

## 室温の測定・暑い/寒い・ふく射伝熱

### *Measurement of Room Temperature, Hot and Cold, and Radiative Heat Transfer*

牧野 俊郎 (京都大学)

*Toshiro MAKINO (Kyoto University)*

*e-mail: toshiro.makino.52s@st.kyoto-u.ac.jp*

\*) 本ファイルは発行後に気付いた誤記を改めた訂正版ですので、オリジナル原稿とはレイアウトが若干変わっております。(Watt & Edison)

#### 1. はじめに

伝熱学の実験研究では、温度の測定はいちばんの基礎になる。しかし、なかなかむずかしいものである。最先端の薄膜技術などというあたりでも、その性能を左右する基板の温度の測定は、実にいい加減である。基板の近くのどこかに被覆された熱電対を置いて、その指示を基板温度などと称していることが多い。それでは、室温の身近かな生活空間の温度なら正しく測れているかという、実はそうでもない。熱電対を壁にビニールテープで貼り付けて壁の温度を測ったつもりになっている、ふく射温度計の指示をそのまま信じて有効数字 2 桁の値を示してはばからない、そんな例が少なくない。

次に、ふく射伝熱である。伝熱の研究者なら、高温では、あるいは低温でも真空の環境ではふく射伝熱が優勢であるのは知っている。しかし、室温の環境においてもふく射伝熱がかなり効くことはあまり気づかれていない。平板に沿う流れによる熱伝達を詳細に調べる風洞実験の研究論文に、その平板をとり囲む壁の材質や温度が記述されることはないようである。しかし、それでよいのであろうか。

筆者は、なん年前前から、冬に浴室に入るときに寒いのが気になり始めた。歳をとったのであろうか。本稿では、このことについて少し説明し、適切な室温の測定法・ふく射伝熱のすごさについて、センスをもっていただこうと思う。

#### 2. 冬の浴室を温かく

都会のマンションでは、浴室は建物の北側の外気に接する部分に配置されることが多い。冬の日、浴室の空気の温度は浴槽の蓋を 10 min も開放しておけばある程度上昇するが、熱容量の大きい壁の温度は容易には上がらない。そこでは、体表面から空気への対流伝熱よりも体表面から壁へのふく射伝熱がはるかに優勢であり、それゆえ冬の浴室は寒い。

そもそも寒いというのは人間の感覚である。体表

面からエネルギーがそれまで以上に奪われて皮膚が冷えていくときにそう感じる。ふだん、とくに冬には厚く衣服を着ているが、浴室に入るときには、その衣服という壁をとり去って裸になり、冷えた浴室の壁に体表面を曝す。猛烈なふく射エネルギー流束が壁に向かう。そして、寒い。

以上は現象の分析であるが、われわれは工学者である。どげんかせんといかん。については、壁の前に熱容量の小さい壁/カーテンを設け、そのカーテンが空気で温められてふく射流束が抑えられるのを期待することにした。この目的のためのカーテンとしてもち出したのが、“ぷちぷち”である[1]。

“ぷちぷち”は、梱包用緩衝材のエアクッションであり、たとえば直径 10 mm、高さ 5 mm の円柱状の空洞をピッチ 11 mm で千鳥格子状に並べたもの(写真 1)であり、ホームセンターなどで幅 900 mm や 1200 mm のロールとして市販されているものである。いらいらするときには、その空洞を ぷちっ ぷちっ と潰して、こころの平静を得る。いろんな用途に使える。横文字で書くときには、“petit-petit”と書くことにしている。フランス語で かわいい などという意味の語である。ちなみに、“プチプチ”の呼び名は商標登録されてしまっているが、“ぷちぷち”はだいたいぶであるようである。

この“ぷちぷち”を浴室の壁の前に壁から少し離して垂らす。図 1 に示すようにである。貼っては効果が減じる。写真 2 は、“ぷちぷち”を垂らしたわが家の浴室のようすを示す。垂らしてみると、わが家の浴室はあまり寒くなくなった。家族の評判も悪くない。そこで、友人たちにはこれを勧めることにして、熱の学会でもお勧めしてきた。皆さんは納得して聴いて下さっているようではあるが、うちでもやってみたという話は聞かない。

