

断熱シート効果の机上計算検討

質問 1

断熱シート（ホームセンター等で売られている窓に貼り付ける”プチプチ状”タイプ）の断熱効果（断熱シートを貼る前後での室温比較）を机上計算で検討したいと思っています。厳冬期（北海道）における戸建住宅（木造2階建）を例として、以下の手順での計算は可能でしょうか。

<計算条件>

屋外気温（℃）と相対湿度（%）

-7℃、70%

室内温度（℃）

20℃

換気量（ m^3/h ）

30 m^3/h

熱源（ストーブ+床暖房、他）の出力（kW）

5kW

<計算手順>

1. 当該建物において、上記の初期条件で室内温度を保っていたとします。このときの、この建物全体での室内から屋外への熱貫流量（J）を算出します。
2. 上記の初期条件において、当該建物のガラス窓（LOW-E ガラス、等級★★★）の面積をパラメータとして、このガラス窓における室外から屋外への熱貫流量（J）の算定式を得ます。
3. 上の1, 2を比較して、当該建物のガラス窓面積として妥当な値を設定します。妥当性は、戸建住宅（木造2階建）における一般的な窓面積割合を考慮することにより判断します。
4. 断熱シートの熱貫流率（ $\text{J}/\text{K}\cdot\text{m}^2$ ）を類推して設定します。断熱シートの熱貫流率は、公称値がなければ、“プチプチシート”と呼ばれる透明なビニル製の梱包シートような外見であることを考慮して設定します。
5. 断熱シートを当該建物のガラス窓の全面に貼り付けた場合（面積は上記3ので設定値）について、ガラス窓からの室外から屋外への熱貫流量（J）を求めます。ガラス窓を通じた熱損失が減少したことにより、当該建物の熱収支がバランスする室温が初期条件の20℃より高くなるはずで。
6. 5の結果から、断熱シートの効果の有意性を判断します。

回答 1

ご提示いただいた計算手順は、熱力学の基本原則に基づいた非常に論理的で優れたアプローチです。結論から申し上げますと、**この手順でのシミュレーションは十分に可能です。**

ただし、机上計算の精度を高めるために、いくつか物理学的な補足と修正案を提案させ

ていただきます。

1. 物理単位の整理（重要）

手順の中で「熱貫流量（J）」とされていますが、定常状態（温度が一定に保たれている状態）を計算する場合、エネルギーの総量（J：ジュール）ではなく、時間あたりの熱の移動量である「熱損失（W：ワット または J/s）」として扱うのが一般的です。

- 熱源の出力（5kW = 5,000W）に対し、家全体から逃げる熱が何ワットあるかを比較します。

2. 計算手順へのアドバイス

手順 1：建物全体の熱損失の算出

室内温度 20°C 、外気温 -7°C （温度差 $\Delta T = 27\text{K}$ ）で室温が維持されているなら、「熱源の出力 = 建物全体の熱損失」という式が成り立ちます。

- $Q_{\text{total}} = 5,000\text{W}$
- この中には、外壁、屋根、床からの伝導熱損失、および換気による熱損失が含まれます。

手順 2：窓の熱貫流率の推定

LOW-E ガラス（等級★★★）であれば、熱貫流率（U 値）は概ね $2.3 \sim 2.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度と想定するのが妥当です。

手順 3：窓面積の推定

北海道の木造 2 階建て住宅の延床面積を 120 m^2 前後と仮定すると、一般的な窓面積は延床面積の 15～20% 程度（約 $18 \sim 24 \text{ m}^2$ ）になることが多いです。

手順 1 で求めた総熱損失から、換気による損失（ $30 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.34 \times 27\text{K} \approx 275\text{W}$ ）を差し引いた残りが「外皮（壁・窓・床・天井）からの損失」となります。ここから逆算して窓面積を推定するのは非常に合理的な手法です。

手順 4：断熱シート（プチプチ）の熱抵抗

梱包用緩衝材のようなシートの断熱効果は、主に「空気層」によるものです。

- シート単体の U 値ではなく、「元のガラスの熱抵抗 + シートによる空気層の熱抵抗」として計算します。
- 空気層 4～10mm の熱抵抗（約 $0.1 \sim 0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ）を加算することで、シート貼付後の新しい U 値を算出できます。

3. 計算の鍵となる数式

室温 T_{in} を求めるためのバランス式は以下のようになります：

$$P_{\text{source}} = (\sum U_i A_i + 0.34 \cdot V) \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$$

- P_{source} ：熱源出力（5000W）
- $U_i A_i$ ：各部位（壁、窓など）の熱貫流率 × 面積

- V : 換気量 (m^3/h)
- 0.34: 空気の比熱容量に関する係数

結論と次のステップ

このモデルで計算すれば、「断熱シートによって窓の U 値がどれくらい改善され、その結果、同じ 5kW の暖房出力で室温が何°Cまで上昇するか」を明確に数値化できます。

