

人工気候下での構造体の熱特性に関する研究

宮 野 秋 彦, 石 黒 隆 敏

建 築 学 教 室

(1967年9月11日 受理)

Heat Characteristics of Building Walls

(Experimentally Studied in Artificial Climate Room)

Akihiko MIYANO and Takatoshi ISHIGURO

Department of Architecture

(Received September 11, 1967)

This paper is to establish heat characteristics in building walls. Fundamental data are experimentally obtained in artificial climate room to realize heat loads caused by out and in-door temperatures, radiation and wind action, hoping that they may be useful to estimate for cooling and heating loads.

1. 緒 言

最近の冷暖房, 空気調和の普及は, 建築物の屋内気候設計に関する正確で詳細な基礎資料を必要としている。本論文は, 建築構造体の内, コンクリート系壁体の熱特性について, 人工気候実験装置を用い, 定量的な基礎資料を得んとしたものである。実験研究の対象とした構造体は, 実大コンクリート壁体および実大気泡コンクリート壁体であって, 実験結果の解析は, 構造体内外表面温度, 屋内外温度並びに構造体内部温度を中心に行い, 熱負荷周期や外表面風速の観点から検討を行ったものである。

2. 人工気候実験装置の開発および機構とその研究への適用

建築物の壁体および屋根の自然条件下における環境工学的諸特性を知る方法としての実測値にもとづく解析法は, 非常に多くの時間と労力を必要とし, 且つ, これらの特性には多くの因子が関係するため, 容易に定量的な解析結果が得られないうらみがある。いま, もし, 定常状態, 非定常状態を含み, 屋外環境条件を人工的に実現できるならば, 現象把握の上で大いに有利になる。

ここに, 筆者は, 実験室内において屋外気候と同質の気候状態を人工的に現出させ得る装置を製作し, 雨天を除くほとんどあらゆる気候の実現を可能にしようとするものである。本装置は, 下記の機器より成る。

① 空気調和装置 (仮想屋外温度制御器) — パッケージ型空気調和器, プログラム設定器, 記録調節計, 抵抗温度変換器, 測温抵抗体, ダクト — ② 輻射熱線放射

装置 (熱線放射ヒーターおよび制御器) — 熱線放射ヒーター, プログラム設定器, 無指示調節計, S C R電力調節計, 輻射感温筒 — ③ 送風装置 (供試壁体表面風速変換器) — 送風機, ダクト — ④ 恒温ボックス (仮想屋内) — 2重ボックス, 内部電熱ヒーター, 攪拌用ファン, 冷却コイル — (図1参照)

上記の機器を用い, 熱実験室を仮想屋外とし, 建築構造体 (供試壁体) と一体化した恒温ボックス内部を仮想屋内として下記の実験を行った。まず, 実験に供される壁体を恒温ボックス前面に設置する。次に, 所定のプログラム設定用紙に外気温度変動曲線 (周期2~96時間) を書き込み, これをプログラム設定器に取り付けると, この指示に従って, 室内温度調節系統が熱実験室内 (仮想屋外) の温度変動を自動的に制御する。同様に, 太陽その他の輻射熱変動 (周期2~96時間) に基づき作成したプログラムを作動させると, この指示により, 熱線放射ヒーター (仮想輻射熱) は自動制御される。また恒温ボックス内 (仮想屋内) (外箱1430×1430×1165mm 内箱 850×850×850mm) の温度は所定の値になるように制御される。さらに送風装置により, 構造体表面に沿って風をあて, その風速を種々に (0 m/s~15 m/s) 変化せしめた。上記の状態の下で, 仮想屋外側供試壁体表面温度, 供試体内各部温度, 仮想屋内側供試体表面温度をC A熱電対を用い, 12点用電子管式自動記録計により記録し解析にあてた。

3. 実験方法・結果とその検討

(A) 表面空気流動の影響

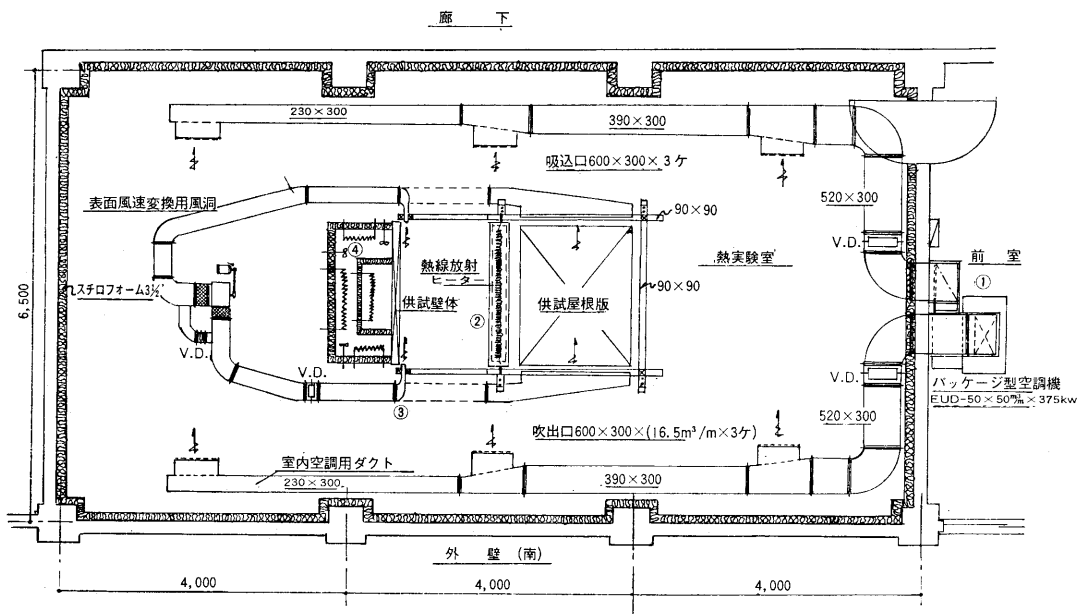


図-1 人工気候実験装置 (平面図)

実験の対象とした建築構造体は、コンクリート壁体 (1450×1450mm, 厚み 120mm, 無仕上) および気泡コンクリート壁体 (2000×1200mm, 厚み 100mm, 無仕上) である。実験は、前記の人工気候装置を用いて行ったが、その実験方法を表-1, 表-2に示した。解析は、気泡コンクリート壁体においては、仮想屋外温度、壁体内外表面温度、仮想屋内温度、輻射熱および壁体表面風速に基づいて行い、コンクリート壁体においては、仮想屋外温度、壁体内外表面温度、壁体内各部温度 (7点), 仮想屋内温度および壁体表面風速を中心に行った。

