

UDC : 681.5.017 : 628.8.02

2. 温熱環境シミュレーション技術および 人体快適性評価技術の開発

Numerical Simulation Technology for Thermal Environment and Thermal Comfort Evaluation.

齊藤恒洋*・尾関義一*
Tsunehiro Saito and Yoshiichi Ozeki

ガラスを多用した建築空間、居住空間や、自動車室内空間の温熱環境を、コンピュータを使用した数値シミュレーションにより予測する技術に関して概説する。さらに、空間内で人体が感じる温熱快適性を評価するための数値シミュレーションモデルの開発、新商品開発への適用について説明する。温熱環境シミュレーション技術を構成する、日射、長波長（赤外線）放射、気流シミュレーションについて述べ、放射と気流の連成シミュレーションについて解説する。さらに、温熱環境シミュレーション技術の精度を検証するために行った実験用アトリウムでの測定結果との対比、実際の建築物への適用例として大規模ガラスアトリウムへの適用例を紹介する。後半では、自動車用温熱環境シミュレーション技術の概要と、人体に対する部位別の熱負荷を考慮した人体快適性評価モデルについて説明し、実車への適用例と自動車用ガラスの新商品開発への適用について紹介する。

This report describes a schematic summary of numerical simulation technologies predicting thermal environment inside of buildings with glass facades, and indoor climate of vehicle cabins. The development of numerical simulation models to evaluate thermal comfort of human body as well as applications for new product design is explained. The first part of this report describes component technologies consisting of thermal environment simulations, including analysis of solar radiation, infra-red thermal radiation, air flow simulation, and comprehensive combination of those technologies. Additionally, comparison of simulation models with measurements from an experimental atrium is shown to verify accuracy of the simulation models. Furthermore, as applications to the real world constructions, results of analysis by those models applied to large scale atrium buildings are demonstrated. The last part of this report includes a schematic summary of automotive indoor thermal environment simulation technologies, and description of human comfort evaluation models which considers thermo-regulation of each human body part. Moreover, some examples of those technologies applied to vehicles, as well as product development of new functional glass for automobiles are presented.

*新事業推進センター 統括主幹 (E-mail : tsunehiro-saito@agc.co.jp)

*新事業推進センター 主席 (E-mail : yoshiichi-ozeki@agc.co.jp)

New Business Development & Promotion Center

1. はじめに

ガラスを多用した建築空間、居住空間や、自動車室内空間の温熱環境を、コンピュータを使用した数値シミュレーションにより予測する技術に関して概説する。さらに、空間内で人体が感じる温熱快適性を評価するための数値シミュレーションモデルの開発、新商品開発への適用について説明する。

近年、地球温暖化の問題や、化石燃料の枯渇や高騰に伴い、省エネルギーを実現する技術への関心が非常に高まりつつある。ガラスを多用した空間では、自然光を透過させることにより、人間にとって快適な空間を形成することができる。温熱環境の面では、必要最小限のエネルギーで快適な温熱環境を実現できる設計・計画を行うことが重要な課題である。ガラスを透過した日射エネルギーによる過剰な温室化は、過大な冷房負荷を必要とする。このため、ガラスを多用した空間の温熱環境を予測し、必要最小限のエネルギーで人間にとって快適な温熱環境を設計するツールとして、温熱環境シミュレーション技術および人体快適性評価技術が注目されるようになった。

本報告では、温熱環境シミュレーション技術および人体快適性評価技術を構成する数値シミュレーションモデルを紹介し、大規模ガラスアトリウム空間や自動車車室空間への適用について説明する。さらに、自動車用ガラスの新商品開発への適用に関して紹介する。

2. ガラスを多用した大空間、居住空間の温熱快適性

アトリウム建築に代表されるガラス被覆を多用した大空間建築物は、1980年代から増加し、大型建築物のエントランスホールやコア空間に配置され、建築物のシンボリック的存在として一般的に広く認知されるようになった。アトリウムと呼ばれる空間建築は、現在は、大規模な建築構造物におけるガラス屋根やガラスファサードに覆われた巨大な吹き抜け空間として一般的に知られているが、元々はヨーロッパや北欧における自然光を採り入れた中庭のような半屋外空間に端を発している。自然採光による居住空間は、人間にとって快適なアメニティ空間を提供するが、反面、日本のような亜熱帯の温暖な気候の下で用いられた場合、夏期に過剰な温室効果を居住空間にもたらす。

アトリウム大空間内は、夏期日中時には、温度成層と呼ばれる気流の状態が空間内に形成される。すなわち、温度の高い空気がアトリウムの上部空間に停滞し、これに伴って低温側の気流が下部空間に流れ込み冷気溜まりを形成した状態で安定する。この状態で、アトリウム全体を冷房空調することは大変難しい上に、多大のエネルギーコストを必要とするが、逆にこの温度成層を積極的に活用し、アトリウ

ム内の居住空間や活動空間をアトリウム下部に設け、その部分のみを冷房空調するように設計すると大変低い冷房負荷で効果的な室内温度分布が得られる。このためには、アトリウム建築の設計時に、アトリウム内の温熱環境を年間の空調負荷を考慮しながら事前に予測する技術が必要となる。元々北欧のような寒冷地で使用されてきたアトリウムを日本のような温暖な気候の下で用いた場合どのような温熱環境となるかを類推するための知見は少なく、何らかの予測技術を必要とした。また、模型実験による事前予測も試みられたが、小型の模型を用いた実験では、夏期日中時の日射熱負荷分布を模型内に再現することは難しく、さらに実物と模型のスケール比が大きいと人間が活動する空間が相対的に模型内で非常に小さくなり測定が困難になる。このため、コンピュータによる温熱環境シミュレーション技術が注目され活用されるようになった。

