

第1章 環境・伝熱

1.1 屋内外の環境

(A) 地球温暖化、ヒートアイランド現象

(1) 地球温暖化

地球は、太陽光のエネルギーを受けて温められている一方、この温められた熱エネルギーを宇宙空間へ放出している。この双方の反復運動がバランスよく行われることによって、我々人類が住みやすい平均した温度が保持されている。

ところが、二酸化炭素（ CO_2 ）などの温室効果ガスの濃度が上がると、温められた熱を宇宙空間に放出する運動が妨げられ、地球が温室バリアーで包まれた状態になり、地表の温度が必用以上に上がってしまう地球温暖化とは、このように、地球表面の大気や海洋の平均温度が長期的に見て上昇する現象である。地球温暖化は、人間の産業活動に伴って排出された温室効果ガスが主因となって引き起こされている。

(2) ヒートアイランド現象

ヒートアイランド現象は、都心部の気温が郊外に比べて島状に高くなる現象で、例えば、東京においては過去 100 年間に年間の平均気温が約 3°C 上昇するなど、大都市において特に顕著にあらわれている。なお、都心部と郊外との温度差は $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ あるといわれている。

その主な原因を示すと

- ① アスファルトの道路は昼間の太陽の熱射で深層まで高温となり、夜間に蓄積された熱が放出される。
- ② 樹木は、大量の水を空气中に吐き出している。緑地面積が小さくなると、植物や地表からの水分の蒸発量が減少し、蒸発潜熱が減少する。
- ③ 都市への人口集中によって、各種のエネルギー使用量が増え、排熱量が増加する。
- ④ 高層建築物などの壁面で多量反射するため、都市の構造物が加熱されやすくなる。

なお、ヒートアイランド現象の緩和には、緑化の推進などが有効であるとされている。なぜなら、緑には、その蒸散作用などによって、気温の上昇を抑える効果があるからである。

また、都市部にある建築物の屋上に高反射性塗料を塗ることにより、ヒートアイランド現象を抑制する効果が期待されている。

(3) 湿度

湿度は、大気中に含まれる水蒸気量を示すもので、気象上は相対湿度で表されるが、空気調和負荷計算などでは絶対湿度が用いられる。

湿度の日変化は、気温の日変化と、ほぼ逆の状態になる。これは、大気中に含まれる水蒸気量があまり日変化しないのに対して、日中の気温が上昇することによって飽和水蒸気量が増大し、その結果、湿度が低下するためである。一方、湿度の年変化は、夏期に高く、冬期に低くなるので、とくに夏期は高温多湿となって、不快な気候状態となる。

気温と湿度は、人々の生活に影響するところが大きく、建築物に対しても、結露を生じさせる要因となるなど、快適性や良好な衛生環境を保持する上で、さまざまな作用を及ぼす。

図 1.1 は、月平均の気温と湿度をプロットし、12 ヶ月を結んだもので、クリモグラフという。気候図の一つで、地球上での各地域における気候の特徴を把握するのに便利である。

(B) 風と気圧

(1) 風

風は、風向と風速でその性質が決まる。風向とは、風の吹いてくる方角をいい、一般に図 1.2 のように 16 方位で表される。

わが国の風向は、夏期には太平洋側の高気圧から中国大陸側の低気圧に向かって吹き、冬期には逆に大陸側から太平洋側に吹くことが多い。しかし、地上近くを吹く風は、地形や障害物によって一定した風向にならない場合がある。

風速は、空気の流れの速さを示し、メートル毎秒 [m/s] で表示され、風速データは、測候所等の地上 10 [m] 以上の高さの開放した場所での観測地で、市街地の低層建築物と風通しの良い高台や高層建築物での風速はかなり異なり、補正を必要とする。図 1.3 に示すように、ある場所で吹く風の状態を表したものを風配図といい、もっとも頻度の高い風向を最多風向あるいは卓越風という。

建築物に風があたると、風上側ではその表面に圧力が加わり、風下側では圧力が減じられて、

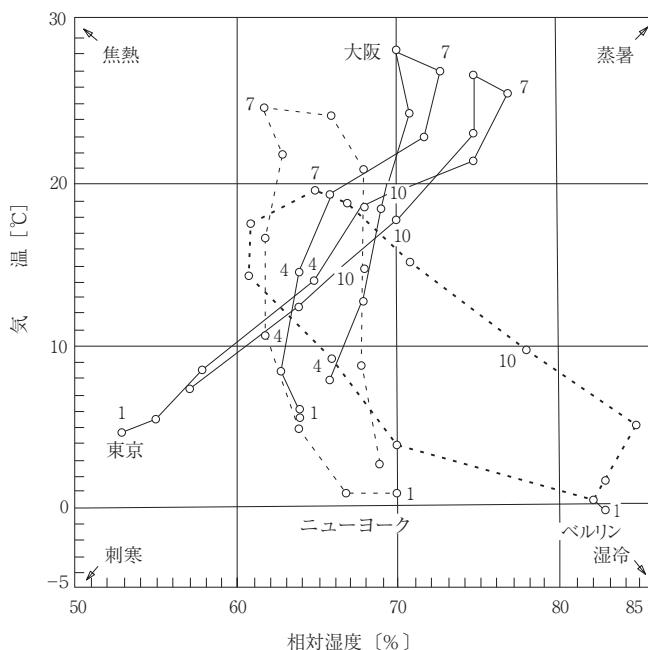


図 1.1 クリモグラフの一例

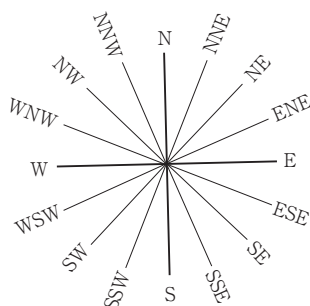


図 1.2 風の 16 方位

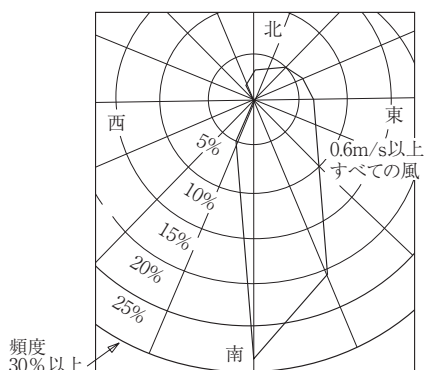


図 1.3 東京における風配図の例（8 月、午後 2 時の計測例）

建築物にいろいろな方向からの力が加わる。このような建築物に作用する力を風圧力といい、局地的な強風や突風、さらに台風などによって大きな被害を受けやすい。それを防ぐには軒の出を浅くしたり、屋根勾配を緩やかにするほか、屋根ぶき材料が飛散しないように下地を緊結するなどの配慮が必要である。

また、高層建築物の周辺では、その建築物によって風向や風速が変化して、局地的な強風が起こり、付近の建築物に被害を及ぼすことがある。これがいわゆるビル風である。ビル風は、高層建築物や大規模な建築物群周辺の狭い範囲で発生するもので、建築物の形状・配置や周辺の状況などにより、非常に複雑な風の流れとなる。ビル風の評価には、風速増加率を用いる。風速増加率は、計画建築物の建設前における風速と計画建築物の建設後における風速の比のことである。ビル風は、時として風害となりうる。これを防止するには、外壁の出隅部分を曲面にするなど工夫して、周辺への影響を少なくする。また、隅角部では、建築物の壁面に沿った風の流れが、隅角部で建築物から離れる現象を、一般に、剥離流れという。つまり、剥離流は、風は建築物にあたると、壁面に沿って流れていくが、建築物の隅角部のところまで来ると、それ以上壁面に沿って流れることができなくなり、建築物から剥がれて、流れ去っていく。この建築物の隅角部から剥がれた風は、その周囲の風よりも早い流速をもち、ビル風の現象のひとつといわれている。なお、剥離流以外のビル風の現象としては、吹き降ろし、逆流、谷間風、開口部風、街路風の渦領域、吹き上げなどの現象がある。さらに、強風によって超高層建築物などに生じる振動（揺れ）は、水平変位が大きい場合もあり、人によっては船酔いの症状を起こすことがある。

(2) 気圧

大気中においては、地上の物体表面に働く圧力で、単位水平面積上にある上空までの大気の重量によって決まる。一般に、水銀柱の高さ 760 [mm] の場合を 1 気圧とする。SI 単位系では、圧力を Pa（パスカル）で表す。

(C) 気温と湿度

(1) 気温

人々の生活は、その地域の気候から、いろいろな影響を受ける。とくに、気温は、大気中の空気の温度をいい、室内温度に対しては外気温、湿度を求めるために乾湿計のガーゼを巻き湿した方の示度である湿球温度に対しては乾球温度という。外気温は放射などの影響がないように百葉箱内に設けた温度計で測定する。

気温は、太陽エネルギーなどの影響で絶えず変化し、季節によって、1 年を周期とする年変化と、1 日を周期とする日変化を繰り返す。気温の日変化は日の出のころに最低となり、以後上昇して午後 2 時頃最高となる。1 日の最高気温と最低気温との差を日較差といい、その地域の気温の日変化の程度を表すものである。わが国では、どの地域でも、ほぼ 10℃ 前後で、比較적おだやかな日変化を示す。また、晴天日は昼間の受熱量も多いが、夜間放射も大きく、曇った日より日較差が大きくなる。

気温の年変化を年較差といい、一般に月別平均気温で示される。年較差とは、年間の最高気温と最低気温との差のことである。一般に、高緯度地域ほど大きくなる傾向といえるが、この違いは、主として冬期の温度によって生じる。各地域によって、月別平均気温による年変化の程度は異なり、札幌で約 26℃、東京約 22℃、鹿児島約 21℃、那覇約 12℃ で、緯度の高低によって差が

ある。

(2) デGREEデー（度日、Degree-day）

冬期、建築物における暖房に必要な熱量、あるいは燃料費などを計算するときには、デGREEデー（度日、Degree-day）を用いる。つまり、暖房をある設定温度とした場合、屋外における気温の日平均が、設定温度よりも低くなった日について、気温と設定温度との差を求め、これを全冬期間にわたって積算し、各地の寒さの目安としたもので、 $D_{28-18}=30000$ （暖房時の設定温度を28℃とし、18℃以下の日に暖房する場合の度日数は3000）など并表示する。なお、デGREEデーの単位は $[\text{℃} \cdot \text{day}]$ である。なお、デGREEデーは冷房の期間でも設定可能である。

