

課題名 B-0910 現地観測データとGISの統合的利用による  
アマモ場の生態系総合監視システムの構築  
課題代表者名 仲岡 雅裕（北海道大学北方生物圏フィールド科学センター厚岸臨海実験所）  
研究実施期間 平成21～23年度  
累計予算額 19,880千円（うち23年度 6,390千円）  
予算額は、間接経費を含む。

## 研究体制

- (1) 広域情報データベースの基盤整備（北海道大学北方生物圏フィールド科学センター厚岸臨海実験所）
- (2) アマモ場の生物多様性と生態系機能の関連性解析（（独）水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所）

## 研究協力機関

- (独) 海洋研究開発機構むつ研究所、東京大学

## 研究概要

### 1. はじめに（研究背景等）

沿岸域にある藻場のうち、種子植物である海草類（アマモ類）を主体として静穏な砂底や泥底に形成されるものを「アマモ場（海草藻場、seagrass bed）」と呼ぶ。アマモ場は、生産性が非常に高く、有用魚介類や絶滅危惧種を含む生物多様性のホットスポットとなっている。さらに、水質の浄化や底質の安定化に貢献するなど、沿岸生態系の中で多様な機能を果たしている。しかしながらアマモ場を含む沿岸生態系は、日本各地および世界各地において、水質や底質の悪化、海岸線の開発、さらに地球温暖化など、さまざまな人間活動の影響を受けて劣化の一途をたどっている。このような状況を反映して、沿岸生態系の長期変動を把握しようとする野外モニタリングが世界各地で行われるようになった。しかし、そのようにして得られた生物多様性や生態系に関する野外観測データは、あくまでも特定の点における情報であり、この成果を沿岸域の保全・自然再生の諸施策に有効に生かすためには、調査結果をいかにして面的な広がりを持つ沿岸域全体に展開するかという課題を克服しなくてはならない。

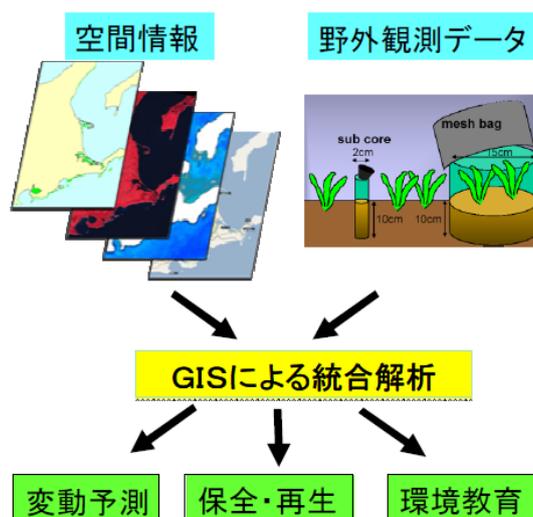
### 2. 研究開発目的

前述の背景を受けて、本研究課題では、沿岸生態系の重要な構成要素であるアマモ場を対象に、現地観測データとリモートセンシングデータを統合したGISデータベースを作成し、これをもとに環境・生物多様性・生態系機能間の関連性の解析を行うことにより、アマモ場の生物多様性と生態系機能の広域かつ長期にわたる変動を監視するシステムを構築することを目指した。

サブテーマ（1）においては、その基盤となるべきデータベースの対象スケール、入力データの分類法などを含むデザイン設計を行い、実際のデータベースを作成した。また、既存の航空写真、衛星画像からのアマモ場の判別方法を検討するとともに、試行的なデータ解析を行い、アマモ場の長期変動を明らかにした。さらに、統合的解析として、アマモ場の生態系機能を表す諸変数の空間異質性と環境要因の関係性を解析し、その結果を、GISデータベース上で内挿することにより、アマモ場全域の生態系機能を空間的に評価する方法を開発した。さらに、2つのサブテーマの成果を統合的に扱うことにより、生態系機能や生物多様性の広域評価を行うことを目的とした（図1）。

サブテーマ（2）においては、アマモ場の物理環境、アマモ植生構造、さらにアマモ場の生物群集構造の三者間の関係を解明し、アマモ場の生物多様性と生態系機能の関係を指標化することを目的とした。アマモ場の周辺環境とアマモ場の主要機能の相関を統計的手法により解析するとともに、得られた相関をもたらす因果関係について野外観測・実験により明らかにした。また、アマモ場の生物多様性や食物網構造と、アマモ場の主要機能との相関を統計的手法により解析し、環境勾配に伴うアマ

