

テーマ 地球温暖化の物理・エネルギー計算の基礎

2015 年 6 月 30 日

長野県地球温暖化防止活動推進員・気象予報士) 宮澤

1. 地球温暖化の物理

＜輻射バランス温度＞：
反射率(アルベド)の影響
金星との比較

＜太陽活動の変化が輻射バ
ランス温度に与える影響＞

| 地球 | | | 金星 | | |
|---|----------|-------------------------------------|---|----------|-------------------------------------|
| 太陽定数 | 1366 | (W/m ²) | 太陽定数 | 2.617 | (W/m ²) |
| ステファンボルツマン定数 | 5.67E-08 | (W/m ² ·K ⁴) | ステファンボルツマン定数 | 5.67E-08 | (W/m ² ·K ⁴) |
| 球の表面積と断面積の比は、4:1であることから、太陽から受ける平均放射量は、太陽定数の1/4倍となる。 | | | 球の表面積と断面積の比は、4:1であることから、太陽から受ける平均放射量は、太陽定数の1/4倍となる。 | | |
| 1日当りの平均太陽エネルギー | 341.5 | (W/m ²) | 1日当りの平均太陽エネルギー | 654.25 | (W/m ²) |
| 反射率 | バランス温度 | | 反射率 | バランス温度 | |
| | (K) | (°C) | | (K) | (°C) |
| 0 | 278.6 | 5.6 | 0 | 327.7 | 54.7 |
| 0.05 | 275.0 | 2.0 | 0.05 | 323.6 | 50.6 |
| 0.1 | 271.3 | -1.7 | 0.1 | 319.2 | 46.2 |
| 0.15 | 267.5 | -5.5 | 0.15 | 314.7 | 41.7 |
| 0.2 | 263.5 | -9.5 | 0.2 | 310.0 | 37.0 |
| 0.25 | 259.2 | -13.8 | 0.25 | 305.0 | 32.0 |
| 0.3 | 254.8 | -18.18 | 0.3 | 299.8 | 26.8 |
| 0.35 | 250.1 | -22.9 | 0.35 | 294.3 | 21.3 |
| 0.4 | 245.2 | -27.8 | 0.4 | 288.5 | 15.5 |
| 0.5 | 234.3 | -38.7 | 0.5 | 275.6 | 2.6 |
| 0.65 | 214.3 | -58.7 | 0.65 | 252.1 | -20.9 |
| 0.8 | 186.3 | -86.7 | 0.8 | 219.2 | -53.8 |

太陽活動の変動の影響

1) 近年は、黒点周期に対応した太陽定数の変化が観測されている。その変動レンジは、1366+/-0.4程度である。
2) 小氷期の原因とされるマウンター極小期のレベルは、小さく見積もっても、1363程度である。

1) 黒点極小期(現代)

| | | | |
|--------------|----------|-------------------------------------|-------|
| 太陽定数 | 1365.6 | (W/m ²) | |
| ステファンボルツマン定数 | 5.67E-08 | (W/m ² ·K ⁴) | |
| 反射率 | バランス温度 | | 影響 |
| | (K) | (°C) | (°C) |
| 0.3 | 254.80 | -18.20 | -0.02 |

2) 小氷期(17~18世紀 マウンダー極小期)

| | | | |
|--------------|----------|-------------------------------------|-------|
| 太陽定数 | 1363 | (W/m ²) | |
| ステファンボルツマン定数 | 5.67E-08 | (W/m ² ·K ⁴) | |
| 反射率 | バランス温度 | | 影響 |
| | (K) | (°C) | (°C) |
| 0.3 | 254.68 | -18.32 | -0.14 |

＜地球の軌道が輻射バランス温度に与える影響 (季節変動)＞

地球の軌道(楕円軌道)の影響は？

輻射強度は、太陽からの距離の2乗に反比例する。

| 離心率 | 0.0167 | 太陽輻射 |
|-----|----------------|------------|
| 長半径 | 1.496E+08 (km) | 1,366 |
| 最大 | 1.521E+08 (km) | 1,321 7月4日 |
| 最小 | 1.471E+08 (km) | 1,413 1月5日 |

