

①

Numerical Predictions of Thermal Environment in a Heated Room

Masamitsu Kaizuka*

Shizuo Iwamoto**

Synopsis In this paper, numerical prediction methods and examples on thermal environment in a heated room with floor panel heating are presented for cases of steady state condition and periodically steady state condition.

For the case of steady state condition, distributed variables like air velocity, air temperature, surface temperature, mean radiant temperature, vector radiant temperature and thermal comfort indices (PMV and SET*) are predicted combining calculation methods for air velocity of the two equation turbulence model and radiation exchange on wall surfaces.

For the case of the periodically steady state condition, supposing perfect mixing of room air, time dependent variables like air temperature, mean radiant temperature, thermal comfort indices, floor surface temperature and heat flux from heated floor are predicted using a backward implicit differential scheme. Three types of heating systems, i. e., electric floor panel heating, hot water floor panel heating and forced convective heating are compared to illustrate the characteristics of the heating systems.

(Received November 15, 1988)

* Department of Architecture, Faculty of Engineering, Meiji University, Member

** Doctoral Course, Graduate School of Engineering, Meiji University, Student Member

居室内の流れ場と温熱環境

貝塚正光*
岩本静男**

キーワード：数値予測(Numerical Prediction), 室内気流分布(Room Air Distribution), 熱環境(Thermal Environment), 温冷感指標(Thermal Comfort Indexes), 住宅暖房(Residential Heating), 床暖房(Floor Panel Heating), 強制対流暖房(Forced Convective Heating), 間欠暖房(Periodic Heating)

本稿では、住宅の床暖房室内の熱環境の空間的分布と時間的変動に対する数値予測例に基づいて、コンピュータによる室内熱環境の数値予測法について解説する。

定常モデルでは、乱流の2方程式モデルの差分法と隔壁での熱放射授受の計算とを連成し、気流・気温・放射・温冷感指標の分布を数値予測している。

周期定常モデルでは、完全混合を仮定して流れの計算をせずに、電気式と温水式の床暖房、および強制対流暖房を想定し、気温・平均放射温度・温冷感指標などの時間的変動を、後退差分法を用いて数値予測している。

はじめに

近年のコンピュータの発達と普及、研究の蓄積、はん(汎)用プログラムの公開などにより、1時間ごとの気象データを用いた1年間の動的熱負荷計算やエネルギーシミュレーションなどは、日常的な技術として比較的容易に利用できるようになってきた。

しかし、室内環境の空間分布をも予測しようとする問題は一挙に複雑になり、いかに高速なスーパーコンピュータをもってしても年間におたるシミュレーションなどはとてもおぼつかなくなる。それは、熱環境の空間分布の主たる要因となる空気の流れ場を解く必要が生じ

るからである。流れ場を解くには、室内をできるだけ細かなセル(体積要素)に分割し、セルに応じた細かな時間差分間隔で、各セルの流速・圧力・温度・濃度・乱流量などに関する連立方程式を反復的に解かなければならない。セル数は、 10^3 程度でもそれらしい解が得られないわけではないが、誤差が大きく、 100^3 程度が当面の目標と思われ、スーパーコンピュータでも定常解を得るのに少なくとも数時間以上の計算を要することになるのが現状であろう。

そこで、本稿では、流れ場を含めた熱環境の空間分布については定常状態に対する予測例(セル数 24^3)、熱環境の時間変動については完全混合を仮定して流れ場の計算をせずに、放射場の空間分布のみを考慮した間欠暖房の周期定常に対する予測例について述べる。

なお、これらの予測例の一部は、文献(2)~(8)などに著者らがすでに報告したものと重複することをお断りする。

1. 計算対象室と計算条件

図-1に示すような、独立住宅の居間を想定した $6.4 \times 4.8 \times 2.4$ mの室内を計算の対象とする。正面と左側壁体は外気に接し、テラス窓と腰窓がある。右側と手前壁体および天井は隣室に接し、床は床下空間に接している。壁体は厚150 mmのコンクリート、外壁と床は厚50 mmの内断熱、窓は厚3 mmの単層板ガラスとする。この室の断熱の程度は、関東・関西地方で一般的なものであろう。

熱放射は、完全拡散面を仮定した壁体表面間の長波の

* 明治大学工学部建築学科 正会員

** 明治大学大学院工学研究科博士後期課程 学生会員

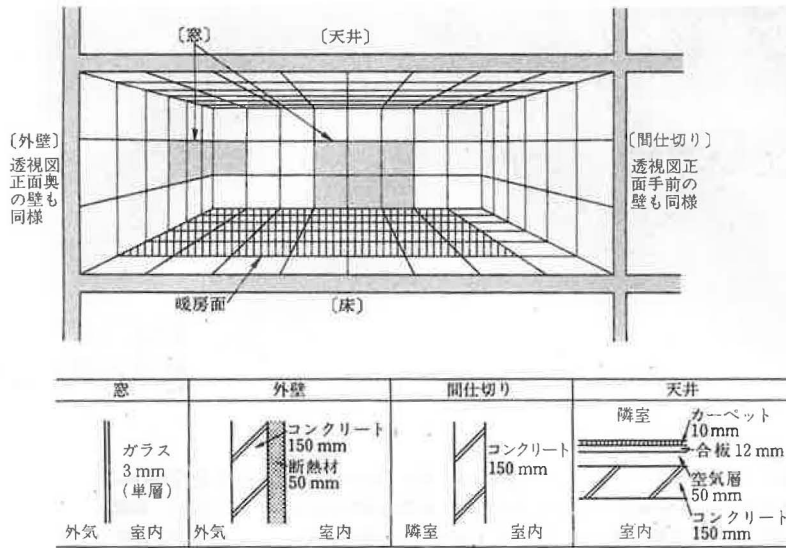


図-1 計算対象室



図-2 定常モデルの計算手順

みの相互放射を考慮する。窓面からの日射などの短波をも考慮に入れることは比較的容易と思われるが、完全拡散面ではなく鏡面反射をも考慮するには、かなり複雑な算法を組み込む必要がある。壁体内の熱伝導は、垂直方向の一次元熱流を仮定しているが、隅角部の3次元熱流やサッシ回りの熱橋なども考慮するには、適切な単純化が必要となる。