モ場の変遷と生物多様性・生態系機能の関係を解明した。最後にこれらの関係を取り入れて、サブテーマ（1）GISベースの空間情報解析モデルを利用して、アマモ場の生物多様性および生態系機能を広域的に推定・評価することを目指した。



さまざまな目的の事業に利用できる  
データベースシステムの構築

図1 本研究課題の目的と利用用途

### 3. 研究開発の方法

#### （1）広域情報データベースの基盤整備

##### 1) 統合GISデータベースプラットフォームの作成

気候・環境条件および人為的開発の程度が異なる3海域（北海道東部、東京湾、瀬戸内海）を対象域とした。空間情報データと現地におけるモニタリングデータを効率的に関連付けるための管理形式を検討し、その結果に基づき、統合GISデータベースの構築を行なった。また、公開版データベースについても作成を行い、平成24年3月より公開を開始した。

##### 2) 衛星画像、空中写真によるアマモ場判別方法の検討

収集・撮影した衛星画像・航空写真画像より、アマモ場の空間分布を判別する方法を検討した。高解像度衛星画像、気球撮影画像について、各地で行われたアマモ場の現地定量的調査、およびアマモ場以外の景観の分布調査結果を元に、教師付分類判別を行い、アマモ場の分布および海草の種構成、被度・現存量の空間分布を解析した。

##### 3) アマモ場の長期変動様式および変動機構の解析

データベースに収集した既存のアマモ場分布データ、および上記2)の方法により判別したアマモ場分布情報データを元に、対象3地域におけるアマモ場の面積の長期変動の解析を行った。また、最も多数の空間分布情報データが取得できた東京湾のアマモ場について、その時間変動パターンの空間変異、およびその要因を解析した。

##### 4) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：アマモの機能の評価

データベースに集積された空間情報を用いて、アマモ場の生態系機能を空間的に連続して推定・評価する方法の開発を行なった。アマモ場の主要植物であるアマモ類による生態系機能を表す指標（目的変数）として、アマモの光合成能力、生物量、生産量、および生物量の安定性を選択し、その変異について、環境の物理的要因（水温、塩分）、地形的要因（水深、海岸からの距離）を説明変数としたGLMを作成した。その予測値と、GISデータベース上の環境要因の空間変異情報を用いて、各目的変数の広域空間変異を評価した。

##### 5) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：動物のアマモ場利用様式の評価

アマモ場を利用する主要消費者群集の生態系機能として、東京湾富津干潟沖のアマモ場に生息する内在性マクロベントス、および厚岸湖で越冬するオオハクチョウのアマモ場利用様式の解析を行った。

## 6) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：統合評価法

これまでのサブテーマ（1）とサブテーマ（2）で得られたアマモ場の生物多様性・生態系機能の空間分布評価データを統合して、多重機能の総合評価を行い、その空間分布を可視化した。

### （2）アマモ場の生物多様性と生態系機能の関連性解析

#### 1) アマモの生長量と水深勾配の関連性

2009年11月に安芸灘生野島の水深の異なる3地点（アマモ分布の上限付近・中央・下限付近）において、標識法によりアマモ地上部の生長量を測定した。株ごとの全体重量、生長した部分の重量、生長した部分の面積、全体の生物量に対する1日当たりの生長重量を比較検討した。

#### 2) アマモの光合成能力の空間変異と環境勾配との関連性

アマモの光合成能力の指標としてクロロフィル蛍光を測定し、物理環境条件（塩分・水深・流速など）との関連を検証するため、Diving-PAM（水中型パルス振幅変調クロロフィル蛍光測定器、Walz社）を用いてアマモのクロロフィル蛍光を測定した。

#### 3) アマモの元素組成と栄養塩勾配の関係

厚岸湖ならびにその周辺海域において河口からの距離が異なる地点にて採集したアマモ葉部試料の元素分析を行い、アマモ葉部が窒素欠乏の状態にあるかどうか検討した。

#### 4) 各重点調査海域でのアマモ植生・植生内の動物相・魚類相とその現存量の把握

魚類採集、アマモ地上部と葉上動物群集、アマモ地下部と内在性動物の定量採集を行った。収集サンプルの測定では、アマモについては形態形質・株密度および現存量の計測を行い、また、葉上動物・内在性動物については種数・個体数・密度および現存量の計測を行った。また、魚類についても種数・個体数密度および現存量の計測を行った。これらの変数について多様性指標値と生態系機能の指標値との関係について栄養段階内と栄養段階間での予備的な統計解析を行った。

