

数値流体シンポにみる気象・環境分野の CFD

CFD Research on Meteorological and Environmental Problems Presented
at the 16th Symposium on CFD

坪倉 誠*

*東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻

Makoto Tsubokura

*Tokyo Institute of Technology

E-mail: tsubo@depe.titech.ac.jp

1 はじめに

近年、我々を取り巻く環境の悪化と、その結果引き起こされる様々な問題の大きさから、環境・エネルギー問題に対する意識が非常に高まっている。この社会的背景を反映してか、先ほど開催された第 16 回数値流体力学シンポジウムにおいても、気象・環境関係だけでも 6 つのセッションが用意され、盛んな研究発表が行われた。ここでは、このシンポジウムで発表された気象・環境・自然エネルギー関係の講演をもとに、CFD を用いたこの分野の研究の動向について述べる。

一口に気象・環境分野と言っても、対象とする問題は、地球温暖化といった地球規模のものから、最終的に人体にどのような影響を与えるのかといった人体スケールのものであり、対象とするスケールや問題によってそのアプローチの仕方、要求される精度も大きく異なる。そこでここでは空間スケールを基準として各トピックスに分類し、その動向について述べる。尚、紙面の都合上、全ての研究成果を網羅することは出来なかったことをご了承願いたい。

2 地形風、局地気候解析

恐らく気象・環境分野の CFD 解析で、今一番注目されているのが、空間スケールで数十キロ以下の局所風況や気候に関するものであると思われる。実際、今回のシンポジウムで最も発表されたのも、このスケールの地形風や局地気候に関するものであった。

気象学の視点からは、局所的な気象現象を高精度で捉えるべく、1000km 未満のメソスケールを

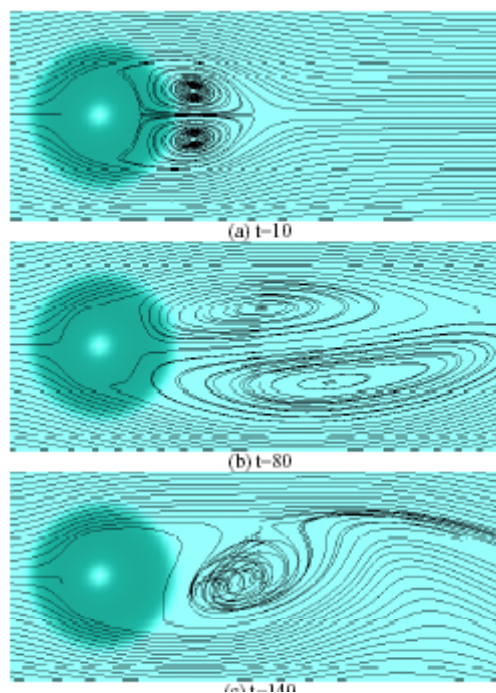


Fig. 1 Instantaneous streamlines, $z^*=0.5h$, $Re=3000$, top view

高分解能で解析する手法の開発が盛んである。より具体的には従来の非弾性・静力学平衡を仮定した方程式系から、高精度非静力学メソスケールモデルへの移行が活発に行われているようである(加藤ら B13-3)。

風工学的な観点からは、風力発電の適地選定や、局地的強風発生機構の理解、大気汚染物質の拡散予測といった研究がなされている。内田ら(B14-1、図 1 参照)は、LES をベースとする独自に開発した数値モデルを用いて、強安定成層状態において孤立峰から発生するカルマン渦列に類似の水平渦の解析を行い、その形成プロセスや鉛直方向構造を明らかにした。一方このスケールの流れ場を考えた場合、乱流の寄与が大きく、LES、RANS を問わず、乱流モデルの高精度化は必要な課題である。この観点から服部ら(B13-4)は、孤島や市街地建物を模擬した三次元立方体周りの RANS による高精度解析を目指し、 $k-\epsilon$ モデルの改良を行っている。