これには、筆者にも反省すべき点があった。“ぷちぷち”が効くと言いながら、どの程度効くかという定量的なあたりについては何も言えない状態に

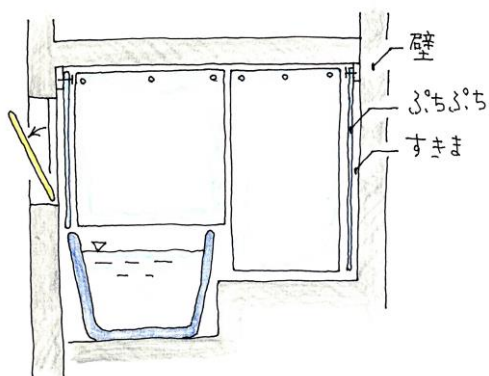


Figure 1 Bathroom with petit-petit sheets



Photo 1 petit-petit sheet



Photo 2 Bathroom with petit-petit sheets

あったからである。そこで、この冬には実験を試みることにした。もちろん、それは事例研究であり、事例の対象はわが家の浴室において他にはない。かくして、冬の浴室で体表面から失われるエネルギー流束を実験的に評価するにあたって、浴室の空気と壁の温度をいかにして測定するかを、改めて考えることになった。

### 3. 室温の空気と壁の温度の測定法

温度は平衡系の状態量であり、その測定はむずかしい。測定に精度よりは正確度を要する場合、室温の気体や表面の温度の測定もむずかしい。そのむずかしさは、温度計は温度計の温度を測る、ということに由来する[2]。

#### 3.1 気体の温度の測定法

測定したい空気の温度は、浴室や壁向こうの空気の(時間/空間)平均温度である。その測定では、細い熱電対よりは、水銀の標準温度計やアルコール温度

計を用いて、温度計の水銀やアルコールが周囲の空気と熱平衡になるのを待つのがよい。については、これで温度が正確に測定されるためには、温度計が周囲の壁によって冷やされることがあってはならない。周囲に冷えた壁があると、人間のみならず温度計も寒い。それゆえ、温度計の温度測定部に熱容量が小さく放射率も小さい壁/カーテンを設けて、その壁が空気の温度と同じ温度になり、温度計から冷えた浴室の壁に向かうふく射エネルギー流束が抑えられるようにすべきである。そのような熱容量の小さい壁としては、台所用の(公称)厚さ  $11 \mu\text{m}$  のアルミニウム箔を用いるのがよい。これを温度計の温度測定部にスカート状にとり付けて縫針で多数の小孔を穿孔する(写真 3)。このスカートは、温度測定部と周囲の壁との間のふく射伝熱を最小化し、温度測定部が周囲の空気と同じ温度になるように機能する。

そのあたりの空気は湿り空気であり、とくに浴室で浴槽の蓋を開けたままの状態では、その湿り空気は相対湿度が  $100\%$  に近い状態にある。温度計は、なるべく浴室より高い温度の部屋に置いていたものを測定の前に浴室に持ち込むようにし、結露、凝縮の影響を受けないように配慮するのがよい。

#### 3.2 表面の温度の測定法

固体表面の温度を測定するには、ふく射温度計を用いるのが簡便でよいという記述がどこかの教科書にあったが、お勧めできない。ふく射温度計は表面の温度を測るのではなく、表面から温度計にやって来るふく射を測るのである。測定されるふく射には温度測定の対象とする表面で放射されたふく射のみならず、他の表面で放射されてその表面で反射されて、その後にくく射温度計にやって来るふく射もしっかりと含まれている。たとえ温度測定の対象とする表面で放射されたふく射だけがふく射温度計にやって来たとしても、その表面の放射率が正確に指定されないと、その表面の温度が解るわけがない。すなわち、ふく射温度計を用いるのは、簡便でもやめておくのがよい。いえいえ、ふく射温度計以上に簡便で安価な方法がある。次を読んでほしい。

固体表面の温度の測定には、写真 4 に示す手づくりの表面温度測定プローブを用いるのがよい。そのプローブは、直径  $28 \text{ mm}$ 、長さ  $30 \text{ mm}$  の程度のコルク栓に直径  $100 \mu\text{m}$  の K 熱電対を渡し、熱電対の表面に厚さ  $11 \mu\text{m}$  のアルミニウム箔 (§ 3.1) を貼っ



