

学 位 論 文 題 名

Spatial Modeling for Sustainable Aquaculture Development
of Japanese Scallop, *Mizuhopecten yessoensis*, in Funka Bay,
Southwestern Hokkaido, Japan: A Satellite Remote Sensing
and Geographic Information System Approach

(噴火湾におけるホタテガイの持続可能な増養殖発展のための空間モデリング：
衛星リモートセンシングと地理情報システム (GIS) によるアプローチ)

学位論文内容の要旨

【序 論】

ホタテガイ (*Mizuhopecten yessoensis*) は、世界中でよく養殖されている貝類の一種である。ホタテガイ養殖生産の増加は沿岸域社会を豊かにすることに貢献している。ホタテガイ養殖による供給を成功させることと長期の持続性を確実にするためには、より良い生産管理計画が必要である。地理情報システム (GIS) とリモートセンシング (RS) は、水産養殖の開発・管理のすべての地理空間的な面で重要な役割を果たしている。これらのテクノロジーは、水産養殖に関して意思決定プロセスを容易にすることに役立つ。本研究において焦点をあてた3つの重要な研究課題は、噴火湾における海洋環境の時空間変動、ホタテガイ稚貝の潜在分布、養殖場適正域選定である。これらの3つの課題は相互に関連して、その解明は持続可能なホタテガイ養殖を確立するために不可欠である。本研究目的は、以下の通りである：(1)海洋環境特性の時空間変動を明らかにすること（特に植物プランクトンバイオマスの変動に注目した）、(2)分位点回帰と GIS モデルを用いてホタテガイ稚貝分布推定できるモデルを開発すること、(3)リモートセンシングと GIS を利用した多変量推定モデルを用いてホタテガイ養殖のための養殖適正域の選定を行うことである。

【使用データと解析方法】

本研究対象海域は、北海道で最も重要なホタテガイ増養殖海域のうちの1つの噴火湾である。この湾は、平均水深 38m、最大水深 107m で、面積は 2315km² と海岸線は 195km である。

本研究で使用した主要な衛星データは、SeaWiFS (1998～2004 年) により観測されたクロロフィル *a* 濃度(chl-*a*)と標準化海面射出輝度 (555nm)、MODIS (2002～2004 年) により観測された海面温度 (SST)、ALOS AVNIR-2 により観測された社会基盤データである。その他に、ホタテガイ稚貝データ、海底地形図、気象データ (太陽日射と風)、地球測位システムデータ (既存のホタテガイ増殖域) と船舶による現場測定データ (chl-*a* と CTD) を使用した。

1. 海洋環境要素の時空間変動

chl-*a* の時空間変動を解析するために EOF 解析を適用した。EOF 解析は、月平均の chl-*a* 画像に適用した。湾の衛星 chl-*a* 値を検証するために、現場観測点を、湾の中央部に設定し、衛星観測 chl-*a* 値と船舶による現場 chl-*a* 値を比較して、chl-*a* 推定値を検証した。月平均の懸濁物質 (SS) は、Ahn et al.,(2001) の方法により chl-*a* を用いて計算した。SST、水深、太陽日射、風データ、SS データは、chl-*a* 変動への影響を解析するために用いた。

2. ホタテガイ稚貝分布モデル

ホタテガイ稚貝データは、2003 年 4 月から 7 月までの期間に収集されたものを用いた。そして、すべてのデータを月平均に統合した。3 つの環境変数 (水深、chl-*a*、SST) とこれらのデータは、分位点回帰 (RQ) 法を用いて解析した。この解析法では、統計的に有意 ($P < 0.05$) なモデルが選ばれた。予測された稚貝分布マップは、ArcGIS v.9.2 (ESRI) で作成した。RQ モデルは、現場データと予測データとを比較して検証した。

3. ホタテガイ養殖最適域推定モデル

ホタテガイ養殖の最適域を推定するためのモデル構造は、階層構造に基づいて作成した。この解析法では、海面水温、懸濁物質、chl-*a*、港からの距離などの 12 の判別基準でスコアリングする方法を採用し、それらは、物理的、生物学的、社会基盤的、制約的の 4 つのカテゴリーに分類した。スコアリング方法を標準化するため、最も適している海域を 8、最も不適な海域を 1 とするように 1 から 8 までのランクに再分類した。それぞれの判別基準の重み付けは、Saaty (1977) により開発されたペアワイズ比較方法 (分析的階層プロセス-AHP) を応用した。最終的な養殖最適域マップは、多変量推定 (MCE) 方法に基づいて作成した。最後に、モデルによる最適推定域と既存のホタテガイ養殖域とを比較し、モデルの検証をした。

