

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（S）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17106003
 研究課題名（和文） 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
 研究課題名（英文） Elementary Processes of Convective and Diffusive Transport in Urban Environment and Next-Generation Turbulence Modeling
 研究代表者
 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
 研究者番号：20024325

研究成果の概要：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。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|-------------|
| 2005年度 | 45,800,000 | 13,740,000 | 59,540,000 |
| 2006年度 | 21,700,000 | 6,510,000 | 28,210,000 |
| 2007年度 | 8,900,000 | 2,670,000 | 11,570,000 |
| 2008年度 | 4,400,000 | 1,320,000 | 5,720,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 80,800,000 | 24,240,000 | 105,040,000 |

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。

4. 研究成果

(1) 都市スケール移流拡散現象の数理モデル

ここで検討する数理モデルは, 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 (例えば, 流れの曲り, 衝突, 剥離・再付着, 温度成層など) を考慮しなければならない。本研究の目的である次世代乱流モデル開発のために, 様々な乱流モデルを開発・評価し, その結果から新たな乱流モデルの提案へと繋げた。

① 複雑地形を有する乱流場に適合する低負荷 RANS モデルの開発

都市環境には地形や建造物など多様な壁面が存在するため, 壁面の影響をいかに適切にモデル化できるかが鍵である。従来の低レイノルズ数型 RANS モデルでは, 壁面特性関数を規定する特性長さとして壁面からの距離が利用されている。そのため, 計算格子点と壁面との最短距離を常に算出する必要があり, 様々な形態の壁面が多数存在する場に適用すると, 計算負荷が急増する。そこで, 本研究では, 壁乱流の素過程を考慮して, 壁面からの距離を用いない RANS モデルを開発し, その有効性を実証した (図 1)。開発したモデルは複雑な曲面からなる 2 次元丘周りの乱流温度境界層の成立過程を高い精度で再現できる。さらに, 渦粘性輸送方程式を直接解くことにより, 計算負荷を格段に軽減できる低レイノルズ数型 1 方程式モデルも新たに開発した。

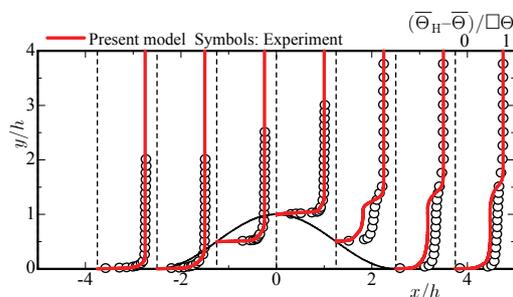


図 1 : 開発した壁面影響関数モデルによる本研究の風洞実験温度場の予測

② 浮力乱流に適用できる非線形 RANS モデルの開発

大きなスケールの移流拡散現象では浮力がその全容を支配する場合がある。しかし, 従来の勾配拡散型モデルは計算負荷は低いものの, 浮力の効果を適切にモデルへ反映させることはほぼ不可能であった。そこで, 浮力の影響を適切に表現できる応力・熱流束モデルの骨子を勾配拡散型モデルに反映することで, 実用性の高い非線形 RANS モデルを開発し, 大気不安定成層および不安定成層を伴う乱流場を高い精度で予測することに成功した。さらに, これを LES 用 SGS モデルに適用するなどして, 次世代乱流モデルへの基礎を構築した。また, この浮力乱流計算法は, 他に類を見ないので特許出願した。

③ DNS, 実験データベースを用いた LES, RANS モデルの評価

本研究で実施した DNS と実験のデータベースを用いて, 代表的な LES, RANS モデル, および新規に開発した上述の乱流モデルと LES 用 SGS モデルをそれぞれ評価した。一般に, 非定常性が強い流れでは LES モデルが, 定常かつ壁面の影響が強い流れでは RANS モデルがより良い予測結果を与えることが知られている。従来, LES モデルの評価は主に内部流であるチャンネル乱流で行われており, 都市環境で支配的な外部流れ (乱流境界層) を対象としたモデル評価は皆無であった。そこで, 本研究成果の一部である乱流境界層の DNS データベースを用いて LES モデルの予測特性を初めて明らかにするとともに, 対数域から外層にわたる広い領域で予測精度が低下する問題を見出した。同様の評価を温度成層を伴う乱流境界層について行ったところ, ②の LES 用 SGS モデルが優れた予測性能を示した。一方, RANS モデルについては, 後述する温度場を伴う 2 次元丘を越える乱流境界層の実験データから, ①の複雑地形に対応できる低負荷 RANS モデルが最良の予測値を与えることが分かった。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 モデルそれぞれの特長を最大限まで活用する数理モデルが, 次世代乱流モデルの基礎であるとの結論に達した。

(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

本研究では, パーソナルスーパーコンピュータと大型計算機センターのスーパーコンピュータを併用し, 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 DNS を以下のとおり実施した。

- ① 大気不安定成層または不安定成層を要因とする温度成層乱流境界層
- ② 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（標高差による地形の段差や岸壁などを想定）