1.2 温熱環境

(A) 快適条件（温熱条件）

人体は常に熱を発生している。その熱を発散しすぎると寒く感じ、発散が足りないと暑く感じる。

人間の体感、すなわち、暑さ寒さの感覚は、基本的には温度、湿度、風速、放射（周囲壁面からの放射）の四つの要素による。環境4要素は室内環境の物理的要素である。そして、さらに室内快適環境を検討する場合に、人間側の要素の作業量〈メット値〉、着衣量〈クロ値〉を加えて、環境6要素という。環境要素を表す尺度の関係を表1.1に示す。なお、表中の△は、多少なりとも尺度に考慮されることを表す。

(B) 不快指数（Discomfort Index, DI）

快適環境の評価で最も簡単なものが不快指数で、気温（乾球温度）と湿球温度（湿度の指標）から求める

$$DI=0.72(\text{乾球温度}[\text{℃}]+\text{湿球温度}[\text{℃}])+40.6$$

これは夏期における屋外の蒸し暑さしか示すことができない。

DIの値が75以上で「やや暑さを感じる」、80以上で「暑くて汗が出る」、85以上で全員「不快」とされる。

(C) 作用温度（Operative Temperature, OT）

気温、気流、放射の影響を数値化することによって、体感温度を示す尺度であり、湿度の影響は加味しない。一般に、発汗の影響を小さい環境下における熱環境に関する指標として用いられ、

表 1.1 環境要素を表す尺度

	温度	湿度	風速	放射	作業量	着衣量
不 快 指 数	○	○	×	×	×	×
作 用 温 度	○	×	○	○	×	×
有 効 温 度	○	○	○	×	×	×
修 正 有 効 温 度	○	○	○	○	×	×
新 有 効 温 度	○	○	○	○	△	△
標 準 新 有 効 温 度	○	○	○	○	○	○
PMV（予測平均申告）	○	○	○	○	○	○

空気温度と平均放射温度の重み付け平均で表される。たとえば、無風（0.2m/s 以下）の場合における作用温度（OT）は、次式のように、気温（ T_i ）と平均放射温度（MRT）との相加平均に等しくなる。主に放射暖房の設計に使用されている。

$$OT \equiv \frac{T_i + MRT}{2}$$

T_i ：気温（室温）、MRT：平均放射温度（Mean Radiant Temperature）

ここで、平均放射温度（MRT）とは、温度が異なる壁体に囲まれた人体表面の放射熱取得量と、これに等しい放射熱が取得できるような室の均一な放射温度をいう。近似的には、室内の平均表面温度となるが、厳密には在室者の位置などで異なる。なお、平均放射温度（MRT）は、グローブ温度、空気温度及び気流速度から求められる。

作用温度は、主に発汗の影響が小さい環境下における熱環境に関する指標として用いられ、空気温度と平均放射温度の重み付け平均で表される。

(D) 有効温度（ET）

これは、ヤグローなどによって研究されたもので、感覚温度、実効温度ともいわれている。有効温度は、室内空気の温度、湿度、風速の三つの要素の組合わせから図表によって求める体感から示す一つの尺度である。この三要素の組合わせによる体感とまったく同じ体感を与える湿度 100%、風速 0 のときの気温で表す。たとえば、ET20℃というのは、20℃、100%、無風時と同等に感じる、あらゆる温度、湿度、風速の組合わせの状態を示すもので、多数の被験者を使つての実験から導き出された指標である。ET17℃～20℃の範囲を快感帯、特にそのなかで湿度 40%～60%の範囲を最適快感帯という。

(E) 修正有効温度（CET）

有効温度（ET）は、周壁の放射の効果を考えていないので、乾球温度の代わりにグローブ温度を用いて図表によって求める。すなわち、温度、湿度、風速、放射熱によって体感を表す。

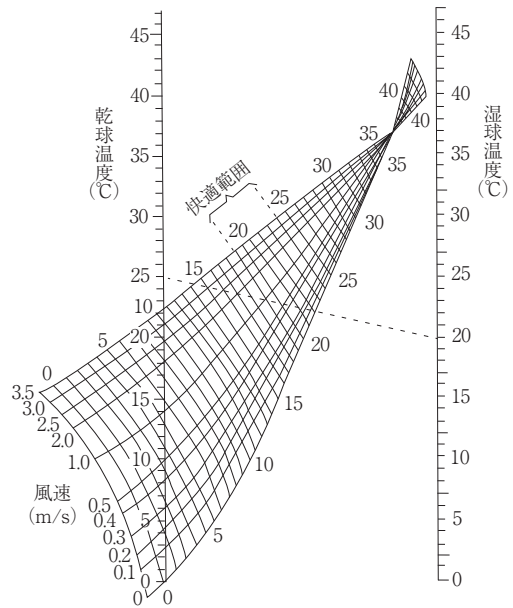


図 1.4 有効温度表（静止して上着を脱いだ場合）
（日本建築学会編『建築設計資料集』）

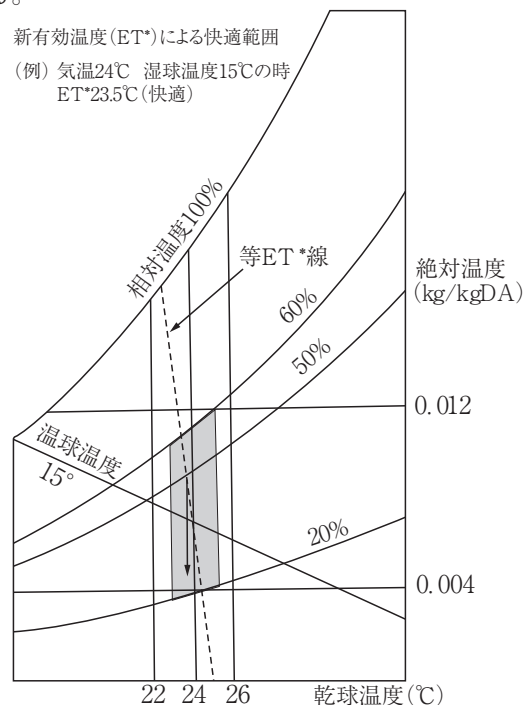


図 1.5 新有効温度（ET*）のイメージ

(F) 新有効温度

新有効温度（ET*、イーティースター）は、温熱4要素を室内環境の要素とし、これに人間側の要素として作業量、着衣量を加えたものである。有効温度は湿度100%を基準にしているが、新有効温度は湿度50%、風速0m/sを基準としている。新有効温度は、椅子に座っている状態（作業量）で、ワイシャツ程度の軽装（着衣量）の人に適用されるものである。

(G) 標準新有効温度

標準新有効温度（SET*、エスイーティースター）は、温熱4要素に加え、作業量、着衣量も考慮した指標である。新有効温度（ET*）は、任意の作業量、着衣量で個々に算出され、同一の作業量、着衣量の時だけしか快適度を比較できない。そこで、標準新有効温度は、相対湿度50%、椅子に座った状態、着衣量0.6clo、風速0m/sの状態に標準化して、異なる作業量、着衣量の時にも、それぞれの快適度を比較できるように工夫した指標である。SET*では、22.2～25.6℃が快適許容できる範囲である。なお、SET*が20℃の場合であっても、必ずしも温冷感は「快適、許容できる」という範囲になるとはいえない。

(H) PMV（予測平均温冷感申告）とPPD（予測不満足者率）

デンマーク工科大学のファンガー（P.O.Fanger）教授が、1967年に快適方程式の導出を発表し、これを出発点として人体の熱負荷と人間の温冷感を結びつけたPMV（Predicted Mean Vote、予測平均温冷感申告）およびPPD（Predicted Percentage of Dissatisfied、予測不満足者率：その温熱環境に不満足・不快を感じる人の割合）の提案をし、ISO7730（1994）ともなっている。

人体の熱的快適感に影響する要素は、室内の温熱感覚に関係する六つであるが、PMVは、室温、放射温度、相対湿度、気流速度の四つの物理的要素と、人間側の要素である在室者の着衣量と人体の代謝量といった二つを考慮した温熱環境指標である。

これらの要素に関して、その複合効果を、どのように評価するかについての理論である。快適方程式に、この六つの要素を代入すると、人間が、その時、暖かいと感じるか、寒いと感じるかを「7段階の評価尺度による数値」で表している。

予測平均温冷感申告（PMV）は、主に均一な環境に対する温熱快適指標であるため、不均一な放射環境、上下温度分布が大きな環境および通風環境に対しては適切に評価できない場合がある。一方、予測不満足者率（PPD）は、人間が、ある暑い寒いの状態の時に何%の人が、その環境に不満足かを表すのに用いられる。なお、この指標は、執務空間など、通常、人が、居住する比較的、快適温度範囲に近い温熱環境を評価するのに適している。PMVが-2から+2の範囲

表1.2 PMVの適用範囲と7段階の基準値

PMVの適用範囲		PMVの7段階の評価尺度	
PMV	-2 < PMV < +2	+3	Hot 暑い
代謝量	0.8～4met	+2	Warm 暖かい
着衣量	0～2clo	+1	Slightly warm やや暖かい
空気温度	10～30℃	0	Neutral 中立
平均放射温度	10～40℃	-1	Slightly cool やや涼しい
平均風速	0～1m/s	-2	Cool 涼しい
相対湿度	30～70%	-3	Cold 寒い

