建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱収支・気流 連成シミュレーション手法開発の基礎的検討

STUDY ON COUPLED SIMULATION SYSTEM OF HEAT AND AIR FLOW IN OUTDOOR SPACE FOR THE COMPUTER AIDED DESIGN TOOL

山村 真司*, 梅干野 晃**, 浅輪 貴史***

Shinji YAMAMURA, Akira HOYANO and Takashi ASAWA

“A Coupled Simulation of Heat and Air Flow” is expected to be the computer aided design tool in outdoor space. Compared with the existing available prediction methods, this method herein described places greater emphasis on its ability to make it possible to evaluate thermal radiant environments, air temperature and wind distribution that are given to the timely prediction in design process as well as to various other factor including both variety of external materials and variety of exterior shapes.

This method was developed based on sensible heat balance simulation for all the exterior surface and standard $k-\epsilon$ turbulent Model. And sensible heat balance simulation is also combined with 3D-CAD system that makes it easily to input the complicated exterior shape and also make it possible to evaluate the 3-D distribution of surface temperature at any view points.

Keywords: Outdoor Space, Computer Aided Design Tool, Heat Balance Simulation, CFD, Coupled Simulation

建築外部空間、設計支援ツール、熱収支シミュレーション、気流シミュレーション、連成シミュレーション

1. はじめに

建築外部空間の環境は生活空間の場であると同時に、屋内熱環境の形成に直接的な影響を及ぼす。このような建築外部空間において、従来の設計実務の分野では、屋外の緑を視覚的なデザイン要素として位置付けするのが一般的であり、熱環境緩和を積極的に意識した扱いがなされてこなかった。しかしながら今日では、設計者あるいは施主からの熱環境的にも有効なデザインの要望が高まりつつある。また、都市域ではヒートアイランド現象の進捗に伴い、年間を通じての自然エネルギー利用による屋内空間の熱環境調整が困難となる傾向にある。このような状況下、実務レベルにおける熱環境緩和を配慮した、建物廻り～街区スケールでの外部空間デザインの計画・実現の普及が急がれるが、そのためには、設計実務の流れの中での熱環境的なデザイン評価をより意識した設計支援手法の構築と、それに基づいた予測評価手法の開発が必要である。

これに対して、既往の予測評価手法の開発状況は、以下を初めとして、様々な熱環境の予測評価手法が開発・提案^{1, 2, 3, 4)}されているものの、設計支援という点では、設計プロセスに対して未だ十分に対応可能な状況には至っていない。

①村上ら^{5, 6)}は、3次元対流・放射・湿気連成解析手法を開発して、従来の $k-\epsilon$ モデルに比べて実現象のより再現性の高い風速・気温分布予測を行っている。しかしながら、一連の物理現象を乱流モデルに組込んでの解析であるため、メッシュサイズに制約がでる点や、空間構成材料及びその組み合わせ(土地被覆材料、樹木等)をパラメトリックに変化させて熱的な影響分析を多数のケースで迅速に行い、デザインの試行錯誤を行いたい場合、CPU の能力に大きく制約される問題などがある。

②谷本ら⁷⁾は、建築一都市一土壌連成系モデルを提案しているが、1次元熱収支モデルを適用しているため、空間構成材料の3次元形状の相違による熱的影響分析や、気流の空間分布が及ぼす影響の反映等の点で、デザイン検討の自由度に制約が残る。

また、建築外部空間に形成される微気候は多様な要素が複雑に絡み合っている。例えばデザイン検討の際、予測結果の平均風速が低い場合、SET*による快適性評価では不利となるが、乱れの強さによる快適性への寄与は無視できない^{8) 註1)}。一方で、平均風速の予測結果から空間各所の乱れの強さを簡易に見積もることは困難な状況にある。従って、予測手法構築に当たっては、平均風速等の一

* 東京工業大学大学院 工修
(株)日建設計

** 東京工業大学 教授・工博

*** 東京工業大学大学院 修士(工学)

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
(Nikken Sekkei Ltd.)

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

連の物理現象を組み込み予測精度向上を図る手法開発もさることながら、設計実務への適用を考慮した建築外部空間デザインの比較検討を主眼に置いた予測評価手法の構築が必要である。

筆者らは、前述のような設計支援を意識して、まず建築外部空間デザインによって直接的に規定される熱放射環境を扱うべく、3D-CADによる空間形状入力～0.2m均等メッシュによるメッシュデータ化～1次元熱伝導をもとにした空間全表面での熱収支計算による表面温度予測評価手法を開発している⁹⁾ 注2)。本研究では、さらに表面温度分布と相互に影響を及ぼしあう気温・気流分布も考慮できるよう、建物廻り～街区レベルのスケールを対象として、建築外部空間デザインの実現化に重点を置いた設計支援手法を構築し、それに基づく予測評価手法の開発を行うものである。

