

平成21年 4月30日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760413

研究課題名(和文) 次世代汎用CFDのための安定成層SGSモデル・植生
キャノピーモデルの開発研究課題名(英文) A study on subgrid-scale modeling for a next-generation
CFD method

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

研究成果の概要：

次世代汎用CFDとして多大な期待を集めるLESのためのSGSモデル、植生キャノピーモデルの開発研究を行った。植生キャノピーモデルの開発研究においては、LESとRANSを組み合わせた、簡易で汎用性の高いハイブリッドモデルを新たに開発した。一方で、LESとRANSの切替位置付近における速度分布の不整合など、新たに開発したモデルには問題点も見られた。現状、その問題点に対する改善策は十分ではなく、さらなる検討が今後も必要である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	0	2,400,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	300,000	3,700,000

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：環境流体工学、大気現象、ラージ・エディ・シミュレーション
サブグリッドスケールモデル、植生キャノピー

1. 研究開始当初の背景

気流解析や気流と連成される熱輸送・物質輸送解析において、CFD(Computational Fluid Dynamics：計算流体力学)は今や強力な解析ツールとなっている。CFDは大別して、①DNS(Direct Numerical Simulation)、②LES(Large Eddy Simulation)、③RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)の3つがある。このうち、乱流モデルを用いないDNSはCFDの中で最も理想的な手法であるが、計算負荷が

桁外れに大きく、現状および近い将来においても汎用的な利用は不可能である。現在の汎用CFDはRANSであるが、これは計算負荷が小さいという理由が大きい。一方、LESはRANSに比べて一般に遙かに高い解析精度を持つが、RANSよりも計算負荷が大きくなるのが欠点である。しかし、近年の計算機性能の向上は目覚ましく、LESの計算負荷の問題は大きく緩和されつつある。LESが汎用CFDとなる時も近い。次世代汎用CFDとしてLESは大きな期待を集めている。

研究代表者はこれまで長年に渡り LES に基づく数値モデル開発の研究に従事してきた。室内温熱環境解析（室内気流解析）や建物周辺気流解析といった人間・建物スケールのモデル開発から、近年では、複雑地形上の CO₂ 輸送解析といった地形スケールのモデル開発にも取り組んできている。研究開始当初、CO₂ を始めとする様々な物質の輸送解析において、温度成層や植生を含む複雑地形が及ぼす影響を詳細に解明することは特に難しい問題であった。

温度成層に関しては、安定、不安定それぞれに難しさがあるが、特に難しいのは安定成層の場合である。この場合、乱流モデル、スカラー（熱・物質）流束モデルのモデル化が大きな鍵となる。しかし、研究開発当初、安定成層の影響を十分に考慮して提案されている乱流モデル、スカラー流束モデルはほとんどなかった。特に、次世代汎用 CFD として期待される LES ではそのようなモデルは皆無に近かった。

複雑地形に関しては、地形そのものは一般曲線座標系や非構造格子、Immersed Boundary 法などの導入により、精度の高い再現が可能である。しかし、複雑地形上に生息する植生のモデル化（植生の葉や枝など、全てを正確に解像することは計算負荷の点から無理であるので、気流障害物としてのマクロなモデル化が必要となる。いわゆる「キャノピーモデル」）については、特に、次世代汎用 CFD として期待される LES では十分な研究が行われているとは言い難い状況であった。LES における植生キャノピーモデルの開発は気象分野で先駆的に行われてきていたが、比較的複雑な式体系に基づく一辺倒な方法が研究されているのみであった。汎用性を意図した簡易なモデル化など、十分な検討には至っていない状況にあった。

2. 研究の目的

次世代汎用 CFD として大きな期待を集める LES のための

(1) 安定成層に適用可能な subgrid-scale (SGS) モデルの開発

(2) 汎用性を意図した簡易な植生キャノピーモデルの開発

を行うことが本研究の目的である。

(1) 安定成層に適用可能な subgrid-scale (SGS) モデルの開発

現在の汎用 CFD である RANS、次世代の汎用 CFD として期待される LES を問わず、既存の乱流モデル、スカラー（熱・物質）流束モデルは多くの場合、勾配拡散近似（渦粘性近似）の考え方を前提にモデルが構築されている。しかし、これらを安定成層の解析に適用する