#### 5) アマモ形態形質機能の変異の実験的検証

アマモの形質について、個々の物理環境に対する形質の変化を操作実験により検証した。実験では、水深・流速・水温を個別に操作した屋外・海上設備を用いて、アマモ栄養株の生育状況と形態形質の計測を行った。

#### 6) アマモ植生構造と魚類群集の関連性解析

アマモ群落構造と魚類群集の関係把握のために、厚岸湖、富津干潟沖、安芸灘生野島の3海域において野外調査を行った。まず各地点でアマモ群落内の魚類の定量採集を行い、種数および生物量の計測を行った。次に、アマモの形態形質（葉数、分岐数、葉長）・株密度の計測を行った。最後に、物理環境（水深・流速・水温）とアマモ群落構造との関係、およびアマモ群落構造と魚類群集との関係について数式化を試み、サブテーマ（1）で作成したデータベース上にある各海域のアマモ場空間分布図を利用し、魚類群集データ（生物多様性指標）を空間的に広く外挿する試みを行った。

#### 7) アマモ形態形質機能の継代可塑性に関する実験的検証

屋外水槽施設にて、単一の花株から採集した種子を発芽させた実生株を用いて、発芽環境および初期実生飼育環境がアマモの形態形質に及ぼす影響を完全に除去し、継代生育条件下での形態形質への流速の影響を評価した。

#### 8) 動物群集多様性の広域分布評価

アマモ群落構造と動物群集の多様性の関係に関する評価を行った。各海域の野外データの精度を向上させ、アマモ群落構造と生物多様性の関係を詳細にモデル化した。各地で採集された魚類相と環境データおよびアマモ場の被度データとの関連性に関して共分散構造解析を用いた統合解析を行い、環境データおよびアマモ場の被度分布から予測された魚類相の分布マップを作成した。

## 4. 結果及び考察

### （1）広域情報データベースの基盤整備

### 1) 統合GISデータベースプラットフォームの作成

本データベースにおいては、入手・作成した空間情報を、サイトスケール、アマモ場スケール、地域スケールの3空間階層に分けて整理・管理した。データベースは、画像（空間）データ、統計・表データ、統合解析ユニットの3つから構成され、平成24年3月現在で、合計435件のデータが登録された。

公開版データベースは、平成22年3月より運用を開始した。インターネット上の表紙ページから対象地域を選択すると、入手可能な情報のリストが表示される。利用者は希望する情報を選択するとその空間情報をkml形式で各自の端末にダウンロードすることができ、Google Earthなどの汎用のソフトウェアでその情報を閲覧することができる形式とした。

### 2) 衛星画像、空中写真によるアマモ場判別方法の検討

厚岸湖を対象に2008年に得られた衛星画像（ALOS, JAXA）からアマモ場の空間分布の判定を行い、アマモ植生の分布を解像度2m以下で判別した。また、2008年から2009年に厚岸湖北岸で観測気球によって得られたアマモ植生の空中撮影画像についても、同様に現地調査による地上検証データを元に判別を行った。その結果、範囲5000m<sup>2</sup>における海草植生の分布を解像度1m以下で判別することができた。

### 3) アマモ場の長期変動様式および変動機構の解析

航空写真、衛星画像、および既存の聞き取り調査や現地調査などの空間情報をもとに、各地域のアマモ場の面積の長期変動を推定することができた。瀬戸内海の広島湾では、1950年代後半にアマモ場の面積が激減したのち、1990年代まで顕著な回復が見られないことが明らかになった。一方、道東の厚岸湖では、1970年代から1980年代にアマモ場面積が減少したのち、2000年代後半以降に急激に回復しつつあることが判明した。

東京湾の10点のアマモ場における1989年～2005年の面積の長期変動のパターンは、アマモ場により異なる傾向を示した。アマモ場のうち、期間中に急激に面積が増加した3箇所（富津港、浜田、波左間）については、港湾建設に伴う周辺地形の大きな変化に伴う物理的環境の変化が関連していることが明らかになった。アマモ場の急激な増加が認められなかった残り7点のアマモ場については、アマモ場の面積変動に関連すると思われる環境要因は場所により異なった。

東京湾最大の面積を持つ富津干潟沖のアマモ場においては、その時間変動パターンがアマモ場内の位置により大きく異なることが明らかになり、位置ごとの時間変動パターンには異なる環境要因の組み合わせが関連していることが判明した。結果的に、アマモ植生がアマモ場内の各サイト間で非同期的な変動を示すことにより、アマモ場全体が安定に存続していることが示された。

