

# 断熱に関する研究(その3)

——外壁の熱的評価について——

田中辰明 大久保嘉子  
小島信男

## Research on Thermal Insulation (Part 3)

——Thermal Evaluations of Exterior Walls——

Tatsuaki Tanaka Yoshiko Okubo  
Nobuo Kojima

### Abstract

The paper carries out thermal evaluations through calculations of exterior walls without insulation and with external, internal and sandwiched insulations. Since it had not been customary for thermal insulation to be provided for buildings in Japan in the past a method of thermal evaluation for exterior walls has not yet been established. Consequently, items of thermal evaluation considered in European countries are taken up for the study.

### 概要

この報告は、断熱なしの外壁および外断熱、中断熱、内断熱を施した外壁のそれぞれについて計算による熱的な評価を行なったものである。従来、断熱の習慣のなかった我国では外壁の熱的な評価法も確立されていないため、評価項目としては諸外国で採用されているものを選定し、各種外壁の評価リストの作成、および熱特性の検討を行なった。評価項目の中には、我国ではあまり知られていないものも多く、本文中でその解説を行なっている。

### 1. まえがき

断熱の施された外壁を熱的に評価する場合、通常は熱貫流率もしくは熱貫流抵抗を算出する。これは熱のしゃ断を前提としたもので、断熱材の種類およびその厚さが対象となる。しかし、より合理的な断熱を行なおうとする際には、断熱材の取り付け位置および壁構成材の配置の違いによって生じる外壁の蓄熱容量や温度振幅の減衰比率、位相の遅れ、さらには水蒸気の拡散も考慮しなければならない。これは、省エネルギーの見地からだけでなく、外壁を熱的に快適なものにするための要因となる。

この報告は、以上の観点から、外壁に外断熱、中断熱、内断熱を施した場合、および断熱なしの場合のそれぞれについて、その熱特性を計算によって明らかにするとともに、各種外壁の評価リストの作成を試みたものである。評価項目としては、熱貫流率、蓄熱数、温度振幅減衰、位相の遅れ等を選定したが、これらは欧州で使われている簡易計算式を用いて求めた。なお、外壁が熱的に人体

の快適性とどのように関わるかを図-1に示した。

### 2. 外壁の断熱法

断熱材の取り付ける位置を違えることによって、構法的には数種類の断熱法が考えられる。図-2は、参考のために、欧州の断熱例を文献から収集したものである。この図では、室温は冬および夏とも20℃、外気温度は冬-15℃、夏30℃とし、夏は外壁に日射が当たっている場合を想定して、その温度分布を記入してある。冬と夏とで温度分布に大きな差があるものは温度変動による壁の挙動も大きく、ひび割れも入りやすいと言える。なお、この報告では、図-2のうち、断熱材を外気側に取り付けた外断熱(図中の③、④)、構造体の内部に断熱材を組み込んだ中断熱(同⑥)、室内側に断熱材を取り付けた内断熱(同⑦)、および断熱なし(同①)をそれぞれ対象としている。