もしよろしければ、以下の具体的な数値を設定して、実際に簡易計算（シミュレーション）をお手伝いしましょうか？

- 建物の想定延床面積（例：120 m^2 ）
- 窓の具体的な種類（アルミサッシか、樹脂サッシかなど）

質問 2

窓は、樹脂サッシとして、試算をお願いします。

回答 2

北海道の住宅で一般的（かつ高性能）な樹脂サッシ+Low-E 複層ガラス（★★★★）を基準に、論理ステップに沿ってシミュレーションを行います。

まず、計算の単位を「ワット (W)」に統一して整理します。

※熱量 $J = W \times \text{秒}$ ですが、平衡状態の比較には W (J/s) を用いるのが標準的です。

ステップ 1 & 2: 現状の熱収支と窓面積の推定

まず、熱源出力 **5.0kW (5,000W)** で室温 20°C、外気 -7°C（温度差 $\Delta T = 27\text{K}$ ）が維持されている状態を分解します。

1. 換気による熱損失 (Q_v):

$$Q_v = 0.34 \times \text{換気量} (30 \text{ m}^3/\text{h}) \times \Delta T (27\text{K}) \approx 275\text{W}$$

2. 建物全体（外皮）からの熱損失 (Q_e):

総出力 5,000W - 275W = 4,725W が、窓・壁・床・天井から逃げています。

ここで、樹脂サッシ Low-E ガラスの熱貫流率 (U 値) を **2.33 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$** と設定し、一般的な北海道の住宅（延床 120 m^2 程度）の窓面積を **20 m^2** と仮定して計算を進めます。

ステップ 3: 部位別の熱損失内訳（初期状態）

• 窓からの損失 (Q_{window}):

$$2.33(U\text{値}) \times 20 \text{ m}^2 \times 27\text{K} \approx 1,258\text{W}$$

• 壁・床・天井からの損失 (Q_{wall}):

$$4,725\text{W} - 1,258\text{W} = \mathbf{3,467\text{W}}$$

$$4,725\text{W} - 1,258\text{W} = 3,467\text{W}$$

ステップ4：断熱シート（プチプチ）の効果設定

"プチプチ" 状の断熱シートを貼ると、ガラスとシートの間に新たな**静止空気層**が生まれます。

- 一般的なシート（厚さ 4mm 程度）を貼った際の熱抵抗の増加分を考慮すると、窓全体の U 値は概ね **2.33 から 1.70 ～ 1.80 W/(m²・K)程度に改善**されると推計されます。
- ここでは控えめに **1.80 W/(m²・K)** として計算します。

ステップ5：シート貼付後の到達室温の算出

窓の断熱性能が上がった状態で、同じ 5,000W の暖房を焚き続けた場合の室温 T_{in} を逆算します。

1. 新しい全体の熱損失係数 (UA 合計 + 換気):

- 窓: $1.80 \times 20 = 36.0 \text{ W/K}$
- 壁等: $3,467 \text{ W} \div 27 \text{ K} \approx 128.4 \text{ W/K}$
- 換気: $275 \text{ W} \div 27 \text{ K} \approx 10.2 \text{ W/K}$
- 合計: 174.6 W/K**

2. 新しい温度差 (ΔT):

$$\Delta T = \text{熱源 (5,000W)} \div \text{合計係数 (174.6W/K)} \approx \mathbf{28.6K}$$

3. 到達室温:

$$\text{外気温 } -7^{\circ}\text{C} + 28.6\text{K} \approx \mathbf{21.6^{\circ}\text{C}}$$

ステップ6：結論（有意性の判断）

項目	対策前（初期）	対策後（シート貼付）	差分
窓の U 値	2.33 W/(m ² ・K)	1.80 W/(m ² ・K)	-22.7%
室温（理論値）	20.0°C	21.6°C	+1.6°C

判断:

数値上、室温が **約 1.6°C上昇** するという結果になりました。体感温度としては「1 度上がると明らかに暖かく感じる」ため、**有意な効果がある**と言えます。

また、室温を 20°C のまま維持すると仮定した場合は、**約 280W 分（電球数個分、あるいはストーブの弱燃焼 1 段階分程度）の節電・節燃料効果**があることになります。

この計算モデルをベースに、例えば「窓面積を 25 m² に増やした場合」や「シートを 2 重に貼った場合」などの追加シミュレーションも可能です。何か気になる条件変更はありますか？

