

平成21年 4月30日 現在

研究種目：若手研究 (A)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18686015
 研究課題名（和文） 境界層乱流構造とスカラ輸送に及ぼす壁面ブロック効果
 と温度成層効果の相互作用の解明
 研究課題名（英文） Effects of wall blocking and thermal stratification on turbulence
 structure and scalar transfer in a turbulent boundary layer
 研究代表者
 長田 孝二 (NAGATA KOUJI)
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50274501

研究成果の概要：

乱流境界層の外部に存在する乱れが壁面近傍の乱流構造と熱輸送に及ぼす影響について、風洞を用いた室内実験と三次元直接数値計算 (DNS) により明らかにした。実験と DNS の結果、境界層外に存在する格子乱流によって、境界層内の速度変動とレイノルズ応力が著しく減少することがわかった。壁面からの熱輸送を伴う実験では、境界層外乱れによって境界層内の温度変動と鉛直方向熱フラックスも減少することが明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2007年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	23,400,000	7,020,000	30,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：環境流体力学，乱流輸送現象，乱流境界層，温度成層，壁面ブロック効果

1. 研究開始当初の背景

大気境界層乱流中での熱および物質の乱流輸送機構を明らかにすることは、局所的な気象予測を行ううえで、また、生活圏内での熱や汚染物質の拡散予測を行ううえで極めて重要である。特に、日射により地表面が温められることにより発生する浮力対流の問題は、大都市で見られるヒートアイランド現象やその中で熱や汚染物質の拡散機構を明らかにするうえでも重要である。大気境界層に代表される境界層乱流に対する従来の考えは、壁面のごく近傍で気流のせん断によって乱れがつけられ、それが壁面上方へと輸

送されるという、いわゆる‘bottom up’の考えである。境界層外に乱れが存在しない場合にはこの概念は正しく、これまでの研究によってその構造が詳細に調べられてきた。ところが、現実の大気乱流を考えてみれば明らかのように、乱流は地表近くの気流の速度勾配によってつくられるのみではなく、上空のせん断層や、または、風上域に存在する高層建造物によってもつくられる。このような場合には、境界層外乱れの壁面ブロック効果が、壁面近傍の乱流構造に影響を及ぼすことが考えられる。しかし、これら境界層外乱れの影響についてはこれまでの研究では十分に

明らかにされていなかった。もしも境界層外乱れが壁面近傍の乱流構造に影響を及ぼすのであれば、境界層外乱れの影響を無視した乱流場での実験や数値計算結果に基づいてつくられた既存の乱流モデルは大きな欠陥を有することになる。また、この問題は環境アセスメント等に役立つのみならず、伝熱装置等の工業装置の性能評価や最適設計問題とも関連して重要である。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究では、①成層がない壁面上境界層乱流、②浮力対流を伴う対流混合層、の中でのスカラー（熱）輸送に及ぼす境界層外乱れの影響を風洞を用いた室内実験と直接数値計算の両面から明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 壁面ブロック効果に関する実験研究

①平板乱流境界層に及ぼす壁面ブロック効果に関する実験研究

風洞入口部に設置した乱流格子によって作り出される境界層外乱れがない場合とある場合で乱流境界層内の乱流統計量を測定し、境界層外乱れが壁面近傍の乱流構造に及ぼす影響を明らかにする。さらに、下壁面を加熱した不安定成層条件でも実験を行い、境界層外乱れと温度成層効果が壁面近傍の乱流場に及ぼす影響を明らかにする。瞬間速度の測定には、Xワイヤプロブを用いる二成分瞬間速度測定用熱線風速計を、瞬間温度の測定にはI型プロブを用いる抵抗線温度計を用い、二成分瞬間速度と瞬間温度の同時計測を行う。また、I型プロブ列による速度の多点計測を行う。

②コーナー近傍における壁面ブロック効果に関する実験研究

格子乱流内にコーナー板を設置し、コーナー板の壁面ブロック効果によって生じる二次流れを測定する。測定には三成分瞬間速度測定用熱線風速計を用い、二次流れとレイノルズ鉛直およびシアストレスを計測し、線形解析結果との比較を行う。

