

断熱に関する研究

——シミュレーションによる断熱と熱負荷の検討——

田中辰明
小宮英孝

Research on Thermal Insulation

——Simulation Study of Thermal Insulation and Cooling Load——

Tatsuaki Tanaka
Hidetaka Komiya

Abstract

A computer program for calculation of cooling load was carried out in which heat conduction in the wall was solved by an implicit difference scheme and radiant heat transfer in the room was taken into consideration. Heat insulation at building exteriors was compared with that at building interiors using this program. As a consequence, it was found that there are many merits in the case of heat insulation at building exteriors, for example, small variations in room air temperature and environmental temperature, less heat extraction through operation of an apparatus taking advantage of the characteristics of exterior heat insulation, and thermal protection of the structure from the climate. In addition, a graph by which insulation thickness may be readily determined has been proposed.

概 要

インプリシット差分を壁体に適用し、室内相互ふく射（直接ふく射のみ）を考慮した負荷計算プログラムを開発し、外断熱と内断熱の熱特性および断熱厚さと熱負荷の関係を求めた。外断熱と内断熱との熱特性を比較した結果、外断熱は室温、環境温度の変動が少ないこと、躯体が熱的に保護されること、外断熱の特性を生かした装置運転をおこなうことにより除去熱量が減らせることなど有利な点が多いことがわかった。また断熱厚さと熱負荷について検討した結果、単位床面積当りの平均熱貫流率と熱負荷の相関が高いことがわかり、この関係を用いた簡易断熱厚決定図表を作成した。

1. はじめに

本報告は省エネルギーの一手法である断熱に関して、シミュレーションにより、熱負荷・熱環境との関係において検討を加えたものである。シミュレーションにより断熱厚さと熱負荷の関係を求めたものは多くあるが、ここでは断熱位置（外断熱・内断熱）による熱環境・熱負荷の違いを主に求めるとともに、簡易断熱厚決定法も示した。熱環境及び熱負荷を算出するプログラムは、インプリシット差分を壁体の熱伝導に適用し、室内直接相互ふく射を考慮したものである。ここで開発したプログラムは上記の目的だけでなく、MRTを考慮した室内環境評価及び冷暖房システム、換気システムの取り扱いが非

常に容易に行えるものである。

2. 熱負荷・熱環境算出プログラム

熱負荷・熱環境算出プログラムの概略を以下に示す。

2.1. 記号

$T_{l, i}$: i 壁温度 ($l: 1$ は内表面, 2 は壁体内〔熱容量がない壁体の場合は外表面〕, 3 は外表面, r は室, x は外気, 隣室を示す。) [°C]

$\alpha, \alpha_o, \alpha_r$: 総合, 対流, ふく射熱伝達率 [kcal/m²h°C]

S : 壁面に吸収される短波長ふく射 [kcal/m²h]

Δt : 時間間隔 [h]

λ, l : 熱伝導率 [kcal/mh°C], 壁の厚さ [m]

C_p, γ : 比熱 [kcal/kg°C], 比重量 [kg/m³]

V, Q: 室の体積 [m³], 換気量 [m³/h]

H_r, S_r: 除去熱量, 室内瞬時負荷 [kcal/h]

2.2. 基礎熱平衡式

壁体の熱伝導計算は, インプリシット差分を用いた。壁体にインプリシット差分を用いたのは, 壁体表面温度, 壁体内温度が容易に算出できること, 壁体分割長さ, 計算時間間隔を任意に選択しても解が安定している等の理由からである。以上の利点を活かし計算時間短縮のために, 熱容量のある壁体は分割数を2, 熱容量のない壁体は分割数を1で定常とし, 計算時間間隔を1時間とした。熱容量のある壁体における各点での熱平衡式を(1)~(3)式に示す(図-1参照)。

$$C_{p1} \cdot \gamma_1 \cdot (l_1/2) / \Delta t \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i}^k) = S_i^{k+1} - \alpha_1 \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_r^{k+1}) - \lambda_1 / l_1 \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i+1}^k) \dots (1)$$

