, 同時期に飯山市で行った同様の実験(内田ら, 2002)でも, 30 cm被覆で $1.0 \text{ cm}/25^\circ\text{C}$ の結果が得られている.

この結果は, 同様の方法で雪山造成を予定する場合に, 計画地における気象庁平年値等の統計値があれば, 雪山高さの減少が容易に予測できることを示している. 例えば, 日平均気温 25°C の日には, 30 cm被覆なら 1.0 cm , 15 cm被覆なら 1.3 cm

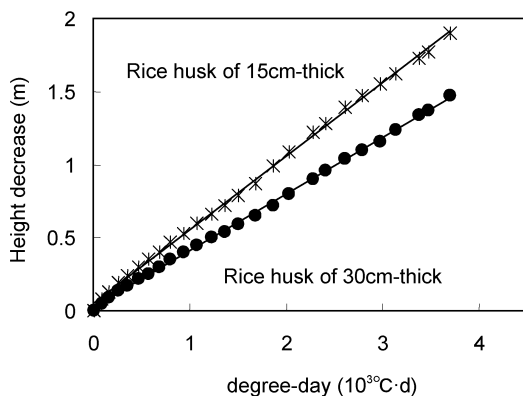


図5 積算気温と雪山高さ減少の関係.

表2 期間毎の雪山高さ減少率

期間	期間 積算 気温	籾殻30cm被覆			籾殻15cm被覆		
		HD	MR	MT	HD	MR	MT
4/1-7/16	1868	72	0.7	1.0	99	0.9	1.3
7/17-8/12	738	32	1.2	1.1	40	1.5	1.4
8/13-9/12	772	30	1.0	1.0	34	1.1	1.1
9/13-9/30	325	13	0.7	1.1	17	0.9	1.4
全期間	3703	147	0.8	1.0	190	1.0	1.3

HD: 雪山高さの減少 (cm/period)

MR: 1日当りの雪山高さ減少率 (cm/d)

MT: 期間積算気温当りの雪山高さ減少率 (cm/25°C)

だけ高さが低くなると見ればよい. また, 利用時期までの保存期間の積算気温を与えれば, 残存量が容易に推定でき, 設計計算がしやすい.

3. 籾殻の諸物性

籾殻の断熱被覆材としての特性を把握するため, 基本物性を実験室にて測定した結果を以下に示す.

3.1 密度, 含水比

籾殻は米を包む殻であり, 品種によってその形状は異なる. 新潟県での雪山保存を想定し, 最も一般的に栽培されるコシヒカリの籾殻について, 短径 a および長径 b を測定した(100粒の無作為抽出)結果, 図6のような分布が得られた. 平均するとそれぞれ $a=2.7 \text{ mm}$, $b=7.5 \text{ mm}$ であった.

籾殻は, 表面の細かい毛の効果による撥水性と, 水に浸すと相当量の水を吸うという吸水性を併せ持つ. 雪山の被覆材としての籾殻の性質を考える場合, この水分保持の状態が物性に大きく影響し, そしてその断熱材としての熱特性に大きく影響を与えられ.

乾燥状態から含水状態になると, 明らかに膨張して色合いが濃く変化する. 単に乾燥状態といっても, 周囲環境の温湿度によって湿気の吸収状態が変化することから, 40°C で5時間以上乾燥させた状態を基準とし, 乾燥状態と呼ぶことにした. また, 籾殻が最大限水分を保持した状態を, 飽和含水状態と呼ぶことにした. 実験では, 500 cm^3 の球形メッシュ容器に籾殻を入れ, それを水中に5時間保持して吸水させ, 水中から引き上げて3分間水切りした状態を飽和含水状態と呼ぶこととした. 以降は, 乾燥状態の物性には添え字 dry

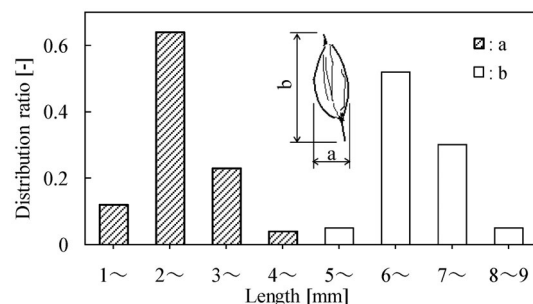


図6 籾殻の形状.

