

## 気象モデルとLESモデルの融合による都市域での強風変動の乱流解析 Turbulent analysis of strong wind variability by merging numerical weather prediction and large-eddy simulation models

竹見 哲也<sup>1\*</sup>, 中山 浩成<sup>2</sup>, 永井 晴康<sup>2</sup>  
Tetsuya Takemi<sup>1\*</sup>, Hiromasa Nakayama<sup>2</sup>, Haruyasu Nagai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>Japan Atomic Energy Agency

都市域での風の変動は、気象擾乱や地形が原因となって生じるばかりではなく、建築・土木構造物などの人工構造物の存在によっても生じる。特に、高層ビルが林立する大都市においては、ビルや道路の配置に応じて強風・弱風域や変動が顕著な領域が局所的に存在するような特有の風系が形成される。このような局所的な風系の存在は、都市における防災・環境・エネルギーの問題を考えるうえでは重要な因子となる。都市における局所的な風系を把握するためには、高密度での地上観測網を展開したりリモートセンシングによる広域観測網を構築したりといった監視網の整備が必要であるとともに、数値モデルによる計算機シミュレーションも有力な手段である。数値シミュレーションに頼る場合には、解析対象に適した数値モデルを構築する必要がある。一般に、気象や地形に起因する変化を捉える場合には、気象モデルを用いるのが有効である。例えば、天気予報は数値気象予報モデルによる数値シミュレーション技術が根幹となっており、これが日々の気温・風などの日常的な気象情報として提供されている。計算機能力の持続的な発展により、気象モデルによる計算は数 km 規模（研究面では数 100 m 規模）にまで高分解能化されている。しかし、都市のような複雑な地形表面形態を取るような地域においては、地形よりもさらに小さな規模の建物の存在が局所的な風系に影響を及ぼすため、現実的な建物情報を取り扱うことのできない気象モデルで都市域での風を計算することは極めて困難である。一方では、現実的な都市構造を持つ領域での局所的な風の解析は数値流体力学の分野で近年活発に進められている。この局所風の解析技術を気象モデルと併用して活用すれば、現実の気象条件のもとで生じる都市域での風の変動を数値的に解析することが可能であると考えられる。数値流体力学モデルの中でも乱流解析で広く用いられるラージ・エディ・シミュレーション（LES）の技術が、都市のような複雑形状場での風速変動の解析に適していると考えられる。そこで本研究では、気象モデルとLESモデルを融合することで、現実都市での風速変動を定量的に解析する技術を構築することを目的とする。解析対象領域を東京都心部（大手町・丸の内およびその周辺地区）とし、2009年台風18号の通過に伴って生じた強風・突風を定量的に評価することを試みる。気象モデルとしてWRFモデルを用い、気象庁メソスケール解析値を初期値・境界値条件としてWRFモデルに与え、台風18号の領域気象シミュレーションを行った。4段階ネスティングにより東京都心部およびその周辺部の領域を60 m格子で解像し、時間・空間の風速データを生成した。WRFより得られたこの風速データをLESモデルの初期値・境界値データとして与えた。LESモデルでは、実際の建物の高さデータにより下端境界条件を設定した。LESモデルにより都市キャノピー内部での風速変動のシミュレーションを実行し、都心の気象庁観測点（北の丸公園内）での風速変動を実際の観測値と比較した結果、変動性状や極大値をかなりよく再現することに成功した。

キーワード: 乱流, 都市, 気象モデル, ラージ・エディ・シミュレーション, 突風, 環境流体力学

Keywords: Turbulent flow, Urban, Meteorological model, large-eddy simulation, wind gust, environmental fluid dynamics

AAS022-02

会場:104

時間:5月25日 08:45-09:00

## 安定境界層の鉛直フラックスにおけるパラメタリゼーションスキームの依存性 Dependence of vertical fluxes on SGS parameterization schemes in a stable boundary layer

北村 祐二<sup>1\*</sup>  
Yuji Kitamura<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

近年、LESは大気境界層の数値実験に広く活用されるようになってきている。しかし、安定境界層の場合、密度成層の効果により混合の特徴的な空間スケールが小さくなるために、LESによる数値モデリングは困難となる。Kitamura (2010, JMSJ) は4種類のパラメタリゼーションを用いて安定境界層の数値実験を実施し、得られる結果の相互比較を行った。その結果、運動量および熱フラックスの大きさはモデルによって異なり、解像度を上げて一つの分布に収束しないことが分かった。本研究では、これらの違いをもたらす要因について解析を行った。

水平平均したフラックスの寄与をグリッドスケール(GS)とサブグリッドスケール(SGS)に分割すると、モデル間の違いは運動量、熱フラックスのいずれもほとんどGS成分のみによってもたらされていた。さらに、地表面付近を除けば、低波数成分によってモデル依存性のほとんどは説明可能であることがわかった。この結果は、SGS成分がGSの低波数成分に及ぼす影響がモデル依存性を考察するうえで重要であることを示唆している。

一方、熱フラックスについてはSGS成分にもモデル依存性が見られる。これは、乱流プラントル数がスキームによって定義が異なっていることに起因するものであり、乱流プラントル数の定義を同じにすることによってSGS成分のモデル依存性は解消される。このことは、乱流プラントル数を適切な形で与えることが必要であることを示唆している。しかしながら、大気の安定度が強い場合の乱流プラントル数については多くの研究があるものの不確実性が残されており、さらなる研究が必要である。

キーワード: ラージ・エディ・シミュレーション, 大気境界層, 乱流フラックス, パラメタリゼーション

Keywords: Large-Eddy Simulation, Atmospheric boundary layer, Turbulent flux, Parameterization

## 風洞実験による中立大気接地層内サブグリッドスケール乱流の空間構造に対するフィルターサイズ影響への洞察 Insight into filter-size effect on SGS turbulence structure in the neutral-surface layer with wind-tunnel experiment

