

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760438

研究課題名（和文）

気象情報をシームレスに組み込んだ建築流体解析のための次世代数値モデルの開発

研究課題名（英文）

Development of a next-generation engineering LES model seamlessly combined with meteorological data

研究代表者

飯塚 悟 (IIZUKA SATORU)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：40356407

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代の汎用流体工学モデルとして期待される LES (Large-Eddy Simulation) モデルと気象シミュレーションモデルのシームレスな結合において最も大きな課題となる、LES モデルのための流入変動風の生成手法の開発に取り組んだ。Moeng ら (2007) の LES-within-LES 手法や人工的に流入変動風を生成する手法の適用性や有用性を検討した。

研究成果の概要（英文）：To merge engineering LES (Large-Eddy Simulation) model and meteorological model seamlessly, the most important issue is to develop generation methods of inflow turbulence for LES. In this study, the applicability and effectiveness of the LES-within-LES method proposed by Moeng et al. (2007) and artificial generation methods of inflow turbulence were investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：建築環境、流体工学、気象、数値モデル、ラージ・エディ・シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

従来の流体工学シミュレーションモデルと気象シミュレーションモデルは取り扱う変動スケールが明確に区別され、両者の間にはいわゆる「スペクトルギャップ」が存在し（図 1 参照）、それぞれ独立した設計思想でモデル開発が進められてきた。しかし近年、コンピュータ性能の著しい向上により、流体工学モデルと気象モデルの境界がオーバーラップしてきている。すなわち、流体工学モデルでは解析領域の広域化、気象モデルでは解析格子の高解像度化が進んできている。その次の研究段階は、両シミュレーションモデ

ルのシームレスな結合であるが、両者をシームレスに結合するためには様々な困難が伴う。次世代の汎用流体工学モデルとして期待される LES (Large-Eddy Simulation) モデルと気象モデルのシームレスな結合は特に難しい。研究開始当初、LES モデルと気象モデルのシームレスな結合に関しては、国内のみならず国外においても十分な成功例がない状況であった。

流体工学モデルと気象モデルの結合の基本は、気象モデルの出力結果を流体工学モデルの境界条件（入力条件）として用いることである。しかし、気象モデルの解析格子は流体工学モデルの解析格子よりも粗く、気象モ

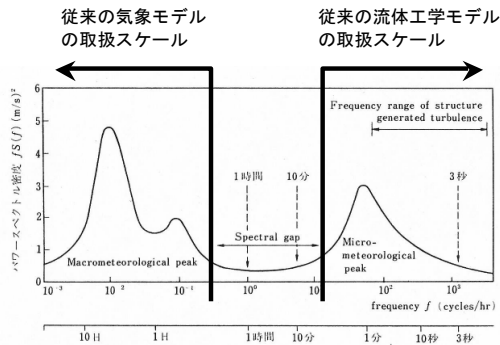


図1 従来のシミュレーションモデルの取扱スケールの違い (スペクトルの図は村上 (1984) より引用)

デルの出力結果のみでは流体力学モデルの格子解像度で必要となる微細な変動成分を与えることはできない。LES モデルと気象モデルのシームレスな結合においては、LES モデル側で必要となる微細な変動成分、特に流入境界条件として用いる微細な風速変動 (流入変動風) をいかに適切に再現するかが最大の課題となる。LES モデルのための流入変動風の生成に関しては、研究代表者らの研究 (Iizuka ら, Proc. 10th International Conference on Wind Engineering, 1999 など) を始めとして、これまでに幾つかの研究事例がある。しかし、これらの研究は風洞実験の再現など、理想的な条件下での流入変動風の生成事例である。一方、本研究では、気象モデルの出力結果に上乘せる変動成分、すなわち、実際の複雑な場を対象とした流入変動風の生成を目指しており、このような研究は国内外を問わずほとんどない状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、気象情報をシームレスに組み込んだ次世代の LES モデル (次世代流体力学モデル) を開発することである。そのためには、LES モデルと気象モデルの結合が必要となるが、両者の結合において最も大きな課題となるのが、LES モデル側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用いる微細な風速変動 (流入変動風) の生成手法の開発である。

