

都市スケール移流拡散現象の素過程抽出と 次世代乱流モデルの構築

Elementary Processes of Convective and Diffusive Transport in
Urban Environment and Next-Generation Turbulence Modeling

長野 靖尚 (NAGANO YASUTAKA)

名古屋工業大学・工学研究科・プロジェクト特任教授



研究の概要

都市エネルギー消費問題に対処するための基盤技術として、熱や有害ガス、浮遊粒子状物質などの移流拡散過程を正しく予測・評価できる熱流体解析法（乱流モデル）の確立が強く要請されている。そのため、移流拡散現象の解析法として十分な実績がある工学乱流モデルを基軸として、都市スケール移流拡散現象の予測・評価に適用できる次世代乱流モデルを構築した。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：移流拡散，都市スケール，乱流モデル

1. 研究開始当初の背景

都市に人口，交通，物流が集中し，多量のエネルギーと物資が局所的に消費されている。その結果，ヒートアイランド現象，大気汚染など都市環境は悪化の一途をたどっている。都市環境問題を詳細に分析し現状を正しく把握するには，排熱や大気汚染物質（NO_x，浮遊粒子状物質など）の移流拡散過程を正しく予測・評価できるモデルが必要とされている。ところが，都市部における熱や物質の移流拡散過程は，建物群や丘陵（複雑地形）が存在するために単純な平原のそれとは比較にならないほど複雑である。現在の乱流モデルは，これを高い精度で再現できるレベルにはないため，モデルの構築が急務である。

2. 研究の目的

都市スケール移流拡散現象の予測技術の基礎となる，次世代乱流モデルの開発を目的とした。具体的には，1）都市スケールの熱・物質移流拡散現象を工学的な視点から解明し，素過程を抽出する；2）移流拡散現象を再現する信頼性の高い素過程乱流モデルを開発し，それを統合して次世代乱流モデルを構築することである。

3. 研究の方法

計画全体は，「素過程の抽出と乱流モデルの統合」，「検証用データの蓄積と整備」という互いに連携する2つの計画で構成した。すなわち，開発した乱流モデルを実験および直接数値シミュレーション（DNS）による計算結果のデータにより検証し，その結果をモデルの修正・改良（再構築）に反映

させるというサイクルで研究を推進した。

[購入物品と使用用途]

レーザ流速計2次元システム，ステレオPIV（画像処理流速計）を導入し，剥離・再付着現象を伴う熱流動現象の計測，観察を行った。また，パーソナルスーパーコンピュータを導入し，直接数値シミュレーションの実施と，データベースの保存に用いた。

4. 研究の主な成果

4.1 都市スケール移流拡散現象の数理モデル

ミクロスケール（機器スケール）からメゾスケール（都市スケール）にわたる熱・物質輸送現象の素過程（運動量輸送，熱対流，分子・乱流拡散，物質輸送）と，都市スケール移流拡散現象を大きく左右する物理的な境界条件を考慮した次世代乱流モデル開発のために，浮力乱流に対応できる非線形RANSモデル等3つのRANSモデルを新たに開発した。そして，本研究で実施したDNSと実験のデータを用い，これら新モデルを含め，代表的なLESとRANSモデルを評価した。乱流境界層におけるLESモデルの評価では，対数領域から境界層外層に至る領域での予測精度の低下を確認し，外部流れにおけるLESモデル予測特性を初めて明らかにした。温度成層乱流境界層の評価では，開発したRANSの知見を反映したLESのSGSモデルが成層乱流の予測に有効であるとの結論を得た。以上から，都市環境における流れの非定常性と地形や建造物を構成する多様な壁面の存在を考慮すれば，LESとRANSモデルのそれぞれの優れた特性を合理的に複合した数理モデル（Hybrid LES/RANSモデル）が，次世代乱

流モデルに最適であるとの結論に達した。

4.2 移流拡散現象の素過程の抽出と直接数値シミュレーション

都市環境における乱流熱・物質伝達の素過程が顕在化する温度成層境界層を基本に、地形の急激な変化を要因とする前向きステップを通過する温度成層乱流境界層、汚染物質の拡散を要因とする温度成層乱流境界層内の濃度場等 6 種類の DNS を実施した。これらの DNS より、様々な流体力学因子が作用する乱流境界層における乱流特有の構造と乱流生成過程の抽出に成功した。