室内表面温度分布計算のために、図-1に示すように、 $0.8 \times 0.8 \text{ m}$ の正方形面素180個に分割し、その面素ごとに、放射・対流・伝導による熱収支の計算から表面温度を算出する。床暖房をする部分は、間仕切り壁に接する面素を除いた床面とする。外気温は常に 0°C とし、壁体構成材料の熱的物性値、壁体外側の表面総合熱伝達率などは所与のものとする。

2. 定常の流れ場と温熱環境の予測

2.1 計算条件

定常モデルでは、上述の条件に加えて、隣室気温 15°C 、床下気温 10°C 、床暖房表面温度 32.5°C の定常状態を仮定する。なお、床暖房表面温度は、高すぎるとかえって不快となり、通常 30°C 以下が望ましいとされている。 32.5°C と設定したのは、完全混合を仮定した計算で、温冷感指標のPMVがほぼ0(中立)となったためである²⁾。もちろん、この室の保温性を良くすれば、PMVを0とするような床表面温度はもっと低くなる。また、足裏などの接触温度を評価に加えることも検討の必要があろう。

2.2 計算方法

室内空間を $0.27 \times 0.2 \times 0.1 \text{ m}$ の直方体セル 24^3 個に分

割し、図-2の流れ図に示すように、つぎのような計算法を組み合わせ用いる。

(1) 流れ場

非等温乱流の $k-\epsilon$ モデルを基礎方程式とし、スタガード格子を用いてコントロールボリューム法で差分化し、共役こう(勾)配法による定常解法^{9),10)}を適用する。温度と乱流量 k, ϵ などのスカラー量の移流項のみには数値粘性誤差はあるが、計算安定性の良い風上差分を用い、他はすべて中心差分を用いる。この計算法は、流れ場の計算法として代表的な方法の一つであるが、つぎのような難点も懸念される⁹⁾。

- 1) 乱流の $k-\epsilon$ モデルは、十分発達した等方的な乱流の特性から組み立てられており、自然対流の床暖房室内は、必ずしも全域にわたってこの条件が満たされない。
- 2) 室内の壁面境界層を的確に予測するようなはん用性の高い境界条件がまだ開発途上にある^{11),12)}。特に自然対流の床暖房室内の流れ場や対流熱伝達は、このことに強く支配されるので重要である。
- 3) 自然対流の計算は、強制対流の場合に比べて収束が遅く、多大な計算時間を要する。その分、セル分割数を少なくせざるを得ない。

これらの難点を克服するための各種の研究が各方面で進みつつあるが、この計算例ではまだ不十分な点があることに御注意願いたい。

(2) 室内表面温度

前述した180個の面素の表面温度を未知とし、表面での対流・放射・伝導による熱流の収支から表面温度を算出する¹³⁾。放射授受の計算のために、山崎ら¹⁴⁾の算法

を用いて各面素間の面々形態係数を算出し、次いでこの形態係数と各面素の放射率を用いて Gebhart¹⁵⁾の吸収係数を連立一次方程式を解いて算出する。ある面素での差引き正味の放射熱流は、この吸収係数と表面温度の関数として表される。対流熱流は、その面素の表面温度と面素に接するセル中心の気温と乱流熱拡散係数で表され、セル中心の値は上述の流れ場の計算から与えられる。伝導熱流は、その面素の表面温度と壁体外側気温・および面素表面から外側空気までの熱抵抗で表され、外側気温と熱抵抗は前述のように設定されている。

これらの収支式は、放射熱流が表面絶対温度の4乗に比例することから、各面素の表面温度に関する連立4次方程式となり、これをニュートン法などで反復的に解くことになる¹³⁾。本計算例では、計算の負担を軽減するために、温度係数を用いて線形化し、表面温度に関する連立一次方程式をLU分解法で直接的に解いている。

(3) 平均放射温度とベクトル放射温度

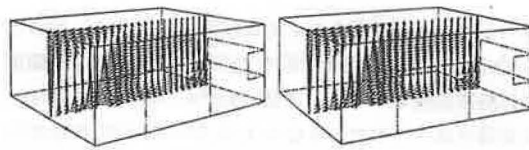
室内空間の放射場の分布を把握するために、中村¹⁶⁾によって提唱された平均放射温度とベクトル放射温度を計算する。そのために、各セル中心に微小立方体を想定し、その6面に対する平均放射温度を算出する。これは、微小面に室内表面から入射する熱流と等しくなるような黒体放射の温度であり、各面素の表面温度・放射率・吸収係数、および微小面に対する形態係数から求められる。6面に対する平均放射温度を平均したものをその点における平均放射温度とし、室内表面からその点への放射熱流を表す指標となる。また、微小立方体の平均放射温度の方向別の差を成分とするようなベクトルがベクトル放射温度であり、放射場の向きを表す指標となる。

(4) 温冷感指標

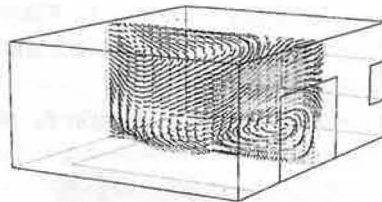
温冷感指標の代表的なものとして、Fanger¹⁹⁾によるPMV(Predicted Mean Vote: 予測平均申告)と、Gaggeら¹⁹⁾によるSET*(New Standard Effective Temperature: 新標準有効温度)の分布を算出する。PMVは感覚尺度で、SET*は標準状態の室温で温冷感を表すものであり、いずれも気温・平均放射温度・気流速度・湿度・着衣量・代謝熱量の6変数の関数として表される。

ここでは、着衣量1 clo(背広姿程度)、代謝熱量1 met(椅子座安静)、水蒸気圧7 mmHg(20°Cで約40%)で一樣に設定する。水蒸気量の分布をも考慮する場合には、温度と同様な移流拡散方程式を組み込むことも可能であるが、室内での水蒸気圧は比較的一様になりやすいこと、暖房時の温冷感への影響が小さいことなどから一樣と仮定している。

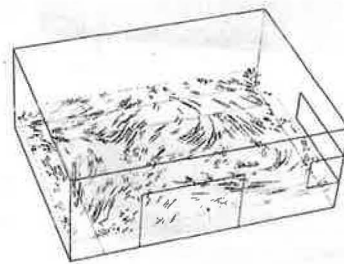
気温と気流速度は、流れ場の計算から得られたものを



(a) ベクトルの立体視(左眼で左図、右眼で右図を見ると立体像が見える)