服部 康男<sup>1\*</sup>, チンホー モーエン<sup>2</sup>, 須藤 仁<sup>1</sup>, 平口 博丸<sup>1</sup>  
Yasuo Hattori<sup>1\*</sup>, Chin-Hoh Moeng<sup>2</sup>, Hitoshi Suto<sup>1</sup>, Hiromaru Hirakuchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (財) 電力中央研究所, <sup>2</sup> 米国大気研究センター  
<sup>1</sup> CRIEPI, <sup>2</sup> NCAR

接地境界層内のサブグリッドスケール (SGS) 乱流構造の同定は、数値気象予報モデルによるラージエディシミュレーション (LES) に関連した重要な課題である。そのような LES は、計算機能力の向上とともに、大気乱流研究の有力なツールとなりつつある (e.g. Takemi and Rotunno 2003, Michioka and Chow 2008, Catalano and Moeng 2010, Hattori et al. 2011)。しかし、必ずしも乱流のエネルギー保有渦を捉えるために十分な格子解像度を与えておらず (特に、接地層近傍において)、その精度向上には、SGS フラックスへのモデル化に更なる改良が必要と考えられている (Wyngaard 2004, Chow et al. 2005, Moeng et al. 2007)。この課題の解決を図るべく、観測を通じた SGS 乱流の特性把握も進んでいるが (e.g. Sullivan et al. 2003)、高解像度を確保した多次元風速計測が困難なこともあり、空間構造の詳細については不明な点が残されている。

このような状況を勘案して、著者ら (Hattori et al. 2010, 服部ら 2009) は、中立大気接地層の構造解明に、多次元計測の実施が容易な風洞実験の活用を検討している。ここでは、大気境界層に内在する大規模 (接地層の風速勾配が作り出す乱流渦より大きな) な変動をアクティブ格子により付加することで、風洞測定部の乱流境界層下層の対数領域と大気境界層下層の中立大気接地層との間で乱流構造の相似性を得ている。

本研究では、この対数領域を対象とした粒子画像流速測定法 (PIV) による 2 次元 2 成分風速測定を行った。得られた速度ベクトルにフィルタ処理を施し、SGS 乱流成分を抽出した後、その空間構造をフィルターサイズの影響に留意しつつ調べた。

風洞実験における大気接地層の模擬方法は、既報 (Hattori et al. 2010, 服部ら 2009) と同じであるため、ここでは概略のみを示す (財) 電中研の堅型風洞を使用した。風洞の主流速度を  $5\text{ms}^{-1}$  に設定した。測定部 (面積  $1000\times 1000\text{mm}^2$ , 長さ  $6200\text{mm}$ ) の上流に設置したアクティブグリッドの動作条件を調整し、測定位置 (アクティブ格子から  $4180\text{mm}$  下流位置) での対数領域内の乱流統計量を大気接地層の値と一致させた。対数領域厚さ  $h_s$  は  $70\text{mm}$  であった。

本研究では、PIV による鉛直 2 次元断面内の 2 成分風速測定を行った。測定部にオイルミストを混入し、シート状のダブルパルスレーザ光を照射することで流れ場を可視化した。対数領域厚さ  $h_s$  をカバーする可視化画像 (観察領域サイズ  $88.4\times 88.4\text{mm}^2$ ) を CCD カメラ ( $2048\times 2048\text{pixel}^2$ ) により撮影した。風速ベクトルの算出には相互相関法を用いた。検査領域を  $1.4\times 1.4\text{mm}^2$  とし、50% のオーバーラップを付加することで、各画面組につき、4096 個の風速ベクトルを得た。動的平均操作に基づき、過誤ベクトルを除去した後、3000 時刻 (サンプリング周波数は  $7\text{Hz}$  程度) のベクトルデータから乱流統計量を算出した。これにより得られる対数領域内の平均風速、変動風速の乱れ強さは、熱線計測の値 (Hattori et al. 2010) と定量的に一致した。風速ベクトルに対して、主流方向に対してトップハット型フィルタ処理を施すことで、SGS 変動風速を求めた (Sullivan et al. 2003, Natrajan and Christensen 2006, Inagaki and Kanda 2010)。

はじめに、対数領域高さでのフィルタ幅  $D_f$  に対する SGS 変動風速の乱れ強さの変化を調べた。フィルタ幅  $D_f$  の増加とともに SGS 成分の寄与が顕著となった。 $D_f/h_s \ll 1$  では、グリッドスケール (GS) 成分が大半を占めるが、 $D_f/h_s = 0.5$  では、SGS 成分が支配的となった。この挙動は、実大気接地層の観測結果 (Sullivan et al. 2003) と定量的に一致した。同時に SGS 変動風速の確率密度関数 (PDF) 分布も変化した。 $D_f/h_s \ll 1$  の結果と比べて  $D_f/h_s = 0.5$  では、大規模低風速塊の出現頻度が低くなった。これは、 $D_f/h_s = 0.5$  の SGS 成分でのパーストライクイブメントの減衰を意味するものであり、大気境界層内の大規模擾乱の直接的な影響を示唆する (Hattori et al. 2010)。

次に、固有直交関数展開 (Meyer et al. 2007) を用いて、SGS 変動風速の空間構造を調べた。 $D_f/h_s \ll 1$  では渦構造が存在し、 $D_f/h_s = 0.5$  では組織構造 (Adrian 2000) に類似した流体運動が存在することを突き止めた。

最後に、数値気象モデル LES の格子解像度が  $D_f/h_s = 1$  程度であること (Sullivan et al. 2003) を勘案して、 $D_f/h_s = 0.5$  での SGS 変動風速によるフラックスと GS 成分の勾配テンソルとの相関を調べた。両者の相関は極めて弱く、通常の勾配拡散型のモデルによる LES は、この SGS フラックスの表現に不適であることを明らかにした。

