

気候特性に対応した住宅の断熱・気密性能に関する検討

住宅の換気・通風に関する実験的研究 その2

NUMERICAL PREDICTION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SHELTER EFFICIENCY AND INDOOR ENVIRONMENT

Experimental study on natural ventilation of detached house. Part 2

赤林伸一*, 水谷国男**, 高倉秀一***, 須山喜美****, 榎原亮一*****

Shin-ichi AKABAYASHI, Kunio MIZUTANI, Shuichi TAKAKURA,

Yoshimi SUYAMA and Ryoichi KUWAHARA

The purpose of this study is to clarify the climatic characteristics of 26 cities in Japan, and to explain the influence on indoor environment by shelter efficiency and heating apparatus and by inhabitants' behavior by means of numerical method. Main conclusions are as follows.

1. To determine the shelter efficiency and housing equipments, it is important to clarify the climatic characteristics in those locations.

2. The raise of shelter efficiency is effective for reducing the winter heating loads and keeping room temperature even in the early morning. However the improvement of shelter efficiency dose not reduce the cooling load in summer and results in keeping room temperature high in the night time.

3. If an unvented heater is used, the CO₂ concentration and the absolute humidity are very high. In the houses with high airtight grade, the use of a vented heater or a mechanical ventilation apparatus is necessary.

Keywords: Regional Climatic Condition, Natural Ventilation, Insulating Efficiency, Airtightness, Indoor Environment, Numerical Prediction

地域気候, 自然換気, 断熱性能, 気密性能, 室内環境, 数値解析

1. 序

建築環境工学の観点からみたわが国の気候の特徴は、南北に細長く縦横に山脈が走るという地形のために、狭い国土でありながら極めて多様な気候を有するところにある。このような気候条件のもとで、地域に対応する住宅の仕様や住まい方が発展してきた^{文献1) 2)}。しかしながら、戦後の暖冷房設備の発達には屋外の気候条件に左右されにくい室内温熱環境を機械力により実現し、建物の仕様は全国的に画一化される傾向が強くなっている。

一方、オイルショックや地球環境問題を契機とした近年の省エネルギー化の動きは、住宅の性能に対して地域の気候特性に対応した新たな検討を要求している。さらに、価値観や生活習慣が多様化したことによって、居住者の個性や住まい方が重視され、それに合わせた住宅の計画が求められている。

しかしながら、このような要求に対応した住宅の計画手法は、現在のところ十分に整備されておらず、例え

ば、断熱性能は、大まかな地域区分で決定された住宅金融公庫の断熱仕様などに基づいて決定される場合が多い。更に、暖冷房設備の計画においても、地域の気候特性や住宅の断熱・気密性能の違いなどが十分に反映されず、過剰あるいは過小な設備が設置されたり、室内空気汚染や結露の被害が発生するなど、住宅の室内居住環境を悪化させている場合も多い。

地域の気候特性に合わせた住宅のシェルター性能や設備性能を考える場合、日射や外壁からの貫流熱の影響に関しては、事務所ビルなどと同様の熱負荷計算手法により予測可能であるが、住宅の場合、自然換気(すき間風)や窓の開放による通風、あるいは設備機器の運転方法など種々の要素(図-1)が室内居住環境に影響を及ぼすため、これらを含めた予測手法が必要になる。

筆者らは、住宅の自然換気や通風と室内環境の関係に関していくつかの研究^{文献3) 4) 5)}を行っており、前報(その1)^{文献6)}では、住宅の風力による自然換気量と気密性

* 新潟大学工学部建設学科 助教授・工博

** 三建設備工業(株)つくば総合研究所・学博

*** (株)間組技術研究所

**** (株)間組技術研究所・工博

***** 三建設備工業(株)つくば総合研究所

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Niigata Univ., Dr. Eng.

Tsukuba Research Institute, Sanken Environmental Engineering Co., Ltd., Ph. D.

Technical Research Institute, Hazama Corporation

Technical Research Institute, Hazama Corporation, Dr. Eng.

Tsukuba Research Institute, Sanken Environmental Engineering Co., Ltd.

能の関係を風洞実験により明らかにした。本報では、様々なグレードの熱的性能、気密性能を持つ住宅を対象に地域毎の気候特性が室内居住環境に及ぼす影響を数値シミュレーションにより明らかにし、冷暖房負荷、室内空気環境を指標として暖冷房方式や断熱・気密性能の評価を行うことを目的とする。

2. 屋外気候の地域特性に関する検討

2.1 使用した気象データ

住宅の暖冷房設備及びシェルター性能を計画するには、まず、屋外気候の地域特性を詳細に把握する必要がある。標準気象データ^{文獻7)}は全国の各都市における、温度、湿度、日射量、大気放射量及び風速・風向の各気候要素について標準的な1年間の値が時刻別に整備されているデータである。このデータはオフィスビルの負荷計算を行うために整備されており住宅の負荷計算に用いることには問題点もあるが、本報では標準気象データを用いた室内環境の数値シミュレーションを行い、気候特性が室内環境に及ぼす影響を検討する。

本報では、まず全国26地点の標準気象データの各気候要素について季節別に分析を行い、地域毎の屋外気候特性を明らかにする。標準気象データの各気候要素の季節

別の平均値、最大・最小値および標準偏差を図-2に示す。また、札幌、仙台、秋田、新潟、東京、松本、金沢、鹿児島各地点の主な気候要素の季節別の累積頻度を図-3に風配図を図-4に示す。

2.2 気温の地域特性 (図-2, 図-3)

冬季(12月~3月)の平均気温(図-2)は札幌と鹿児島で約10℃の温度差があり、札幌では0℃以下になる頻度が80%以上ある(図-3)。秋田と松本は緯度が大きく異なるにもかかわらず、気温の頻度分布は類似して