$$[C_{p1} \cdot \gamma_1 \cdot (l_1/2) + C_{p2} \cdot \gamma_2 \cdot (l_2/2)] / \Delta t \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i}^k) = -\lambda_1 / l_1 \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i+1}^k) - \lambda_2 / l_2 \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i+1}^k) \dots (2)$$

$$C_{p2} \cdot \gamma_2 \cdot (l_2/2) / \Delta t \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i}^k) = S_x^{k+1} - \alpha_x \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_x^{k+1}) - \lambda_2 / l_2 \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i+1}^k) \dots (3)$$

熱容量のない壁体・二重ガラスにおける各点での熱平衡式を(4)~(5)式に示す(図-2参照)。

$$S_i^{k+1} - \alpha_1 \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_r^{k+1}) - C \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i+1}^k) = 0 \dots (4)$$

$$S_x^{k+1} - \alpha_x \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_x^{k+1}) - C \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,i+1}^k) = 0 \dots (5)$$

但し

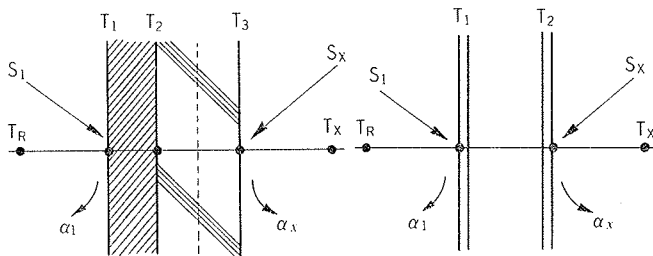


図-1 熱容量のある壁体 図-2 熱容量のない壁体

$$1/C = \sum_{m=1}^n l_m / \lambda_m$$

室での熱平衡式を(6)式に示す。(6)式は, 暖冷房システム, 換気なども取り扱えるが, 天井排熱は無視した。

$$C_p \cdot \gamma \cdot V / \Delta t \cdot (T_r^{k+1} - T_r^k) = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,1} \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_r^{k+1}) \cdot A_i + C_p \cdot \gamma \cdot Q \cdot (T_x^{k+1} - T_r^{k+1}) + S_r^{k+1} - H_r^{k+1} \dots (6)$$

2.3. 応用熱平衡式

室内相互ふく射を考慮した場合(1)式右辺第2項, (4)式左辺第2項は, $-\alpha_{e1} \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_r^{k+1}) - \sum_{j=1}^N F_{i,j} \cdot \alpha_{r1} \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_{K,j}^k)$ に, (6)式右辺第1項は $\sum_{i=1}^N \alpha_{e1,i} \cdot (T_{K,i}^{k+1} - T_r^{k+1}) \cdot A_i$ に置き換えられる。但し $F_{i,j}$ は i 面から j 面への形態係数である。以上の結果, 図-3 に示した室(7面は二重ガラス, 8面は熱容量のない壁体)の場合は, 室温の与えられる空調時には22元の連立方程式を解き(6)式により除去熱量を求め, 非空調時には23元の連立方程式を解き室温を求めることになる。