Photo 3 Mercury/ alcohol thermometers with radiation shields



Photo 4 Probe for measuring surface temperature

たものである。アルミニウム箔は、表面と熱電対の間の熱抵抗を緩和する。熱電対とアルミニウム箔の熱容量は小さく、コルクの熱伝導性は低いので、プローブと壁表面の間の熱平衡は容易に達成される。このプローブを表面に軽く押し付けて約3s後に表面の温度を測定する。“ぷちぷち”などの柔軟性のある表面の温度は発砲スチロール板を“ぷちぷち”などの裏面に置いて測定するのがよい。熱電対の零接点は(氷シャーベット+水)に浸して実現するのがよい。氷シャーベットは、家庭用の手回しのかき氷製造機で作る。これには、力と根気が要る。

ところで、このコルク栓の温度測定プローブを教わったのは、30年くらい前に東北大学の岡田茂盛先生が京都大学の化学工学教室でお話されたときのことであった。先生のそのときのお話の主題については、申し訳ないが、全く憶えていない。しかし、このプローブのことはいまも鮮明に憶えている。大谷先生の後継の三浦隆利教授にお尋ねして、この測定法を紹介する文献[3]を教えてください。

### 3.3 熱流束の評価

浴室における体表面から空気への対流伝熱の熱流束は、空気(時間/空間)平均温度と体表面の温度と(自然対流)熱伝達率によって評価される。体表面の温度は、生活環境科学の分野で快適と感じる温度とされてきた33℃であるとする[+]。空気の平均温度は、空気の流れがほとんどない実験空間に、注目する垂直平板の表面が周囲の壁と同じ温度になるように調整された条件/ふく射伝熱の影響が無視できる条件を実現して、§3.1に示した方法で測定した。表面の温度は、§3.2に示した方法で測定した。表面の熱伝達率 $h$ は $h=4.9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ と評価された。

### 3.4 ふく射流束の評価

いっぽう、体表面から浴室の壁に向かうふく射流

束を評価するには、浴室を構成する多数の壁と体表面の温度と放射率を地道に測定し、伝熱学の教科書[4]にある、要素表面の温度と放射率と形態係数を用いるふく射エネルギー交換の方法で、ふく射流束を計算するのがよい。世にはふく射流束計というものがあるが、便利そうであるが、よろしくない。その測定器が測定するのは射度(radiosity)[4]であって、いま評価したい正味の流束(net flux)ではないからである。

浴室の壁の温度は、§3.2に示した方法で測定した。教科書のふく射エネルギー交換の方法における放射率は、本来は分光半球放射率であるべきであるが、室温の表面どうしのふく射エネルギー交換については、全半球放射率で代用しても、そう悪い近似にはならない。そこで全半球放射率を知りたいが、そのあたりの室温の表面の1つずつについて全半球放射率のデータはないし、まともな測定器もない。まともな測定器がない理由は簡単で、ふく射エネルギー交換の方法に現れる放射率が半球放射率であることが、実は伝熱学の研究者にもよく理解されていないからである。ならば作ろう。全半球放射率測定器を開発した[5]。開発した測定器は、ペルチェ素子で裏面から冷却したふく射流束計を室温の試料表面に近接させて、そこでのふく射エネルギー交換量を測定する方式のもので、ふく射流束計の表面の全半球放射率も考慮するものである。浴室の壁や体表面の全半球放射率は、この測定器で測定した。

## 4. 浴室での実験

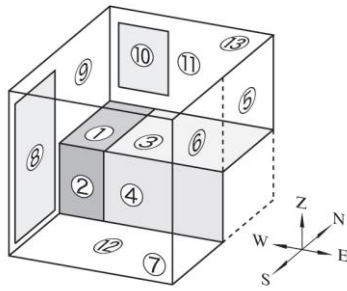
### 4.1 浴室の概要

実験は、京都市内の集合住宅の3階の1室の北側に面する浴室で行った。浴室は $w1150\times d1670\times h2100\text{ mm}$ の広さのものである(図2)。北側の壁に $w520\times h640\text{ mm}$ の窓⑩がある。窓のある北壁⑪と東壁⑤、⑥の裏面は外気に面している。窓⑩は、おもに換気のために、常に上部の高さ280mmの部分を半開きになっている(cf. 図1)。浴室の壁には“ぷちぷち”を壁から15mm程度離して垂らす。“ぷちぷち”は、浴室の入口の扉⑧を除き、浴室の側壁を窓⑩を含めて覆う。