2. デザイン評価に即した設計支援の方法と予測評価手法

建築物及び建築外部空間の設計においては、通常、基本構想(企画)～基本設計～実施設計というプロセスを経てプランを収斂させていくが、各段階において要求される熱環境的な評価項目・レベルは多様である。さらには、実際の設計作業では熱環境も含めて施主要望、法規制など様々な要因に基づいてデザインの試行錯誤¹⁰⁾が行われるため、設計プロセスに応じた迅速かつ効率的な熱的検証・設計へのフィードバックが必要となる。また、設計実務者の3D-CADによるデザイン検討の過程¹¹⁾に合致させた形状入力及び予測結果の出力方法等、簡便な取り扱いへの考慮も重要な要素である。

予測評価結果の設計プロセスへの効率的な反映、設計過程での現実的な支援をより意識した手法開発のためには、以下の項目を前提とした検討を行う必要がある。

①対象となる外部空間スケール：実務上、扱う頻度が比較的高い街

区スケール(数百 m)～住棟間スケール(数十 m)にて、居住域レベルが対象となる。

②デザイン上評価対象とする空間構成要素：外部空間の居住域レベルを取り巻く外装材料、土地被覆材料、緑(種類、樹木形状・大きさ、量、配置)、小スケールではあるが居住域放射環境に直接的に影響を及ぼす空間構成要素(庇、パーゴラ、ベランダ等)及びそれらの組み合わせが対象となる。

③設計の各プロセスにおける熱環境把握のニーズ：一般的に、空間デザインは、施主要望、コスト、動線計画、環境への配慮等あらゆる要素をもとに収斂させていく。設計の段階が進むに従い、デザインに対するこれら要素の制約が大きくなるため、予測・評価結果をフィードバックさせるにくくなる。従って、図1に示すように、計画の段階を追って適宜必要な予測・評価を行い、設計を支援出来る柔軟な手法が必要である。例えば、基本構想段階では、建物群の配置計画に際して通風性状やビル風等に関する評価結果をマスタープランに織り込む、基本計画段階では、外装・土地被覆材料、植栽計画の方針決定に際して、表面温度分布の観点から熱放射環境改善の効果を把握するといった具合である^{注3)}。

④設計支援に必要な評価・判断指標：外部空間構成要素をパラメトリックに変化させ、その熱的影響分析を検討する場合、SET*などの快適性指標¹²⁾ だけの判断では、快適性指標の相違に対して直接要因となる空間構成要素(部材形状・材料など)が特定し難い場合がある^{注1)}。また、屋外居住域の熱放射環境が空間構成要素の相違によって直接的に規定される傾向も考慮すると、総合的なSET*による快適性評価とともに、表面温度(又はMRT)、平均風速、気温・湿度といった物理的指標による評価も含めて、設計プロセスの各段階に応じて、デザインへのフィードバックに必要十分な評価指標を

図1 各設計プロセスにおける支援手法（予測評価手法）の関わりの一例^{注3)}

図2 熱収支・気流連成シミュレーション手法のフレーム概要

適宜選択して評価が出来るツール構成とすることで設計支援の柔軟性・即応性はより高まると考える。

3. 熱収支・気流連成シミュレーションによる予測評価手法の提案

3.1 連成予測評価手法の概要

以上より、表面温度予測手法と空間内の気温・気流分布予測手法の2つの方法を用いて、必要に応じてこれらを単独あるいは連成させて使用することで設計プロセスに対応可能な支援システムの構築が可能と考える。本報では、筆者ら⁹⁾らが開発を行っている熱収支シミュレーション⁹⁾と、気流シミュレーション(標準k-εモデル)⁴⁾を各々独立した予測ツールとして連成を図った予測評価方法(熱収支・気流連成シミュレーション手法)による設計支援システムを提案する(図1、2)。

本手法の特徴は、①設計プロセスにおける予測評価のタイミングと要求される評価対象(項目)に合わせてツール構成を柔軟に選択できる点、②予測評価の目的に応じて、居住域レベルでの3次元空間形状の相連を、計算上十分再現出来、かつ計算負荷を低減化させるために、熱収支シミュレーション⁹⁾における空間全表面の均等メッシュ化サイズと気流シミュレーションのメッシュサイズが各々独立して設定でき、かつ表面温度等の境界条件が連携できること、③また、表面温度算出にあたっては、空間構成材料の熱放射環境における影響分析を前提として、蓄熱効果を考慮した非定常計算である点、④連成するにあたって、時系列での非定常計算(熱収支シミュレーション)と1時刻対象の定常計算(気流シミュレーション)の間のデータ受け渡しについて、設計支援上、予測精度と計算負荷抑制とのバランスを考慮したデータのフィードバック方法の導入等が挙げられる。

3.2 連成予測評価手法構築のための検討事項

時系列での全表面温度予測を行う熱収支シミュレーションと気温・気流の空間分布把握を目的とする気流シミュレーション各々の特徴を活かし、かつ設計支援を意識した連成手法を構築するためには以下をはじめとした様々な検討を行う必要がある。

