

高層建築における窓ガラスの熱負荷

Heat Losses Through Window Glass of Skyscraper

大 沢 宏* 松 田 弘 一*
Hiroshi Ōsawa Hiroichi Matsuda

内 容 梗 概

空気調和負荷計算において、今までの低層建築では窓ガラスの熱貫流率を一定として考えてきたが、今後わが国でも高層建築が多く建てられるようになってきたので、そびえ建つ高層部における風速および天空放射を考え、ガラス表面の対流熱伝達率、放射熱伝達率より熱貫流率を計算したものである。

1. 緒 言

空気調和設備は最近 10 年間に非常に発達して、ほとんどあらゆる建物に取り入れられ、近代的な恒久建築物としては必需設備となつてつあるのが現状である。しかも近年建築基準法が改正されて、今までの 31m という高さの制限が撤廃され、高層建築が建てられるようになってきた。そこで建物が高層化されたとき、今までの低層ビルに比べ、暖冷房負荷に大きな影響を与える窓ガラスの熱負荷について、屋外風速、天空放射冷却を考慮して外側総括熱伝達率および熱貫流率の一部の計算を試み空調設備設計用の実用的数値を得んとしたものである。なお本計算では太陽日射を考えていないので冬期および夏期夜間についての諸数値である。

2. 設計用屋外風速

自然大気の風速は地表面からの高さが高くなるほど増加することが実測され、一般に地上約 500 m までは Douglas Archibad の実験式が適用される⁽⁵⁾。すなわち

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h, h_0 : 任意の高さおよび基準高さ (m)

v, v_0 : h, h_0 における風速 (m/s)

n : 定数

(1)式において基準高さ h_0 は気象台測定高度の平均をとり、 $h_0 = 15\text{m}$ とし基準高さ h_0 における風速 v_0 としては、現在低層ビル設計用風速として用いられている夏期 3 m/s、冬期 5 m/s を用い⁽¹⁾、また定数 n については中央気象台の実測値は $\frac{1}{3}$ であるが、空調換気計算用として $\frac{1}{4}$ が推奨され⁽⁵⁾ ているので、両者について計算した結果第 1 図を得た。

この高さと風速の関係曲線に見られるように高空にゆくほど、すなわち建物の高層部分になるほど、風速の変化は少なくなるので、高さを 3 段階に分けそれぞれ夏期、冬期の設計用風速を定めて実用計算に便するようにしたのが第 1 表である。

3. 外側総括熱伝達率

建物の外気側の表面熱伝達率は対流熱伝達率と放射熱伝達率を合わせた見かけの熱伝達率を用いる。

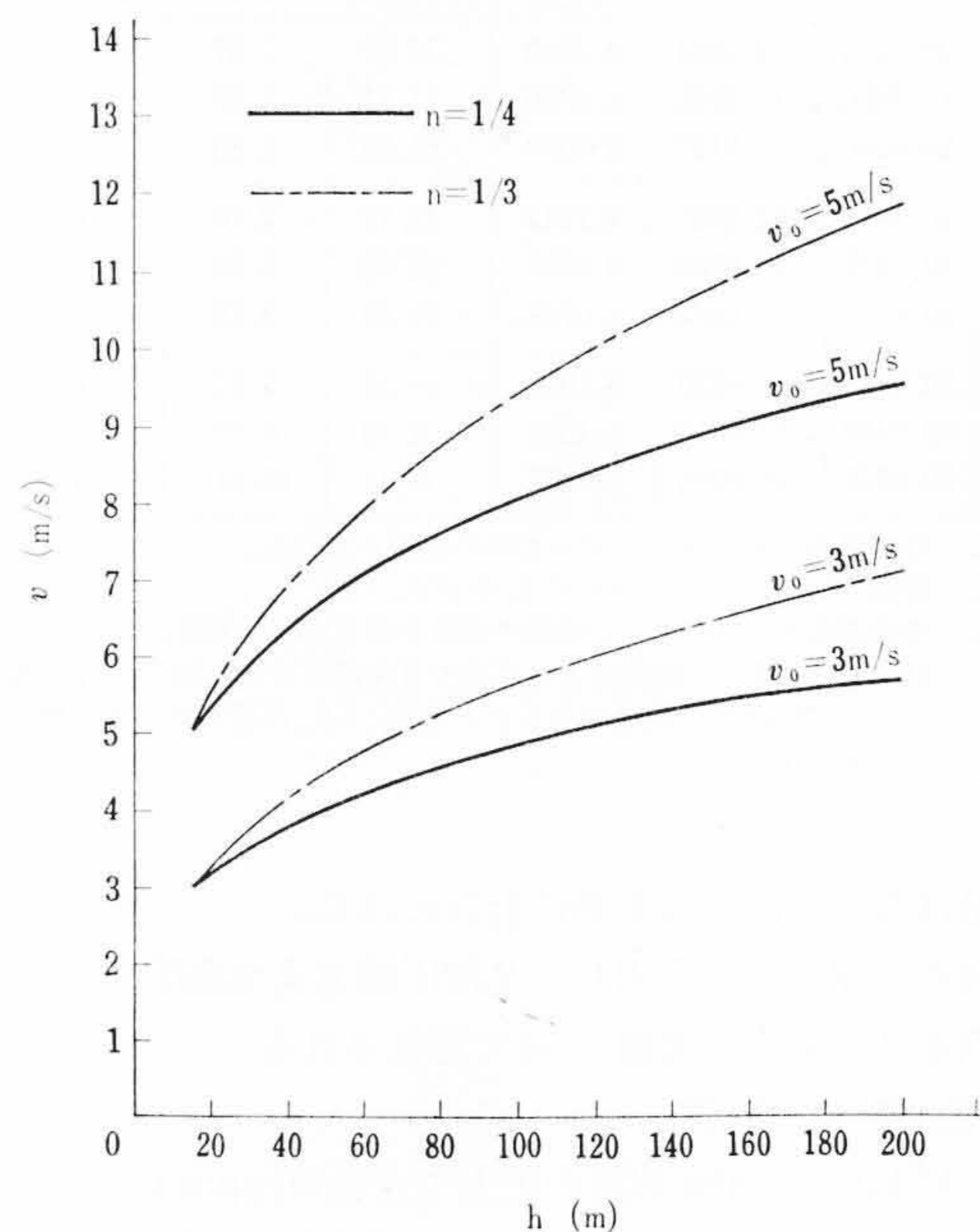
$$\alpha_0 = \alpha_{0c} + \alpha_{0r} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 α_0 : 外側総括熱伝達率 (kcal/m²h°C)