これに関連する気候変動因子が2つある。

1) 離心率は変動する。0.015~0.05 10万年および40万年周期(ミランコビッチ)

2) 近日点は移動する。(一般相対論:太陽重力場による時空間の歪み)

1975年 黄経102.529度
2002年 黄経102.946度

離心率が最大となったときの、最大、最小距離と太陽輻射を計算する。
楕円の式 $(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1$ 最大距離 $a*(1+e)$
最小距離 $a*(1-e)$

| 離心率 | 0.05 | 太陽輻射 |
|-----|----------------|-------|
| 長半径 | 1.496E+08 (km) | 1,366 |
| 最大 | 1.571E+08 (km) | 1,239 |
| 最小 | 1.421E+08 (km) | 1,514 |

＜CO2による放射強制力の増加が輻射バ ランス温度に与える影響＞

過去 100 年の CO2 の増加 (280ppm⇒380ppm) による

放射強制力は、1.66W/m²である。

CO2の放射強制力の影響

太陽からの放射は1.66増加したのと同等とみなせる。

| | | | |
|----------------|----------|-------------------------------------|------|
| 太陽定数 +放射強制力 | 1367.66 | (W/m ²) | |
| ステファンボルツマン定数 | 5.67E-08 | (W/m ² ·K ⁴) | |
| 反射率 | バランス温度 | | 影響 |
| | (K) | (°C) | (°C) |
| 0.3 | 254.89 | -18.11 | 0.07 |

＜地球の自転軸の傾きの変動(歳差運 動)が放射量に与える影響(北極点で計 算)＞

地球の自転軸の傾きの影響

傾きは変動する。(22.1度~24.5度)

現在は、23.4度

夏至の北極点の日射量を計算する。

| | | |
|------|------|---------------------|
| 太陽定数 | 1366 | (W/m ²) |
|------|------|---------------------|

| 傾き | 日射強度 | |
|------|-------------------------|----|
| 22.1 | 514 (W/m ²) | 最小 |
| 23.4 | 543 (W/m ²) | 現在 |
| 24.5 | 566 (W/m ²) | 最大 |

高緯度地方で影響が大きい。

<太陽輻射に関するまとめ>

マクロ影響(地球トータル)

- 1) 小氷期: -3W/m^2 (-0.14°C) \Rightarrow $2\sim 3^\circ\text{C}$ の気温低下を引き起こした。
- 2) CO₂ 増加 100ppm: $+1.66\text{W/m}^2$ ($+0.07^\circ\text{C}$)
- 3) 太陽黒点が回復しないと: -0.4W/m^2 (-0.02°C)

メソ影響(地球の中での配分)

- 1) 地球の軌道(季節変動): $+47\text{W}$ / -45W 最大 $+148\text{W}$ / -127W
- 2) 歳差運動(公転軸): 極地方 $+23\text{W}$ / -29W
昼夜変動: $0\sim 1366\text{W}$ (緯度による)
- 3) アルベド(反射率): 地球平均 30%
 - 雪氷面: 約 80%
 - 赤道付近: 20~30%
 - 海面: (太陽高度 25 度以上では 10%以下、25 度以下では、10~70%)
 - 白い雲: 70%
 - 砂漠: 25~40%
 - 森林: 10~20%
 - 草原: 15~25%

