

学 位 論 文 要 旨

氏 名

細谷 和範

題 目

リモートセンシングと数値シミュレーションによる冬季の九州南岸域及び鹿児島湾の海水流動特性
(Characteristics of the current structure at the south coast of Kyushu and Kagoshima bay in winter by satellite remote sensing and numerical simulation.)

東シナ海付近の黒潮は、南九州付近で南北方向に摂動しながら大きく蛇行する。このとき黒潮の一部がフィラメントとして流軸から分離して九州南岸域に暖水塊をもたらすことが知られ、鹿児島湾では主に冬季にこの暖水塊に由来すると見られる暖水侵入現象が頻繁に生じ、沿岸環境に大きく影響を与えている。しかしながら、既往の現地観測手法では広範囲の経時的な観測が難しく、暖水塊の挙動や暖水侵入の全体像は把握されていない。そこで本研究では人工衛星によるリモートセンシングを適用し、観測された表層水温 (SST) データから冬季に生じる黒潮暖水塊の挙動や暖水侵入を経時的に調べた。さらに暖水塊が示す代表的な現象を数値シミュレーションでモデル化し、衛星画像では把握できない水面下の情報を補完して各現象の全体像の把握や暖水侵入のメカニズムを明らかにした。

NOAA 衛星による SST 画像を用いて九州南岸域の高水温領域を解析した結果、黒潮流軸から分離したフィラメントは吹上浜沖や鹿児島湾内に暖水侵入現象を発生させ、鹿児島湾では 3 つの侵入パターンが認められた。この他、大隅海峡では大隅半島南岸に沿うように発達する冷水塊が確認された。

これらの暖水塊の挙動とメカニズムを数値シミュレーションでモデル化して調べた結果、鹿児島湾や吹上浜沖の暖水侵入は傾圧的な暖水密度流がコリオリ力の影響を受けて発達する半地衡的な沿岸密度流であることがわかった。鹿児島湾の暖水侵入はおおよそ 20cm/s の速度を有し、侵入パターンは海上風や暖水塊の接岸頻度の影響を受けやすいことが見出された。さらに、暖水侵入が沿岸環境に与える影響を詳しく把握するため、半日周潮による潮流と暖水侵入について比較を行った。潮流場は各潮時で湾口鞍部や桜島水道に速い往復流をもたらすものの、物質移動に寄与する潮汐残差流は弱い循環流を示し、また鉛直循環流も非常に小さく、積極的に湾内水を交換する構造ではなかった。これに対して湾の東岸に沿って侵入する暖水侵入は卓越した上層流入・下層流出の鉛直構造を示し、暖水塊と湾内水との界面で生じる摩擦せん断力によって下層水の鉛直循環を促す傾向を示した。これら潮流と暖水侵入に伴う海水交換率を求めた結果、1 週間あたりの海水交換率は潮流のみの場合は約 5% だったのに対し、暖水侵入時は約 25%~30% を示し、暖水侵入が湾内の流動構造並びに水質環境に大きく影響を及ぼす事が示された。また大隅半島南岸の冷水塊については、九州南岸を東進する流れが大隅半島に干渉して発達するよどみ領域によって、暖水が通過する前の冷水を滞留する構造及び佐多岬先端で局所的に発生する湧昇流が寄与していることがわかった。

本研究は衛星画像と数値シミュレーションを補完しあうことで卓越した暖水侵入現象の特徴を把握できることを示した。ただし本手法はモデル化が可能な卓越した現象には有効であるが、様々な非線形現象の影響を受けている海象に対して必ずしも万能ではない。そこで萌芽的な海象データの整理法の試みとして、主成分解析法を適用して流れの中で支配的な寄与を持つ組織構造の抽出を行った。23 年分の衛星 SST 画像を解析した結果、黒潮流軸から分離した暖水塊が九州南岸を經由して大隅海峡に向かう経路が抽出された。また、鹿児島湾の潮流計算結果を解析した結果、主要な流れの組織構造として、桜島水道や湾口鞍部付近の往復流、湾中央の循環流及び湾口鞍部の渦列が抽出された。特に湾口鞍部の渦列は振動渦を示唆する構造を示し、既存の解析手法では見出すことができなかった流れ構造の把握することができた。