- ①熱収支シミュレーションと気流シミュレーションとの間の形状・サイズが異なるメッシュ間でのデータ受け渡し方法
- ②空間全表面を対象とした熱収支シミュレーションによる表面温度算出にあたっての気温、平均風速の空間分布の考慮方法
- ③連成の具体的実施手法構築と、妥当な連成反復回数の抽出
- ④メッシュデータ化を前提とした熱収支シミュレーション及び気流シミュレーション共通の3D-CADによる空間形状入力手法の構築⁵⁾
- ⑤本連成手法に適用する樹木の力学的影響のモデル化手法⁴⁾
- ⑥湿気(潜熱)の扱い⁶⁾

本研究では、①～③について、方法論の構築と適用可能性の評価を行った。

4. 連成手法における境界条件(気温・風速・表面温度)の取り扱い

4.1 各ツールにおける異なるメッシュサイズ・形状間でのデータ受け渡し方法

熱収支シミュレーションでは、庇、パーゴラなど小スケールであるが、居住域の熱放射環境に大きな影響を及ぼす空間構成要素が網まえられる3次元均等メッシュサイズ(0.2m)にて計算を行う。一方、気流シミュレーションにおいては、計算負荷の点から、最小メッシュサイズは概ね1m～数mオーダーであり、また、メッシュ形状も空間内の場所によって異なる。従って、熱収支シミュレーションにて算出した表面温度を気流シミュレーションの熱の境界条件として扱う場合、以下の受渡し手順を採用した(図3)。

- ①各気流解析メッシュが包含する熱収支計算メッシュの位置関係を3次

元座標によって関連付ける。

②気流解析メッシュが包含する熱収支計算全メッシュの表面温度を面積平均し、気流解析メッシュの表面温度条件とする。

③空間内全表面にて、①、②を気流解析メッシュ毎に繰り返す

本方法では、樹冠による日影・日向の境界など著しい表面温度変化がある領域では、データ受け渡し後、表面温度分布が滑らかなとなってしまうが、実際には、当該部分での気温・風速が日影・日向によって大きな変化が見られないことから、定性的な分布傾向には大きな影響はないものと判断した。

また、気流シミュレーションにて算出した気温、風速の空間分布を熱収支シミュレーションにおける各メッシュ毎の表面温度算出の参照データとする場合は以下の方法にて受け渡しを行った。

①' 地表面・壁面等に接する各気流解析メッシュと熱収支計算メッシュの位置関係の関連付けは、上記①“の方法に同じ。

②関連付けた気流解析メッシュの気温・風速を、当該メッシュが包含する各熱収支計算メッシュに一樣に与える。これを空間全表面にて繰り返す。

なお、熱収支計算メッシュ毎に、受け渡された風速より Jurges の式にて対流熱伝達率を求める方法^{注7)}は、これまでの熱収支シミュレーション手法⁹⁾と同様である。

4. 2 表面温度算出の際の気温・気流局所分布の反映方法

(以降：定時解析手法) の提案

本連成手法は、夏季の熱環境の悪化が予想される時間帯を特に解析対象としているため、空間内の場所毎に材料の蓄熱を考慮した時系列での計算が必要となる。

熱収支シミュレーション⁹⁾による表面温度算出において、これまで筆者らは第1段階として、都市キャノピー内における気温、風速の空間分布は一樣¹³⁾として扱ってきた。しかしながら、居住域を対象とする場合、日影・日向の分布に伴う気温の局所分布、ビル風・縮流などによる風速の加速領域、建物風下の wake 内などの低風速領域における対流熱伝達の相違などを相対的に考慮する必要がある(図4)。

その際、連成手法構築上、気流シミュレーションで解析した1時刻の気温・風速分布を如何にして表面温度算出のための時系列のデータとして取り扱うかが問題となる。予測評価の対象とする時刻（以降、着目時刻）にのみ分布のデータを与えたのでは空間内の各場所における材料の蓄熱性の相違を十分には考慮していないことになり、また多数の時刻分（例えば24時刻分）の解析を行っていたのでは計算負荷量の点から設計支援という目的にそぐわない。

そこで、本手法では着目時刻とその直前1時刻ステップ前（着目時刻の1時間（または2時間）前）の2つの時刻を対象に気流シミュレーションで解析した気温・風速分布をもとにして簡易的に局所分布を考慮した時系列入力データを作成し、熱収支シミュレーションを行う手法（以降、定時解析手法と呼ぶ）を提案する^{註8)}。以下でその有効性と適用可能範囲を検証する。

4. 3 定時解析手法の適用の検証

前述のように、これまでの熱収支シミュレーション⁹⁾での都市キャノピー上空の気象データ（時刻別気温・風速データ）を空間一様の分布¹³⁾と仮定した表面温度予測に対して、例えば放射環境が劣悪な居住域など、場所によっては上空気温と大きな気温差が生じることがある。気流分布についても同様である。