質問 3

節約効果として得られた数値 280W がすべて、ストーブ（床暖房含む）に寄与するとして、燃料消費率（L/s）に換算するための計算式をお示しいただけますでしょうか。燃料は灯油（JIS1 号灯油）です。

回答 3

節約された熱出力 **280W** を、灯油の燃料消費率（L/s）に換算するための計算式を整理します。灯油（JIS1 号灯油）のエネルギー密度を標準的な値を用いて計算を進めます。

1. 必要な物理定数

計算に使用する定数は以下の通りです。

- 灯油の低位発熱量 (H_l): 約 **\$34.6 \text{ MJ/L}** ($34,600,000 \text{ J/L}$)
- ストーブの燃焼効率 (η): 一般的な FF 式ストーブやボイラーを想定し、**90% (0.9)** とします。

2. 計算式

燃料消費率 m (L/s) を求める基本式は以下の通りです。

$$m = \frac{P_{\text{save}}}{H_l \times \eta}$$

ここで、

- $P_{\text{save}} =$ 節約された熱出力 ($280\text{W} = 280 \text{ J/s}$)
- $H_l =$ 灯油の発熱量 ($34.6 \times 10^6 \text{ J/L}$)
- $\eta =$ 燃焼効率 (0.9)

具体的な数値代入：

$$m = \frac{280}{34,600,000 \times 0.9}$$

$$m \approx 0.00000899 \text{ L/s}$$

3. 実用的な単位への換算（1 時間あたりの消費量）

L/s（秒間）では数値が小さすぎて実感が湧きにくいので、**1 時間あたり（L/h）** に換算します。

$$M \text{ (L/h)} = m \times 3,600 \text{ (秒)}$$

$$M = 0.00000899 \times 3,600 \approx 0.032 \text{ L/h}$$

4. シミュレーション結果のまとめ

窓に断熱シートを貼ることで、同じ室温を維持する場合の灯油節約効果は以下のようになります。

期間	節約できる灯油量（推計）	備考
1 時間あたり	約 0.032 L	小さじ約 6 杯分

1 日 (24 時間) あたり	約 0.77 L	1 シーズン 100 日で 77L
1 ヶ月 (30 日) あたり	約 23.1 L	ポリタンク約 1.3 本分

補足：

北海道の厳冬期、24 時間暖房をつけっぱなしにする環境であれば、1 ヶ月でポリタンク 1 本分以上の節約になる計算です。窓面積がさらに大きい場合や、外気温がより低い（-15℃など）場合は、この節約幅はさらに拡大します。

この「月間 23L の節約」という数値は、断熱シートの購入コスト（数千円）を考慮しても、1 シーズンで十分に元が取れる投資（有意な効果）であると言えます。

質問 4

外気及び室内の潜熱（水蒸気量）の扱いについては、どのように考えればよいでしょうか。夏期に比べて冬期は低温であるため、空気に含まれる水蒸気量は極く少ないとして無視してよいのでしょうか。例えば、外気の相対湿度が 70%、室内の相対湿度を 30%に保つ場合、潜熱を考慮した場合の計算（修正）はどのようなになるのでしょうか。

回答 4

結論から申し上げますと、冬期の北海道のような極寒地では、「暖房負荷」としての潜熱（加湿）の影響は決して無視できません。

空気中の水蒸気量は温度によって劇的に変わるため、外気（-7℃）と室内（20℃）では、相対湿度の数値以上に「絶対湿度（空気 1kg あたりの水蒸気重さ）」に大きな差が出るからです。

1. 潜熱負荷が発生するメカニズム

冬期、室内の湿度を 30%に保つためには、換気（30 m³/h）によって入ってくる乾燥した外気に、加湿器などで水分を補給し続ける必要があります。この「水を蒸発させて水蒸気にするエネルギー」が潜熱負荷となります。

2. 絶対湿度の算出

空気線図または計算式を用いて、それぞれの絶対湿度 $\times$ (kg/kg(DA)) を求めます。

- **外気 (-7℃, 70%):**

飽和水蒸気圧が極めて低いため、絶対湿度は約 **0.0015 kg/kg(DA)** です。

- **室内 (20℃, 30%):**

絶対湿度は約 **0.0044 kg/kg(DA)** です。

つまり、換気 1kg あたり **0.0029 kg\$ (2.9g)** の水分を常に補給しなければ、室内湿度は維持できず、外気と同じレベルまで低下してしまいます。

3. 潜熱負荷の計算式

潜熱負荷 Q_L は、以下の式で算出されます。

$$Q_L = \rho \cdot V \cdot \Delta x \cdot r$$

- ρ : 空気の密度 (約 1.2 kg/m³)
- V : 換気量 (30 m³/h)
- Δx : 絶対湿度差 (0.0029 kg/kg)
- r : 水の蒸発潜熱 (約 2,501 kJ/kg または 0.695 Wh/g)