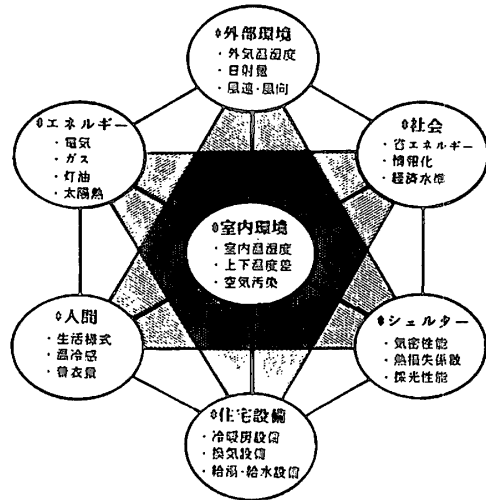
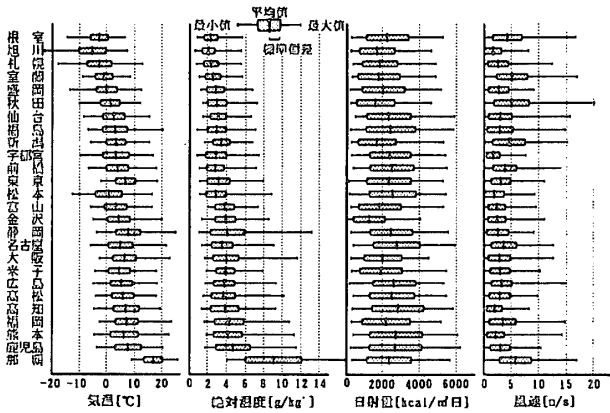
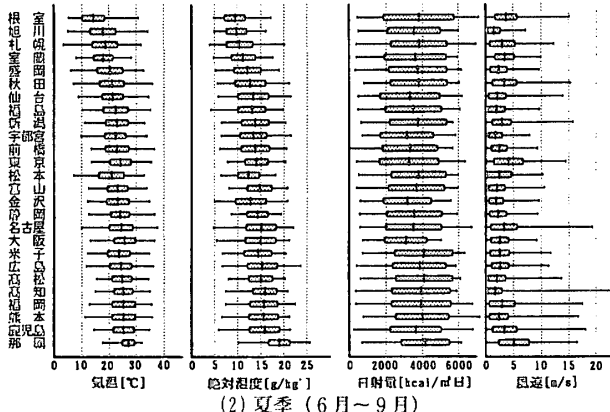


図-1 室内居住環境を構成する諸要素^{文獻8)}

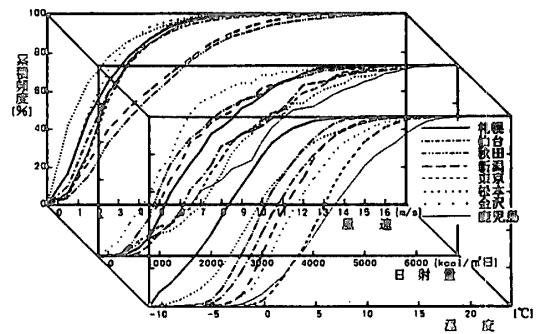


(1) 冬季 (12月~3月)

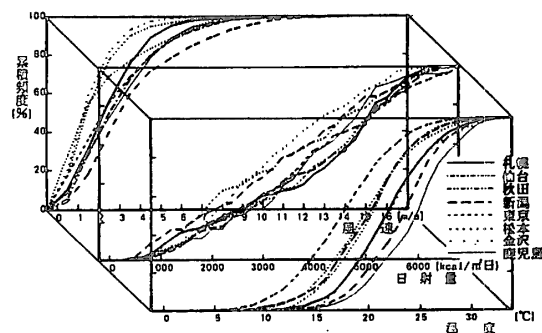


(2) 夏季 (6月~9月)

図-2 屋外気候要素の地域別特性



(1) 冬季 (12月~3月)



(2) 夏季 (6月~9月)

図-3 主な屋外気候要素(温度、日射量、風速)の累積頻度分布

いる。これは、松本の標高が約500mと高いためと考えられる。夏季（6月～9月）の気温は地域による差が比較的小さく、仙台、秋田、松本の3地点の頻度分布は類似している。

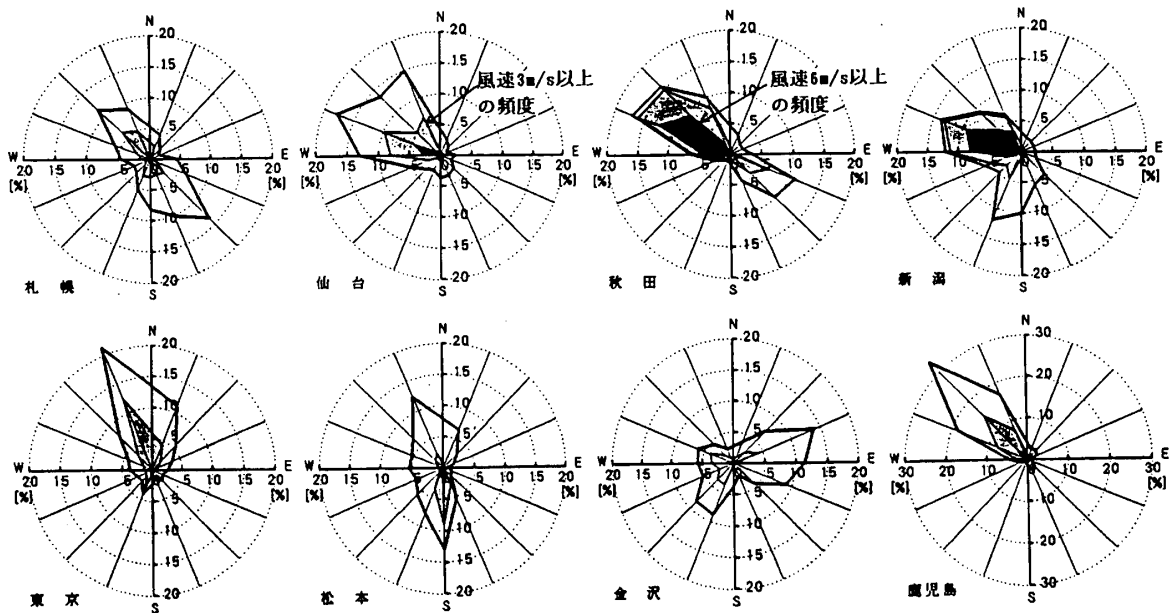
2.3 絶対湿度の地域特性（図-2）

冬季の平均絶対湿度は地域毎の平均気温に比例して高くなる傾向がみられるが、富山、金沢では平均気温が低いにもかかわらず、絶対湿度の平均値は約4 [g/kg]と名古屋や静岡と同程度である。逆に、東京の絶対湿度の平均値は約3 [g/kg]と平均気温に比較して相対的に低く、松本と同程度である。夏季の絶対湿度の平均値は、冬季に比