(b) マーカの飛跡(断面上に等間隔に配置したマーカの飛跡)



(c) トレーサの光幕イメージ(ランダムに散布したマーカがスリット状の光幕を通過した像)

図-3 気流分布

用いる。人体に対する平均放射温度は、微小立方体の各面に適切な重み係数を乗じて、人体に対する形態係数を近似する中村¹⁶⁾の方法を用いて算出する。人体の向きを横方向に平均した場合は、椅子座に対しては約1:1:2、立位に対しては約1:1:10の微小立方体で人体に対する平均放射温度を近似することに相当する。

2.3 計算結果と検討

(1) 気流分布

図-3に、気流分布を(a)ベクトルの立体視、(b)マーカの飛跡*、(c)トレーサの光幕イメージ*などで示す。かなり複雑な流れとなるが、全体的には床中央付近から上昇し、周壁から下降している。このような3次元的な複雑な流れを上手に表現することは容易ではないが、コンピュータグラフィックスなどの対象として興味あるテーマであり、各種の表現法の開発が期待される。

(2) 気温分布

図-4に、気温分布*を示す。各壁体面に接する部分を除けば気温はほぼ一樣となるが、気温の高い部分がきのこ雲状に広がり、窓面や周壁から冷気が下降して床面に

* 図-3(b), (c)、図-4は、大形計算機による計算結果を用い、佐藤正章氏[鹿島建設(株)]が開発した算法に基づいて、NEC PC-98 XLで作成したものである。

侵入している様子が見える。

図-5に、壁体表面温度分布を示す。32.5°Cの床暖房面以外は気温より低く、窓面は約6°C、壁面は約20°C、天井面は床からの放射を反映して22~20°Cの同心円状の分布となっている。

(3) 平均放射温度とベクトル放射温度

図-6に、平均放射温度の分布を示す。床面付近で高く、窓面付近で低くなっている状況がよく理解されよう。

図-7に、ベクトル放射温度の分布を示す。床面から

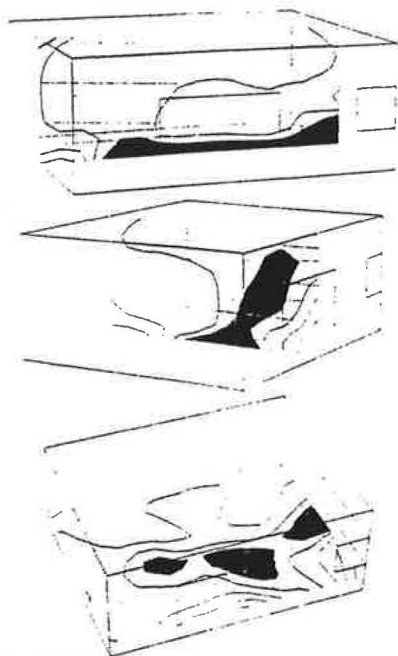


図-4 気温分布(室内平均気温約 23°C)

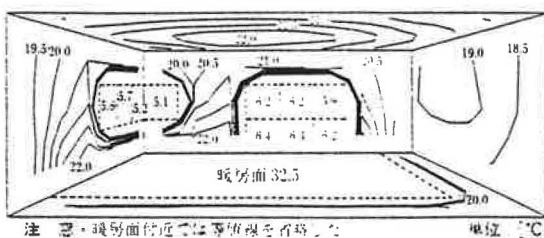


図-5 壁体表面温度分布

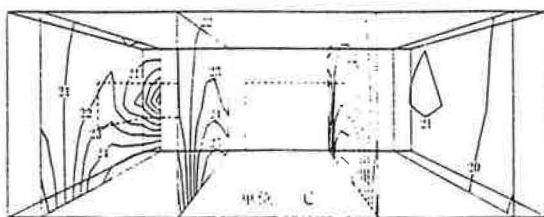


図-6 平均放射温度分布(元小立方体)

の放射が周壁に向かい、特に窓面へ流出していることがわかる。

(4) 温冷感指標

図-8,9に、床上0.6mの椅座位に対するPMVとSET*の分布を示す。両者の分布の形状はほぼ同様であり、中央で高く、窓面付近で低くなっている。PMVの値は、-0.5("中立0"と"やや涼しい-1"の中間)程度となっている。

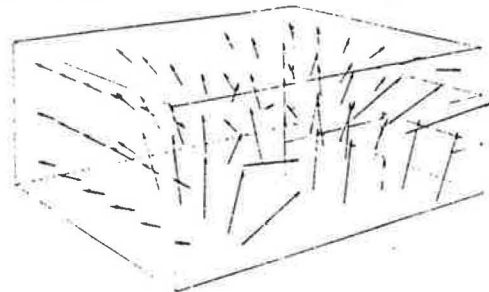


図-7 ベクトル放射温度分布

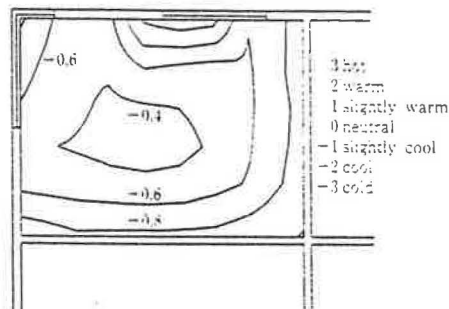


図-8 PMV 分布(椅座位)

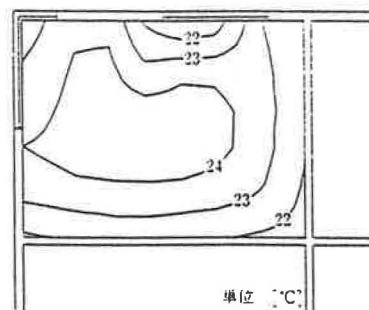


図-9 SET* 分布(椅座位)

