

氏名	朴 容 佑
学位の種類	博士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2299 号
学位授与の日付	平成 15 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科 土木工学専攻
学位論文題目	OBSERVATION OF PHYTOPLANKTON MULTIPLICATION PROCESSES AND REAL-TIME PREDICTION OF ITS BLOOMING IN TANABE BAY (田辺湾における植物プランクトン増殖過程の観測と群集密度変動のリアルタイム予測)
論文調査委員	(主 査) 教授 高山 知 司    教授 酒 井 哲 郎    助教授 間 瀬 肇

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、和歌山県田辺湾を対象にして、1998年から2002年にかけて実施した3次元水質計測や植物プランクトン群集密度計測、湾内養殖筏環境テレメトリー、田辺・中島高潮観測塔の気象・海象観測のデータを用いて、海域環境と植物プランクトン群集密度変動との関係を明確にするとともに、ニューラルネットワークによる植物プランクトン細胞数の変動予測を行ったものであり、5章からなっている。

第1章では、海洋生態系モデルに関する過去の研究を総括するとともに、本研究の位置付けと目的を明らかにしている。

第2章では、1998年から実施してきた海洋環境のモニタリングおよび植物プランクトン細胞数の変動の観測結果からその特性を調べ、以下のようなことを明らかにしている。①田辺湾の海水交換は、夏季には、朝夕流や内部急潮（黒潮流動に起因する外洋水の周期的な進入）、北風による鉛直循環流である沿岸湧昇流の3機構により促進される。②湾内養殖筏環境テレメトリーデータや気象・海象観測データ、海底設置型のADCP (300kHz) データ、観測船による湾内3次元CTDによる水質環境観測（水温・塩分・溶存酸素・クロロフィル・栄養塩）データから1998年から2001年の間における夏季の田辺湾内の水質は、降雨や日射、風等の気象条件、外洋水の侵入、河川水の流入状況によって時空間的に変化する。③湾内での赤潮発生機構を解明するため、採水による植物プランクトンの観測を行い、この海域の植物プランクトンは、渦鞭毛藻類として *Gymnodinium spp.*, *Prorocentrum spp.* 等、珪藻類として *Skeletonema spp.*, *Nitzschia spp.*, *Thalassiosira spp.* が卓越していること、渦鞭毛藻類と珪藻類の間には競合関係がある。さらに、主成分分析を行って、植物プランクトンの群集密度変化と環境要因との間に以下のような関係があることを明らかにしている。①植物プランクトン細胞数の変動特性には、水温、塩分、日射量、湾口での東西流速成分および栄養塩状態が支配的要因となる。②珪藻類は全窒素と高相関で、渦鞭毛藻類はアンモニアおよびリンと相関が高い。③湾口部の底面流速のトレンドは、3日と7日の長周期変動を示すと同時に珪藻類の細胞数変動と1日の遅れの極めて高い相関を示す。

第3章では、植物プランクトンの細胞数変動のような非線形現象を予測するための手法として、ニューラルネットワークを用いることとし、その最適な予測モデルを検討している。対象としたニューラルネットワークは、入力層と出力層の間をシナプス結合の重みで結んでいる3層の階層型ネットワークで、ノード間のシナプス結合の重みは学習プロセス間で繰り返して調節される。ニューラルネットワークは、入力信号を受け取ると入力層、中間層、出力層へと信号が伝わり、最終的に出力信号となる。入力層のユニットから中間層のユニットへの入力信号と中間層のユニットにおける伝達関数を検討した結果、非線形現象の予測にはシグモイド関数が最適であることを明らかにしている。最終的な出力値と学習指針として望ましい出力値（教師信号）との間に誤差が生じるが、この誤差を減らすように各層間の結合強度を修正する。誤差を最小化するように出力層から中間層へ、中間層から入力層へと最急降下法により教師信号に近い値が出るようにネットワークの結合強度を修正する誤差逆伝播学習法を用いている。