表-1 実験条件 (コンクリート壁体)

	屋外温度	屋内温度	壁体表面風速	放射熱変動	放射熱周期
1	25°C	自然	0 m/s ~ 12m/s	sin曲線	6, 12, 24 HR
2	20°C, 19.5°C	47°C, 53°C	0 m/s ~ 12m/s	0	

表-2 実験条件 (気泡コンクリート壁体)

	屋外温度	屋内温度	壁体表面風速	放射熱変動	放射熱周期
1'	25°C	自然	0 m/s ~ 4.2m/s	sin曲線	12HR
2'	25°C	自然	0 m/s ~ 4.1m/s	sin合成曲線	12HR
3'	25°C	自然	0 m/s	一定	

(i) コンクリート壁体

実験2の場合における屋内温度と内表面温度との差の外表面温度と屋外温度との差に対する比の表面風速による影響を図2に掲げる。

また、一般に熱放射をうける壁面に関する総合熱伝達率 α は $\alpha = \alpha_{co} + \alpha_r$ で表わされる。(ここに α_{co} : 対流並びに伝導にもとづく熱伝達率, α_r : 放射にもとづく

熱伝達率)。実験2においては熱線放射装置は使用していないので、これよりの放射熱は0であるが、被測定壁面をとりまく実験室内の各表面との間の温度差にもとづく放射熱が存在する。したがって、実験2による測定結果には当然この放射熱によるものが包含されると考えねばならない。即ち、上記した α を求めていることになる。いま、熱放射も含めて、上記の実際の熱的状态となった場合 (壁体の熱伝導率は一定とする) の屋内外表面総合熱伝達率 α_i および α_o を算定した。なお、この実験における外部放射熱伝達率は約 7.5kcal/m²hr·deg である。

(図-3参照) 図3により明らかな如く、この実験より求めた式によればすでに提案されている値にくらべ風速の熱伝達率への影響が顕著である。これは試料面積および材料の相異——Jürges, 50cm×50cm (銅板), Rowley および Algren 30cm×30cm (コンクリート), 西藤一郎

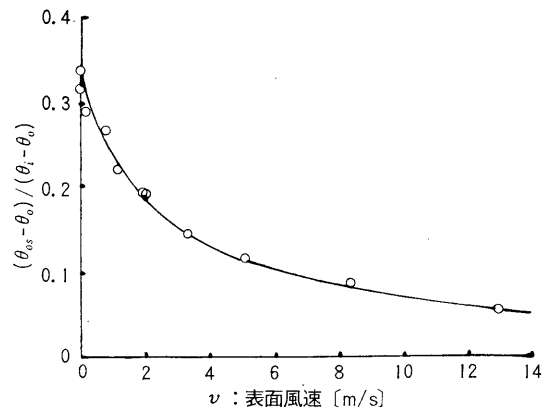
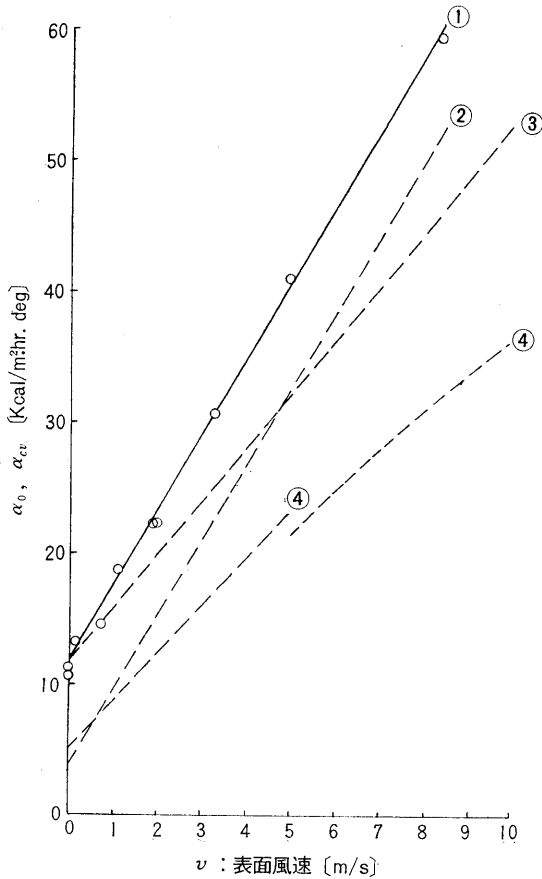


図-2 風速と $(\theta_{os} - \theta_o) / (\theta_i - \theta_o)$ (コンクリート)

図-3 風速と α_0, α_{cv} (コンクリート)

- ① $\alpha_0 = 5.8v + 11.5$
- ② $\alpha_{cv} = 5.8v + 4.0$ ($\alpha_r = 7.5$ として①を平行移動)
- ③ Rowley, Algren の式
- ④ Jürges の式

100cm×100cm (コンクリート) —— 設定条件のちがひ (温度, 風その他) によるものと考えられる。

(ロ) 気泡コンクリート

実験 1', 2' における外表面温度較差と風速の関係を図 4 に掲げる。次に熱伝達率と風速との関係は, 下記の計算により求めた。

輻射をうける壁体においては, $\theta_e - \theta_o = (a_o/\alpha_o)I$ (θ_e : 相当外気温度 [°C], θ_o : 屋外温度 [°C], a_o =吸収率, α_o =外表面熱伝達率 [kcal/m²·hr·deg], I =輻射熱 [kcal/m²·hr])

$\Theta_e = (\theta_e - \theta_o)_{max} = (a_o/\alpha_o)I_{max}$ (Θ_e : 相当外気温度振巾 [deg]) $\Theta_{os}/\Theta_e = \Theta_{os}/(a_o/\alpha_o)I_{max} = f(\alpha_o)$

$(\Theta_{os})_1/(\Theta_e)_1 = (\Theta_{os})_1/(a_o/\alpha_{o1})I_{max} = f(\alpha_{o1})$