学 位 論 文 要 旨

氏 名 Kazunori Hosotani

題 目 Characteristics of the current structure at the south coast of Kyushu and Kagoshima bay in winter by satellite remote sensing and numerical simulation.
(リモートセンシングと数値シミュレーションによる冬季の九州南岸域及び鹿児島湾の海水流動特性)

The Kuroshio Current meanders greatly at southern Kyushu in the East China Sea. It brings a warm water mass to the south coast of Kyushu. In Kagoshima Bay, the warm water intrusion well known as 'Kyucho' phenomenon occurs frequently in winter and it seems that this phenomenon generates from the warm water mass. In order to observe these phenomena, it is required to carry out simultaneous observation of the multipoint. However, since it is impossible to observe by using the usual vessel observation, the phenomenon is not fully revealed. This research focused on these phenomena at winter season and a satellite remote sensing analysis technique and a numerical simulation were employed in complement.

At first, NOAA satellite SST (Sea Surface Temperature) images were utilized to analyze the surface behaviors of the warm water mass at the south coast of Kyushu. SST images showed that the warm water mass generates the warm water intrusion into Fukiage seashore and Kagoshima Bay. Kagoshima Bay has three intruding patterns. In addition, SST images also showed the cold-water mass at the south coast of Osumi peninsula.

Then the numerical simulation, which applied and modeled the satellite SST images, was carried out. As the result, the mechanism of the warm water intrusions into Kagoshima Bay and Fukiage seashore were a clockwise semi-geotropically density flow driven by a warm water and Coriolis effect. Three intruding patterns of Kagoshima Bay were influenced by the ocean surface winds or the warm water contact frequency. Furthermore, in order to find out the influences to the coastal environment, the warm water intrusion was compared with the tidal current. And the tidal current forms oscillating flows at the saddle section and Sakura-jima channel. The tidal residual current showed anticlockwise weak circulation and vortexes at middle section and saddle section, respectively. Vertical flow forms weak upwelling or mixing flows near the channel and the saddle section. On the other hand, the warm water intrusion forms a strong inflow with 20cm/s velocity along east side of the bay. The upper layer forms an inflow and a lower layer forms an outflow on the contrary. Calculated seawater exchange rates of them were 5% in the case of tidal current and 25%-30% in the case of warm water intrusion. By the way, in the southern coast of the Osumi peninsula, the stagnation region and the local upwelling flow form the cold-water mass.

In this research, a principal component analysis was challenged to find out coherent and organized structures. As the result of 23-year SST image analysis, the extracted higher SST structure pattern showed the main route of the warm water mass, which goes eastward through Osumi strait. In the case of the analysis from simulated tidal current, three dominant flow patterns such as the oscillating flow patterns, the large circulation pattern and the vibrating vortex flow pattern, which cannot find out by the usual analysis method, were extracted. By these reasons, this analysis method was shown that practical use is possible.