以下に、温熱環境シミュレーション技術を構成する気流解析技術（CFD（Computational Fluid Dynamics））、日射解析・長波放射解析技術に関して概要を説明する。

2.1 温熱環境シミュレーション技術の概要

アトリウム空間内部の温度・気流性状は、壁面境界、特に壁面から空気に伝達される対流熱伝達量の影響を大きく受ける。この対流熱伝達量は、壁面熱収支を構成する日射取得熱量、長波放射熱伝達量、壁体内部の熱伝導を介して外側に伝達される熱量とのバランスにより定まる（Fig. 1）。従って、空間内部の温度・気流性状を精度良く予測するためには、壁面熱収支を構成する個々の物理量を精度良く予測するのみならず、CFDとこのような物理量を連成して総合的に解析する必要がある。以下、日射解析手法、長波放射解析手法、CFDとの連成手法について説明する⁽¹⁾。

2.2 日射解析

アトリウム空間は透過日射の影響を強く受ける。そのため、CFD解析の精度は、熱源となる日射の熱取得分布が如何に正確に予測されるかに大きく依存している。日射解析は、CFD解析と連成して行う必要はなく独立して行うことができる。日射解析は、アトリウム内外壁表面に到達する直達日射、天空日射、地面及び隣接建物による反射日射、さらに到達日射の内部での相互反射日射を計算し、CFD連成のための壁表面での日射取得熱量を算出する（Fig. 2）。

日射解析では、建物所在位置、計算対象時刻を入力することにより太陽の位置を算出し、これを基に法線面直達日射量、及び水平面天空日射量を経験式により推定する。この法線面直達日射量、水平面天空日射量を基に、ガラスの日射透過率・反射率などの壁体熱性能値、建物の構造部材、庇などの日射遮蔽物及び隣接建物などの幾何学形状を考慮して、各種到達日射量を算出し、これに各壁体表面の日射吸

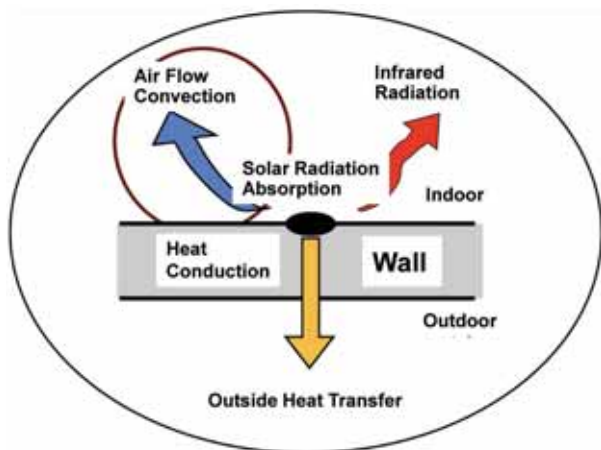


Fig. 1 Thermal energy balance on a wall of an atrium.

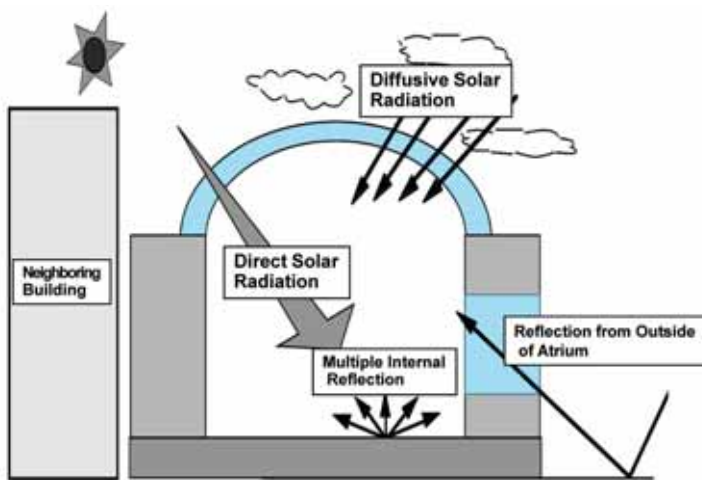


Fig. 2 Schematic diagram of solar radiation absorption in an atrium.

収率を乗じて吸収日射熱量を算出する。なお、ガラスの日射透過率・反射率には入射角度特性がある。すなわち、ガラスに対する入射角度が大きくなると反射成分が増大し、ガラスの日射透過率が減少する。これを考慮しないと入射熱量に大きな誤差が生じる。また、壁体の熱貫流率が比較的小さく、日射が透過しない壁体外壁表面での日射吸収熱量も、室内温度・気流性状の予測結果に無視できない影響を与える場合があり、考慮する必要がある。このようにして算出された日射取得熱量を発熱量として扱うことにより、CFD解析に取り込むことが可能となる。CFD解析に対する日射シミュレーション手法の詳細については文献(1)~(3)を参照されたい。

2.3 長波放射解析

アトリウム空間では温度成層により、天井面温度が高くなり、天井面からの長波放射伝熱が大きくなる。したがって、アトリウム空間の詳細な温熱環境の予測のためには、熱輸送の対流成分・放射成分を正確に取り扱うことが重要となる。長波放射熱伝達量の算出方法としては、ラジオシティ法がある。

これは、放射熱伝達面を灰色体、完全拡散、さらに空気は放射に対し透明であると仮定し、形態係数を基にした放射熱平衡式を構成し、これを反復法で解くことにより長波放射熱伝達量を算出する手法である。ラジオシティ法では、形態係数の計算が計算時間の大部分を占める。このため、形態係数の高速・高精度算出に関する手法の確立が必要である。物理的に矛盾が生じない放射熱伝達シミュレーションを行うためには、算出された形態係数の相反則・総和則の満足度に注意する必要がある。相反則の精度が低下すると、表面温度差が小さい空間では、低温壁から高温壁に熱移動が生じる場合がある。総和則の精度が低下すると、壁面で熱の生成もしくは消失が生じ空間全体の熱収支が合わなくなるなどの矛盾が生じる。なお、形態係数は、対流・放射連成解析の前に予め計算しておく必要がある。放射熱伝達シミュレーションの詳細については文献(3)を参照されたい。