$(\Theta_{os})_n/(\Theta_e)_n = (\Theta_{os})_n/(a_o/\alpha_{on})I_{max} = f(\alpha_{on})$

$$\therefore \frac{f(\alpha_{o1})}{f(\alpha_{o2})} = \frac{\alpha_{o1}(\Theta_{os})_1}{\alpha_{o2}(\Theta_{os})_2} \quad (1)$$

$(\Theta_{os})_1, (\Theta_{os})_2, \dots, (\Theta_{os})_n$ は, 供試体表面風速 $v_1, v_2,$

\dots, v_n に対する外表面温度振巾であり, 実験より求める。

一方, 前田, 長谷川の逐次計算により, α_o を仮定すれば, $\Theta_{os}/\Theta_e = f(\alpha_o) \dots \dots \dots (2)$ が求まる。また, 定常状態の実験 3' から α_i が求まる。この時, 内外表面風速を略 0m/s とすれば, $\alpha_i = \alpha_o$ と見なすことができる。いま, $f(\alpha_o)_1$ を外表面風速 0 の時の値とすれば, 式 1 と式 2 より α_{o2} が求まる。同様に $\alpha_{o3} \dots \dots \alpha_{on}$ が求まる。(図 5 参照)

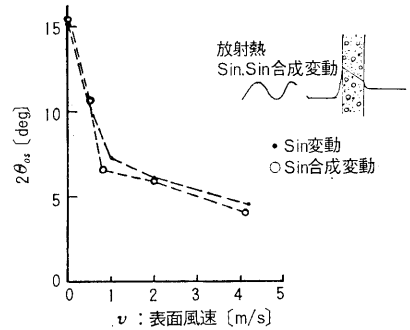
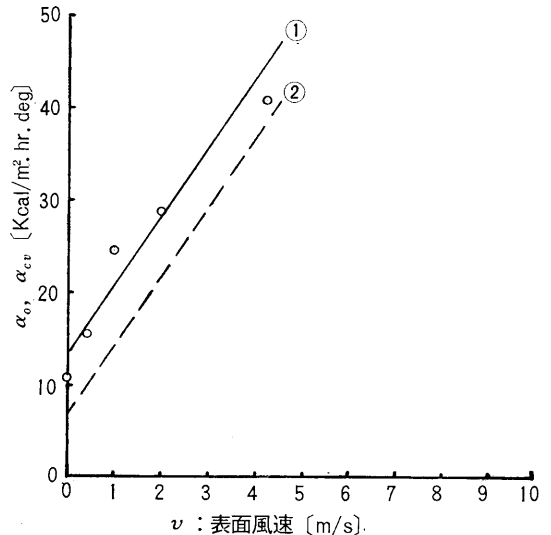


図-4 表面風速と表面温度較差

図-5 風速と α_0, α_{cv} (気泡コンクリート)

- ① $\alpha_0 = 7.4v + 12.9$
- ② $\alpha_{cv} = 7.4v + 6.9$ ($\alpha_r = 6$ として①を平行移動)

(B) 放射熱および気温が変動する場合の温度性状

実験の対象とした建築構造体は, 前記のコンクリート壁体および気泡コンクリート壁体であり, その実験方法を表 3, 表 4 に, 実験結果に基づいて取りまとめたものを表 5 ~ 表 8 に示した。解析にあたっては, 輻射熱変動および気温変動の周期並びに振巾が, 壁体各部の温度変動に及ぼす影響を, 温度変動初期および温度波形定常のそれぞれについて検討した。(図 6 参照)

表-3 実験条件 (コンクリート壁体)

	屋外温度	屋内温度	壁体表面風速	放射熱変動	放射熱周期
1	25°C	自然	0 m/s	sin曲線	2, 3, 6, 12, 24, 48 HR
2	25°C	自然	0 m/s ~ 12 m/s	sin曲線	6, 12, 24HR
3	20°C	47°C (一定)	0 m/s ~ 12 m/s	sin曲線	6 HR
4	20°C	47°C (一定)	0 m/s	sin曲線	2, 3, 6, 12 HR
5	sin曲線 (20°C ~ 30°C)	自然	0 m/s	0	3*, 6*, 12*, 24*HR
6	sin曲線 (20°C ~ 30°C)	自然	0 m/s	sin曲線	6*, 12*, 24*HR

* 外気温変動周期

表-4 実験条件 (気泡コンクリート壁体)

1'	25°C	自然	0 m/s	sin曲線	2, 3, 6, 12, 24 HR
2'	25°C	自然	0 m/s	sin合成曲線	2, 3, 6, 12, 24 HR
3'	25°C	自然	0 m/s ~ 4.2 m/s	sin曲線	12HR
4'	25°C	自然	0 m/s ~ 4.1 m/s	sin合成曲線	12HR
5'	20°C	自然	0 m/s	sin, sin合成	12HR
6'	設計温度	自然	0 m/s	実測曲線	実測周期

(1) 減巾率: η について

コンクリート壁体

η_i, η_{ia} とも τ の増加に伴って大きくなり, $\tau \rightarrow \infty$ では η_i は 1 に, η_{ia} は 1 より小さい一定値に近づく。又, η_i, η_{ia} とも $\tau \leq 6$ hr ではほとんど差がみとめられない。 $\tau \leq 48$ hr において適用できる実験式は

$$\eta_i = 1.05e^{-0.050\sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}}, \quad \eta_{ia} = 0.76e^{-0.033\sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}}$$

である。 η_s, η_{sa} も $\tau \leq 6$ hr ではほとんど差がなく, $\tau \rightarrow \infty$ で η_i に近づく。一方, 半無限固体壁は $\eta' = e^{-0.12\sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}}$ で表わされる。内部一定とした場合の逐次計算による η'' は, $\tau \rightarrow \infty$ で 0.59 に近づき, 定常状態の $\eta' = 0.59$ に一致する。 $\tau \rightarrow \infty$ で η_{sa} は逐次計算値に近づくと考えられる。 η_i と η_{ia}, η_s と η_{sa} との間の差は, 背面ボックスの熱的特性によって異なるもので, η_i と η_s は前者は温度変動一回の場合, 後者は変動が連続した後の定常状態に関する値であるので, η_s の方が逐次計算による値によく適合する。また, 実測値の η_i, η_s , 実測値を補正した η_{ia}, η_{sa} はともに半無限固体壁の解および逐次計算値にくらべ大きくなるので, 計算のみで η を求める場合は補正が必要である。(図7参照)

