

- 2.4 The HRPT data receiving station in the Tohoku University
- 2.5 Summary
- Chapter 3. The accuracy of SST estimation equations of the AVHRR/NOAA-11 in the oceans around Japan
 - 3.1 Introduction
 - 3.2 MCSST and CPSST equations
 - 3.3 Match-up data set
 - 3.4 Satellite SST and buoy SST comparison
 - 3.5 Relations among the satellite-derived SSTs
 - 3.6 Characteristics of Sakaida and Kawamura's MCSST
 - 3.7 Summary and conclusion
- Chapter 4. Sea surface cooling caused by typhoons in the Tohoku Area in August 1989
 - 4.1 Introduction
 - 4.2 Background of sea surface cooling study
 - 4.3 Data
 - 4.4 SST change in the Tohoku Area before and after the typhoons
 - 4.5 Relationships between the upper ocean structure and the sea surface cooling
 - 4.6 Mechanism of the sea surface cooling
 - 4.6.1 Surface heat flux observed during the typhoon passages
 - 4.6.2 Numerical experiments
 - 4.7 Summary and discussions
- Chapter 5. SST variations in the ocean south of Japan during the 1988-1989 and 1989-1990 wintertimes
 - Part 1 : Satellite SST data producing procedure and validation of the satellite SST data set
 - 5.1 Introduction
 - 5.2 Satellite SST data set
 - 5.2.1 SST calculation at each grid point
 - 5.2.2 Cloud detection algorithm
 - 5.2.3 Some remarks
 - 5.3 JMA SST-MCSST comparison
 - 5.3.1 Background
 - 5.3.2 Analysis techniques
 - 5.3.3 Results
 - 5.3.4 Discussions

5.4 Summary and conclusion

Chapter 6. SST variations in the ocean south of Japan during the 1988-1989 and 1989-1990
wintertimes. Part 2

6.1 Introduction

6.2 Overview of SST variations

6.3 Meander of the subtropical front and its westward propagation

6.4 Discussions

Chapter 7. Conclusion

Acknowledgments

References

Tables and figures

論文内容要旨

海面水温 (SST) データは、海洋-大気系を理解する上で、欠かすことのできない情報源である。近年、地球観測において、人工衛星を利用したリモート・センシング技術の有用性が認識されているが、海洋学の分野では、NOAA 衛星に登載されている Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) センサーが、局地的な、あるいは、全球的な SST 観測において、非常に重要な役割を果たしている。東北大学理学部付属の大気海洋変動観測研究センター (CAOS) には、NOAA 衛星の HRPT データの受信施設が整備され、HRPT データの常時受信が行われている。また、CAOS において、HRPT データに含まれる AVHRR/NOAA データを利用した精度のよい SST 推定手法も開発されている。本研究では、AVHRR/NOAA-11 データから導出した SST データを利用して、様々な海洋現象を研究した。対象とした現象は、全て、衛星リモートセンシング以外の手法、すなわち、船舶・ブイでは、詳細な研究が困難であった現象である。現象の解析と平行して、本研究では、衛星から導出される SST の精度検証も行った。

衛星による SST 観測、および、それにより得られたデータが、海洋学の分野において本格的に利用されるようになったのは1970年代の終わり頃からである。それは、それ以前から行われていた宇宙開発による技術の蓄積を背景に、NOAA 衛星による定常的な観測が開始された時期に一致する。以来、衛星 SST 観測データを用いて多くの基礎的研究が行われ、色々な分野へ応用可能な様々なノウハウが蓄積されてきた。本研究も、宇宙開発技術を利用した、将来における全球的な海洋観測システム構築のための基礎的研究と位置付けられる。