中山ら(B13-1)は、大気境界層における物質拡散過程において、地表面粗度が与える影響について、地表面粗度を風洞実験と類似のラフネスブロックで模擬することで LES 解析を行い、その特性を評価している。ここでは物質輸送方程式の対流項に CIP 法を用いて、濃度場に対する安定化を図っている。

2 河川・海洋

河川・海洋を対象とした CFD の発達は、土木工学の寄与するところが大きい。河川に関する研究では、河床や堤防における粗度、摩擦の効果に関する研究が二件発表された(B310-2、B310-4)。杉山ら(B310-2)は、曲がり開水路の代数応力モデルによる RANS 解析を行い、河床の粗滑が乱流構造に与える影響について調べている。ここでは粗面の影響は、乱流モデルの壁関数に対して境界条件として間接的に考慮されている。一方石井ら(B310-4)は、防災的見地から長良川を対象とした河川の洪水氾濫解析を行っている。また逆解析法の一つであるパラメータ同定法を用いて粗度係数の逆算値を求めている。海洋に関する研究としては、金子が(B26-2)有限要素法による海洋モデルとして、aliasing error free な Helmholtz 型水位方程式を導出し、その有用性を示している。

3 都市域熱環境

都市の発展に伴う地表面緑地面積の減少と人口排熱の増加は、ヒートアイランド現象と呼ばれる都市域特有の熱環境を生み出す。このヒートアイランド現象とそれに伴う大気汚染等の都市環境の悪化に対する対策を講じるためには、都市域特有の気候を詳細に予測し、その物理機構を明らかにする解析手法の確立が求められる。この都市気候を気流、熱輸送、水蒸気輸送といった様々な要因が複雑に絡み合う連成問題として捉えた場合、CFD は極めて有効な手法となりうる。

今回のシンポジウムでは同一のグループ

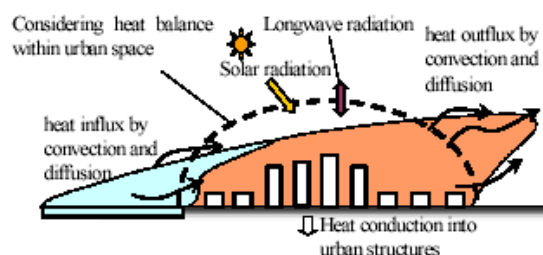


Fig. 2 Image of Urban Thermal Metabolism Model

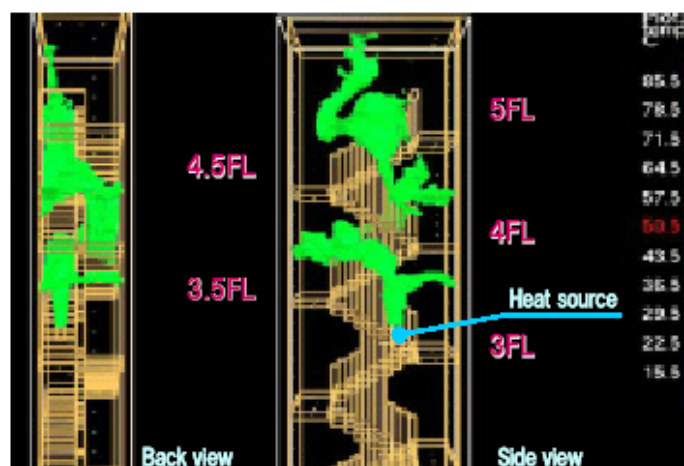
から二つの都市気候解析に関する研究の発表があった(B15-2、B15-3)。ここでは都市への流入熱、発熱、蓄熱を考慮した都市全体での熱収支を考慮した熱代謝モデル(図 2)が提案され、東京都区部を対象として解析結果が示された(原山ら B15-2)。また、この熱代謝モデルを用いて、都市緑化の効果に対する検討がなされた(佐々木ら B15-3)。これらの解析では三段階の nested grid を用いて約 400 キロ四方の東京都周辺の山岳、海洋の影響を考慮されており、興味深かった。