(2) 外部乱れとしての格子乱流の数値計算

数値計算で実験と同様の境界層外乱れを生成するため、格子乱流を高精度で計算できる数値スキームを開発する。格子表面での境界条件を満足させるための方法としては埋め込み境界法を用いる。乱流格子としては通常の正方格子および強い乱流を生成できることが実験的に報告されているフラクタル格子を用いる。

(3) 格子乱流と乱流境界層の相互作用に関する数値計算

上述の乱流格子によって生成された乱れを空間発展乱流境界層に流入させて計算を行う。計算領域をドライバー部とテスト部に分割し、ドライバー部で格子乱流を生成した後、発達した格子乱流の任意の流動場をテスト部に流入させる。

4. 研究成果

(1) 壁面ブロック効果に関する実験研究

①平板乱流境界層に及ぼす壁面ブロック効果に関する実験研究

壁面上の乱流境界層の時空間構造を調べるために、まず、境界層外乱れの壁面ブロック効果がない通常の乱流境界層において、21点I型熱線プロブによる多点瞬間速度と壁面に埋め込んだ圧力センサによる壁面瞬間圧力の同時測定を行った。測定された瞬時データにVITA法および本研究で開発した大規模渦検出アルゴリズムを適用することにより境界層の大規模渦構造と壁面近傍のバースト渦を検知し、それらの構造を明らかにした。その結果、壁面バーストとバルジまたはバレイと呼ばれる境界層の大規模渦構造の間には密接な関連があることがわかった。

次に、乱流境界層の外部に格子乱流が存在する場合について風洞を用いた実験を行い、境界層外の格子乱流が壁面近傍の乱流構造に及ぼす影響を明らかにした。その結果、境界層外に存在する格子乱流によって、境界層内の速度変動とレイノルズ応力が著しく減少することがわかった（図1および図2）。

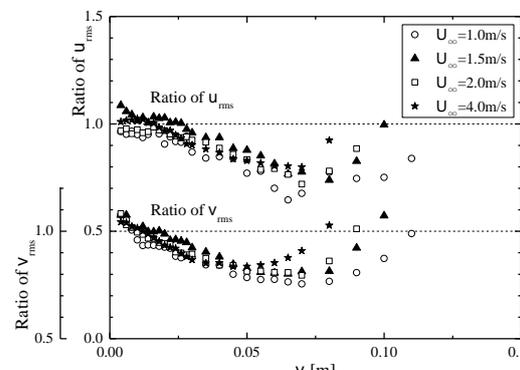


図1 境界層外乱れ（格子乱流）による乱流境界層内の速度変動 rms 値の減少率

また、それぞれの輸送方程式に現れる生成項を評価した結果、格子乱流が存在する場合には生成項が著しく減少しており、それが境界層内の速度変動とレイノルズ応力の減少に起因していることがわかった。さらに、下壁面を加熱した場合についても同様の実験を行い、乱流境界層内の熱輸送に及ぼす格子乱流の影響を明らかにした。

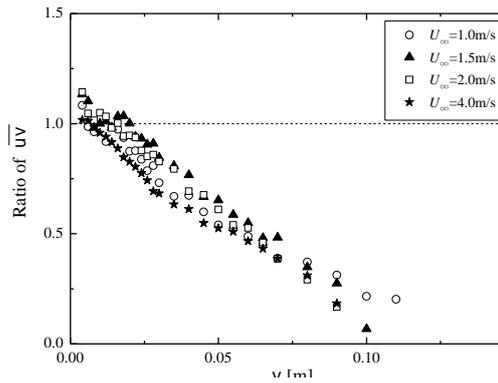


図2 境界層外乱れ（格子乱流）による乱流境界層内のレイノルズ応力の減少率

その結果、速度乱れやレイノルズ応力と同様、温度乱れと壁面からの乱流熱輸送も格子乱流によって著しく減少することが明らかになった。（温度変動 rms 値と鉛直方向熱フラックスの減少率を図3および図4に示す）。さらに、この減少率が成層の強さによって変化することが明らかになった。