キーワード: 組織構造, ラージエディシミュレーション, 接地層, 乱流, 風洞実験  
Keywords: coherence structure, LES, surface layer, turbulence, wind-tunnel experiment

AAS022-04

会場:104

時間:5月25日 09:15-09:30

## 実在都市域での流れと拡散に関する LES 解析 -風洞実験結果との比較- LES of flow and plume dispersion in an actual urban area

中山 浩成<sup>1\*</sup>, 永井晴康<sup>1</sup>

Hiromasa Nakayama<sup>1\*</sup>, Nagai Haruyasu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Atomic Energy Agency

化学物質や可燃性物質などの有害危険物質が漏洩事故やテロなどにより都市域内で放出された場合、安全評価の観点から平均濃度に加え、瞬間的に発生する高濃度も重要な指標となる。都市の地表面は建築構造物が多様に構成配置されているために、著しく局所性の強い乱流場が形成され、そういった複雑な流れ場の中においても拡散物質の非定常挙動ならびに空間分布を的確に予測評価することが必要である。そのため、本研究では非定常現象の予測に優れた LES 乱流モデルを用いて数値シミュレーションを実行し、都市域での流れ場および拡散場に関する精度検証を行い、都市地表面形態に基づく濃度の空間分布について考察することを目的とする。

本 LES モデルの基礎方程式は、空間フィルター操作された連続の式、N-S 方程式、物質拡散方程式により構成され、流れ場・拡散場のモデル定数は標準型スマゴリンスキーモデル (Smagorinsky, 1963) により評価する。計算アルゴリズムは MAC 法、Poisson 方程式の反復解法は SOR 法、時間進行法は Adams-Bashforth 法である。また、モデルでは建物効果を Feedback forcing (Goldstein et al., 1993) により表現している。本試験計算の検証として、乱流境界層内に埋没された実在都市オクラホマシティーを対象にした拡散風洞実験結果 (ハンブルク大学所有, <http://www.mi.uni-hamburg.de>) を比較に用いた。本モデルでは、まず、乱流駆動領域を設けて非定常変動風を作り、実在都市が設置されている主解析領域の流入境界に時々刻々与えることで、排ガス拡散の非定常解析を実行している。計算領域サイズは、ドライバー領域では主流方向に 3.1km、水平方向に 1.2km、鉛直方向に 0.75km、メイン領域では 2.0km、1.2km、0.75km としている。格子数はドライバー領域で 510, 300, 90、メイン領域で 450, 300, 90 である。主解析領域での解像度は主流・水平方向ともに 4m、鉛直方向は 1m-36m の不等間隔としている。

LES 結果を風洞実験結果と比較すると、まず、接近流の平均風速分布・各成分の乱流強度分布はともに良好に再現された。次に、都市域においては、平均風速分布はいずれの地点においても良好に一致することが分かった。乱流強度分布は、建物群内では実験結果との差異がやや見られたものの、その上部では比較的良好に再現された。また、拡散場においては、実験結果と良好に対応性が取れたことが分かった。

キーワード: LES, 拡散, 実在都市

Keywords: LES, plume dispersion, actual urban area

## 人工的な流入変動風を用いた大気境界層流のLES Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow with artificial inflow turbulence

近藤 亮彦<sup>1\*</sup>, 飯塚 悟<sup>1</sup>, 金原 和矢<sup>1</sup>

Akihiko Kondo<sup>1\*</sup>, Satoru Iizuka<sup>1</sup>, Kazuya Kinbara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup> Nagoya University

近年のコンピュータ性能の向上により、気象モデルでは高解像度化、工学 LES (Large-Eddy Simulation) モデルでは解析領域の広域化が進み、両モデルで取り扱う範囲が重複してきている。これに伴い最近、気象モデルと工学 LES モデルの「シームレスな」結合が多く注目を集めている。しかし両者はこれまで、いわゆる「スペクトルギャップ」を挟み、それぞれ独自にモデル開発が進められてきた。1) 乱流の取り扱い、2) 放射や雲などの物理過程の取り扱い、3) 予報変数の違いなど、両モデルの間には様々な隔たりがあり、シームレスな結合には多くの困難を伴う。

気象モデルと工学 LES モデルを結合する場合、工学 LES モデル側の境界条件は気象モデルの出力結果に基づくことになる。しかし、相対的に格子解像度の粗い気象モデルの結果のみでは、工学 LES モデルの境界条件として必要となる微細な変動成分 (特に、流入境界条件としての風速変動成分。以下「流入変動風」) を与えることはできない。気象モデルと工学 LES モデルのシームレスな結合のためには、工学 LES モデルの境界条件として必要となる流入変動風をいかに生成するかが大きな課題の一つとなる。

本研究では、工学 LES モデルのための流入変動風を Lee らの方法 (Phys. Fluids, 1992) に準じて人工的に生成し、大気境界層流を対象とした解析を行い、その有効性を検証する。Lee らの方法では、目標とする乱流統計量を満足する波数空間のエネルギー Spektrum を規定し、規定された Spektrum のフーリエ逆変換から人工的に変動風を生成する。この方法は、連続条件を満足した流入変動風を生成できることが大きな特徴であるが (人工的に生成するので、当然のことながら運動方程式は満足しない) 等方的な風速変動成分 (等方性乱流) の生成のみに限定される。従って、非等方の風速変動成分を有する大気境界層流の解析にはそのままでは適用できない。そこで、大気境界層流の流入面の鉛直方向を多層分割し、それぞれの層に対して目標とする乱流統計量を変化させて Lee らの方法を適用することを試みる。

キーワード: LES, 乱流, 流入変動風, 大気境界層, エネルギー Spektrum, フーリエ逆変換

Keywords: Large-Eddy Simulation, Turbulence, Inflow Turbulence, Atmospheric Boundary Layer, Energy Spectrum, Inverse Fourier Transform

AAS022-06

会場:104

時間:5月25日 09:45-10:00

## ドップラーライダーで観測した海上の組織的気流構造

### Organized flow structures in the atmospheric boundary layer over the sea detected by a 3D scanning Doppler lidar

藤原 忠誠<sup>1\*</sup>, 藤吉康志<sup>2</sup>

Chusei Fujiwara<sup>1\*</sup>, Yasushi Fujiyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院環境科学院, <sup>2</sup> 北海道大学低温科学研究所

<sup>1</sup>EES, Hokkaido Univ., <sup>2</sup>ILTS, Hokkaido Univ.