気泡コンクリート壁体

$\tau \leq 6$ hr では, $\eta_i, \eta_{ia}, \eta', \eta''$ の全てについて大差はない。 $\tau \rightarrow \infty$ では η_i は 1 に, η_{ia} は 1 よりも小さい一定値に近づく。 $\tau \leq 24$ hr において適用できる実験式は

$$\eta_i = 0.99e^{-0.093\sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}}, \quad \eta_{ia} = 0.36e^{-0.044\sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}}$$

である。 $\tau \rightarrow \infty$ では, 半無限固体壁は $\eta' = e^{-0.10\sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}} \rightarrow 1$, 内部一定とした時の逐次計算値は $\eta'' = 0.22$ であり, 定常状態の $\eta = 0.22$ に一致する。気泡コンクリートの場合は, コンクリートにくらべ減巾が大きくなり, 熱伝導率, 温度伝播率が小さいので, η_i は半無限固体壁の解に近似し, η_{ia} は逐次計算の解に近似する。(図8参照)

(2) 時間遅れ (Time lag): ϕ について

コンクリート壁体

全周期にわたり, ϕ_i は ϕ_{ia} にくらべ大であり, その差は $\tau > 12$ hr では一定と考えられる。したがって, 48 hr $> \tau > 12$ hr では周期が大になるにつれて変動の遅れを時間で示せば, それは一定の割合で増大する。計算による半無限固体壁の ϕ' は, $\tau > 6$ hr で ϕ_i を上廻り, $\tau = 48$ hr では角度にして 10° , 時間にして約 1.3 hr の差を生ずる。また, $\tau < 6$ hr では ϕ_i を下廻る。したがって, 半無限固体壁として解いた ϕ' は実測と大きく異なり近似しない。一方, 逐次計算による ϕ'' は, 角度にして 10° , 時間にして約 0.66 hr の差異を生ずる。上記より, ϕ に関しては, 逐次計算値も半無限固体壁と考えた解も実測値に近似しないことがわかる。(図10参照)

気泡コンクリート壁体

ϕ_i は ϕ_{ia} にくらべ大であり, その差は, 24 hr $\geq \tau \geq 12$ hr では一定である。半無限固体壁と考えた時の ϕ' は ϕ_i を上廻り, その差は, $\tau = 24$ hr では角度にして 25° , 時間にして約 1.7 hr となり, コンクリートの場合よりも大きい差異となる。逐次計算による ϕ'' は $\tau > 6$ hr で ϕ_{ia} を上廻る。 ϕ'' と ϕ_{ia} との差は, $\tau = 24$ hr で角度にして 16° , 時間にして約 1.1 hr の差となる。すなわち, 半無限固体壁の解および逐次計算値ともに実測値に近似せず, その差はコンクリートの方が大である。(図9参照)

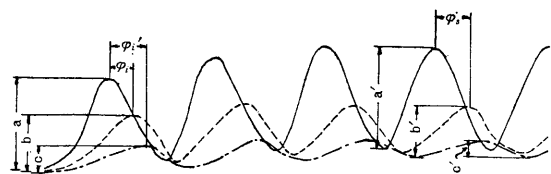


図-6

 $b/a = \eta_i$ (温度変動初期減巾率) $b'/a' = \eta_s$ (温度波形定常のときの減巾率) $c/a = 0$ のとき, η_{ia} ($c = 0$ のとき) $c'/a' = 0$ のとき, η_{sa} ($c' = 0$ のとき) ϕ_i : 初期の時間遅れ ϕ_s : 温度波形定常のときの時間遅れ ϕ_{ia} : $c = 0$ のときの ϕ_i ϕ_{sa} : $c' = 0$ のときの ϕ_i

表-5 コンクリート壁体 (放射熱: sin変動, 外表面風速: 0 m/s)

	τ [hr]	θ_e [°C]	θ_{os} [°C]	θ_{is} [°C]	θ_i [°C]	$2\theta_{os}$ [deg]
温度変動初期	2	$4.95\Theta\cos(\omega t + 40^\circ 46')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.33\Theta\cos(\omega t - 324^\circ)$	$0.21\Theta\cos(\omega t - 504^\circ)$	5.2
		$4.95\Theta\cos(\omega t + 40^\circ 46')$	//	$0.33\Theta\cos(\omega t - 324^\circ)$	0	
	3	$4.81\Theta\cos(\omega t + 35^\circ 45')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.39\Theta\cos(\omega t - 228^\circ)$	$0.24\Theta\cos(\omega t - 276^\circ)$	5.8
		$4.81\Theta\cos(\omega t + 35^\circ 45')$	//	$0.39\Theta\cos(\omega t - 222^\circ 12')$	0	
	6	$3.70\Theta\cos(\omega t + 35^\circ 9')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.46\Theta\cos(\omega t - 90^\circ)$	$0.36\Theta\cos(\omega t - 120^\circ)$	7.0
		$3.77\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 21')$	//	$0.46\Theta\cos(\omega t - 79^\circ 25')$	0	
	12	$2.67\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 26')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.65\Theta\cos(\omega t - 60^\circ)$	$0.45\Theta\cos(\omega t - 90^\circ)$	10.2
		$2.83\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 47')$	//	$0.58\Theta\cos(\omega t - 47^\circ 47')$	0	
	24	$1.96\Theta\cos(\omega t + 23^\circ 58')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.74\Theta\cos(\omega t - 30^\circ)$	$0.51\Theta\cos(\omega t - 52^\circ 30')$	11.7
		$2.04\Theta\cos(\omega t + 29^\circ 59')$	//	$0.60\Theta\cos(\omega t - 18^\circ 14')$	0	
	48	$1.77\Theta\cos(\omega t + 11^\circ 51')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.82\Theta\cos(\omega t - 18^\circ 45')$	$0.55\Theta\cos(\omega t - 30^\circ)$	14.6
		$1.65\Theta\cos(\omega t + 19^\circ 33')$	//	$0.63\Theta\cos(\omega t - 12^\circ 16')$	0	
温度波形定常	2	$4.95\Theta\cos(\omega t + 40^\circ 46')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.077\Theta\cos(\omega t - 167^\circ)$	≈ 0	3.9
		$4.95\Theta\cos(\omega t + 40^\circ 46')$	//	$0.088\Theta\cos(\omega t - 166^\circ 43')$	0	
	3	$4.82\Theta\cos(\omega t + 36^\circ 28')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.095\Theta\cos(\omega t - 114^\circ)$	$0.71\Theta\cos(\omega t - 156^\circ)$	4.2
		$4.81\Theta\cos(\omega t + 35^\circ 45')$	//	$0.094\Theta\cos(\omega t - 107^\circ 38')$	0	
	6	$3.74\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 50')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.34\Theta\cos(\omega t - 63^\circ)$	$0.16\Theta\cos(\omega t - 123^\circ)$	5.8
		$3.77\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 21')$	//	$0.338\Theta\cos(\omega t - 57^\circ 3')$	0	
	12	$2.81\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 1')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.56\Theta\cos(\omega t - 48^\circ)$	$0.28\Theta\cos(\omega t - 78^\circ)$	7.2
		$2.83\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 47')$	//	$0.507\Theta\cos(\omega t - 43^\circ 9')$	0	