③ 都市やその周囲の地形を模擬する 2 次元丘（曲壁）を通過する熱対流を伴う乱流境界層

④ 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

⑤ 建造物を模擬する 2 次元矩形ブロックを通過する乱流境界層の熱輸送と濃度拡散

⑥ 建造物に囲まれた空間の熱伝達と遠心力の効果を要因とする回転矩形管内の乱流熱伝達

以上の DNS は世界に先駆けて実施されたものも多く、この研究分野を先導する成果を本研究は着実に生み出している。なかでも、様々な要因が乱流構造や移流拡散過程に及ぼす影響を定量化し、素過程の抽出に成功したことは重要な成果である (図 2, 図 3)。DNS が生成する膨大なデータはデータベースとして系統的に整備され、(1) で述べたように都市スケール移流拡散現象の数理モデルの構築で活用された。

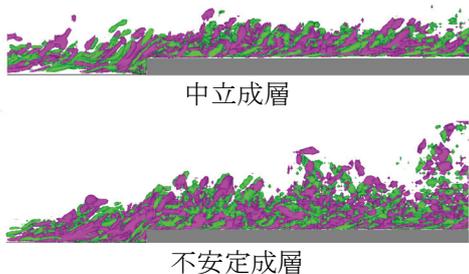


図 2 : 前向きステップを通過する温度成層乱流境界層の DNS と乱流渦構造の抽出

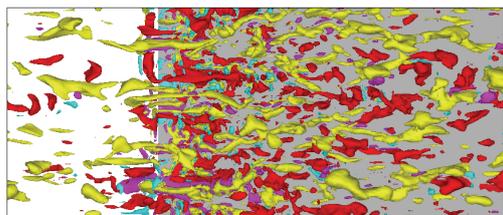


図 3 : DNS による乱流瞬時素過程運動の可視化, 水色 : 外向きインターアクション, 黄色 : イジェクション, 桃色 : 壁向きインターアクション, 赤 : スイープ

(3) 熱輸送現象の素過程の抽出と風洞実験

① 多点熱線・冷線プローブによる壁近傍の乱流熱輸送機構

速度場素過程と熱の移流拡散過程を説明するために、線径 $3\mu\text{m}$ の熱線 10 本と線径 $0.63\mu\text{m}$ の冷線 5 本を組み合わせて、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、圧力勾配が作用する流れの速度場と温度場の時空間構造の解明に成功した。

② 2 次元丘を通過する乱流境界層の速度場

と温度場の計測

高レイノルズ数の複雑乱流場の DNS は現在の計算機性能であっても困難である。そこで、新たに風洞を製作し、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), 線径 $0.63\mu\text{m}$ 冷線等を用いて測定した。実験では、独自の乱流測定法 (速度と温度の同時測定, 応答補償など) とデータ処理法 (乱流構造・統計解析) を駆使して、その全体像を明らかにした (図 4)。たとえば、丘上流の境界層厚さが背面に形成される剥離・再循環域の形成に多大な影響を及ぼすこと、強いレイノルズ剪断応力は丘背面の速度ゼロ境界 (一点鎖線) の上部を覆うように出現すること、温度場はこの領域をはさむように壁面近傍と主流の特性に支配される二重構造を有することなど、2次元丘周りの熱・物質輸送過程の支配要因を特定し、そこで生起する現象の理解に必須の知見を得た。

(4) 複雑乱流場における熱・物質移流拡散過程の解明

① 複雑乱流場の非定常挙動と分離加熱による現象解明

都市構成要素周りの移流拡散過程を説明するために、LDV と PIV を併用して 2 次元丘周り乱流場の非定常挙動を捕捉することに成功した。また、日射や火災による局所的な加熱の効果を知るために、丘の上流側と下流側壁面を分離加熱する実験を行った。これらの成果は、複雑乱流場における熱や汚染物質の移流・拡散・滞留という各過程の本質に関する重要な知見である。

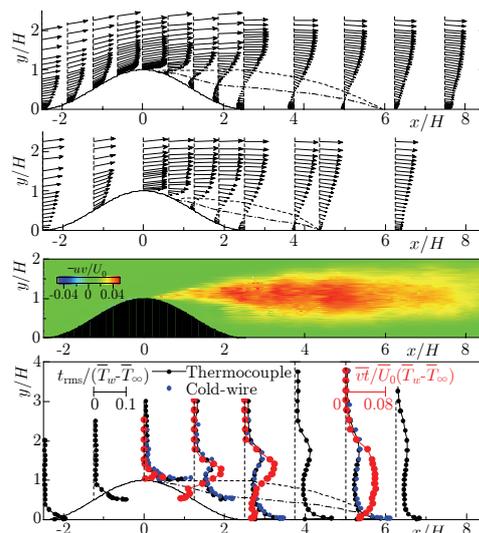


図 4 : 装置実験で得られた 2 次元加熱丘周りの速度場と温度場 : 流入境界層厚さの影響 (上図), レイノルズ剪断応力 (中図), 温度変動と乱流熱流束 (下図)