### 4) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：アマモの機能の評価

アマモ場の生態系機能のうち、アマモ自身の機能はいずれも、アマモ場内で大きな変異を示した。富津干潟沖では、アマモの最大光合成収率、現存量、生産量の変異の大部分が、水深および離岸距離の組み合わせで説明できることが判明した。最大光合成収率、現存量、生産量は同じパターンの空間変異を示し、アマモ場東部および西部で高い値を、中央部で低い値を示した。

厚岸湖のアマモ場では、アマモの最大光合成収率と現存量共にその変異の大部分が、水深および夏季の水温・塩分の組み合わせで説明できることが判明した。各目的変数の広域空間変異については、最大光合成収率、現存量共に、湖南西部で高い傾向があること、最大光合成収率は湖北部で、現存量は湖南東部で低い傾向があることが明らかになった。風蓮湖のアマモの生物量は、水深と共に減少、塩分と共に増加し、その空間分布は、湾口に近い東部および湖の北部で高かった。

厚岸湖のアマモ場の安定性について、1967年以降のアマモ植生の置換頻度から空間的に評価した結果、置換頻度が低く安定している場所と置換頻度が高く不安定な場所が厚岸湖全域にモザイク状に分布していることが判明した。また、富津干潟沖アマモ場潮間帯下部～潮下帯上部については、潮下帯部分の植生のほうが、潮間帯部分より時間的変動が少なく安定していることが明らかになった。

### 5) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：動物のアマモ場利用様式の評価

富津干潟沖アマモ場のマクロベントス群集の生物量および種多様性は、海草の被度と正の相関を示した。調査地点の周囲直径10～15mのスケールで海草の被度を測定した場合に最も相関が高かった。個体数と多様性指数はいずれも海草被度の変動係数と負の相関を示した。すなわち、安定した植生において生物多様性と生物量がより高いことが明らかになった。

厚岸湖で越冬をするオオハクチョウのアマモ場利用頻度には、岸からの距離が大きく影響し、結氷前では水深の影響、結氷後ではアマモ分布の影響も大きいことが判明した。厚岸湖は冬期に湖面が大規模に結氷し、アマモ場の一部を利用できなくなるため、結氷の前後で決定要因に変化したと考えられる。

#### 6) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：統合評価法

サブテーマ(1)とサブテーマ(2)で得られたアマモ場の生態系機能と生物多様性の空間分布の統合的評価の結果、厚岸湖のアマモ場では、現存量、安定性、魚類の機能群多様性に着目した場合、湾中央部の水深が比較的深いアマモ植生帯の総合評価ランクが高く、岸沿いの潮間帯部分が低いことが判明した(図2)。

### (2) アマモ場の生物多様性と生態系機能の関連性解析

#### 1) アマモの生長量と水深勾配の関連性

アマモの株あたりの乾燥重量、および成長量は、水深により大きく変異した。深い地点においては、葉を薄く広くして集光効率をあげ、弱光に対応していると考えられた。得られた結果より、アマモの生態系機能評価の方法として、標識法に代わり簡易的方法として利用されている葉鞘の長さから生長量を推定する方法の利用条件が明らかになった。