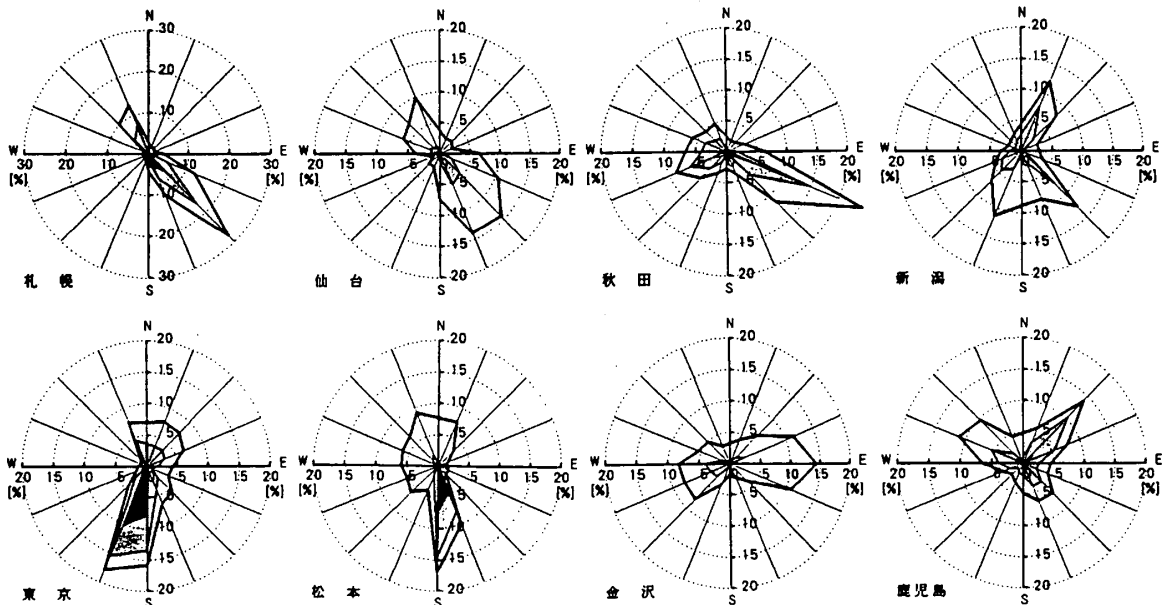
べて、8～12 [g/kg]高く、札幌以南では10 [g/kg]以上になる。

2.4 日射量の地域特性（図-2，図-3）

日射量は標準気象データ中の放線面直達日射量と水平面天空日射量から、時刻別の水平面全天空日射量を計算し、1日について積算した日積算日射量を比較に用いる。冬季の日積算日射量は高緯度地域ほど小さくなる傾向があるが、秋田、新潟、金沢などの日本海側の地域は、太平洋側の地域に比較して少なく、平均値は2000 [kcal/m²日]以下になっている。夏季の日積算日射量は、地域の特徴を示すような明確な差はみられない。



(1) 冬季（12月～3月）



(2) 夏季（6月～9月）

図-4 各地域の季節別風配図

2.5 風速・風向

各地点の風速・風向の頻度分布を図-3, 図-4に示す。なお, 風配図(図-4)のハッチ部分は最も内側の部分が風速6[m/s]以上, 外側の部分は3[m/s]以上の頻度の割合を示す。冬季の平均風速(図-2(1))は根室, 室蘭, 秋田, 新潟, 那覇で特に速く, 秋田, 新潟では風速5[m/s]以上の頻度が40%以上である(図-3(1))。夏季の平均風速(図-2(2))および頻度分布(図-3(2))は, 地域による差が少ない。

冬季の風向(図-4(1))は仙台, 秋田, 新潟, 東京, 鹿児島などで, 冬季, 北西の風向きの頻度が高くなる。また, 夏季の風向(図-4(2))は地域によって大きく異なる。このため, 住宅の通風や風力を利用した換気などを計画をする際には, その地域の季節別の主風向を考慮して建物や窓を配置する必要がある。

3. 住宅の自然換気量と冷暖房負荷に関する数値解析

3.1 計算方法

対象とした住宅モデルを図-5に示す。建物形状は窓を除き, 前報^{文献6)}で風洞実験を行った1階建の住宅モデル(切り妻および陸屋根)と同一である。窓は南壁面に1.8m×1.8mの窓を2個, 北壁面に1.8m×0.9mの窓を2個, 東西壁面に1.8m×0.9mの窓をそれぞれ1個設置する。また, 小屋裏, 床下は室に含め1室としている。計算方法は, まず, 前報^{文献6)}の風洞実験から求めた建ペイ率及び風向別の風圧係数を利用し, 風速と換気回数の関係を室内圧仮定法による換気回路網計算^{文献9)}により算出

天井高	3.3 [m]	
床面積	77.76 [m ²]	
窓面積	N 1.8 ^W ×0.9 ^H 2個	3.24 [m ²]
	S 1.8 ^W ×1.8 ^H 2個	6.48 [m ²]
	W 1.8 ^W ×0.9 ^H 1個	1.62 [m ²]
	E 1.8 ^W ×0.9 ^H 1個	1.62 [m ²]

* 住戸内に温度分布, 湿度分布はないものとして計算を行っている

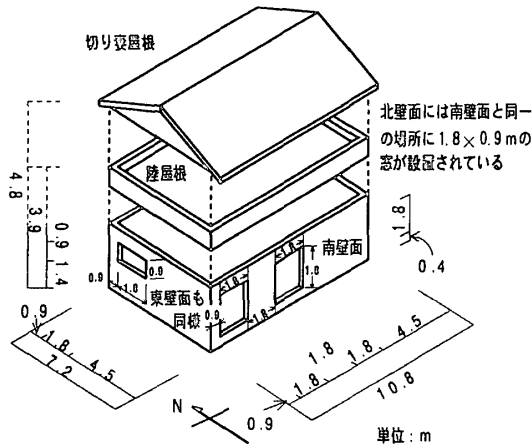


図-5 シミュレーションで対象とした住宅モデル

する。計算パラメータとしては, すきま定数(n), 相当開口面積(αA)の他, 前報では無視した内外温度差も変化させ, 温度差による換気を考慮している。なお, 建物のすきまは外壁に均等に分布しているものと仮定している^{文献10)}。

次に, 上記計算結果と2章で使用した標準気象データの風向, 風速及び外気温の値を用いて, 毎時刻の換気量を求める。さらに, この換気量をすき間風負荷とし, 時刻別の熱負荷計算手法と組み合わせて非空調時の室温と空調時に必要な熱量を算出する。

計算プログラムは, 空気調和・衛生工学会の非定常熱負荷計算プログラム(HASP/ACLD/8001)を改良し, 時刻別の換気量(すき間風量)や詳細な生活スケジュールデータの入力を可能とした。なお, 熱負荷計算の結果得られた室温が, 換気量算出時の仮定値と異なる場合には, 一致するまで, 換気量と室温の計算を繰り返し行っている。

仮定した建物のシェルター性能に関する計算条件を表-1に示す。また, 計算に使用した生活スケジュールは文献13)を参考に図-6の様に仮定する。暖冷房は温度のみを上下させるものとし, 湿度の調節(加湿や除湿)は行っていない。暖冷房時の設定室温は冬季(2月~3月)が22℃, 夏季(6月~9月)が26℃とした。中間