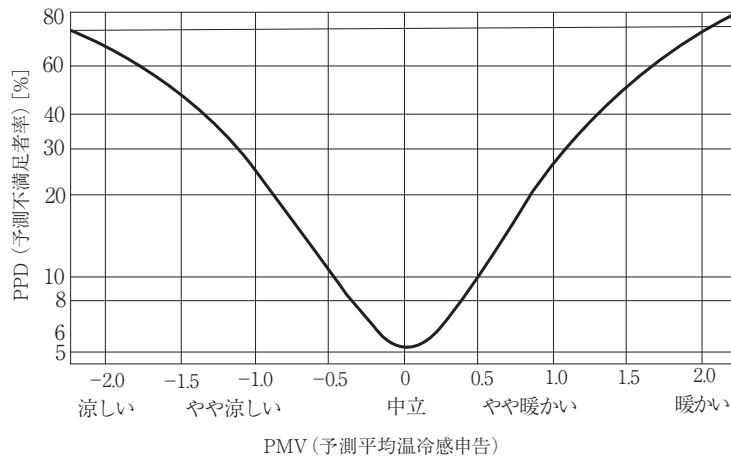


図 1.6 PMV と PPD の関係

内の温熱環境評価に用いるのがよいとされている。予測平均温冷感申告（PMV）の値が0に近づくに従って、予測不満足者率（PPD）は低くなる。ISO7730（1994）では、PMVが ± 0.5 以内に収まり、かつ、PPDが10%未満となるような温熱環境を推奨している。

(I) 熱的快適性と局所的不快感

熱的快適性は「その温熱環境に満足を示す心の状態」として定義されるが、快適と感じる温度には個人差があるために、在室者の少なくとも80%が許容できる温熱環境とされている。

高齢者は代謝量が低下するので、やや高い温度が好まれ、実際の生活環境下では女性のほうが一般的に着衣量が少ないこともあり、女性のほうが男性よりも寒さを感じやすい。

また、次のような局所的な条件によって不快感を感じることもある。

(a) 周辺からの放射

暖かい天井、壁に対する周辺からの放射の不均一の限界は 5°C 以内、冷たい窓面に対する周辺からの放射の不均一の限界は 10°C 以内とされる。開口部（冷たい窓面）の断熱性が重要となる。

(b) 気流の乱れ・ドラフト

夏期には気流を増すことによって、涼感を得ることができるが、気流を増加させすぎるとドラフトを感じる。ドラフトとは「望まれない局部気流」と定義されるが、特に温度の低い冷たい気流によるドラフトは、コールドドラフトと呼ばれ、実際の温度以上に寒さを感じることになる。室内の気流の乱れは、冬期 0.15m/s 以下、夏期 0.25m/s 以下がドラフトに対する許容限界とされる。

(c) 室内の上下の温度

椅座（いす座）位の場合、くるぶし（床上 0.1m ）と頭部（床上 1.1m ）の上下温度差は、 3°C 以内とすることが推奨されている。

(d) 床面温度

通常の室内の床面温度としては、 $19 \sim 26^{\circ}\text{C}$ が推奨され、床暖房装置がある時でも、その表面温度は 29°C 以下とすることが勧められている。特に体温よりも高い表面温度による暖房は、低温やけどを起こす危険があり、避けるべきである。

(e) 温度変動

周期的な温度の変動は、その変動の許容範囲として、1.1℃以内、また、温度変動率では2.2℃/hを超えないこととされている。また、冷たい壁面による温熱の局所的な不快感を防ぐためには、放射の不均一性（放射温度の差）を10℃未満にすることが望ましい。冷暖房機器は、一般に、外部負荷の少ない場所に設置するより、外部負荷の多い窓付近に設置するほうが、良好な室内の温熱環境が得られる。

(J) 人体からの発熱

人体からの熱放散は、放射・対流・蒸発・飲食・呼吸・排泄物などによるが、人体からの発熱は室温を上げる顕熱と水蒸気を発生することによる潜熱とに分けることができる。例えば、空気調和の熱負荷では顕熱と潜熱に分けて扱っている。安静時には顕熱による発熱の比率が高いが、重作業になるほど潜熱による発熱の比率が高くなる。

(a) 顕熱

人体からの放射伝導などによるもので、安静時室温24℃のとき約58W/人である。重作業時には130W/人以上となる。

(b) 潜熱

人体からの水蒸気の蒸発による潜熱は、室温の高低、作業の状態などによって差は大きく、通常23～46W/人であるが、重作業時には210W/人以上にも達する。つまり、作業の程度に応じて代謝量が増えるにつれて、人体からの総発熱量に占める潜熱発熱量の比率は、一般に、増加する傾向にある。

(K) 作業量（代謝量）

作業量（代謝量）として、人体の代謝熱量を単位met（Metabolic Equivalent、メット）という運動強度を示す単位で表すことができる。椅座（いす座）位の安静時には身体表面積1m²当たり58.2W

の発熱量があるので、これを基礎代謝として1metとする。立って軽作業をしている時は2met、重労働時では6met以上と増大する。なお、着席安静時における日本人の標準的な体格の成人男性の作業量（代謝量）は、約100W/人である。

表 1.3 人体からの放射熱量

作業状態	met	放射熱量 (W)		
		顕熱	潜熱	合計
いす座（安静時）	1.0	70	23	93
重作業（工場等）	3.7	162	210	372

(L) エネルギー代謝率

エネルギー代謝率（Relative Metabolic Rate, RMR）は、労働代謝の基礎代謝に対する比率で表され、人間の作業強度を表す指標である。

$$\begin{aligned} \text{エネルギー代謝率} &= (\text{活動時総代謝量} - \text{安静時代謝量}) / \text{基礎代謝量} \\ &= \text{活動(労働)代謝量} / \text{基礎代謝量} \end{aligned}$$

(M) 着衣量

着衣量は衣服の断熱性を表す単位clo（クロ）によって表される。着衣なしの状態が0clo、普通の事務服で1clo、新有効温度測定時は0.6cloの着衣とする。

$$1\text{clo} = 0.155(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

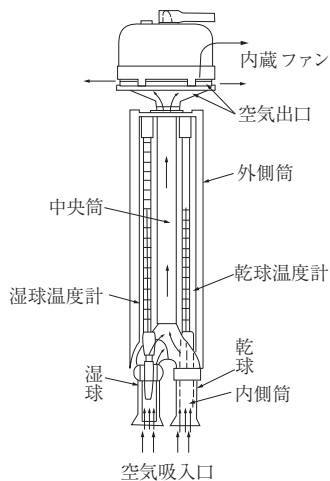


図 1.7 アスマン通風乾湿計

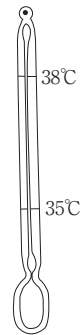


図 1.8 カタ計

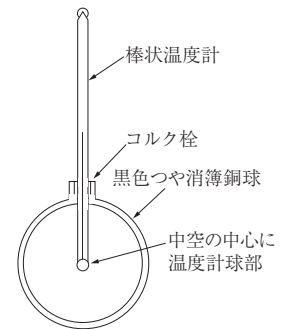


図 1.9 グローブ温度計

(N) 微気候

微気候とは、一般に、建築物や人体への影響が大きい地表面近くの気候、室内環境における建築部材付近や人体の皮膚付近の気候等をいう、微気候の概念は、住宅や街づくりに微気候デザインとして導入されている事例もある。

(O) 測定器具

(a) アスマン通風乾湿度計

周囲の放射熱の影響を防ぐために、温度計を2重の円筒で囲み、上部の付属ファンを回して感熱部に気流を与え、一定時間経過したのち、乾球と湿球の温度目盛を読み取るものである。

(b) カタ計

一種のアルコール寒暖計である。一定温度間の降下時間を計測して微風速を測定する。現在は、ほとんど用いられていない。

(c) グローブ温度計

中空の銅球の表面に黒ツヤ消しエナメル塗装をし、球の中心部に温度計を入れ、気温と周壁の放射熱の効果を温度で示す。

(d) 抵抗温度計

金属の抵抗が温度によって変化することを利用するもので、精密温度測定に適している。

(e) 熱線風速計

気流中に置いた熱線の温度は、電力による加熱量と風速による冷却量によるので、温度を一定に保つときの供給電力で風速が推定（計測）できる。風速の測定範囲、応答の善し悪しで数多くの種類があるので、目的にあったものを選択し、また、指向性のあるものが多く、気流の方向と検出部の指定方向を正しく合わせる必要がある。

(f) 赤外線サーモカメラ

モニター上にカラーで物体の表面温度を表示して、常温近くの表面温度を精度よく測定できる。建築物や配管の表面温度分布から断熱の欠陥を調査したり、人体の表面温度から、健康状態、快適性を調べることもできる。

1.3 空気汚染、室内環境に関連した物質

(A) 居住者の呼吸による室内空気の汚染

成人安静時の呼吸量を表 1.4 に示す。安静時で $0.012\text{m}^3/\text{h}$ 、普通の事務作業程度で $0.02\text{m}^3/\text{h}$ の二酸化炭素 (CO_2) を発生する。

CO_2 は、よほど高い濃度にならない限り、人体に有害ではない。むしろ、同時に、水蒸気、臭気その他の人体からの発散物の量も増大し、それらが空気の質を悪化させると考えられる。したがって、室内空気の CO_2 濃度をもって汚染の程度を示す指標とすることが広く行われている。

表 1.4 成人安静時の呼吸量

毎 時 呼 吸 量	240 ～ 360l
毎 時 O_2 消 費 量	0.01 ～ 0.018 m^3
毎 時 CO_2 発 生 量	0.006 ～ 0.013 m^3

- (注) 1. 安静時とは横臥安静ないし立位安静のことである。
 2. 女子は O_2 消費量以外は一般に男子より、やや小である。
 3. 児童は成人の 40 ～ 70%，平均 50%。

(B) 二酸化炭素 (CO_2) の許容濃度

室内における CO_2 の許容量は、通常 1,000ppm (0.1%) 以下とされる (表 1.5)。多数の人間が継続して在室している時の許容量は 700ppm (0.07%)、2,000ppm (0.2%) 以上で相当不良をきたす。身体への有害性は 10,000ppm (1%) 程度以上から始まり、4% 以上では顕著になる。

(C) 一酸化炭素 (CO) の許容濃度

室内への新鮮空気の給気が不足し、室内空気の酸素濃度が低下すると、暖房器具等の燃料が不完全燃焼を起こし、一酸化炭素 CO を発生するようになる。 CO は有毒であり、その許容量は、100ppm (0.01%) 以下とされている。表 1.6 に許容 CO 濃度と中毒症状を示す。各種法令による許容度は 6ppm (0.0006%) 以下とされている。

