

氏名	たかぎ けんじ 高木賢二
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)都市・建築学専攻
学位論文題目	大気・海洋連成運動の数値シミュレーションに関する研究
指導教官	東北大学教授 山田 大彦
論文審査委員	主査 東北大学教授 山田 大彦 東北大学教授 吉野 博 東北大学教授 柴田 明德 東北大学助教授 植松 康

## 論文内容要旨

我が国のように海浜地帯に発達した都市の風環境評価を合理的に行うには、海陸風の影響を精度良く考慮する必要がある。本論文の目的は、メソスケールの風環境予測の計算精度の向上を図るために、大気と海洋の流れを同時に計算する新しい数値シミュレーション手法を開発することにある。

本論文では、大気と海洋の連成運動に注目し、海面での連成メカニズムに関する考察をもとに、海面での運動量と熱エネルギーの連成計算モデルを提案する。また、風環境評価に必要なメソスケールの大気・海洋数値シミュレーションにおける差分近似方法、地表面での運動量と熱エネルギー収支計算モデル、更に大気と海洋の乱流計算モデル等を理論解析、数値シミュレーション並びに観測データとの比較により検討して、最適な大気・海洋連成運動の数値シミュレーション手法を提案する。これらの手法を用い、局地風と湾内流の2次元連成運動に応用し、連成効果を明らかにする。以上本論文は、風環境評価に期待される数値シミュレーションに関する新しい知見を提供するものである。

以下に本論文の構成と内容を示す。

### 第1章 序論

第1章では、様々な物理現象を含む風の数値シミュレーションに関して、その可能性を示すとともに、過去に行われた研究の調査・検討を行い、現状の課題を整理した。

現在の計算機能力の進歩とメソスケールの数値シミュレーションに特有な問題である静力学平衡の適用限界を考慮すれば、過去に提案された差分近似方法、地表面での運動量と熱エネルギー収支の計算モデル及び鉛直方向の乱流モデルに関して整理と再検討が必要であることを明らかにした。また、大気と海洋の連成現象のシミュレーションを行うには、連成現象の解明が必要であり、新しい大気と海洋の連成計算モデルの提案が必要であることを明かにした。

### 第2章 数値シミュレーションにおける差分近似精度と計算安定性

第2章では、大気と海洋の数値シミュレーションの基礎式である運動量と熱エネルギーの輸送方程式における線形項と移流項の差分近似方法に関して、過去に提案された数種類の計算式の差分近似精度と計算安定性に着目した比較・検討を行った。

局地循環風のような熱エネルギーが主な駆動源である場合には2次元の線形化が可能であり、境界条件により解析解が導き出せる。これから、線形項の数値計算結果と解析解との比較により定量的な計算方法の評価方法を提案して、2種類の計算方法の比較検討を行った。また、移流項の計算方法に対して、理論解析、1次元数値計算及び計算安定性解析から、4種類の計算方法について総合的な評価を行い、各計算方法の数値流体的特徴を定量的に明らかにした。

メソスケール大気運動の数値シミュレーションには、線形項の計算方法は4次精度の中心差分が、移流項の計算方法は時間に関しては松野法と空間に関しては4次中心差分が適していることが分かった。

次に、本章で検討した各計算方法を用いて2次元海陸循環風の計算を行った結果、海陸循環風のような一般風の小さい現象の数値シミュレーションでは移流項計算方法による計算結果への影響は小さいが、2

次精度及び3次精度風上差分による計算安定性の向上も小さいことが分かった。また、線形項（圧力項、水平拡散項）の差分近似方法による相違は計算結果に大きく影響し、近似精度の高い4次中心差分が適当であることが分かった。

### 第3章 観測データを用いた地表面での運動量、熱エネルギー収支計算モデルの検討

第3章では、地表面での運動量と熱エネルギー収支の計算モデルについて、過去に提案された数種類の計算式に対してメソスケールへの適用の妥当性を検証した。

東京都立川市において屋外観測を実施し、その観測データに基づく日射量、赤外放射量、顕熱及び潜熱量の各計算モデルの計算精度を明らかにし、これらの計算モデルを用いた地表面モデルの再現性を地表面温度予測シミュレーションにより明らかにした。

観測値との比較により、日射量計算には片山の提案式が、赤外放射量には Deardorff の提案式が、顕熱及び潜熱移動量と運動量輸送には KEYPS の式数値積分モデルが、それぞれメソスケール数値シミュレーションに最も適していることを定量的に明らかにした。また、これらの結果を用いて、地表面温度の数値シミュレーションを行い、コンクリート面では裸地モデルにより、芝生面では植生モデルにより、それぞれ $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内で観測値を予測できることが分かった。

### 第4章 大気と海洋の乱流モデル

第4章では、大気や海洋の数値シミュレーションにおいて様々に提案されている5種類の鉛直方向乱流モデルに関して、同一の条件のもとでの鉛直1次元大気運動シミュレーションの計算値と文献値及び観測値との比較・検討により、メソスケールの数値シミュレーションに最適な乱流モデルを明らかにした。