を, 飽和含水状態には添え字 sat を使う.

籾殻の主成分はセルロースである. 籾殻自体が多孔質である上, 米粒の入っていた空間が空孔を形成していることから, みかけの密度 (かさ密度: 空隙部分も含めた単位体積当たりの質量) は小さく, 新雪と同程度である. 実験室における 5 回の測定の平均値は, 乾燥状態で 104 kg m^{-3} , 飽和含水状態では 226 kg m^{-3} であった.

含水状態にある籾殻の, 含水の割合を表す指標として, 次式で表される含水比 γ を導入する.

$$\gamma = \frac{W - W_{\text{dry}}}{W} \quad (3)$$

ここで W は籾殻の質量である. 飽和含水時の含水比 (飽和含水比) は 0.54 (5 回の測定の平均) であった.

3.2 比熱, 熱伝導率

籾殻の比熱を混合法によって測定した. 質量 m_h , 温度 T_h の籾殻と質量 m_w , 温度 T_w の水を断熱保温容器の中で混合し, 平衡温度が T となった時, 籾殻の比熱 C_h は次式で求められる.

$$C_h = \frac{(T - T_w)m_w}{(T_h - T)m_h} \times C_w \quad (4)$$

ここで C_w は水の比熱 ($4.18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) である. 22°C の乾燥籾殻 20 g と 0°C の水 100 g を混合して比熱を測定した結果, 5 回の平均値で $C_h = 2.75 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ を得た.

籾殻は多孔質材料であるため, その隙間や内部に多量の空気を含んでいる. そのため, 籾殻内部での熱移動は, 籾殻同士での熱伝導だけではなく, 籾殻層内部の対流, 放射も同時に起こっているが, これらの成分の分離は困難であることから, 今回測定したのは層としての総括の熱伝導率である.

測定装置を図 7 に示す. 50 mm 厚さのポリスチレン板を積層した断熱容器の中央に籾殻を入れ, 上部に電熱線, 下部に 0°C の氷水を入れて温度勾配を与えた. 下部の籾殻と氷水の接する部分には 0.5 mm 厚さのアルミ板をおき, 籾殻を保持しつつ冷却できるようにした. 籾殻の上面と下面には

熱電対 (銅-コンスタンタン) をおいた. 測定開始から十分時間が経過し, 概ね上部が 40°C 程度で定常状態になった時の上面, 下面の温度 T_1, T_2 から, 次式により熱伝導率を求めた.

$$\lambda = \frac{qd}{A(T_1 - T_2)} \quad (5)$$

ここで q は電熱線出力 ($=1.47 \text{ W}$), d は籾殻厚さ ($=50 \text{ mm}$), A は伝熱面積 ($=100 \text{ cm}^2$) である. 籾殻の熱伝導率の含水比依存性を調べるために, 乾燥状態 ($\gamma=0$) と飽和含水状態 ($\gamma=0.54$) の籾殻を所定割合で混合し, 熱伝導率を測定した. 測定結果を図 8 に示す. 乾燥状態では $\lambda_{\text{dry}} = 0.215 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 飽和含水状態では $\lambda_{\text{sat}} = 0.309 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, その間は含水比に比例して熱伝導率が増加し, 次式で, 近似される.

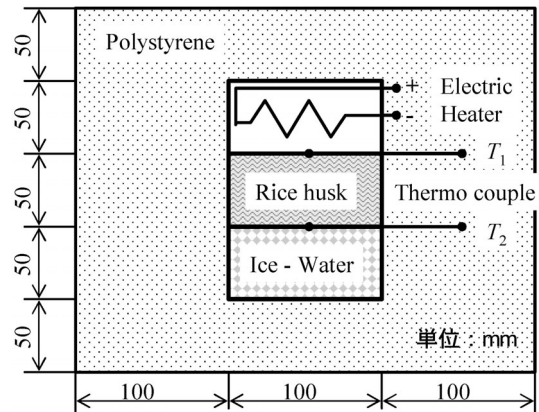


図 7 熱伝導率測定装置.