1章では、本研究の立脚点を明らかにするために、研究の背景について述べた。また、本論文の構成についても述べた。

2章では、NOAA 衛星と AVHRR センサーについて述べた。NOAA 衛星は、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) が継続的に運用している極軌道地球環境監視衛星である。TIROS-N シリーズと呼ばれる NOAA 衛星の運用は1978年に開始され、現在に至っている。TIROS-N シリーズの衛星には AVHRR センサーが登載されている。AVHRR センサーは、地表面で反射された太陽光反射光や、地表面からの熱赤外放射を測定する受動型のセンサーである。AVHRR は、1回の走査で、地上距離にして約 3000 km の幅の領域を、1.1 km (直下点で) という分解能で観測する。そのため、AVHRR は、広域にわたる密な SST 観測を可能とする。AVHRR/NOAA のデータを使うための設備と基本的なソフトウェアについても、2章で述べた。CAOS では、AVHRR データの処理システムが実用化されている。そのシステムは、NOAA が公表している標準的な処理を実現している。

AVHRR/NOAA データを使って SST を求める手法としては、MCSST (Multi-Channel SST) 法や CPSST (Cross Product SST) 法等が知られている。本研究に先立ち、Sakaida and Kawamura (1992a) では、NOAA/NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and

Information Services) が公表している MCSST, CPSST 式の, 日本周辺海域における精度検証を行った。その検証には, 気象庁が運用している海洋気象ブイデータと AVHRR/NOAA-11 データとで作成したデータセットを用いた。また, 精度検証の結果を踏まえて, データセットから新たな MCSST 式が導出された。この Sakaida and Kawamura (1992a) で導出した MCSST 式は, 本研究を通じて利用される式である。3 章では, Sakaida and Kawamura (1992a) の MCSST 式の精度評価を, 海洋気象ブイのデータとの比較, 及び, NOAA/NESDIS の方程式との比較によって行った。

海洋気象ブイ (ブイ SST) との比較の結果によれば, Sakaida and Kawamura の MCSST 式のバイアスは 0.08°C , 残差の標準偏差は 0.51°C であった。NOAA/NESDIS の夜間のデータに対する式がブイ SST よりもやや低目の値を見積もる傾向があることを除けば, NOAA/NESDIS の式も, Sakaida and Kawamura の式も, 結果として得られるバイアス, 残差の標準偏差の値に大きな違いはない。

Sakaida and Kawamura の式により得られる SST (MCSST) と, NOAA/NESDIS の MCSST 式により得られる SST [MCSST (NOAA)], NOAA/NESDIS の CPSST 式により得られる SST [CPSST (NOAA)], の 3 者の間には, ある関係がある。MCSST と MCSST (NOAA) との差は, 比較的小さい。昼間の MCSST (NOAA) は, ブイ SST が 20°C を越える場合, あるいは, AVHRR のチャンネル 4 と 5 の輝度温度差 ($T_4 - T_5$) が 2°C を越える場合には, MCSST よりも高めの値となる傾向がある。CPSST (NOAA) は, $T_4 - T_5$ が 1°C より低いとき, または, 2°C より高いときに MCSST よりも高めの値となる傾向がある。CPSST (NOAA) と MCSST (NOAA) の差は 0.7°C にも及ぶ。データセットから, チャンネル 4 の輝度温度 (T_4) と $T_4 - T_5$ の関係を仮定し, その仮定されたレンジにおける, 3 者の違いを調べた。模擬的に計算された 3 者の SST 値の間に成り立つ関係は, 先に述べた関係をよく再現した。

仮定された T_4 と $T_4 - T_5$ の関係を使って, 昼間の式から計算される SST 値と夜間の式から計算される SST 値との差について調べた。衛星天頂角 (ϕ) が 60° のとき, 夜間の式から得られる値は, 昼間の式から得られる値よりも, 18°C を越える辺りから, 常に高目となるという結果が得られた。これは, Reynolds et al. (1989) により指摘された次の問題点に関係している。すなわち, Reynolds et al. (1989) は, 太平洋西部熱帯域に, 昼間の SST が, 夜間よりも最大で 0.5°C も低くなる領域があることを示した。このような不自然な領域が生じた原因は, 先に示したように, 衛星から SST を求める式そのものに内在していると考えられる。