2.4. 計算における仮定

2.4.1. 照明・人体発熱 照明は発熱量の50%が対流成分, 50%がふく射成分であるとし, ふく射成分は天井

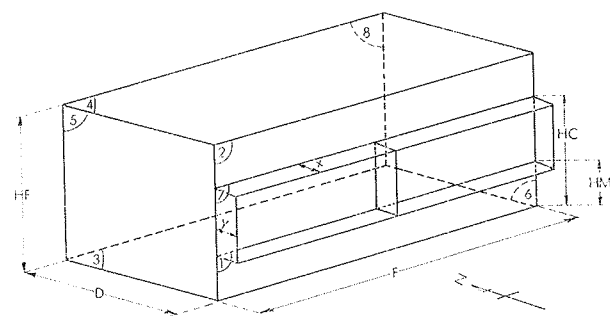
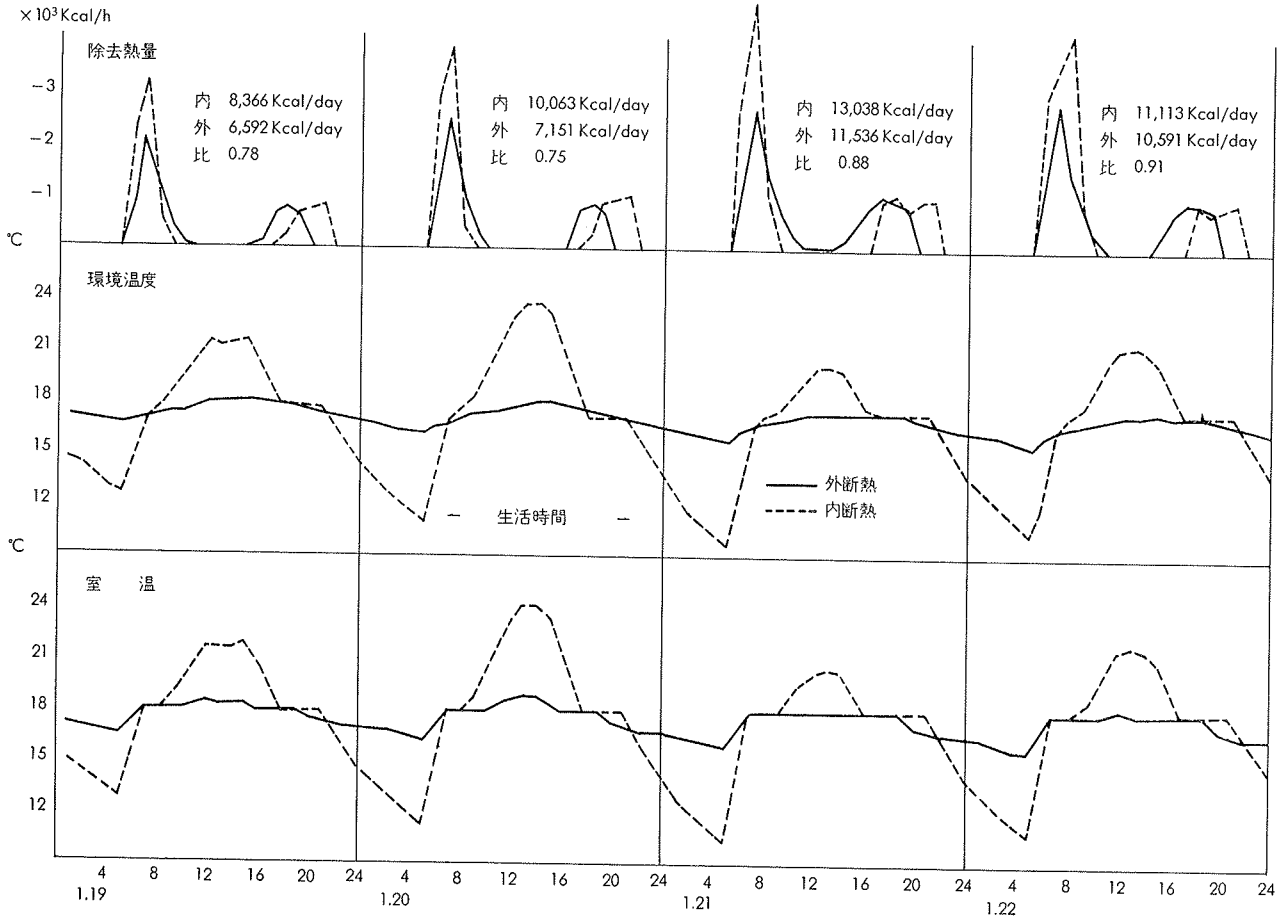


