

## 衛星データを用いた環境流体力学の展開

Development for Environmental Fluid Dynamics based on Satellite Data

- 研究代表者 東北大学工学研究科土木工学専攻教授 澤本正樹  
Prof., Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University  
Masaki Sawamoto
- 共同研究者 大阪大学工学研究科土木工学専攻教授 中辻啓二  
Prof., Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University  
Keiji Nakatsuji
- 東京工業大学情報理工学研究科情報環境学専攻教授 灘岡和夫  
Prof., Department of Mechanical and Environmental Informatics, Graduate School of Information  
Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
Kazuo Nadaoka
- 埼玉大学理工学研究科環境制御工学専攻助教授 浅枝隆  
Assoc.Prof., Department of Environmental Science and Human Technology, Saitama University  
Takashi Asaeda
- 八戸工業大学工学部土木工学科助教授 西田修三  
Assoc.Prof., Department of Civil Engineering, Hachinohe Institute of Technology  
Shuzo Nishida
- 東京工業大学総合理工学研究科環境物理工学専攻助手 長尾正之  
Res. Assoc., Department of Environmental Physics, Interdisciplinary Graduate School of Science and  
Engineering, Tokyo Institute of Technology  
Masayuki Nagao

Following subthemes are studied from the view points of utilization of satellite data for analysis in environmental fluid mechanics.

- 1) Flow and temperature field analysis through NOAA image database.
- 2) Hydrodynamics of the Yodo River effluent in Osaka Bay based on satellite infrared images.
- 3) Development and application of a satellite-data analysis method for monitoring of coastal environments.
- 4) Flow pattern and temperature structure analysis based on satellite data and field observations.
- 5) Correlation analysis between remotely sensed vegetation activity and ground observations.
- 6) Empirical estimation of diurnal radiation with NOAA satellite data.

### 研究目的

地球規模の議論が契機となり、環境問題も次第に広い領域の議論を行うようになってきている。広域の環境観測に衛星データの利用が不可欠であることはよく知られているが、環境過程の中の最も重要な水循環・物質循環・エネルギー循環を扱う場合には、衛星で流体の運動そのものが観測できるわけではないので衛星データから対応する物理過程の情報を引き出すには慎重な検討が必要であるとともに、地上で得られる他のデータの利用や数値計算などを併用した解析が必要となる。このような観点から本研究では、

- 1) 衛星データと地上の物理過程に対応する諸量をどのように結びつけるか
  - 2) 実際に衛星データを利用してどのような環境場の流体力学を議論することができるのか
- の2つを検討することを目的とする。

### 研究経過

上述の目的に従い以下の項目を分担で研究した。

- 1) 衛星画像データベースを利用した沿岸域の流動・熱環境解析：澤本正樹@東北大学。公表論文：1, 2, 3
- 2) 衛星データを用いた淀川流出流の拡がり機構の解明：中辻啓二@大阪大学。公表論文：4, 5, 6
- 3) 沿岸環境モニタリングのための衛星リモートセンシング画像解析法の開発と応用：灘岡和夫@東京工業大学。公表論文：7, 8, 9, 10
- 4) 衛星データと現地実測を組み合わせた陸奥湾の流動と水温構造の解析：西田修三@八戸工業大学・中辻啓二@大阪大学。公表論文：11, 12, 13
- 5) 衛星計測植生活性指標の地上計測量への定量化：浅枝隆@埼玉大学。公表論文：14
- 6) NOAA衛星データを用いた簡単な日射量時系列の推定方法について：長尾正之@東京工業大学。公表論文：15

1)では、衛星データを時系列データとして利用して流動および熱収支を議論することを目的とした。利用した衛星画像は東北大学に整備されているNOAA/AVHRRデータの画像データベースのものである。

流動の解析では駿河湾・熊野灘の熱画像を使い、その経日的変化からこの海域に特有の暖水塊の発生・流下・拡散の過程を観察するとともに、地上で得られている潮位データ・水温データを収集し、その流体力学的機構についての考察を行った。さらに沿岸域の海水が短期間に交換する急潮現象を衛星画像から観察することを試みた。

沿岸域の熱収支解析では、東京湾を対象として衛星熱画像データと地上データとから熱収支を解析した。まず、画像データベースから244シーンを収集した。さらに、観音崎での海面温度で温度補正を行った後に、湾内の全点の水温時系列にフーリエ展開を施し、年変動パターンを抽出した。次に熱収支に関連する地上データとして気温、風速・風向などの気象データ、潮位データ、河川流量データを収集し、熱収支に関わる全ての要素の評価を行った。これらから年間の熱収支の評価を行うとともに、東京湾の温度変化のモデルを検討した。