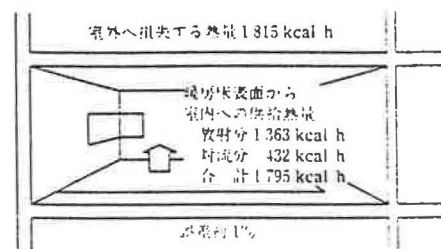


図-10 熱収支の計算結果

(5) 熱収支

暖房床表面から室内への供給熱量の対流分と放射分、および周壁からの室外への損失熱量を上述の計算結果から逆算した結果を図-10に示す。両者の差は1%程度であり、十分収束した解と見なせよう。しかし、放射分比べて対流分がかなり小さくなっており、対流熱伝達率を逆算すると、 $432 / (32.5 - 23.0) / (5.6 \times 4.0) = 2.0 \text{ kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ となってしまふ。通常、このような状況での対流熱伝達率は、 $4 \text{ kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 程度とされる¹⁷⁾ので、対流分が半分程度に評価されていることになる。この原因は、前述したように、流れ場の計算における境界条件もしくは差分間隔の不適切さにあると想像され、この計算例の不十分さを示すものと考えられる。もし、対流分が適切に評価されれば、気温と周壁温は上述の計算結果より高くなり、温冷感指標も上昇し、PMVはほぼ"中立"となる²⁾。

3. 周期定常の熱環境の予測

3.1 計算条件

周期定常モデルでは、1.の条件に加えて、室内空気の完全混合(瞬時一様拡散)を仮定し、気流と気温は一様と見なす。運転時間は、5~8, 11~13, 15~21時の間欠暖房の周期定常状態を想定する。外気温は、前述のように常に0°Cとし、隣室と床下の気温は、室内外気温差に対する温度差割合をそれぞれ0.7と0.4として設定する。

定常モデルでは考慮しなかった換気回数と室内熱容量を0.1回/h, 4.5 kcal/m³・°Cとする。また、定常モデルでは、未知として流れ場の計算から算出した室内側表面对流熱伝達率を既知として、熱流方向と暖房方式別に設定する。

3.2 暖房方式のモデル化

暖房方式としては、面状発熱体による電熱式床暖房、温水配管による床暖房、および空気加熱による強制対流暖房をつぎのようにモデル化し、運転時間中に居住域平均のPMVが、0.1を超えるとOFF、-0.1より下がるとONとなるような簡単な制御がなされるものとする。

(1) 電熱式床暖房

図-11に示すように、床仕上げ合板の下に面状発熱体

を設け、その下は、断熱材・コンクリートスラブ・床下空間とする。他にも各種の床構成が考えられ、検討の必要があるが、この例は、発熱の影響が比較的速く床表面に現れやすいタイプである。発熱は一様なものとし、延べ床面積あたり200 kcal/m²・h(合計6144 kcal/h、発熱面積あたり274 kcal/m²・h)をON-OFFすることとする。

(2) 温水式床暖房

図-11に示すような温水配管による床暖房パネルを、温水温度一様で温水容積の等しい温水層としてモデル化し、床暖房面素の一次元熱伝導計算に組み込む。入水温度を80°Cとし、流量5 l/minをON-OFFするものとする。出口温度は、温水層の熱収支から算定し、温水層の温度は入口・出口温度の平均値とする。暖房熱量は、入口・出口温度差、流量、および容積比熱を乗じて算定する。

温水が床全面にわたって流れるような場合には、このような近似が可能であるが、配管ピッチが広くなれば、2次元熱流が生じ、放熱量が減少する。この減少率は、熱交換器などのフィン効率に相当する²⁰⁾。このフィン効率は、床の構成条件などでも異なり、床暖房パネル固有の値として近似できそうもない。そこで、図-12に示すように、温水配管回りの定常熱伝導計算を差分法で実行し、フィン効率を算出したところ、上向きと下向きの熱流に対してそれぞれ0.5と0.8程度となった。このフィン効率は、定常状態に対するもので、非定常ではやや異なるかもしれないが、ここではとりあえずフィン効率を一定なものとして非定常計算に組み込むこととする。すなわち、温水配管からの伝導による床表面および床下空気への熱流を、温水層を仮定した一次元熱流にそれぞれ0.5および0.8を乗じて算定する。

電熱式の場合には、暖房開始とともに発熱量が一定になると考えられるが、温水式の場合の発熱量は配管周囲の温度に依存するので、このようなモデル化によってその時間変動や積算値を算出し、特性を把握しようとするわけである。

(3) 強制対流暖房

上述の床暖房との比較のために、室内空気の直接加熱

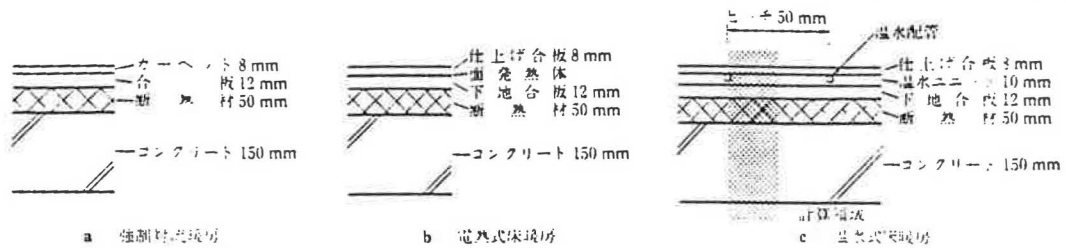


図-11 各暖房方式の床構成

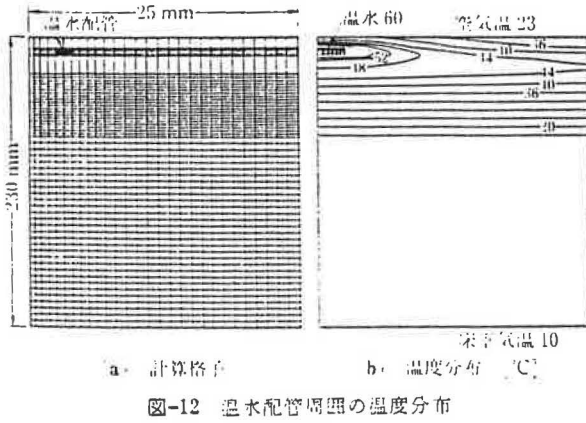


図-12 温水配管周囲の温度分布

あるいは温風の送風によって、電熱式床暖房の発熱量と同じ 6144 kcal/h (延べ床面積あたり $200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$) を室内空気に ON-OFF で投入するような強制対流暖房を想定する。

実際の空気暖房では、床暖房に比べて、気流や温度の分布が大きくなるが、ここでは完全混合を仮定しているため、扇風機などで室内空気が十分かくはん(攪拌)されているような状況を想定していることになる。