α_{0c} : 外側対流熱伝達率 (kcal/m²h°C)

α_{0r} : 外側放射熱伝達率 (kcal/m²h°C)

普通建築に対する従来の値は $\alpha_{0r} = 3 \sim 4$ (kcal/m²h°C) の常数として扱われてきた。しかし高層部に至ってはこれをはるかに越える大きな数値となるので、別に天空放射損失を計算してこれより α_{0r}



第 1 図 高さと風速
(1)式より計算した値で夏期は $v_0 = 3 \text{ m/s}$ 、冬期は $v_0 = 5 \text{ m/s}$ の曲線を用いる

第 1 表 屋外設計用風速 (m/s)

h (m)	夏 期	冬 期	備 考
$h < 30$	3	5	低 層 部
$30 < h < 100$	5	8	中 層 部
$100 < h < 200$	7	10	高 層 部

を求めた。

(1) 外側対流熱伝達率

建物の外表面の対流熱伝達率は外気風速 v に比例し、その関係は一般に実用化されている Jürges の実験式が適用される。すなわちガラスのような平滑面に対しては

$$v \leq 5 \text{ m/s のとき } \alpha_{0c} = 4.8 + 3.4 v \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$v > 5 \text{ m/s のとき } \alpha_{0c} = 6.12 v^{0.78} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式に第 1 表の設計用風速を代入して、外側対流熱伝達率 α_{0c} を得る。

第 2 表 高さによる α_{0c} の変化 (kcal/m²h°C)

h (m)	夏 期	冬 期	備 考
$h < 30$	15.0	21.8	低 層 部
$30 < h < 100$	21.8	31.0	中 層 部
$100 < h < 200$	27.9	36.8	高 層 部

* 日立工事株式会社

(2) 外側放射熱伝達率

建物の外気側表面の放射熱伝達率は多くの要素によって決まるもので、いま外気に面するガラスの表面単位面積から出入りする熱量を考えると

$$q = q_c + q_r \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし上式は屋内より屋外へ流れる熱量を正とした。またこの熱量は室内側への出入り熱量に等しいから

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{l}{\lambda}} (t_i - t_{s0}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(5)式において

q_c : 外側対流熱伝達量 (kcal/m²h)

q_r : 外側放射熱伝達量 (kcal/m²h)

また(6)式において

α_i : 内側表面熱伝達率 (kcal/m²h°C)

λ : ガラスの熱伝導率 (kcal/mh°C)

l : ガラスの厚さ (m)

t_i, T_i : 室内温度 (°C, °K)

t_0, T_0 : 外気温度 (°C, °K)

t_{s0}, T_{s0} : ガラスの外側表面温度 (°C, °K)

(5)式の対流熱伝達量は

$$q_c = \alpha_{0c} (t_{s0} - t_0) \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、放射熱伝達量をまとめて次式のように表わす。

$$q_r = \alpha_{0r} (t_{s0} - t_0) \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、 q_r は仮想天空放射面を考えると、放射の基礎式⁽⁶⁾より

$$q_r = 4.88 \cdot \varepsilon \cdot \varphi \left[\left(\frac{T_{s0}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_R}{100} \right)^4 \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