【結果と考察】

1. 海洋環境要素の時空間変動

SeaWiFS chl-*a* 値と現場観測 chl-*a* 値とを比較した結果、統計学的に有意に 1 対 1 の直線関係が得られた ($r^2 = 0.70$, $p < 0.001$, $n = 24$)。これは、SeaWiFS chl-*a* 推定アルゴリズム (OC4v4 を使う) が、この研究水域に適用できることを示す。噴火湾における Chl-*a* は、顕著な季節変動を示した。毎年、最も高い chl-*a* 値は、春 (3 月) に観測され、相対的には小さなブルームは、秋にも観測された。SS、SST と日射や風などのローカルな強制力は、この海域の chl-*a* 変動に影響している。EOF 解析の結果、最初の 3 つのモードだけは、chl-*a* の変化を説明するために考慮された。第 1 モードは、全変動の 77.93% を占め、一般的な季節サイクルを説明していた。第 2 モード (全変動の 3.89%) と第 3 モード (全変動の 2.12%) は、春季ブルームと秋季ブルームとにそれぞれ関係していた。

2. ホタテガイ稚貝分布モデル

一変量 RQ モデルは、SST が増加している傾向が観察される間、稚貝密度変化が深さと chl-*a* のわずかな減少に関係していることを示した。第 95 番目の分位点は最も高い分位点で、統計的に優位なモデル ($P < 0.001$) であり、最も低い AIC 値のモデルを最適なモデルとして選択された。この RQ モデルは噴火湾でホタテガイ稚貝分布の限界を示すものとして選択した。そして、それは $\ln(\text{larvae}+1) = 4.155 - 0.00732 \text{ Depth} - 0.1862 \text{ chl-}a + 0.3392 \text{ SST}$ の式で表された。ホタテガイのための予測された稚貝密度マップは、潜在的な生息地ホタテガイ稚貝の時間平均化されたものを示す。最高稚貝密度は、鹿部から室蘭までの浅海域 (水深 30m 以下) に沿って、比較的幅広い範囲で予測された。モデルを検証した結果、予測値と観測値との相関は正の相関があり統計的にも有意であった ($P < 0.001$)。

3. ホタテガイ養殖最適域推定モデル

最適域推定モデルにおいて、解析のための海域は、水深 60m より浅い海域 (1038km^2 の潜在的な海域) であった。それぞれ、潜在的な海域のおよそ 69%、33%、38% は、それぞれ物理的、生物学的、社会基盤に起因する最適な水域 (スコア 8) として分類された。この海域におけるホタテガイ養殖の適正域の範囲は、制約域 (スコア 0) の存在によって制限された。これらは、潜在的な海域の 12% を占めている。モデルの感度解析の結果、モデル 1 (物理的条件に重み付けを大きくした) が最も適正域 (32%) を占め、次にモデル 2 (生物学的条件に重み付けを大きくした; 31.1%)、そして、モデル 3 (社会基盤的条件に重み付けを大きくした; 30%) の順であった。最終的な

モデルでは、スコア 8 の潜在的海域が 29%、スコア 7 の潜在的海域が 28% を占めた。そのモデル出力と現場データとを比較した結果、一致していることが確認できた。既存のホタテガイ養殖域のおよそ 60% がスコア 8 海域、28% がスコア 5、6、7 の海域に位置していた。しかし、既存のホタテガイ養殖域のおよそ 4% と 8% は、それぞれ制約海域と潜在的海域（水深 60m より深い海域）に位置した。

【ホタテガイ養殖の持続可能性】

噴火湾におけるホタテガイ養殖の将来の発展と持続可能性を考慮する際に、それがいくつかの要因に依存し、環境条件（例えば、気候変動影響のために）、稚貝採集可能性、養殖の時空間スケール、および管理戦略などを含まねばならない。この研究において、養殖資源への気候変動の潜在的影響を評価するために、3 種の SST、1℃、2℃または 4℃の上昇値を使ってモデル化した。これらの 3 種の SST は、いくつかの IPCC の予測モデル（IPCC、2007）の結果に近い値を選んだ。SST が 1℃増加させたモデルにおいて、スコア 8 と分類される面積は、元のモデルからわずかに減少した。SST が 2℃増加させたモデルにおいて、潜在的海域の 26.4% と 30% は、それぞれスコア 8 とスコア 7 に分類された。SST が 2℃を増加したとき、大部分の適正な海域（スコア 8）は潜在的海域の 14%、29%（元のモデル）から重要な減少を示した。SST を 4℃増加させたモデルでは、最も適正な地域（スコア 8）は、29%（元のモデル）から潜在的地域の 0.01% と大きく変化した。これらの結果から、地球温暖化などの気候変動がこの海域における養殖の将来の発展に重要な影響を及ぼすかもしれないことを示し、考慮される必要があることを示している。