4.3 熱輸送現象の素過程の抽出と風洞実験

2 次元丘を通過する乱流境界層の速度場と温度場をレーザ流速計 (LDV)、画像処理流速計 (PIV)、 $0.63\ \mu\text{m}$ の極細冷線等を用いて測定した。実験では、これまでに確立した独自の乱流測定法とデータ処理法を活用して、速度場と温度場の全体像を明らかにした。更に、速度場素過程と熱の移流拡散過程を解明するために、線径 $3\ \mu\text{m}$ の熱線 10 本と線径 $0.63\ \mu\text{m}$ 冷線 5 本を組み合わせ、速度・温度変動の多点同時測定プローブを開発した。これにより、圧力勾配が強く作用する環境流れの、速度場と温度場の時空間構造の解明に初めて成功した。

4.4 複雑乱流場における熱・物質移流拡散過程の解明

汚染物質の拡散過程を知るために、2 次元丘上流の一点からエチレン C_2H_4 を放出し、丘下流の剥離域におけるエチレン濃度場の特性を調べた。実験では、放出源が丘上流の壁近傍にある場合 (地表面を想定) と空中にある場合 (建物や煙突を想定) を比較した。いずれの場合も、丘の存在が物質拡散に非常に強く作用して、分布は急拡大するが、放出源が地表面近傍にある場合の方が横方向 (スパン方向) により広く拡散することが明らかになった。これらの知見は都市環境における汚染物質の拡散を評価する際の基礎となる知見であり、次世代乱流モデルの試金石となるデータである。

4.5 素過程モデルによるリアルタイムシミュレーション法の開発

リアルタイムシミュレーションには、(1) 適切な素過程モデル、(2) 複雑地形や建造物等の複雑な境界条件の表現、(3) 効率的な非定常計算が主に要求される。都市の複雑境界条件を表現するために、境界埋込み法と境界適合法を適用した複雑境界条件非定常流体解析スキームを完成させた。次いで、開発した Hybrid LES/RANS モデルと上記スキームを組み合わせ、リアルタイムシミュレーション法を構築した。完成させたリアルタイムシミュレーション法を評価するために、本研究で実施した 2 次元丘乱流境界層の実験結果や、DNS と LES

の計算結果と比較を行い、本法の予測精度の高さを確認した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究の温度成層乱流境界層での様々な DNS は、世界に先駆けて実施されたものであり、乱流モデル構築の基礎データとしての普遍的価値に留まらず、乱流物理における素過程抽出といった貴重な学術的知見を得ていて、国内外で高く評価されつつある。

乱流中における熱・物質拡散における速度・熱/物質相関値は、重要な物理量であるが、その計測には高度な技術を要する。本研究の LDV、PIV、極細冷線を駆使した熱流体計測法は、それらを高精度で計測できる方法であり、乱流計測法の進展に多大に寄与する技術である。また、濃度計測では、地形の影響で濃度分布に偏向が出ることを見出し、都市の周囲に山岳がある場合の汚染物質拡散予報に重要な知見を与えるものと期待される。

本研究における乱流モデル構築手法は、気象現象も含めた様々な乱流熱・物質輸送現象の予測精度を向上させる手法として注目され、開発した素過程モデルによるハイブリッドモデルシミュレーション法は、都市災害や汚染物質拡散のより高精度な予測技術に結びつくものと考えている。

6. 主な発表論文

- 1) 服部博文・梅原孝年・田川正人・長野靖尚，“温度成層乱流境界層における LES/Hybrid シミュレーションの予測評価,” 第 24 回生研 TSFD シンポジウム講演論文集, pp. 70-77, 2009.
- 2) T. Houra and Y. Nagano, “Spatio-Temporal Turbulent Structures of Thermal Boundary Layer Subjected to Non-Equilibrium Adverse Pressure Gradient,” *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 591-601, 2008.
- 3) T. Houra, M. Tagawa and Y. Nagano, “Turbulent Heat and Fluid Flow over a Two-Dimensional Hill,” *Proc. 7th International ERCOFTAC Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, Limassol, Cyprus, pp. 268-273, 2008.
- 4) H. Hattori, T. Houra and Y. Nagano, “Direct Numerical Simulation of Stable and Unstable Turbulent Thermal Boundary Layers,” *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1262-1271, 2007.
- 5) H. Hattori, A. Morita and Y. Nagano, “Nonlinear Eddy Diffusivity Models Reflecting Buoyancy Effect for Wall Shear Flows and Heat Transfer,” *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, pp. 671-683, 2006.

原著論文 17 編, 国際会議 (査読有) 27 編, 基調講演 1 件, 特許申請 1 件, 国内会議多数
ホームページ

<http://heat.mech.nitech.ac.jp/kaken-s/index.html>