009年7月から、長崎半島沖合の長崎市池島に3次元走査型コヒーレントドップラーライダー(3D-CDL)を移設し、海上の気流構造の観測を継続している。観測期間中に、小スケールの鉛直渦(Dust devil-like vortex; 以下DDV)、網目状構造やストリークが普遍的に観測された。

DDVは、都市域と同様、晴天弱風日中に網目状構造に伴って検出された。一方、夜間風速 $9\text{ m s}^{-1}$ 程度の強風時でも、網目状構造が形成され、DDVが検出された。検出されたDDVの特性は、直径45-104 m、最大鉛直渦度 $0.18\text{ s}^{-1}$ であり、札幌での観測と一致した。発生時の環境場は、風速が比較的強い時でも発生し( $2.4\text{--}9.1\text{ m s}^{-1}$ )、境界層高度が高く(1000-1200 m)、SSTと気温の差が8K程度と強不安定が示唆された。

中立時に近い強風時には、ストリーク構造や島による後流が観測された。ストリークは、小スケールの島や陸上が風上数100kmに存在しない観測領域でも観測された。このことは、地形や障害物などがない海上でもストリークが生成されることが示している。

これら観測された気流構造をLESによって再現し、観測データと比較することで、気流構造の力学的メカニズムや、LESの検証と改良に役立つことが期待される。

キーワード: LESの検証, ドップラーライダー, 組織的気流構造

Keywords: LES validation, Doppler lidar, Organized flow structure

AAS022-07

会場:104

時間:5月25日 10:00-10:15

## 対流混合層に生じる Dust Devil の LES Large Eddy Simulation on Dust Devils in Convective Mixed Layers

伊藤 純至<sup>1\*</sup>, 新野 宏<sup>1</sup>, 中西 幹郎<sup>2</sup>

Junshi Ito<sup>1\*</sup>, Hiroshi Niino<sup>1</sup>, Mikio Nakanishi<sup>2</sup>

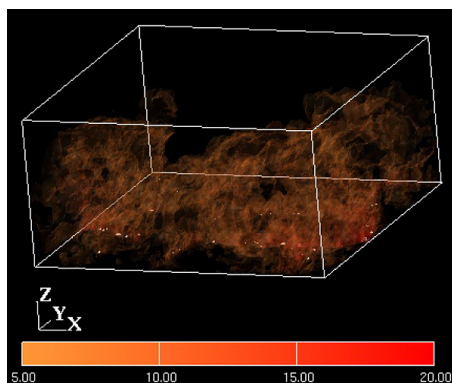
<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 防衛大学校

<sup>1</sup>AORI, The University of Tokyo, <sup>2</sup>National Defense Academy

晴天時の日中、大気下層では日射により加熱された地表面から大気への顕熱フラックスにより、成層が不安定になり、活発な乱流状態の対流が卓越する対流混合層が形成される。対流混合層では Dust Devil (塵旋風) とよばれる小スケールの強い鉛直渦が発生し、強い接線風速により舞い上げられたダスト粒子によって可視化される。Dust Devil は地球だけでなく、火星でも観測されるため、乱流状態にある対流混合層における普遍的な構造であると考えられる。対流混合層の特徴的な構造である網目状の対流セルや混合層上部でのエントレインメントなどは、LES(ラージ・エディ・シミュレーション)を用いることで、従来から再現されてきた。近年は高解像度の LES を利用することで、対流混合層中の Dust Devil を再現する試みが行われてきている。著者らは LES により、Dust Devil に対応する渦を再現し、Dust Devil の形成メカニズムを調べた(伊藤ら、2010 連合大会)。本発表では、1) Dust Devil の強さと対流混合層内の対流の強さとの関係、2) Dust Devil が舞い上げるダスト粒子量の見積もりについて報告する。

本研究では、初期に安定成層をした静止状態にあり、一定のヒートフラックス  $Q$  を与えたときの対流混合層の発達を格子間隔が 50m の LES で再現した。このとき対流の強さは対流速度  $w_c = (ghQ/T_0)^{1/3}$  でスケールされる。ここで  $g$  は重力加速度、 $h$  は対流混合層の高さ、 $T_0$  は基準温度である。対流速度と、地表付近の水平断面での鉛直渦度の最大値  $Zeta_{max}$  (Dust Devil に対応)の間には  $Q$  の大きさに関わらず、 $Zeta_{max} \propto w_c$  という関係があり、Dust Devil の鉛直渦度は  $w_c$  と共に大きくなることがわかった。

対流混合層では一様風が全く無い状態であっても、Dust Devil や対流運動に伴う強い水平風が地表面付近に存在するため、ダスト粒子が舞い上げられ、対流混合層全体に拡散することが考えられる。このような無風状態で日変化する対流混合層に浮遊するダスト粒子濃度の見積もりを行うために、格子間隔が 20m の LES に、ダスト粒子濃度を新たに変数として導入し、Loosmore and Hunt (2000) の実験式により地表面ダストフラックスを与える計算を行った。計算の結果、ダスト濃度は Dust Devil に対応する渦があるような領域付近で大きくなり(図参照)、発達した対流混合層内には平均的には  $10^{-5} \text{g/m}^3$  程度の濃度のダストが鉛直一様に存在するという結果が得られた。さらに、もし同じような気象条件が続けば、舞い上がったダスト粒子が大気中に滞留し続けることで、7 倍程度大きい濃度が出現する可能性が示された。