<太陽エネルギーと地球の熱容量の比較>

| | |
|--------------------------|----------------------------------|
| <u>太陽エネルギー(1日平均)</u> | <u>29.5 (MJ/m²)</u> |
| <u>大気の熱容量(全層)</u> | <u>10.4 (MJ/m² K)</u> |
| <u>海の熱容量(深さ1mまで)</u> | <u>4.2 (MJ/m² K)</u> |
| <u>海の潜熱(深さ1mまで)</u> | <u>2257 (MJ/m²)</u> |
| <u>雪氷の熱容量(氷で深さ1mまで)</u> | <u>2.1 (MJ/m² K)</u> |
| <u>雪氷の潜熱(氷で深さ1mまで)</u> | <u>334 (MJ/m²)</u> |
| <u>陸上(土)の熱容量(深さ1mまで)</u> | <u>1.6 (MJ/m² K)</u> |

<気候変動は、なぜ起きる？>

ケース1: マクロ影響(地球トータル)のわずかな変動が、正のフィードバックの引き金となる。

ケース2: 歳差、軌道等の長期変動(ミランコビッチサイクル)により、気候システムを新たな安定点に移行する。(システムの移行)

正のフィードバック

- 1) 温暖化 \Rightarrow 海洋、土壌等からの CO₂ 放出 \Rightarrow 更なる温暖化
- 2) 温暖化 \Rightarrow 雪氷溶解 \Rightarrow アルベド低下 \Rightarrow 更なる温暖化
- 3) 寒冷化 \Rightarrow 雪氷拡大 \Rightarrow アルベド増加 \Rightarrow 更なる寒冷化

負のフィードバック(変動抑止力)

- 1) 温暖化 \Rightarrow 植物の繁栄 \Rightarrow CO₂ 吸収 \Rightarrow 寒冷化
- 2) 温暖化 \Rightarrow 降雪増加 \Rightarrow 雪氷拡大 \Rightarrow アルベド増加 \Rightarrow 寒冷化
- 3) 寒冷化 \Rightarrow 降雪減少 \Rightarrow 雪氷縮小 \Rightarrow アルベド低下 \Rightarrow 温暖化

2. エネルギー計算の基礎と活用

<エネルギーの単位について>

1. エネルギーの単位:

カロリー: 水 1 g の温度を 1°C 上げるエネルギー = 1 カロリー (cal)

ジュール (J): SI 単位系におけるエネルギー、仕事、熱量、電力量の単位

定義: $1 \text{ ジュール} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ ニュートン} \cdot \text{メートル}$

1 ニュートンの力が力の方向に物体を 1 メートル動かすときの仕事

102 グラム (小さなリンゴくらいの重さ) の物体を 1 メートル持ち上げる時の仕事

$1 \text{ ジュール} = 1 \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ クーロン} \cdot \text{ボルト}$

1 ボルトの電位差の中で1クーロンの電荷を動かすのに必要な仕事

$$1 \text{ ジュール} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ ワット秒}$$

1 ジュールは、1ワットの仕事率を1秒間行ったときの仕事

電力関係では、ワット秒の3 600 000 (= 60×60×1,000)倍のキロワット時が用いられる。
日本の計量法ではジュールとともにワット秒、ワット時の使用が認められている。

<エネルギーの大きさのイメージ>

1 ジュール

1 N·m (ニュートン・メートル) = 1 C·V (クーロン・ボルト) = 1 W·s (ワット秒)

約 2.78 × 10⁻⁷ kW·h (キロワット時) 約 0.238 9 cal (カロリー)