そこで、検討対象としたいいくつかの街区モデルのうち、上空と空

図3 熱収支シミュレーションにて算出した表面温度の
気流シミュレーションメッシュへの受け渡し例

図4 都市キャノピー内の気温・風速の空間分布概念

図5 定時解析検討街区モデルの概要

間内局所の気温（及び風速）の差が著しく大きくなるような場合を想定して、表面温度が高温となる材料で構成した街区モデル^{※9）}（図5）において、以下の3つのケースにて図5に示すa～fの各地点の表面温度算出結果を比較した。①既存の方法通り上空の気象データを用いて表面温度を算出するケース（ケース①）。②図6、7に示すような方法で、上空気温（及び風速）の時系列変化をもとに局所気温（及び風速）の24時間の時系列データを仮定して与えるケース（その際、局所の時系列データは空間内分布一律として与える；ケース②）^{※10）}。③着目時刻とその1時刻ステップ前の2つ

の時刻にのみ局所データを与え、それ以外の時刻は、上空の気温（及び風速）時系列データを与えるケース（ケース③、図6の「採用気温」、及び図7の「採用風速」のデータ参照）。

以上の3つのケースにて、各ケースの位置付けを把握し、ケース③の着目時刻における表面温度がケース②に対してどの程度近づくか検証する。

（1）気温の日変化への対応 図6に示すような上空気温と局所気温にて最大約5℃の差がつくような場合^{注10)}にて上記の3つのケースにおける気温日変化を適用した場合、地点a～fのうち、ケース③の表面温度予測結果がケース②に最も近付かなかった地点bの表面温度変化を図8に示す。この場合でも着目時刻において0.5℃程度の差異に収まっており、既往の方法であるケース①に比べて、この手法が気温局所分布の考慮に関して有効であるといえる^{注11)}。

（2）風速の日変化への対応 上空風速に対して局所風速が約0.1倍となるようなほぼ無風状態に近い場合^{注10)}を想定して、上記の3つのケースにおける風速の日変化を適用した場合、図9に示すように、風速の違いは表面温度の予測結果に大きな相違をもたらす。着目時刻及びその1時間前の局所風速を考慮した場合、着目時刻において地点bの表面温度の差異は約3℃であり、着目時刻及びその2時間前の場合でも2℃弱の差異がある。また、日射量が減少し、日中に較べて表面温度と気温との差が小さくなる夕方を対象として比較を行ったが、2℃程度の差があった^{注12)}。

以上の結果から判断して、着目時刻及び1時刻前（着目時刻の2時間前）の局所風速分布を考慮する本手法を採用するに当たって、対象とする上空風速について上限を設定する必要がある。図10に、日中の上空風速の変化幅を2～10m/sとしたときの地点bの各表面温度の変化を示す。ただし、局所風速を用いない時刻には上空と地表近くの風速比の分布¹⁴⁾をもとに、上空風速の0.5倍を空間内一様に与えることとした。この場合、表面温度は、10、8、6m/sの場合は2℃前後、2、4m/sの場合は1℃前後の差となった。したがって、建築外部空間の居住域レベルでの熱環境改善評価においては、ヒートアイランド現象下での風速が比較的低い状況が前提であることを考慮し、上空風速が5m/s程度までの場合を本手法の対象範囲とする^{注12)}。

5. 連成システムの構築

5.1 連成手順の検討

熱収支シミュレーションと気流シミュレーションの連成手順決定にあたって、建築外部空間デザインの相違が熱放射環境に直接的に影響することを考慮すると、熱収支シミュレーションによる表面温度分布予測は連成使用時でも単独使用時でも目的に応じて柔軟に使い分けられるシステムとしておく必要がある。従って、気流シミュレーションが常に熱収支シミュレーションの前提となる構成では簡便性及び柔軟性を欠くことになる。

そこで、本連成システムでは図11に示すように、まず従来通り、空間内気温・気流分布一様、初期表面温度を気温とする方法^{9, 13)}で表面温度分布を求めることとする（図11のA1）。次に、24時間での表面温度算定結果の内、着目時刻とその1時刻前の2時刻分の表面温度分布を気流シミュレーションの境界条件として、2時刻分の気温・風速分布を求める（図11のB1）。これをもとに熱収支シミュレーションによる計算用の気温・気流分布時系列データとして先に述べた定時解析手法を用いて表面温度分布を求める（図11中

図6 表面温度算出時の着目時刻前後の局所気温の導入概念

図7 表面温度算出時の着目時刻前後の局所風速の導入概念

図8 局所気温考慮時の表面温度の推移(地点b)

図9 局所風速考慮時の表面温度の推移(地点b)

のA2)。以下、順次B2、A3といった繰り返しとする。

5.2 妥当な連成反復回数の検討

連成前後における空間全表面による面平均表面温度差、及び気温差、平均風速差の空間平均値を平均収束判定値として、妥当な連成反復回数の抽出のための評価を行った。各種街区モデルの中でも図12に示すように、空間内にて表面温度、気温、平均風速の各分布にて大きな相違が発生すると考えられる街区モデル^{注13)}を設定し、図11に示す計算を行った^{注14)}。表1に、着目時刻(14:00)における各物理量の平均収束判定値の推移を示す。