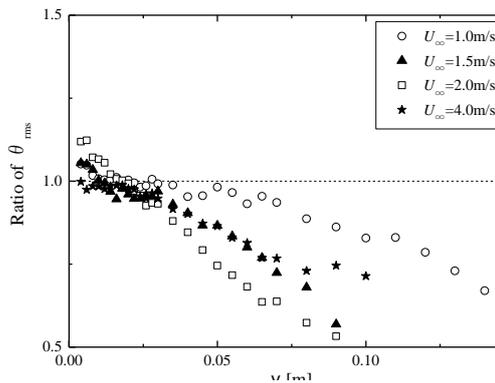


図3 境界層外乱れ（格子乱流）による温度変動 rms 値の減少率

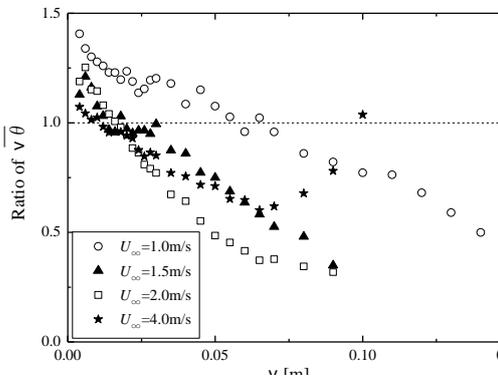


図4 境界層外乱れ（格子乱流）による鉛直方向熱フラックスの減少率

これらの結果は過去に報告されている結果（外部乱れがあると境界層内の乱れやフラックスが増加する）と全く異なっており、そのメカニズムについては今後更に詳しく調べる必要がある。特に、境界層外乱れの乱流特性長と境界層厚さが重要なパラメータであることが過去の研究により指摘されているので、より広範な条件で実験を行う必要がある。また、現在、大型風洞を用いて安定成層条件まで含めた温度成層条件について実験を行っているが、外部乱れを組み込むには至っておらず、今後の研究課題である。

② コーナー近傍における壁面ブロック効果に関する実験研究

風洞実験の結果、乱れのない一様流にコーナー板を入れた場合には二次流れが発生しないのに対して、格子乱流中にコーナー板を入れた場合には図5に示すようにコーナー近傍で二次流れが発生することが示された。壁面ブロック効果に基づく理論解析と比較した結果、実験結果と解析結果はよく一致し、壁面ブロック効果によって二次流れが発生することが示された。

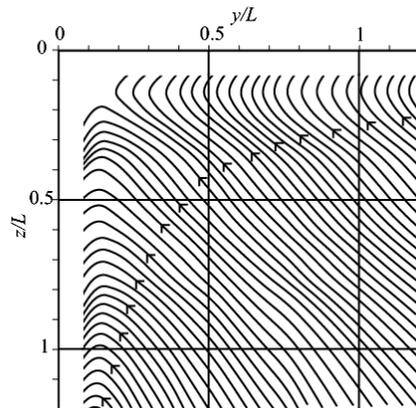


図5 壁面ブロック効果によるコーナー近傍での二次流れ（流線）。格子乱流がない場合には二次流れは発生しない。

(2) 外部乱れとしての格子乱流の数値計算

実験で用いた格子乱流場を再現できる三次元直接数値計算 (DNS) コードを開発した。格子表面での境界条件を満足させる方法として、ナビエ・ストークス (NS) 方程式に外力項を付加して解く方法を用いることで、高精度な解を高効率に得ることができた。対流項と圧力項に対して四次精度の保存型中心差分を、粘性項に対して六次精度のコンパクトスキームを用いることで空間解像度を飛躍的に向上させた。一様流の乱れに関しては、通常の格子乱流のみならず、0型フラクタル格子、I型フラクタル格子、無せん断混合層、

の4種類の外部乱れを生成するプログラムを作成した。これにより、一様流の乱れの強さや種類による壁面乱流境界層の変化を調べることが可能となった。計算結果の一例として、フラクタル格子乱流の計算結果を可視化したものを図6に示す。