表-1 シェルター性能に関する計算条件

条件タイプ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
断熱性能 グラスウール 断熱厚さ (24t)	0 00	●										
	50 00		●	●								
	100 00				●	●	●					
	200 00							●	●	●	●	●
窓ガラス	977b(300)	●	●		●							
	17(97300)			●	●		●	●	●	●	●	●
開口部 (気密グレード)	22.4 (6)	●										
	7.1 (4)		●	●		●	●		●			
	2.24 (2)				●			●		●		
	0.71 (0)								●			●
	0.4 (-1)											●

注) 熱伝導率は0.036[kcal/m·h·℃]とした。

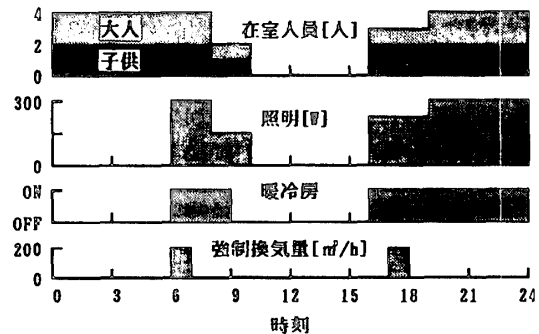


図-6 居住者の生活スケジュール

期（4月～5月，10月～11月）は自然室温が22℃以下のとき暖房を行い，26℃以上のときは冷房を行うと仮定した。室内温熱空気環境に影響を及ぼす要素としては上記の条件以外に通風性能や庇の日射遮蔽性能等様々な条件が考えられるが，本報では室内環境に及ぼす影響の大きいと思われる上記の条件のみをパラメータとした解析を行っている。

時刻別の換気回数と冷暖房負荷の計算結果の一例を屋外気候の変動とともに図-7に示す。

3.2 建ペイ率と換気回数の関係

建ペイ率（K）を0%，5%，20%，40%と変化させたときの冬季の換気回数（1月15日～2月15日の平均値）を図-8に示す。ここでは，1階建，陸屋根， $n = 1.5$ の場合について比較する。冬季の換気回数は，条件A（気密グレード6， $\alpha A = 22.4 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ，表-1参照）では，建ペイ率0%の場合が最も多く，新潟では2.5回/h以上になる。また，風速の速い地域ほど建ペイ率の影響が大きく，たとえば，新潟では，建ペイ率が0%から40%になると換気回数は約1/2になる。

条件F（気密グレード4， $\alpha A = 7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ）では，新潟を除いて，建ペイ率の影響は小さく換気回数は0.4～0.5回/h程度になる。また，条件L（気密グレード1， $\alpha A = 0.4 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ）では，換気回数が0.1回/h程度と小さくなり，建ペイ率及び地域による差異はほとんどみられない。

3.3 すきま定数と換気回数の関係

すきま定数（n）を1.0，1.5，2.0と変化させたときの

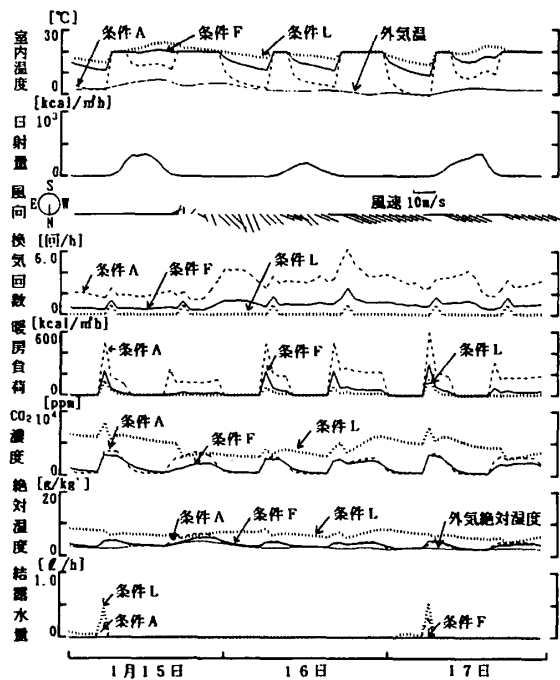


図-7 屋外気候と室内環境のシミュレーション結果の一例

冬季の換気回数（1月15日～2月15日の平均値）を図-9に示す。ここでは，1階建，切妻屋根のデータを使用した。冬季の換気回数とすきま定数（n）の関係は，条件A（気密グレード6， $\alpha A = 22.4 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ）の場合，nが大きくなるにしたがって換気回数が増える傾向がみられる。ただし，新潟，秋田，仙台では，nが1.5から2.0に変化しても換気回数はほとんど変わらず，札幌では逆に減少する。

条件F（気密グレード4， $\alpha A = 7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ）の場合も，すきま定数nが大きくなると換気回数は増加するが，その割合は小さく，nが1.0から2.0になったときの換気回数の増加量は，どの地域も0.2回/h以下である。また，条件L（気密グレード1， $\alpha A = 0.4 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ）では，どの地域も換気回数がきわめて小さく，地域及びすきま定数による差異は，ほとんど見られない。

なお，図-8（K=0%）と図-9（n=1.5）の差は，陸屋根と切り妻屋根の換気回数の違いを示してお

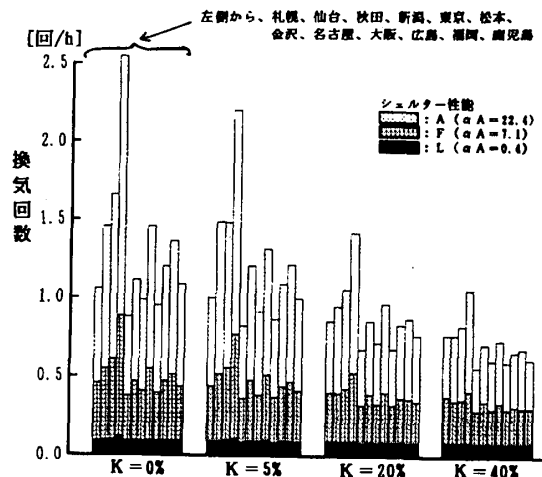


図-8 建ペイ率（K）と冬季の換気回数の関係（陸屋根， $n = 1.5$ ）

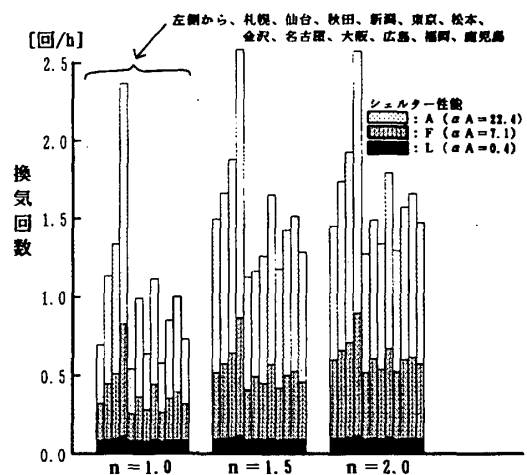


図-9 すきまの特性（n）と冬季の換気回数の関係（切妻屋根，建ペイ率0%）

り、どの地域においても切り妻屋根の方が多少大きい。


以下ではすべて、1階建、切妻屋根、建ペイ率0%、すき間の特性 $n=1.5$ の場合の解析結果を使用する。

3.4 換気回数とシェルター性能の関係 (図-10)