3. 研究の方法

本研究は、2010 年度、2011 年度の 2 年間の研究として実施した。両年度ともに、LES モデルと気象モデルのシームレスな結合において最大の課題となる、LES モデルのための流入変動風の生成手法の開発に取り組んだ。

2010 年度は、LES モデルのための流入変動風の生成手法として、Moeng ら (Monthly

Weather Review, 135, 2007) が提案している LES-within-LES 手法を導入し、その有用性を検討した。Moeng らの LES-within-LES 手法は、気象モデルとの結合において LES モデルの 2 段階の領域ネスティングを行い、外側 LES モデルをバッファ領域 (擬似的 LES モデル) とみなし、内側 LES モデルで必要となる微細な乱流変動成分が生成できると期待する手法である。

2011 年度は、LES モデルのための流入変動風を人工的に生成する手法の開発に取り組んだ。1 つは、鉛直多層分割+各層における等方性乱流の仮定、による人工的な流入変動風の生成手法の開発である。等方性乱流は、Lee ら (Physics of Fluids, 1992) が提案している波数空間の 3 次元エネルギースペクトル+フーリエ逆変換に基づく手法により人工的に生成した。もう 1 つは、Reynolds 応力のコレスキー分解 (例えば、Lund ら, J. Computational Physics, 1998) + 1 様乱数に基づいて流入変動風を人工的に生成する手法の開発に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) LES-within-LES 手法の導入

気象モデルとしては世界最新鋭の領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting)、LES モデルとしては WRF に付属する LES 機能を用いて、名古屋市街地を中心とする領域の夏季風環境の解析を行った (以下の第 4 領域が主たる解析領域)。4 段階の領域ネスティング

- ・第 1 領域：日本全体を覆う領域
水平 1975km×1975km (水平格子 25km)
- ・第 2 領域：中部地方を覆う領域
水平 500km×500km (水平格子 5km)
- ・第 3 領域：濃尾平野を覆う領域
水平 120km×120km (水平格子 1km)
- ・第 4 領域：名古屋市を覆う領域
水平 30km×30km (水平格子 200m)

を用いて、①全ての解析領域で WRF を使用したケース (Case 1)、②第 1-3 領域に WRF、第 4 領域のみに LES を使用したケース (Case 2)、③第 1-2 領域に WRF、第 3-4 領域に LES を使用したケース (Case 3) の解析を行い、比較した。ここで、Case 3 が Moeng ら (2007) が提案している LES-within-LES 手法 (第 3 領域を外側 LES 領域、第 4 領域を内側 LES 領域とする、2 段階の領域ネスティング) を想定したケースである。

図 2 は名古屋 (名古屋地方気象台の位置) における風向・風速 (地上 17.9m) の日変化について、観測結果 (アメダス) と各ケースの結果を比較したものである。風向に関しては、3 ケースともに一日を通じて観測と同様の傾向を示している。しかし、風速の大きさはケ

ース間で大きく異なっている。風速の大きさについては、LES を接続していない Case 1 の結果が観測結果と最も良く対応している。一方、LES を用いた Case 2、Case 3 の結果は観測に比べて風速を過大評価している。