2.4 CFD解析と放射解析の連成

対流・放射の連成解析は、各壁面の表面温度を未知として扱い、これを各壁表面での熱収支式から求めることにより実現することが出来る。壁面での対流熱伝達量の評価では、一般に対流熱伝達率 ac を用いた壁関数が多く用いられる。これは壁直近の流体セル温度と壁表面温度との差及び既知の対流熱伝達率から対流熱伝達量を算出するものである。この対流熱伝達量を算出する際、空気の参照温度の選定方法および対流熱伝達率の算出方法が重要となる。対流熱伝達率の算出には、壁面法線方向温度分布に関する対数則を仮定し予測する方法があるが、対流熱伝達率の予測結果には多少の計算用メッシュの依存性がある。このメッシュ依存性を避けるために、既往の実験値、慣用値により与える方法もあるが、あらゆる状況下で適切な対流熱伝達率を与えることは難しい。さらに、実際のアトリウムの設計等に対し、CFD+2波長放射(日射・長波放射)連成シミュレーションを適用する場合には、上記CFD固有の課題の他に、アトリウムに大量に存在するサッシ及び複雑な構造部材に関する取り扱いにも注意を払う必要がある。このようなサッシ及び構造部材は、CFD+2波長放射(日射・長波放射)連成シミュレーションによりアトリウムの温熱環境を予測する際、決して無視することはできず、その影響及び取り扱いは重要である。CFD解析と長波放射解析との連成についての詳細は、文献(4)~(6)を参照されたい。

2.5 熱的快適性の評価

対流・放射の連成解析により放射場、気流、温度分布が求められるので、PMV, SET*など温熱環境指標の分布を容易に算出することができ、詳細な環境評価が可能となる。ただし、PMV, SET*など温熱環境指標は、均一環境を対象としており、日射の影響

により大きな不均一環境が形成されるアトリウム空間での温熱環境評価には適さない。最近では、不均一環境下での快適性を評価するために、人体を模した形状モデルを居住域の評価位置に組み込み、数値シミュレーションにより人体と周囲空間との形態係数及び、人体に対する日射取得熱量分布を精度良く予測し、人体内部の体温調節モデル、さらには放射・対流連成シミュレーションとの総合連成シミュレーションにより、人体部位別放熱性状及び人体部位別生理量などを評価する手法が用いられる。これらの詳細は、文献(7)を参照されたい。

2.6 温熱環境シミュレーションの精度検証

CFD+2波長放射(日射・長波放射)連成による温熱環境シミュレーション技術の予測精度の検証は、Fig. 3に示す実大スケールの実験用アトリウムによる実験結果との対比により行った。実物のアトリウムでは、計画・設計時と建設時で構成部材が異なる等の理由により、シミュレーション結果と測定結果の詳細な比較が難しい場合が多いが、実験用アトリウムでは、構成部材の熱物性値が既知のものかあるいは事前に測定した部材のみで全てを構成し、室外・室内日射量を測定し、空調負荷をコントロールすることにより、明確な境界条件の下でのシミュレーションと実験結果との対比が可能となった。Fig. 4, 5, 6に、実験用アトリウムでの測定結果とシミュレーション結果との比較を示す。測定結果は、1994年9月14日14:00、外気温33.1、外気平均風速2.63m/sec、空調吹き出し温度21.6、空調吹き出し量459m³/hrの冷房空調負荷のもとで測定された結果である。Fig. 4に測定ポイント、Fig. 5に空気温度の測定結果とシミュレーション結果の比較、Fig. 6に壁面温度の測定結果とシミュレーション結果の比較を示す。測定結果とシミュレーション結果の間に良い一致が見られることが分かる。実験用アトリウムにおける実験結果とシミュレーション結果の比較の詳細は、文献(3)~(5)を参照されたい。

2.7 大規模ガラスアトリウムへの適用事例

Fig. 7, 8, 9, 10, 11に、温熱環境シミュレーション

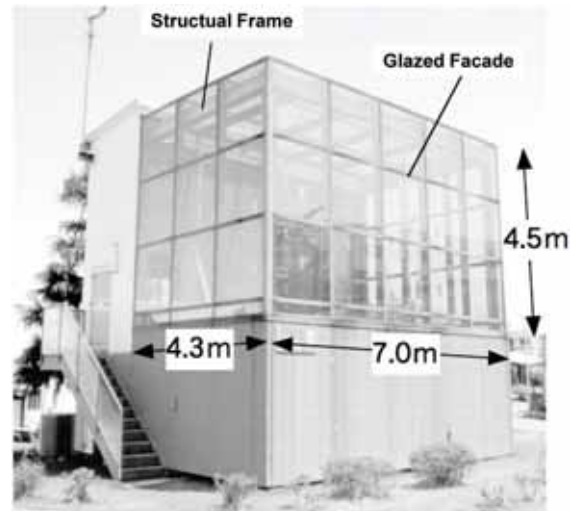


Fig. 3 Experimental atrium.