### 3. 外壁の評価

断熱をしたことによる外壁の熱的評価として、いくつ

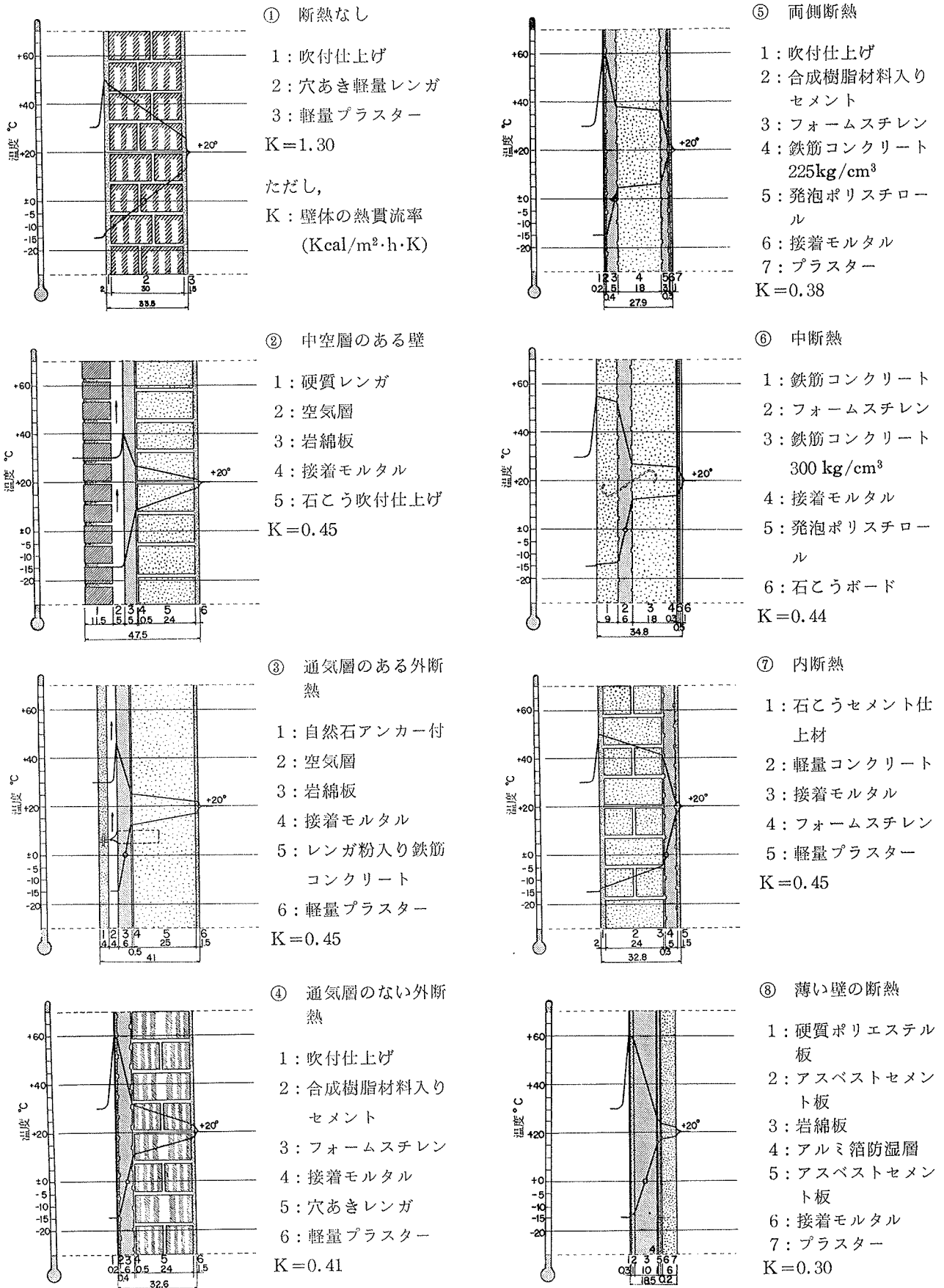


図-2 各種の断熱法 (文献1より収集)