4 章では, 1989 年 8 月の東北海区において, 台風 14, 15 号が引き起こした大きな SST 降下現象を, AVHRR/NOAA-11 から得た MCSST 画像, 海洋気象ブイデータ, 船舶観測データを合わせ用いることにより, 解析した。そして, SST 降下現象と, 東北海区の複雑な海洋構造との間の関係を明らかにした。台風通過前, 通過後の MCSST 画像の比較により, 東北海区には, 最大 10°C にも及ぶ SST 降下が生じていたことが分かった。SST 降下域は, 黒潮統流の北側, 及び, 143°E よりも東側の領域に広がっていた。ただし, その領域内でも, そこにあるいくつかの

暖水塊の内部では、大きな SST 降下は生じていなかった。SST 降下域の船舶観測データの多くは、200 m 深水温 (T_{200}) が 10°C よりも低いことを示した。Kawai (1972) によれば、 $T_{200} < 10^{\circ}\text{C}$ である領域は、東北海区の中でも、親潮による影響が大きい領域であり、従って、本研究では、この領域を親潮域と呼ぶ。結局、海面水温降下域は親潮域に対応していることになる。

鉛直方向の温度プロファイルを調べたところ、親潮域では、温度躍層が海面近くにあって、他海域と比べ同じ深さにおける水温もずっと低いことがわかった。このような上層構造は、大きな海面水温降下を引き起こし易い。なぜなら、より深い層からの冷たい水の上層への移流と entrainment が、台風通過による海面水温降下の主要因だからである。数値実験により、親潮域において、黒潮域よりも 4 倍も大きな水温降下を生じることが分かった。

ブイのデータは、台風通過に伴う海面水温降下が、下向きの熱フラックスを増加させることを示した。熱フラックスの変動は急激に生じる。潜熱の向きは、台風通過の間には、海面を暖める方向に反転する。

5 章と 6 章では、1988-1989 年及び 1989-1990 年冬季の日本南方海域における SST 変動を取り扱う。SST 変動を取り扱う前に、まず、CAOS について受信された HRPT データに含まれる AVHRR/NOAA データから、格子間隔 0.075° の SST データを作成するためのソフトウェアを作成した。ソフトウェアは、Sakaida and Kawamura (1992a) の MCSST 式による SST 計算と、Saunders and Kriebel (1988a, b) の雲域判別アルゴリズムを改良したアルゴリズムによる雲域除去処理を、それぞれ行う。ソフトウェアについては、5 章の前半で説明されている。

作成したソフトウェアを使って、AVHRR/NOAA-11 データから、1988-1989 年冬季、及び、1989-1990 年冬季をカバーする、日本南方海域の衛星 SST データセットを作成した。データセットは、経度方向には 126.75°E から 149.25°E 、緯度方向には 19.925°N から 36.05°N 、の範囲をカバーしている。格子数は、301 (経度方向) \times 216 (緯度方向) である。データセットに含まれるデータ数は、1988 年 11 月から 1989 年 3 月の間 (1988-1989 年冬季, P1) は 261 シーン、1989 年 9 月から 1990 年 3 月の間 (1989-1990 年冬季, P2) は 333 シーンである。

5 章の後半では、衛星 SST データを気象庁の海況旬報による SST データと比較する。海況旬報は、格子間隔 1° 、平均期間 10 日間の SST データである (JMA SST)。この比較は、衛星 SST データの精度検証を目的とするばかりでなく、衛星観測に基づく SST 場と現場観測に基づく SST 場との間の差の様相を調べることをも目的としている。比較を行うために、35 旬分の、格子間隔 1° 、平均期間 10 日、のデータを、衛星データから作成した (MCSST)。アノマリを計算する際の基準場としては、1950-1992 年の JMA SST の平均データを使用した (CLIM)。MCSST, JMA SST, CLIM の 3 者から、比較のための様々な統計量を計算した。