を、大規模ガラスアトリウムへ適用した事例を示す(文献(3)参照)。大規模ガラスアトリウムは、Fig. 7に示すように、幅32m、長さ200m、高さ65mのスケールを持った舟形の大型ガラスアトリウムで、日本国内に建設されたガラスアトリウム建築物の中では最大級のものである。シミュレーションには、Fig. 7に示す有限要素法(FEM)メッシュ(55756要素)を使用した。Fig. 8に、シミュレーションに使用したFEMメッシュの内観と、実際に建築されたアトリウムの内観を示す。歩行デッキ、スロープなど日射の遮蔽体となる可能性のある構造物は出来る限り考慮したメッシュとなっている。また、アトリウム全体を支える骨組み構造物に関しては、日中に吸収した日射熱量を夜間に放射する可能性があるため、メッシュとして形状モデル化は行わず、熱容量体としてモデル化し、温熱環境シミュレーションに反映させた。Fig. 9, 10, 11に、夏期南中時のシミュレーション結果を示す。Fig. 9に、アトリウム内の日射吸収熱量の分布を示す。Fig. 10に、アトリウム内の垂直断面内の空気温度分布を示す。さらに、Fig. 11に、アトリウム内の気流の様子を粒子追跡手法を用いて可視化した様子を示す。アトリウム内に、温度成層が形成され、1階から地下1階の居住空間

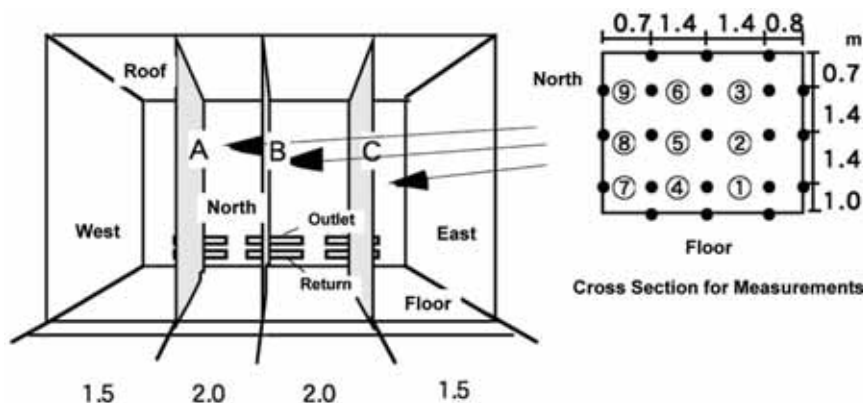


Fig. 4 Measured points in the experimental atrium.

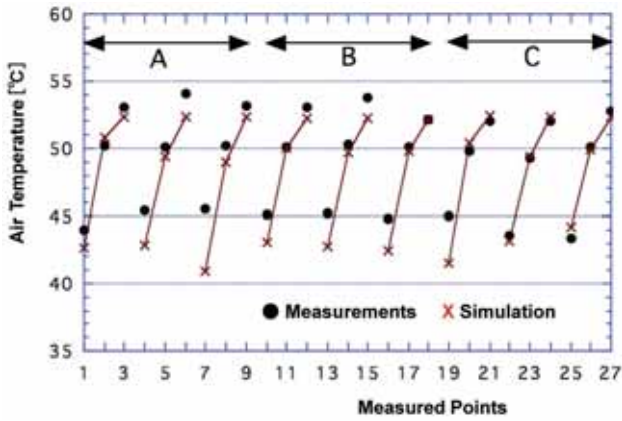


Fig. 5 Comparison between simulation results and experiments.

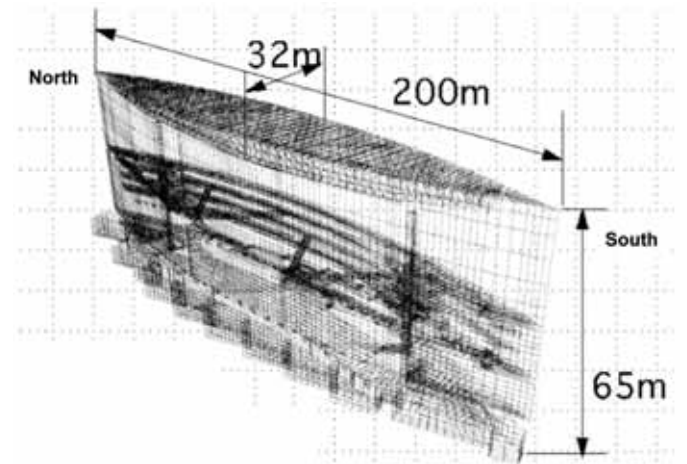


Fig. 7 FEM mesh model for simulation.

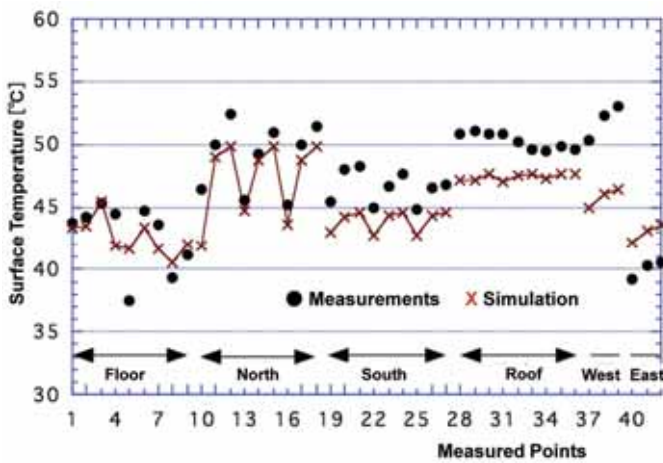


Fig. 6 Comparison between simulation results and experiments.