キーワード: ダストデビル, 塵旋風, 鉛直渦, 対流混合層, ラージ・エディ・シミュレーション

Keywords: dust devil, vertical vortices, convective mixed layer, large eddy simulation



AAS022-08

会場:104

時間:5月25日 10:15-10:30

## 湿潤対流混合層に発生する蒸気旋風のラージ・エディ・シミュレーション A large eddy simulation on steam devils in a moist convective mixed layer

山口春季<sup>1</sup>, 新野 宏<sup>2\*</sup>

Haruki Yamaguchi<sup>1</sup>, Hiroshi Niino<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 気象庁数値予報課, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>The University of Tokyo

冬季に寒気が暖かい海上に吹き出すときには、湿潤対流混合層が形成され、その中にしばしば蒸気旋風が形成される。本研究では、ラージ・エディ・シミュレーションを用いて、湿潤対流混合層と蒸気旋風を再現し、渦の特徴や生成過程及びその環境場との関わりを調べた。最初に、降水が生じない場合を調べたところ、この場合の蒸気旋風の振る舞いは塵旋風（ダスト・デビル）とよく似ており、雲底下のセル状対流に伴って生ずる現象であることがわかったほか、数少ない観測とも整合的であることがわかった。次に、降水を伴う場合について調べたところ、降水雲から生じた冷気外出流が地表面近くに水平シアを伴う収束線を作り出し、降水が生じない場合よりも強い蒸気旋風を作り出すことがわかった。

キーワード: 蒸気旋風, 湿潤対流混合層, 対流, 渦, 大気境界層

Keywords: steam devil, moist convective mixed layer, convection, vortex, atmospheric boundary layer

AAS022-09

会場:104

時間:5月25日 10:45-11:00

## 台風境界層内外に起こる不安定のラージ・エディ・シミュレーション Large-eddy simulation of instabilities in and above a hurricane boundary layer

中西 幹郎<sup>1\*</sup>, 新野 宏<sup>2</sup>

Mikio Nakanishi<sup>1\*</sup>, Hiroshi Niino<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防衛大学校, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>National Defense Academy, <sup>2</sup>AORI, The University of Tokyo

ラージ・エディ・シミュレーションモデルを用いて、台風を中心から 100km および 40km 離れた地点の境界層内に、どのような不安定が起こり、どのような構造が現れるかを調べた。計算結果は、乱流統計量と POD 解析 (EOF 解析ともいう) を用いて分析した。POD 解析と乱流運動エネルギー (TKE) の収支によると、境界層内に変曲点不安定が起こり、波長 1.4~3.0 km の水平ロール渦が現れる。また TKE 収支と変動風速の水平分布によれば、地上付近に数百メートル間隔でストリーク構造が出現する。この構造は、台風が上陸した後にしばしば見られる小スケールの被害に関係がありそうである。さらに、台風中心から 40km の距離では、境界層の上に時計回りの渦が現れて成長を続ける。変動風速の水平分布と TKE 収支から、遠心力不安定が示唆される。しかし、このような渦が実際に存在するのか、観測を通して確かめる必要がある。

キーワード: ラージ・エディ・シミュレーション, 水平ロール渦, ストリーク, 変曲点不安定, 遠心力不安定

Keywords: large-eddy simulation, horizontal roll vortices, streaks, inflection-point instability, centrifugal instability

AAS022-10

会場:104

時間:5月25日 11:00-11:15

## LESを用いた都市キャノピー層乱流の空間分布構造に関する検討 Numerical investigation of instantaneous flow structure within a cubical canopy

稲垣 厚至<sup>1\*</sup>, 神田学<sup>1</sup>

Atsushi Inagaki<sup>1\*</sup>, Manabu Kanda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

本研究ではLESを用いた数値解析により、大気混合層及び都市接地境界層の発達下での都市キャノピー層の乱流特性について検討を行った。

計算領域は水平 2560m × 2560m、鉛直 1709.6m であり、大気混合層の熱対流を再現するための大きさを確保している。地表面には都市建物群を模擬した、1辺 40m の均一な立方体群が建蔽率 0.25 となるように整列配置されている。計算格子間隔は各方向 2.5m であり、高度 1200m より上空では z 方向のみ 1.08 倍でストレッチングさせている。地表面及び、建物屋根面から一定の熱量をフラックスとして与え、大気混合層を発達維持させている。初期風速の鉛直分布を一定値 (10m/s) で与え、接地境界層の発達を駆動している。初期温位勾配を地表面から高度 800m まで 0.008 K/m とし、それより上空では 0.074 K/m と設定した。

本計算によって再現された大気混合層の乱流特性として、速度分散に関して既往の平原での観測結果との相似性が見られた。これは混合層の乱流特性が建物凹凸の影響に対して鈍いことを示しており、実都市での観測結果と合致するものである。接地境界層の乱流特性に関しては、空間フィルターを用いることで大気混合層起因の低周波成分を線形分離して検討したところ、乱流統計量が既往の MOS によく従い、またその空間分布構造は低・高速のストリーク構造によって代表されることを確認した。なお、空間フィルター処理の前後で接地境界層の運動量輸送量がほぼ変化しないことを確認している。