(4) 熱源容量

定常状態に対する強制対流暖房の計算結果²⁾では、PMV が 0 (中立) となる場合の供給熱流は、延べ床面積あたり $84.3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ (2590 kcal/h) であった。本例の間欠暖房に対して、 $150, 175, 200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ の場合について計算をしたところ、 $200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ (6144 kcal/h) の場合の予熱時間が 1 時間程度となったので、電熱式床暖房についてもこの発熱量の場合について例示するわけである。温水暖房の入口温度も $60, 70, 80^\circ\text{C}$ の場合について計算したが、 60°C では PMV が 0 以上にならないので、最も立上りの速い 80°C の場合について例示する。

3.3 計算方法

以上のような条件に対して、以下のような計算法を組み合わせ、図-13 の流れ図に示すような手順で時間差分間隔を 0.02 時間として周期定常に至るまで数値計算を行う。

(1) 室温

室温は、各面素からの対流熱量と室空気および家具などの熱容量への蓄熱量との収支(強制対流暖房では供給熱量も加わる)からなる微分方程式を、後退差分で近似して、面素表面温度と一時点前の室温の関数として表す。

(2) 室内表面温度

各面素の室内表面温度は、定常モデルと同様に、各面素との放射授受、室空気との対流および壁体内熱伝導の収支から表される。放射分は、前述のように線形化して面素表面温度の関数となり、対流分は、対流熱伝達率を

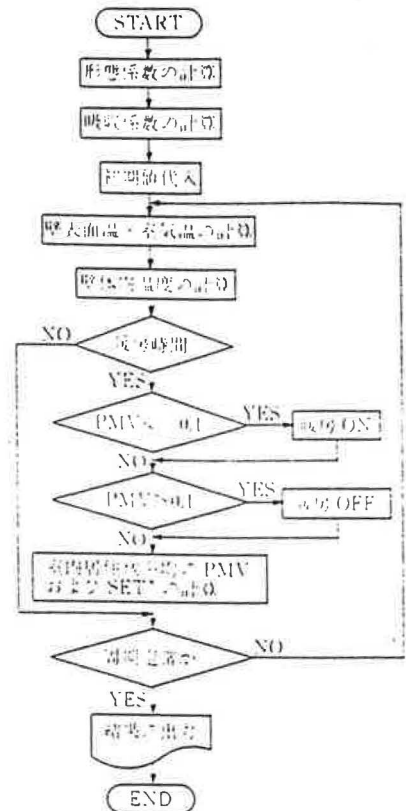


図-13 非定常モデルの計算手順

既知としているので、面素表面温度と室温の関数となる。

(3) 壁体内熱伝導

各面素の壁体構成材の各層を数点に分割し、一次元熱伝導の偏微分方程式をコントロールボリューム法と後退差分法で近似する^{21)~23)}。3重対角行列算法 TDMA (Tri Diagonal Matrix Algorithm) を適用すると、各分割点の温度は一時点前の温度を既知とすれば、表面温度と室温および外気温または隣室温の関数として表される。外気温は所与のものとし、隣室温は温度差割合を用いれば、室温の関数として表せる。また、表面での伝導熱流は、表面温度と第一分割点との温度こう配から算定できるので、表面温度と室温の関数となる。

以上、(1)~(3)の定式化により、室温と各面素の表面温度を未知数とする連立一次方程式が構成されるので、LU 分解法を用いて直接的に解くことができる。このようにして、時間ステップごとのすべての未知数が順次算出される。

(4) 温冷感指標

PMV と SET* は、本来、定常状態に対するものであるが、非定常状態に対する温冷感指標が確立されていないので、瞬時定常を仮定して、各時間ステップごとに、前述の定常モデルの場合と同様に算出し、居住域で平均した値を代表値として評価することにする。

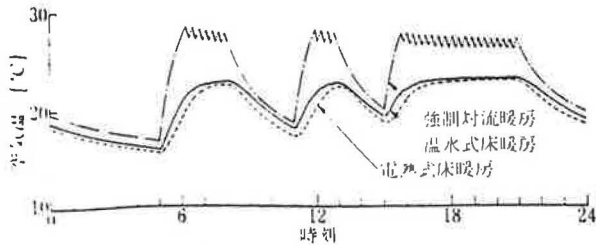


図-14 室温の変動

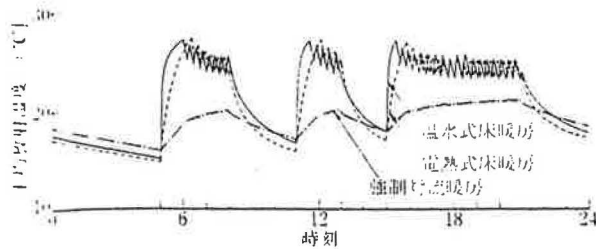


図-15 平均放射温度の変動(椅座位の居住域平均)

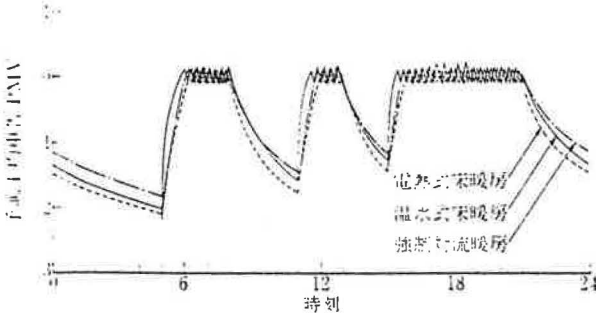


図-16 PMVの変動(椅座位の居住域平均)

3.4 計算結果と検討

(1) 室温

図-14に、3種の暖房方式別に室温の24時間周期定常の変動を示す。強制対流暖房では、運転開始後1時間程度でON-OFF制御の影響が直接現れ、27°C前後の高い水準となる。床暖房では、ON-OFF制御の影響が床仕上げ材を通して間接的に現れるので室温の変動は緩やかとなり、23°C以下の低い水準となる。温水式床暖房のほうが電熱式床暖房より運転開始時に放熱量が多いので、1~2°C高くなっている。

(2) 平均放射温度

図-15に、平均放射温度の変動(椅座位の居住域平均)を示す。気温とは逆に、床暖房ではON-OFF制御の影響が直接的に現れ、25°C前後の高い水準となる。強制対流暖房では、ON-OFFの影響が間接的で変動が緩やかとなり、21°C以下の低い水準となる。