### 4.2 実験の日の天気

実験は、2009年2月18日の夜21:13~23:46に行った。翌日の新聞によれば、その日は「最高気温9.9℃(平年9.6℃)、最低気温-0.1℃(平年1.5℃)、





- ① 湯沸器上面      ⑥ 東壁      ⑪ 北壁
- ② 湯沸器側面    ⑦ 南壁      ⑫ 床/洗い場
- ③ 浴槽            ⑧ 入口扉    ⑬ 天井
- ④ 浴槽側面      ⑨ 西壁
- ⑤ 東壁            ⑩ 窓 ...半開き

Figure 2 Sketch of bathroom

晴」であった[6]. 実感では、しかし、この冬は平年に比べて暖かかった.

### 4.3 実験の手順

実験の日には、まず、冬にはいつも垂らしている“ぷちぷち”を 19:50 にいったん巻き上げ、その約 140 min 後から、壁と空気の温度を測定した. ついで、“ぷちぷち”を垂らし、“ぷちぷち”の表面の温度を測定した. その後、浴槽の蓋を外して湯張りを始め、その約 40 min 後に、“ぷちぷち”の裏になった壁を含む壁と空気の温度を測定した. また、“ぷちぷち”の表面の温度を測定した.

## 5. 冬の浴室の熱・ふく射環境

### 5.1 実験の結果

実験の結果を図 3 に示す[2]. 図 3 は、浴室の壁を展開図的に表示するものであり、湯張り前後の浴室の壁の温度を記号 → の前後に℃の単位で表す. → の行を 2 段に示す壁(側壁⑤~⑪)については、上段が“ぷちぷち”の設置がない場合、下段が“ぷちぷち”の設置がある場合を表す. 図中の $\epsilon$  は各要素表面の全半球放射率の測定結果である. これらの値は新しく求めたものである. とくに人体の表面(皮膚)の値  $\epsilon=0.97$  は貴重である.

### 5.2 壁と空気の温度分布とその変化

外気温は 5.0→5.0℃であったが、壁裏が外気に面する壁⑪、⑤、⑥の温度は、夜が更けると、浴槽に湯張りし浴室の気温が 12.6→18.7℃と上昇しても、むしろ低下した. いっぽう、“ぷちぷち”の表面の温度の変化は小さかった. すなわち、湯張り前には浴室の気温より高く、湯張り後には浴室の気温の程度になった.

### 5.3 ふく射伝熱の計算

図 3 の実験結果に基づいて、人体から浴室の壁へのふく射伝熱量を計算した. 灰色・完全拡散流束近似が成立し、形態係数と全半球放射率を用いる方法 (§ 3.4)が有効であるとした. ただし、わが家の浴室の構造(図 2)を厳密に計算に反映させる意味はほとんどないので、ふく射伝熱の計算は図 4 に示すようなもっとも簡単な 2 体間ふく射エネルギー交換

09.02.18. 22:13/22:48 → 23:27/23:46		ceiling ⑬ (塗装面) $\epsilon = 0.84$ 13.7→14.3		トイレ 10.5→10.6 ⑨ (タイル)裏 13.8→10.2			
外気 5.0→5.0 ⑥ (タイル)裏 8.1→5.2				洗面所 18.0→ ⑧ (塗装面)裏 18.9→16.2			
E		S		W		N	
⑤ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 9.9→8.9 16.9→16.2	⑥ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 10.4→9.2 16.9→16.6	⑦ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 13.4→11.5 17.4→18.1		⑧ (塗装面) $\epsilon = 0.84$ 15.4→16.0 15.4→16.0	⑨ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 12.6→11.1 18.1→18.2	⑩ (ガラス) $\epsilon = 0.86$ 10.9→12.7 19.1→18.7	⑪ (タイル) $\epsilon = 0.91$ 10.1→9.2 19.1→18.4
(浴槽)		petit-petit $\epsilon = 0.48$		door		(浴槽)	
		floor ⑫ (タイル) $\epsilon = 0.97$ 12.1→10.0		浴室 12.6→18.7		② (SUS) $\epsilon = 0.31$ 19.7→24.5	
		③ (plastic/湯) $\epsilon = 0.79/0.96$ 13.1→43.2		(人体 $\epsilon = 0.97$ )		④ (plastic) $\epsilon = 0.79$ 12.5→24.3	
		① (SUS) $\epsilon = 0.31$ 14.5→27.3					