τ : 周期, θ_e : 相当外気温度, θ_{os} : 外表面温度, θ_{is} : 内表面温度, θ_i : 内部温度, Θ : 外表面温度変動振幅
同一周期の上欄は実測値, 下欄は内部温度一定 ($\theta_i=0$) とした補正値

表-6 気泡コンクリート壁体 (放射熱: sin変動, 外表面風速: 0 m/s)

	τ [hr]	θ_e [°C]	θ_{os} [°C]	θ_{is} [°C]	θ_i [°C]	$2\theta_{os}$ [deg]
温度変動初期	2	$1.82\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 2')$	$\Theta\cos\omega t$	≈ 0	≈ 0	9.5
		$1.82\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 2')$	//	$0.03\Theta\cos(\omega t - 189^\circ 2')$	0	
	3	$1.77\Theta\cos(\omega t + 21^\circ 51')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.12\Theta\cos(\omega t - 192^\circ)$	$0.10\Theta\cos(\omega t - 324^\circ)$	11.8
		$1.77\Theta\cos(\omega t + 21^\circ 51')$	//	$0.12\Theta\cos(\omega t - 192^\circ)$	0	
	6	$1.43\Theta\cos(\omega t + 17^\circ 53')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.16\Theta\cos(\omega t - 120^\circ)$	$0.115\Theta\cos(\omega t - 180^\circ)$	13.8
		$1.43\Theta\cos(\omega t + 17^\circ 48')$	//	$0.16\Theta\cos(\omega t - 98^\circ 57')$	0	
	12	$1.32\Theta\cos(\omega t + 13^\circ 48')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.25\Theta\cos(\omega t - 66^\circ)$	$0.16\Theta\cos(\omega t - 102^\circ)$	15.2
		$1.34\Theta\cos(\omega t + 13^\circ 58')$	//	$0.20\Theta\cos(\omega t - 39^\circ 57')$	0	
	24	$1.22\Theta\cos(\omega t + 6^\circ 35')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.37\Theta\cos(\omega t - 33^\circ)$	$0.25\Theta\cos(\omega t - 66^\circ)$	16.6
		$1.21\Theta\cos(\omega t + 8^\circ 53')$	//	$0.22\Theta\cos(\omega t - 10^\circ 20')$	0	

温度 波 形 定 常	2	$1.82\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 2')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.04\Theta\cos(\omega t - 288^\circ)$	$0.026\Theta\cos(\omega t - 360^\circ)$	7.6
		$1.82\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 2')$	\parallel	$0.03\Theta\cos(\omega t - 189^\circ 2')$	0	
	3	$1.77\Theta\cos(\omega t + 21^\circ 51')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.04\Theta\cos(\omega t - 204^\circ)$	$0.03\Theta\cos(\omega t - 228^\circ)$	9.7
		$1.77\Theta\cos(\omega t + 21^\circ 51')$	\parallel	$0.03\Theta\cos(\omega t - 211^\circ 56')$	0	
	6	$1.43\Theta\cos(\omega t + 17^\circ 51')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.11\Theta\cos(\omega t - 108^\circ)$	$0.05\Theta\cos(\omega t - 168^\circ)$	11.4
		$1.43\Theta\cos(\omega t + 17^\circ 48')$	\parallel	$0.109\Theta\cos(\omega t - 108^\circ)$	0	

表-7 コンクリート壁体内部温度変動 (放射熱: sin変動, 温度変動初期, $\tau = 12\text{hr}$)