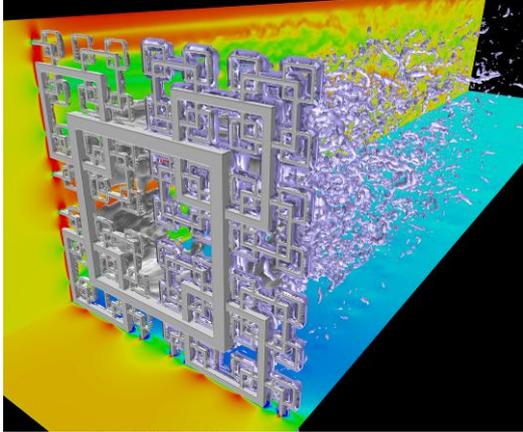


図6 フラクタル格子による強い外部乱れの生成。下面コンターは瞬間圧力（赤：高压 → 青：低压），奥面コンターは瞬時流速（赤：高速 → 青：低速），紫は渦構造と関連する速度こう配テンソルの第二不変量 Q の等値面を示す。速度零の等値面によってフラクタル格子が可視化されている。

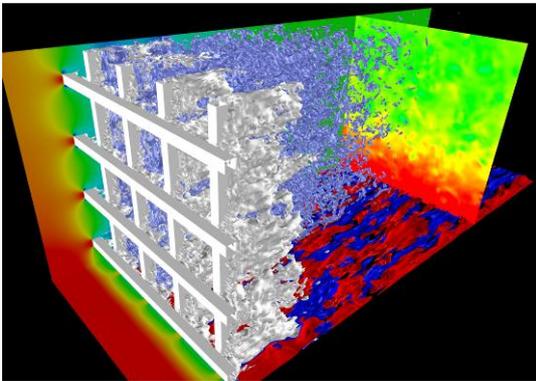


図7 正方格子乱流と壁面上乱流境界層の相互作用。コンターは瞬間圧力（赤（高压）→ 青（低压）），白は瞬時流速 $U=0$ の等値面，紫は速度こう配テンソルの第二不変量 Q の等値面，下壁面近傍の赤色および青色部分はストリーク構造を示す。

(3) 格子乱流と乱流境界層の相互作用に関する数値計算

格子乱流と乱流境界層の相互作用を計算する方法として、実験と同様に平板境界層上流に乱流格子がある場合（計算結果を可視化したものを図7に示す）、および、計算領域

をドライバー部とテスト部に分割し、ドライバー部で格子乱流を生成した後、発達した格子乱流の任意の流動場をテスト部に流入させる場合についてプログラムを作成した。実験と同様の条件で計算を行った結果、格子乱流によって境界層内の速度乱れやレイノルズ応力が減少することがDNSによっても示された。また、スカラー輸送を伴う場合には、格子乱流によって壁面からのスカラー輸送が減少し、実験結果とも一致した。今後は様々な流動条件で計算を行うとともに、乱れやフラックス増減のメカニズムを明らかにする必要がある。

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 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, フラクタル格子により生成されるマルチスケール誘起乱流の構造とスカラー拡散機構第1報, DNSによるフラクタル基本形状の影響に関する検討, 日本機械学会論文集(B編), 75巻755号, (2009), 印刷中, 査読有
- ② H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, DNS of Passive Scalar Field with Mean Gradient in Fractal-Generated Turbulence, Proc. of the 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, (2009), 印刷中, 査読有
- ③ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, 有限差分法を用いた平行平板間乱流DNSの精度向上について(粘性項へのCompact Schemeの導入による散逸領域の高解像度化の試み), 日本機械学会論文集(B編), 75巻752号, 642-649頁, (2009), 査読有
- ④ Y. Sakai, K. Nagata, H. Yokoi, T. Kubo and H. Shimogata, Experimental Study on Relationships between Large-scale Coherent Motions and Bursting Events in a Turbulent Boundary Layer, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.4, No.1, pp.37-46, (2009), 査読有
- ⑤ 長田孝二, 酒井康彦, 田川眞司, 濱松岳, 久保貴, 壁面ブロッキング効果により発生するコーナー近傍での二次流れ, 日本機械学会論文集(B編), 75巻749号, 40-47頁, (2009), 査読有
- ⑥ K. Nagata, H. Suzuki, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, Direct Numerical Simulation of Turbulence Characteristics Generated by Fractal Grids, International Review of