Figure 3 Distribution and change of temperatures of walls and air in and around bathroom

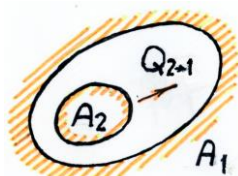


Figure 4 Simplest model for radiation energy exchange among surfaces

のモデルをもってすることにした。すなわち、浴室の壁を温度  $T_1$  と全半球放射率  $\epsilon_1$  が一様なくぼみのない閉曲面 1 であるとし、裸の人体を温度  $T_2$  と全半球放射率  $\epsilon_2$  が一様な凸面だけで構成される壁面 2 であるとして、人体 2 から浴室の壁 1 へのふく射伝熱量  $Q_{2-1}$  [単位: W] を、もっとも簡単な計算式[4]、

$$Q_{2-1} = \sigma(T_2^4 - T_1^4)A_2 \left\{ \frac{1}{\epsilon_2} + \left( \frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \frac{A_2}{A_1} \right\} \quad (1)$$

で計算した。ただし、式(1)中の全半球放射率や温度を評価するためには、次の加重平均の式を用いた。

$$A_1 = \sum_i A_i \quad A_2 = \sum_j A_j \quad (2)$$

$$\epsilon_1 A_1 = \sum_i \epsilon_i A_i \quad \epsilon_2 A_2 = \sum_j \epsilon_j A_j \quad (3)$$

$$\epsilon_1 \sigma T_1^4 A_1 = \sum_i \epsilon_i \sigma T_i^4 A_i \quad \epsilon_2 \sigma T_2^4 A_2 = \sum_j \epsilon_j \sigma T_j^4 A_j \quad (4)$$

ここで、下つき添字  $i, j$  は、それぞれ浴室の壁 1 と人体 2 を構成する要素表面を表す。浴室の壁の総面積  $A_1$  は  $14.7 \text{ m}^2$  である。人体の表面の温度  $T_2$  は  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ 、体表面積  $A_2$  は  $1.20 \text{ m}^2$  であると仮定した。人体の全半球放射率  $\epsilon_2$  には測定値  $0.97$  を用いた。

### 5.3 計算の結果のまとめ

計算の結果を表 1 にとりまとめる。壁 1 の温度は式(4)で計算される  $T_1$  である。湯張り後でも“ぷちぷち”の設置がない場合には、人体から壁へのふく射伝熱量は  $130 \text{ W}$  の程度になる。いっぽう、対流伝熱量は  $80 \text{ W}$  の程度であり、ふく射伝熱量の方が大きい。男子学生は 1 日に  $2500 \text{ kcal}$  のエネルギーを摂取するといわれているが、これを  $24 \text{ h}$  で平均すると  $120 \text{ W}$  になる。その 2 倍に近いエネルギーが浴室で一挙に放出されると、これは若い学生でも寒いはずである。ご老体には、寒いでは済まない。いっぽう、“ぷちぷち”を設置すると、そのふく射伝熱量/人体からのエネルギー損失をいくぶんかでも軽減することができる。

“ぷちぷち”を浴室に垂らしてみる価値は十分にある。さあ、やってみよう。ところで、式(1)で放射率  $\epsilon_1$  を小さくすれば、ふく射伝熱量  $Q_{2-1}$  は小さく

Table 1 Radiation energy loss from a human body

“ぷちぷち”の設置がない場合					
〈湯張り前〉			〈湯張り後〉		
(壁)	(人体)	(空気)	(壁)	(人体)	(空気)
$13^\circ\text{C}$	$\leftarrow 33^\circ\text{C}$	$\rightarrow 12.6^\circ\text{C}$	$14^\circ\text{C}$	$\leftarrow 33^\circ\text{C}$	$\rightarrow 18.7^\circ\text{C}$
140 W		120 W	134 W		84 W
(ふく射伝熱)		(対流伝熱)	(ふく射伝熱)		(対流伝熱)
“ぷちぷち”の設置がある場合					
〈湯張り前〉			〈湯張り後〉		
(壁)	(人体)	(空気)	(壁)	(人体)	(空気)
$16^\circ\text{C}$	$\leftarrow 33^\circ\text{C}$	$\rightarrow 12.6^\circ\text{C}$	$18^\circ\text{C}$	$\leftarrow 33^\circ\text{C}$	$\rightarrow 18.7^\circ\text{C}$
116 W		120 W	101 W		84 W
(ふく射伝熱)		(対流伝熱)	(ふく射伝熱)		(対流伝熱)