第4章では、田辺湾における環境要因観測データを用いた植物プランクトンの細胞数のリアルタイム予測を試みた。近年、田辺湾奥部においては海水が浄化傾向にあり、湾奥部の観測点でも富栄養状態が継続することが少なくなりつつある。このため湾奥での赤潮の発生予測には栄養塩の状態が大きな支配要因となっているが、リアルタイムの赤潮発生予測には栄養塩データを用いることは実用的ではないので、この情報を除外した環境要因観測データを用いて予測を行っている。すなわち、湾内の自然環境遠隔計測および湾奥の湾内養殖筏環境テレメトリーを近畿大学水産研究所と共同して行い、得られたデータを用いて内湾の自然・生態環境モニタリングシステムを構築するとともに、湾内の植物プランクトン細胞数をリアルタイムで予測する実務的な予測手法を検討している。開発したニューラルネットワークを用いて田辺湾の植物プランクトンの細胞数変動予測を行った。入力変数として水温と塩分、溶存酸素、日射量、降水量、気温、栄養塩を用い、出力変数として1 ml中の渦鞭毛藻類と珪藻類の細胞数とした。1998～2001年の観測データによる学習の後、2002年の予測を行った。入力する環境要因データを変化させて、ニューラルネットワークの感度分析を行った結果、栄養塩は重要な環境要因ではあるが、これを入力変数に含めない場合でも、植物プランクトン細胞数の予測がある程度可能であることがわかった。さらには、学習期間や環境要因データの違い、カルマンフィルターとの併用について検討した結果、以下のようなことを明らかにしている。①対象海域（湾奥）での水温、塩分、溶存酸素、観測塔での日射量、降水量、気温、および湾口での表面水温のテレメトリーデータを入力変数とするニューラルネットワークが植物プランクトン細胞数の予測において最適な予測結果を示す。特に、湾口での表面水温を入れない場合には予測精度が悪くなる。②2日前までの観測データとニューラルネットワークによる予測データを用いたカルマンフィルターを併用することで、予測値が安定し精度が向上する。③湾口における底面流速の長周期成分データがある場合には、これを追加することで予測精度に若干の向上が見込める。④学習期間は最も長い4年間で最適な予測結果となる。

第5章では、本論文で得られた成果を取りまとめるとともに、赤潮予測を実務レベルで運用するためのシステム機構における今後の課題について言及している。

#### 論文審査の結果の要旨

本論文は、1998年から2002年にかけて田辺湾で実施してきた海域環境モニタリングおよび植物プランクトン細胞数の変動に関する観測結果に基づいて、湾内の海域環境と植物プランクトン群集密度変動との関係を明確にするとともに、ニューラルネットワークによってプランクトン細胞数の変動予測を行ったものであり、得られた成果は以下の通りである。

1. 太平洋に開口している田辺湾の海水交換は、夏季には潮汐流や内部急潮、北風による沿岸湧昇流の3機構によって促進されることを明らかにした。
2. 田辺・中島高潮観測塔の気象・海象観測データ、湾内3次元CTDによる水質環境観測（水温・塩分・溶存酸素・クロロフィル・栄養塩）データから、1998年から2001年の間における夏季の田辺湾内の水質変化が降雨、日射、風等の気象条件、外洋水の侵入、河川水の流入状況によって時空間的に変化する様子を観測によって明らかにした。
3. 主成分分析を用いて観測データを解析した結果、植物プランクトンの群集密度変化と環境要因との間に以下のような関係があることが分かった。①植物プランクトン細胞数の変動特性には、水温、塩分、日射量、湾口での東西流速成分および栄養塩状態が支配的である。特に、外洋からの底層水の侵入が湾内環境に寄与している可能性が高い。②珪藻類は全窒素との相関が高く、渦鞭毛藻類はアンモニアおよびリンとの相関が高い。③湾口部の底面流速のトレンド（49時間移動平均）には3日と7日の長周期変動があり、これら珪藻類の細胞数変動と1日遅れで極めて高い相関を示している。
4. 植物プランクトンの細胞数変動のような非線形現象を予測するための手法として、ニューラルネットワークを用いることとし、その最適な予測モデルを提案した。最終的な出力値と学習指導として望ましい出力値（教師信号）との間に生じる誤差を最小化するように出力層から中間層へ、中間層から入力層へと最急降下法によって教師信号に近い値が出るようにネットワークの結合強度を修正する誤差逆伝播学習法を用いた。
5. 環境要因観測データを入力変数としてニューラルネットワークとカルマンフィルターと併用して田辺湾での植物プランクトンの細胞数変動予測を行った。入力変数として水温や塩分、溶存酸素、日射量、降水量、気温、栄養塩を用い、出力変数は1 ml中の渦鞭毛藻類と珪藻類の細胞数とした。1998～2001年の観測データによる学習の後、2002年の予測を行っ

た結果、栄養塩は重要な環境要因ではあるが、これを入力変数に含めない場合でも、植物プランクトン細胞数の予測がある程度可能なことがわかった。

以上要するに本論文は、田辺湾で実施してきた海域環境モニタリングと植物プランクトンの観測結果に基づいて、湾内の流況や海水交換特性を明らかにするとともに、主成分分析によって植物プランクトンの群集密度に影響する環境要因を調べ、さらに、ニューラルネットワークとカルマンフィルターとを併用して植物プランクトン細胞数の変動予測を行い、予測の可能性について検討しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年5月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。