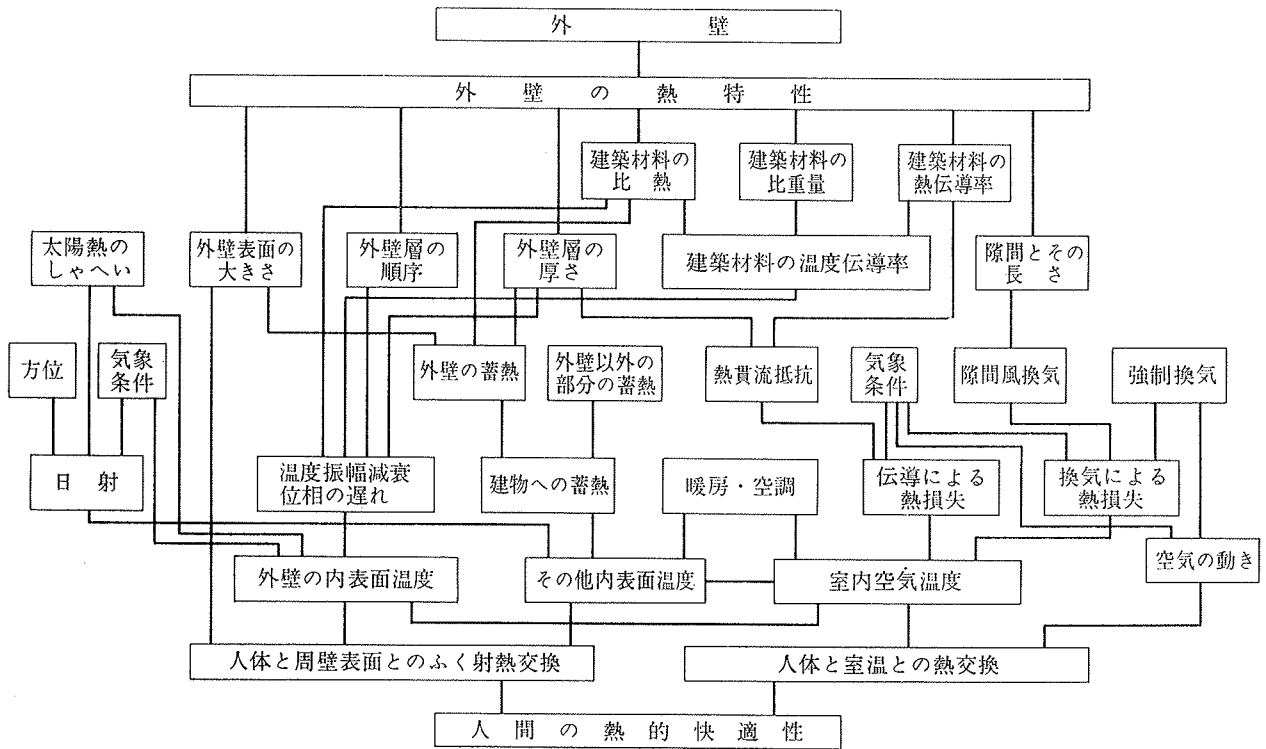


図-1

かの評価項目を諸外国の例に倣って設定したが、中にはわが国ではなじみの薄いものもある。ここでいくつかの項目に対し簡単な解説を行なう。

3.1. 蓄熱数 (Wärmespeicherungszahl W)

オーストリアの断熱基準 B8110 に記されている評価法の一つで、単位は kcal/m<sup>2</sup>·K である。室内外に温度差が 1℃ あり、温度の振幅が壁を通過して減衰していく状態のとき外壁 1 m<sup>2</sup> に蓄えられる熱量と定義されている。多層壁の場合、(1)式によって算出される<sup>1)</sup>。

$$W = K \cdot \left\{ d_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot \left( \frac{1}{\alpha_e} + \frac{d_1}{2 \cdot \lambda_1} \right) + d_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot \left( \frac{1}{\alpha_e} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_2} \right) + \dots + d_n \cdot \rho_n \cdot c_n \cdot \left( \frac{1}{\alpha_e} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{d_n}{2 \cdot \lambda_n} \right) \right\} \dots \dots \dots (1)$$

- ただし、K: 外壁の熱貫流率 (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)
- di: i 層目の材料の厚さ (m)
- ρi: 同比重量 (kg/m<sup>3</sup>)
- ci: 同比熱 (kcal/kg·k)
- λi: 同熱伝導率 (kcal/m·h·k)
- αe: 外表面熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)

3.2. 温度振幅減衰 (Temperaturamplituden dämpfung ν)

図-3 でみるように、温度波は壁を通過することにより、波長 (τ<sub>0</sub>) は同一のまま振幅が減衰するが、その

際の減衰比を温度振幅減衰と呼びνで表わすと、

$$\nu = A_{te} / A_{\theta i} \dots \dots \dots (2)$$

となる。νは無次元数で、その大きさは内外表面の熱伝達率、壁体の物理的特性、厚さによって変化し、値が大きい程外壁の熱容量が大きく外乱の影響も少ない。

νを求める簡易計算式を、(4)式~(7)式に示す<sup>2)3)</sup>。

3.3. 位相の遅れ (Phasenverschiebung η)