1 キロジュール

1 キロジュール (記号:kJ) = 1,000 ジュール

1 kJの仕事は、1キロワットの装置が1秒間にする仕事である。

1 kJの熱量で、0℃、3gの氷を溶かすことができる。

1 kJの熱量で、0℃、5gの水を50℃上げることができる。

地球上で100 kgの物体を1 m (または1 kgの物体を100 m) 持ち上げたときの仕事は、約1 kJである。

1 kJは、5/18ワット時 (約0.2778ワット時) に等しい。

1 メガジュール

1 メガジュール (MJ) = 1,000,000 (百万) ジュール

1 MJの仕事は、1 kWの装置が16分40秒間 (1 000秒) にする仕事である。

1 MJの熱量で、0℃、3 kgの氷を溶かすことができる。 1 MJは、約0.277 8キロワット時

<エンタルピーとは>

エンタルピー (enthalpy) とは、熱力学における示量性状態量のひとつである。

物質の発熱・吸熱挙動、及び、外部に対する仕事量にかかわる値である。

物質が発熱して外部に熱を出すとエンタルピーが下がり、吸熱して外部より熱を受け取るとエンタルピーが上がる。

また、物質が他の物質などに仕事をするとエンタルピーが下がり、外部より仕事を受けるとエンタルピーが上がる。

定義 : エンタルピー H は以下の式により定義される。

$$H=U+PV \quad (U: \text{内部エネルギー}, P: \text{圧力}, V: \text{体積})$$

性質 : エンタルピーは等圧変化を記述する上で有用な物理量である。

$$dH=dQ+VdP$$

となる。ところが、等圧過程においては $dP=0$ であるから、結局、

$$dH=dQ$$

となる。つまり、等圧過程においては系に与えた熱量が系のエンタルピーの変化と等しくなっている。

(これは等積過程において系に与えた熱量が系の内部エネルギー変化に等しくなっていることと対応する。)

<エネルギーのコストについて>

輸入化石燃料価格の乱高下で、電力、都市ガス等の価格の変動が大きくなっています。その中で、
エネルギー視点でのコスト計算の概略を知っておくことが重要です。(簡単です。)

●都市ガス13A

1立米あたりの発熱量 : 高発熱量 : 43. 11 MJ (燃焼によって生ずる水蒸気のエネルギーを含んだもの) 低発熱量 : 38. 93 MJ (水蒸気を含まないエネルギー)

購入単価 : 120 円/立米とすると エネルギー単価は、3. 08 円/MJ 11. 1 円/k

Wh

(低発熱

量で計算)

●電気(電力)

1J=1W·s なので、 1 kWh=60×60=3600KJ=3. 6MJ

購入単価を 25 円とすると、エネルギー単価は、6. 9 円/MJ 25. 0 円/kWh

●蒸気

40℃の水⇒170℃の蒸気 : エンタルピーの概念が必要。167MJ/トン⇒2767MJ/トンとなる。

エンタルピーの増加分がエネルギーと考えると、 2600MJ/トン。

購入コスト（製造コスト）：10,000円とすると、エネルギー単価は、3.85円/MJ 13.8円/kWh

●灯油

灯油の発熱量は、36.7MJ/リットル（省エネ法の数値から）

購入単価を 100円/リットル とすると、エネルギー単価は、2.73円/MJ 9.8円/kWh

<エネルギーの利用効率について>

電力のエネルギー単価は、通常、化石燃料や蒸気のエネルギー単価よりはるかに高い。

したがって、熱エネルギーとしてそのまま使うなら、電気以外の燃料の方が安い。

しかし、ヒートポンプ（エアコン、冷凍機等）を使うと、まったく逆になる。

例：冷凍機（ヒートポンプ）で、温度差5℃、300トン/時の冷水の製造を考える。

1) 冷却するエネルギー量を計算する。

$$4.186\text{MJ} \times 5 \times 300 = 6278\text{MJ/h} \quad 6278 / 3.6 = 1744\text{kW} = (495\text{US 冷凍トン})$$