冬季の換気回数(1月15日~2月15日の平均値)とシェルター性能(表-1, A~L)の関係を図-10に示す。気密性能が等しい場合(条件B C E F IとD G J, H Kはそれぞれ相当開口面積が同じ)の換気回数はほぼ等しい。

新潟における換気回数は、条件A ($\alpha A=22.4\text{cm}^2/\text{m}^2$)で2.5回/h以上と特に大きい。他の地域では1.5回/h前後である。気密性能が高くなるにつれて地域による差は小さくなり、 $\alpha A=2.24\text{cm}^2/\text{m}^2$ (条件D, G, J)で0.2回/h, $\alpha A=0.4\text{cm}^2/\text{m}^2$ (条件L)では0.1回/h程度である。

3.5 暖房時間1時間当りの負荷とシェルター性能の関係

冬季の暖房運転時間内の1時間当りの暖房負荷(1月15日~2月15日の時間平均値)を図-11に示す。すきま風負荷(図中  部分)は、換気回数と同様に気密性能によってほぼ決定される。しかしながら、貫流熱負荷は、

断熱材の厚さ及びガラスの種類によって大幅に異なるため、それらを合計した暖房負荷は、気密性能が同じでも大きく異なる。

今回仮定した計算条件では、暖房負荷に占めるすきま風負荷の割合がほとんどの地域で20%以下になっており、気密性能を向上させることによる省エネルギー効果は断熱性能向上の効果に比べて小さい。

3.6 年間暖房負荷とシェルター性能の関係 (図-12)

年間暖房負荷は、冬季(1月15日~2月15日)の暖房時間1時間当りの負荷と同様に、シェルター性能の向上に伴って減少するが、寒冷地と温暖地域では、暖房が必要となる時間数が異なるため、地域による差が大きくなる。

また、ペアガラスを用いた場合は、断熱材を50mm(条件C)から100mm(条件F)にすると、年間暖房負荷が大幅に減少する(新潟で約20[Mcal/m²年]減少)。これに対して、シングルガラスでは、断熱材を50mm(条件B)から100mm(条件E)に変更しても年間暖房負荷はほとんど変わらない。これは、条件B, E(シングル

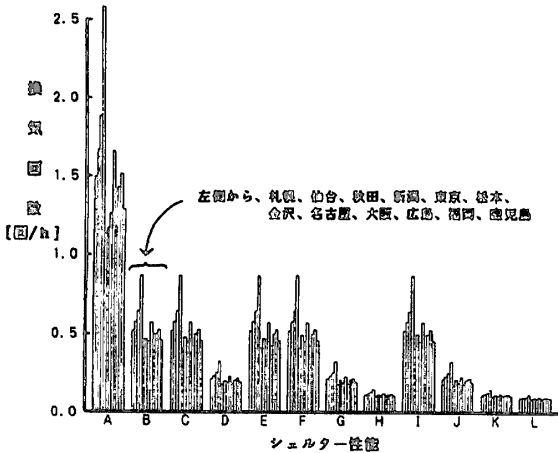


図-10 換気回数(1月15日~2月15日の平均値)とシェルター性能の関係

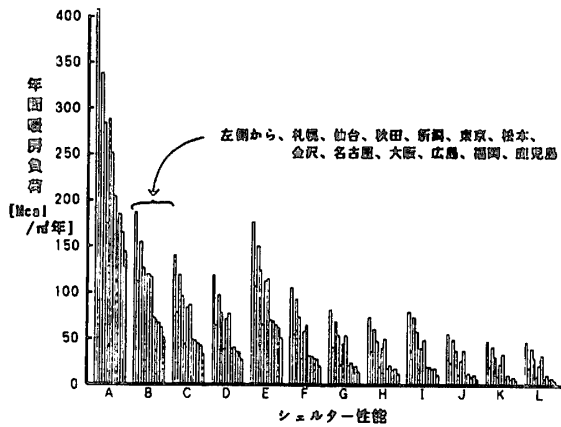


図-12 年間暖房負荷とシェルター性能の関係

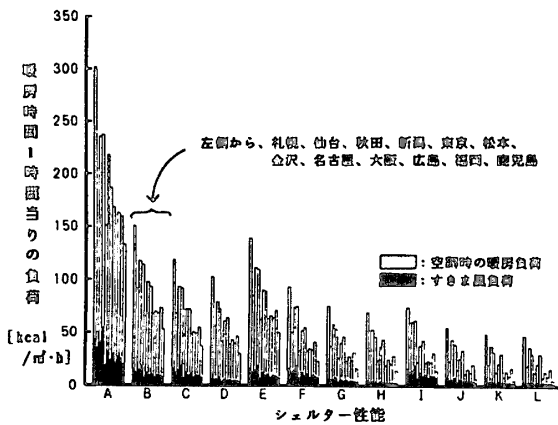


図-11 暖房時間1時間当りの負荷(1月15日~2月15日の平均値)とシェルター性能の関係

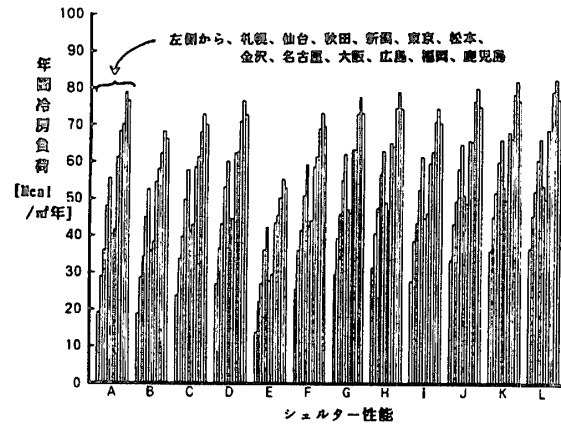


図-13 年間冷房負荷とシェルター性能の関係

ガラス)の場合、暖房負荷の多くが窓からの熱損失であるためと考えられる。

条件C(断熱50mm+ペアガラス)と条件E(断熱100mm+シングルガラス)の比較で明らかなように、寒冷地においては外壁の断熱材を厚くするより、ガラスを2重にする(あるいは窓面積を減らす)方が省エネルギー効果が高い場合が多いと考えられる。

3.7 年間冷房負荷とシェルター性能の関係(図-13)