このような一般的な挙動を示す混合層及び接地境界層下での、都市キャノピー層の乱流特性について検討した。キャノピー層内の乱流変動の空間分布形状に関しては、個々の建物よりも十分大きな構造を形成していることが分かった。これは接地境界層で発達している筋状乱流構造の直接影響を受けているためであり、特にキャノピー内から上空への熱・運動量の輸送については上空の低速ストリークの通過によって引き起こされている傾向が見られた。一方上空からキャノピー内への運動量・熱輸送に関しては建物形状に強く規定されており、流れ方向に沿ったストリートに沿って生じている傾向が見られた。

キーワード: 都市キャノピー, 接地境界層, 大気混合層, 乱流組織構造

Keywords: urban canopy, surface layer, convective mixed layer, turbulent organized structure

AAS022-11

会場:104

時間:5月25日 11:15-11:30

## メソスケール擾乱を考慮した市街地内ガス拡散予測のための数値モデル CFD model considering meso-scale disturbance for gas dispersion in an urban district

道岡 武信<sup>1\*</sup>, 佐藤 歩<sup>1</sup>

Takenobu Michioka<sup>1\*</sup>, Ayumu Sato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所

<sup>1</sup> CRIEPI

With the increasing availability of powerful supercomputers, numerical simulations have become a very attractive tool for simulating transport and dispersion of airborne materials in an urban district. A normal computational fluid dynamics (CFD) model, however, cannot estimate 1-hour averaged concentration which is usually used in an environmental impact assessment because a large-scale turbulent motion like a meso-scale disturbance cannot be considered in the computational domain. In the present study, a CFD model coupled to a mesoscale model is developed to estimate 1-hour averaged concentration in an urban district. FrontFlow/Red (Unemura et al. 2004) is employed for CFD model, which is based on a finite volume method with an unstructured grid system to resolve a flow structure in a complex geometry. As for a meso-scale model, the Advanced Regional Prediction System, which developed at the Center for Analysis and Prediction of Storms at the University of Oklahoma (Xue et al. 2000, 2001) is applied. Both the CFD and mesoscale models are based on a large-eddy simulation (LES). The detailed method of LES for meso-scale flows is described in Michioka and Chow (2008). The velocities obtained by the mesoscale model are directly given as the boundary conditions for the CFD model without change of velocity variables. To evaluate the performance of the developed CFD model, the model is applied to simulate tracer gas dispersion released from the roof of the building in Komae Research Laboratory at CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry) in Japan, where field experiments were conducted in 3 February 2005.

Figure 1 shows the ground concentration which are averaged over 1 hour (15:30 - 16:30). During the period, the wind direction is almost North and the atmospheric stability is nearly-neutral. The concentration  $C^*$  is normalized by the reference velocity,  $U_{ref}$ , and source strength,  $Q$ . It is found that the ground concentration estimated by normal CFD model is larger than that in the field experiment. This is attributed to the fact that normal CFD models do not consider a large-scale turbulent motion like a meso-scale disturbance. It also means that normal CFD models tend to overestimate 1-hour averaged ground concentration. On the other hand, the gas concentration obtained by the developed model is widely distributed compared to that in the normal CFD model owing to large-scale turbulent motion generated in the meso-scale model, and the concentration are nearly equal to that in the field experiment.

### References

Unemura, T., Zhang, H., Taniguchi, N., 2004. Development of the Fluid Dynamic Simulation Software FrontFlow/Red, Monthly Journal of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 56, 40-43 (in Japanese).

Xue, M. et al., 2000. The Advanced Regional Prediction System (ARPS): A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification. Meteor. Atmos. Pys., 75, 16-193.

Xue, M. et al., 2001. The Advanced Regional Prediction System (ARPS): A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications. Meteor. Atmos. Pys., 76, 143-165.

Michioka, T., Chow, F. K., 2008. High-resolution large-eddy simulations of scalar transport in atmospheric boundary layer flow over complex terrain. J. App. Meteor. Soc., 47, 3150-3169.

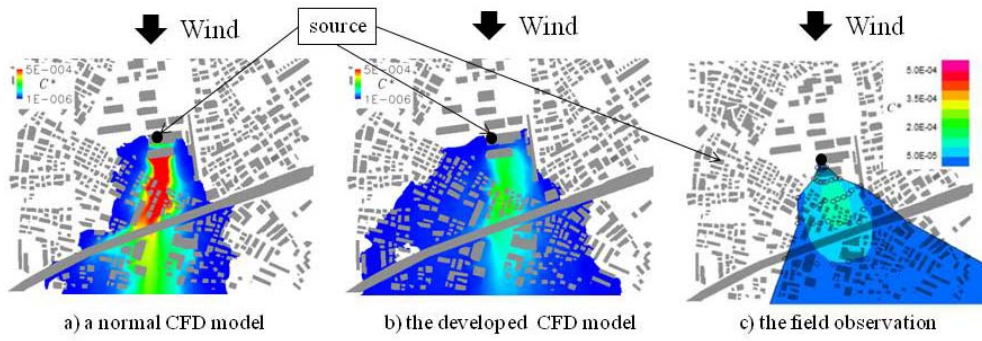


Figure1. 1-hour averaged ground concentration

キーワード: ガス拡散, 一時間濃度値, メソスケールモデル, ラージエディシミュレーション, 都市域  
 Keywords: Gas dispersion, 1-hour averaged concentration, Meso-scale model, Large-eddy simulation, Urban district

AAS022-12

会場:104

時間:5月25日 11:30-11:45

## チェルノブイリ原子力発電所事故による放射性核種濃度の大気長期広域運命予測 Mathematical analysis of the concentration of radioactive aerosol from the Chernobyl accident

太田 健介<sup>1\*</sup>  
Kensuke Ota<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科