中毒症状の程度は濃度と呼吸時間との積で示され、濃度 (ppm) \times (h) が 600 以上になると中毒症状があらわれるといわれる。人間は、空気中の一酸化炭素濃度が 1% を超えると、数分間で死に至る。開放型燃焼器具の使用によって、室内の酸素濃度が 18% 以下になると、不完全燃焼による一酸化炭素の発生量が増加し、一酸化炭素中毒の危険性が高くなる。なお、室内の酸素濃度が 18% 近くに低下した場合、人体に対しては生理的に大きな影響を与えにくい、開放型燃焼器具の不完全燃焼をもたらすおそれがある。

表 1.5 CO_2 濃度の許容量および生理的有害限度

濃度 (%)	意義	摘要
0.07	多数継続在室する場合の許容量	CO_2 そのものの有害限度ではなく、空気の物理的、化学的性状が、 CO_2 の増加に比例して悪化すると仮定したときの汚染の指標としての許容量を意味する
0.10	一般の場合の許容量 (1,000ppm)	
0.15	換気計算に使用される許容量	
0.2 ～ 0.5	相当不良と認められる	
0.5 以上	最も不良と認められる	
4 ～ 5	呼吸中枢を刺激して呼吸の深さ、回数を増す。呼吸時間が長ければ危険。 O_2 の欠乏を伴えば障害は速く生じ、決定的となる	
8	10 分間呼吸すれば、強度の呼吸困難、顔面紅潮、頭痛を起こす。 O_2 の欠乏を伴えば障害は、なお著しくなる	
18 以上	致命的	

表 1.6 許容 CO 濃度と中毒症状

濃度 (%)	許容度および呼吸時間と症状
0.01	長時間の呼吸時の許容度
0.02	2～3 時間内に前頭に軽度の頭痛
0.04	1～2 時間で前頭痛、吐き気、2.5～3.5 時間後、頭痛
0.08	45 分で頭痛、めまい、吐き気、けいれん、2 時間で失神
0.16	20 分で頭痛、めまい、吐き気、2 時間で致死
0.32	5～10 分で頭痛、めまい、30 分で致死
0.64	10～15 分で致死

(D) 浮遊粉じん

大気中の粒子状物質は、「降下ばいじん」と「浮遊粉じん」に大別され、さらに「浮遊粉じん」は、環境基準が設定されている粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の浮遊粒子状物質 (SPM, Suspended Particulate Matter) とそれ以外に区別される。現在では、 $2.5\mu\text{m}$ 以下のものを PM2.5 として基準が設定されるようになった。

粒径が $10\mu\text{m}$ 以上のものは、痰とともに排出されるが、 $10\mu\text{m}$ 以下のものは、肺の奥まで吸収される。これらの人体への影響は、じん肺、気管支炎、肺水腫、ぜんそくなど吸収による直接的なものと、大気中の物質による日光の遮断が原因のくる病の発生増加のような間接的なものがある。

建築物衛生法（建築物における衛生的環境の確保に関する法律）における浮遊粉じんに関する基準は、中央管理方式の空気調和設備を設ける居室において、 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ 以下とするように規定されている。

(E) シックハウスと化学物質による室内汚染

シックハウスとして問題になる背景には、①住宅の高気密化、②新築住宅の割合が多い、③新建材（天然のものから高加工品）の使用割合が高い、④家庭内薬剤（殺虫剤、芳香剤、消臭剤等）の多用、⑤施工時における接着剤の多用、⑥工期（乾燥期間）の短縮などの要因があり、多種の汚染源に囲まれているともいえる。

一方、物質が体内に入ってくる主なルートには、①呼吸による空気から、②食べ物や飲み物から、③皮膚が触れたものからなどがあり、このなかで、呼吸は 24 時間休みなく常時行われている関係から、空気から取り込まれるものの割合は非常に大きい、したがって、シックハウスの予防には、発生源に注意するとともに、換気が極めて重要となる。室温が高くなると、発散量が多くなり、汚染濃度が高くなる傾向がある。表 1.7 に厚生労働省が定めた主な室内濃度指針値を示す。表中、 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ は、 $0.001\text{mg}/\text{m}^3$ に換算できる。例えば、ホルムアルデヒドの場合、 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ は、 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ となる。なお、中央管理方式の空気調和設備を用いた居室において、許容されるホルムアルデヒドの量の上限は、 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ である。さらに、図 1.10 に、室内空気中における有機化合物の分類と沸点を示す。

表 1.7 厚生労働省が定めた主な室内濃度指針値

物質名	室内濃度指針値		主な用途、補足
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	
ホルムアルデヒド	100	0.08	工場で用いる木質材料用接着剤原料、防腐剤
アセトアルデヒド	48	0.03	接着剤原料、防腐剤
トルエン	260	0.07	接着剤、塗料などの溶剤
キシレン	870	0.2	接着剤、塗料などの溶剤
エチルベンゼン	3,800	0.88	接着剤、塗料などの溶剤
パラジクロロベンゼン	240	0.04	衣類の防虫剤、芳香剤
クロルピリホス	1	0.0007 (0.07ppb)	防蟻剤
総揮発性有機化合物 (TVOC)	400	—	—

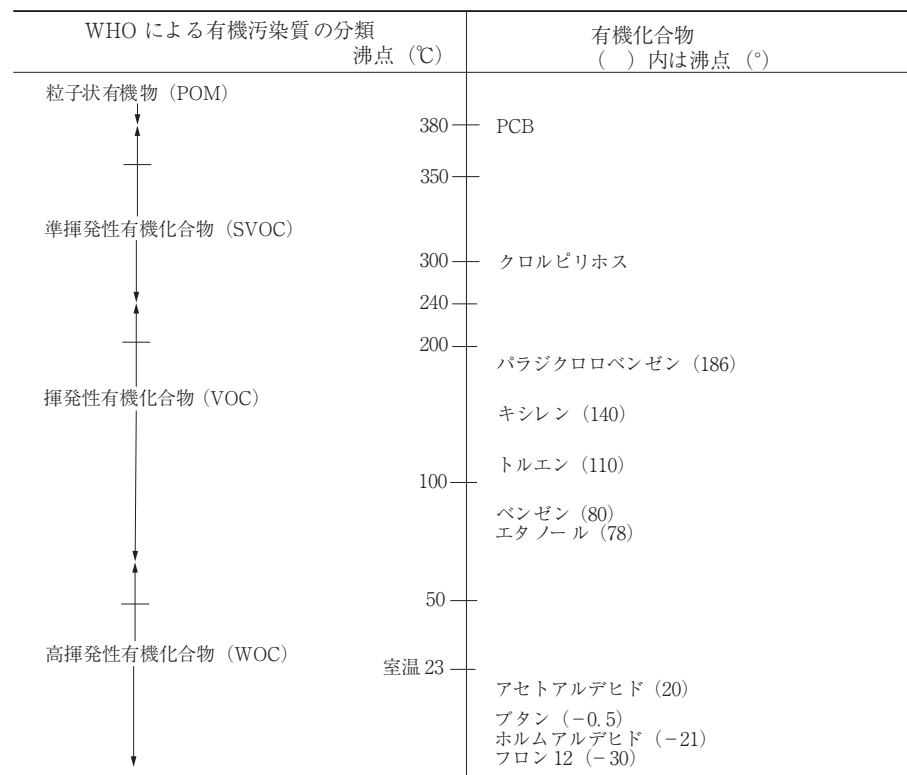


図 1.10 室内空気における有機化合物の分類と沸点

1.4 伝熱

(A) 伝熱過程と熱の性質

熱は、一般に高温部から低温部へと移動する性質をもっている。しかし、その移動は、場合によって、いろいろと異なる方法で行われている。例えば、室内の温度における熱の移動を考えた場合、窓や出入口を閉めきったとしても、高温側の空気中の熱が建築物の各部を貫通して、低温側の空気へ伝わるために変化する。熱の移動が激しい建築物の室内では、外気温の影響を大きく受け、特に、夏期や冬期には、不快な室内気温になりやすい。

一般に、建築物の各部に熱が伝わる過程は、図 1.11 のように、高温側の空気中の熱は熱伝達され、材料の表面で熱対流や熱放射した後、材料内を熱伝導する。そして、材料と材料の間に中空層（空気層）が存在する場合、熱対流や熱放射された後、再び材料の表面から、一部は熱対流や熱放射され、低温側の空気へ熱伝達する。この伝熱過程の全体を熱貫流（または熱過程）という。

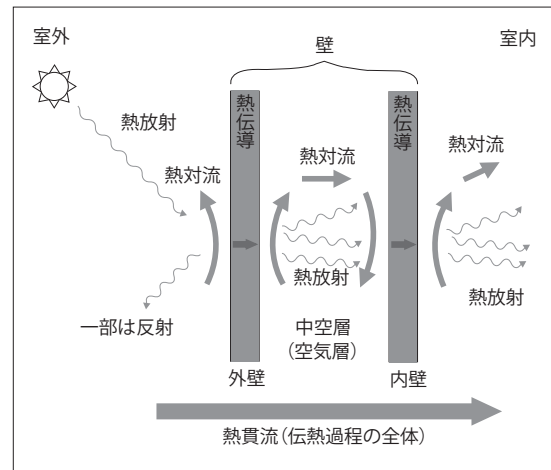


図 1.11 建築物における伝熱過程のしくみ

(B) 熱貫流量（熱通過量）

(1) 熱貫流量（熱通過量）とは

室内の温度は、建築物の各部に流入したり、各部から流出したりする熱量で変化する。熱貫流によって流入したり、流出したりする熱量を熱貫流量あるいは熱通過量という。主に建築環境工学の分野では、熱貫流量といい、建築設備工学の分野では、熱負荷計算などで熱通過量と表現されるが、基本的には両者とも同義である。

建築物は、正倉院の校倉造りやイヌイット^{あぜくら}の住んでいるイグルーと呼ばれる家のように、それぞれの物質が単独で用いられているということは稀で、一般には、いろいろな物質が組み合わされて構成され、いろいろな物質でつくられた壁とか屋根などの建築物を構成する部位全体の熱の通しやすさを示す尺度を熱貫流率（部位の両側における空気の温度差が 1°C のとき、 1m^2 当たりの通過熱量で $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ で示される）という。