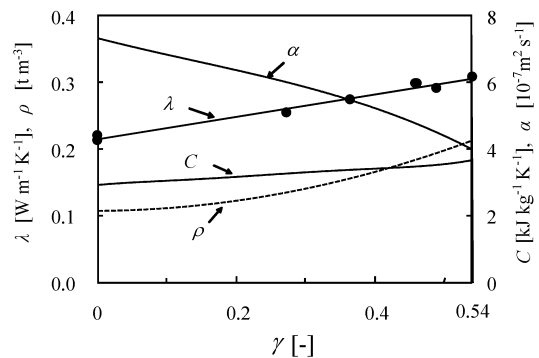


図 8 籾殻物性の含水率依存性.
 γ : 含水比, λ : 熱伝導率, ρ : 密度
 α : 熱拡散率, C : 比熱.

$$\lambda = 0.167\gamma + 0.215 \quad (6)$$

なお、この測定結果は、層内の対流、放射、水蒸気移動による熱移動も含めたものであり、方向依存性も想定されることから、(1) 上から下への熱移動、(2) 0 から 40℃ 程度の温度勾配を有する、(3) 全層の平均、という条件下での結果である。

3.3 物性値の含水比依存性

籾殻の諸物性は主として含水比 γ に依存すると考えられることから、上記の実験結果を踏まえ、密度 ρ 、比熱 C 、熱拡散率 α を含水比 γ の関数として以下のように整理した（添え字 w は水の物性を表す）。

密度： ρ

$$\rho = \left(\frac{1-\gamma}{\rho_{\text{dry}}} + \frac{\gamma}{\rho_w} \right)^{-1} \quad (7)$$

比熱： C

$$C = (1-\gamma)C_w + \gamma C_w \quad (8)$$

また、熱拡散率 $a (= \lambda / \rho C)$ は定義から、(5)、(7)、(8) 式より求められる。以上を図 8 に示す。図から、密度、比熱は含水比の増加に随って増加し、熱拡散率は減少することがわかる。

4. 籾殻層内の水分移動

4.1 籾殻層内への降雨の浸透

籾殻表面に水を散布して降雨を再現し、籾殻層内の水の流れを観察した。W 20 cm × H 20 cm × D 15 cm のアクリル製容器の底に吸水したスポンジを敷き、その上に所定厚さの籾殻を詰めた。噴霧器を用いて、5 分間に 2.5 ℓ の水を散布した時の籾殻断面の様子を図 9 に示す。上部に散水された水は、直後は籾殻の撥水性により滞留するが、次第に表層部分の籾殻に吸われ、ある瞬間層内部に水みちを形成し、底に向かい流下した。そして流下後、スポンジに吸収されるまでの間に底部の籾殻が吸収状態となった。

上部吸水層、底部吸水層ともにその厚さは 5 mm 程度であり、上部吸水層厚さは散水量を変化させてもほとんど違いがなかった。中間層の水平断面における水みち面積の割合は 7% であった。

前述の露天雪保存実験において、実験終了後に被覆をはがして観察すると、雪山表面に直径 1～15 cm の雪孔が多数できており、そのほとんどが地面に到達していた（図 10）。このことは、室内実験における中間層の水みち形成が、屋外でも同様に起きていることの裏づけであり、籾殻が露天で風雨に晒されていたにもかかわらず、その大部分が乾燥状態を保っていることの理由と考えられる。また、露天実験では籾殻層底部吸水層厚さは、5 cm 程度であり、室内実験の結果とは一致しなかった。

4.2 吸水形態を考慮した平均熱伝導率

籾殻層内の大半は空気であり、吸水状態の籾殻から乾燥状態の籾殻への物質移動も含めて、通気に伴う熱・物質移動が起こるし各粒間の放射伝熱も起きる。しかしここでは単に吸水状態と乾燥状