νと同様に、温度波長、熱伝達率などの関数として表わされ、壁体のν値が大きければ、位相の遅れ (η) も大きい。ただし、ν値が壁体の厚さによって急激に増加するのに対し、ηは直線的にゆっくり上昇するので、常に評価基準となる。ηは時間によって表わされ、例えば η=14h とすれば、夏の場合太陽熱によって生じた最大温度は14時間後に内面に現われ、室内に向けてふく射さ

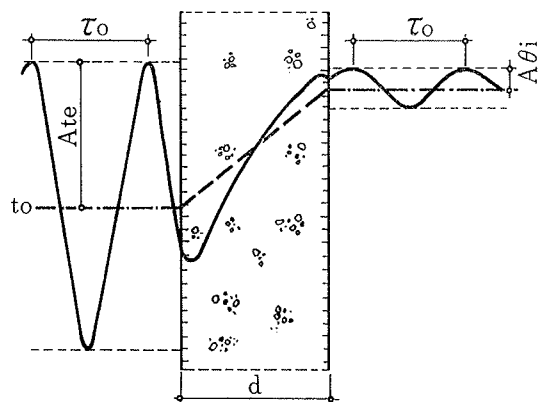


図-3 温度振幅の減衰 (文献 2, V. Barcs による)

れる。 $\eta$ を求める簡易式を、(8)式~(9)式に示す<sup>23)</sup>。

3.4. 24時間周期に対する蓄熱値 (S)

温度振幅減衰および位相の遅れを求めるには、気候の影響を考慮して、材料の24時間周期に対する蓄熱値  $s$  (kcal/m<sup>2</sup>·h·k) を算出しておく。これは、加熱時間を24時間としたときの、単位面積、単位時間あたり温度差1℃のときの蓄熱量を表わすと定義され、国際的にも使用されている。Sは(3)式によって計算されるが、一般外壁の最高値はほぼ14.0である<sup>1)23)</sup>。

$$S = 0.512 \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \text{ (kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{k)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $\lambda$ : 材料の熱伝導率 (kcal/m·h·k)

$\rho$ : 比重量 (kg/m<sup>3</sup>)

$c$ : 比熱 (kcal/kg·k)

ここで、 $d$ : 材料の厚さ (m)

$\alpha_i$ : 内表面熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)

$\alpha_e$ : 外表面熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)

とし、24時間周期に対する蓄熱値:  $s$  (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)

熱抵抗:  $R = d/\lambda$  (m<sup>2</sup>·h·k/kcal)

熱慣性:  $D = RS = R \cdot 0.512 \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$

表面層の蓄熱値:  $U$  (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)

とすれば、単層壁の場合の温度振幅減衰  $\nu$  は、

$$\nu = 0.9e^x \frac{(S + \alpha_i)(\alpha_e + U_1)}{(S + U_1) \cdot \alpha_e} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 $U_1 = S_1$  (熱慣性  $D \geq 1$  のとき)

$$U_1 = \frac{R_1 S_1^2 + \alpha_i}{1 + R_1 \cdot \alpha_i} \text{ (熱慣性 } D < 1 \text{ のとき)}$$

また、 $e^x$  は指数関数で  $x = \Sigma D / \sqrt{2}$

2層壁の場合の  $\nu$  は、

$$\nu = 0.9e^x \frac{S_1 + \alpha_i}{S_1 + U_1} \cdot \frac{S_2 + U_1}{S_2 + U_2} \cdot \frac{\alpha_e + U_2}{\alpha_e} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 $U_2 = S_2$  ( $D \geq 1$ )、 $U_2 = \frac{R_2 \cdot S_2^2 + U_1}{1 + R_2 \cdot U_1}$  ( $D < 1$ )

3層壁の場合の  $\nu$  は、

$$\nu = 0.9e^x \frac{S_1 + \alpha_i}{S_1 + U_1} \cdot \frac{S_2 + U_1}{S_2 + U_2} \cdot \frac{S_3 + U_2}{S_3 + U_3} \cdot \frac{\alpha_e + U_3}{\alpha_e} \quad \dots\dots(6)$$