30°N より北側の多くの領域で、MCSST と JMA SST の差の平均は正 (MCSST $>$ JMA SST) となっていた。この領域では、MCSST は、JMA SST よりわずかに高目か、あるいは、一致する傾向にある。従って、MCSST アノマリの変動と、JMA SST アノマリの変動との対

応はよい。MCSST アノマリと JMA SST アノマリの時間相関も高い。しかし、両者の空間相関はあまり高くない。一方、30°N より南では、MCSST は、JMA SST よりも低目の値を示す傾向にある。この傾向は、特に、P1 期間において顕著である。このことに対応して、MCSST アノマリは、1990年1月頃まで、JMA SST アノマリより低目に推移する。アノマリの時間相関は、領域の中央部で比較的高く、東側・西側で低い。

アノマリの時間相関が高い領域は、現場観測が密に行われている領域、すなわち、航路に沿って現れる傾向があることが分かった。JMA SST > MCSST という傾向が30°N より南側で生じた原因については、衛星観測、現場観測ともに今後検討すべき点が残されている。もう一つの問題として、残差 (MCSST - JMA SST) の空間パターンと JMA SST のアノマリのパターンが似ていることが挙げられる。MCSST - JMA SST と CLIM - JMA SST の空間相関は、常に正で、場合によっては、0.8近い値を示すことがある。SST の衛星観測と現場観測とは、多くの点で異なるが、そういった観測手法の差が、得られる SST 場の差を生み出しているようである。衛星による SST 観測、現場 SST 観測、双方において、継続的に精度検証を行う必要がある。

6章では、衛星 SST データセットを用いて、様々な海洋現象について調べた。衛星 SST 画像上では、黒潮表面前線の追跡により、黒潮を容易に知ることが出来る。衛星 SST データセットの黒潮表面前線の変化は、気象庁により報告された黒潮流路の変動とよく一致した。特に、P2 期間の後半は、黒潮大蛇行の時期に一致する。黒潮の大蛇行への変化の過程を、衛星 SST データセットによっても、追跡することが出来た。黒潮以外にも、黒潮の蛇行に伴う冷水隗の発達過程等も、衛星 SST データはとらえていた。時計回りの渦が、黒潮の大蛇行が始まる直前まで、黒潮のすぐ南側に現れているのも見つかった。この渦は、大蛇行が始まる直前まで見られた一時的な現象で、黒潮大蛇行の前兆現象の一種である可能性がある。

衛星 SST データには、顕著な SST の季節変動も現れている。冬季には、海面からの熱放出の卓越による対流作用により SST は降下する。そして、SST の降下は、混合層の発達にも対応する。SST データセットによれば、データセットの北側ほど SST が大きく下降していた。また、黒潮が直接影響しない南の海域において、P1 期間のほうが、P2 期間よりも温度が下降していた。後者については、黒潮流路の変動に伴う黒潮再循環系の変動に関係している可能性がある。

6章で特に着目した現象は、亜熱帯前線の蛇行とその西向き伝播である。P2 期間の SST データセットの25°N 付近には、SST の低温域と高温域が 500 km の間隔で交互にあらわれていた。そして、そのパターンが西向きに伝播していく様子も観測された。これは、亜熱帯前線の蛇行に伴う現象であると考えられる。1989-1990年冬季(P2 期間)には、亜熱帯前線は、振幅 400 km、周期 2 ヶ月ほどの、大きな蛇行をしていた。波長は、(高温域と低温域の間隔から) 500 km 程と見積もられる。西向き伝播速度は、7 km/day (8 cm/sec) ほどである。この伝播速度は、日本南方海域の25°N 帯における傾圧ロスビー波の第 1 モードの速度 (5-6 cm/sec) とよく一致している。