間である地下1階に集中することが分かる。この冷気溜まりを形成することにより、実際に、夏期のアトリウムの冷房空調負荷は、アトリウム全体を冷房した場合に対して10分の1程度であることが報告されており、温度成層をうまく利用した温熱環境設計の省エネルギー性に対する有用性が証明されている。

アトリウム内の上部空間のスロープや歩行デッキ、居住域に関しては、局所的に冷房空調されており、この設計に対しても、温熱環境シミュレーションを利用した空調設計が実施された。また、冬期は、暖房空調による気流がアトリウム内を上昇し、アトリウムの密閉性を向上させないと外気がアトリウム内に流れ込み温熱環境が悪化する可能性があることがシミュレーション検討により判明、初期デザインで検討されていた1階の大開口部は南北2カ所のエントランスにデザイン変更されるなど、温熱環境シミュレーション技術が環境設計に重要なツールとして活用された。

に冷気溜まりが形成されている様子が分かる。このアトリウムには、屋根部に排気口が設けられていて、自然換気により熱気が排出され空調とバランスする仕組みになっているが、アトリウム内が適度に温度成層化することにより、冷気が人間の主たる活動空



Fig. 8 Indoor view of the actual atrium and the FEM mesh model.

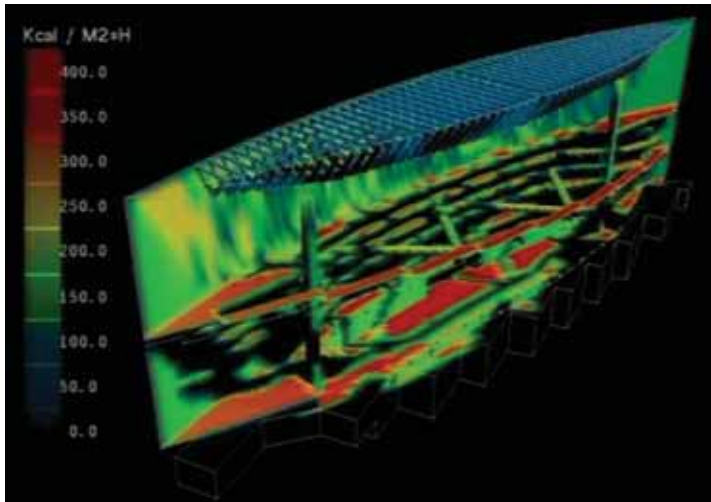


Fig. 9 Distribution of solar radiation absorption in the atrium in Fig. 8.

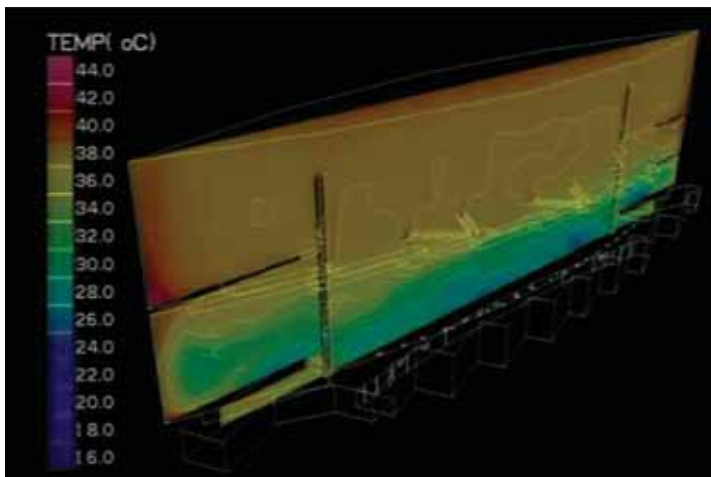


Fig. 10 Air temperature distribution on a vertical cross section in the atrium.

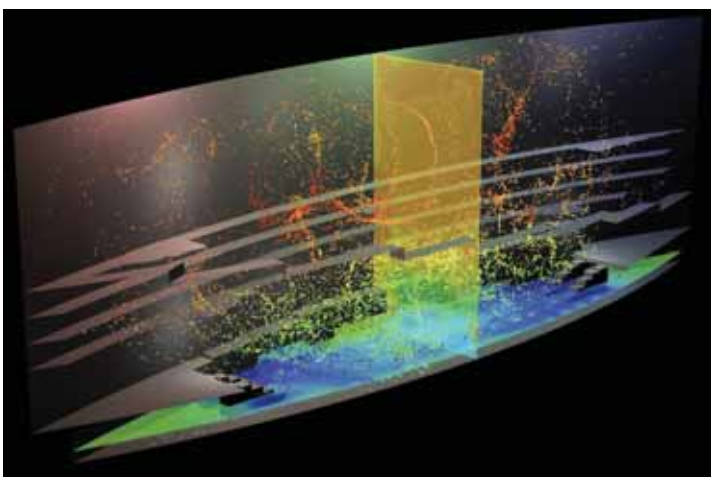


Fig. 11 Visualization of air convection in the atrium by the particle tracing.

3. 自動車室内空間の温熱快適性

建築物内の温熱環境設計・温熱快適性評価ツールとして発展した温熱環境シミュレーション技術は、1990年代から自動車内の空調（HVAC）システムのデザインツールとしてその利用が検討された。この背景には、20年以上前は車体の表面積においてボディが70%、窓ガラスが30%程度の占有面積であったのに対し、約10年前にはガラスの占有面積が50%に達し現在も増加していること、従って窓ガラスを通して車内に吸収される日射熱負荷が、冷房空調に与える影響が相対的に大きくなったことが考えられる。さらには、ハイブリッドカー、電気自動車、燃料電池車などの次世代の車をデザインする上で、車を設計する際の最大熱負荷の1つである日射熱量と空調負荷を精密に検討する必要性が高まったことがあげられる。今日、自動車用燃料の高騰や、自動車の排熱が地球環境に与える影響などにより、車を設計する上で、さらなる省エネルギーデザインが求められており、自動車に対する空調デザインツール、温熱環境デザインツールとして、シミュレーション技術のニーズは増加するものと予想される。