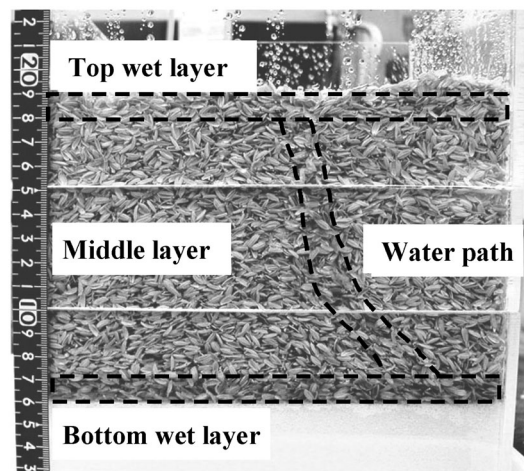


図 9 籾殻層内部に形成された水みち。



図 10 雪山に形成された穴。

態の籾殻の 2 種類の熱伝導体により構成されるものとして、図 11 (a) のようにモデル化した。これを図 11 (b) のように抵抗におきかえてモデル化すると、上層 t 、中層 m 、下層 b それぞれの熱伝導方程式は次のようになる。

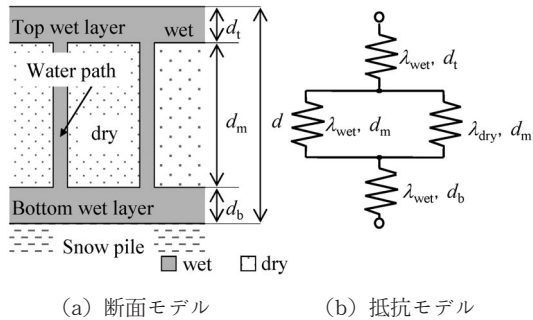
$$\begin{aligned} Q_t &= \frac{\lambda_{\text{wet}}}{d_t} \Delta T_t \\ Q_m &= (\sigma \lambda_{\text{wet}} + (1-\sigma) \lambda_{\text{dry}}) \frac{\Delta T_m}{d_m} \\ Q_b &= \frac{\lambda_{\text{wet}}}{d_b} \Delta T_b \end{aligned} \quad (8)$$

ここで $Q_t = Q_m = Q_b$ とし、全層の熱伝導方程式 $Q = \bar{\lambda} \Delta T / d$ との比較によって、全層平均熱伝導率は次のように得られる。

$$\bar{\lambda} = d \cdot \left(\frac{d_t + d_b}{\lambda_{\text{wet}}} + \frac{d_m}{\sigma \lambda_{\text{wet}} + (1-\sigma) \lambda_{\text{dry}}} \right)^{-1} \quad (9)$$

ここで d は籾殻全層厚さ、 d_t は：上部吸水層厚さ、 d_b は下部吸水層厚さ、 d_m は中間層厚さ、 σ は中間層の水みち面積割合を示している。

上部吸水層、下部吸水層の厚さ、中間層水みちの面積比を籾殻層の厚さによらず一定と仮定し、 σ は実験で得られた 0.07 を与えて、平均熱伝導率 $\bar{\lambda}$ を (9) 式で求めた結果を図 12 に示す。 $\bar{\lambda}$ は、籾殻層の厚さが 20 cm 以上になると変化が小さくなり、30 cm をこえとほとんど差がなくなる。その値は $0.23 \sim 0.24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ となることがわかった。



(a) 断面モデル (b) 抵抗モデル

図 11 吸水部を含む籾殻層の熱抵抗モデル。

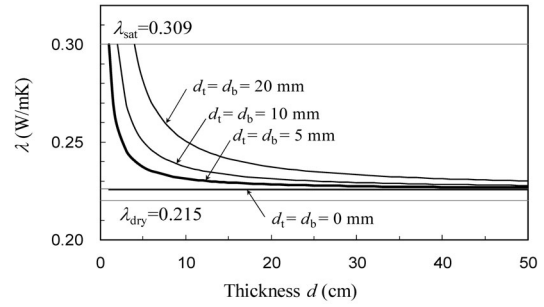


図 12 籾殻層厚さによる熱伝導率変化。

5. 結論

低コストで雪を長期貯蔵できる技術として雪山が有望視されている。本論文では、籾殻について、露天での雪保存実験および実験室における物性測定から、その断熱被覆材としての熱特性の定量的把握を試みた。

露天での雪保存実験の結果、平均の雪山高さの減少率は、15 cm 被覆部で 1.5 cm d^{-1} 、30 cm 被覆部で 1.2 cm d^{-1} 、夏季日中でも 2.0 cm d^{-1} 程度と良好な保存性を示した。また雪山高さの減少は、積算気温と良い直線関係があることがわかった。