と、様々な問題が生じる。例えば、安定成層内で速度勾配が存在すると、勾配拡散近似型の乱流モデルでは乱れを増大させる方向に働く。しかし実際は安定成層なので、乱れは減衰している。このような乱れの減衰を含め、安定成層の影響を十分に考慮できる乱流 SGS モデル、スカラー流束 SGS モデルを開発する。モデル開発を行う場合、検証用のデータベースが不可欠となる。本研究では、DNS を用いて安定成層時の乱流・熱・物質輸送に関するデータベースを作成する。DNS データベース作成には、産業技術総合研究所所有のスーパーコンピュータ（HITACHI SR11000）を利用する（研究開始当初、研究代表者は産業技術総合研究所に所属）。最新鋭のスーパーコンピュータを持ってしても DNS の汎用的な利用は困難であるが、このようなデータベース作成への DNS の適用は大変有効である。

(2) 汎用性を意図した簡易な植生キャノピーモデルの開発

k-ε型 2 方程式モデルなど、RANS では比較的複雑な式体系のモデルがほとんどである。一方、LES の SGS モデルの場合、何かの物理量の輸送方程式を解くことを必要としない、0 方程式型モデルが主流である。0 方程式型モデルは簡便であることに加えて、通常は経験的に設定する必要があるモデル係数の数が最小限となるので、汎用性が増すという利点も持つ。しかし、これまで先駆的に研究されてきた LES のための植生キャノピーモデルは、SGS 運動エネルギーの輸送方程式を解く 1 方程式型 SGS モデルに基づく比較的複雑な式体系のモデルのみである。本研究では、次世代汎用 CFD としての LES を強く意識して、汎用性の高い簡易な植生キャノピーモデルを開発する。

3. 研究の方法

(1) 安定成層に適用可能な subgrid-scale (SGS) モデルの開発

まず始めに、スーパーコンピュータを利用して、安定成層時の乱流・熱・物質輸送に関する DNS データベースを作成する。作成する DNS データベースは、①安定度（弱安定～強安定）、②地形形状、③大気（基本的に弱風）をパラメータとする。このような DNS データベースを検証用データとして、安定成層に適用可能な LES の乱流 SGS モデル、スカラー（熱・物質）流束 SGS モデルを開発する。

(2) 汎用性を意図した簡易な植生キャノピーモデルの開発

まず始めに、汎用性の高い簡易な植生モデルを構築し、これまで先駆的に研究されてきた比較的複雑な式体系に基づく植生キャノ

ピーモデルと比較する。その比較結果やその他の問題も踏まえて、新たなキャノピーモデルの開発も行う。

4. 研究成果

本研究の目的の1つであった、安定成層に適用可能なSGSモデルの開発は、残念ながら新しいモデルの開発には至らなかった。2008年度に産業技術総合研究所から名古屋大学に異動したため、DNSデータベースが十分に作成できなかったこともその一因としてある。

本研究のもう1つの目的である植生キャノピーモデルの開発に関しては、まず、0方程式型SGSモデルの代表格である標準Smagorinskyモデルを用いたLESに基づく植生キャノピーモデルを構築し、これまで気象分野において先駆的に研究されてきた、SGS運動エネルギーの輸送方程式を解く1方程式型SGSモデルを用いたLESに基づく植生キャノピーモデルとの比較を行った。図1は平坦地形上の植生キャノピー内外の主流方向平均風速の鉛直分布を比較したものである(植生は水平方向に一様に分布する状況を設定)。この解析では、SGSモデルの影響が大きくなる比較的粗い計算格子を用いているが、図1に示されるように、両者にほとんど差は見られなかった。

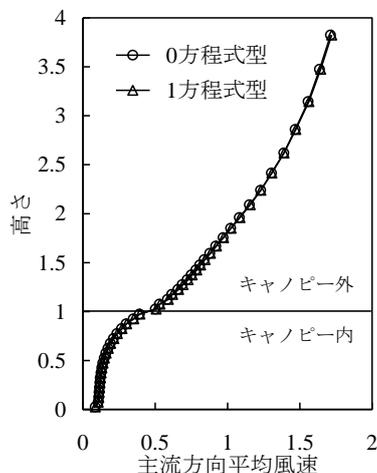


図1 平坦地形上の植生キャノピー内外の平均風速の比較

LESに植生キャノピーモデルを導入する場合、キャノピーモデル中に含まれる抗力係数の最適化が問題点の1つとして挙げられる。図2は、平坦地形上の植生キャノピー内部の主流方向平均風速の鉛直分布である。図2中のLES01、LES015、LES02は、キャノピーモデル中に含まれる抗力係数の値をそれぞれ、0.1、0.15、0.2としたものである(LESのSGS