自動車内の温熱環境を、空気温度を計測するだけで評価することは難しい。例えば、夏期に屋外駐車場に長時間放置していた車に搭乗しエアコンを稼働させると、空気温度は比較的短時間で低温となるが、人体は長時間に渡って暑く不快感を感じる。これは、窓ガラスや車体が吸収した日射熱量が長波長の赤外線となって再放射されるためであり、空気温度は30以下に下がったとしても、空気に対して1000倍以上の熱容量をもつ窓ガラスや車体から受ける長波長の放射熱量により人体が不快と感ずるためである。このように、自動車内の空調や温熱環境をデザインするためのシミュレーション技術としては、単にエアコンから吹き出す空気速度や空気温度をシミュレーションするだけでなく、車体や車室に吸収される日射熱量、窓ガラスや車体から再放射される放射熱量も含めた総合的なシミュレーション解析ツールが必要である。

3.1 自動車用温熱環境シミュレーション技術の概要

自動車用温熱環境シミュレーション技術が建築用と大きく異なる点は、(a)自動車内温熱環境の非定常性、(b)人体に対する部位別の熱負荷を考慮した人体快適性評価、の2点である。基本的なシミュレーション技術は、上記に説明したCFD+2波長放射（日射・長波放射）連成シミュレーション技術を車室内空間に適用する。ただし、自動車の場合、駐車状態からエアコンを稼働させて快適な状態になるまでの時間を評価ファクターとする場合が多く、シミュレーション技術として時間変化を伴う非定常シミュレーションが求められる。さらに、自動車室内空間では、建築空間に対して非常に狭い空間内に大

きな温度分布が形成される。日射も、ステアリングを握る手、腕や上半身には当たり易いが下半身には当たり難く、人体に対して部位別に不均一に大きな熱負荷が作用する。このような熱的に不均一な温熱環境が人体の温冷感に与える影響を考慮した快適性評価技術が求められており、人体に対する部位別の熱負荷を考慮した人体快適性評価モデルの開発が必要である。

自動車への日射エネルギーを、Fig. 12に示す。直達日射、天空日射とも、窓ガラスを通過する際にその一部は反射し、一部はガラスに吸収され赤外として再放射される。窓ガラスを通過して車室内に到達した日射は、内部拡散反射を繰り返しながら車室内のシートや壁面で吸収され赤外として再放射される。車体の外面で吸収された日射熱量は、熱伝導により車体壁面を通過し、車室内の温熱環境に影響する。この日射エネルギーの伝達のメカニズムは建築と同じである。ただし、温熱評価に非定常性を考慮する必要があるため、日射解析を一定時間間隔で非定常的にを行い、車室へ到達する日射熱量分布の非定常変化を予め計算しておくことが必要である。

車のボディーは複雑な構造を持つが、熱伝導率や熱容量の異なる積層体としてマクロにモデル化することが出来る。ボディー内には中空層あり、その部分は空気の内対流伝熱を考慮した積層体としてモデル化する。また、ボディーの一部には熱的にヒートブリッジの役割をしている部分があり、その部分は領域を別に分けて、ヒートブリッジを考慮した積層体とする。外気を導入した空調モードの場合、空調から車室に流入した空気は、車体の隙間を通じて外界に排気される。この排気用の隙間をモデル化する必要があるが、シミュレーション上は隙間相当面積としてモデル化する。

自動車用温熱環境シミュレーションにおいて、非定常シミュレーションを精度良く行う場合、問題となるのが計算時間ステップの問題である。CFDによる気流シミュレーションを非定常的にを行うには、1秒以下の非常に小さい時間ステップを用いる必要が

ある。しかし、温熱環境の評価には実時間で数時間分の計算が必要であり、これをCFDによる非定常気流計算で行うと、数万ステップ、場合によっては数100万ステップもの莫大な計算が必要になる。一方、空気に対して熱容量が非常に大きい車体の温度の時間変化はより緩やかであり、数10秒～数分間隔の時間ステップで非定常計算を行うことが可能である。この問題を解決する一つの手法として、車体は非定常計算を行うが、気流シミュレーションは、車体非定常計算の各ステップでの熱フラックスを境界条件とした定常計算で代替する手法が考えられる。空気は車体に対して非常に熱容量が小さいため、壁体から見た場合に瞬間的に熱収支が釣り合う定常状態として近似することが出来る。この手法を用いた場合、車体は数10秒～数分間隔の時間ステップで非定常計算を行い、その各時間ステップ毎に気流と壁面との界面での熱フラックスを求め、これを境界条件とした定常気流計算を行う。壁体の非定常計算と、各時間ステップでの気流の定常計算は連成させて計算させることが必要である。自動車用温熱環境シミュレーションの詳細は、文献(9)~(12)を参照されたい。

3.2 自動車用温熱環境シミュレーションの適用例

自動車用温熱環境シミュレーションの適用例を、Fig. 13に示す。車室内の形状はSUV車を想定したモデルとした。シミュレーションは、夏期晴天状態の日射条件を設定し、10:00~13:00の間の3時間分の非定常計算を行った。南向きに駐車した状態で計算をスタートさせ、10:00~12:00の2時間駐車場で放置し、12:00に乗員1名が運転席に搭乗しエアコン稼働させ、直後に40km/hの速度の走行状態に移行し、12:00~13:00の間走行状態を維持するシナリオを設定してシミュレーションを行った。ガラスは、グリーンガラスとIRカットガラスの比較を行った。シミュレーション結果をFig. 13に示す。Fig. 13には、時刻12:03(エアコン稼働、走行直後)時点での、日射受熱量分布(左上)、車室内表面温度分布(右上)、垂直断面上の空気温度分布(右下)、粒子追跡による気流の可視化(左下)をそれぞれ示す。冷房空調稼働させたため、気流の温度は20以下に下がっているが、車室内の表面温度、特にインパネやステアリング、フロント側シートなどが日射により加熱され、非常に表面温度が高くなっていることが分かる。車室内空気温度のみを下げて、このような車室表面からの赤外の再放射を低減化しないと、乗員の温熱快適性が向上しないことが分かる。