室内での物性測定実験から、籾殻の乾燥密度 104 kg m^{-3} 、飽和含水密度 (含水比 0.54) 226 kg m^{-3} が得られた。熱伝導率は乾燥状態で $0.215 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、飽和含水状態では $0.309 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ あり、その間は含水比に比例して増加した。

籾殻層に雨を模擬する散水実験をした結果、籾殻の撥水性により上部に滞留した後、層内に水みちを形成して一気に流下した。そのため、表層・下層および中間層の水みち部以外では、乾燥状態を保つ様子が見られた。上部・底部吸水層および水みち部をモデル化し、全層の平均熱伝導率を計算したところ、籾殻層厚さが 20 cm 以上になると変化が小さくなり、30 cm を越えると $0.23 \sim 0.24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ とほぼ一定値となることがわかった。

以上、本報によって得られた籾殻の物性測定の結果だけでは、籾殻が雪山の断熱被覆材として優れる理由の説明には不十分である。そこで、第 2 報以降で表面熱収支に関する検討を行うこととする。

謝 辞

本研究は, J-POWER 電源開発株式会社との共同で行われたことを記し, 関係された各位に謝意を表します。

文 献

北海道経済産業局, 2005: 雪氷熱エネルギー活用事例集
3. 経済産業省北海道経済産業局資源エネルギー環境
部新エネルギー対策課, 4-6.
池上佳芳里, 1999: 北陸地方における雪室の分布とその

盛衰. 地理科学, **54**, 126-137.
伊東宏城・媚山政良・川本周郎・松居正道・佐藤龍
幸・岩腰壮康, 2000: 沼田式雪山貯蔵実験報告〜初か
ら, バーク材を被覆として使用した場合〜. 寒地技術
シンポジウム論文・報告集, **16**, 701-705.
対馬勝年・谷井文夫, 1994: 断熱材による雪山の融雪制
御. 日本雪工学会誌, **10**, 22-31.
内田郁男・中村洋一・杉山弘泰・上村靖司, 2002: 長野
県飯山市及び新潟県小出町におけるもみ殻及びおが
屑を利用した雪の夏季保存実験について. 寒地技術シ
ンポジウム論文・報告集, **18**, 801-807.

Heat transfer process of a rice husk layer as an insulation material for long-term snow storage Part 1 : Open air experiment and property measurements

Seiji KAMIMURA¹⁾, Takeshi SHOYAMA²⁾ and Shingo HOSHINO²⁾

1) Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188

2) Graduate school of Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188

Abstract: Storing snow piles using simple insulation in open air is an inexpensive long-term solution for thermal storage. Rice husk has been well known as a good insulation material for covering snow piles. In order to determine its insulation performance and mechanism, we performed an experiment on the storage of snow piles in open air and measured the properties of rice husk in the laboratory. We stacked 450 tons of snow in open air and covered the pile with a 15- or 30-cm-thick layer of rice husk. The average decrease in the height of the snow pile (HD) was 1.5 and 1.2 cm d⁻¹ for a 15-cm-thick and 30-cm-thick layer of rice husk, respectively. There is a proportional relationship between HD and degree-day (cumulative daily mean air-temperature).

The measurement of the properties of rice husk in the laboratory yielded the following results : the density of rice husk is 104 and 226 kg m⁻³ in dry and moist-saturated conditions, respectively. The thermal conductivity is 0.215 and 0.309 W m⁻¹ K⁻¹ in dry and moist-saturated conditions, respectively, and it proportionally increases with the percentage of water content. The rainfall simulation indicated a water absorption mechanism and the existence of the flow down process. After watering a rice husk layer, water accumulated on the top for a while, before flowing down to the bottom along the water flow path. Therefore, the layer remains dry even after heavy rain, except for the thin top and bottom layers and the water path. A complex wet and dry layer model of heat conduction was developed and the overall heat conductivity was simulated. It is demonstrated that if the rice husk thickness becomes more than 30 cm, the thermal conductivity becomes almost constant with a value of 0.23-0.24 W m⁻¹ K⁻¹.

(2007 年 6 月 8 日受付, 2007 年 11 月 11 日改稿受付, 2007 年 12 月 3 日最終改稿受付, 2007 年 12 月 4 日受理
討論期限 2008 年 7 月 15 日)