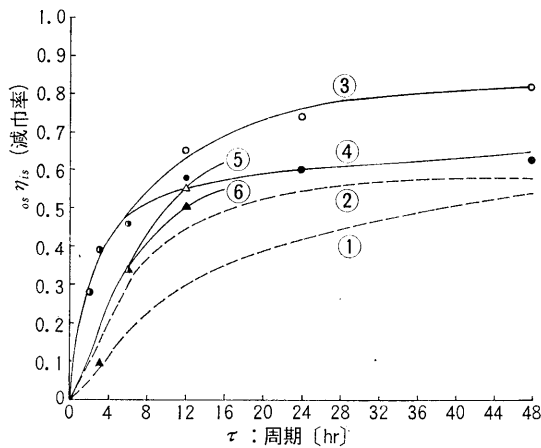
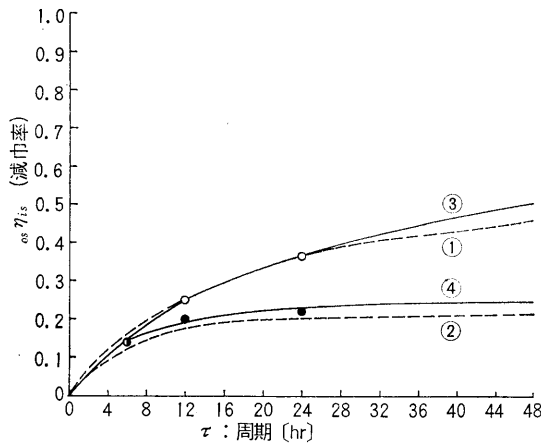
v [m/s]	θ_e [°C]	θ_{os} [°C]	θ_{is} [°C]	θ_i [°C]	$os\eta_{is}$	$e\eta_{is}$	$os(r_\varphi)_{is}$	$e(r_\varphi)_{is}$	$2\Theta_{os}$ [deg]
0	$2.83\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 47')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.59\Theta\cos(\omega t - 47^\circ 47')$	0	0.59	0.21	0.13	0.23	9.3
0.8	$2.09\Theta\cos(\omega t + 28^\circ 55')$	\parallel	$0.63\Theta\cos(\omega t - 55^\circ 33')$	\parallel	0.63	0.30	0.15	0.23	7.3
2.0	$1.76\Theta\cos(\omega t + 24^\circ 38')$	\parallel	$0.67\Theta\cos(\omega t - 45^\circ 5')$	\parallel	0.67	0.38	0.13	0.19	6.4
3.7	$1.52\Theta\cos(\omega t + 20^\circ 4')$	\parallel	$0.71\Theta\cos(\omega t - 46^\circ 57')$	\parallel	0.71	0.47	0.13	0.19	3.7
5.3	$1.39\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 53')$	\parallel	$0.77\Theta\cos(\omega t - 34^\circ 17')$	\parallel	0.77	0.56	0.095	0.14	3.2
v [m/s]	θ_e [°C]	θ_{os} [°C]	θ_{11} [°C]	θ_i [°C]	$os\eta_{11}$	$e\eta_{11}$	$os(r)_{11}$	$e(r)_{11}$	$2\Theta_{os}$ [deg]
0	$2.83\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 47')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.66\Theta\cos(\omega t - 44^\circ 28')$	0	0.66	0.23	0.12	0.22	9.3
0.8	$2.09\Theta\cos(\omega t + 28^\circ 55')$	\parallel	$0.72\Theta\cos(\omega t + 40^\circ 35')$	\parallel	0.72	0.34	0.11	0.19	7.3
2.0	$1.76\Theta\cos(\omega t + 24^\circ 38')$	\parallel	$0.73\Theta\cos(\omega t - 34^\circ 5')$	\parallel	0.73	0.41	0.095	0.16	6.4
3.7	$1.52\Theta\cos(\omega t + 20^\circ 4')$	\parallel	$0.76\Theta\cos(\omega t - 37^\circ 43')$	\parallel	0.76	0.50	0.10	0.16	3.7
5.3	$1.39\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 53')$	\parallel	$0.81\Theta\cos(\omega t - 28^\circ 57')$	\parallel	0.81	0.59	0.080	0.13	3.2
v [m/s]	θ_e [°C]	θ_{os} [°C]	θ_9 [°C]	θ_i [°C]	$os\eta_9$	$e\eta_9$	$os(r_\varphi)_9$	$e(r_\varphi)_9$	$2\Theta_{os}$ [deg]
0	$2.83\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 47')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.72\Theta\cos(\omega t - 36^\circ 41')$	0	0.72	0.25	0.10	0.20	9.3
0.8	$2.09\Theta\cos(\omega t + 28^\circ 55')$	\parallel	$0.76\Theta\cos(\omega t - 42^\circ 40')$	\parallel	0.76	0.37	0.12	0.20	7.3
2.0	$1.76\Theta\cos(\omega t + 24^\circ 38')$	\parallel	$0.80\Theta\cos(\omega t - 33^\circ 15')$	\parallel	0.80	0.46	0.092	0.16	6.4
3.7	$1.52\Theta\cos(\omega t + 20^\circ 4')$	\parallel	$0.82\Theta\cos(\omega t - 35^\circ 46')$	\parallel	0.82	0.54	0.099	0.15	3.7
5.3	$1.39\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 53')$	\parallel	$0.86\Theta\cos(\omega t - 32^\circ 19')$	\parallel	0.86	0.62	0.090	0.14	3.2
v [m/s]	θ_e [°C]	θ_{os} [°C]	θ_{is} [°C]	θ_i [°C]	$os\eta_6$	$e\eta_6$	$os(r_\varphi)_6$	$e(r_\varphi)_6$	$2\Theta_{os}$ [deg]
0	$2.83\Theta\cos(\omega t + 34^\circ 47')$	$\Theta\cos\omega t$	$0.77\Theta\cos(\omega t - 30^\circ 15')$	0	0.77	0.27	0.084	0.18	9.3
0.8	$2.09\Theta\cos(\omega t + 28^\circ 55')$	\parallel	—	\parallel	—	—	—	—	7.3
2.0	$1.76\Theta\cos(\omega t + 24^\circ 38')$	\parallel	$0.84\Theta\cos(\omega t - 27^\circ 37')$	\parallel	0.84	0.48	0.077	0.15	6.4
3.7	$1.52\Theta\cos(\omega t + 20^\circ 4')$	\parallel	$0.89\Theta\cos(\omega t - 14^\circ 9')$	\parallel	0.89	0.59	0.039	0.095	3.7
5.3	$1.39\Theta\cos(\omega t + 16^\circ 53')$	\parallel	$0.91\Theta\cos(\omega t - 26^\circ 20')$	\parallel	0.91	0.66	0.073	0.12	3.2

 v : 壁体外表面風速 $os\eta_{is}$: θ_{is} 変動振巾/ θ_{os} 変動振巾 $os\eta_x$: 外表面から $x\text{cm}$ のところの θ_{os} に対する減巾率 $e\eta_x$: 外表面から $x\text{cm}$ のところの θ_e に対する減巾率 $os(r_\varphi)_{is}$: θ_{os} 変動と θ_{is} 変動の位相のずれ/ θ_{os} 変動周期

表—8 気泡コンクリート壁体

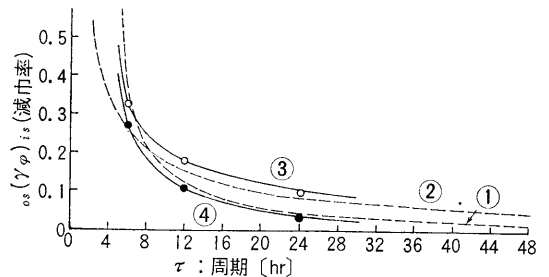
(温度変動初期, $\tau = 12\text{hr}$)