3.3 人体に対する部位別の熱負荷を考慮した人体快適性評価モデルの開発

自動車室内の不均一な温熱環境下での人体快適性を評価するモデルを開発するためには、人体が周囲

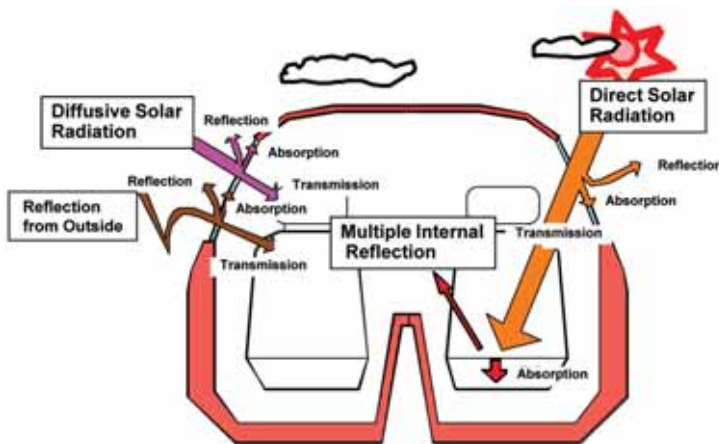


Fig. 12 Schematic diagram of solar radiation absorption in a car.

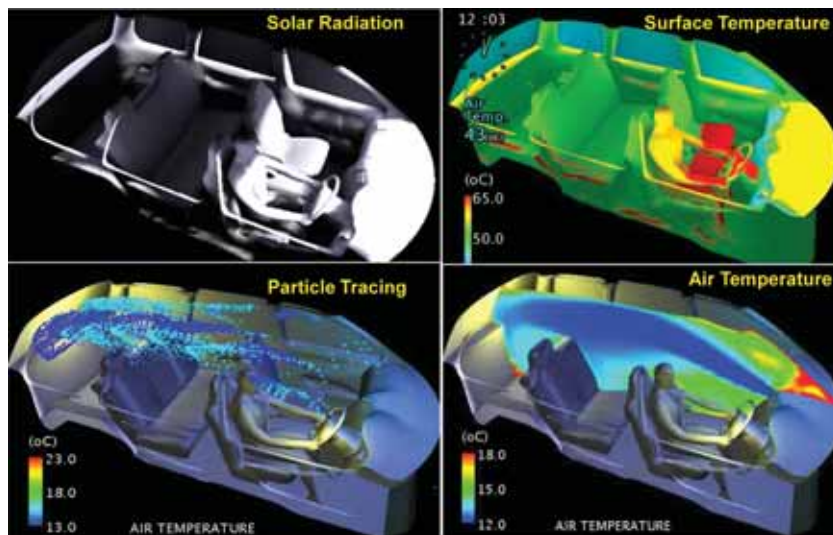


Fig. 13 Thermal environment and comfort simulation in a car.

環境から受ける熱量を定量化しモデル化するとともに、人体内部での熱輸送と生理量の関係モデル化する必要がある。人体表面形状を詳細にモデル化し、人体各部位における周囲環境からの受熱量（日射受熱量、周囲環境との間の放射熱伝達量、周囲環境との間の対流熱伝達量）さらには体温調節を含む人体内部の熱移動量を精度良く予測し、車室内温熱環境シミュレーションと総合的に連成させることが必要である。人体形状モデルとしては、立位・椅座位の人体表面の凹凸を詳細に再現した3次元形状モデルを作成しシミュレーションに用いる。この人体モデルが受ける直達日射による受熱量は、人体の有効放射面積・投影面積を利用して算出する。放射伝熱量の算出には人体と周囲空間との間の形態係数の算出が必要である。体温調節モデルは、全身をいくつかの部位に分割し、それぞれの部位をコア層と皮膚層の2層に分割し熱交換をモデル化する。特に、各部位コア層の中心にはそれぞれ大動脈・大静脈に相当する動・静脈血液プール、Chest部位及びBack部位コア層には心臓を表す中央血液溜まりを設定する。各部位各層では動・静脈血液プールと血流による熱交換を考慮し、部位間の熱移動は血液プール間の血液の移流によりモデル化される。四肢部位では大静脈以外に皮膚表面静脈を考慮し、手掌部・足底部ではAVA 血管反応を考慮している。

このようにして開発された人体快適性評価モデルは、実験用アトリウムを用いた被験者実験やサーマルマネキンを用いた実験結果と比較することにより、その予測精度の検証が行われた。Fig. 14に、立位の人体形状モデルと、実験用アトリウムを用いた被験者実験の様子を示す。また、Fig. 15に、椅座位の人体形状モデルと、実験用アトリウム内に設置されたサーマルマネキンによる実験の様子を示す。人体快適性評価モデルの詳細は、文献(7)を参照されたい。

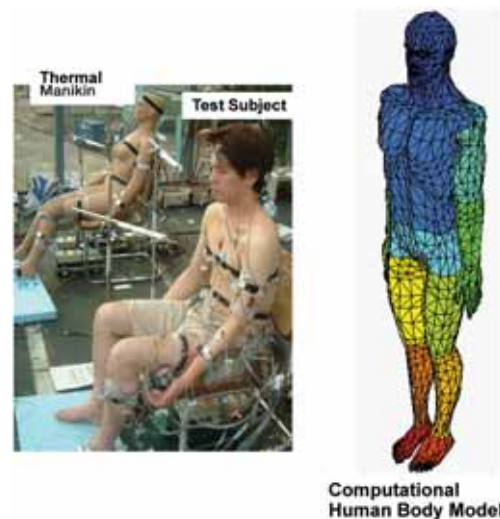


Fig. 14 Human body model for the evaluation of the thermal comfort.