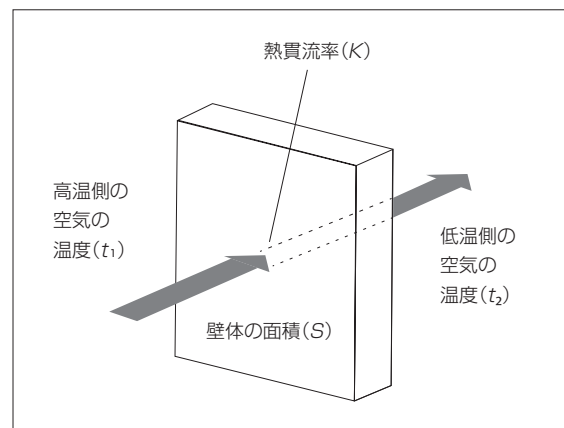


図 1.12 壁体の熱貫流量

断熱材を天井や壁に用いるのは、熱貫流率を小さくするのに有効なためである。例えば、建築物の要素別の熱貫流率が $3.64\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であったのに、片面に 40mm のガラス繊維を張ることで、 $0.71\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ になる。また、材料の使い方によっては、熱伝導率の大きい材料でも熱貫流率の小さい部位をつくることも可能である。例えば、ガラスのように熱伝導率の大きい材料でも、ブラインドやカーテンを組み合わせただけで熱の移動は約 30% もカットできる。さらに、ペアガラスにしたり、ミラーガラスにすることによって、熱貫流率を大幅に小さくすることができる。

熱貫流率の小さい屋根や壁で構成された室内は、熱の流入出が少なく、外気温の影響を受けにくく、室内温度の変動が少ないということになる。草ぶき屋根の農家が温度変化が少ないのは、熱貫流率のきわめて小さい草ぶき屋根が全体を覆っているからである。

熱貫流量 Q は、前述した材料の熱の伝わりやすさを表す熱貫流率 K と高温側と低温側の温度差 $(t_1 - t_2)$ の積 ($Q = K \times (t_1 - t_2)$) で示すことができるが、この場合には、単位面積当たりの熱貫流量になる。図 1.12 のような壁体の熱貫流量を求める場合には、単位面積当たりの熱貫流量に壁体の面積 S をかけて、次式のようにして算出する。

$$Q = K \times (t_1 - t_2) \times S$$

ここで、 Q ：熱貫流量 [W]

K ：熱貫流率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

t_1 ：高温側の空気の温度 [$^{\circ}\text{C}$]

t_2 ：低温側の空気の温度 [$^{\circ}\text{C}$]

S ：各部（壁体・屋根など）の面積 [m^2]

上記の熱貫流率 K は、次式で求める。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{R}$$

ここで、 K ：熱貫流率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

表 1.8 伝熱計算に用いる熱伝達率 α (単位： $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

室外側伝達率 α_1

冷暖房負荷		風速 [m/s]	熱伝達率 α_1
冬期暖房	市街	約 5	35
	郊外	約 7	41
夏期冷房	市街	約 3	23
	郊外	約 5	35

室内側熱伝達率 α_2

表面の位置及び熱流方向		熱伝達率 α_2
垂直		9
水平	上向	11
	下向	7

α_1 ：室外側の熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

α_2 ：室内側の熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

λ ：材料の熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

d ：材料の厚さ [m]

R ：熱貫流抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

なお、同一仕様で断熱を施す場合、内断熱・外断熱にかかわらず、熱貫流率は同じ値となる。

熱伝達率 (α) とは、材料の表面と周囲の空気との間の熱の伝わりやすさを示すもので、単位は、 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ を用いる。伝熱計算に用いる熱伝達率を表 1.8 に示す。

(2) 熱貫流率、熱貫流抵抗の留意点

- ①外壁を構成する各部材の熱伝導抵抗が大きくなると、一般に、熱貫流率は小さくなる。
- ②単層壁の熱貫流抵抗は、同一の材料で壁の厚さを2倍にしても2倍にはならない。
- ③外壁表面の放射率が大きくなると、一般に、熱貫流率は大きくなる。
- ④屋外の風速が大きくなると、一般に、熱貫流率は大きくなる。
- ⑤外壁と屋根や床等との取合い部における熱伝導を考慮しない場合、あるいは断熱材の厚さや各部の熱伝導率が同じ場合、構造体の室内側での断熱（内断熱）、室外側での断熱（外断熱）にかかわらず、外壁の熱貫流率は等しくなる。

(3) 熱貫流率の計算

例題 1 (図 1.13)

$$\text{熱貫流率 } (K) = \frac{1}{\text{熱貫流抵抗 } (R_t)}$$

$$\text{熱貫流抵抗 } R_t = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + R_\alpha + \frac{1}{\alpha_i}$$

鉄筋コンクリート厚さ 150mm、中空層厚さ 25mm、合板厚さ 5mm

解答

$$\text{外側熱伝達} \quad \frac{1}{\alpha_0} = \frac{1}{35} = 0.029$$

$$\text{鉄筋コンクリート} \quad \frac{d_1}{\lambda_1} = \frac{0.15}{1.5} = 0.100$$

$$\text{中空層（空気層）} \quad \text{例題では、} \div 0.180 \text{ とする}$$

$$\text{合板} \quad \frac{d_2}{\lambda_2} = \frac{0.005}{0.180} = 0.028$$

$$\text{内側熱伝達} \quad \frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{9} = 0.111$$

$$R_t = 0.029 + 0.100 + 0.180 + 0.028 + 0.111$$

$$= 0.448 [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$$

$$K = \frac{1}{R_t} = 2.23 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

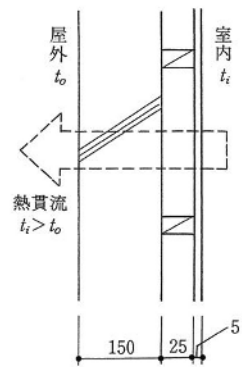


図 1.13 壁体の構造

(4) 平均熱貫流率

部分的に熱貫流率が異なる壁体の全体的な平均熱貫流率は、それぞれの部分ごとの熱貫流率に、その部分の面積率を乗じ、合計すればよい。

(例)

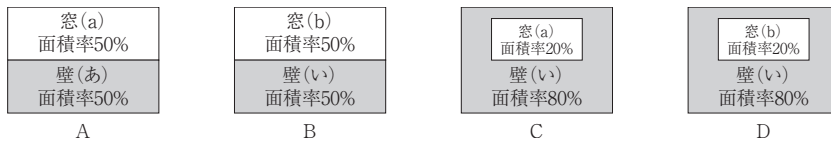


図 1.14 窓面積と平均熱貫流率

各部の熱貫流率は、下記の数値とする。

壁(あ)…… $2.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 壁(a)…… $5.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

壁(い)…… $0.5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 壁(b)…… $2.5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

∴ A の平均熱貫流率は $(5.0 \times 0.5 + 2.0 \times 0.5) = 3.5$

B の平均熱貫流率は $(2.5 \times 0.5 + 0.5 \times 0.5) = 1.5$

C の平均熱貫流率は $(5.0 \times 0.2 + 0.5 \times 0.8) = 1.4$

D の平均熱貫流率は $(2.5 \times 0.2 + 0.5 \times 0.8) = 0.9$ となる。

(5) 定常状態と不定常状態

屋外の外気温は一定ではなくて常に変動している。また、日射熱による影響もあり、外壁体の内部を流れる熱流は絶えず変化している。

しかも、この変動の要因と状況は複雑で、これを正確にとらえることは非常に難しい。そこで、外気温、室温とも一定で日射の影響もないとし、外壁体の熱流はどこでも一様にあると仮定して計算を行うのが、定常状態による熱計算といわれているものである。定常状態において、外部から室内へ流入する空気の質量は、室内から外部へ流出する空気の質量と等しい。

一方、変動の状態をできるだけ忠実に計算しようということも行われており、それは不定常状態の熱計算といわれている。

なお、「壁体内部の温度分布の計算」は定常状態と仮定した場合の計算である。壁体の定常伝熱は、壁体の両面の空気温度または表面温度を長時間一定に保った後も、壁体内の各部の温度が時間の経過によって変化せず、熱流量が一定な場合の伝熱過程をいう。

(6) 壁体内部の温度分布の計算

例題 2

熱貫流率計算の例で各部の熱抵抗の和を求めたが、これにより、壁体内部の各部分の温度分布を知ることができる。すなわち、内外温度差全体 (25°C) に対する各部の部分の温度差の比は、熱貫流抵抗全体に対する各部の部分抵抗の比に等しい (図 1.15 参照)。

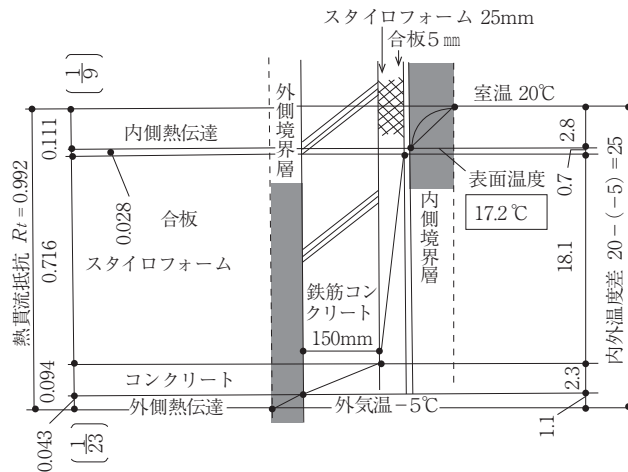


図 1.15 壁体の熱抵抗と各部の温度差（壁体の各部の温度差は熱抵抗に比例する）

数式に表した場合、下式のようなになる。

$$\frac{R_x}{R_t} = \frac{(t_i - t_x)}{(t_i - t_o)} \quad t_i - t_x = \frac{R_x}{R_t} (t_i - t_o) \quad \begin{array}{c} \text{部分} \\ \text{全体} \end{array}$$

t_i, t_o : 内外気温 t_x : 壁体内の任意点の温度

R_t : 熱貫流抵抗 R_x : 高温側空気から任意の点までの熱抵抗の和

解答

図 1.15 の例で

$$t_i = 20^\circ\text{C} \quad t_o = -5^\circ\text{C} \quad R_i = 0.992$$

$R_x = 0.111$ （室内側熱伝達抵抗）とおけば

$$20 - t_x = \frac{0.111}{0.992} (20 - (-5)) \quad t_x = 20 - (0.11191 \times 25) = 20 - 2.8 = 17.2^\circ\text{C}$$