- Physics, Vol.2, No.6, pp.400-409, (2008), 査読有
- ⑦ K. Nagata, H. Suzuki, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, Direct Numerical Simulation of Turbulent Mixing in Grid-generated Turbulence, *Physica Scripta*, T132, NO.014054, (2008), 査読有
- ⑧ H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, DNS of Spatially Developing Fractal-Generated Turbulence, Proc. of the 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, in CD-ROM (3 pages), (2008), 査読有
- ⑨ K. Nagata, T. Sato, S. Komori, Effect of Molecular Diffusivities on Countergradient Scalar Transfer in a Strong Stable Stratified Flow (Study on the Linear and Nonlinear Processes by using RDT), *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.3, No.2, pp.232-240, (2008), 査読有
- ⑩ 長田孝二, 伊藤陽人, 酒井康彦, 小森悟, 乱流境界層に及ぼす境界層外乱れの影響 (第1報, 等温の乱流境界層に及ぼす格子乱流の影響), *日本機械学会論文集(B編)*, 74巻737号, 58-65頁, (2008), 査読有
- ⑪ K. Nagata, P.A. Davidson and H. Wong, Secondary Flow near an Undulatory Surface Induced by Wall Blocking Effect, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.2, No.2, pp.410-416, (2008), 査読有
- ⑫ H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, Direct Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layer Downstream of Turbulence-Generating Grid, Proc. of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, in CD-ROM (No. FEDSM2007-37433, 5pages), (2007), 査読有
- ⑬ H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, Direct Numerical Simulation of the Convective Boundary Layer with External Grid Turbulence, Proc. of the 18th International Symposium on Transport Phenomena, pp.1957-1961, (2007), 査読有
- ⑭ K. Nagata, Y. Sakai, S. Komori, T. Kubo, Velocity and Passive Scalar Cross Spectra in Stably and Unstably Stratified Grid Turbulence, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.2, No.1, pp.109-119, (2007), 査読有
- ⑮ 長田孝二, 伊藤陽人, 酒井康彦, 小森悟, 乱流境界層に及ぼす境界層外乱れの影響 (第2報, 対流境界層に及ぼす格子乱流の影響), *日本機械学会論文集(B編)*, 73巻728号, 1021-1028頁, (2007), 査読有
- ⑯ 酒井康彦, 下形英之, 長田孝二, 久保貴, 横井宏尚, 乱流境界層における大規模渦構造とバースト現象の関連性に関する実験的研究, *日本機械学会論文集(B編)*, 73巻727号, 655-662頁, (2007), 査読有
- ⑰ K. Nagata, Y. Sakai, S. Komori, Momentum and Heat Transfer in Turbulent Boundary Layers with External Grid Turbulence, *Advances in Turbulence (Proc. of 11th European Turbulence Conference)*, Vol.11, pp.444-446, (2007), 査読有
- ⑱ K. Nagata, P.A. Davidson, J.C.R. Hunt, Y. Sakai, S. Komori, Direct Numerical Simulation of Surface Blocking Effects on Isotropic and Axisymmetric Turbulence, Proc. of 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Vol.1, pp.131-135, (2007), 査読有
- [学会発表] (計 22 件)
- ① 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 鶴飼涼太, 高Sc数パッシブスカラー乱流輸送の二次元LIF計測, 第37回可視化情報シンポジウム, 2009年7月21日 (発表決定), 工学院大学
- ② 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 鶴飼涼太, 久保貴, フラクタル格子乱流による高Sc数スカラー混合, 第46回日本伝熱シンポジウム, 2009年6月2日 (発表決定), 国立京都国際会館
- ③ 濱松岳, 酒井康彦, 長田孝二, 久保貴, 壁面ブロッキング効果によるコーナー近傍および波状壁面上での二次流れに関する実験的研究, *日本機械学会東海支部 第58期総会・講演会*, 2009年3月17日, 岐阜大学
- ④ 小嶋孝仁, 濱松岳, 酒井康彦, 長田孝二, 壁面ブロッキング効果による波状壁面上での二次流れに関する実験的研究, *東海学生会第40回学生員卒業研究発表講演会*, 2009年3月16日, 岐阜大学
- ⑤ 鶴飼涼太, 酒井康彦, 長田孝二, 液相フラクタル格子乱流の特性に関する実験的研究, *東海学生会第40回学生員卒業研究発表講演会*, 2009年3月16日, 岐阜大学
- ⑥ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, DNSによる空間発展フラクタル格子乱流の構造解明とスカラー拡散機構, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008年12月17日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑦ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, フラクタル格子乱流による乱流熱輸送の直接数値計算, *化学工学会第40回秋季大会*, 2008年9月25日, 東北大