<sup>1</sup> University of Tsukuba, graduate school

近代における重要な大気汚染の事例の1つとして、チェルノブイリ原子力発電所事故における放射性核種による周辺環境の汚染問題がある。

事例を紹介すると、1986年4月26日に旧ソ連、ウクライナ共和国のチェルノブイリ原子力発電所4号炉にて大きな爆発があった。この原発事故は、原子炉の炉心が大気に開放状態となり、さらに事故終息までに数日を要したため、放射性核種が多量に、そして非常に広範囲に飛散したという歴史上最悪な原発事故となってしまった。

過去に大気拡散現象に関する研究は多くなされてきた。しかし、それらの研究は避難や一時的な安全性を目的としたもので、適用範囲はせいぜい数年程度のものである。しかし、現在も問題となっている半減期の長い汚染物質、半減期30.7年のCs、半減期28.78年のSrなどがある状況では長期的にかつ広域な空間分布を予測できる大気拡散予測モデルを改めて考える必要がある。

また、今回の放射性核種は特異性が大きいので、大気中でのトレーサーとして考える事ができ、大気拡散の基礎的知見を得ることができる。そしてその結果を他の物質にも応用し、二酸化炭素などの長期広域拡散予測を得る事も可能であると考えられる。

先行研究として用いられているものとして以下のものがある。

$$C(t) = A \exp(-\text{phy}t) t^{\gamma}$$

この予測モデルは定点における濃度の時間変化を記述したものであり、この予測モデルのパラメータは2つありAと $\gamma$ がある。Aはその地点に降り積もった放射性核種の量、 $\gamma$ はその地点での環境の浄化作用である。また、phyはそれぞれの放射性元素の崩壊定数であり、Cs、Srなどで違う値をとる。

先行研究ではCsのフィッティングが精度よく追従できていてSrと他元素でも精度よくフィッティングできている事が示された。よって他の様々な放射性物質をフィッティングする事で、この地域の安全性を確認する事が出来ると我々は考える。

だが、この予測式にも問題点がある。このモデル式には時間による濃度変化というのはいま表現できているが、空間的な濃度分布に関してうまく記述できていない。実現象では拡散という見地から絶対的に空間の濃度分布というものを解析しなければならない。よって私は空間分布を予測するために数理解析を行う。

空間分布の解析にあたり移流方程式からスタートするのであるが、ここでこの移流方程式の解析解を出すために様々な仮定をおいた。まず1つ目にObukhovが提唱した乱流の自己相関関数というものをを用いて再浮遊元素の確率密度関数の関係性をを用いた。それによって時間変化において変化する拡散係数が打ち出された。

そして2つ目に環境の浄化作用というものに注目したのであるが河川、植物、海などによる浄化作用の中でチェルノブイリ近郊では植物の浄化作用が一番支配的であり時間に反比例して取り込み率が減っていていることに注目した。それによって時間関数は冪乗の項が打ち出された。最後にKappor, Gelharなどによって処されている数学的処理をおくことにより空間分布を定数とした場合上記の先行研究で用いられている解析解になることがわかった。

しかし、空間分布においては導出されたのは、ガウス型の解析解であった。このガウス型の解析解が表すものとしては通常拡散の挙動のみであり、IAEA発行のチェルノブイリの放射性元素とフィッティングを行うとうまく濃度分布が記述できないことがわかった。

このことにより現在研究している内容として2つのアプローチがある。まず1つ目として確率密度関数から空間分布を予測する方法でありモンテカルロ法の1つであるLevy Flightモデルを考えた。このLevy Flightモデルはランダムウォークモデルのジャンプ距離が一定ではなく距離の頻度が冪乗型になっているものである。この方法での妥当性は決定係数が常に高い値を示し有効な予測法と考えられる。しかしこの方法では実現象を予測する際には適していないことが伺えたが、今回このLevy Flightモデルと支配方程式の関係を導出した。それは非整数階微分という1階微分や2階微分の知識を応用し非整数階にも微分作用素が適用できるとした数学的なアプローチでそれを用いると支配方程式に記述できることがわかった。

また2つ目のアプローチとして支配方程式で解析に用いた自己相関関数をSreenivasanが提唱する空間の自己相関関

数を定義するアプローチなどを解析した。それによると、拡散係数が時間と空間の関数となっており今回の現象に予測できる可能性が大いにあることを打ち出された。

よって今回の解析によりチェルノブイリ事故のように点源瞬間放出の場合の解析解を得ることが出来、それを連続放出や線源面現放出を考えるにあたりグリーン関数としてこの解析解を用いることにより異常拡散を表現できる大気輸送モデルを完成できる可能性があることが打ち出された。

キーワード: 放射性エアロゾル, 大気輸送モデル, 異常拡散, 数理解析, 非整数階微分

Keywords: Radioactive aerosol, Atmospheric transport model, Anomalous diffusion, Mathematical analyze, Fractional derivative

AAS022-13

会場:104

時間:5月25日 11:45-12:00

## 風起源の近慣性振動に関する LES とその結果に基づく海洋混合層モデルの有効性の検証

### Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using LES

古市 尚基<sup>1</sup>, 日比谷 紀之<sup>2\*</sup>, 丹羽 淑博<sup>3</sup>

Noki Furuichi<sup>1</sup>, Toshiyuki Hibiya<sup>2\*</sup>, Yoshihiro Niwa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 東京大学 大学院理学系研究科, <sup>3</sup> 東京大学 大学院理学系研究科

<sup>1</sup>Grad. Schl. of Sci., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Grad. Schl. of Sci., Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Grad. Schl. of Sci., Univ. of Tokyo

台風等の大気擾乱によって励起された近慣性シアアに伴う混合層の消長を LES モデルにより再現するとともに、その結果に基づいて Mellor and Yamada (1982) および Nakanishi and Niino (2009) の Level 2.5 の混合層モデルの有効性を検証した。その結果、LES モデルで計算された混合層下部でのエントレインメントとそれに伴う海面水温の低下に比べ、Mellor-Yamada モデルによる実験結果は過小評価の傾向、Nakanishi-Niino モデルによる実験結果は過大評価の傾向となった。そこで、強い成層下における乱流長さスケールの発達の抑制をより強くするように Nakanishi-Niino モデル内の定式化を修正したところ、LES の結果に匹敵する良好な結果が得られた。