図11のA1では気温・風速の空間分布を考慮しないため、A1～A2で約3℃の表面温度差が生じた。それに伴い、B1～B2では、気温の平均収束判定値は約0.1℃以下であるが、場所によって約1～2℃の差となった。A2～A3では、空間内での表面温度の大きな差はほとんど無く、また、気温についても空間平均ではほとんど差異が見られず、比較的溫度差がつく場所でも約0.1℃近くまで低下した。なお、平均風速については、A1～A2、A2～A3いずれもほとんど差異が見られなかった^{注15)}。以上より、表面温度は気温・風速の変化の影響を受けるが、気温、風速は表面温度の変化の影響を全空間で直接大きく受ける傾向にはなく、また、設計支援が目的であることから、表面温度分布、気温・気流分布の予測結果を総合的に評価する場合は、3回目の気流シミュレーション以降を省略し、A3をもって連成を終了させることとした。

6. 結論

建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱収支・気流連成シミュレーション手法の開発を行った。本手法は、熱収支シミュレーションと気流シミュレーションから構成されており、設計プロセスと要求される熱環境の評価性能によって、柔軟なツール構成をもって対応可能とするといった特徴を持つ。本連成手法開発にあたり、①熱収支シミュレーションによる外部空間の全表面温度算出にあたっての気温、風速の空間分布の考慮方法、②連成の具体的実施手順と連成反復回数などについての方法論を提案し、妥当性を確認した。今後は、熱収支シミュレーション、気流シミュレーションの両者に対する3D-CADによる空間形状の共通入力化方法の構築等について検討を行っていく。

【謝辞】

本研究は、文部科学省科学研究費、平成12年度基盤研究B(2)（代表：梅干野晃）の補助を受けた。また、本研究は、修士論文として取り組んだ当時大学院生東山純也氏の成果でもある。ここに記して感謝する。

注1) 例えば、住棟間・敷地内通路に、高木の樹木群を配し日射遮蔽を行った場合、予測評価の結果、熱放射環境は大幅に改善されるものの平均風速が低減し、平均風速の下がり幅によってはSET*評価では快適性が低下するといった可能性もあり得る。一方、既往の実測結果⁸⁾から、日射遮蔽下における低風速時の乱れの強さの快適性への寄与が認められることを考慮すると、SET*等快適性指標だけによる建築外部空間デザインの判断には注意を要する。乱れの強さや短波長放射などを考慮したより実態に即した総合快適性指標の実用化が望まれるが、現時点では未だ十分ではない。従って、パーゴラ、樹木等の空間構成要素の相違が熱放射環境に及ぼす影響を評価したい場合などは、表面温度(MRT)にても、実務上デザインの相違の判断は可能であり、さらにSET*等快適性指標にて補足を図るといった評価の方法がより現実的と考える。

注2) 熱収支シミュレーション手法は、3D-CADによる空間形状入力(及び3次元均等メッシュデータ化)、及び計算結果のグラフィック表示が可能である。また、複雑な樹冠形状、庇・パーゴラなどの小スケ

図10 上空風速の違いによる表面温度変化の相違(地点b)

図11 連成システムの概要

図12 連成反復回数検討用街区モデルの概要

表1 着目時刻(14:00)における平均収束判定値の推移

連成 step 判定対象	A1～A2 (B1～B2)	A2～A3 (B2～B3)
表面温度差(°C)	3.2	0.2
気温差(°C)	0.071	0.014
風速差(m/s)	0.013	0.008

ールな空間構成要素の形状を反映した熱放射環境の比較検討が出来るよう空間全表面を 0.2m 均等メッシュによりメッシュ化を行っており、メッシュ毎に各表面における受熱日射量（鏡面反射、拡散反射含む）、大気放射量、対流熱伝達量などを組み込んだ 1 次元熱伝導方程式を基本として、周辺地物からの長波長放射も併せた熱収支計算によって空間全表面温度を算出する。これらの機能は、本研究で提案する設計支援を目的とした予測評価手法構築に当たって必要不可欠であり、1 次元熱収支モデルを基にした谷本ら⁷⁾のモデルをはじめ、その他の熱収支計算手法では、前述した設計支援上の必要機能を満足し難い。

各メッシュにおける対流熱伝達量の算出にあたっては、第 1 段階として、参照する気温、風速は空間内（都市キャノピー内）の分布一様として、気象データの平均風速（U）をもとに Jurges の式（ $U \leq 4.9 \text{ m/s}$; $\alpha c = 6.2 + 4.3U$ 、 $U > 4.9 \text{ m/s}$; $\alpha c = 7.6U^{0.78}$ ）にて対流熱伝達率（ αc ）を求めている。熱収支シミュレーション手法の詳細は参考文献（9）を参照されたい。