この他、陳ら(B15-1)は、Shenzhen 市の集合住宅を対象に、より建築問題に特化した建物スケールでの屋外温熱環境に関する数値解析を、RANS をベースにした対流・放射連成解析により行い、解析結果が実測値と良く一致することを示した。

4 植生キャノピー

都市域熱環境の植生による緩和効果に代表されるように、局地気候に関わる環境問題を考える場合、植生が気流に与える影響を詳細に捉え、モデル化することは重要な課題である。この観点から植生キャノピーのモデル化に関する発表がいくつかみられた。

平岡(B26-1)は、4 種類の RANS 乱流モデルに 5 種類の植生モデルを組み込み、測定データと詳細な比較を行うことで、包括的な植生キャノピー乱流モデルの評価を行った。基本的には平岡による植生モデルが、全ての乱流モデルのケースで比較的良い結果を示すようである。



(a) H30-CC

5 火災気流

火災時における熱気流や、爆発事故における爆風挙動を予測することが、防災的観点から求められている。火災時における熱気流挙動の CFD については、同一グループから二つの研究発表があった(阿部ら B311-1、飯田ら B311-2)。ここでは燃焼モデルに混合分率モデルを組み込んだ LES により、建物スケールの解析が行われた。図 3 に、阿部らにより得られた、建物階段室火災における温度分布を示す。温



(b) H30-OO

Fig.3 Isosurface of temperature (about 50°C) at 2 min.

度分布について、解析結果は実験結果と良い一致を示すことが報告されている。こういった RANS が不得意とする高浮力乱流場における実験値との良好な一致は、LES を用いたことに拠る部分が多いように思える。

6 室内気流

室内気流の問題は、古くから建築分野における CFD の課題の一つとして発展してきており、技術的にはかなり成熟しているという印象を受ける。今回のシンポジウムの講演中では、安福ら(B14-4)による、シックハウス問題の観点から化学反応を考慮した室内汚染物質濃度の予測と換気の影響に関する研究が、興味深かった。

7 その他

7.1 自然エネルギー

自然エネルギーの有効利用という観点から、波力発電用タービン翼(D311-2)、風車用翼型(D311-3)、風車まわり(D311-4)の CFD が報告された。翼型周りの解析は CFD のターゲットの一つとして古くから行われているが、特に風車用翼型に着目した場合、航空機の翼型とは運転条件や、翼の特性が大きく異なり、既存の知見が必ずしも有効ではないようである。その一つが抗力を抑える為に、翼型上面で乱流遷移をできるだけ遅らせる特性であり、RANS を用いた解析においてはこの遷移点を予測できる乱流モデルが今後の課題のようである(貞住ら D311-3)。古川(D311-4)らは、九州大学で提案された日本の風況特性を考慮した風車に対して RANS 計算を行い、その三次元渦構造の解析を行った(図 4)。

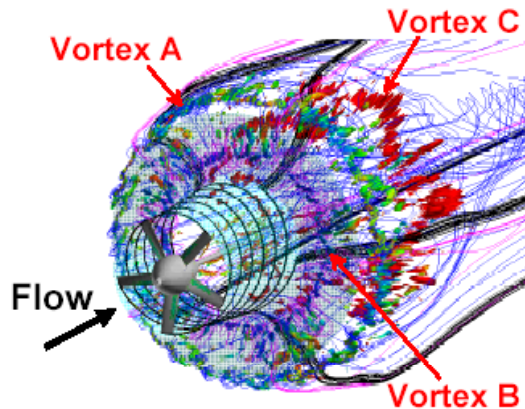


Fig.4 Three-dimensional vortical flow structure

7.2 大気海洋間の熱・物質輸送

地球規模の環境問題の一つとして、地球温暖化が重要な問題となっている。このとき、海洋が温暖化ガスのシンクとして大きな役割を果たすことから、大気中の温暖化ガス濃度の予測において、大気海洋間の熱・物質輸送の予測は重要な課題である。現在地球シミュレータ等を用いた地球規模での大気海洋シミュレーションが行われているが、こういったマクロシミュレーションにおいてモデル化される大気海洋物質交