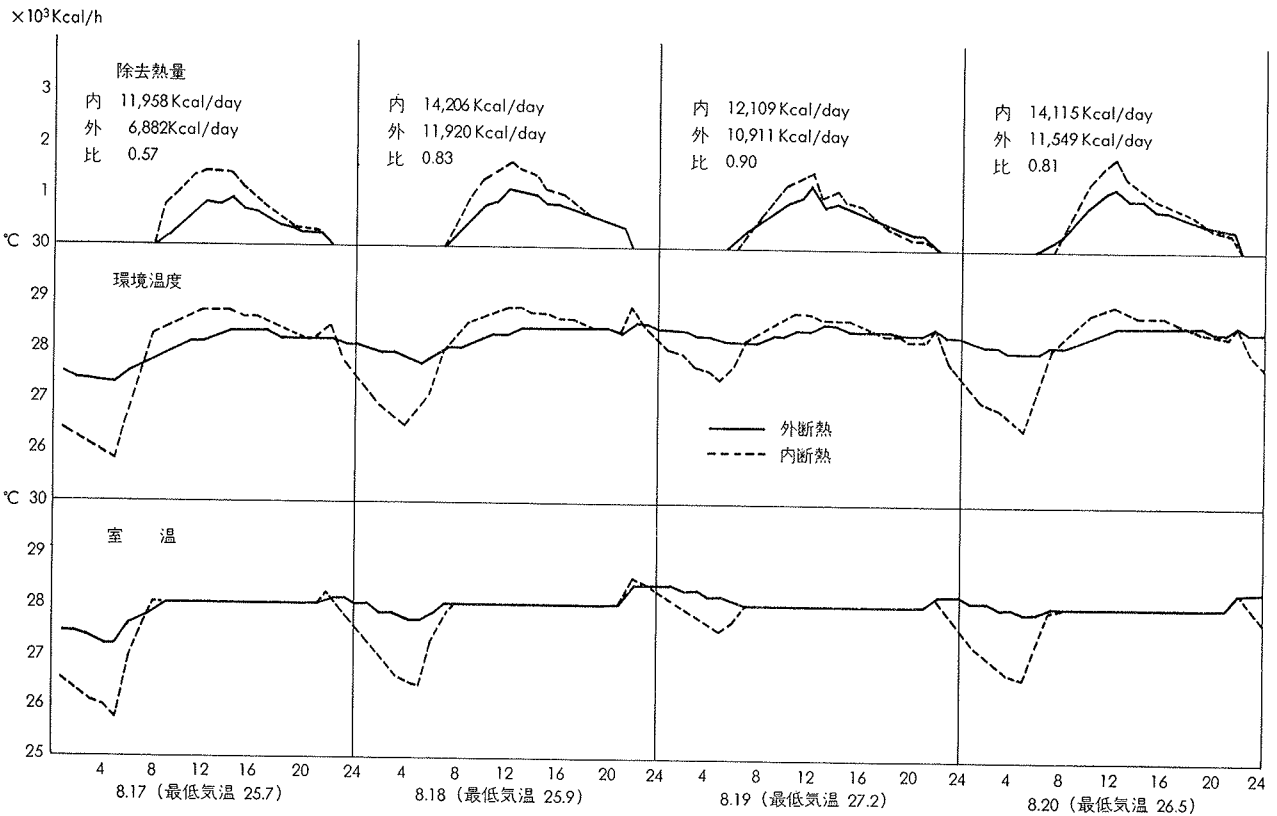
図-3 モデルルーム

建 物	東京地方 個人住宅 床面積 48m ²	室内条件	冬期 18℃ 40%以上 夏期 28℃ 60%以下
部屋スケール	H F = 3.7m D = 6m F = 8m H M = 1.0m x = y = 0.3m (図1)	装置運転時間	冬期 外断熱 6:00~19:00 内断熱 6:00~21:00 夏期 6:00~21:00 ○予熱予冷は1時間 ○室使用时间(生活時間)は7:00~22:00とする ○土・日も平日と同様
壁体材料	外断熱 1面 コンクリート150mm+スチロール50mm 2面 コンクリート300mm+スチロール55mm 3・4面 コンクリート180mm+スチロール50mm 5・6面 コンクリート120mm+スチロール50mm 7面 二重ガラス(5mm+5mm) 内断熱 1~6面の配置を逆にする	換 気	冬期 0.5回/h 夏期 すき間風 7:00~21:00 ナイトバージ(1.5回/h)22:00~6:00
隣 室	1・2・5~7 外気に面する 3・4・8 非空調室(外気の関数)に面する	室内発熱	人体 2人 照明 10W/m ²
気象データ	1966年 東京ピーク週 冬期 1/17~1/23 夏期 8/14~8/20		

表-1 入力条件



図—4 外断熱と内断熱との熱特性比較 (冬期)



図—5 外断熱と内断熱との熱特性比較 (夏期)

を面源とし形態係数でわりふった。人体発熱は、顕熱・潜熱とも50 kcal/h・人とし、顕熱のうち50%が対流成分、50%がふく射成分とした。またふく射成分は床を面源として照明と同様のあつかいをした。

2.4.2. 予熱 予熱時においては、予熱時間を与えて装置容量は与えずに以下の様にして求めた。すなわち予熱開始以前の室温を予熱時間中に線形に変化させ、室使用開始時に設定温度になるようにして、予熱時の除去熱量を求めた。

2.5. 出力

出力として、除去熱量、室温、平均ふく射温度、環境温度、外壁々体内温度を求めた。環境温度は人間が感じる温度感覚に比較的近い指標として、英国 (IHVE 等) で用いられているものであるが、今回は対流熱伝達率 (α_c) = 3.0 kcal/m²h°C、ふく射熱伝達率 (α_r) = 4.5 kcal/m²h°C を用い、次式より求めた。