となり、室内側表面温度が求められる。

(7) 熱貫流抵抗と表面温度の関係

室の内外の温度条件が同じであっても、熱貫流抵抗が変わると、室内側の表面温度が変わる。その関係は次の図 1.16 のようになる。

これらのことから、熱貫流抵抗が大きいほど、または熱貫流率が小さいほど、室内側表面温度の低下は小さく、室内温度に近くなることがわかる。また、断熱性能を高めることは、室温と室内表面温度の差を小さくすることにつながり、室内の上下の温度差も小さくすることができる。

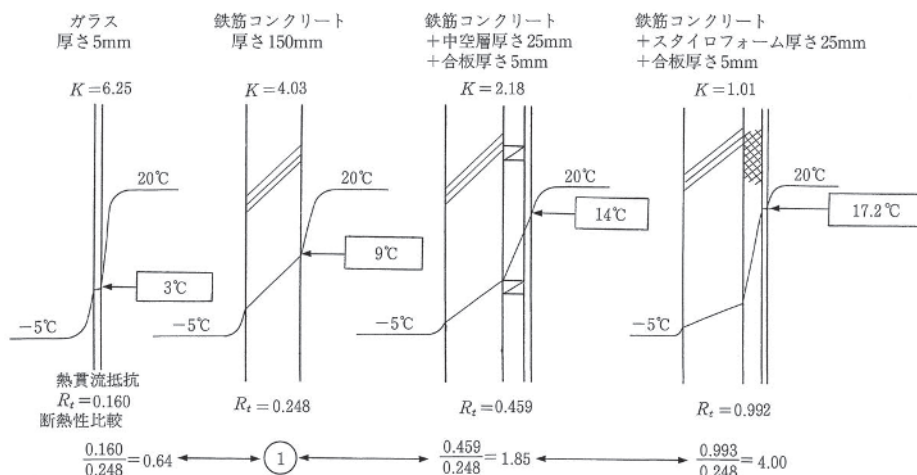


図 1.16 各種壁体の熱貫流抵抗と室内側表面温度の比較

例題3

図のような外壁において、イ～ホの条件によって計算した熱貫流率に最も近いものは、次のうちどれか。

条件

- イ. 屋外側熱伝達率: $20\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- ロ. 室内側熱伝達率: $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- ハ. コンクリートの熱伝導率: $1.6\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- ニ. 押出発泡ポリスチレンフォームの熱伝導率: $0.04\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- ホ. セッコウボードの熱伝導率: $0.2\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

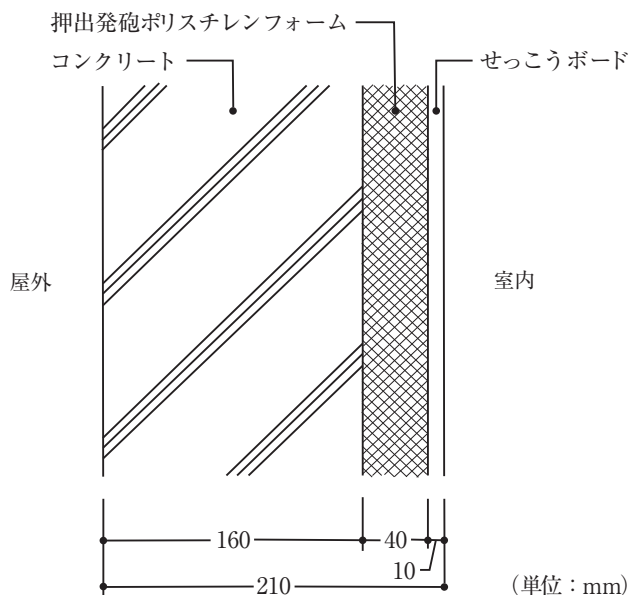


図 1.17 例題3の図

- 1. $0.5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- 2. $0.8\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- 3. $1.3\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- 4. $2.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- 5. $2.4\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

解答

熱通過率（熱貫流率） K ： $W/(m^2 \cdot K)$ は、

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right) + \frac{1}{\alpha_i}}$$

α_0 ：外表面熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$

α_i ：内表面熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$

d_1, λ_1 ：コンクリートの厚さ m 、熱伝導率 $W/(m \cdot K)$

d_2, λ_2 ：押出発泡ポリスチレンフォームの厚さ m 、熱伝導率 $W/(m \cdot K)$

d_3, λ_3 ：せっこうボードの厚さ m 、熱伝導率 $W/(m \cdot K)$

条件を式に代入して

$$K = \frac{1}{\frac{1}{20} + \left(\frac{0.16}{1.6} + \frac{0.04}{0.04} + \frac{0.01}{0.2} \right) + \frac{1}{10}} = 0.77$$

(C) 熱伝導と熱伝導率**(1) 熱伝導と材料の熱伝導率**

スプーンの先を熱い湯に入れると柄の方まで熱くなっている。これは、スプーン自体には、何の変化も起こらずに、スプーンの先端の熱だけが柄の方へ移動したために起こった現象である。これを熱伝導という。このように熱伝導は、熱エネルギーが主として、固体中を移動する現象で、その現象は、フーリエの熱伝導の基本式で表される。

$$q = \frac{r(\theta_1 - \theta_2)}{d}$$

ここで、 q ：通過熱量 $[W/m^2]$

r ：材料の熱伝導率 $[W/(m \cdot K)]$

θ_1 ：室外側の表面温度 $[K]$

θ_2 ：室内側の表面温度 $[K]$

d ：材料の厚さ $[m]$

同じ物質のなかでも、接触した異なる物質の間でも、熱伝導は起こる。物質によって、熱の伝わりにくいものと伝わりやすいものがある。前述した事例のスプーンでも、鉄の代わりに木のスプーンを使えば、いくら熱い湯につけても、手元はほとんど熱くならない。木は熱を伝えるにくい材料だからである。

また、薄いコンクリート板や鉄板で屋根や壁が作られている室では、屋外における寒暖の変化が直接、伝わって、不快であるが、これに板を内張りすれば、気温の変化はずっと和らぎ、さらに、畳や、じゅうたんを敷けば、もっと快適な状態が期待できる。これは、コンクリートや鉄よりも木の方が熱伝導率が低く、じゅうたんや、畳は、さらに低いため、外気温の変化を伝えるにくいからである。

物質が伝導によって熱を伝える場合、物質の性質によって、その熱の伝えやすさの度合に差があり、これを数値化したものが熱伝導率であり、単位は $[W/(m \cdot K)]$ を用いる。

表 1.9 に各種材料の熱伝導率を示す。同表のように、代表的な建築材料である木、コンクリート、板ガラス、銅、アルミニウムの熱伝導率を比べると 0.17、1.3、0.78、45、210 である。銅の熱伝導率は、きわめて大きく、日なたに置いた自動車の室内は、たちまち高温になる。また、アルミニウムの場合、木の 1000 倍も熱を伝えやすいため、サッシの枠のようなわずかな面積からでも多量の熱の流出が起こる。これに対して、木は熱伝導率が小さく、外気温をよく遮断することは、正倉院のように空気調和設備のような装置がなくても 1000 年もの間、宝物を風化から守っていることがよく証明している。また、イヌイットの住んでいるイグルーという氷の家が意外と暖かいといわれているのも、氷の熱伝導率が小さいためである。

表 1.9 各種建築材料の乾燥状態における熱伝導率

建築材料	熱伝導率[W/(m・K)]
アルミニウム	210
銅	45
タイル	1.3
コンクリート	1.3
かわら・スレート	0.96
スレート	0.96
板ガラス	0.78
木	0.17
パーテクルボード	0.15
木毛セメント板	0.15
合板	0.15
石こう板	0.14
壁・天井仕上用クロス	0.13
たたみ	0.11
軟質繊維板	0.046
フォームポリスチレン保温板	0.037
硬質ウレタンフォーム保温板	0.027

(2) 発泡性の保温材における熱伝導率

発泡性の保温材では、図 1.18 のように、空隙率が同じであれば、材料内部の気泡寸法が大きいものほど、熱伝導率は大きくなる。気泡寸法が小さいほど、空気層が細分化され、熱伝導率は小さくなる。

(3) 中空層（空気層）

壁体内部、天井裏、床下などの中空層（空気層）の熱抵抗を図 1.19 に示す。

中空層の熱の伝わり方は熱抵抗として示され、中空層の厚さや施工の程度によって大きく変わる。一般的な垂直空気層の場合でわかるように、気密性が下がると（密閉から反密閉）熱抵抗は 1/3 以下に低下する。また、中空層の厚さが 3～5 [cm] のとき、熱抵抗が最大で、さらに厚さが増すと、層内に対流が起こる関係で、かえって熱抵抗は低下する。

(D) 熱対流と熱放射

(1) 熱対流

やかんで湯を沸かすとき、熱を加えるのは、やかんの底の部分だけである。しかし、湯は、全体が、ほぼ同じ温度で上昇していく。これは、暖められた湯が熱をもって上方へ移動し、代わりに冷たい水が下方に動くためである。水や空気のような流体は、このようにそのもの自体が熱をもって移動する。これを熱対流という。

対流は、必ずしも熱い部分が冷たい方へ動くわけではなく、温度の高い部分が上方へ、低い部分が下方へ移動しようとするものである。このため、上から暖めると上方ばかり熱くなって、全体が均一に暖かにならない。対流暖房のときは器具を床付近に置き、冷房器具を上方に設けるのはこのためである。

熱対流に関する法則には、ニュートンの冷却則があり、次式で表される。なお、この式は水などの流体にも適用される。

$$q_c = \alpha_c (\theta_s - \theta_f)$$

ここで、 q_c : 通過熱量 [W/m^2]

α_c : 対流熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

θ_s : 壁体表面温度 [K]