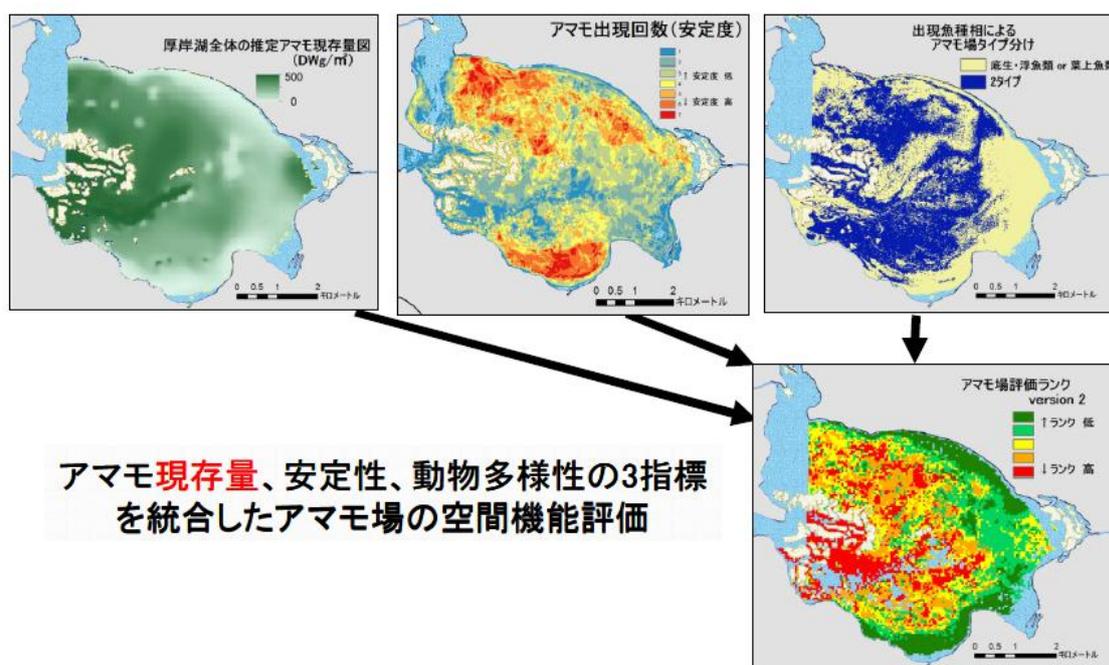


図2 アマモ現存量、安定性、魚類の機能群多様性を統合して求めた厚岸湖のアマモ場の統合的空間機能評価

#### 2) アマモの光合成能の空間変異と環境勾配との関連性

厚岸湖では、地点間でクロロフィル蛍光に有意な差が検出されず、塩分との線形的な対応も見られなかった。塩分勾配以外の要因も複合的に作用していることが示唆された。東京湾富津では、水深が深い地点ほどクロロフィル蛍光が高くなる傾向があったが、その理由に関しては、解釈が困難であった。クロロフィル蛍光の測定は標識法と比較して簡便にアマモの生産性の指標を得ることができる上、非破壊的な方法で調査対象であるアマモにほとんど悪影響を与えないという点でアマモの生態系機能評価に有効な方法であることが示された。

#### 3) アマモの元素組成と栄養塩勾配の関係

厚岸湖の河口域において9月に、最も外洋側にて6月と9月にC/N比が20以上の値を示した。一方、

窒素含量は閾値である1.3を下回ることにはなかったが、他の地点より低い傾向をしめした。各地点ともアマモの生長量は春季に最も大きい値を示すため、アマモの栄養塩要求量も春季に最大になる。別寒辺牛川を通じた融雪水の影響で、河川を通じた窒素の流入は3月頃が年間を通じて最大である。このことが、生長量が最も大きい6月に河口域で窒素が欠乏していない理由であると考えられる。厚岸湖中央部では、海草の生長量も他の地点より大きく、窒素の欠乏は認められなかった。河口域から最も遠い地点においては、夏季だけでなく、春季にも窒素が欠乏することが判明した。

#### 4) 各重点調査海域でのアマモ植生・植生内の動物相・魚類相とその現存量の把握

アマモ植生に関する野外調査の結果を受けた一般線型モデル解析の結果、地上部現存量で地点間に若干の差が見られ、地下部現存量では有意な差が認められた。ただし、瀬戸内海と厚岸といった海域間での差より海域内での差が大きくなった。また、形態形質においては、葉長、分岐数、葉面に地点間、地域間の有意な差が認められた。葉上動物と内在性動物に関する同様の予備解析では、すべての変数において地点間に差が見られず、海域間での差より海域内での差が大きい傾向が確認された。魚類における予備解析結果では、種数は海域間より海域内の地点間での差が大きい一方で、現存量は海域間での差が大きかった。これらの結果は、生物多様性および生態系機能の指標となりうる変数は、栄養段階間で異なる空間スケールの要因によって制限されている可能性を示唆している。

予備的に行った変数間の単相関関係の結果、いくつかの変数間で有意な相関が得られた。魚類の種の豊度(多様性)は地上部現存量と負の相関を示し、現存量は株数や葉数・分岐数と相関を示した。葉上動物では、種の豊度が葉面積と正の相関を示し、現存量も栄養株数や分岐数、葉長と相関を示した。これらの結果は、複数の栄養段階の多様性を評価軸に用いる場合、一般的に生態系機能の指標として用いられるアマモの現存量や生産量に加えて、形態形質の指標値もデータベースに加える必要性を示している。