年間冷房負荷はシェルター性能が最も低い条件Aと最も高い条件Lでほとんど変わらない。これは、シェルター性能が高くなると昼間の冷房負荷は小さくなるが、夜間室温が下がりにくくなり、夜間の冷房負荷が増加するためと推察される。年間冷房負荷が最も小さくなるシェルター性能は条件Eである。年間暖房負荷の最も小さい条件Lは年間冷房負荷については逆に最も大きくなる場合が多い。

なお、今回の計算では窓の開閉を考慮していないが、夏季の夜間外気温が室温より低い地域では、窓を開放して換気・通風を行えば、内部発熱負荷(人体や照明の発熱など)を除去し、室温を下げることができるため、断熱・気密性能が高い住宅であっても年間冷房負荷は大きくならないと考えられる。

3.8 冬季の室温とシェルター性能の関係

冬季の室温の時間変化の一例を図-7に示す。冬季の夜間室温は条件Aの場合、暖房停止後急激に低下し、明け方の室温は外気温とほぼ等しくなる。しかしながら、シェルター性能が向上すると外気温との差が大きくなり、条件Lでは、外気温より20℃程度高い。

図-14に、明け方の最低室温とシェルター性能の関係を示す。明け方の最低室温を10℃以上にするためのシェルター性能は、札幌で断熱材200mm、 $\alpha A=2.24 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (条件J)以上、仙台、秋田、新潟、松本、金沢では、断熱材100mm、 $\alpha A=7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (条件F)以上

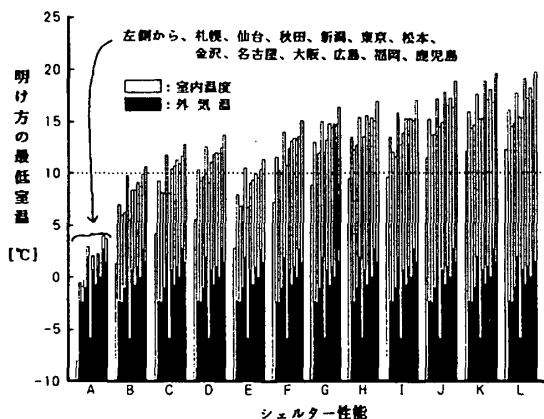


図-14 明け方の最低室温(1月15日~2月15日の平均値)とシェルター性能の関係

の性能が必要となる。その他の太平洋側の地域は、断熱材50mm、 $\alpha A=7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (条件C)でよいが、鹿児島を除いた地域では、ペアガラスを使用する必要がある。以上の条件は年間暖房負荷を60[Mcal/m²年](灯油に換算して約7ℓ/m²年)以下とするために必要なシェルター性能とほぼ等しい。

4. 室内空気環境と結露に関する検討

4.1 冬季の室内空気汚染と結露の発生要因

冬季の室内空気汚染や結露の有無は暖房設備の種類によって大きく異なる^{文献:1)}。

密閉型ストーブなど、燃焼廃ガスが室内に放出されない暖房設備を用いた場合は、結露の原因となる水蒸気やCO₂などの空気汚染質は人体などからわずかに発生するのみである。

これに対して、開放型ストーブを用いた場合は、燃焼廃ガス中の水蒸気とCO₂が室内に大量に放出されるため、絶対湿度及びCO₂濃度が上昇し、結露や室内空気環境の悪化につながる。また、この場合、室内の汚染質濃度は燃料の消費量(暖房負荷に比例する)と換気量(強制換気と自然換気)によって変化する。

そこで、3章で求めた時刻別の熱負荷計算結果より、開放型又は密閉型ストーブを用いた場合のCO₂及び水蒸気の発生量を算出し、地域別、シェルター性能別に室内CO₂濃度と結露量のシミュレーションを行う。

なお、ここでは建物の条件として、切妻屋根、建ぺい率K=0%、すきま特性n=1.5の場合を対象とし、シミュレーション結果を比較する。

表-2 室内空気環境に関する計算条件

	CO ₂ 発生量	水蒸気発生量
成人1人当り	6~22時 17.3 [ℓ/h]	23~5時 8.3 [ℓ/h]
(子供は1/2)	[ℓ/h]	[ℓ/h]
開放型ストーブ (燃料は灯油)	0.15[ℓ/kcal] (発熱量1kcal当り)	0.134[g/kcal] (発熱量1kcal当り)

*開放型ストーブの機器効率は100%と仮定し、また、壁体の吸放湿、透湿性能は無視している。

表-3 室内CO₂濃度と絶対湿度の計算式

- 室内CO₂濃度の時間変化計算式

$$C_{R_{n+1}} = C_{R_n} + (M_n/V)t - Q_n/V(C_{R_{n+1}} - C_{O_n})t \quad (1)$$

$C_{R_{n+1}}$: n+1時点の室内CO₂濃度 [ppm]
 C_{O_n} : n時点の外気CO₂濃度 [ppm] (=350 [ppm] 一定)
 C_{R_n} : n時点の室内CO₂濃度 [ppm]
 M_n : n時点の換気量 [m³/h]
 V : 室容積 (m³), t: 時間間隔 (=1 [h])
- 室内絶対湿度の時間変化計算式

$$X_{R_{n+1}} = X_{R_n} + (\Delta X_n/G_v)t - G_n/G_v(X_{R_{n+1}} - X_{O_n})t \quad (2)$$

$X_{R_{n+1}}$: n+1時点の室内絶対湿度 [g/kg]
 X_{R_n} : n時点の室内絶対湿度 [g/kg]
 X_{O_n} : n時点の外気絶対湿度 [g/kg]
 ΔX_n : n時点の室内水蒸気発生量 [g/h]
 G_n : n時点の乾燥空気換気量 [kg/h]
 G_v : 室内乾燥空気の重量 [kg], t: 時間間隔 (=1 [h])

4.2 計算方法

(1) CO₂濃度

計算条件を表-2に示す。人体からのCO₂発生量は、在室者の作業状態を、就寝時は仰臥、その他は静座として計算する^{文献12)}。開放型ストーブの機器効率を100%と仮定し、CO₂発生量は、灯油(発熱量8400[kcal/l])を使用するものとして燃焼廃ガスの成分比^{文献12)}から計算する。

CO₂濃度の時間変化は室内一様拡散を仮定し、表-3に示す式で算出する。

(2) 絶対湿度と結露水量

計算条件を表-2に示す。人体から放出される水蒸気量は、作業強度と室温によって変化する。ここでは、作業強度を軽作業程度と仮定し、室温と潜熱発生量の関係^{文献7)}を用いて水蒸気発生量を計算する。ただし、水蒸気の発生量は呼気に含まれる水蒸気量(10.5[g/h人])を下回らないものとする。

開放型ストーブからの発生量は灯油(発熱量8400[kcal/l])を使用するものとして燃焼廃ガスの成分比^{文献12)}から計算する。絶対湿度は、換気及び結露によってのみ減少するものとし、壁などの吸放湿や透湿及び結露水の再蒸発は考慮していない。