第4章で検討した乱流モデルは、大気や海洋の数値シミュレーションで多く用いられている k- $\epsilon$  モデル、並びに Mellor & Yamada の Second Order Turbulence Closure Model の level 2, level 2.25, level 2.5 及び level 2.5+ $q^2$ 1 である。これらのモデルについては、同一条件での比較を行った。

大気運動の日間の定性的な変化はどのモデルでも再現できることが分かった。また、k- $\epsilon$  モデルは他のモデルに比べ乱流の発達を小さく計算する傾向にあること、Mellor & Yamada モデルの level 2, level 2.25, level 2.5, level 2.5+ $q^2$ 1 ではほぼ同様な計算が可能であること、更に大気境界層内部の大気乱流の状態を良く再現するのは、level 2.5+ $q^2$ 1 モデルであることの知見を得た。

### 第5章 大気と海洋の連成計算モデルの提案

第5章では、大気と海洋を連成して計算する数値シミュレーションで必要となり、未だ検討がなされていない大気と海洋の連成現象を表現する計算モデルを提案し、観測データを用いてその計算精度を定量的に評価して、その妥当性を明らかにした。

海面近傍の大気と海洋の連成現象のメカニズムを理論的考察から明らかにし、海面直下の運動量と熱エネルギーの鉛直輸送の計算モデルを構築し、連成計算モデル式を提案した。次に、大気と海洋を同時に観測した Japanese TOGA-COARE データを用いて鉛直1次元の大気・海洋同時計算を行い、観測値と計算値を比較して提案した連成計算モデルの妥当性を評価した。海面温度や海洋へ投入される熱量に関して、Fig. 1 のように計算値と観測値は定量的に良く一致しており、提案した連成計算モデルは実際の連成現象を正しく再現でき得ることが確認された。

また、連成計算モデルを用いずに、従来の海洋の数値シミュレーションで用いられている海洋への投入熱量の観測値を与えるケースと海面直下の現象を考慮しないケースによる比較計算を行った。提案した連成計算モデルは海洋への投入熱量の観測値を与えるケースと同様な計算が可能であり、海面直下の現象を考慮しない連成計算は海面近くの混合現象を過小に評価して、実際の現象を再現できないことが分かった。これらの結果から、提案した大気と海洋の連成計算モデル

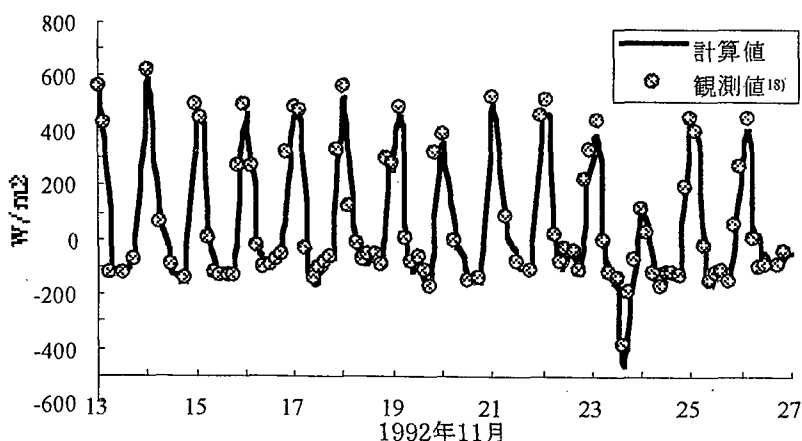


Fig. 1 海洋に投入される総熱移動量の時間変化  
(連成計算モデルの計算値と観測値の比較、横軸：日)

ルの有用性が確認された。

## 第6章 大気と海洋連成運動の数値シミュレーション

第6章では、前章の結果をふまえて、大気と海洋運動の連成現象を再現する数値シミュレーション手法を提案し、大気と海洋運動の連成現象として、2次元海陸循環風と海洋運動の連成現象を数値シミュレーションにより再現した。

水深が500mと深い沿岸域での海陸循環風に関しては、海上で海面の温度分布により2次渦が生じ、循環の大きさが地表面や海表面の温度を一様に変化させるシミュレーションに比べて大きくなることが分かった。また、海洋内全体の運動においては慣性振動による18時間周期の変動が大きく、海洋表層では海面の表層風の影響による12時間周期の変動がみられた。