注 3）図 1 に示した各設計プロセスと設計支援手法（予測評価手法）の関わりは、設計に際して、一般的に基本構想～実施設計といった段階的プロセスが踏まれる場合の予測評価手法の関わりの一例である。プロジェクトによって、踏襲される設計プロセスは多様であり、基本構想段階がない、基本設計と実施設計が時間差なく進捗するといったケースもありうるため、設計プロセス進捗に対する図 1 中「予測評価その 1～3」の関わり方は、基本設計で「予測評価その 3」が実施されるなど、これ以外にも多様に考えられる。

注 4）k-ε 乱流モデルについては、様々なモデルが提案され、各モデルの予測精度について、単体建物周りの流れ場を対象にしたベンチマークテスト¹⁵⁾が実施され比較検討が進んでいる。しかしながら、本研究で対象とするような、樹木と建物が複雑に配置されるような流れ場に関する各モデルの予測精度の位置づけは充分精査されていない。従って、本連成手法では、通常の標準型 k-ε モデルを採用し、下記の式（1）～（3）に示す樹木の力学的影響^{5, 16)}を組み込んだモデルを使用した。組み込みにあたって、運動方程式に抗力項（式（1））のみを組み込んだ場合と、抗力項（式（1））、及び k、ε 方程式に式（2）、（3）を組み込んだ場合とで風洞実験結果と比較し、予測精度の検証を行っている¹⁷⁾。

なお、連成手法構築にあたり、実務での汎用性を考慮するに現段階では、標準型 k-ε モデルの採用が妥当と考えるが、その他の k-ε 乱流モデルを採用した場合の本モデルとの相違については、4、5 章に述べる連成手法構築のための各種方法論を適用した比較検討を行う必要があり、今後の検討課題である。

$$F_d = \rho a C_d u_j^2 \quad (1)$$

$$k = C_d a(x, y, z) (\langle u_j \rangle^2)^{3/2} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} \left\{ C_d a(x, y, z) (\langle u_j \rangle^2)^{3/2} \right\} \quad (3)$$

F_d : 樹木による抗力項、 $\langle u_j \rangle$: 平均風速 ($j=1,2,3$)、 C_d : 抵抗係数、 ρ : 空気密度 [g/m^3]、 $a(x, y, z)$: 葉面積密度 [m^2/m^3]

注 5）熱収支シミュレーションでは小スケールの空間構成要素の熱放射環境への影響を評価するため、0.2m での 3 次元均等メッシュデータ化を行う。一方、気流シミュレーションは対象とする空間形状の大きさ・複雑さに応じてメッシュサイズ・形状は多様となる。従って、メッシュ化を前提とした場合、両者に共通の 3D-CAD による空間形状入力の方法構築は今後の課題である。

注 6）本連成手法では、建築外部空間の快適性の高精度な予測評価よりも、空間デザインの熱的評価による設計支援に主眼をおいているため、空間内の潜熱移動までの連成とはしていない。しかしながら、樹木、芝、裸地の蒸散作用については、梅干野ら¹⁸⁾、片山ら¹⁹⁾の実測結果を元にした気温と日射量による表面温度の回帰式を熱収支シミュレーションに組み込み、空間全表面温度の算出上、蒸発潜熱を考慮している。外部空間デザインの評価上、空間内の潜熱移動の簡易な組み込みは今後の検討課題である。

注 7）熱収支シミュレーションにおいて、0.2m 均等メッシュを用いて複雑な空間形状の再現性を高めている関係上、本来であれば、各空間構成要素の材料・形状等の相違を考慮した高精度な対流熱伝達率算出のモデル化が必要である。しかしながら現段階では検討の過程にあるため、汎用されている方法として Jurges の式に拠った。デザインの相対的比較においては特に支障ないものとするが、今後の検討課題である。

注 8）表面温度算出のため、簡易に気温・風速の局所分布を考慮した時系列入力データを作成する方法としては、このほか、以下のような方法等が考えられる。①気流シミュレーションにて着目時刻の気温・風速分布を算出する。②着目時刻における上空気象データと各局所との気温比、風速比を求め、上空気象データの時刻変化より、各局所毎に 24 時間分の気温・風速の時刻別データを作成する。本方法の場合、上空と局所との気温比・風速比が日中常に成立することが前提となる。気温比の成立については、いくつか既往の実測報告²⁰⁾も散見するが、樹冠配置も含めた複雑な空間形状の中での各局所と上空気象データとの間の時刻毎の相関関係については明確になっておらず今後の検討課題である。一方、風速比については一定風向下での成立¹⁴⁾は確認されているものの、上空気象データ上、本来、風向も時刻変化して一定ではなく、風向変化によって風速比そのものが大きな影響を受ける。以上より、気温比・風速比の常時成立を原則前提とせず、風向も含め着目時刻と 1 時刻前の上空気象データより局所分布を求める「定時解析手法」のほうがより実現象に対して現実的である。ただし、「定時解析手法」において、着目時刻の 1 時刻前を 2 時間前とする場合については、着目時刻直前の 1 時間前の局所毎の気温・風速に限っては、本方法により便宜的に算出している。