$$\text{環境温度} = 1/3(\text{室温}) + 2/3(\text{平均ふく射温度}) \cdots \cdots (7)$$

3. 外断熱、内断熱の熱特性比較シミュレーション

3.1. 入力条件とシステム運転

図-3 に示す様な一戸建て住宅をモデル・ルームとして計算を行った。一戸建て住宅を選んだ理由は、断熱位置による熱負荷・熱環境の違いが比較的やすいためである。図のモデル・ルームに対し2章で述べた数学モデルを適用し、外断熱・内断熱各々の除去熱量、室温、環境温度、外壁々体内温度を求めた。外断熱と内断熱の違いは、断熱材と構造材の位置を反転することにより区別した。環境温度を室内の指標として用い、特に冬期の運転は夜間の室使用時間における環境温度が概略同一になるように、外断熱の場合の装置運転を内断熱より2時間早く打ち切る方法をとった。また断熱効果ができるように、冬期においては夜間(19時~6時)は断熱雨戸を閉める方法を、夏期においてはナイト・パーズを行うことにより夜間の蓄冷効果を増すような装置運転方法をとった。計算に用いた詳細な運転条件、気象条件を表-1 に示す。

3.2. シミュレーション結果

冬期と夏期の外断熱と内断熱における除去熱量(顕熱)、室温、環境温度の計算結果を図-4、図-5 に示す。冬期の場合、環境温度は立上り時、夜間の室使用時(19時~22時)のいずれも大体同一となっている。また室温・環境温度ともに、外断熱は変化が少なく内断熱は変化が大きい。特に日中内断熱は室温が必要以上に高くなっている。この結果ピーク週の外断熱の除去熱量は 67,247 kcal/week、内断

熱は 73,577 kcal/week であり、外断熱の方が10%前後少なくなっている。しかし当日の日射量が少なくかつ朝の最低気温が低くなると、差がほとんどなくなりわずかなのであるが逆転するケースもでてくる。夏期の場合、環境温度は室使用時において常に外断熱の方がよくなっている。また外断熱の除去熱量は 48,167 kcal/week であり、内断熱は 67,290 kcal/week で外断熱の方が28%少なくなっている。この違いは朝の最低気温が低くなる程大きくなる。