よって(8)式と(9)式より

$$\alpha_{0r} = \frac{4.88 \cdot \varepsilon \cdot \varphi \left[\left(\frac{T_{s0}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_R}{100} \right)^4 \right]}{t_{s0} - t_0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

t_R, T_R : 仮想天空放射面温度 (°C, °K)

ε : ガラスの放射率 (0.9)

φ : 建物の形態係数

放射熱伝達率 α_{0r} はガラスの外表面温度 t_{s0} 、外気温度 t_0 、仮想天空放射面温度 T_R を知れば求められる。

仮想天空放射面温度 T_R は Brunt の式⁽²⁾より水平面、垂直面 (H. V. の符号であらわす) に対する温度が得られ、(9)式に代入

することにより放射熱伝達量 q_r が得られる。このとき水平面の場合は形態係数 $\varphi=1$ とし垂直面の場合はさらに大地との放射 ($\varphi=0.5$ 、地面温度 $T=T_0$ と仮定) があると考えると

$$T_{RH}^4 = T_0^4 (0.55 + 0.0654 \sqrt{h}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$T_{RV}^4 = T_0^4 (0.80 + 0.0327 \sqrt{h}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$q_{rH} = 4.88 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_{s0}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 (0.55 + 0.654 \sqrt{h}) \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$q_{rV} = 4.88 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_{s0}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 (0.80 + 0.327 \sqrt{h}) \right] \quad \dots\dots\dots (14)$$

h : 外気の水蒸気分圧 (mmHg)

以上より(5)式と(6)式は等しいゆえ、これに(7)式および(13)式(垂直面の場合は(14)式)を代入すると

$$q_c + q_r = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{l}{\lambda}} (t_i - t_{s0}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\alpha_{0c} (t_{s0} - t_0) + 4.88 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_{s0}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 (0.55 + 0.0654 \sqrt{h}) \right] = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{l}{\lambda}} (t_i - t_{s0}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

となり、この式に夏期、冬期の室内外設計標準状態の α_{0c} 、 α_i 、 t_0 、 t_i 、 h およびガラスの λ 、 l を代入すれば外側表面温度 t_{s0} を得、さらに、(13)式、(14)式によって q_r を計算し(10)式によって外側放射熱伝達率 α_{0r} を得る。各条件における高さによる外側熱伝達率 α_0 の計算値は第3～5表に示すとおりである。

(3) 外側総括熱伝達率

総括熱伝達率は対流熱伝達率と放射熱伝達率を合計したものであるから、次にその一計算例を示すとともに各計算値を整理すると第3～5表のようになる。

第3表 α_0 およびその他の計算値 ($t=3$ mm ガラス)