一方、亜熱帯フロントの蛇行は、P1 期間においては、あまり顕著ではなかった。P1 期間中においても、小スケールの蛇行は生じているが、亜熱帯前線の位置は南西に傾いているようである。P1 期間と P2 期間における亜熱帯前線の差異の原因にも、やはり、黒潮流路の変動に伴う黒潮再循環系の変動が関係している可能性がある。この関係を明らかにするには、より長期にわたるデータセットを整備し、研究を進める必要がある。

7 章では、本研究の結論をまとめた。

本研究では、AVHRR/NOAA-11 号のデータを利用して MCSST データセットを作成し、様々な海洋現象の研究に利用した。衛星 SST データセットは、台風通過時の SST 降下現象のような急変する SST 変動を伴う現象を記述する場合だけでなく、亜熱帯前線の蛇行のような、より長いスケールの SST 変動を伴う現象を記述する場合にも、有用であった。しかし、AVHRR/NOAA から SST を推定する手法には、なお、改良の余地が残されていることも明らかとなった。

NOAA/NESDIS が、AVHRR/NOAA による全球規模の SST 観測を開始してから13年が経過した。このことは、数 km の分解能で全球をカバーする13年分の衛星 SST 観測データを、我々が潜在的に所有していることを意味している。本研究で取り扱ったデータは、その中のほんの一部に過ぎない。将来は、コンピューターの能力の向上に伴い、我々が取り扱えるデータの量はますます増加することが予想される。解析を待つ大量のデータには、海洋-大気系に関する多くの知見が含まれていることが期待できる。大量のデータを効果的、効率的に処理できるように、データ処理手法をなお洗練し、将来に備える必要があると考える。

論文審査の結果の要旨

境田太樹の論文は、まず、東北大学大気海洋変動観測研究センターで直接受信された NOAA 衛星搭載の AVHRR（高解像度可視赤外放射計）センサーによる観測データの処理システムを開発し、その後の研究を効果的に進めるための基盤整備を行った。海面水温抽出アルゴリズムの開発に当たっては、日本周辺海域に設置されている気象庁ブイの観測データを基準として用い、約0.5度Cの観測精度で海面水温を推定できるアルゴリズムを開発した。また、長期海面水温データセットを作成するうえで不可欠な、雲域除去アルゴリズムを日本周辺海域に合わせて開発した。

次に、作成された衛星観測海面水温データにより、三陸沖の広い海域で見つかった、台風通過ともなう温度降下現象を研究した。この温度降下は、親潮水域でのみ起こっており、黒潮水域では見られないことが、データの解析から明らかとなった。海面熱フラックスの解析からは、海洋は台風から熱エネルギーの供給を受けており、水温降下の原因は大気海洋間の熱交換ではないことが示される。強い台風の風によるかき混ぜの可能性について、数値モデルを用いて調べ、親潮域に特徴的な上層海洋構造は、黒潮海域のそれに比べて約4倍も温度降下が起こりやすいことを示し、データの結果を解釈した。

さらに、雲に覆われることが多く、衛星観測が難しかった日本の南方海域の、秋から春にかけての海面水温変動を、長期間の衛星海面水温データを作成することによって調べた。このようなデータセットは、はじめて作成されるものであり、多くの新しい発見があった。黒潮大蛇行に伴って発現した時計回りの渦、秋から冬にいたる間の海面水温降下の特性、亜熱帯前線が位置する北緯25度付近を西方へ伝播する擾乱の存在とその特性などである。また、同衛星データと、現在最もよく整備され、日々の業務に利用されている気象庁海況旬報との詳細な比較を行って、将来の衛星観測を取り込んだ新しい海面水温観測体制の確立を目指した研究も行っている。

このように、境田太樹の論文は、日本周辺での衛星放射計 AVHRR データによる海面水温観測のアルゴリズムを実用的なレベルにまで高めたうえで、それを利用して日本周辺海域の様々な時空間スケールの海洋変動現象を研究し、多くの新しい知見を見いだしたものである。これは申請者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、境田太樹提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。