図-6 に外壁々体内温度の比較を示す。外断熱の方が日変動・年変動ともに少なく、壁体が熱的に保護されていることがわかる。

また装置運転時間を長くして全日運転にすると、外断熱は環境温度の変化が内断熱より小さいだけで除去熱量は概略同一となり、短くすると(5時間前後)外断熱の方が除去熱量が大きくなる場合もでてくる。

4. 断熱グレードと熱負荷

4.1. 入力条件と計算方法

集合住宅の中間階5室を負荷計算対象室に選び、外壁の断熱厚さ(0, 20, 40 mm)及び窓ガラスの種類(普通ガラス、二重ガラス)を変化させ、5種類の外壁のグレードを設定し、熱負荷(顕熱)と外壁のグレードの関係を求めた。各外壁のグレード別の年積算負荷は、設計日の日積算負荷に負荷率を用いて算出した。また計算は東京と札幌の2地点で行った。

4.2. シミュレーション結果

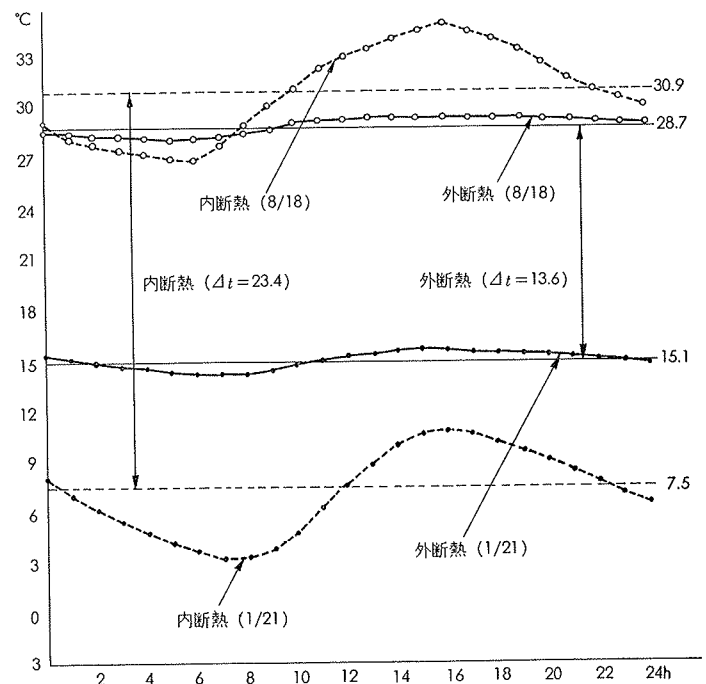


図-6 外断熱と内断熱の外壁々体内温度比較

熱負荷は外壁の断熱厚さ以外の要素（例えば外壁面積・窓面積率・室の形、大きさ・方位、内部発熱等）によっても大きく変化するため、床単位面積当りの（外壁）平均熱貫流率（ $\Sigma KA/F$ 値）と床単位面積当りの熱負荷との関係を求めた。この結果を図-7に示す。図より床単位面積当りの（外壁）平均熱貫流率と床単位面積当りの熱負荷が折れ線で対応できることがわかるとともに両者の相関が高いことがわかる。

4.3. 簡易断熱厚決定図表の提案

省エネルギーの観点から、冷暖房エネルギーの節約をおこなうには、上記の結果から、窓・外壁の断熱を総合的にあつかう $\Sigma KA/F$ 値が重要になってくる。建設省建築研究所の断熱基準の一部に熱損失係数¹⁾ という形でこの基準値が提案されている。ここでは基準値が決定された場合の簡易断熱厚決定法の提案を以下に示す。