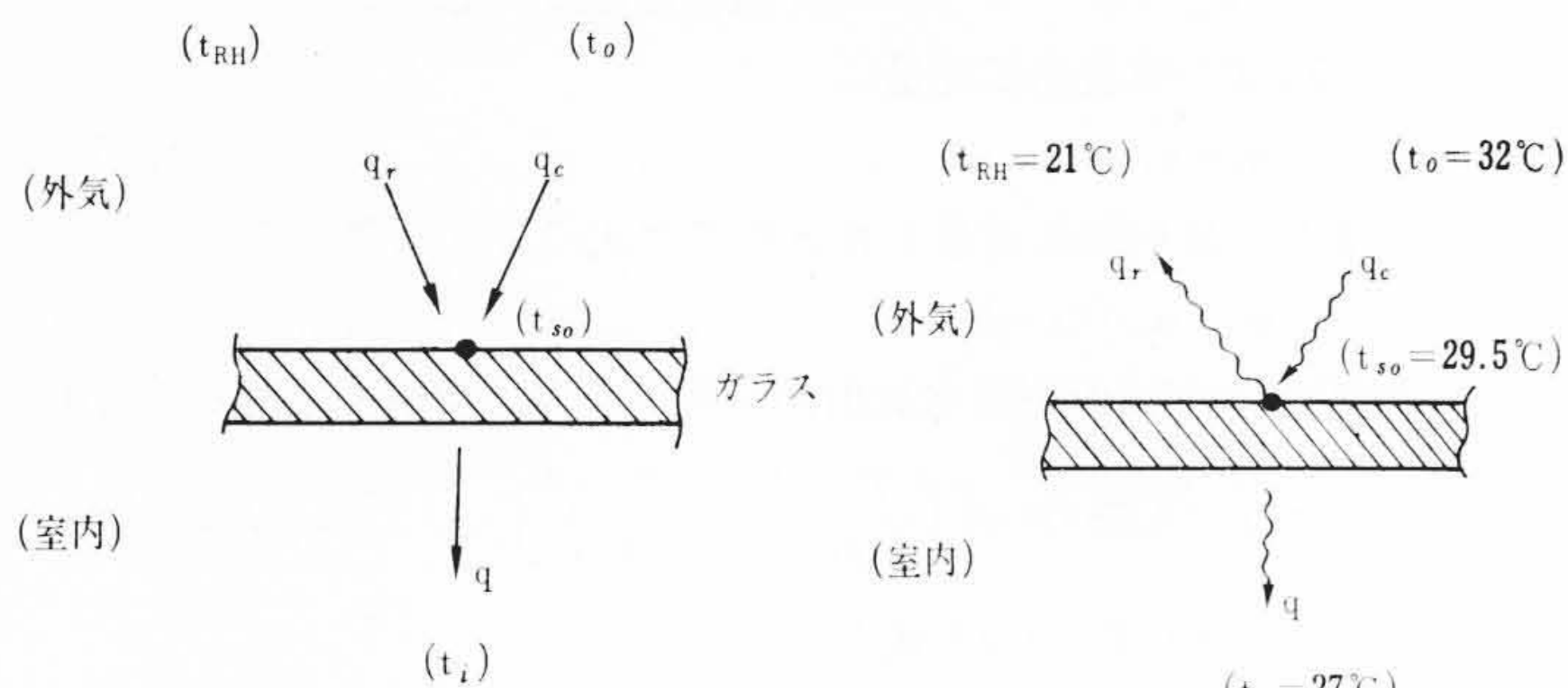
		水 平 ガ ラ ス				垂 直 ガ ラ ス			
		夏 期		冬 期		夏 期		冬 期	
h	m	100	200	100	200	100	200	100	200
t_{RH}	°C	21	21	-30	-30	29	29	-12.7	-12.7
t_{s0}	°C	29.5	29.9	0.75	0.55	30.5	30.7	1.95	1.55
q_r	kcal/m ² h	-36.2	-38.1	93.9	93.1	-7.7	-8.6	48.5	47.1
q_c	kcal/m ² h	54.5	58.6	54.3	57.0	32.7	36.2	91.5	93.9
q	kcal/m ² h	18.3	20.5	148.2	150.1	25.0	27.6	140.0	141.0
α_{0r}	kcal/m ² h°C	-14.5	-18.1	53.6	60.0	-5.1	-6.6	16.4	18.5
α_{0c}	kcal/m ² h°C	21.8	27.9	31.0	36.8	21.8	27.9	31.0	36.8
α_0	kcal/m ² h°C	7.3	9.8	84.6	96.8	16.7	21.3	47.4	55.3
Δt_0	°C	-1.66	-1.37	3.03	2.53	-0.35	-0.31	1.56	1.28
t'_0	°C	30.34	30.63	-4.03	-3.53	31.65	31.7	-2.56	-2.28

第4表 α_0 およびその他の計算値 ($t=5$ mm ガラス)

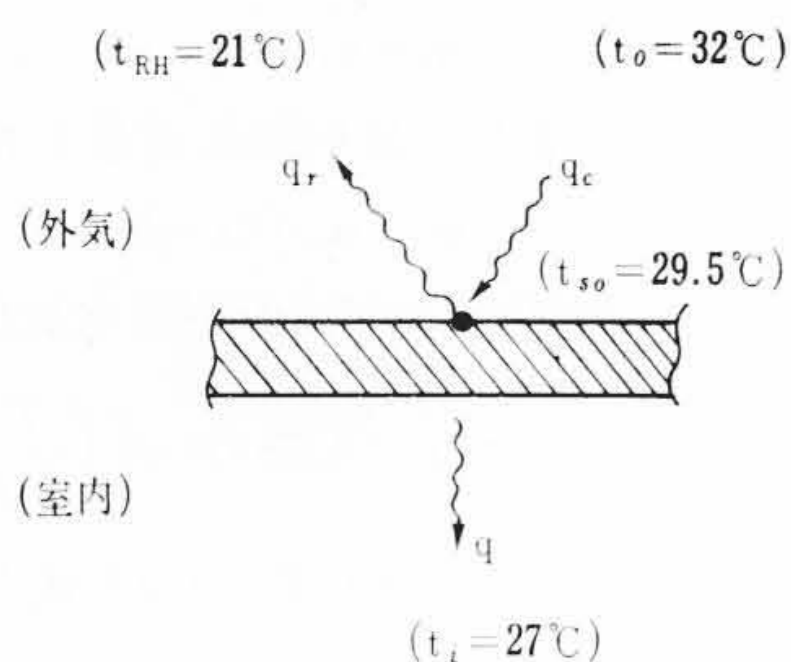
		水 平 ガ ラ ス				垂 直 ガ ラ ス			
		夏 期		冬 期		夏 期		冬 期	
h	m	100	200	100	200	100	200	100	200
t_{RH}	°C	21	21	-30	-30	29	29	-12.7	-12.7
t_{s0}	°C	29.5	29.9	0.7	0.5	30.5	30.7	1.85	1.50
q_r	kcal/m ² h	-36.2	-38.1	93.6	93.0	-7.7	-8.6	48.1	46.8
q_c	kcal/m ² h	54.5	58.6	52.7	55.2	32.7	36.2	88.4	92.0
q	kcal/m ² h	18.3	20.5	146.3	148.2	25.0	27.6	136.5	138.8
α_{0r}	kcal/m ² h°C	-14.5	-18.1	55.0	62.0	-5.1	-6.6	16.9	18.7
α_{0c}	kcal/m ² h°C	21.8	27.9	31.0	36.8	21.8	27.9	31.0	36.8
α_0	kcal/m ² h°C	7.3	9.8	86.0	98.8	16.7	21.3	47.9	55.5
Δt_0	°C	-1.66	-1.37	3.02	2.52	-0.35	-0.31	1.55	1.27
t'_0	°C	30.34	30.63	-4.02	-3.52	31.65	31.7	-2.55	-2.27