さらに、東京湾のように水深が20mと浅い沿岸域の海陸循環風に関しては、大気と海洋双方のエクマン輸送や海面付近の密度成層の変化による相

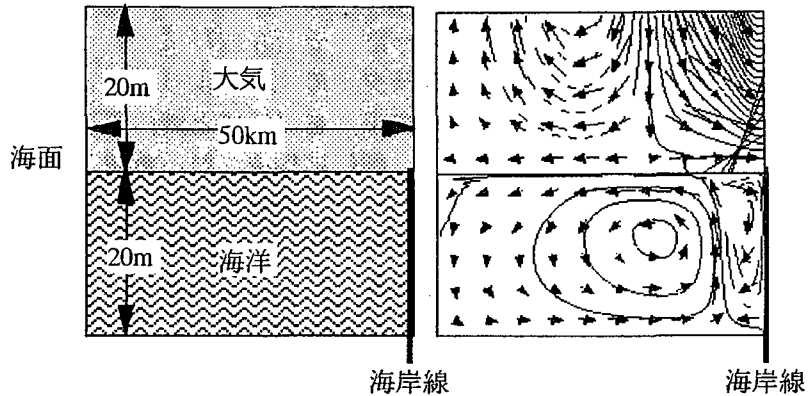


Fig. 2 大気と海洋の相互作用時刻12:00の流線図  
(実線=時計回り，破線=反時計回り)

相互作用が Fig. 2 のように定量的に把握でき、湾内流の現象解明に効果的であることがわかった。また、海洋運動を考慮して数値シミュレーションと従来の方法である海洋内の熱移動を鉛直1次元熱伝導とする数値シミュレーションを用いてパラメトリックな計算を行い、海洋内の熱移動を鉛直1次元熱伝導とする数値シミュレーションの場合には、総括的な海洋の温度拡散率を海水の温度拡散率の100倍~1000倍の間でパラメーター調整が必要であることを明らかにした。

このように、大気と海洋の連成現象に密接な現象を数値シミュレーションにより初めて再現することができた。

## 第7章 結論

第7章では、各章で得られた結果をまとめ、今後の課題について整理した。

## 審査結果の要旨

我が国における海浜地帯に発展した都市の風環境評価を合理的に行うには、海陸風の影響を精度よく考慮する必要がある。本論文では、大気と海洋の連成運動に注目し、海面での連成メカニズムに関する考察をもとに、海面での運動量と熱エネルギーの連成計算モデルを提案している。更に、風環境評価に必要なメソスケールの大気・海洋連成運動の数値シミュレーションにおける差分近似法、地表面での運動量と熱エネルギー収支計算モデル並びに大気と海洋の連成計算モデルを、理論解析、数値シミュレーション並びに観測データとの比較により検討して、最適な大気・海洋連成運動シミュレーション手法を提案している。この手法を局地風と湾内風の2次元連成運動に応用し、連成効果を明らかにしている。本論文は、風環境評価に期待される数値シミュレーションに関する新しい知見を提供したもので、全編7章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、運動量と熱エネルギーにおける線形項と移流項の差分近似方法について、精度と計算安定性を検討した。メソスケール大気運動の数値シミュレーションには、線形項については4次精度中心差分を用い、移流項については空間差分に4次精度中心差分、また時間差分に松野法を用いることが妥当であることを示した。

第3章では、地表面での運動量と熱エネルギー収支の計算モデルについて、屋外観測を実施して得たデータに基づき、既往の計算モデルのメソスケールにおける数値シミュレーションへの適用性を検討した。その結果を用いて地表面温度の数値シミュレーションを行い、コンクリート面並びに芝生面での温度変化を精度よく予測できることを明らかにした。これは、地表面熱収支の定量的評価方法を確立する上で重要な知見である。

第4章では、大気や海洋の数値シミュレーションにおいて提案されている Mellor等による2次完結モデルの内の4モデル並びに標準 $k-\epsilon$ モデルについて、メソスケールへの適用性を検討した。その結果、上記の5モデルは、いずれも定性的には日間変化を説明できるが、標準 $k-\epsilon$ モデルは他のモデルと比較して乱流の発達を小さく計算する傾向があること、また  $level2.5+q^1$ モデルは大気境界層内部の乱流状態をよくシミュレートできることの知見を得た。

第5章では、海面近傍の大気と海洋との連成現象のメカニズムを明らかにし、海面直下の運動量と熱エネルギーの鉛直輸送の計算モデルを構築し、連成計算を可能にした。また、大気と海洋の同時観測データを用い、本計算方法の妥当性を検証した。本連成計算モデルは、従来の方法のように海洋への投入熱量に観測値を必要とせず、シミュレーション方法を飛躍的に発展させるものと評価される。

第6章では、前章の結果を踏まえ、メソスケールにおける大気・海洋連成運動の数値シミュレーション手法を提案している。例として、水深が深い沿岸域と水深が浅い湾内域における2次元海陸循環風と海洋運動の連成現象を解析し、水深に応じた海洋運動の変化を明らかにした。また、海洋内の熱移動を鉛直1次元熱伝導とする従来の近似方法では、等価な海洋の温度拡散率を海水の持つ値の100倍のオーダーで調整することが必要であることを明らかにした。

以上要するに本論文は、風環境評価に期待されるメソスケールにおける大気・海洋連成運動の数値シミュレーションの手法を提案し、その有用性を明らかにしたもので、都市・建築学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。