- (1) 図-8 上段中央左にある $\Sigma KA/F$ の基準値と対象室の床面積をプロットし直線で結び中決の値を求め、下段中央のグラフにプロットする。
- (2) 上段右の窓ガラスの種類を選択し、窓面積値をプロットし直線で結び中央の値を求め、下段右のグラフにプロットする。
- (3) 下段の右と中央を結び、左のグラフ上の値を求め、上段左のグラフの中央にプロットする。同一グラフの右に外壁面積をプロットし2点を結ぶことにより左のグラフより外壁に必要とされる熱貫流率、必要断熱厚が得られる。

5. まとめ

- (1) 外断熱と内断熱との熱特性比較シミュレーションを行った結果、除去熱量は内断熱の特性を活かした装置運転を行うことにより内断熱より減ずることができるとわかった。また室温・環境温度の変化が小さいこと、躯体が熱的に保護されることなど外断熱のメリットが明らかになった。
- (2) 熱負荷と床単位面積当りの外壁平均熱貫流率との相関が高いことが明らかになるとともに、簡易断熱厚決定図表の提案をした。
- (3) ここで開発したプログラムは単純な負荷計算だけでなく、室内の熱環境評価、暖冷房システム、換気の取り扱いがおこなえる。

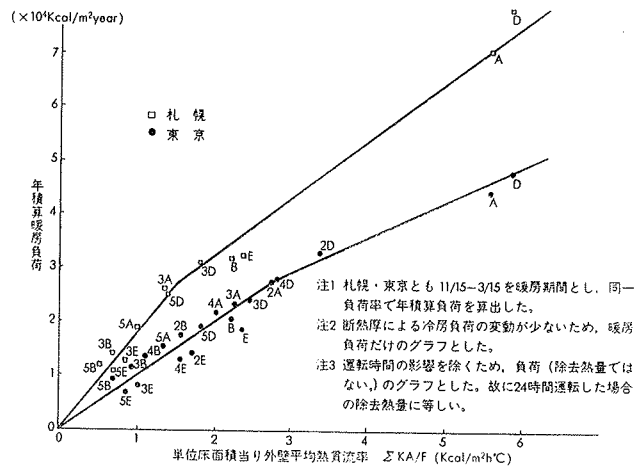


図-7 年積算暖房負荷と $\Sigma KA/F$ との関係

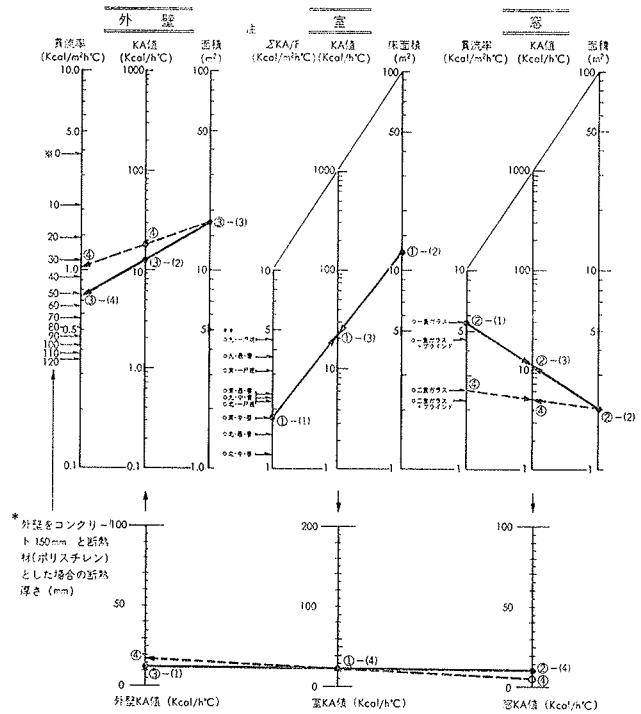


図-8 簡易断熱厚決定図表

参考文献

- 1) 日本建築センター：枠組壁工法による住宅の壁等の断熱性能に関する研究報告書，(昭和51. 3)
- 2) 田中，小宮：外断熱に関する研究，空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集，(昭和51. 10)
- 3) 木村建一：建築設備基礎理論演習，学献社，(1970)