(3) 温冷感指標

図-16, 17に、PMVとSET*の変動(椅座位の居住域平均)を示す。PMVは、±0.1の範囲に制御されるはずであるが、差分計算の時間間隔(0.02時間)のために、多少オーバーシュートやアンダシュートが生じている。SET*では、強制対流暖房が2°Cほど低くなっているが、

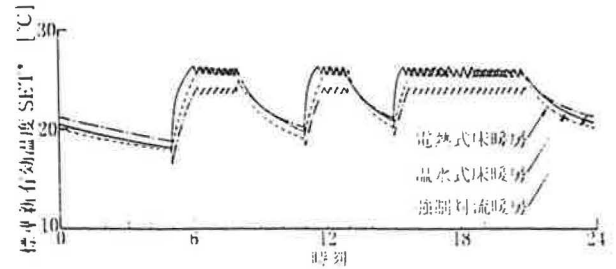


図-17 SET*の変動(椅座位の居住域平均)

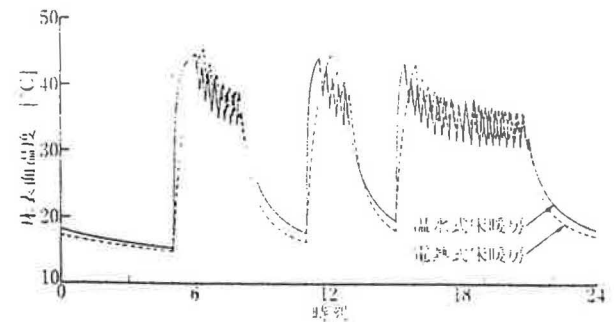


図-18 床表面温度の変動(床暖房部分の平均)

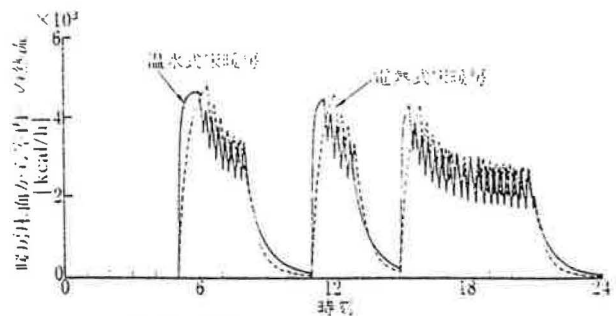


図-19 暖房床面から室内への熱流の変動

これは二つの温冷感指標で、蒸せつ(泄)・対流・放射などの熱損失の扱い方がやや異なることによるものと思われる。

夜間の非暖房時には、室温・平均放射温度・SET*ともに1°C、PMVで0.2程度、強制対流暖房のほうが床暖房より高くなっている。これは、強制対流暖房時の室温が高く、室内熱容量の蓄熱量が床暖房より大きいためと思われる。

(4) 床表面温度

図-18に、床暖房の床表面温度の変動(床暖房部分の平均)を示す。暖房時は、電熱式も温水式も30~45°Cとなってしまう、前述したように快適性の面から高すぎるし、接触温度による低温やけど(火傷)を考えると危険ですらある。

床表面を下げるために、以下の対策が必要となろう。

- 1) 暖房負荷を小さくする。
- 2) 床暖房面積を大きくする。
- 3) 室の保温性を高める。
- 4) 暖房運転時間を長くする。
- 5) 他の暖房方式と併用する。

6) PMVの水準を下げる。

(5) 床面から室内への熱流

図-19に、電熱式床暖房と温水式床暖房の場合の暖房床面から室内への熱流の変動を示す。温水式と電熱式で同程度となるが、暖房開始時には、温水式のほうが立ち上がりが速くなる。これは、温水入口温度を常に80°Cと仮定しているためで、現実には、ボイラ容量に制約され、温水入口温度が下がり、図-14~19に見られるような立ち上りの差はもっと小さくなるであろう。

熱源からの供給熱流と上述の床面熱流の1日積算値[kcal/d]は、つぎのようであった。

- 1) 電熱式床暖房：44 610(床面からの熱量 37 660)
- 2) 温水式床暖房：45 570(床面からの熱量 38 720)
- 3) 強制対流暖房：41 660

このような計算結果から暖房効率の比較ができるが、立ち上がり時間・熱源容量・制御方法などについての系統的な解析も必要と思われるので、今後の課題としたい。

おわりに

定常モデルでは、床暖房室内の流れ場と温熱環境の空間分布の予測例を示したが、さらに検討すべき課題として以下のような項目が挙げられる。

- 1) 流れ場の計算法：非等温で層流・乱流が混在するような流れ場に対する基礎方程式、適切な壁面境界条件、高速で安定な数値計算法、誤差評価法、不整形境界への適用
- 2) 放射場の計算法：日射や鏡面反射の計算、家具などの障害物を含めた計算法
- 3) 温冷感指標：熱環境の空間的分布、接触温感、非定常温冷感などの評価法
- 4) 予測結果の表現法：コンピュータグラフィックス・アニメーション・ホログラフィ

周期定常モデルについては、完全混合を仮定し、対流熱伝達率を既知とする点に限界はあるが、暖房室内熱環境の時間変動や暖房方式の特性を的確に予測し得ることを示した。このような計算によって、室内環境の特性を予測し、建築や設備の設計や評価に役立てることが容易となろう。さらには人用性を高めるためには、熱源や搬送設備の特性の組込み、多室問題への拡張なども必要となろう。

最後に、編集委員会から依頼された“室内環境予測の全般的解説”ができなかったことをお詫びするとともに、参考にさせていただいた多くの文献の著者に感謝の意を表します。なお、熱環境全般については、一連の熱シンポジウムテキスト¹⁰⁾に関連する各種の研究成果がよく取りまとめられていること、また、本稿で例示した暖

房室内の熱環境については、水野ら²⁵⁾による数値解析的研究、および木村・井上・田辺ら²⁶⁾による実験的研究などの成果が蓄積されていることを付記させていただきます。