第5表 α_0 およびその他の計算値 ($t=8$ mm ガラス)

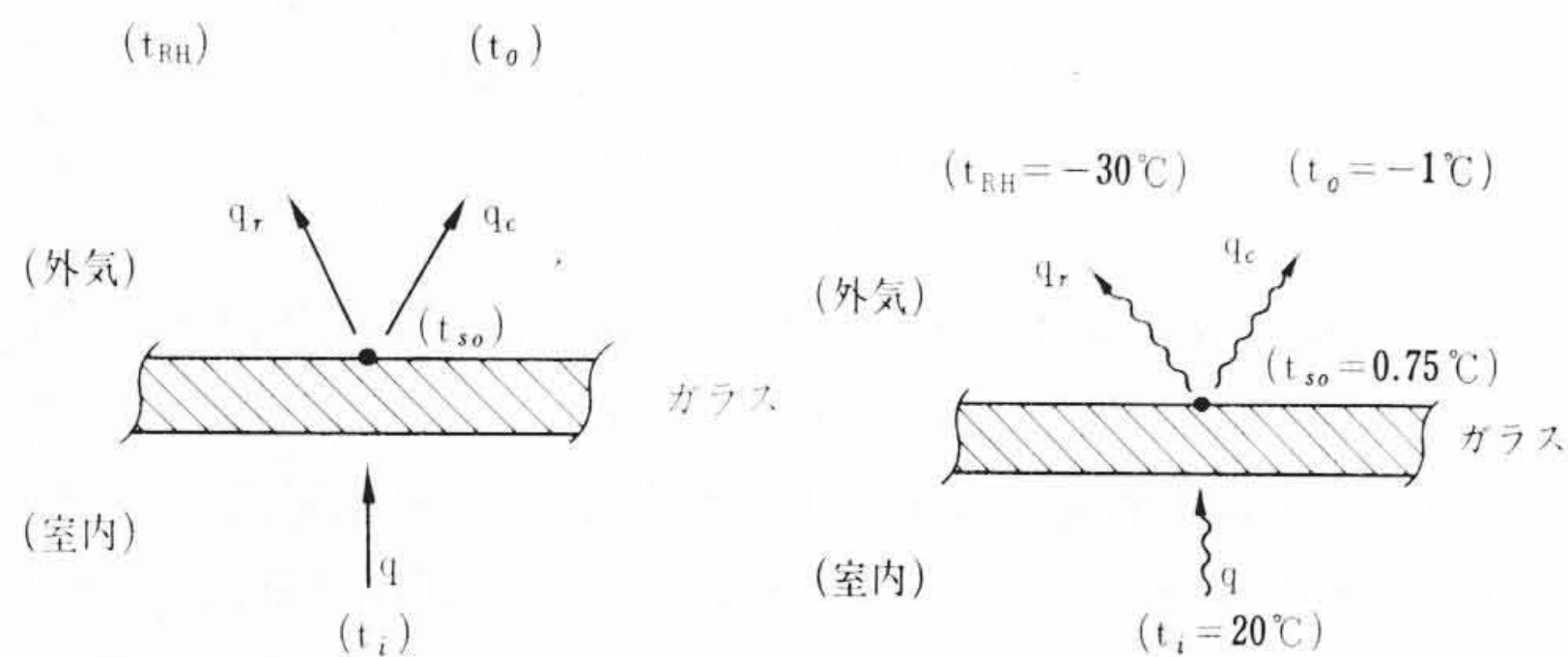
		水 平 ガ ラ ス				垂 直 ガ ラ ス			
		夏 期		冬 期		夏 期		冬 期	
h	m	100	200	100	200	100	200	100	200
t_{RH}	°C	21	21	-30	-30	29	29	-12.7	-12.7
t_{s0}	°C	29.5	29.9	0.60	0.40	30.5	30.7	1.75	1.40
q_r	kcal/m ² h	-36.2	-38.1	93.3	92.5	-7.7	-8.6	47.7	46.5
q_c	kcal/m ² h	54.5	58.6	49.6	51.5	32.7	36.2	85.2	88.4
q	kcal/m ² h	18.3	20.5	142.9	144.0	25.0	27.6	132.9	134.9
α_{0r}	kcal/m ² h°C	-14.5	-18.1	58.3	66.0	-5.1	-6.6	17.4	19.4
α_{0c}	kcal/m ² h°C	21.8	27.9	31.0	36.8	21.8	27.9	31.0	36.8
α_0	kcal/m ² h°C	7.3	9.8	89.3	102.8	16.7	21.3	48.4	56.2
Δt_0	°C	-1.66	-1.37	3.01	2.51	-0.35	-0.31	1.54	1.26
t'_0	°C	30.34	30.63	-4.01	-3.51	31.65	31.7	-2.54	-2.28