換気による絶対湿度の時間変化は、表-3に示す式によって計算する。

次に、結露は窓でのみ発生すると仮定し、窓ガラスの室内側表面温度における飽和空気絶対湿度と室内空気絶対湿度の差(室内絶対湿度の方が高いときに結露する)から結露水量を算出する。

窓ガラスの室内側表面温度については、各時刻の内外気温と窓ガラスの熱伝導率から求め、表面熱伝達率は一定(数値は3章の熱負荷計算と同じ、室内側8[kcal/m²h°C]、外気側20[kcal/m²h°C])とした。

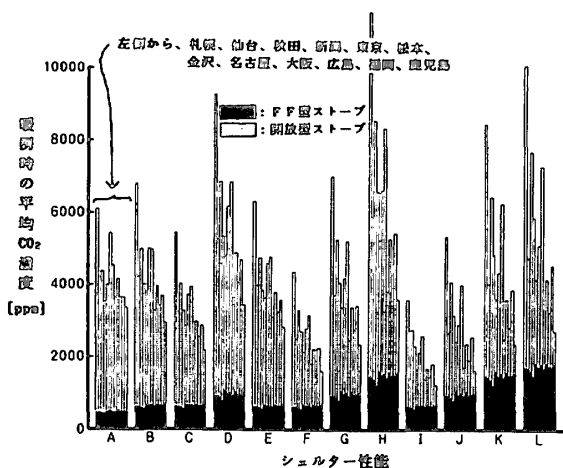


図-15 室内CO₂濃度(1月15日~2月15日の平均値)とシェルター性能の関係

4.3 CO₂濃度と結露水量の時間変化

開放型ストーブを使用した場合の時刻別のCO₂濃度と結露水量のシミュレーション結果の一例を図-7に示す。

CO₂濃度は暖房負荷の時間変化に対応して上下するが、気密性能が高い条件L($\alpha A=0.4\text{cm}^2/\text{m}^2$)では暖房を止めてもCO₂濃度はあまり低下せず、一日中5000[ppm]を超えている場合もある。

一方、結露水量は朝の暖房開始時にピークが見られ、ピークの高さはこの場合、条件F、条件A、条件Lの順に高くなっている。また、条件Lでは暖房開始前(早朝)に結露が生じる日もある。

4.4 平均CO₂濃度とシェルター性能の関係(図-15)

開放型ストーブを使用した場合、断熱性能が向上すると燃料の消費量が減少するため室内CO₂濃度は低下する。逆に気密性能が向上すると、換気量が減少するためCO₂濃度は上昇する。たとえば、札幌、秋田、金沢では $\alpha A=0.71\text{cm}^2/\text{m}^2$ (条件H)で8000[ppm]以上となり、窓の開放や強制換気が必要となる。したがって、計算を行った条件の中では断熱性能が高く気密性能が低い、条件IやFが室内CO₂濃度を低くするのに適しているといえる。密閉型ストーブ使用時の室内CO₂濃度は気密性能のみによって決まるが、 $\alpha A=0.4\text{cm}^2/\text{m}^2$ (条件L)で最もCO₂濃度の高い鹿児島でも1800[ppm]以下である。

4.5 日積算結露水量とシェルター性能の関係(図-16)

開放型ストーブ使用時の日積算結露水量は、CO₂濃度と同様で、断熱性能が向上すると減少し、気密性能が向上すると増加する。計算を行った条件の中では断熱材200mm、 $\alpha A=7.1\text{cm}^2/\text{m}^2$ (条件I)が最も結露の少ない条件になる。この条件では、札幌で0.1[l/日]結露するだけで、他の地域ではほとんど結露しない。

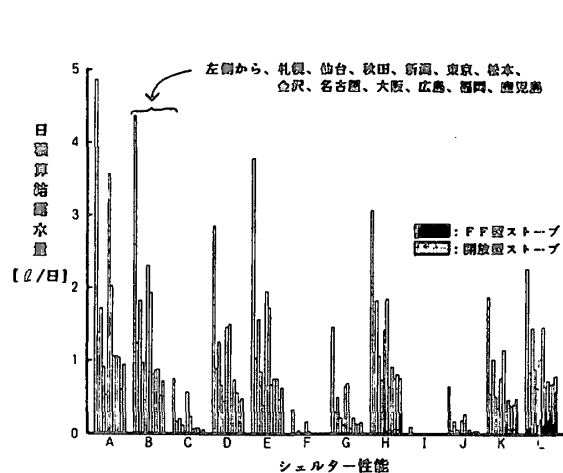


図-16 日積算結露水量(1月15日~2月15日の平均値)とシェルター性能の関係

密閉型ストーブを使用した場合は、気密性能が $\alpha A = 2.24 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ より悪いとき（条件H, K, L以外）は、ほとんど結露しない。また、鹿児島では $\alpha A = 0.71 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ 以下で特に結露が多く、条件Lでは、 $0.58 [\ell/\text{日}]$ になる。この原因は鹿児島の冬季の外気絶対湿度が比較的高い（平均 $4.8 [\text{g}/\text{kg}]$ 、図-1参照）ためと考えられる。

5. 最適なシェルター性能に関する考察

5.1 シェルター性能の評価方法

4章で検討したように、住宅のシェルター性能（断熱・気密性能）が同じでも、地域や暖房器具の種類によっては、結露や空気汚染などの問題を生じる場合と室内環境の改善に大いに役立つ場合がある。したがって、最適なシェルター性能は地域ごとに異なる可能性が高く、画一的な基準では問題を生じやすいと考えられる。そこで、以下ではいくつかの評価項目について地域別にシェルター性能を評価し、それらを総合して最適なシェルター性能の選択を行う。

5.2 暖房負荷の低減とシェルター性能

暖房負荷を $60 [\text{Mcal}/\text{m}^2\text{年}]$ 以下にするために最低限必要なシェルター性能は、札幌、秋田、で断熱材 200mm 、 $\alpha A = 2.24 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ （条件J）、新潟、金沢で断熱材 200mm 、 $\alpha A = 7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ （条件I）または断熱材 100mm （ペアガラス）、 $\alpha A = 2.24 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ （条件G）、仙台、松本で断熱材 100mm （ペアガラス）、 $\alpha A = 7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ （条件F）である。

5.3 暖房時の室内CO₂濃度低減とシェルター性能

開放型ストーブを使用し、暖房時の室内CO₂濃度を $4000 [\text{ppm}]$ 以下とするために最低限必要な断熱性能は、 $\alpha A = 7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ の場合、札幌で断熱材 200mm （条件I）、秋田で断熱材 100mm +ペアガラス（条件F）、仙台、新潟、松本、金沢では、断熱材 50mm +ペアガラス（条件C）である。ただし、仙台、新潟、松本、金沢では、断熱材 200mm 、 $\alpha A = 2.24 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ （条件J）でも可能である。