3.4 自動車用温熱環境シミュレーションを用いた新商品開発

当社では、自動車のフロントガラスを主用途として開発・商品化したIRカットガラス（商品名：クールベール）の開発に際し、自動車用温熱環境シミュレーション技術と人体快適性評価モデルを積極活用して、商品の開発を進めた⁽¹³⁾。人体が受ける赤外線（IR）をカットするガラスを開発することは、人体快適性に有効であることは容易に分かるが、どの程度有効かを定量的に評価するためには、自動車用温熱環境シミュレーション技術と人体快適性評価モデルが必要である。実際、IRカットガラスを用いた室内環境と通常のグリーンガラスを用いた室内環境を比較するために、車室内の空気温度を測定し比較したとしても数度の差しかなく、その効果が明確に定量化出来ないが、実際に乗車してみると人体温冷感に大きな差があることがわかる。この人体が感じる温冷感は、空気からの伝熱だけでなく、人体が窓ガ

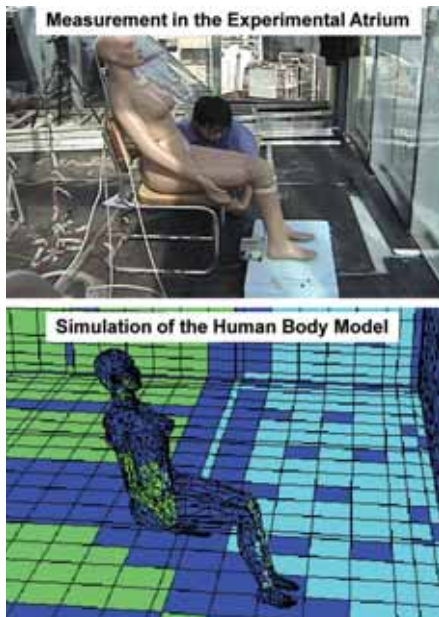


Fig. 15 Human body model for the evaluation of the thermal comfort.

	Conventional Green Glass	COOL VERRE [®]
Time required for 1°C rise of skin Temperature	32 (SEC) Typically uncomfortable for stops by red traffic lights	58 (SEC) Comfortable in most cases of urban driving
SHF	25	45

Fig. 16 The thermal comfort index SHF.

ラスを通じて直接受ける日射と、赤外による放射伝熱を総合することにより、評価することが出来る。この目的のためには、自動車用温熱環境シミュレーション技術と人体快適性評価モデルが有効である。当社では、さらに、新商品の価値を顕在化させ、乗員の快適性をより定量的に評価するために、Fig. 16に示す新しい温熱快適性評価指標SHF (Skin Heating Factor)を開発し、商品の有効性を検証した⁽¹³⁾。

4. おわりに

以上、本報告では、温熱環境シミュレーション技術および人体快適性評価技術を構成する数値シミュレーションモデルを紹介し、大規模ガラスアトリウム空間や自動車車室空間への適用、さらに、自動車用ガラスの新商品開発への適用に関して紹介した。温熱環境シミュレーション技術および人体快適性評価技術は、現在も技術開発が進められており、適用分野も、建築・自動車から、各種熱機器の設計や電機・電子機器の設計などその用途は拡大している。また、温熱環境シミュレーション技術は、都市の温暖化、ヒートアイランド現象の解明など、空間スケールから都市・地域スケールへ、その適用範囲を広げている。気象観測データとのリンクも進められており、今後注目していく必要があると考えられる。

- 参考文献 -

- (1) 尾関義一、CFDと放射の連成、アトリウムの熱環境設計小委員会成果報告書、空気調和・衛生工学会、215-221, 2000. 3.
- (2) 尊田嘉之他、アトリウムの温熱環境解析 日射計算システムの開発、旭硝子研究報告、42[1], 1, 1992.
- (3) 尾関義一、斉藤恒洋、尊田嘉之、山本雅史、大柿聡、アトリウムの温熱環境解析 輻射計算システムの開発、旭硝子研究報告、42[2], 109-127, 1992.
- (4) 尾関義一、加藤信介、村上周三、実験用実大アトリウム内の熱伝達・気流性状に関するCFD解析 (第1報)、空気調和・衛生工学会論文集、No.68, 1998.
- (5) 尾関義一、加藤信介、村上周三、実験用実大アトリウム内の熱伝達・気流性状に関するCFD解析 (第2報)、空気調和・衛生工学会論文集、No.69, 1998.
- (6) 尾関義一、村上周三、加藤信介、対流場・放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析 (第1報)、空気調和・衛生工学会論文集、No.57, 1995.
- (7) 尾関義一、田辺新一、人間 熱環境系の快適性数値シミュレーション、日本建築学会第34回熱シンポジウム、55-62, 2004.12.
- (8) 藤田明浩、金丸純一、中川洋、尾関義一、自動車内温熱環境を予測するシミュレーションの実用化手法、HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, 1999.
- (9) 尾関義一他、車室内における日射波長特性を考慮したガラスの体感影響、自動車技術会学術講演会前刷集、No.33-99, 1999.
- (10) 江崎秀範、木滝泰隆、尾関義一、斉藤恒洋、温冷感・快適感予測のための人体、シート熱モデルと車室内CFDとの連成解析 (第1報)、自動車技術会学術講演会前刷集、No.126-05, 2005.
- (11) 江崎秀範、高野茂喜、植村健、温冷感・快適感予測のための人体、シート熱モデルと車室内CFDとの連成解析 (第2報)、自動車技術会学術講演会前刷集、No.126-05, 2005.
- (12) 自動車室内環境2005 (総合技術レビュー)、自動車技術会、2006.3.
- (13) 尾関義一、ジリジリ感低減ガラス (クールベール)、自動車技術、Vol.57 No.2, 101, 2003.2.