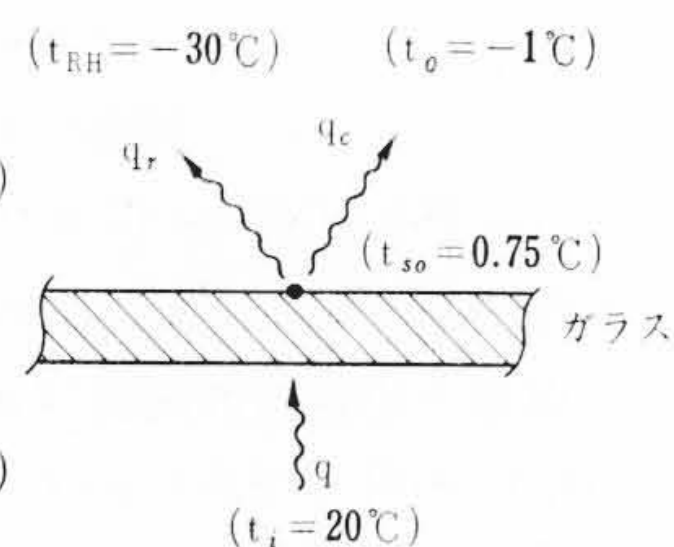
第2図 熱取得の仮定図



第3図 実際の熱平衡



第4図 熱取得の仮定図



第5図 実際の熱平衡

[計算例]

高さ100mの水平面普通ガラス(厚さ3mm)に対する外気側表面温度および熱伝達率の計算

夏期水平面ガラスについて

計算条件

$$\begin{aligned} \text{外気} & \begin{cases} t_o = 32^\circ\text{C} \\ \varphi = 68\% \\ h = 24.4 \text{ mmHg} \end{cases} \\ \text{室内} & \begin{cases} t_i = 27^\circ\text{C} \\ \varphi = 50\% \end{cases} \end{aligned}$$

$$h = 24.4 \text{ mmHg}$$

$$T_o = 273 + 32 = 305^\circ\text{K}$$

$$\begin{aligned} T_{RH}^4 &= T_o^4 (0.55 + 0.0654 \sqrt{h}) \\ &= 305^4 (0.55 + 0.0654 \sqrt{24.4}) \\ &= 75.5 \times 10^8 \end{aligned}$$

$$T_{RH} = 294^\circ\text{K} \quad \therefore t_{RH} = 21^\circ\text{C}$$

(5), (6), (7), (9) 式から

$$\begin{aligned} q &= 4.88 \times 0.9 \left[75.5 - \left(\frac{T_{so}}{100} \right)^4 \right] + 21.8 (32 - t_{so}) \\ &= \frac{1}{\frac{0.003}{0.68} + \frac{1}{8}} (t_{so} - 27) \\ \therefore q &= 1,030 - 21.8 t_{so} - 4.39 \left(\frac{T_{so}}{100} \right)^4 \\ &= 7.73 (t_{so} - 27) \end{aligned}$$

上式を解いて

$$t_{so} = 29.5^\circ\text{C} \quad \therefore T_{so} = 302.5^\circ\text{K}$$

ゆえに

$$\begin{aligned} q_r &= 4.88 \times 0.9 \left[75.5 - \left(\frac{302.5}{100} \right)^4 \right] \\ &= -36.2 \\ q_c &= 21.8 (32 - 29.5) \\ &= 54.5 \\ \therefore q &= q_r + q_c = -36.2 + 54.5 \\ &= 18.3 \end{aligned}$$

最初第2図のように仮定して計算した結果、実際の熱の方向は第3図のようになり、ガラスの表面から仮想天空面($t_{RH} = 21^\circ\text{C}$)に向かって放射損失があり、また外気($t_o = 32^\circ\text{C}$)からガラス表面に対流熱伝達がある。