5.4 冬季の結露水量の低減とシェルター性能

開放型ストーブを使用し、日積算結露水量を $0.5 [\ell/\text{日}]$ 以下にするために必要な断熱性能は、 $\alpha A = 7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ の場合、札幌、松本で断熱材 100mm +ペアガラス（条件F）、仙台、秋田、新潟、金沢が断熱材 50mm +ペアガラス（条件C）である。ただし、札幌以外では断熱材 200mm 、 $\alpha A = 2.24 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ （条件J）でも可能である。

5.5 シェルター性能の総合評価（表-4）

全国26地点について、年間暖房負荷、CO₂濃度、結露水量、年間冷房負荷の4つの要素に関するシェルター性能の評価を表-4に示す。評価方法は、評価の高い順に●、○、△、×の4段階とした。4つの要素がすべて○以上となるシェルター性能の条件は、松本では、F、I、J、新潟、金沢が、I、J、富山がF、I、東京では、C、Fとなる。札幌、秋田などの寒冷地では、暖房負荷の条件を満たすJ、K、Lでは、CO₂濃度と結露が多くなるため、密閉型ストーブを使用する必要がある。また、大阪以西では暖房負荷と冷房負荷をともに満足す

表-4 シェルター性能の総合評価

条件別	A				B				C				D				E				F				G				H				I				J				K				L			
評価指標	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
旭川	×	×	×	○	×	×	×	●	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
根室	×	×	×	○	×	×	×	●	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
札幌	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
室蘭	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
盛岡	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
仙台	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
秋田	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○
新潟	×	×	○	△	×	×	△	○	△	○	○	○	△	○	○	○	×	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○				
福島	×	×	×	○	×	×	×	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○				
宇都宮	×	×	×	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
前橋	×	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
東京	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	△	△	○				
松本	×	×	×	○	×	×	×	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
富山	×	△	△	○	×	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
金沢	×	△	△	○	×	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
静岡	×	○	△	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○				
名古屋	×	○	△	○	△	△	△	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○				
大阪	×	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
米子	×	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
広島	×	○	△	○	△	△	△	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○				
高松	×	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
高知	×	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
福岡	×	○	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
熊本	×	○	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
鹿児島	×	○	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	△	○				
那覇	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○				

評価指標
 1. 年間暖房負荷 [Mcal/m²年] ●: 20以下, ○: 60以下, △: 100以下, ×: 100以上
 2. CO₂濃度 [ppm] ●: 3000以下, ○: 4000以下, △: 5000以下, ×: 5000以上
 3. 結露 [ℓ/日] ●: 0.1以下, ○: 0.5以下, △: 1.0以下, ×: 1.0以上
 4. 年間冷房負荷 [Mcal/m²年] ●: 20以下, ○: 60以下, △: 100以下, ×: 100以上

る条件がないため、夏季の通風を利用した冷房方法などを考慮する必要がある。

6. 結論

(1) 全国26地点の標準気象データを用いて屋外気候の比較を行い、暖房方式や断熱・気密性能を選定する場合に必要と考えられる地域毎の詳細な気候を特性を明らかにした。例えば、秋田や新潟などでは、冬季の風速が速く、日射量が少ないためシェルター性能のグレードを高くする必要があると考えられる。

(2) 気密性能が低い場合、冬季の風速が速い新潟などでは、建ペイ率によって換気回数が大きく異なる。気密性能が高くなると、建ペイ率や地域による換気回数の違いは小さくなり、 $\alpha A = 7.1 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ で0.5回/h、 $\alpha A = 0.4 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ で0.1回/h程度である。

(3) シェルター性能の向上は、冬季の暖房負荷を軽減させ、明け方の室温を上昇させるのに効果的である。しかしながら、夏季の冷房負荷は今回の計算条件の範囲では、シェルター性能が向上しても低下しない。さらに、夜間室温が上昇するなど、夏季の室内温熱環境が悪化する場合もある。

(4) 断熱・気密性能の向上は当然のことながら暖房負荷を低減する。しかしながら、シェルター性能の向上のみを行うことは室内の空気環境の悪化や結露を引き起こす原因となる。例えば高い気密性能を持つ住宅で解放型ストーブを使用する場合には、室内CO₂濃度が5000ppmを越え、窓面での結露水量が1ℓ/日を越えるような室内空気環境が形成される場合があり、このような住宅では、密閉型ストーブを使用するか、強制換気を行う必要がある。

(5) 住宅の室内環境計画にあたっては屋外気象条件の地域特性・住まい方を把握した上でその地方に適した断熱・気密性能及び住宅設備を決定する必要がある。両者のバランスが悪い場合、結露や空気汚染などの問題が発生する可能性が高くなる。

謝辞

標準気象データの使用にあたっては、近藤靖史氏（日建設計）および永村一雄氏（大阪市立大学）の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 江口和雄，他：公営住宅の室内気候実態調査その1，その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和46年11月，昭和47年12月
- 2) 荒谷 登，他：居室の温熱環境の実態その1，その2，日本建築学会計画系論文報告集，No.264，No.265，昭和53年2月，3月
- 3) 村上周三，赤林伸一，他：接近流の気流性状が建物の換気通風に及ぼす影響に関する研究，第9回風工学シンポジウム論文集，1986年12月
- 4) 村上周三，赤林伸一，他：住宅の自然通風に関する実験的研究その1，日本建築学会計画系論文報告集，No.372，昭和62年2月
- 5) 村上周三，赤林伸一：トレーサガス法を利用した住宅の自然通風に関する風洞実験，日本風工学会誌，第33号，昭和62年3月
- 6) 赤林伸一，村上周三，水谷国男，高倉秀一：住宅の換気・通風に関する実験的研究その1，日本建築学会計画系論文報告集，No.456，平成6年2月
- 7) 松尾 陽，横山浩一，石野久彌，川元昭吾：空気調和設備の動的熱負荷計算入門，日本建築設備士協会，昭和55年3月
- 8) 吉野 博，他：住宅設備の性能評価に関する研究，東京大学生産技術研究所報告，第26巻，第3号，昭和52年3月
- 9) 高桑哲男：配水管網の解析と設計，森北出版，1978年8月
- 10) 吉野 博，長谷川房雄，内海康雄：住宅における自然換気量の予測に関する研究 その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和59年10月
- 11) 水谷国男，岩瀬昭雄，赤林伸一：新潟市の中層集合住宅における温熱空気環境に関する調査報告，日本建築学会計画系論文報告集，No.407，1990.1
- 12) 渡辺 要：建築計画原論 Ⅲ，丸善，昭和48年11月
- 13) 宇田川光弘：標準問題の提案 住宅用標準問題，日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジウム資料 昭和60年8月

(1994年2月3日原稿受理，1994年8月25日採用決定)