2)では、淀川からの洪水の流入による大阪湾内の流動機構の検討を行った。NOAA衛星画像の収集により、大規模な洪水があると河口から神戸・淡路島東岸沖へ向かう反時計回りの流れのあることが確かめられた。これは、洪水の水平規模がロスビー半径を超えると地球回転の影響を受けるためと解釈できる。一方、平水時や小洪水のときには時計回りの流れとなることが知られており、単純な解釈では説明しえないことも明らかになった。そのため、この機構を明確にするために、衛星による流れの観測と並行して3次元数値実験を実施した。

3)では、沿岸環境モニタリングシステムの開発を行った。これまでの解析手法では、総じてシートウールズ・データと衛星データ間の経験的な回帰関係式や何らかの統計的手法に基づく経験的な枠組みによるものであることから、陸域と接しているがゆえにさまざまな汚染物質や環境関連物質が混在し、かつ時間変動も大きくなり易い沿岸環境のモニタリングを行っていくには、基本的な限界がある。また、従来のリモートセンシング観測では、多くの場合、水表面ないしはごく表層の情報しか抽出しておらず、事実上平面的2次元観測になっていることから、プランクトン濃度などの鉛直分布情報が重要となる測定対象が多い沿岸環境モ

ニタリングにとって、そのことが重大な制約となっている。

そこで、本研究では、このような従来のモニタリング手法の本質的な限界を打破すべく、以下の項目について具体的に研究・開発を行うことにより、合理性・一般性のある沿岸環境モニタリングシステムを構築することを試みた。

a)対象海域中に複数のモニタリング対象物質が混在する場合を想定して、光学理論(放射伝達理論)に基づく定式化を行うとともに、それと非線形最適化手法を組み合わせることで、衛星データから各対象物質濃度を理論的に逆推定する手法を開発した。

b)可視光の水中透過特性(具体的には透過深さ)が波長依存性を持つことを利用して、この逆推定法をさらに一般化することにより、各物質濃度の鉛直方向分布情報を抽出するための手法を開発した。

4)では、陸奥湾の水温分布と流動の解析を行った。まず、1年分のデータを手し、NOAA熱画像の輝度温度と湾内自動観測ブイで計測された実測水温との比較を行い、その精度と補正方法を検討した。その結果を基に、NOAAデータによる陸奥湾の表層水温の季節変動を明らかにし、さらに、連続する2画像データを基に相関法による表層流動の解析も行った。また、観測ブイによって採取された水温データを基に成層構造の解析を行うとともに、95年8月、96年7月、8月には流動と水温塩分構造の実態を把握するための現地観測も併せて実施した。

5)では、公園緑地がヒートアイランド現象で気温が上昇している周辺都市域内のクールスポットとして熱環境的に重要な役割を果たしていることに着目し、都市熱環境解析への衛星データの利用のための基礎的な検討を行った。そのため、衛星で計測される正規化植生活性指標NDVIと地上の観測量である樹木の葉面積指数LAIとの関連を調べた。NDVIとLAIとの関連の報告例はこれまでもいくつかあるが、樹木のスケールとセンサーの解像度が大きく異なることによる誤差が問題となる。本研究では、高解像度の航空機MSSセンサー(解像度1.2m)を用い、単体広葉常緑樹のLAIとNDVIとの関係について調べた。

6)では、広域の環境解析で必要となる日射量の空間分布・時間変動を、衛星データから推定する方法を検討した。そのために、NOAA衛星の近赤外画像と地上観測点における日射量の時間変化の関係を調べ、日射量の推定方法についての考察を行った。まず、NOAA衛星

画像と、そのデータ取得時刻における地上観測点での日射量との間の相関関係を調べた。次にこの結果を使って、気象衛星ひまわりの画像から、地上観測点上を通過する雲の平均的移流方向を求め、NOAA衛星画像上の雲の空間分布と地上観測点での日射量時系列との相関を調べた。

#### 研究成果

1)の流動・熱環境解析では熊野灘・駿河湾における黒潮系暖水塊が紀伊半島先端から剥離・放出される渦として観察できた。この流下からこの海域における乱流拡散係数を評価し、それがリチャードソンの相似則の延長上にあることを確かめた。さらに、駿河湾における急潮現象がこの暖水塊の湾への侵入現象であることを確かめ、衛星データにより急潮の予報が可能であることを指摘した。