注 9）街区モデルを熱容量が大きくかつ反射率の高い材料によって構成し、また、樹木等による日射遮蔽が全く無い空間とすることで、熱放射環境が居住域気温分布に影響を及ぼしやすい状況にして、夏期の熱環境が劣悪になる場合を前提としている（なお、日射吸収率はモルタル、アスファルトいずれも 0.8 とした）。その上で街区モデル内に、直達日射の影響を昼中通じて受けやすい地点、日射遮蔽の影響を受けやすい地点、ガラス面からの鏡面反射の影響を受けると想定される地点等、実際の街区にて熱放射環境的な特徴が予想される地点を a～f ま で設定して表面温度を算出し検討を行った。熱放射環境改善が考慮された街区モデル等についても今後同様に確認を行っていききたい。

注 10）上空気象データには、東京の 8 月の晴天日の標準気象データを用いた。また、居住域レベルにおける局所データは、大幅な差異がみられる状況を想定して、①上空の気温時系列データに対して気温は解析対象時刻で約 5℃ 差、②また、上空の風速時系列データに対して風速は最大 0.1 倍程度の差をつけたデータを作成し、空間内ではこのような局所気温・風速が一様に分布するとして与えている。実際には、空間内の全居住域でこのような大きな差異がつくことは考えにくい、定時解析手法の妥当性検証のため、本前提のような厳しい条件の場合を想定した。なお、前述以外の水平面全天日射量等は、標準気象データをもとに与えた。注 11）「1 時刻前＝着目時刻－2 時間」をケース③とした場合、地点 b のケース②との表面温度差は 0.5℃ 以下であった。1 時刻前の時間を長くするほど、ケース②、③の表面温度差は小さくなるが、”注 8）”に示

した方法を踏襲することになり、定時解析手法から外れ問題が残る。

注 12) 局所風速考慮時、「1 時刻前=着目時刻-3 時間 or 4 時間」をケース③とした場合、地点 b のケース②との表面温度差は、1℃前後となるが、「注 11)」に示した気温の場合と同様、本定時解析手法から外れ問題が残る。風速に関する定時解析手法の採用に当たり、特に風速は対流熱伝達に大きな影響を及ぼすことから、適用可能範囲についての確認を行った。

注 13) 連成反復計算において、第 1 回目の計算(表 1 中 A 1)結果と、第 2 回目の計算(表 1 中 A 2)結果の差が大きいほど計算時間の短縮化に影響を及ぼす。従って、表面温度分布幅、及び気温・風速の空間分布幅が出来るだけ大きくなることを考慮して、建物間北面側が日影になる時間帯が長く、かつ、南北方向の敷地内通路は風が通り抜け、建物間は気流が停滞し、建物間の北面側に熱気溜りが生じやすい空間形状とした。なお、街区の領域外の状況は全て空気(3.3℃)として計算を行った。

注 14) 計算条件の概要は以下のとおり。

- ・気象データ：東京の 8 月の晴天日の標準気象データ
- ・日射吸収率：モルタル、アスファルトいずれも 0.8
- ・気流解析の計算条件：

流入条件	$U \propto Z^{-1/4}$ ($Z=74.6\text{m}$ にて 3m/s)、 $\varepsilon = C_\mu^{-1/2} k \partial U / \partial Z$ 、 $C_\mu=0.09$
壁面条件	一般化対数則
上空・側面	Free Slip

注 15) 気流シミュレーションを先行して行う場合については、以下の手順となる。まず、解析対象時刻の上空気象データの風速をもとに、気流シミュレーションにて等温解析を行う。算出した風速分布とともに、空間内気温分布一様、初期表面温度=気温として、時刻別表面温度分布を熱収支シミュレーションにて算出する。次に、解析対象時刻とその 1 時刻前の表面温度分布を気流シミュレーションの境界条件として、2 時刻分の気温・風速分布を求める。これをもとに熱収支シミュレーションによる気温・気流分布時系列データとして定時解析手法を用いて表面温度分布を求める。本手順を適用した結果、A 1～A 2 では、空間全表面による面平均表面温度差は 1℃程度となり、熱収支シミュレーション先行の場合よりも表面温度差は低減化した。しかしながら、場所によっては、2℃以上の表面温度差があることから、A 2 で連成を終了できず、A 2～A 3 すなわち 3 回目の気流シミュレーションが必要になり、計算負荷削減に寄与しない。従って、連成システム構築にあたっては、熱収支シミュレーション単独での使用の可能性も考慮して、まず、熱収支シミュレーションにて表面温度分布を求めるのを原則とした。

一方、図 12 の街区モデルよりも空間内の風速分布がより偏在化する空間形状を対象として図 11 の手順にて連成した場合、A 1～A 2 の表面温度差は表 1 の結果よりも大きくなる傾向にあるが、A 2～A 3 の差が A 1～A 2 の差に較べて大幅に低下する傾向は概ね同様であった。