放射熱	v [m/s]	θ_e [°C]	θ_{os} [°C]	θ_{is} [°C]	θ_i [°C]	$os\eta_{is}$	$e\eta_{is}$	$os(r_\varphi)_{is}$	$e(r_\varphi)_{is}$	$2\theta_{os}$ [deg]
sin 曲 線 変 動	0	$1.34\theta\cos(\omega t + 13^\circ 58')$	$\theta\cos\omega t$	$0.20\theta\cos(\omega t - 43^\circ 13')$	0	0.20	0.15	0.12	0.16	15.2
	0.45	$1.22\theta\cos(\omega t + 10^\circ 11')$	//	$0.19\theta\cos(\omega t - 36^\circ 21')$	//	0.19	0.16	0.10	0.13	10.9
	1.0	$1.16\theta\cos(\omega t + 8^\circ 1')$	//	$0.30\theta\cos(\omega t - 42^\circ 18')$	//	0.30	0.26	0.12	0.14	7.0
	2.0	$1.12\theta\cos(\omega t + 6^\circ 10')$	//	$0.27\theta\cos(\omega t - 40^\circ 50')$	//	0.27	0.24	0.11	0.13	6.4
	4.2	$1.08\theta\cos(\omega t + 4^\circ 8')$	//	$0.28\theta\cos(\omega t - 59^\circ 40')$	//	0.28	0.26	0.17	0.18	4.6
合 成 曲 線 変 動	0	$1.34\theta\cos(\omega t + 13^\circ 58')$	$\theta\cos\omega t$	$0.15\theta\cos(\omega t - 26^\circ 47')$	0	0.15	0.11	0.074	0.11	15.3
	0.5	$1.22\theta\cos(\omega t + 10^\circ 11')$	//	$0.17\theta\cos(\omega t - 27^\circ 23')$	//	0.17	0.14	0.076	0.10	10.7
	0.8	$1.18\theta\cos(\omega t + 8^\circ 34')$	//	$0.20\theta\cos(\omega t - 29^\circ 40')$	//	0.20	0.17	0.082	0.11	6.6
	2.0	$1.12\theta\cos(\omega t + 6^\circ 10')$	//	$0.19\theta\cos(\omega t - 47^\circ 27')$	//	0.19	0.17	0.13	0.15	5.9
	4.1	$1.08\theta\cos(\omega t + 4^\circ 8')$	//	$0.21\theta\cos(\omega t - 42^\circ 16')$	//	0.21	0.19	0.12	0.12	4.3

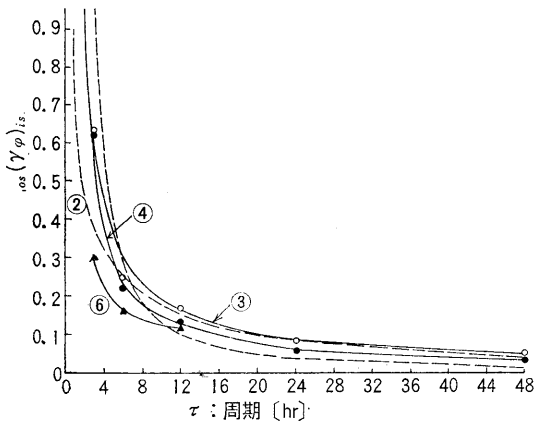
図—7 $os\eta_{is}$ と τ (コンクリート)図—8 $os\eta_{is}$ と τ (気泡コンクリート)

- ①半無限固体壁の解 ②逐次計算値 ③ η_i (温度変動初期, θ_i : 変動) ④ η_{ia} (温度変動初期, $\theta_i=0$ とした補正值) ⑤ η_s (温度波形定常, θ_i : 変動) ⑥ η_{sa} (温度波形定常, θ_i 一定とした補正值)

(3) 壁体表面風速: v と減巾率: η の関係について
風速 v の増大に伴って $os\eta_{is}$ は増大する。風速 v と $os\eta_{is}$ の関係は $v < 1\text{ m/s}$ では曲線的に, $v > 1\text{ m/s}$ では略直線的に変化する。風速 v と壁体各部の深さ (x) における $os\eta_x$ との関係は, 壁表面からの深さが大きくなる程 $os\eta_x$ の変化が大きくなる。風速 v の増加に伴う $e\eta_{is}$ の増加は, $v > 1\text{ m/s}$ ではほとんど直線的であり,

図—9 $os(r_\varphi)_{is}$ と τ (気泡コンクリート)

- ①半無限固体壁の解 ②逐次計算値 ③ $r_{\varphi i}$ (温度変動初期, θ_i : 変動) ④ $r_{\varphi ia}$ (温度変動初期, θ_i 一定とした補正值) ⑤ $r_{\varphi s}$ (温度波形定常, θ_i : 変動) ⑥ $r_{\varphi sa}$ (温度波形定常, θ_i 一定とした補正值)

図—10 $os(r_\varphi)_{is}$ と τ (コンクリート)

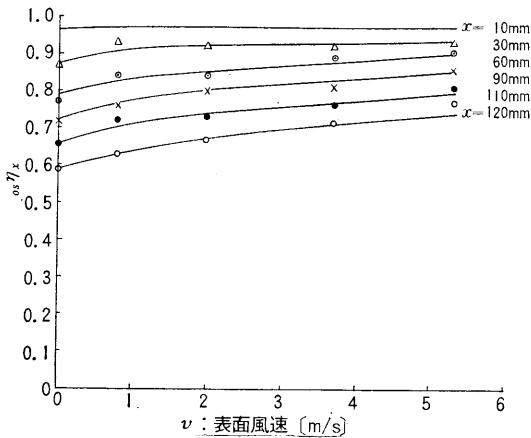


図-11 η_x と v (コンクリート)

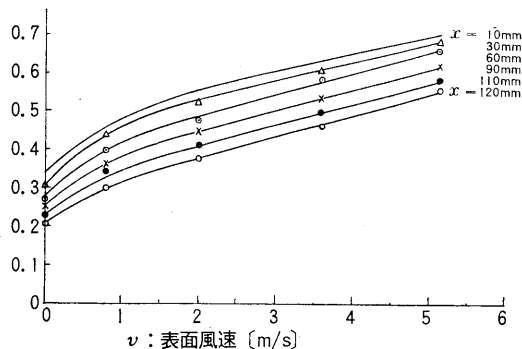


図-12 η_x と v (コンクリート)

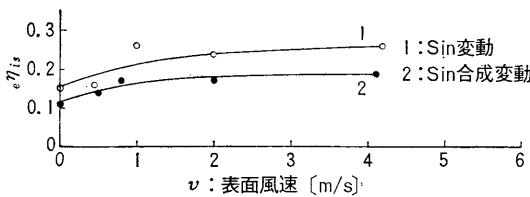


図-13 η_{is} と v (気泡コンクリート)

v の変化による壁体各部の η_x への影響はほとんど一定の傾向を示している。(図11~図13参照)