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏 名	細谷 和範
審査委員	主査 鹿児島 大学 教授 永松 哲郎
	副査 宮崎 大学 教授 三浦 知之
	副査 鹿児島 大学 教授 重廣 律男
	副査 鹿児島 大学 助教授 西 隆一郎
	副査 鹿児島 大学 助教授 石黒 悦爾
審査協力者	鹿児島 大学 教授 菊川 浩行 宮崎 大学 助教授 多炭 雅博
題 目	リモートセンシングと数値シミュレーションによる冬季の九州南岸域及び鹿児島湾の海水流動特性 (Characteristics of the current structure at the south coast of Kyushu and Kagoshima bay in winter by satellite remote sensing and numerical simulation)
<p>北太平洋の西岸を北上する黒潮本流はトカラ列島と屋久島の間を南北方向に摂動しながら大きく蛇行して太平洋側へ抜け、その後日本列島に沿って北上する。このとき黒潮の一部がフィラメントとして流軸から分離し、九州南岸域に暖水塊をもたらすことが知られている。鹿児島湾では、湾内との海水温度差が大きい冬季にこの暖水塊に由来すると見られる暖水侵入現象が周期的に生じ、沿岸環境に大きな影響を与えている。しかしながら、既往の現地観測手法では広範囲の経時的な観測が難しく、暖水塊の挙動や暖水侵入の全体像はまだ十分には把握されていない。本研究は、九州南岸域や鹿児島湾内に浸入する黒潮暖水塊の挙動やメカニズムを明らかにすることを目的として、人工衛星を利用したリモートセンシングによる広範囲かつ経時的な実現象の観察と数値流体力学による仮想的なシミュレーションを相補的に併用して研究を進め、以下のような結果を得た。</p>	

1. 衛星画像による暖水侵入現象の把握

NOAA および Landsat 衛星による海表面水温画像を用いて、冬季の九州南岸海域における、黒潮から分離したフィラメントの挙動について調べた。フィラメントは吹上浜沖や鹿児島湾内に暖水侵入現象を発生させ、鹿児島湾では周期的な侵入パターンが認められた。これらの暖水塊は水産養殖業に大きな影響を及ぼす。衛星画像解析により暖水塊の湾内挙動に3つのパターンがあること、その侵入速度はおおよそ $10\text{cm/s} \sim 15\text{cm/s}$ であることを明らかにした。

2. 数値シミュレーションによる暖水侵入現象メカニズムの解明

九州南岸海域の流れの全体像を把握するためと、鹿児島湾内への暖水侵入のメカニズム把握のための数値シミュレーションを行った。解析は差分法によるもので、計算に必要な諸係数の値を、実測値等を参考にして慎重に決定した。注目すべき点は、暖水塊の鹿児島湾内侵入のメカニズムを解明するために、いくつかの仮説を立てて、その仮説の妥当性を検証していることである。その結果、鹿児島湾の暖水侵入は傾圧的な暖水密度流がコリオリ力の影響を受けて発達する半地衡的な沿岸密度流であること、暖水侵入の3つのパターンには海上風や暖水塊の接岸頻度の影響があることを見出した。更に、暖水侵入は卓越した上層流入・下層流出の鉛直構造を示し、湾内水との界面で生じる摩擦せん断力によって下層水の鉛直循環を促す傾向を示した。そのため、1週間あたりの海水交換率は暖水塊の侵入がない場合は約5%だったのに対し、暖水侵入時は約25%~30%を示し、暖水侵入が湾内の流動構造並びに水質環境に大きく影響を及ぼすことなど、注目すべき結果を示した。

3. 主成分分析法による流れ構造特性の抽出

主成分解析法を応用して海洋の複雑な流れの構造の特性を抽出する方法を適用して、23年分の衛星 SST 画像を解析した結果、黒潮流軸から分離した暖水塊が九州南岸を經由して大隅海峡に向かう経路が抽出された。また、鹿児島湾の潮流計算結果を解析した結果、組織構造として、湾中央の循環流及び湾口鞍部の渦列が抽出された。特に湾口鞍部の渦列は振動渦を示唆する構造を示し、既存の解析手法では見出すことができなかった流れ構造を把握できた。

以上のように、本研究では、これまで不明であった鹿児島南岸海域及び鹿児島湾内への暖水塊の侵入の実態を、人工衛星を利用したリモートセンシングにより把握し、そのメカニズムを数値シミュレーションにより明らかにしたものである。更に、実測が極めて困難な湾内の海水交換率の推算を行い、暖水塊の果たす影響の大きさを明らかにしている。また、主成分解析法を応用して特徴的な流れの構造解明を試みている。このように、本研究は学術上及び実用上の意義が大きい成果が認められる。従って、審査員一同は、本論文は、博士(学術)の学位論文として十分に価値があるものと判定した。