※) 冷凍トン： US 冷凍トン (USR t) = 3.52kW

COPについて：Coefficient of Performance（成績係数）：

加熱または冷凍の能力Q（kW）を消費エネルギーL（kW）で割ったもの $COP = Q/L$

1. （蒸気）吸収式冷凍機： COP=1.2~1.3 程度である。（1.3で計算すると）

必要な蒸気エネルギーは、 $6278\text{MJ} / 1.3 = 4829\text{MJ/Hr} = 1341\text{kW}$

必要な蒸気量は、 $4829 / 2600 = 1.86$ トン/Hr コストは、 $10,000$ 円 $\times 1.86 =$ 約18,600円

2. ターボ冷凍機： COP=6.0~7.0（6.0で計算すると）

必要な電気エネルギーは、 $1744 / 6.0 = 291\text{kW}$ コストは、 25 円 $\times 291 =$ 約7,300円

暖房も同じことである。

蒸気を直接使うよりも、電気ヒートポンプ（エアコン）を使った方が、安くなる。

<熱エネルギーの考え方>

<熱エネルギー計算の問題>

熱の移動は、伝導、対流、放射（輻射）のかたちでどこへでも、移動します。それぞれについて、考察や計算が必要となります。また、理論や計算が複雑で、しかも、厳密な答えができません。

したがって、実験式、経験式、簡易計算式等を活用して、概数をつかむことが重要となります。

エネルギーの単位の定義と、エネルギーの大きさのイメージが重要です。

※) 以下に紹介する熱エネルギーの計算手法の多くは、

財団法人）省エネルギーセンターが毎年発行する“省エネルギー手帳”に掲載されています。

<壁面、窓、配管等からの放熱量の計算>

1. 求めたい数値は、熱伝達率とし、単位は、 $\text{W/m}^2\text{K}$ とする。

$$(1\text{W} = 1\text{J/s} \Rightarrow 1 \times 60 \times 60 = 3,600\text{J/Hr} = 3.6\text{KJ/Hr})$$

2. 熱伝達率が求めれば、温度差、面積、時間等を掛けて、自在に、放熱エネルギーを計算できます。

3. 表面温度がわかれば、対流と放射の2つを考えればよい。

4. 対流は、無風時の自然対流と、風が吹いているときの強制対流がある。

5. 放射（輻射）は、物体の材質、表面状態による“放射率”を決める必要がある。

<熱エネルギーの簡単な計算（1）>

テーマ： 平面から逃げる熱の計算

1. 対流伝熱

(1) 自然対流

水平上向き

対流熱伝達率 $\alpha_c = 3.3 \cdot \Delta t^{0.25}$

水平下向き

対流熱伝達率 $\alpha_c = 1.7 \cdot \Delta t^{0.25}$

垂直

対流熱伝達率 $\alpha_c = 2.6 \cdot \Delta t^{0.25}$

<計算例> 壁（垂直）から逃げる熱の計算とする。

気温 0 度 壁（垂直）の温度 20 度 ⇒ 温度差 $\Delta t = 20$ 度

垂直の式に代入して

対流熱伝達率 $\alpha_c = 2.6 \cdot \Delta t^{0.25} = 2.6 \cdot 20^{0.25} = 5.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

1 m²あたりの熱伝達量は、温度差の 20 度を掛ける。

$$5.5 \times 20 = 110 \text{ W/m}^2$$

$$110 \times 60 \times 60 = 396,000 \text{ J/Hr} = 396 \text{ KJ/Hr} = \text{約 } 0.40 \text{ MJ}$$

(2) 強制対流

対流熱伝達率 $\alpha_c = a + bw^n$ w: 風速

温度差には無関係、風速のみ影響

<計算例> 壁（垂直）から逃げる熱の計算とする。

風速 4 m、粗面の場合 気温 0 度 壁（垂直）

の温度 20 度 ⇒ 温度差 $\Delta t = 20$ 度

対流熱伝達率 $\alpha_c = a + bw^n = 6.19 + 4.28 \times 4 = 23.3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

1 m²あたりの熱伝達量は、温度差の 20 度を掛ける。

$$23.3 \times 20 = 466 \text{ W/m}^2$$

$$466 \times 60 \times 60 = \text{約 } 1,680,000 \text{ J/Hr} = 1,680 \text{ KJ/Hr} = \text{約 } 1.7 \text{ MJ}$$

| 壁面 | w < 5m/s | | | 5 < w < 30m/s | | |
|-----|----------|------|-----|---------------|------|------|
| | a | b | n | a | b | n |
| 平滑面 | 5.61 | 3.91 | 1.0 | 0 | 7.15 | 0.78 |
| 粗面 | 6.19 | 4.28 | 1.0 | 0 | 7.58 | 0.78 |