ただし、 $U_3 = S_3$  ( $D \geq 1$ )、 $U_3 = \frac{R_3 \cdot S_3^2 + U_2}{1 + R_3 \cdot U_2}$  ( $D < 1$ )

4層壁の場合の  $\nu$  は、

$$\nu = 0.9e^x \frac{S_1 + \alpha_i}{S_1 + U_1} \cdot \frac{S_2 + U_1}{S_2 + U_2} \cdot \frac{S_3 + U_2}{S_3 + U_3} \cdot \frac{S_4 + U_3}{S_4 + U_4} \cdot \frac{\alpha_e + U_4}{\alpha_e} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $U_4 = S_4$  ( $D \geq 1$ )、 $U_4 = \frac{R_4 \cdot S_4^2 + U_3}{1 + R_4 \cdot U_3}$  ( $D < 1$ )

位相の遅れ  $\eta$  は、単層壁の場合、

$$\eta = \frac{1}{15} \left( 40.5 D - \arctan \frac{\alpha_i}{\alpha_i + S\sqrt{2}} + \arctan \frac{S}{S + \alpha_e\sqrt{2}} \right) \quad \dots\dots\dots(8)$$

多層壁の場合の  $\eta$  は、

$$\eta = \frac{1}{15} \left( 40.5 \Sigma D - \arctan \frac{\alpha_i}{\alpha_i + U_i\sqrt{2}} + \arctan \frac{U_e}{U_e + \alpha_e\sqrt{2}} \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 $U_i$ : いちばん内側の層の蓄熱値 (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)

$U_e$ : いちばん外側の層の蓄熱値 (kcal/m<sup>2</sup>·h·k)

$$1/15 = \tau_0/360 = 24/360$$

$$40.5 = 360/2\pi\sqrt{2}$$

3.5. 水蒸気拡散抵抗係数 (Diffusionswider standsfaktor  $\mu$ )

内部結露の有無をチェックするためには、壁体内の水蒸気の拡散を考慮する必要がある。壁体内の水蒸気拡散は、わが国では、 $\lambda'$  を湿気伝導率 (gr/m·h·mmHg) として(10)式で示されるが、この  $\lambda'$  の値は各研究機関などでまじまじに測定され統一されたものがないことから、この研究では  $\lambda'$  のかわりに  $\mu$  (水蒸気拡散抵抗係数) を採用している。

$$w = -\lambda' \cdot dp/dx \text{ (gr/m}^2 \cdot \text{h)} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ただし、 $w$ : 単位時間に単位面積を通過する水蒸気量

$P$ : 蒸気圧 (mmHg)

$x$ : 流路に沿う長さ (m)

$\mu$  は無次元数で、(11)式のように定義されている。

$$\mu = D(p_1 - p_2) / G \cdot s \cdot Rd \cdot T \quad \dots\dots\dots(11)$$

ただし、 $D$ : 空気中における水蒸気の拡散数 (m<sup>2</sup>/h)

$P_1$ : 試験体外側の水蒸気分圧 (kgf/m<sup>2</sup>)

$P_2$ : 同内側の水蒸気分圧 (kgf/m<sup>2</sup>)

$G$ : 試験体を通じ拡散する水蒸気の重量 (kg/m<sup>2</sup>·h)

$s$ : 試験体の厚さ (m)

$Rd$ : 水蒸気的气体定数 (m·kgf/kg·k)

$T$ : 絶対温度 (k)

いくつかの材料の  $\mu$  値を表-1に示す。空気は  $\mu$  値は1となる。一方、水蒸気の伝導抵抗は  $\mu \cdot s \cdot N$  で表わさ

材 料 名	$\mu$ 値	材 料 名	$\mu$ 値
気泡コンクリート	6	岩綿板	1.2
コンクリート 225kg/m <sup>2</sup>	60	木毛板	5
モルタル	10	プラスター	9
発泡スチレン板	25	PVCシート	60,000

表-1 いくつかの材料の水蒸気拡散抵抗係数(文献1より)