学力確認結果の要旨

学位申請者 氏名	細谷 和範
審査委員	主査 鹿児島 大学 教授 永松 哲郎
	副査 宮崎 大学 教授 三浦 知之
	副査 鹿児島 大学 教授 重廣 律男
	副査 鹿児島 大学 助教授 西 隆一郎
	副査 鹿児島 大学 助教授 石黒 悦爾
審査協力者	鹿児島 大学 教授 菊川 浩行 宮崎 大学 助教授 多炭 雅博
実施年月日	平成 19年 1月 12日
試験方法（該当のものを○で囲むこと。）	
<input type="radio"/> 口答 <input checked="" type="radio"/> 筆答	
<p>主査及び副査の5名と審査協力者の2名は、平成19年 1月12日の公開審査会において、学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>また、筆記により、外国語(英語)の学力を確認した。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が大学院博士課程修了者と同等以上の学力ならびに識見を有するものと認め、博士（学術）の学位を与えるに十分な資格を有するものと認めた。</p> <p>なお、申請者の研究は水産学に密接な繋がりのある海洋の物理的環境である流れを対象としたものであるが、研究手法はリモートセンシングと数値流体力学に関する深くて広い知識と解析技術に基づいている。このような研究能力は水産学の領域を超えて、理学的、工学的な分野にわたる学際的な分野の研究に相応しいと考える。よって、“学術”の学位を授与するのが適切と判断した。</p>	

学位申請者 氏名	細谷 和範
[質問 1]	本論文の研究手法のオリジナリティ、または他の海域や問題への展開性はあるか？
[回答]	研究手法自体にはオリジナリティは無いが、応用するには個々の問題や適用する海域に特有の条件があつて、それを十分に吟味検討しなければ有意な結果は得られない。例えば、鹿児島湾で使った方法をそのまま東京湾で使うことはできないと考えられます。
[質問 2]	鹿児島湾では海水面に温度差があるので応用できるが他では応用できないのか、あるいは逆に他でも応用ができるものがあるのか？
[回答]	鹿児島湾の場合は冬季に明瞭な海水面の温度差が現れるので、現象を捉えることができたが、例えば東京湾では難しい。一方、クロロフィルは夏でもリモートセンシングで捉えることができるので、今後は、海水面温度ではなく、そのような別の物理量をトレーサーとすることも考えています。他への応用ということでも可能かどうか検討したいと考えています。
[質問 3]	黒潮暖水塊が湾内へ侵入するメカニズムは何か？
[回答]	黒潮本流から分離した一部の暖水塊が鹿児島湾口に到達したとき、暖水の密度が小さいため、水面が高くなる。水位が高い暖水は重力の作用により水面の低い方へ流れていくが、そのときに、コリオリ力により右回りの力を受けて、鹿児島湾の大隈半島に押し付けられたようにして、湾内へ侵入していくと考えられます。
[質問 4]	黒潮暖水塊は慣性力によって鹿児島湾へ侵入しているとは考えられませんか？
[回答]	数値シミュレーションの計算条件として、完全ではありませんが、慣性力に相当する条件を考慮した計算をしたが、鹿児島湾内侵入の大きな駆動力にはなっていないと考えています。
[質問 5]	数値シミュレーションにより、潮流による湾内の海水交換率を算出して文献の結果と比較して検証しているが、文献の結果はどのようにして求めているのか？
[回答]	文献の結果は、湾口における1日の流速の実測結果である。
[質問 6]	湾内の海水交換率は潮流よりも暖水塊の方が大きいので、海水交換への暖水塊の寄与は大きいと結論されているが、暖水塊の侵入は断続的であるから、毎日起こる潮流の方が、年間の海水交換への貢献度は大きいのではないか？
[回答]	暖水塊の侵入は冬季のみが明瞭に観察されるが、夏場にどうなっているか分からないし、あつたとしてもそのメカニズムは不明です。従つて、年間を通じて考えたときは、まだ分かりません。
[質問 7]	暖水塊の侵入の周期(頻度)はいくらか？
[回答]	衛星データや水産試験場で計測した海水温度のデータでは、約2週間に1度くらいの頻度