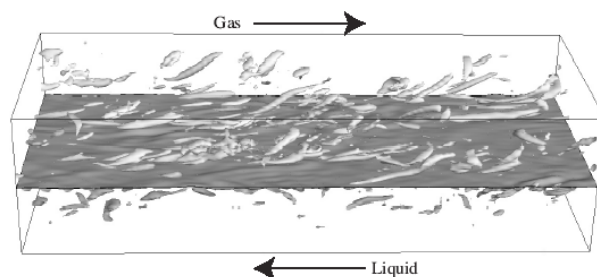


Fig.5 Turbulent structures near the wind-driven air-water interface

換過程の高精度化の為に、ミクロな物理現象に着目した熱・物質輸送の物理的機構の解明が求められている。このような観点から、気液界面での乱流物質輸送機構の DNS 解析が長谷川(E28-3、図 5)らにより報告されている。ここでは特に、液層においてさざなみに相当する短波長の波の影響について考察を加えている。一方、温暖化ガスの主要因である炭酸ガスの液層におけるシュミット数は 600 程度と非常に高く、DNS の実施が困難である。この観点から光石ら(E28-4)は DNS データを用いたアプリオリテストを行い、既存の SGS モデルに対する評価を行っている。

気象・環境分野の問題というと、とにかく高レイノルズ数条件が挙げられ、それだけで DNS の適用が難しいという印象を受けるが、これらの研究は、スケールを絞ることで非常に高い精度で基礎研究が可能であり、重要な知見を得ることができることを示している。

8 おわりに

最後に今回の数値流体シンポの建築・環境セッションに参加して、私が思ったことを少し述べたい。もともと気象・環境分野においては将来を予測することの必然性が非常に強く、CFD に対する期待感は大い。実際、空調室内環境の予測といった工学的側面が強い分野では、CFD 技術の成熟は著しく、既に設計支援に利用されつつある。しかしここで述べたその他の多くの分野で、解決すべき問題は数多く残されている。局地的な気候解析に限定しても、地形の変化や複雑に配置された複数の地上構造物の境界条件としての力学的、熱的表現方法、成層性大気境界層を想定した入口境界条件、成層効果が著しい場合の乱流モデルの開発等々、多くの課題がある。しかしながら様々な物理的要因が複雑に絡みあう結果、解析結果の妥当性や有用性を吟味するに耐えうる信頼すべき観測データが少ないのも事実である。

現在の社会的背景から、環境分野の研究は社会的インパクトも強く、CFD の結果も注目されやすい。しかし、CFD を実施して、「こんな計算やってみました。」「へえ、すごいですね。」と言って解析結果を見過ごされないように、そして CFD が真に環境問題に著しく貢献できる為にも、問題に対して要求される精度や、再現すべき現象を的確に認識し、目的意識を明確にした上で CFD を行うことが大切であろう。CFD の利点や将来性をことさら強調するよりも、むしろ対処したい各種環境問題に対して現在 CFD が持つ問題点を大きくクローズアップし、気象、建築、土木、機械といった垣根を越えて情報交換を行うことが求められている。様々な環境問題に対する CFD 技術の底上げの為に、比較的信頼すべきデータが豊富な基礎的問題に、ベンチマークとしてチャレンジすることも重要である。

こういった環境問題に特化した CFD 技術の底上げにより、環境アセスメントに基づく都市計画や政策立案といった社会的影響と責任のより大きい問題に対して、CFD が貢献できるようになると思われる。