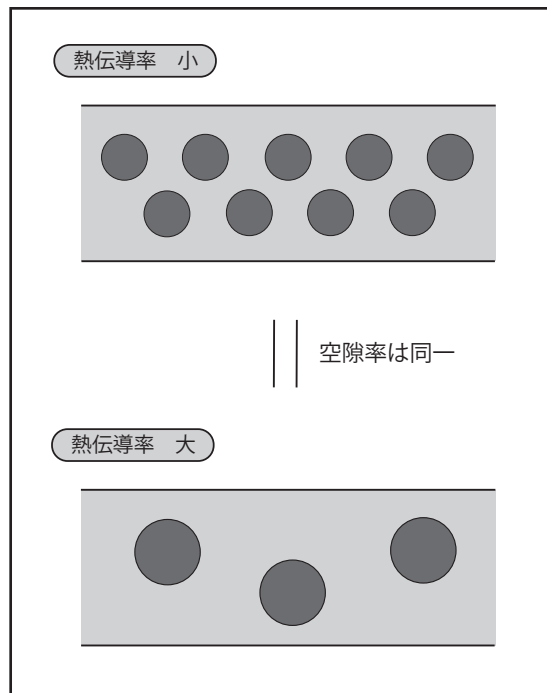


図 1.18 発泡性の保温材における熱伝導率のイメージ

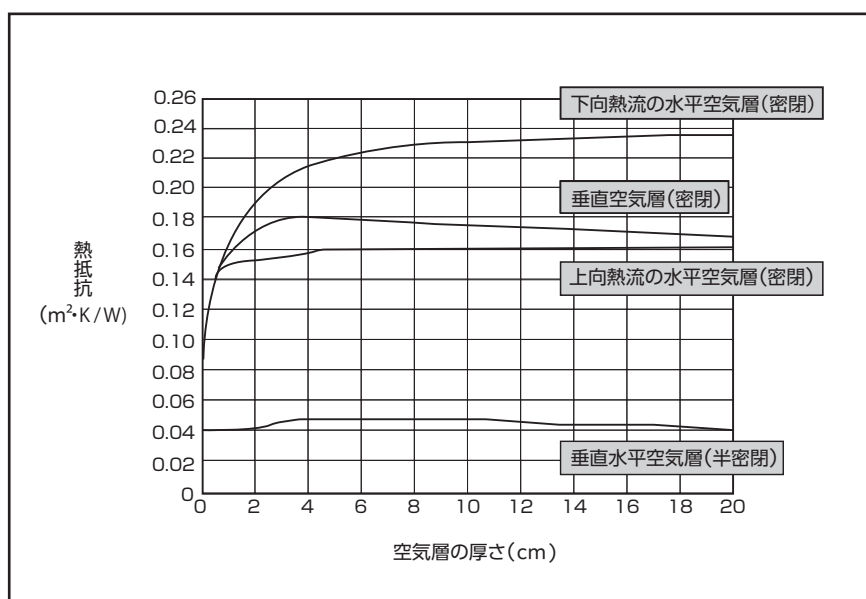


図 1.19 空気層の厚さと熱抵抗の関係

θ_f : 周囲の表面温度[K] (壁体表面から十分離れた場所の温度)

(2) 熱放射

熱い部分と冷たい部分の間に物質がない場合、熱は物資と物質との空間を、電磁波（主として波長の長い、目に見えない熱線）によって伝わる。これが放射である。太陽の日射しが暖かいのは、この放射によるものである。地球は、主として、太陽からの放射によって暖められる。放射は空気中でも真空中でも伝わるが、間に障害物があるとそこで遮られてしまう。昼間、晴れると気温が上昇するが、反対に夜間、よく晴れると冷える。これは地表の熱が放射によって、空に向かって発散して、気温が下がるのが原因である。これを放射冷却と呼んでいる。

室内の電気ストーブなどでは、主として、放射によって熱を伝えるので、熱線の方向にある対象物だけが極端に熱くなる。

熱放射の法則としては、シュテファン・ボルツマンの法則があり、次式で表される。

$$E_b = \sigma T^4$$

ここで、 E_b : 黒体の放射熱量[W/m²]

σ : シュテファン・ボルツマンの定数 [4.88×10⁻⁸(W/(m²・K⁴))]

T : 黒体の絶対温度[K]

(E) 熱容量

室の熱環境には、室内外における熱の流出入のほか、建築物の熱容量を考える必要がある。コンクリート造の建築物などの最上階や西日を受ける西端の室では、日が沈んで外気温度が低くなってから、室温がどんどん上昇して行くことがある。屋根や外壁が鉄板であれば、外気温の上昇につれて室温も上昇し続けるが、午後になって外気温が下がり始めると、直ちに室温も下がり始める。

一方、コンクリート壁のように、暖めにくく、冷めにくい場合、いったん壁自体が熱を吸収す

れば、これを放出するのに長い時間がかかる。このような壁は大量の熱を蓄えることができる。この場合、「壁の熱容量が大きい」と表現する。鉄板のように熱容量の小さい壁では、外気温は直ちに室に伝えられるが、コンクリート壁のように熱容量の大きい場合は、外気温が室に伝わるのに時間がかかり、気温のピークがずれる。

また、壁やその他の部分の熱容量が小さい室では、暖房を切った途端にどんどん冷え始めるが、熱容量の大きな室は、ぬくもりを残して、室温は徐々に下降して行くことになる。

断熱性が高く、熱容量の大きな屋根や壁で構成された建築物は、熱的性能が高いといえる。すなわち、直接、外気温に影響を受けにくく、室温が安定していて、より快適な室温を保ちやすいということである。なお、暖房時の室温変動に対する熱容量と断熱性の影響を図 1.20 に示す。

例えば、コンクリートの質量 2,400[g]、比熱 $0.79[\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})]$ 、グラスウール保温板の質量 20[g]、比熱 $0.84[\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})]$ とすると、コンクリートの熱容量は、 $1,896[\text{J}/\text{K}]$ 、グラスウールでは $16.8[\text{J}/\text{K}]$ となり、熱容量に大きな差があることがわかる。

熱容量は、一般的には、木造の壁よりもコンクリートの壁の方が大きい。木材の比熱は、 $1.03[\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})]$ であるので、木造の壁の質量を 600[g] とすると

コンクリート

$$0.79[\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})] \times 2,400[\text{g}] = 1,896[\text{J}/\text{K}]$$

木材

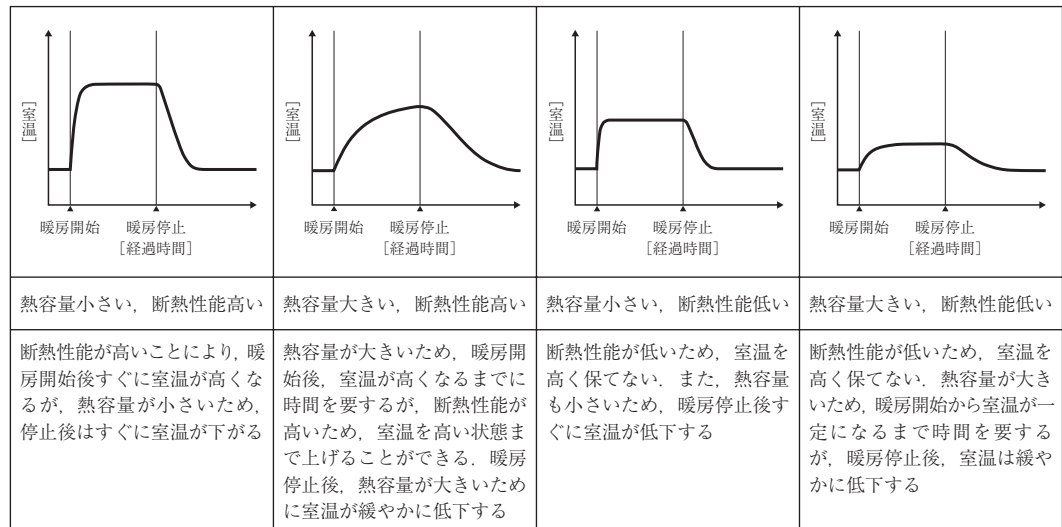


図 1.20 熱容量・断熱性能と室温変動の関係

$$1.30[\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})] \times 600[\text{g}] = 780[\text{J}/\text{K}]$$

(F) 基礎断熱工法

基礎断熱工法とする場合、床下換気孔を設置してはならない。断熱の基本は、住宅全体を断熱材ですっぽり覆ってしまうことである。外皮の断熱や気密の性能を高めることは、暖房時の室内の上下温度差を小さくすることにつながる。基礎断熱工法の場合に床下換気孔を設置することは、

その断熱区画（屋外と屋内の熱的な境界）に孔を開けてしまうことになるため、基礎断熱工法の場合は床下換気孔を設置しないこととしている。

基礎断熱工法は、床下換気孔を設置しないため、床下空間に湿気が滞留し、結露を発生させないために、床下地面の防湿措置を入念に行う必要がある。また、断熱材はシロアリの被害を受けやすいため、シロアリの生息地域では対策が不可欠である。そのために、基礎断熱工法とする場合は、次の要件を満たすことが必要である。

- ・床下防湿措置（防湿フィルム敷きあるいは、べた基礎等）を講じる。
- ・地面に講じる防蟻措置として、布基礎と一体となった鉄筋コンクリート造の、べた基礎等とする（ただし、寒冷地を除く）。

なお、建築基準法施行令第22条において、木造住宅の床下をコンクリートで覆う場合には、床下の換気は不要と明記されている。

1.5 結露とその対策

(A) 透湿と湿気貫流

室内を暖房や冷房（特に暖房したときに加湿）すると、室の内外に湿度差が生じる。湿度差が生じれば、当然、湿度の高い所から低い所へ湿気（水蒸気）が移動する。

水蒸気を含んだ空気が壁の表面にふれると、水蒸気の一部は壁の表面に吸着される。一方、水蒸気が吸着している壁の表面に乾燥した空気が当たると水蒸気は空気中にもどる。このような現象を放湿という。壁の両側で湿度が異なると、一方で吸湿、他方で放湿の現象が起こり、水蒸気が壁を透して移動することになる。これが透湿または湿気貫流である。

材料の両側の空気の温度が等しく水蒸気圧に差のあるとき、定常状態において、この材料の単位面積を単位時間に通過する水分量（透湿量） w は次式で表される。

$$w = \frac{f_1 - f_2}{R_v} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s]} \quad (1.5.1)$$

$$w = P \cdot (f_1 - f_2) \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s]} \quad (1.5.2)$$

ここに f_1 : 一方の面に接する空気の水蒸気圧 [Pa]

f_2 : 他方の面に接する空気の水蒸気圧 [Pa]