です。

[質問 8] 湾内への暖水塊侵入のパターンが3つあるということだが、各パターンの出現割合はどのくらいか？

[回答] 暖水塊が大隈半島に沿って桜島島まで到達するAパターンが約9割で、鹿屋付近から反時計回りにUターンするBパターンと鹿屋と海潟の中間付近から櫻島方向と喜入方向に枝分かれするCパターンが併せて1割です。

[質問 9] 暖水塊が鹿児島湾の大隈半島に沿って侵入するとき、湾口の薩摩半島側はどうなっているか？

[回答] 衛星データによると海面の表層域は暖水塊で覆われますが、暖水塊の下の層では湾外へ出て行く流れになっています。

[質問10] 本研究の手法は海水温度に明瞭な差が観察される場所でないと適用は難しい、ということだが、鹿児島湾以外でそのような海域はあるか？

[回答] 豊後水道では適用可能であると考えられます。

[質問11] 潮流のシミュレーションで、山川港の潮汐の振幅は大潮時、小潮時を考慮したか？

[回答] 数値シミュレーションで安定した解を得ることを優先した計算をしました。そのため、潮汐の振幅は一定値を用いたので、実際の現象とは厳密には異なります。計算における仮定と実現象との違いは認識して結果を評価している。

[質問12] 数値シミュレーションにおいて、潮汐の振幅を75cmとした根拠は？また、暖水塊の水温を17度とした根拠は？

[回答] 鹿児島島の検潮所の潮位表から、中潮時の M_2 分潮（主太陰半日周期）のデータを用いました。水温は自分の調査では16.5度であったが、シミュレーションでは暖水塊の侵入を見るため、湾内の水温との相対温度差を設定しました。

[質問13] 数値シミュレーションで、鹿児島湾口での水温度差2度は水位差にするといくらになるか？

[回答] 数値シミュレーションでは、潮汐の駆動力としても水位差を用いているので、水温差が水位差と直接的には結びついていないので厳密ではないが、3度の水温差が水位では5~10cmである。

[質問14] 鹿児島湾の海水交換には、湾内へ流入する河川の影響を無視できないと思うが、今回の計算では考慮しているか？

[回答] 河川水は淡水であるため海水とは密度差ができることになり、今回採用した数値計算法では密度流の厳密な取り扱いができない。河川の影響は無視できないので、今後の課題としたい。

[質問15] 湾奥の海水温度が年毎に上がってきているが、いつ頃から上がっているのか？

[回答] 表層よりも下層の海水の水温が次第に上昇しているが、80年代から顕著になっています。

[質問16] 鹿児島湾の海水は1週間で 1/4が交換するというシミュレーション結果は大きすぎるように思えるが、どのような算出法か？

[回答] 粒子法と呼ばれるもので、流体の動きと一緒に動く仮想の粒子を湾内の海水中に一様に配置して、1週間の潮汐の計算をしたときに、湾内に残る粒子と流出した粒子の数をカウントして、それから海水交換率を算出する。なお、湾奥の海水は殆ど交換しないで、湾口から湾央の海水が交換されている。

[質問17] 湾口では海水交換はどうなっているのか？

[回答] 表層から海水が流入し、下層から流出していく。湾奥の深いところの海水も引きずられて流出しています。

[質問18] 数値シミュレーションにおいて海底摩擦の効果は考慮しているか？また、その計算結果に及ぼす影響は調べたか？

[回答] 一般によく使われている摩擦係数を使っている。海底摩擦が流れに及ぼすのは海底に近い層に限られます。