温 度	N(m·h·kgf/m <sup>2</sup> ·kg)	温 度	N(m·h·kgf/m <sup>2</sup> ·kg)
30℃	0.1425×10 <sup>6</sup>	-10℃	0.1597×10 <sup>6</sup>
20	0.1462×10 <sup>6</sup>	-20	0.1648×10 <sup>6</sup>
10	0.1504×10 <sup>6</sup>	-30	0.1702×10 <sup>6</sup>
0	0.1549×10 <sup>6</sup>		

表-2 空気の水蒸気伝導抵抗と温度との関係(文献4より作成)

れる。s は材料の厚さ(m)で、Nは空気の水蒸気伝導抵抗 (m・h・kgf/m<sup>2</sup>・kg) N=Rd・T/D である。Nは温度により変化し、表-2 のようになるのであるが、常温での変化は小さいとみれば、壁体内部の結露をチェックするのに実際には μ・s のみをもって行なうこともできる。なお、水蒸気拡散抵抗係数(μ)と湿気伝導率(λ')とは次のような対応を示す。

$$\mu \cdot s \cdot N \text{ (kgf} \cdot \text{h/kg)} \doteq 73.5559s/\lambda' \text{ (m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/gr)}$$

### 3.6. 状態係数 (Lagefaktor) 状態値 (Lagewert)

多層壁を構成する各材料を並べるにあたり、内部結露が起こらないように配慮しなければいけない。この判断を簡単に行なうため、E. Neufert は状態係数という値を

導入している。状態係数は μ・λ(kcal/m・h・k) で表わされ、各層の状態係数を室内から外へできるだけ減少するように並べると内部結露を起こさないとしている<sup>5)</sup>。H. Hebgren と F. Heck は状態値という値を導入し、内部結露の起こりやすさの判定は状態係数だけですべきでなく、これに材料の厚さを乗じて判断しなければいけないとし、状態値を μ・λ・s (kcal/h・k) で定義している。この場合も、室内から外へできるだけ状態値が減少するように配置すべきであるとしている<sup>1)</sup>。