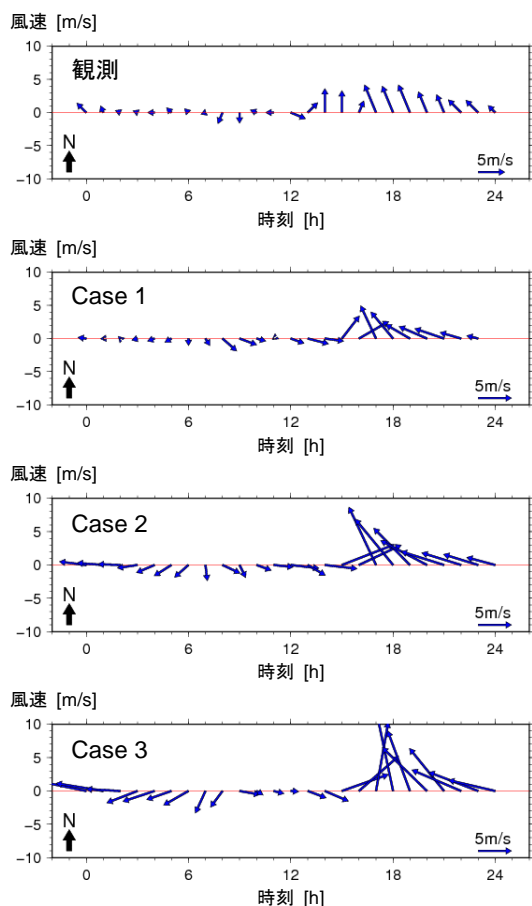


図2 風向・風速の日変化の比較 (2006年8月5日、地上17.9m)

図3に第3領域と第4領域における水平風速成分のスカラー値の分布(地上10m)を示す。同図において、第4領域の結果は第3領域の結果の中に貼り込み、枠が第3領域と第4領域の間の境界を表している。Case 1はWRFで統一しているため、境界近くの風速分布はほぼ滑らかに接続されている。一方、Case 2では、第4領域内の風速を大きく評価し、第3領域との接続は滑らかでない。Case 3では、第3領域の風速が他のケースに比べてかなり大きくなっている。また、第4領域内の風速も大きく評価し、第3領域と第4領域の接続は十分に滑らかではない。図は省略するが、Case 3では第2領域と第3領域の間でWRFとLESが接続されているため、その境界付近の風速分布の接続も滑らかとなっていない。

以上のような風速分布の不連続が生じてしまう原因としては、①LESの2重ネスティングを行っても、内側LESモデル側で必要となる微細な乱流変動成分の生成には至って

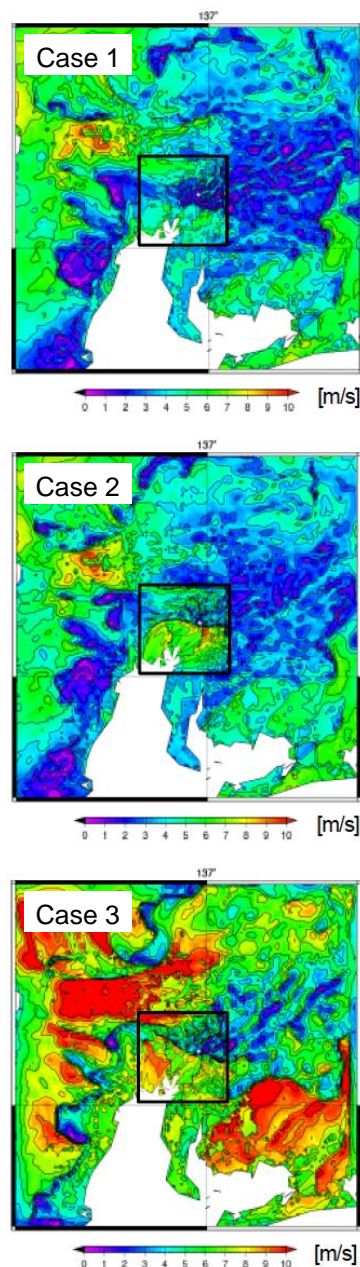


図3 スカラー風速(水平成分)分布(2006年8月5日14時、地上10m)

いないこと、②WRF(気象モデル)とLESモデルで用いている乱流モデル(乱流パラメタリゼーション)が大きく異なること、などが考えられる。特に①に関して、LESモデルのための流入変動風の生成手法としてLES-within-LES手法のみでは不十分と考えられ、人工的に微細な乱流変動成分を生成する手法の導入あるいは併用が必要であることが示唆された。