#### 5) アマモ形態形質機能の変異の実験的検証

水温・水深・流速の物理環境勾配とアマモ群落構造との関連を調べた操作実験の結果では、水温変化に伴う群落構造の変化は確認されなかったが、水深勾配および流速勾配に伴うアマモ群落構造の変化が確認された。また、すべての実験において群落間(潮間帯群落および潮下帯群落)での差は検出されなかったため、現場海域での群落構造の由来に関わらず、実生株は環境に応じて可塑的に群落構造を変化させていたと考えられた。

水深勾配実験においては、各実生株の全長において注目すべき変異があり、統計的には有意な差ではないが水深が深いほど大きくなる傾向が確認された。流速勾配実験においては、各流速条件下の実験株間で群落構造に大きな変異が確認され、分岐数は中程度の流速条件下で分岐数が少なくなる傾向が確認された。他の群落構造パラメータ(株数、実生株全長、葉幅)でも有意な変異が観察され、一番弱い流速条件下で有意に全長が大きく、株数が少なく、葉幅が大きくなっていた。これらの結果を総合的に解釈すると、強い流速条件下では全長が小さく葉が細い形態を示すが株数が多くなる群落構造になり、弱い流速条件下では全長が大きく葉が太い形態で株数が少ない群落構造になると考えられる。

#### 6) アマモ植生構造と魚類群集の関連性解析

厚岸湖での魚類群集全体とアマモ群落構造との関係では、群落の株数が多くなるほど魚類群集の多様性が減少する傾向、および株平均全長が大きいほど魚類全体の現存量が減少する傾向が確認された。個々の魚種タイプで見ると、底魚類の現存量は群落構造に関係なくすべての調査点に多く、全体現存量と正の相関関係にあった。その一方で葉上魚類の現存量は株全長と正の相関があり、全体種数とも正の相関をも有していた。また、浮魚類も全体種数と正の相関を有していた。

これらの結果を総合的に解釈すると、厚岸湖では魚類全体に占める底魚類の割合が大きく、全長が大きく株密度が小さい群落が形成されている場所でのみ、底魚類に加えて葉上魚類と浮魚類が出現し、その結果として多様性が高くなっていることが示唆された。そのため厚岸湖の魚類群集の分布は、全長の小さい群落の分布域に相当する底魚類のみの分布域と、全長の大きい群落の分布域に相当する魚類群集全体の分布域の2タイプで表すことができる。これらの情報をもとに、魚類群集の空間分布を評価することができた。

#### 7) アマモ形態形質機能の継代可塑性に関する実験的検証

流速勾配実験においては、上記5)と同様に、各流速条件間でアマモ形態形質に大きな変異が確認

された。流速が最も早い群落では株密度が大きく、草丈が短く、葉幅が細くなる傾向があり、流速が遅くなるにつれて株密度が小さく、草丈が長く、葉幅が太くなる傾向が確認された。その一方で、潮間帯から採集された実生株では、すべての流速条件下で小型化し、株密度も小さくなっており、各流速条件下で有意な差が見られなくなっていた。以上の結果から、同所的に存在するアマモであっても、環境条件により遺伝的に異なる発現をしていることが示唆された。

#### 8) 動物群集多様性の広域分布評価

これまでの調査結果と空間情報をもとに、3海域における魚類群集構造の空間分布を評価した。厚岸湖での魚類については、2010年度と2011年度で変化していないことが明らかとなった。安芸灘生野島では、アマモ群落の株数が増えるほど魚類群集の多様性と現存量が減少する傾向が得られた。また、中層魚類の現存量は草丈と正の関係が得られた ( $r = 0.413$ )。魚類群集の空間分布は、湾奥部の株密度が高い海域で魚類が殆ど出現しない一方、湾口部になるほど魚類相の現存量が多く、すべての魚類が出現する多様性の高い分布域が形成されることが判明した。富津海域で、同様の解析を行った結果では、水深が浅くアマモも分布しない砂州周辺で殆ど魚類が出現せず、次いでその周囲のアマモ群落の草丈が高くなる海域で中層魚類が優先する魚類群集となり、さらに水深の増加に伴いすべての魚類群集が出現するアマモ群落が続き、さらに水深が増加するとアマモが分布せず、底生魚類だけが出現するという空間分布が評価できた。このように、すべての重点海域でアマモ群落構造から食物網を介して高次消費者まで予測が可能であることが示された。これらの結果をサブテーマ1で行う統合解析に提供した。

### 5. 本研究により得られた主な成果

#### (1) 科学的意義

本研究により、空間画像データと現地モニタリングデータを関連付けながら、アマモ場生態系の変化を統合的に追跡できるシステムが開発された。特に、現地観測データの関連性を統計モデルで解析した上で、GIS上で内挿するという統合的なアプローチの開発により、アマモ場の基本的な生態系機能を表す変数類の広域空間変異の評価が可能となった点は、従来の解析の多くがアマモ植生の有無を判別する段階にとどまっていたことに対して格段の進歩である。