【結 論】

本研究において、3 つの重要な研究課題を解明した。ホタテガイ稚貝の高密度分布と適正な海域の利用可能性という理想的な環境条件がそろえば、噴火湾においてホタテガイ養殖の発展ためにまだ潜在的海域があることを示した。本研究は、先進技術（GIS と RS）を用いることにより、意思決定者またはプランナーが噴火湾のホタテガイ養殖開発と持続可能性のために、沿岸および沖合の資源を全体的に利用する可能性を考慮して、さらにより良い計画を作成することに寄与できることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 齊 藤 誠 一

副 査 教 授 五 嶋 聖 治

副 査 准教授 平 譯 享

副 査 科 長 馬 場 勝 寿 (道立函館水産試験場)

学 位 論 文 題 名

Spatial Modeling for Sustainable Aquaculture Development of Japanese Scallop, *Mizuhopecten yessoensis*, in Funka Bay, Southwestern Hokkaido, Japan: A Satellite Remote Sensing and Geographic Information System Approach

(噴火湾におけるホタテガイの持続可能な増養殖発展のための空間モデリング:

衛星リモートセンシングと地理情報システム (GIS) によるアプローチ)

近年、エルニーニョなど地球規模の環境変化や地球温暖化による気候変動が沿岸域へどのような影響をあたえているか、グローバルな視点で解明する国際的なプロジェクト LOICZ(Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone)が実施されている。沿岸域は、陸域・海域の境界領域として、また陸圏・水圏・大気圏におけるいろいろな変動の相互作用の場として重要な役割を果たしていることが認識されるようになってきた。この沿岸域における環境評価や持続的な資源利用が人類の生存にとって重要な課題である。

本研究の対象とした噴火湾は北海道南西部に位置し、季節的に親潮系水と津軽暖流水の2つの水塊が流入する特徴をもつ。この噴火湾は、経済的にも、生態学的にも重要なホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* の養殖海域である。ホタテガイは、世界中でよく養殖されている貝類の一種であり、ホタテガイ養殖生産の増加は沿岸域社会を豊かにすることに寄与している。長期の持続的なホタテガイ養殖生産を確保にするためには、より良い生産管理計画が必要である。そのためには、この海域の水塊の変動や表層の流れが、この海域の生産性をどのように制御しているか、さらに社会的基盤の状況も含め、総合的にホタテガイ養殖にどのように影響を与えているか、理解する必要がある。

地理情報システム (GIS) とリモートセンシング (RS) は、水産養殖の開発・管理のすべての地理空間情報を統合し、水産養殖に関する意思決定プロセスを容易にすることに役立つと考えられる。

本研究は、RSとGISを統合的に利用して、ホタテガイ養殖海域における、(1)海洋環境特性の時空間変動を明らかにすること、(2)分位点回帰とGISモデルを用いてホタテガイ稚貝分布推定できるモデルを開発すること、(3)リモートセンシングとGISを利用した多変量

推定モデルを用いてホタテガイ養殖のための養殖適正域の選定を行うこと、(4)地球温暖化などの気候変動の影響を評価することを目的にしたものである。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. 分位点回帰と GIS モデルを用いて推定した最高稚貝密度域は、鹿部から室蘭までの浅海域（水深 30m 以下）に沿って、比較的幅広い範囲で予測された。モデルを検証した結果、予測値と観測値との相関は正の相関があり統計的にも有意であった ($P < 0.001$)。
2. ホタテガイ養殖の最適域を推定するために、階層構造に基づいて空間モデル作成した。この解析法では、海面水温、懸濁物質、クロロフィル a 濃度、港からの距離などの 12 の判別基準でスコアリングする方法を採用し、それらは、物理的、生物学的、社会基盤的、制約的の 4 つのカテゴリーに分類した。既存のホタテガイ養殖域とモデルで推定された最適域との違いからまだ養殖域に選択の余地があることを示唆した。
3. 養殖資源への気候変動の潜在的影響を評価するために、3 種の SST、1℃、2℃または 4℃の上昇値を使ってモデル化した。地球温暖化などの気候変動がこの海域における養殖の将来の発展に重要な影響を及ぼすことを示唆した。

以上の諸点は、噴火湾におけるホタテガイ養殖域の管理とその持続可能性に関する重要な知見を得たものと認め、審査員一同は、申請者が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。