モデルは全て0方程式型の標準Smagorinskyモデルに使用)。抗力係数の値が大きくなるほどキャノピーの抗力が大きくなるので、風速が減衰するのは当然であるが、ここで注意すべきことは抗力係数の値の多少の違いにより、大きく風速値が異なることである。

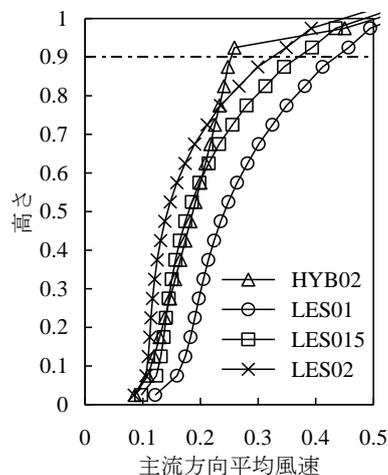


図2 平坦地形上の植生キャノピー内部の平均風速の比較

RANSのキャノピーモデルとは異なり、LESのキャノピーモデルでは、実験や実測で求められる平均値としての抗力係数をそのまま用いるのは問題があると考えられる一方で、与え方の明確な指針もない。この問題を回避する一方策として、本研究では、キャノピー層にRANSを適用し、それよりも上層部にLESを適用するLES/RANSハイブリッドモデルを開発した。本研究で開発したLES/RANSハイブリッドモデルの結果(平坦地形上の植生キャノピー内部の主流方向平均風速の鉛直分布)を図2に併せて示す。本研究で開発したLES/RANSハイブリッドモデルは非常に簡易で汎用性の高いものと考えているが、一方で、LESとRANSの切替位置付近で速度分布に不整合が生じてしまうという問題点も明らかになった(図2参照。高さ0.9m位置がLESとRANSの切替位置)。この問題点の改善のために、①LES、RANSそれぞれの乱流モデル(SGSモデル)の組み合わせ、②切替位置付近における空間的フィルタ操作の導入(Hamba, 2003, 2006)の検討を行なった。

①の組み合わせに関して、LESのSGSモデルとしては、標準Smagorinskyモデルと1方程式型SGSモデル、RANSとしては、混合距離モデルと平岡ら(1989)のk-εモデルを導入した。RANSとして平岡らのk-εモデルを用いた場合の方が若干妥当性の高い結果が得られたが(図1からも分かるように、LESのSGSモデルの違いによる影響はほとんどなし)、いずれの組み合わせでも、LESとRANSの切替

位置付近で流速分布に非物理的な不整合が生じた。そこで、それぞれの組み合わせに対して、②の切替位置付近での空間的なフィルタ操作（不整合な流速分布を滑らかにするためのフィルタ操作）の導入を試みた。しかし、いずれの場合も十分な改善は得られなかった。この問題に対しては今後もさらなる改善策を検討していく予定である。

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 1 件)

- (1) Iizuka, S., and Kondo, H. LES/RANS hybrid simulation of turbulent flow within and above a plant canopy. Proceedings of APCOM' 07-EPMESC XI, 査読無, 2007, MS41-1-2, 1-6.

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 飯塚悟, 近藤裕昭, 植生キャノピー乱流への RANS/LES ハイブリッドモデル導

入の試み, 日本流体力学会年会 2007, 2007 年 8 月 6 日, 東京.

- (2) 飯塚悟, 近藤裕昭, 植生キャノピー乱流への RANS/LES ハイブリッドモデル導入の試み, 2007 年度日本建築学会大会, 2007 年 8 月 29 日, 福岡.
- (3) 飯塚悟, 近藤裕昭, 植生キャノピー乱流の RANS/LES ハイブリッドシミュレーション, 第 9 回非静力学モデルに関するワークショップ, 2007 年 9 月 14 日, 京都.
- (4) Iizuka, S., and Kondo, H. A LES/RANS hybrid simulation of canopy flows. BBAA VI International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications, July 20, 2008, Milano, Italy.

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