【本研究に関連する既発表文献】

- 1) 山村真司、梅干野晃、松永恒雄、北村規明：熱収支・気流連成シミュレーション手法の提案(その 1) 建築外部空間のバイオクリマティックデザインのための設計支援手法(その 1)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.891～892、1999 年 9 月、(その 2)、同上、pp.893～894、(その 3)、同上、pp.895～896

【引用文献】

- 1) 谷本潤、Douglas BALKOM、片山忠久、萩島 理：LOW-ENERGY BUILDING 設計支援ツールとしての ENERGY-10 に関する報告、日本建築学会技術報告集、第 9 号、pp.153～158、1999 年 12 月
- 2) 樋口佳樹、宇田川光弘、佐藤誠、木村健一：建築屋外における日射と長波長放射の計算モデル—周囲環境を考慮した住宅の熱負荷シ

ミュレーションに関する研究—、日本建築学会計画系論文集、第 544 号、pp.9～15、2001 年 6 月

- 3) 村上周三、持田灯：関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係 Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析、日本建築学会計画系論文集、第 491 号、pp.31～39、1997 年 1 月
- 4) 森川康成、工藤圭子、小野浩志、西村正和：市街地における温熱環境の予測・評価手法の検討 Rapid Prototype 技術の適用、日本建築学会学術講演梗概集、pp.869～872、1997 年
- 5) 吉田伸治、大岡龍三、持田灯、富永禎秀、村上周三：樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外熱環境緩和効果の検討、日本建築学会計画系論文集、第 536 号、pp.87～94、2000 年 10 月
- 6) 原山和也、村上周三、吉田伸治、大岡龍三、持田灯：非定常対流・放射・伝導を考慮した屋外温熱環境予測評価手法に関する研究(その 1) 実在街区を対象とした非定常の放射・伝導解析の精度検証、日本建築学会学術講演梗概集、pp.925～926、2001 年 9 月
- 7) 谷本潤、林徹夫、片山忠久、大濱淳司、空間幹雄：建築—都市—土壌連成系モデルによる都市高温化要素の定量的比較に関する研究 第 1 報 理論構成手法と基本解、日本建築学会計画系論文集、第 504 号、pp.87～93、1998 年 2 月、をはじめとして、同計画系論文集、第 510 号、pp.53～60、1998 年 8 月、同計画系論文集等
- 8) 例えば、斎藤雅也、宿谷昌則：「涼しさ」を感じる気流に関する屋外での実測とその解析、日本建築学会計画系論文集、第 523 号、pp.39～44、1999 年 9 月
- 9) 山村真司、梅干野晃、浅輪貴史：建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発、日本建築学会計画系論文集、第 554 号、pp.85～92、2002 年 4 月
- 10) 例えば、P・G・ロウ著、奥田健二訳：デザインの思考過程、鹿島出版会、1993
- 11) 例えば、和田浩一、西村伸也、高橋和也、周博、高橋鷹司：3D-CAD を用いた設計手法に関する研究、設計教育における準実験的試み その 2、日本建築学会計画系論文集、第 549 号、pp.169～176、2001 年 11 月
- 12) 吉田伸治、村上周三、持田灯、大岡龍三、富永禎秀、金相璠：対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析、日本建築学会計画系論文集、第 529 号、pp.77～84、2000 年 3 月
- 13) Akinaru Iino, Akira Hoyano: Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data, ENERGY AND BUILDING, pp.199～205, 1996
- 14) 新建築学大系編集委員会：新建築学大系 8 自然環境 第 3 章風論、彰国社、1989 年 5 月
- 15) 環境工学委員会・空気環境小委員会・風環境数値計算 WG：CFD を利用した高層建物周辺の風環境予測手法の開発—その 1—ベンチマークテストによる各種 $k-\varepsilon$ モデルの相互比較—、日本建築学会技術報告集、第 12 号、pp.119～124、2001 年 1 月
- 16) Yamada T.: A Numerical Model Study of Turbulence Airflow in and above a Forest Canopy, J. of Meteorol. Soc. Japan 60, pp.439～454, 1982
- 17) 山村真司、梅干野晃、松永恒雄、白澤多一、浅輪貴史、清水敬示：熱環境に配慮した建築外部空間の実現化を目的とした設計支援手法(その 3) 標準型 $k-\varepsilon$ モデルを用いた樹木が通風効果に及ぼす影響の予測、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1135～1136、2000 年 9 月
- 18) 梅干野晃、萩原賢二：屋上の芝生植栽による照り返し防止・焼け込み防止効果、日本建築学会環境工学論文集、pp.133～140、昭和 58 年 11 月
- 19) 下川幸司、片山忠久、林徹夫、谷本潤、何平、池沢紀幸：樹木のある街路の熱環境予測その 5、実測に基づく樹冠部熱特性に関する検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.131～132、1996 年 8 月
- 20) 例えば、中村泰人、平岡久司、西村浩一：市街地空間における気温分布性状に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文集、第 364 号、pp.48～55、昭和 61 年 6 月

(2002 年 1 月 9 日原稿受理、2002 年 7 月 5 日採用決定)