本稿の計算と作図は、東京大学大型計算機センターのHITAC M-680 H, S-820と額額一勉氏(東京大学地震研究所)による端末プログラム Eterm++に負うものであり、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会環境工学委員会編(編)：数値解析の現状と課題、第15回熱環境シンポジウム(昭60-9)
- 2) M. Kaizuka, S. Iwamoto: A Numerical Calculation on the Distribution of Surface Temperature and Thermal Comfort Index caused by Radiation Interaction in a Heated Room, Trans. SHASE, No. 33(Feb., 1987), pp. 103~113
- 3) 貝塚正光・岩本静男：放射授受を含めた非定常暖房室内の熱環境の数値予測——床暖房と強制対流暖房の比較例、空気調和・衛生工学会論文集, No. 38(昭63-8), pp. 67~75
- 4) 岩本静男・貝塚正光：放射授受を含めた非定常室内の熱環境の数値予測——電熱式床暖房、温水式床暖房および強制対流暖房に対する計算例、空気調和・衛生工学会論文集, No. 39(平元-2)
- 5) 貝塚正光・岩本静男：共役勾配法を用いた床暖房室内の空気分布の数値予測、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(昭63-9), pp. 613~616
- 6) 貝塚正光・岩本静男：電熱式と温水式の床暖房による間欠暖房時の熱環境の数値予測、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(昭63-9), pp. 321~324
- 7) 貝塚正光・岩本静男：共役勾配法を用いた床暖房室内の定常熱空気環境の数値予測、日本建築学会大会学術講演梗概集(昭63-10), pp. 769, 770
- 8) 貝塚正光・岩本静男：床暖房と温風暖房による間欠暖房時の熱環境の数値予測、日本建築学会大会学術講演梗概集(昭63-10), pp. 771, 772
- 9) 貝塚正光：室内気流の数値予測、空気調和・衛生工学, 58-3(昭59-3), pp. 13~24
- 10) 松尾陽：NS方程式定常問題の一解法、日本建築学会大会学術講演梗概集(昭61-8), pp. 271, 272
- 11) 倉淵隆・鎌田元康：非等温室内空気分布数値予測法の壁面境界条件に関する研究——垂直加熱平板自然対流に関する検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(昭63-9), pp. 565~568
- 12) 加藤信介・村上周三・永野神一郎：室内気流数値シミュレーションの診断システムに関する研究(第17, 18報)k-εモデルの壁面境界条件の各種タイプの検討(その1), (その2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(昭63-9), pp. 573~580
- 13) 坂本雄三：室内空気分布の数値解法に関する研究、東京大学博士論文(昭52-12)
- 14) 山崎均・真鍋正規：ソーラーコントロールデバイス設計に関する基礎的研究、文部省科学研究費エネルギー特別研究、自然エネルギーの研究、研究発表資料(昭56)
- 15) B. Gebhart: A New Methods for Calculating Radiant Exchanges, ASHRAE Transactions, Vol. 65, No. 1667

(1959), pp. 321~332

16) 中村泰人: 建築都市空間内の人体に対する熱放射の表現法について, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 376(昭62-6), pp. 29~35

17) 渡辺俊行: 室内表面の熱流方向別平均対流熱伝達率と温度差, 日本建築学会編建築設計資料集成1環境(昭53), p. 99, 丸善

18) P. O. Fanger: Thermal Comfort(1972), McGraw-Hill Book Company

19) A. P. Gagge, Y. Nishi, R. G. Nevins: The Role of Clothing in Meeting FEA Energy Conservation Guidelines, ASHRAE Transactions, No. 2417, Part 2(1976), pp. 234~247

20) 宇田川元弘: ノンコンによる空気調和計算法(昭61), ホーム社

21) S. V. Patankar 著, 水谷孝夫・香月正司共訳: コンピューターによる熱移動と流れの数値解析(昭60), 森北出版

22) 宇田川元弘・木村建一: 多数室温変動の实用的計算手法と断熱層の熱的效果の設計, 日本建築学会論文報告集, No. 265(昭53-3), pp. 125~132

23) 松尾陽・井上隆・美野二郎・金沢亮: 結露危険の判定と結露量の算定を含む空調システム・シミュレーション(その1) 後退差分法による壁体内表面温度と室温の算出, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(昭62-10), pp. 153~156

24) 日本建築学会環境工学委員会熱小委員会熱ラジエーションシステム, 人間・熱環境(昭61-8), 大空間建築の熱環境設計(昭62-3), 住宅のバリエーション(昭63-9)

25) 水野玄道・貝塚泰弘: 暖房方式による室内環境の試算結果と評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(昭63-9), pp. 337~340

26) 木村建一・井上宇市・田辺新一・秋本孝之・藤野健治・岩下剛・田宮建司: 低温ふく射暖房・温風暖房・床暖房の快適性とエネルギー消費量に関する研究(その1)エネルギー消費量, (その2)環境試験室における体感実験, (その3)実際の室内における体感実験, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(昭63-9), pp. 325~336

(昭和63. 11. 15 原稿受理)

Numerical Predictions of Thermal Environment in a Heated Room

Masamitsu Kaizuka
Shizuo Iwamoto**

Synopsis In this paper, numerical prediction methods and examples on thermal environment in a heated room with floor panel heating are presented for cases of steady state condition and periodically steady state condition.


For the case of steady state condition, distribute variables like air velocity, air temperature, surface temperature, mean radiant temperature, vector radiant temperature and thermal comfort indices (PM and SET*) are predicted combining calculation methods for air velocity of the two equation turbulence model and radiation exchange on wall surface.

For the case of the periodically steady state condition, supposing perfect mixing of room a time dependent variables like air temperature, mean radiant temperature, thermal comfort indices, floor surface temperature and heat flux from heated floor are predicted using a backward implicit differential scheme. Three types of heating systems, i. e., electric floor panel heating, hot water floor panel heating and forced convective heating are compared to illustrate the characteristics of the heating system.