2. 放射（輻射）伝熱

放射熱伝達率 $\alpha_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4) / (T_1 - T_2)$

ステファンボルツマン係数 $\sigma = 5.67 \text{ E-}8$ 放射率 ϵ

$0 < \epsilon < 1$

<計算例> 壁（垂直）から逃げる熱の計算とする。

気温 0 度 壁（垂直）の温度 20 度

壁の放射率 $\epsilon = 0.94$ （コンクリート、塗装） ⇒ 温度差 $\Delta t = 20$ 度

壁の放射率 $\epsilon = 0.94$ を上の式に代入して 放射熱伝達率 $\alpha_r = 4.84 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

1 m²あたりの熱伝達量は、温度差の 20 度を掛ける。 $4.84 \times 20 = 97 \text{ W/m}^2$

$$97 \times 60 \times 60 = \text{約 } 349,000 \text{ J/Hr} = 349 \text{ KJ/Hr} = \text{約 } 0.35 \text{ MJ}$$

| 種々の物質の放射率(代表値) | | |
|----------------|-------|-------|
| 物質 | 表面状態 | 放射率 |
| アルミ | (研磨面) | 0.04 |
| | (粗面) | 0.06 |
| | (酸化面) | 0.34 |
| 鉄 | (研磨面) | 0.21 |
| | (酸化面) | 0.74 |
| ニッケル | (研磨面) | 0.072 |
| ステンレス | (研磨面) | 0.074 |
| | (褐色面) | 0.4 |
| ガラス | | 0.94 |
| 紙 | | 0.93 |
| アスファルト | | 0.94 |
| 砂 | | 0.9 |
| コンクリート | | 0.94 |
| 塗装面 | | 0.94 |

<対流、放射の簡易計算>

自然対流も、放射も、熱伝達率が、温度や温度差の関数となっているため、壁、窓、断熱材等の具体的な計算をするときに、計算が複雑化して不便です。

目的は省エネですから、対策の効果の大きさのイメージがつかめれば良いので、だれでも簡単に、エネルギーの計算ができる方が実用的です。

思い切った簡略化をしてしましましょう。（注）確立された手法ではなく、考え方の一例です。）

・ **自然対流**： 無風の室内へ適用。日常の温度範囲では大差はないので、 $\alpha = 6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

・ **強制対流**： 屋外へ適用。換気ファンや排気が影響している室内へも適用。

弱い風の時間帯が多いので、風速 2 m を代表として、 $\alpha = 15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

・ **放射**： 放射率は、ほとんどの物質は、0.9 として、

省エネで使われる「アルミの光沢面」は、0.04 とします。

温度については、生活温度（常温）の範囲内と、高温で使う蒸気配管の 2 つくらいで良いかと考えます。

⇒ **放射熱伝達率の概算値**

| | | | | | |
|----|-----|-----------------|-----|----------------|-------------------------|
| 常温 | アルミ | $\alpha = 0.22$ | その他 | $\alpha = 5.5$ | |
| 高温 | アルミ | $\alpha = 0.35$ | その他 | $\alpha = 8.0$ | 単位 (W/m ² K) |

<断熱材の効果 (1)>

断熱材の壁 VS コンクリートの壁 厚さ 50mm 室内 20度、屋外 0度

<計算例>

断熱材（発泡スチロール）： 熱伝導率 $\lambda = 0.04$ (W/mK)

⇒厚さを決めて、単位面積当たりの「熱通過率」に換算する。

厚さ 50mm=0.05m

$$\text{熱通過率 } \alpha = 0.04 \text{ (W/mK)} / 0.05 \text{ (m)} = 0.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