(2) 人工的な流入変動風の生成手法の開発

LESモデルのための人工的な流入変動風の生成手法の開発としてまず、鉛直多層分割とその各層における等方性乱流の仮定、による

手法の開発に取り組んだ。本手法開発は、平板境界層流を対象として行った。3. の研究の方法で述べたように、等方性乱流は、Leeら (1992) が提案している波数空間の3次元エネルギースペクトルとそのフーリエ逆変換に基づく手法により人工的に生成した。また、鉛直方向に多層分割するために、等方性乱流を生成する際に鉛直各層で乱流強度を変化させた。解析領域流入直後では鉛直多層分割の影響で階段状の乱流統計量(乱流エネルギーやせん断応力)の分布が続くものの、流下するにつれてそれなりに妥当と考えられる乱流統計量の分布を再現することができた。本手法をより実用的に用いるためには、階段状の非物理的な分布から物理的な分布になるまでの助走距離を可能な限り短くする必要があり、これは今後の課題である。

また、別の人工的な流入変動風の生成手法として、Reynolds 応力のコレスキー分解と一様乱数に基づいて流入変動風を生成する手法の開発に取り組んだ。この手法開発も平板境界層流を対象として行った。

図4は乱流エネルギーとシアストレスの鉛直分布について、目標値 PBC (水平方向に周期境界条件を用いた平板境界層流の LES 解析結果)と比較したものである。Reynolds 応力のコレスキー分解+一様乱数により人工的に生成した流入変動風を用いた解析の結果は、主流 (x_1) 方向に対して、 $x_1=0$ (流入面), 2.5H, 5.0H, 7.5H の4地点の鉛直分布(主流横断 (x_2) 方向に対しては平均)を示している。

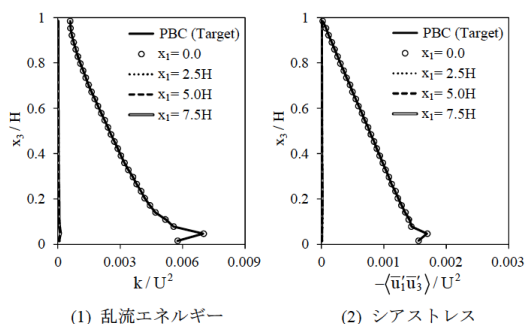


図4 乱流エネルギーとシアストレスの鉛直分布の比較(平板境界層流解析)

この手法の場合、流入境界条件としての乱流変動成分は目標値(PBC)を正しく再現できる。しかし、解析領域流入直後に大きな乱れの減衰が生じ、流下しても正常な乱れの回

復は見られなかった。Reynolds 応力のコレスキー分解と組み合わせる変動量が無相関の一様乱数ではなく、時間相関あるいは空間相関を持つものとする必要性が示唆された。

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1件)

- (1) Kinbara, K., Iizuka, S., Kuroki, M., Kondo, A., Merging WRF and LES models for the analysis of a wind environment in an urban area, Proceedings of the 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), 2010, 440-1-6.

[学会発表] (計5件)

- (1) 飯塚悟, 地球/都市/街区/建物空間における温熱環境・気流環境のダウンスケーリングシミュレーション, 空気調和・衛生工学会中部支部, 建築設備研究会, 2010年7月30日, 名古屋.
- (2) 金原和矢, 飯塚悟, 気象モデルと工学CFDモデルのシームレスな結合に向けて(その1) WRF-LESの適用, 日本建築学会大会, 2010年9月9日, 富山.
- (3) 近藤亮彦, 飯塚悟, 金原和矢, 人工的な流入変動風を用いた大気境界層流のLES, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 2011年5月25日, 千葉.
- (4) 飯塚悟, 都市環境学のoverview, 日本気象学会2011年度秋季大会シンポジウム「理学と工学の融合か 切り開く新しい都市環境学」, 2011年11月17日, 名古屋.
- (5) 飯塚悟, 50年後の名古屋の気温を予測する, 平成23年度名古屋市環境科学研究所・調査研究発表会, 2012年2月3日, 名古屋.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯塚 悟 (IIZUKA SATORU)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号: 40356407