(4) 冷房負荷設計用相当外気温度の検討

前節において気温および輻射量が正弦波形で変動した場合について種々の検討を行った。しかし乍ら、一般に建築物の置かれる環境におけるそれらの変動は不整形である。以下に実験に出現する不整形の周期的変動に対する適用の一例として、実験に供したコンクリート壁体を東に面して設けた場合の名古屋地方における冷房負荷設計用相当外気温度 θ_e の日変動を掲げ、これに対応する内表面温度変動の算定を行う。尚、冷房負荷設計用外気温度 θ_o および全日射量 I は筆者の提案値によった。

$$(\alpha_o = 0.85, \alpha_o = 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{deg})$$

一般に、不整形周期変動波形は、フーリエ級数に展開することができる。前記の θ_e をローマンの方法により、フーリエ級数に展開したものを $(\theta_e)_F$ とすると、

$$(\theta_e)_F = 35.4 + 11.79 \sin(\omega t + 289^\circ 5') + 5.64 \sin(2\omega t + 190^\circ 12') + 46.3 \sin(3\omega t + 76^\circ 23') + 2.00(4\omega t + 310^\circ 17') + 0.041 \sin(5\omega t + 270^\circ) + 0.93 \sin(6\omega t + 219^\circ 21') + 0.88 \sin(7\omega t + 106^\circ 34') + 0.31 \sin(8\omega t + 0^\circ) + 0.34 \sin(9\omega t + 16^\circ 42') + 0.46 \sin(10\omega t + 90^\circ)$$

これを時刻毎に求めて連ねると図14の如く θ_e のかなり高い近似が得られる。 $(\theta_e)_F$ の変動項に実験より求めた表面温度正弦変動の時の η , φ を代入すると、

$$(\theta_{is} - \theta_i) \textcircled{1} = 4.60 \sin(\omega t + 251^\circ) + 1.52 \sin(2\omega t + 156^\circ) + 0.97 \sin(3\omega t + 48^\circ) + 0.33 \sin(4\omega t + 266^\circ) + 0.05 \sin(5\omega t + 249^\circ) + 0.08 \sin(6\omega t + 200^\circ) + 0.06 \sin(7\omega t + 90^\circ) + 0.815 \sin(8\omega t + 14^\circ) + 0.013 \sin(9\omega t + 3^\circ) + 0.016 \sin(10\omega t + 77^\circ)$$

これを時刻0から時刻23について解くと、 $(\theta_e)_F$ に対応する内表面温度変動が求まる。別に、 θ_e を正弦変動において、実測より得た η , φ を用いて θ_e の変動波形を減巾させ位相をずらせたものが $(\theta_{is} - \theta_i) \textcircled{2}$ である。また、フーリエ級数展開より求めた $(\theta_{is} - \theta_i) \textcircled{1}$ の変動の日較差の θ_e の日較差に対する比と、最大起時のずれを用いて θ_e を減巾させ位相をずらせると $(\theta_{is} - \theta_i) \textcircled{3}$ となる。しかるに $\textcircled{1}$ の方が正解に近いので、現在冷房負荷算定用

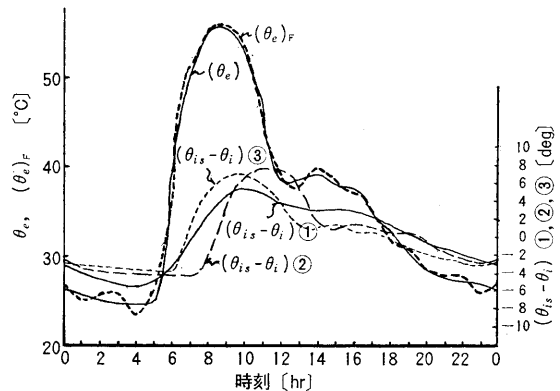


図-14 θ_e の日変動 (垂直東壁, コンクリート)

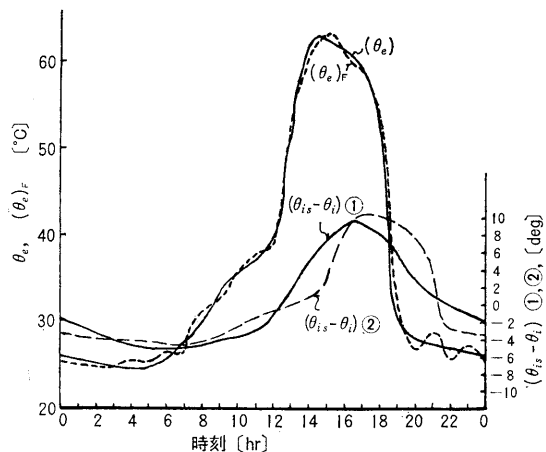
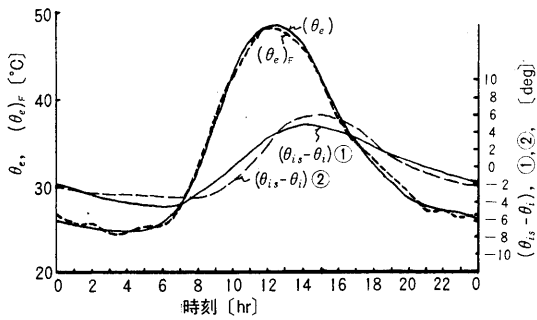
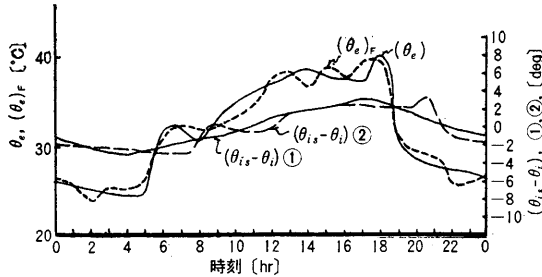


図-15 θ_e の日変動 (垂直西壁)

図-16 θ_s の日変動 (垂直南壁)図-17 θ_s の日変動 (垂直北壁)

として一般に近似的に用いられている②および③とはかなり誤差を生じていることがわかる。同様に求めた西, 南, 北壁に関する値を図15~図17に掲げる。

4. 結 言

本研究のために, 人工気候実験装置を考案作成し, 主としてコンクリート系壁体について, その非定常状態における熱的特性を実験研究し, 室内環境設計の基礎的資料の解析究明を行い, 表面風速の影響, 日射熱及び外気温変動周期による影響を明らかにした。