前述の壁の例で、外気との温度差 $\Delta t = 20$ 度を掛けると

$$0.8 \times 20 = 16 \text{ W/m}^2$$

厳密な計算をするには、断熱材の熱伝導と表面の対流伝熱・放射伝熱を合わせた総合の熱通過率を求める必要がありますが、断熱材の効果が圧倒的に大きいので、断熱材だけの計算でも、大きさのイメージは大きく変わりません。

総合的な熱通過率は、直列部分は逆数和、並列部分は単純和で計算します。

$$1/\alpha = 1/\alpha_1 + 1/(\alpha_2 + \alpha_3)$$

屋内（自然対流）+断熱材+屋外（強制対流）+放射 の場合

$$1/\alpha = 1/6 + 1/0.8 + 1/(15 + 5.5) \Rightarrow \alpha = 0.68 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

断熱材単独計算よりも、更に、少し小さく（良く）なります。**熱通過量は、 $0.68 \times 20 = 14 \text{ W/m}^2$**

コンクリートの壁 熱伝導率 $\lambda = 1.0$ (W/mK)

厚さ 50mm=0.05m

$$\text{熱通過率 } \alpha = 1.0 \text{ (W/mK)} / 0.05 \text{ (m)} = 20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

外気との温度差 $\Delta t = 20$ 度を掛けると

$$20 \times 20 = 400 \text{ W/m}^2$$

これに対流伝熱・放射伝熱を合わせた総合の熱通過率を求める必要があります。

屋内（自然対流）+コンクリート+屋外（強制対流）+放射 の場合

$$1/\alpha = 1/6 + 1/20 + 1/(15 + 5.5) \Rightarrow \alpha = 3.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

コンクリート単独の計算よりかなり小さく（良く）なりますが、断熱材と比べて、5倍以上、熱が通過することがわかります。**熱通過量は、 $3.8 \times 20 = 76 \text{ W/m}^2$**

<窓の断熱性能について>

JISに基づいた数値が一般化していますが、窓ガラスそのものの物理的な特性を表しているわけではないことに注意が必要です。

単板ガラス（3mm）：6.0W/m²K 複層ガラス（5/6/5mm）：3.3W/m²K Low-E複層ガラス：2.6W/m²K

<窓を通過するエネルギーを簡易計算してみよう>

前述した対流と放射は、簡略化した数値を使えば簡単です。

計算例1：単板ガラス 3mm

$$\text{熱伝導率 } \lambda = 1.0 \text{ W/mK} \Rightarrow \text{熱通過率 } \alpha = 1.0 / 0.003 = 333 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

室内 20°C 自然対流 屋外 0°C 強制対流とすると

$$\text{総合熱通過率 } \alpha = (1 / (1/6 + 1/333 + 1/15)) + 5.5 = 9.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

計算例2：ペアガラス 5/6/5mm

$$5\text{mmのガラス 熱伝導率 } \lambda = 1.0 \text{ W/mK} \Rightarrow \text{熱通過率 } \alpha = 1.0 / 0.005 = 200 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$6\text{mmの空気 熱伝導率 } \lambda = 0.024 \text{ W/mK} \Rightarrow \text{熱通過率 } \alpha = 0.024 / 0.006 = 4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

室内 20°C 自然対流 屋外 0°C 強制対流とすると

$$\text{総合熱通過率 } \alpha = (1 / (1/6 + 1/200 + 1/4 + 1/200 + 1/15)) + 5.5 = 7.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

計算例3：窓のフレーム部分 アルミ VS 樹脂

20mmのアルミ（表面塗装） 熱伝導率 $\lambda = 2280 \text{ W/mK}$

$$\Rightarrow \text{熱通過率 } \alpha = 228 / 0.02 = 11,400 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