- 学
- ⑧ 長田孝二, 酒井康彦, 小森悟, 久保貴, 安定および不安定成層を形成する格子乱流場における速度とスカラのクロススペクトルについて, 日本流体力学会 年会 2008, 2008年9月7日, 神戸大学
 - ⑨ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, フラクタル格子乱流による乱流熱輸送特性, 日本流体力学会 年会 2008, 2008年9月7日, 神戸大学
 - ⑩ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, 空間発展フラクタル格子乱流による乱流熱輸送, 第45回日本伝熱シンポジウム, 2008年5月21日, つくば国際会議場
 - ⑪ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, フラクタル格子乱流の直接数値シミュレーション, 化学工学会 第73回年会, 2008年3月17日, 静岡大学
 - ⑫ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, DNSによる乱流境界層の構造・熱輸送に及ぼす外部乱れの影響に関する研究, 日本機械学会東海支部 第57期総会・講演会, 2008年3月10日, 名古屋大学
 - ⑬ K. Nagata, H. Suzuki, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, Direct Numerical Simulation of Fractal-Grid-Generated Turbulence, American Physical Society, Division of Fluid Dynamics, 2007 Annual Meeting, 2007年11月19日, The Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, USA
 - ⑭ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, 直接数値計算による乱流境界層の乱流構造及び熱輸送に及ぼす格子乱流の影響の解明, 第85期日本機械学会流体工学部門 講演会, 2007年11月17日, 広島大学
 - ⑮ H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase and T. Kubo, Direct Numerical Simulation of Turbulent Mixing in Grid-Generated Turbulence, International Conference on Turbulent Mixing and Beyond, 2007年8月24日, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy
 - ⑯ 濱松岳, 長田孝二, 酒井康彦, 久保貴, 田川眞司, 壁面ブロッキング効果による二次流れに関する研究, 日本流体力学会 年会2007, 2007年8月8日, 東京大学
 - ⑰ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴, 直接数値シミュレーションによる乱流境界層に及ぼす格子乱流の影響の解明, 日本流体力学会 年会2007, 2007年8月8日, 東京大学
 - ⑱ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏

- 幸, 久保貴, 格子乱流の直接数値シミュレーション, 計算工学講演会 第12回講演会, 2007年5月23日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑲ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 格子乱流下に形成される壁面上乱流境界層流中の熱移動に関する直接数値計算, 化学工学会 第72年会, 2007年3月21日, 京都大学
- ⑳ 長田孝二, 酒井康彦, 下形英之, 久保貴, 乱流境界層のコヒーレント構造に及ぼす主流かく乱の影響に関する研究, 日本機械学会東海支部 第56期総会講演会, 2007年3月7日, 静岡大学
- ㉑ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 久保貴, 格子乱流下に形成される壁面上乱流境界層の直接数値計算, 日本機械学会東海支部 第56期総会講演会, 2007年3月7日, 静岡大学
- ㉒ 長田孝二, 田川眞司, 酒井康彦, 久保貴, 壁面ブロッキング効果による二次流れの発生機構に関する研究, 日本機械学会東海支部 第56期総会講演会, 2007年3月7日, 静岡大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長田 孝二 (NAGATA KOUJI)
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 50274501

研究協力者
 鈴木 博貴 (SUZUKI HIROKI)
 名古屋大学・大学院工学研究科・博士後期課程2年
 日本学術振興会特別研究員 (DC1)
 研究者番号: なし