(8)式から

$$\alpha_{0r} = \frac{q_r}{t_o - t_{so}} = \frac{-36.2}{32 - 29.5} = -14.5$$

$$\therefore \alpha_0 = \alpha_{0c} + \alpha_r = 21.8 - 14.5 = 7.3$$

相当外気温度差

$$\Delta t_0 = \frac{q_r}{\alpha_{0c}} = \frac{-36.2}{21.8} = -1.66$$

相当外気温度

$$t'_0 = t_o + \Delta t_0 = 32 - 1.66 = 30.34$$

冬期水平面ガラスについて

計算条件

$$\begin{aligned} \text{外気} & \begin{cases} t_o = -1^\circ\text{C} \\ \varphi = 40\% \\ h = 1.7 \text{ mmHg} \end{cases} \\ \text{室内} & \begin{cases} t_i = 20^\circ\text{C} \\ \varphi = 50\% \end{cases} \end{aligned}$$

ゆえに

$$h = 1.7 \text{ mmHg}$$

$$T_o = 273 + (-1) = 272^\circ\text{K}$$

$$T_{RH}^4 = 34.8 \times 10^8$$

$$T_{RH} = 243^\circ\text{K} \quad \therefore t_{RH} = -30^\circ\text{C}$$

(5), (6), (7), (9) 式から

$$\begin{aligned} q &= 4.88 \times 0.9 \left[\left(\frac{T_{so}}{100} \right)^4 - 34.8 \right] + 31.0 (t_{so} + 1) \\ &= 7.73 (20 - t_{so}) \\ q &= 4.39 \left(\frac{T_{so}}{100} \right)^4 + 31.0 t_{so} - 122 \\ &= 7.73 (20 - t_{so}) \end{aligned}$$

上式を解いて

$$t_{so} = 0.75^\circ\text{C} \quad \therefore T_{so} = 273.75^\circ\text{K}$$

ゆえに

$$\begin{aligned} q_r &= 4.88 \times 0.9 \left[\left(\frac{273.75}{100} \right)^4 - 34.8 \right] \\ &= 93.9 \\ q_c &= 31 (0.75 + 1) \\ &= 54.3 \\ \therefore q &= q_r + q_c = 93.9 + 54.3 \\ &= 148.2 \end{aligned}$$

第5図のようにガラスの表面から仮想天空面($t_{RH} = -30^\circ\text{C}$)に向かって熱損失があり、また外気($t_o = -1^\circ\text{C}$)へ対流熱損失がある。

(8)式から

$$\alpha_{0r} = \frac{q_r}{t_{so} - t_o} = \frac{93.9}{0.75 + 1} = 53.6$$

$$\therefore \alpha_0 = \alpha_{0c} + \alpha_r = 31 + 53.6 = 84.6$$

相当外気温度差

$$\Delta t_0 = \frac{q_r}{\alpha_{0c}} = \frac{93.9}{31} = 3.03$$

相当外気温度

$$t'_0 = t_o + \Delta t_0 = -1 - 3.03 = -4.03$$

以上と同様な方法で3, 5, 8 mm ガラスの水平面, 垂直面に対する結果が第3~5表である。ただし外気室内条件は夏冬とも計算例と同じとする。

第6表 総括熱伝達率 α_0 の値

	l mm h m	水平 ガ ラ ス			垂 直 ガ ラ ス		
		3	5	8	3	5	8
夏 期	100	7.3	7.3	7.3	16.7	16.7	16.7
	200	9.8	9.8	9.8	21.3	21.3	21.3
冬 期	100	84.6	86.0	89.3	47.4	47.9	48.4
	200	96.8	98.8	102.8	55.3	55.5	56.2

また外側総括熱伝達率のみを表わしたのが第6表である。

4. 熱 貫 流 率

熱貫流率 K は内表面、外表面および内部の熱抵抗より得られる。
すなわち

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} \dots\dots\dots (17)$$

ここに

K :	熱 貫 流 率	(kcal/m ² h°C)
α_0 :	外側総括熱伝達率	(kcal/m ² h°C)
α_i :	内側総括熱伝達率	(kcal/m ² h°C)
λ :	熱 伝 導 率	(kcal/mh°C)
l :	ガ ラ ス 厚 さ	(m)

(17) 式において α_0 に第6表の数値を用い、 $\alpha_i = 8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, $\lambda = 0.68 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ として計算したものが第7表である。この表に見られるように夏期夜間は天空放射冷却の影響を受けて熱負荷が小さくなり、春秋の中間期のごときは、昼間は日射の影響で冷房をするが、夜間は暖房を必要とする場合が起こってくると考えられる。また冬期日射のない日や夜間は天空放射冷却と、風速の増大の影響が顕著にあらわれ、今までの低層ビルに比べて熱負荷は増大

第7表 熱貫流率 K の値

	l mm h m	水平 ガ ラ ス			垂 直 ガ ラ ス		
		3	5	8	3	5	8
夏 期	100	3.8	3.7	3.7	5.3	5.2	5.1
	200	4.3	4.3	4.2	5.7	5.6	5.4
冬 期	100	7.1	6.9	6.8	6.6	6.6	6.4
	200	7.2	7.0	6.8	6.8	6.7	6.5