数値代入：

1 時間あたりの必要熱量：

$$1.2 \times 30 \times 0.0029 \times 2,501 \approx 261 \text{ kJ/h}$$

これをワット (W) に換算すると：

$$261,000 \text{ J} \div 3,600 \text{ s} \approx \mathbf{72.5 \text{ W}}$$

4. 計算モデルの修正 (顕熱 vs 潜熱)

前回の計算 (顕熱のみ) に、この潜熱負荷を加えると全体の熱バランスは以下のようになります。

項目	負荷 (W)	全体に占める割合
顕熱負荷 (建物 + 換気)	5,000 W	98.6%
潜熱負荷 (加湿維持)	72.5 W	1.4%
合計熱負荷	5,072.5 W	100%

修正のポイント：

- **熱源への影響:** 室内湿度を 30% に「維持」しようとする場合、ストーブの熱だけでなく、加湿器の電気エネルギーや、ストーブの上に乘せたヤカンの熱などがこの 72.5W 分を負担していることになります。
- **断熱シートの効果への影響:** 断熱シートは「伝熱 (顕熱)」を抑えるものであり、湿度の移動 (潜熱) には直接関与しません。したがって、「断熱シートによって浮いた 280W」という節約幅自体は変わりません。

結論：無視してよいか？

熱源全体の容量 (\$5,000W\$) に対して潜熱分は **約 1.5% 程度** です。

厳密なシミュレーションとしては考慮すべきですが、「断熱シートの導入効果を判断する」という目的においては、無視しても計算結果の妥当性 (有意性) を揺るがすほどではありません。

ただし、もし室内湿度を **50%** まで上げたい場合は、潜熱負荷は約 **180W** まで跳ね上がります。これは窓の結露リスクを高めるため、断熱シートによる「窓表面温度の上昇 (結露抑制)」という別のメリットが非常に重要になってきます。

次は、この「結露」という観点から、断熱シートがカビや湿度管理にどう寄与するかを深掘りしてみますか？

質問 5

潜熱負荷は、あくまでも加湿維持のために室内に供給する熱量であって、窓ガラスの断熱効果の向上（熱抵抗の増加）による室温の上昇には寄与しないという理解でよろしいですか。

回答 5

その通りです。「**潜熱負荷**」はあくまで**空気中の水分量を維持するためのエネルギー**であり、窓の断熱性能向上による「**熱の逃げにくさ（顕熱）**」とは物理的に切り離して考えて差し支えありません。より正確に整理すると、以下のようになります。

1. 潜熱と断熱シートの関係

断熱シートが食い止めるのは、温度差によって移動する「**顕熱（伝導・対流・放射）**」です。

一方、潜熱は「**水蒸気の出入り**」に伴うエネルギーです。窓にシートを貼っても、窓ガラスそのものが水蒸気を通さない（透湿抵抗が極めて高い）以上、**シートの有無で「家から逃げる水蒸気量」は変わりません**。したがって、加湿を維持するために必要な熱量（潜熱負荷）も変化しません。

2. 室温上昇に寄与するのは「顕熱の削減分」のみ

今回のシミュレーションで室温を 20℃ から 21.6℃ に押し上げた原動力は、「窓から逃げていた顕熱（約 280W 分）を室内に閉じ込めたこと」です。

潜熱負荷（約 72.5W）は、換気システムや壁の隙間から水蒸気が排出される限り、断熱シートの性能とは無関係に発生し続ける「**固定コスト**」のようなものです。

3. 実践的な補足：結露と潜熱の「隠れた関係」

計算上は切り離せますが、実生活では一つだけ重要な「**潜熱が顕熱に化ける現象**」があります。それが**結露**です。

● シートを貼る前：

窓ガラスで結露が起こると、空気中の水蒸気が液体に戻る際に「**凝縮熱（潜熱の放出）**」が発生し、窓際のごく狭い範囲をわずかに温めます。しかし、これは室内の熱を奪って蒸発させた水分が戻っているだけなので、トータルの暖房効率にはマイナス（窓を濡らすだけ）です。

● シートを貼った後：

シートにより窓内側の表面温度が上がると、結露が抑制されます。結露に使われていた「**水蒸気**」が室内に留まるため、加湿器の稼働を抑えられ、結果的に家全体のエネルギー消費を抑える副次的な効果が期待できます。

結論

あなたの理解は完全に正しいです。「室温を上昇させる直接的な要因は、窓の熱抵抗が増

えたことによる顕熱損失の抑制である」と定義して、机上計算を完結させて問題ありません。これで計算のロジックは非常に強固なものになりました。