東京湾の熱環境解析では、まず、衛星データを時系列データとして利用する際に必要な処理法を明らかにした。次に年間の水温分布パターンを抽出し、熱収支の各要素を定量化することができた。それによると、東京湾のような浅い閉鎖性の湾では、日照による加熱、水面からの潜熱・顕熱輸送による冷却が主要な熱輸送であり、それに陸域から河川を通じて熱の供給があり、これらが潮汐により湾奥、湾口、湾外で交換される機構が定量化できた。これらの収支は年間で数%の誤差の精度で議論しうることが確かめられた。また、海面水温と気象データとから水温変動を計算するモデルを提案し、数年にわたり精度よい計算が可能となることを確かめた。

2)の数値実験では、平水時の淀川河川水の挙動には洪水時のそれとは異なる力学が作用していることが予想されるため、パロクニック流れの3次元数値実験を採用した。それによると、成層状態にある湾奥部の上層水への下層水の連行と浮力による密度流が結びついた結果として、上層の水平発散が惹起され、地球自転の影響を受けて渦度を生じる、換言すれば、上層水は時計廻りに回転を始めることになる。この高気圧性渦脱は、水平発散を直接引き起こす要因はラグランジェ風の粒子追跡計算結果からエスチュアリー特有の鉛直循環であることが判明した。この時計廻りの環流の存在は伊勢湾や東京湾の湾奥においても観測されている。これにより平水時の淀川河川水は南下するように運ばれる。このように、同じコリオリ力が全く異なった形で作用するというきわめて興味深い結果が得られた。

3)では、初年度 LANDSAT/TM画像により、東京湾奥における青潮現象を捉えることに成功し、その発生原因を把握すべく、次年度において現地観測を行った。これらと並行して、光学理論に基づく衛星画像解析法の開発を行い、それによって、青潮海域の成分物質を抽出することに成功した。さらに、最終年度、海域内物質の鉛直分布情報を抽出するための手法の開発した。これらにより、従来シートゥールースとの直接対比で経験的に推定していた水質項目が理論的に定量化できるようになった。

4)の陸奥湾の衛星データ解析では、NOAAのCh.4より得られた輝度温度と観測ブイによって計測された実測温度には最大で約5℃の温度差がみられたが、ブイ観測を実施している湾内6地点において同様の特性を示すとともに、経時変化の傾向もほぼ一致しており、線形補正を施すことによりCh.4データを用いて約1℃の精度で湾内水温分布の把握が可能であることがわかった。温度補正を施した熱画像の解析より、3月には湾外に比べ湾内では表層水温が最大で4℃低く、8月には逆に3℃高くなっており、閉鎖性内湾の水温特性を示していることがわかった。また、水塊が出入りする湾口部では水温と等温線に大きな日変化がみられ、激しい水交換のようすが画像データにも現れていた。連続した2つの熱画像を基に相関法による表層流動の解析を行った結果、湾奥では流向が安定せず低流速の流れを示したのに対し、湾口部では潮汐に対応した卓越した流動が認められ、衛星画像による表層流動の定量化が可能であることがわかった。

水深方向に多点計測されているブイデータの解析により、夏季の成層化傾向は湾口部より湾央の方が強く、表層と底層の水温差が7℃に及んでいることがわかった。また、夏季に実施した現地観測の結果より、湾口部では内部潮汐波の入射に起因した流動が卓越し、密度構造と大きく関係していることが明らかとなった。

5)の植生活性指標NDVIと葉面積指数LAIの関係では、まず、高精度航空機NDVIと地上単位面積あたりの樹幹直径の二乗とを比較したところ、両者の間に対数関係があることが明確になった。樹幹直径の二乗はLAIと直線関係にあることが知られており、針葉樹についてはその係数も報告されている。今回はクスノキについて新たにその関係を確定することができた。今回は高解像度のNDVIデータを使用したので単純な比較は難しいが、落葉性針葉樹林と常緑広葉樹であるクスノキではその係数が大きく異なることがわかった。