### 4. 評価リスト

各種外壁について作成した熱的な評価リストの中から、

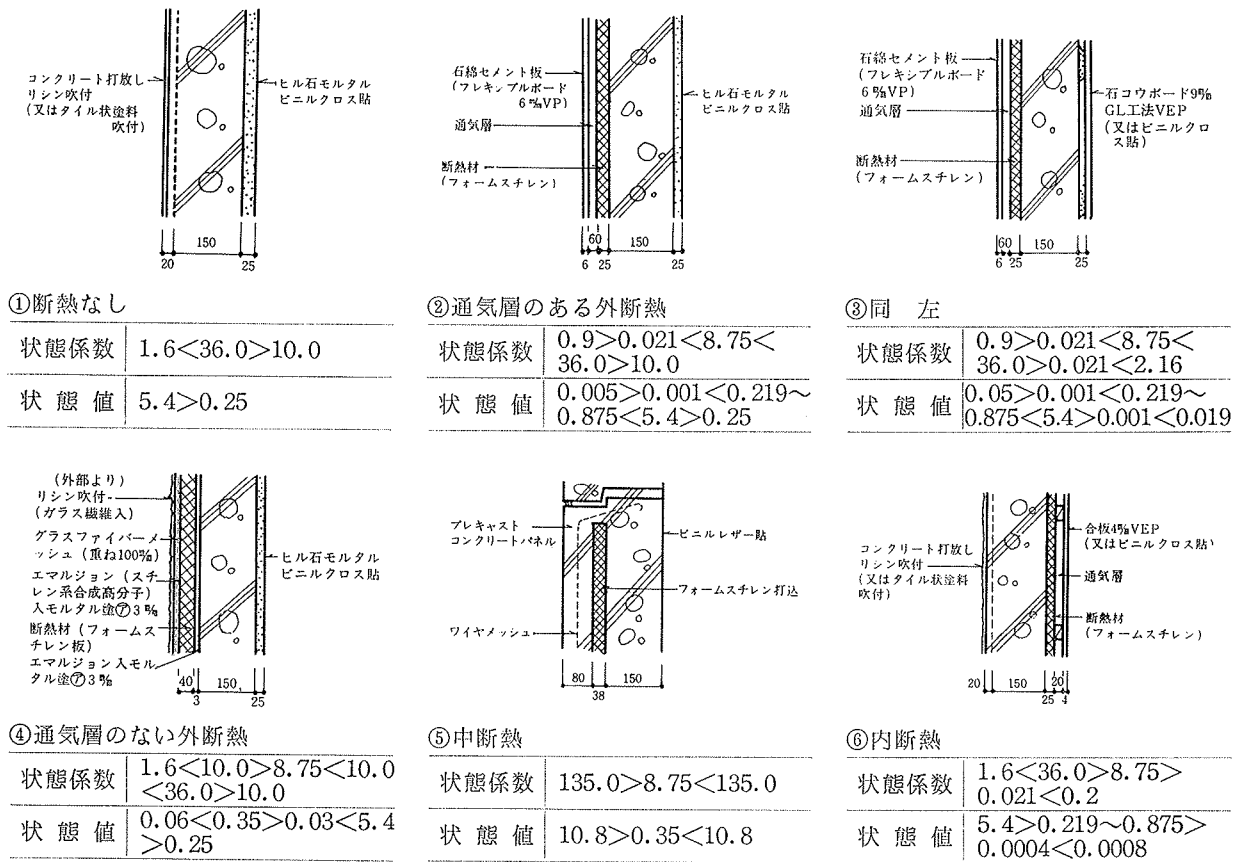


図-4 外壁の断面概略と状態係数、状態値

	単位	①断熱なし		②③ 外断熱				④	⑤	⑥ 内断熱					
		—	—	25	40	50	75	100	40	40	25	40	50	75	100
断熱材の厚さ	mm	—	—	25	40	50	75	100	40	40	25	40	50	75	100
壁厚	mm	175	195	266	281	291	316	341	233	270	199	214	224	249	274
壁重量	kg/m <sup>2</sup>	380	424	391.8	392.4	392.8	393.8	394.8	357.7	576	332.2	332.8	333.2	334.2	335.4
蓄熱数(W)	kcal/m <sup>2</sup> ・K	35.8	40.6	76.8	82.1	83.9	87.3	88.9	65.3	85.4	9.0	6.8	5.8	4.6	3.9
熱貫流率(K)	kcal/m <sup>2</sup> ・h・K	3.08	2.93	0.94	0.67	0.56	0.40	0.31	0.67	0.68	0.91	0.66	0.55	0.40	0.31
熱貫流抵抗(1/K)	m <sup>2</sup> ・h・K/kcal	0.33	0.34	1.06	1.49	1.77	2.49	3.20	1.50	1.47	1.09	1.52	1.81	2.52	3.24
水蒸気拡散抵抗係数(μ)	独立気泡	4.8	5.4	11.1	14.8	17.3	23.6	29.8	14.7	30.7	10.8	14.5	17.0	23.3	29.5
	連続気泡	—	—	6.1	6.8	7.3	8.6	9.8	6.7	22.7	5.8	6.5	7.0	8.3	9.5
温度損幅減衰(ν)	—	6.2	7.3	27.3	39.3	47.6	69.3	93.6	41.2	84.0	26.6	38.0	45.8	66.3	89.3
位相の遅れ(η)	h	5.2	5.8	6.2	6.5	6.8	7.4	8.0	6.0	7.3	5.3	5.7	6.0	6.6	7.2