GISデータベースを利用した諸解析の結果、アマモ場の長期変動様式および生態系機能・生物多様性は、地域間・地域内の異なるアマモ場間だけでなく、1つのアマモ場内の環境勾配によっても大きく変わること、アマモ場間・アマモ場内で非同期的に面積が変動することにより長期的な安定性が維持されること、アマモ場に生息する動物類の分布や多様性・生物量は、アマモの量だけでなく、アマモの形態形質や、アマモ植生の空間配置や安定性に影響を受けていることなど、アマモ場の生態学に関する基本的な知見が本研究により新たに加わった。

さらに、サブテーマ(1)と(2)で得られたさまざまなタイプの生態系機能の空間評価結果を統合的に解析することにより、アマモ場の多重機能を統合評価を行う方法が開発された。本方法は、従来の手法に比べ、対象海域のアマモ場全域にわたり空間連続的に機能評価を行える点で画期的であり、今後世界各地のアマモ場で同様のアプローチによる解析が進むことが期待される。

#### (2) 環境政策への貢献

本事業により、アマモ場に関する既存のさまざまな異なるタイプのデータソースを階層的に整理・検索することが可能になり、今後の多方面にわたる社会的なニーズに応じて、必要な情報を効率的に検索、利用するための基盤が整った。また、公開版データベースを通じてアマモ場の生物多様性および生態系機能の空間評価結果を広く発信することができるようになった。

本システム、およびそれを利用して解析した成果は既に下記のような環境政策に関連する多数の事業・研究プログラムに適用され、実績を挙げつつある。

- 地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書において、本サブテーマに基づく沿岸生態系の観測指針およびデータベース構築の有用性が取り上げられ、その推進に貢献した。
- 地球温暖化対策分野関連では、水産庁地球温暖化対策推進費委託事業「藻場・干潟の炭素吸収源評価と吸収機能向上技術の開発」、および港湾空港技術研究所の関連研究で、本課題が開発したGISデータベースが運用されている。
- 環境省重要生態系監視モニタリング推進事業・沿岸域調査(アマモ場)のデータの有効性を、本研究成果に得られた手法で検証し、当該事業の推進に貢献した。

- 海洋生物多様性の保全および海洋資源の持続的利用にかかる研究開発事業、「漁場環境・生物多様性評価手法等開発事業（水産総合研究センター）」、「藻場の資源供給サービスの定量・経済評価と時空間変動解析による沿岸管理方策の提案（環境省・環境研究総合推進費）」、「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究（環境省・環境研究総合推進費）」にて、本システムが利用されている。
- 2011年3月に発生した東日本大震災において激甚な被災を受けた東北～関東の沿岸域の被害状況の把握と影響評価を行う水産庁、文部科学省、環境省の各事業において、本研究の手法を用いた解析が行われている。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) T. YAMAKITA, K. WATANABE and M. NAKAOKA: *Ecography*, 34, 519–528 (2011)  
DOI: 10.1111/j.1600-0587.2010.06490.x  
“Asynchronous local dynamics contributes to stability of a seagrass bed in Tokyo Bay”
- 2) T. YAMAKITA and M. NAKAOKA: *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 21, 177–183 (2011)  
“Importance of considering grain and extent for the analysis on spatial dynamics: perspectives from comparison between theory and empirical example on seagrass bed dynamics in Tokyo Bay”