この R_v をこの材料の透湿抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}$]、 P を透湿係数 [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$] という。

材料が均質で厚さが d [m] であったとすれば、これを単位厚さに換算して、

$$r_v = \frac{R_v}{d} \text{ [m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg]} \quad (1.5.3)$$

を湿気伝導抵抗とよび、その逆数

$$p_v = \frac{1}{r_v} = \frac{d}{R_v} = P \cdot d \text{ [kg/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)]} \quad (1.5.4)$$

を湿気伝導率と呼んでいる。

この値は、厚さや両面の水蒸気圧差とは比例しないこともある。

多層壁の透湿を湿気貫流といい、熱貫流の場合と同じように、その逆数は湿気貫流抵抗で、各

層の湿気抵抗の和として求めることができる。

$$R_{vt}=R_{v1}+R_{v2}+\cdots=\Sigma R_{vi}$$

ごく薄い厚さで十分な湿気伝導抵抗を示す層を防湿層とよび、これに用いるような透湿抵抗の大きい材料を防湿材という。各種材料の湿気伝導率を表 1.10 に、湿気伝導抵抗を表 1.11 に示す。

表 1.10 各種材料の湿気伝導率

材料名	平均湿度 (%)	湿気伝導率 (10^{-3}) [kg/m·s·Pa]
鉄筋コンクリート壁	72	0.0029
モルタル	84	0.0016
気泡コンクリート板	28 ~ 89	0.038 ~ 0.052
プラスターボード	53	0.0060

表 1.11 各種材料の湿気伝導抵抗

材料	湿気伝導抵抗 [m ² ·s·Pa/kg]	平均湿度 (%)
木片セメント板	2.96×10^9	64
合 板	0.37×10^9	84
ク	0.80×10^9	84
アルミはく	348×10^9	

(B) 結露とその対策

結露とは、空気中の水分が、その露点以下の冷たい物体に触れて凝固する現象であり、表面結露と内部結露に大別される。

一般的な結露対策としては、まず、壁や天井などの室内側の表面温度を露点以下に下げないようにすることである。したがって、結露の発生しやすい部分、たとえば、外壁の出隅（角）の室内側には、熱貫流量を少なくする必要がある、できるだけ熱伝導率の小さい材料を用いて断熱効果を高めるようにする。

しかし、金属など熱を伝えやすい構造材が外気側と室内側を通して取り付けられている場合があり、これが熱橋（(E) で後述する）となって、その部分の室内側表面を低温下させ、表面に結露が生じやすくなる。この場合、室内側での対応としては、湿度を必要以上に高めないことが大切で、湿度が高まるほど、室内空氣の露点温度と壁の表面温度の差が少なくなって、内装材の表面のわずかな温度低下で結露しやすくなる。特に、水蒸気を多く発生する室や室内を閉めきることが多い暖房時などには、適度の換気をはかって、室内の湿度を下げる工夫が必要である。

結露防止対策をまとめると、次のとおりである。

- (1) 建築物各部材の断熱性能を高めて、内装材の表面温度を露点以下にならないようにする。
- (2) 室内の水蒸気を壁体の中へ入れないようにする。
- (3) 室内の暖かい空氣が、冷たい部位に接触しないようにする。
- (4) 室内の湿度を必要以上に高めないように、できるだけ換気や通風をはかる。
- (5) 窓ガラスの室内側にカーテンを設けることは、冬期におけるガラス面の結露の防止対策として期待できない。
- (6) 浴室から他の室への水蒸気の侵入を抑制するため、浴室に設置した排気ファンを使用する。
- (7) 木造住宅における最上階の天井部分のみに断熱材を施した屋根において、野地板面の結露を防止するため、小屋裏に換気口を設ける。
- (8) 空氣を加熱しても、絶対湿度が同じ場合、その空氣の露点温度は変化しない。
- (9) 冬期において、二重サッシの間の結露を防止するためには、屋外側サッシの気密性に比

べて室内側サッシの気密性を高くすることが有効である。

(C) 表面結露とその防止方法

表面結露の防止対策をまとめると、次のとおりである。

- (1) 壁体の断熱性を高めて、表面温度を高く維持し、露点温度よりも低下しないようにする。
- (2) 室内の湿度を低くおさえて、露点温度を低くおさえる。したがって、水蒸気発生量を抑制する。開放型（燃焼後の廃気が室内に排出される型式）のガスストーブや石油ストーブを用いて暖房する場合、燃焼に伴い、多量の水蒸気が発生するので、結露が起こりやすくなる。一方、外壁の室内側の表面結露を防止するため、暖房設備を開放型燃焼器具の代わりに密閉型燃焼器具とする。
- (3) 冬期の暖房室では、一般に、湿度が高く、その室の押入れ内の湿度も高くなる。外壁に接する押入れの襖（ふすま）の断熱性を高めると、冷えた外壁によって、押入れの空気が、さらに冷やされて、押入れ内の結露が生じやすくなる。また、壁体に接して配置した家具の裏面や押入れ内部は空気の流通が悪く、湿った空気が停滞し、結露が生じやすい。適正な空気の流通が行われるように家具を壁面から少し離すとか、北側の外壁に接して押入れを設けないことなどが必要になる。なお、表面結露の発生の有無は、「表面近傍空気の絶対温度から求まる露点温度」と「表面温度」との大小によって判定することができる。
- (4) 外壁の室内側の表面結露を防止するため、外壁断熱を強化することによって室内側の壁面温度を上昇させる。

(D) 内部結露とその防止方法

高温高湿の空気が壁体内部で結露する内部結露というものもある。この内部結露を防止するには、壁体の高温高湿側（室内側）、つまり、断熱材の室内側に透湿抵抗の大きい材料を用いた防湿層を施工するのがよい。

外断熱は、内断熱に比べて壁体内部の温度分布を高くできるので、内部結露の防止に有効である。しかしながら、室内表面温度は変わらないため、表面結露には効果がない。つまり、内部結露の防止の点では、内断熱よりも外断熱の方が有効であるが、表面結露の防止の点では、内断熱も外断熱も変わらない。

なお、枠組壁工法は、壁体の気密性の高い工法であるが、防湿層の施工が不十分であると内部結露が発生する場合がある。

(E) 熱橋（ヒートブリッジ）

熱伝導率の低い材料で構成されている壁体の一部に、鉄骨の間柱など熱伝導率の高い材料で構成されている部分がある場合、夏期は室外の高温が、この部分から室内に侵入し、冬期は逆に室内側のその周辺部分の温度が低下し、結露が生じやすくなることがある。

このように、熱を伝えにくい熱貫流抵抗の大きい壁体の中の、熱を伝えやすい部分を熱橋（ヒートブリッジ）という。この部分では

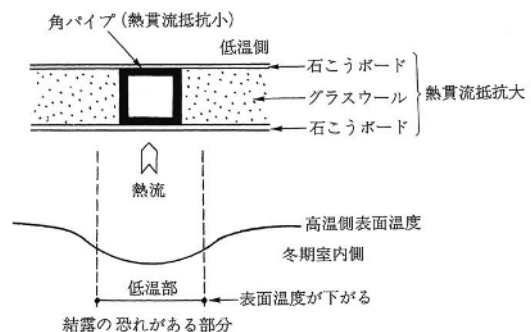


図 1.21 熱橋（ヒートブリッジ）

表面結露も生じやすい。なお、外壁において、熱橋部分の室内側表面温度は、一般に、熱橋部分以外の部分の室内側表面温度に比べて、外気温度に近くなる。

(F) 出隅・入隅部分

建築物の出隅部分も外部に接する部分が多く熱貫流が大きくなり、室内側の表面温度が低下し、室内の入隅部分が結露しやすくなる。これらの部分は、特に断熱をよくするなどの施工上の配慮をしなければならない。

また、隅角部では、建築物の壁面に沿った風の流れが、隅角部で建築物から離れる現象を、一般に剥離流という。つまり、剥離流は、風が建築物にあたると、壁面に沿って流れていくが、建築物の隅角部のところまで来ると、それ以上、壁面に沿って流れることができなくなり、建築物から剥がれて、流れ去っていく。この建築物の隅角部から剥がれた風は、その周囲の風よりも速い流速をもつ現象で、ビル風の現象のひとつといわれている。ビル風は、建築物の見付面積が大きく、風をより多くせき止めるほど、一般に、剥離する領域が大きくなる。ここで、見付面積とは、建築物の部材のうち、正面を向いた部分の面積のことで、外壁の見付は風圧力に耐えるため、見付面積に応じて所定の強度、つまり、必要壁量を確保するように、建築基準法で定めている。なお、剥離流以外のビル風の現象としては、吹き降ろし、逆流、谷間風、開口部風、街路風、渦領域、吹き上げなどの現象がある。

例 題

それぞれの正誤を答えよ。

- 【1】快適域として推奨される PMV と PPD の範囲は、それぞれ $-0.5 < \text{PMV} < +0.5$ 、 $\text{PPD} < 5\%$ である。
- 【2】人体の温冷感に影響を与える要素は、代謝量、着衣量、空気温度、放射温度、湿度及び気流の6項目である。
- 【3】成人女性の平均的な代謝量は、成人男性の代謝量の80～85%程度である。
- 【4】「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」において、居室におけるホルムアルデヒドの量の管理基準は、 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 以下である。
- 【5】人の呼気に含まれる二酸化炭素の濃度は、4%程度である。
- 【6】同一仕様で断熱を施す場合の熱貫流率は、外断熱より内断熱のほうが大きくなる。
- 【7】繊維系断熱材の熱伝導率は、一般に、含水率が大きくなるほど大きくなる。
- 【8】壁体表面の対流熱伝達率は、風速が大きくなるほど大きくなる。
- 【9】建築物の熱容量が大きい場合、空調をしない状態の室温の変化は、外気温の変化に対して時間遅れが生じたものとなる。

解 答 (⇒本文参考箇所)

- 【1】× (⇒1.2)
- 【2】○ (⇒1.2)
- 【3】○ (⇒1.2)
- 【4】○ (⇒1.3)

【5】○ (\Rightarrow 1.3)

【6】× (\Rightarrow 1.4)

【7】○ (\Rightarrow 1.4)

【8】○ (\Rightarrow 1.4)

【9】○ (\Rightarrow 1.4)