20mmの樹脂サッシ 熱伝導率 $\lambda = 0.25 \text{ W/mK}$

$$\Rightarrow \text{熱通過率 } \alpha = 0.25 / 0.02 = 12.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

室内 20°C 自然対流 屋外 0°C 強制対流とすると、総合熱通過率は、

$$\text{アルミ } \alpha = 1 / (1/6 + 1/11,400 + 1 / (15 + 5.5)) = 4.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\text{樹脂 } \alpha = 1 / (1/6 + 1/12.5 + 1 / (15 + 5.5)) = 3.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

計算例4： 1～3を基に、窓から逃げる熱の大きさを計算してみましょう。

ガラスの部分とサッシのフレーム部分の比率を、8：2としておきます。

単板ガラス+アルミサッシ 熱通過率 $\alpha = 9.7 \times 0.8 + 4.6 \times 0.2 = 8.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

ペアガラス+アルミサッシ 熱通過率 $\alpha = 7.5 \times 0.8 + 4.6 \times 0.2 = 6.9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

ペアガラス+樹脂サッシ 熱通過率 $\alpha = 7.5 \times 0.8 + 3.4 \times 0.2 = 6.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

<まとめ：壁の熱通過>

・断熱材 50mm 熱通過率 $\alpha = 0.68 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

・コンクリート 50mm $\alpha = 3.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

標準的な住宅でも、壁の面積は 200 m²程度ある。

1日で逃げる熱は？

・断熱材 50mm 熱通過量 $Q = 0.68 \times 200 \times 20 \times 24 = 65 \text{ kWh}$

$Q = 0.68 \times 200 \times 20 \times 60 \times 60 \times 24 / 1000 / 1000 = 235 \text{ MJ}$ (灯油換算 6.4 リットル (36.7MJ/リットル))

・コンクリート 50mm 熱通過量 $Q = 3.8 \times 200 \times 20 \times 24 = 365 \text{ kWh}$

$Q = 3.8 \times 200 \times 20 \times 60 \times 60 \times 24 / 1000 / 1000 = 1313 \text{ MJ}$ (灯油換算 36 リットル (36.7MJ/リットル))

<まとめ：窓の熱通過>

・単板ガラス+アルミサッシ $\alpha = 8.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

・ペアガラス+アルミサッシ $\alpha = 6.9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

・ペアガラス+樹脂サッシ $\alpha = 6.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

大きな窓 (1.8m×1.8m) が 10 枚、面積：32 m²の場合： 1日当たり熱通過量

・単板ガラス+アルミサッシ 熱通過量 $Q = 8.7 \times 32 \times 20 \times 24 = 134 \text{ kWh}$

$Q = 8.7 \times 32 \times 20 \times 60 \times 60 \times 24 / 1000 / 1000 = 481 \text{ MJ}$ (灯油換算 13 リットル (36.7MJ/リットル))

・ペアガラス+アルミサッシ 熱通過量 $Q = 6.9 \times 32 \times 20 \times 24 = 106 \text{ kWh}$

$Q = 6.9 \times 32 \times 20 \times 60 \times 60 \times 24 / 1000 / 1000 = 382 \text{ MJ}$ (灯油換算 10.4 リットル (36.7MJ/リットル))

・ペアガラス+樹脂サッシ 熱通過量 $Q = 6.7 \times 32 \times 20 \times 24 = 103 \text{ kWh}$

$Q = 6.7 \times 32 \times 20 \times 60 \times 60 \times 24 / 1000 / 1000 = 370 \text{ MJ}$ (灯油換算 10.1 リットル (36.7MJ/リットル))

・窓を断熱材で塞いだら・・・ 熱通過量 $Q = 0.68 \times 32 \times 20 \times 24 = 10.4 \text{ kWh}$

$Q = 0.68 \times 32 \times 20 \times 60 \times 60 \times 24 / 1000 / 1000 = 37.6 \text{ MJ}$ (灯油換算 1.0 リットル (36.7MJ/リットル))