(Received November 15, 1988)


* Department of Architecture, Faculty of Engineering, Meiji University, Member

** Doctoral Course, Graduate School of Engineering, Meiji University, Student Member



快適空間へ。

最先端テクノロジーを駆使する
「三建設備」のクリーンエンジニアリング



建築環境・産業環境設備
設計・施工

— クリーン環境時代をリードする

三建設備

三建設備工業株式会社

● 本社 〒103 東京都中央区日本橋区本町1-35-3
☎03 56713431

● 支店 札幌・仙台・横浜・名古屋・大阪・東京・神戸

内の熱環境については、本野ら¹⁹⁾による数値解析と、および木村・井上・田辺ら²⁰⁾による実験的研究の結果が蓄積されていることを付記させていただきます。

この計算と検証は、東京大学計算機センターのCM-680 H, S-820 と協成(株)東京型地震研究所による編成プログラムEterm-1によるものであることを記述を表明します。

参考文献

1) 日本建築学会環境学委員会(1992)「建築環境の現状と展望」第15「熱環境学」(巻末)第90号

2) I. Kazuoka, S. Iwamoto: A Numerical Calculation on Distribution of Surface Temperature and Thermal Comfort Index caused by Radiation Interaction in a Heated room, Trans. SHASE, No. 33, Feb., 1957*, pp. 103~113

3) 貞塚正光・岩本静男:放射収受を含めた非定常暖房室内の温度の数値予測——床暖房を想定した暖房の比較例, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 63(巻63-9), pp. 67~73

4) 貞塚正光・貞塚正光:放射収受を含めた非定常暖房室内の温度の数値予測——電熱式床暖房, 温熱式床暖房および強制循環型に対する計算例, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 63(巻63-9), pp. 61~66

5) 貞塚正光・岩本静男:非定常暖房を用いた暖房設備の室内温度の数値予測, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(巻63-9), pp. 613~616

6) 貞塚正光・岩本静男:電熱式と温水式の床暖房による間接換気の熱環境の数値予測, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(巻63-9), pp. 321~324

7) 貞塚正光・岩本静男:非定常暖房を用いた暖房設備内の定常熱環境の数値予測, 日本建築学会大会学術講演要集(巻63-10), pp. 769, 770

8) 貞塚正光・岩本静男:床暖房と温熱環境による間接換気時の温度の数値予測, 日本建築学会大会学術講演要集(巻63-9), pp. 771, 772

9) 貞塚正光:室内気流の数値予測, 空気調和・衛生工学, No. 59-3, pp. 13~24

10) 尾崎: NS 方程式定常問題の一解法, 日本建築学会大会講演要集(巻61-3), pp. 271, 272

11) 斎藤・鎌田:非定常室内空気分布数値予測法の壁面条件に関する研究——垂直自然対流に関する換気空気調和, 衛生工学会学術講演会講演論文集(巻63-9), pp. 55~66

12) 藤谷介・村上潤三・水野伸一郎:室内気流(数値シミュレーション)の診断システムに関する研究(第17, 18 回)k-mエロ型境界条件の各種タイプの検討(その1), (その2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(巻63-9), pp. 33~38

13) 尾崎三:室内空気分布の数値解法に関する研究, 東京大学論文(巻52-12)

14) 尾崎三・貞塚正光:「ニューコントロールシステム」設計の基礎的研究, 京都府科学振興費プロジェクト特別研究(ニューコントロール)研究, 研究報告(巻47)第3号

15) Zehbart: A New Method for Calculating Radiant Angles, ASHRAE Transactions, Vol. 65, No. 1667

(1959), pp. 321~332

16) 貞塚正光:建築都市環境内の人体に対する熱放射の長波長に於いて, 日本建築学会計画系論文報告書, No. 37(巻61-65), pp. 29~35

17) 貞塚正光:室内表面の熱流方向と人体の熱感とを主要な, 日本建築学会論文集(計画系)巻61(巻61-65), p. 29, 丸善

18) P.O. Fanger: Thermal Comfort(1972), McGraw-Hill Book Company

19) A.P. Gagge, T. Nishi, R.G. Novince: The Role of Clothing in Meeting FEA Energy Conservation Guidelines, ASHRAE Transactions, No. 241, Part 2, 1976, pp. 244~247

20) 宇田川忠雄・中野正司による空気調和計算法(巻61), 東京大学出版

21) S.V. Patankar 著, 水谷清典・西川正典訳:コンピュータによる熱流動と放射の数値解析(巻60), 技報堂出版

22) 宇田川忠雄・中野正司:多数変数温度場の非定常計算手法と放射熱の非定常計算の検討, 日本建築学会論文報告書, No. 268(巻61-65), pp. 125~132

23) 尾崎三・尾崎潤・尾崎二郎・金成浩:放射熱伝達の問題と非定常熱伝達を含む問題の解法, コンピュータ・グラフィック, 後援会による非定常熱伝達と放射の問題の解法, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(巻63-10), pp. 153~156

24) 日本建築学会環境工学委員会熱気委員会編:ニューコントロールシステム, 大里・熱環境(巻91-8), 大空間建築の熱環境設計(巻91-8), 大里(巻91-8), コンピュータグラフィック(巻91-8)

25) 水野伸一郎・尾崎三:暖房方式による室内環境の数値解析と評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(巻63-9), pp. 337~340

26) 水村建一・村上潤三・田辺新一・坂本孝之・藤野純治・菅下剛・宮田建司・松尾久・神尾勇・温熱暖房・床暖房の快適性とエネルギー消費量に関する研究(その1)エネルギー消費量(その2)可変空気量における体感実験(その3)実験の室内における体感実験, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(巻63-9), pp. 325~336

(昭和63, 11, 15 原稿受理)

Numerical Predictions of Thermal Environment in a Heated Room

Masamitsu Kazuoka*
Shizuo Iwamoto**

Synopsis In this paper, numerical prediction methods and examples on thermal environment in a heated room with floor panel heating are presented for cases of steady state condition and periodically steady state condition.

For the case of steady state condition, distributed variables like air velocity, air temperature, surface temperature, mean radiant temperature, vector radiant temperature and thermal comfort indexes (PMV and SET)* are predicted combining calculation methods for air velocity of the two equation turbulence model and radiation exchange on wall surfaces.

For the case of the periodically steady state condition, supposing perfect mixing of room air, time dependent variables like air temperature, mean radiant temperature, thermal comfort indexes, floor surface temperature and heat flux from heated floor are predicted using a backward implicit differential scheme. Three types of heating systems, i.e., electric floor panel heating, hot water floor panel heating and forced convective heating are compared to illustrate the characteristics of the heating systems.

Received November 15, 1988

* Department of Architecture, Faculty of Engineering, Meiji University, Member
** Doctoral Course, Graduate School of Engineering, Meiji University, Student Member

SANKEN
Environmental Control Systems

建築環境・産業環境設備
設計・施工

— クリーン環境時代をリードする —

三建設備

三建設備工業株式会社

● 本社 〒03 東京都中央区日本橋区本町1-15-3
03 567 1431
● 支店 札幌市中央区南一条西5丁目1-1

快適空間へ。

最先端テクノロジーを駆使する
「三建設備」のクリーンエンジニアリング