表-3 外壁の熱的な評価リスト一覧

項目 材料	厚さ (mm)	比重 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (kcal/kg·K)	熱伝導率 (kcal/m·h·K)	水蒸気拡散 抵抗係数 (-)	24時間周期に 対する蓄熱値 (kcal/m <sup>2</sup> ·h·K)	状態係数 (kcal/m·h·K)	状態値 (kcal/h·K)
コンクリート	150 170	2200	0.25	1.200	30.0	13.2	36.000	5.4000
P C 板	230	2500	0.25	1.500	90.0	15.7	135.000	31.0500
モルタル	3 25	2000	0.25	1.000	10.0	11.4	10.000	0.0300 0.2500
A L C 板	50	640	0.25	0.330	4.0	3.7	1.320	0.0660
グラスウール	25 50 100	30	10.20	0.035	1.0	0.2	0.035	0.0009 0.0018 0.0035
石綿セメント板	6	1800	0.23	0.300	3.0	5.7	0.900	0.0054
ロックウール	25 50	40	0.20	0.035	1.1	0.3	0.039	0.0010
発泡ポリスチレン (独立気泡)	10 25 40 50 75 100	40	0.29	0.035	250.0	0.3	8.750	0.0875 0.2188 0.3500 0.4375 0.6563 0.8750
発泡ポリスチレン (連続気泡)	10 25 40 50 75 100	25	0.29	0.035	50.0	0.3	1.750	0.0175 0.0438 0.0700 0.0875 0.1313 0.1750
発泡ポリウレタン	25 35 50	30	0.33	0.030	40.0	0.3	1.200	0.0300 0.0420 0.0600
合板	4	300	0.40	0.050	4.0	1.3	0.200	0.0008
石こうボード	9	900	0.20	0.180	12.0	2.9	2.160	0.0194
岩綿成形板	12	300	0.20	0.035	4.0	0.7	0.140	0.0017

表—4 各種材料の物性値一覧

断熱材としてフォームスチレン板を使用しているもののみを取り出し、これをそのディテールとともに示すと、図—4および表—3のようになる。なお、これらの図および表には、比較のために断熱なしの外壁も含めている。各種外壁の熱特性について、以下にその概略を述べる。

(1) 蓄熱数は、外断熱と中斷熱とでは大差がなく、ともに高い数値を示しているものの、内断熱の場合ではその値が極めて低い(図—5参照)。また、外断熱および中

断熱の場合、断熱材が厚くなることによって蓄熱数も増加するのに対し、内断熱ではこの傾向が逆転する。すなわち、蓄熱容量は減少する。

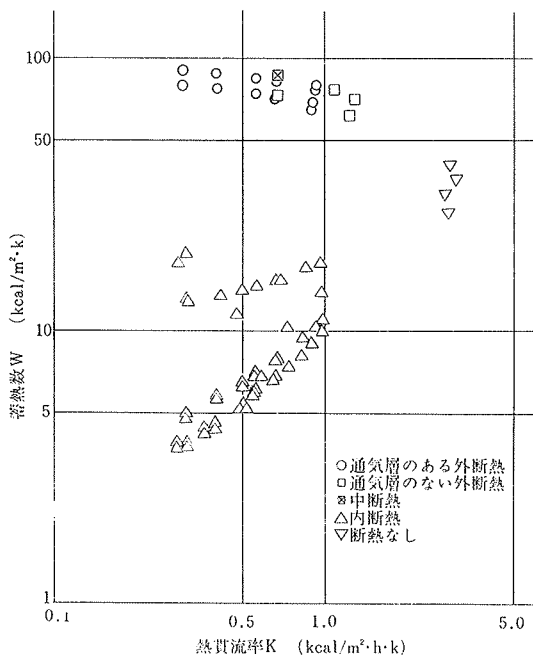
(2) 温度振幅減衰および位相の遅れは、内断熱と比較した場合外断熱の方が数値が高く、外乱の影響を受けにくいと言えよう。なお、水蒸気拡散抵抗は、断熱材の透湿性の違いによって明らかに二群に分けられ、これは壁全体の透湿性を支配する。

### 5. あとがき

今回選定した評価項目の中には、我国ではまだ一般に使われていないものが多い。従って、この報告はそのような項目を紹介することに主眼を置き、熱特性の検討は概略にとどめた。しかし、建物の省エネルギー化が叫ばれている現在、人間の熱的快適性や経済性に観点を置いた合理的な断熱の必要性はさらに高まると予想されることから、今後は、実験による裏付けも含めた詳細な研究を行なう所存である。

### 参考文献

- 1) H. Hebggen, F. Heck: Außenwandkonstruktionen mit optimalem Wärmeschutz
- 2) F. Eichler: Bauphysikalische Entwurfslehre
- 3) F. Eichler: Praktische Wärmelehre in Hochbau
- 4) K. Seiffert: Wasserdampfdiffusion in Bauwesen
- 5) E. Neuffer: Styropor Handbuch



図—5 各種外壁における蓄熱数の分布