なるので、垂らすのは“ぷちぷち”より  $\epsilon_1$  の小さいアルミニウム箔のほうがよさそうである。しかし、あまりお勧めできない。気持ちよくお風呂に入ること重要であるからである。

## 6. デスクヒーターと冬の駐車場

これまでには、「浴室を温かく」というテーマを挙げて、われわれのふだんの生活環境においてもふく射伝熱は重要であり、また、それに対処するためにささいな工夫が可能であることを述べた。まだ紙面に余裕があるので、冬を温かく暮らすためのふく射伝熱の工夫について、もう少し述べる。

### 6.1 冷え症の強～い味方

冬の日椅子に座って仕事をしていると、冷え症でなくても、脚が冷える。しかし、こんども空気を温める必要はない。注目すべきは壁の温度である。



Figure 5 Desk heater, keeping her head cool and legs warm

については、デスクヒーターなる商品がある[7]。図5に示すような屏風状のついたての表面を40℃くらいに温めるものである。脚の周囲に温かい壁を設けて、空気ではなくにわか作りの壁を温め、そして、脚をふく射でポカポカと温める。わずかに135Wの電力で“頭寒足熱”を実現してくれる。価格は1万円くらいである。ふく射伝熱の妙である。

### 6.2 車のフロントガラスの凍結

冬の朝、駐車場に停めたわが家の車のフロントガラスが凍結していることがよくある。私の住む京都ではこのなん年か最低気温が0℃を下回ることはまれなのに、である。また、凍結は車のフロントガラスで起こり、車の屋根はフロントガラスほどには凍らない。なぜか？この現象に注目するきっかけを下さったのは一関高専の佐々木世治先生であった。現象を説明するキーワードは、低温の天空へのふく射の放射(emission of radiation)である。ほかに考えるべきあたりを表2にまとめる。さて、工学/実践であるが、佐々木先生には、“駐車場には常緑樹を植えよう！”とのご提案があった(図6)。荒木信幸先生には、“私の車はわが家に向けて停めている”とのことであった。世には、よ〜く考えて、そ



Figure 6 Frozen front glass of a car in a winter environment

して行動する方もおられる。

### 7. まとめ

室温の気体・表面についても、温度の測定はむずかしい。こころして当たるべきである。室温の空間でもふく射伝熱の寄与はすごいことがある。しかし、ささいなふく射伝熱の工夫がわれわれの生活環境を改善してくれることがある。注目すべきは、空気の温度というより、むしろ“壁”の温度であることが多い。

本研究経費の一部は科学研究費補助金(萌芽研究19656057)によった。

### 文献と注

- [1] <http://leaf-me.eng.hokudai.ac.jp/JSTP/pdf/SKmakino.pdf>
- [2] 牧野俊郎: 冬の浴室の壁の温度分布とその壁と体表面との間のふく射伝熱, 第46回日本伝熱シンポジウム講演論文集, vol.II+III, pp.511-512, 2009.
- [3] 武山斌郎・大谷茂盛・相原利雄: “大学講義 伝熱工学”, pp.26-27, 丸善, 1983.
- [4] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P.: “Introduction to Heat Transfer”, pp.585-640, Wiley, 1985.
- [5] 若林英信・佐藤啓太・千田尚之・牧野俊郎: 室温の表面の全半球放射率測定器の開発, 第46回日本伝熱シンポジウム講演論文集, vol.I, pp.77-78, 2009.
- [6] 京都新聞, 朝刊, p.3, Feb. 19, 2009.
- [7] [http://panasonic.co.jp/ha/info/important/desk\\_heater/index.htm](http://panasonic.co.jp/ha/info/important/desk_heater/index.htm)
- [+] 冬の浴室に入って1 min 程度の間の温度としては、すこし高めかもしれない。

Table 2 Energy balance of a car in a winter environment