キーワード: 近慣性流シアア, 海洋混合層, 混合層モデル, 海面水温, 乱流長さスケール, エントレインメント

Keywords: near-inertial shear, oceanic mixed layer, turbulence closure model, sea surface temperature, turbulent length scale, entrainment



AAS022-14

会場:104

時間:5月25日 12:00-12:15

## 吹雪現象へのLESの適用 Application of LES to blowing snow

根本 征樹<sup>1\*</sup>, 西村 浩一<sup>2</sup>, 佐藤 威<sup>1</sup>  
Masaki Nemoto<sup>1\*</sup>, Kouichi Nishimura<sup>2</sup>, Takeshi Sato<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(独)防災科学技術研究所, <sup>2</sup>名古屋大学

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>Nagoya University

吹雪による視程悪化や吹きだまり・雪庇の発生は、冬季間の交通障害や雪崩発生の原因となることから、その予測と制御は重要な課題である。これまでの研究により、時間平均的な場における吹雪の構造はかなりの部分が明らかにされた。しかし、本来、吹雪は大気乱流による激しい変動を伴う現象であり、交通事故の主因とされる視程の突発的変動などを論じるにあたっては、従来の時間平均化された情報から脱却し、乱流による三次元の時空間変動を考慮した現象解明が不可欠となる。以上を踏まえ、本研究では、乱流現象の非定常計算に優れる Large-Eddy Simulation (LES) を用い、吹雪の時間・空間変動特性の数値計算を試みた。計算から得られた吹雪空間濃度は風速変動に伴い激しく変動するが、10秒程度の周期を持つ変動が目立った。任意高度の水平面上における吹雪空間濃度の瞬間値も場所により大きく異なり、また濃度の変動パターンについては、1m以上の高度差がある場合、目立った鉛直相関は見られない。一般に大気境界層において、乱流変動の空間相関は高度差の増加とともに急激に減少するが、計算された空間濃度分布についても同様の傾向が見られた。

キーワード: 吹雪, ラージエディシミュレーション

Keywords: Blowing snow, LES

AAS022-15

会場:104

時間:5月25日 12:15-12:30

## 火星大気の高解像度大気大循環実験：大気擾乱の解像度依存性 High resolution general circulation model experiments of the Martian atmosphere: Resolution dependence of disturbances

高橋 芳幸<sup>1\*</sup>, 林祥介<sup>1</sup>, 小高正嗣<sup>2</sup>

Yoshiyuki O. Takahashi<sup>1\*</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>1</sup>, Masatsugu Odaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院

<sup>1</sup>Kobe University, <sup>2</sup>Hokkaido University

High resolution experiments of Martian atmosphere have been performed by using a general circulation model (GCM). One of purposes of the experiments is to investigate the small and medium scale disturbances whose horizontal scales range from thermal convection to baroclinic waves on Mars. The other purpose of the experiments is to have some insights into dust lifting processes on Mars. Dust suspended in the atmosphere has significant impact on the thermal and circulation structure of Martian atmosphere through radiative processes. In the followings, some features of atmospheric disturbances observed in our model are presented. In this study, the circulation structure and effects of disturbances on dust lifting are investigated by examining its resolution dependence.

The model used in this study consists of the dynamical core of AFES (Ohfuchi et al., 2004), and the physical processes introduced from the Mars GCM which has been developed by our group so far (Takahashi et al., 2003, 2004, 2006). The AFES is a spectral primitive equation model and is based on CCSR/NIES AGCM 5.4.02. The introduced physical processes include the radiative, the turbulent mixing, and the surface processes. In addition, the dust lifting process is implemented to diagnose the dust mass flux in the model. The horizontal variation of surface orographic height, albedo, and thermal inertia are given following the observational results. However, in some experiments, uniform surface properties are used to investigate atmospheric disturbances that are not forced by variations of surface properties. By the use of this GCM, experiments at northern fall condition are performed with horizontal resolutions of T79, T159, T319, and T639, and number of vertical layers of 96. Horizontal resolutions of T79, T159, T319, and T639 are equivalent to about 89, 44, 22, and 11 km grid size, respectively. In these experiments, the dust distribution used for radiative heating rate calculation is assumed to be uniform horizontally with dust optical depth of 0.2.

A lot of atmospheric disturbances are observed in the results of experiments. Some of those are baroclinic waves in northern middle and high latitude, fronts associated with them, vortices in the lees of mountains, several streaks with horizontal scale of tens of kilometers, and a lot of small scale vortices in low latitudes. Comparing the result of T319 resolution experiment with that of T79, many disturbances, such as baroclinic wave, fronts, and lee vortices with several hundred kilometers, are observed in both experiments. Further, the existence of small scale streaks and vortices in low latitude is implied. However, by increasing the model resolution, the structures of streaks become very clear, and the horizontal size of the small scale vortices in low latitude decreases and the strength increases as the increase of horizontal resolution. In addition, the local time when the small scale vortices develop tend to become early by the increase of horizontal resolution. It is considered that these small scale vortices are caused by convective activity represented by the model, and these are the results of the change of model representation of convective motion.

In the presentation, the disturbances observed in experiments with uniform surface properties and the effects of atmospheric disturbances on dust lifting will be shown and discussed.

キーワード: 火星, 惑星大気, 大気大循環モデル, 中小規模擾乱, 地球シミュレータ

Keywords: Mars, planetary atmosphere, general circulation model, small and medium scale disturbance, Earth simulator