② 乱流境界層内の一点から放出される物質の拡散過程

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 (分子量 28, シュミット数=1) を放出し、丘下流の剥離域におけるエチレン濃度場の特徴を調べた (図5)。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: 左図の右下) と空中にある場合 (建物や煙突を想定: 右図の左下) を比較した。いずれの場合も、丘の存在が濃度拡散過程に非常に強く作用して、分布を急拡大させるが、放出源が壁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。これらの知見は都市環境における汚染物質の拡散過程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。

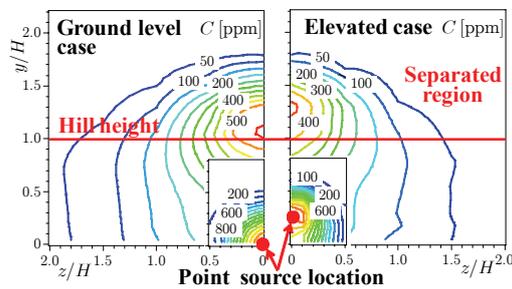


図5: 2次元丘の上流で点源供給されたエチレンの流れ方向断面濃度分布。放出源位置として地表面 (左) または煙突, 建物屋上等 (右) を想定

(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 複雑地形や建造物など複雑な境界条件の表現、③ 効率的な非定常計算法、が要求される。そこで、境界埋込み法と境界適合法を適用した複雑境界・非定常解析スキームを完成させるとともに、(1)②の成果によるハイブリッド LES/RANS シミュレーション (HLR) 法を確立し、リアルタイムシミュレーションの基盤を構築した。一例として、開発したハイブリッドモデルの予測結

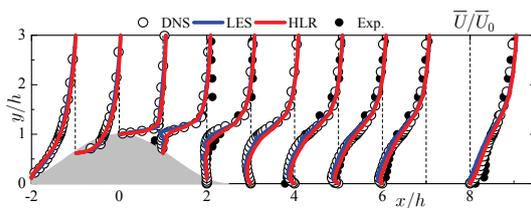


図6: 境界埋込み法 (DNS) と、境界適合法 (LES, HLR) を用いた2次元丘を通り過ぎる乱流境界層の計算。黒丸は本研究で行われた装置実験値

果 (赤) を実験 (黒), DNS (白丸), LES (青) と比較している (図6)。計算負荷が極めて小さい本リアルタイムシミュレーション法で、複雑な丘下流の速度場がDNSと同程度の精度で予測できることが実証された。

以上のとおり、数値実験 (DNS) と装置実験の連携・融合という独自のアプローチにより、都市スケール移流拡散現象の素過程を抽出し、次世代乱流モデルを構築した。これらは、学術的に高い価値を有するとともに、都市計画や防災などに資する高精度環境予測技術の基盤となる成果である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計18件)

- ① T. Houra and Y. Nagano, “Turbulent Heat and Fluid Flow over a Two-Dimensional Hill,” *Flow, Turbulence and Combustion*, 2009 (in press), 査読有。
- ② H. Hattori, N. Ohiwa, M. Kozuka, and Y. Nagano, “Improvement of Nonlinear Eddy Diffusivity Model for Rotational Turbulent Heat Transfer at Various Rotating Axes,” *Fluid Dynamics Research*, Vol. 41, 012402 (26 pages), 2009, 査読有。
- ③ 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, 査読有。
- 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, 査読有。
- 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, 査読有。

[学会発表] (計29件)

- 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シポジウム講演論文集, pp. 70-77, 2009年3月6日, 東京。
- ② H. Hattori, M. Tagawa and Y. Nagano, “Turbulent Structures and Modelling of Specially Developing Thermally-Stratified Turbulent Boundary Layers,” *Proc. 7th International ERCOFTAC*

Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements - ETMM7 -, pp. 175-180, June 4-6, 2008, Limassol, Cyprus.

③ H. Hattori and Y. Nagano, "New Advanced Two-Equation Heat Transfer Model for Complex Turbulent Thermal Fields," Proc. of CHT-08 : ADVANCES IN COMPUTATIONAL HEAT TRANSFER, May 11-16, 2008, Marrakech, Morocco.

④ Y. Nagano, "Recent Developments in DNS and Modeling of Rotating Wall-Turbulent Shear Flows with Heat Transfer," Proc. International Symposium on Frontiers of Computational Science 2005, December 12-13, Nagoya, Japan, 2005, 基調講演.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

「浮力を伴う乱流の流体的及び熱的諸特性の推定方法及び推定プログラム」, 長野靖尚, 服部博文, 森田昭生, 松井秀也, 特許コード P07A010289, 2006.9.28 公開, 特開 2006-258391.

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

研究者番号 : 20024325

(2) 研究分担者

田川 正人 (TAGAWA MASATO)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 80163335

保浦 知也 (HOURA TOMOYA)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号 : 00324484

服部 博文 (HATTORI HIROFUMI)

名古屋工業大学・技術部・技術専門員

研究者番号 : 30467352