する。

5. 結 言

建築物が高層になった場合屋外風速が速くなり、また天空放射冷却が考えられるのでこれらを考慮してガラスの暖房負荷、冷房負荷に用いられる諸数値を部分的に計算したのであるが、これより一般的にいえることは風速が速くなることにより熱負荷は増大するが、天空放射冷却の面から夏期夜間は小となり、冬期は大となることである。今後さらに日射を考えて各方位垂直面について計算し、方位別熱負荷特性によるゾーンコントロール方式に役だてるようにしたいと思っている。

終わりに参照させていただいた文献の各著者に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 「空気調整の基本計画」 内田秀雄著
- (2) 「建築学大系 No. 8」 前田敏男
- (3) 「伝熱工学」 古田 正著
- (4) 「空気調和衛生工学会誌」 Vol. 34 No. 3 斎藤平蔵, 松尾陽
- (5) 「空気調和衛生工学会誌」 Vol. 37 No. 9 渡辺 要
- (6) 「空気調和衛生工学会誌」 Vol. 38 No. 4 内田秀雄
- (7) 日立工事株式会社技術資料 No. 514001
- (8) 日本板ガラスカタログ



特 許 の 紹 介



特許第427576号

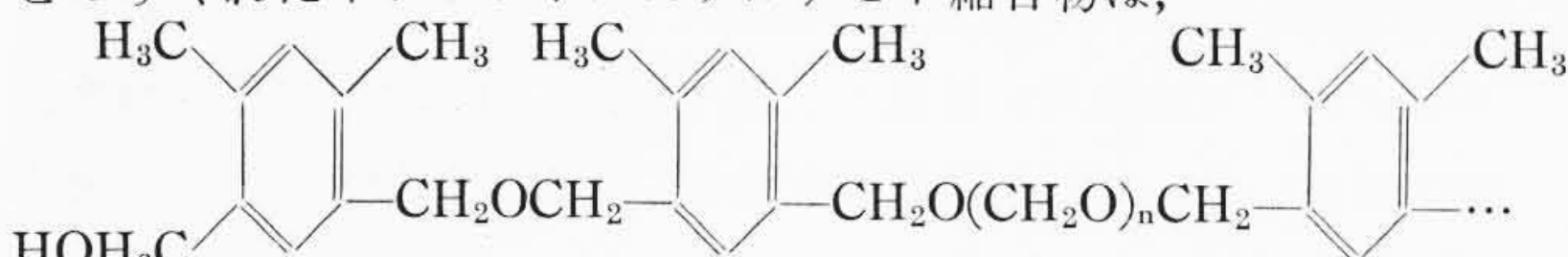
古賀 弥・阿保 雅 宏
野間口 兼 政

キシレンホルムアルデヒド縮合物変性石油樹脂の製造方法

石油樹脂とは、石油のクラッキングによるエチレンなどの製造工程において副生する油状物質を重合させて得られる淡黄色の熱可塑性固形樹脂であって、溶剤などとの相溶性がすぐれ、比較的安価なので最近注目されている樹脂である。

この石油樹脂の化学組成は一般的にはスチレン誘導体、インデン誘導体を主体とし、プロペニル誘導体、ジオレフィン類、クマロンなどを含む共重合体であるので、その軟化点はたかだか 130°C 程度であった。

ところで電気絶縁性、溶剤溶解性、粘着性、乾燥性、耐薬品性などのすぐれたキシレンホルムアルデヒド縮合物は、



の化学構造で示されるように、メチロール基、メチレンエーテル結合、アセタール結合などをもっている。

これらの結合は酸が存在すると、加熱によって容易に開裂して、活性水素をもつ化合物とは脱水縮合反応をし、また不飽和二重結合をもつ化合物とは付加反応をすることが知られている。

この発明は以上のようなキシレンホルムアルデヒド縮合物の反応性を利用して、石油樹脂を変性し、より有用な樹脂を与えるためになされたものである。

この発明の特長は、石油樹脂 100 重量部にたいし、キシレンホルムアルデヒドを 43~3 重量部配合し、これを酸性触媒の存在のもとで加熱、反応させることである。この反応によって、軟化点が高く、乾燥性がよく、パラフィン系炭化水素系溶剤およびアルキド樹脂などとの相溶性がすぐれたキシレンホルムアルデヒド縮合物変性石油樹脂が得られる。

たとえばメタキシレンホルムアルデヒド縮合物(酸素含量 15%) 50 重量部と石油樹脂(軟化点 108°C) 250 重量部とを、三弗化硼素のフェノールエーテル(触媒) 2.03 重量部の存在下で反応させると、軟化点 122°C の淡褐色、透明な固形樹脂が得られる。