6) 衛星による日射量時系列推定では、まずNOAA画像から求められた雲のアルベド値と、画像撮影時刻に相当する地上観測日射量と理論晴天日射量との比(日射率)の間には、高い相関関係があることを確かめた。さらに、実際の雲は一様に分布していないため、これを考慮したアルベド値と日射率の回帰式を作成した。次に、上で述べた方法により、NOAA衛星画像から地上観測点の真上を通過したと考えられるアルベドの時系列を求め、先に求めた回帰式から日射量を推定した。この値を地上観測点での日射量と比較したところ、雲の移流状態の予測がうまくいった場合では、地上日射量との対応が良好であることが確かめられた。

#### 今後の課題と発展

本研究では衛星データを利用して広域の環境場での流体力学的検討の可能性を探ってきた。データの特徴から流れそのものを扱うばかりでなく、熱や物質循環を扱う場合が多くなり、しかも、それがきわめて有効かつ将来性のあることが確かめられた。

衛星データに立脚した解析では必然的に対象範囲が広がる。このことは逆に従来の空間的スケール・時間的スケールでの研究の枠組みの中に衛星データを取り込もうとしても必ずしもうまくは行かないということでもある。さらに、衛星データから環境過程の有意な情報を引き出すには、対象とする現象への深い理解と地上計測・その他のデータの併用が不可欠であることも明確となった。

今後、この方面での発展は大いに期待できる。それと同時に我々研究者にとっては従来の研究の枠組みを超えた発想を求められていることにもなり、一層の努力が求められていることにもなる。

#### 研発表論文リスト

1. 児島正一郎・風間聡・沢本正樹：黒潮系暖水遠州灘～駿河湾への流入と挙動，海岸工学論文集，Vol. 42，421-425，1995.
2. Kojima, S., S. Kazama and M. Sawamoto: Observation of the eddy structures by the satellite, Proc. 4th Asian Symp. on Visualization, 451-458, 1996.
3. 中野渡新一・風間聡・沢本正樹：熱収支モデルによる東京湾の熱環境評価，海岸工学論文集，Vol.

- 43, 1131-1136, 1996.
4. Nakatsuji, K. and T. Fujiwara : Anticyclonic Residual Circulation in Upper Layer and Estuarine Vertical Circulation Observed in Head of Enclosed Bays, Estuarine and Coastal Modelling Conference, (Ed. M.L. Spaulding and R. T. Cheng), ASCE, 128-142, 1996.
5. Nakatsuji, K. and T. Fujiwara : Residual Baroclinic Circulation in Semienclosed Coastal Seas, J. Hydraulic Engineering, Vol. 123, No. 4, 362-373, 1997.
6. 金種仁・中辻啓二・村岡浩爾：大阪湾の底質特性と淀川洪水時の挙動特性との関連性，海岸工学論文集，Vol. 43, 336-340, 1996.
7. 宮崎早苗・八木宏・小倉久子・灘岡和夫：衛星画像解析に基づく東京湾の青潮発生状況把握の試み，海岸工学論文集，Vol. 42, 1076-1080, 1995.
8. 宮崎早苗・灘岡和夫・八木宏：光学理論に基づく海域内物質濃度の逆推定法，海岸工学論文集，Vol. 43, 1261-1265, 1996.
9. 宮崎早苗・灘岡和夫：光学理論に基づく海域内物質濃度の鉛直構造推定，海岸工学論文集，Vol. 44, 1997.
10. 八木宏・内山雄介・鯉淵幸生・日向博文・宮崎早苗・灘岡和夫：東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性に関する現地観測，海岸工学論文集，Vol. 44, 1997. 印刷中
11. 中辻啓二・崔成烈・西田修三・福島博文・湯浅泰三：陸奥湾の湾口部における密度構造と流れ，水工学論文集，Vol. 40, 467-472, 1996.
12. 福島博文・崔成烈・西田修三・中辻啓二・湯浅泰三：陸奥湾湾口部における物質輸送機構，海岸工学論文集，Vol. 43, 326-330, 1996.
13. 崔成烈・入江政安・福島博文・西田修三・中辻啓二：陸奥湾における流動・密度構造—1996年夏の観測—，海岸工学論文集，Vol. 44, 1997(印刷中)。
14. 藤野毅・浅枝隆・中津川徹・坪松学：航空機MSSによるNDVI分布特性と樹幹形状の関係について，水工学論文集，Vol. 41, 343-348, 1997.
15. 小澤啓明，長尾正之，石川忠晴：NOAA画像を用いた日射量の推定，土木学会年次学術講演会概要集第2部，1018-1019, 1995