### (2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) M. Nakaoka, M. Hori: Coastal and Estuarine Research Federation 2009 Biannual Meeting, Portland, U. S. A. (2009)  
“The linkage between biodiversity and ecosystem functions: regional perspectives.”
- 2) M. Hori, Y. Tanaka, T. Miyajima, G. Yoshida, M. Hamaguchi: Coastal and Estuarine Research Federation 2009 Biannual meeting, Portland, U. S. A. (2009)  
“Landscape diversity enhances secondary production of the associated community in seagrass/algal beds”
- 3) 仲岡雅裕：第57回日本生態学会東京大会（2010）  
「アマモ場の生物多様性：沿岸生態系におけるその役割」
- 4) 仲岡雅裕：2010年度日本水産学会春季大会シンポジウム「魚介類生産の場としての浅海域の生態系サービス」（2010）  
「地球環境変動と生態系サービス」
- 5) 堀正和・島袋寛盛：全国アマモサミット2010「海のゆりかご」の再生を目指して 鹿児島（2010）  
「西日本のアマモ場とその生産機構-アマモ場の分布と機能評価に関する話題を中心に-」
- 6) 堀正和・吉田吾郎・島袋寛盛・山田勝雅：第12回環境リモートセンシングシンポジウム（2010）  
「沿岸海洋景観のGISデータベースの構築：衛星画像を用いた藻場生態系の生態系機能評価」
- 7) M. Nakaoka, M. D. Fortes: 9th International Seagrass Biology Workshop, Trang, Thailand (2010)  
“Towards an integrated coastal ecosystem conservation and adaptive management of coastal areas of Southeast Asia”
- 8) Hori, M., T. Yamakita, K. Watanabe, G. Yoshida, M. Hamaguchi, and M. Nakaoka: World Seagrass Conference 2010, Phuket, Thailand (2010)  
“Landscape analysis of the relationship between fish and seagrass spatial distribution associated with adjacent habitats”
- 9) M. Nakaoka, N. Tojo, K. Watanabe, M. Hori, Y. Tanaka, T. Yamakita, N. Whanpetch: World Congress of Marine Biodiversity 2011, Aberdeen, U. K. (2011)  
“The linkage between biodiversity and ecosystem functions in seagrass beds: a multiple spatial-scale approach in Japan”
- 10) M. Hori, Y. Tanaka, T. Miyajima, G. Yoshida, M. Hamaguchi: Vulnerability of coastal ecosystems to global change and extreme events, Biarritz, France (2011)  
“Effects of coastal seascape diversity on seagrass-associated fish production.”
- 11) M. Nakaoka: East Asian Federation of Ecological Societies 5th International Congress,

Otsu, Japan (2012)

“Board-scale variation in biodiversity and functions of seagrass beds along the Pacific coast of eastern Asia”

12) M. Hori, T. Yamakita, K. Watanabe, G. Yoshida, H. Sudo: East Asian Federation of Ecological Societies 5th International Congress, Otsu, Japan (2012)

“Spatial classification of the suitable coastal seascape structure for fish species “

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 仲岡 雅裕

1965生まれ、東京大学理学部卒業、博士(理学)、現在北海道大学北方生物圏フィールド科学センター厚岸臨海実験所所長

研究参画者

(1): 仲岡 雅裕 (同上)

(2): 堀 正和

1974生まれ、北海道大学水産学部卒業、博士(水産科学)、(独)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所主任研究員

## B-0910 現地観測データとGISの統合的利用によるアマモ場の生態系総合監視システムの構築

### (1) 広域情報データベースの基盤整備

北海道大学

北方生物圏フィールド科学センター厚岸臨海実験所 仲岡雅裕

<研究協力者>

北海道大学

北方生物圏フィールド科学センター厚岸臨海実験所 東条斉興（博士研究員）（平成21年度）

北方生物圏フィールド科学センター厚岸臨海実験所 渡辺健太郎（学術研究員）（平成22～23年度）

独立行政法人海洋研究開発機構むつ研究所 田中義幸（平成22～23年度）

平成21～23年度累計予算額：14,590千円（うち、平成23年度予算額：4,900千円）  
予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】**本サブテーマにおいては、野外観測とGISによる広域空間情報を統合したアマモ場の生態系総合監視システムを作成・運用すると共に、他サブテーマの成果も踏まえた統合的な解析を行うことにより、アマモ場の生態系機能・生物多様性の広域評価を行うことを目的とする。環境条件が異なる3海域（北海道東部、東京湾、瀬戸内海）のアマモ場を対象域とした。GISデータベースは得られた空間情報データを4つの空間階層、5つのデータ種別に整理して格納すると共に、野外調査等で得られた非空間データも管理して、両者を用いた統合的解析ができるように作成した。同時にウェブページ上に公開版データベースも作成した。データベースの情報を用いて解析したアマモ場の長期変動様式は地域間、場所間、さらには1つのアマモ場内の地点間で大きく変異し、場所により異なる環境条件の組み合わせに影響されていることが判明した。さらに、アマモ場の生態系機能を表す諸変数の空間変異と環境要因・地形的要因との関係性を統計モデルで表し、その結果をGISデータベース上でアマモ場の分布情報に内挿することにより、アマモ場の生態系機能を広域的に評価する方法を開発した。その結果、海草自身の機能を表す生物量、光合成効率の高さは、水深、水温、塩分、離岸距離など複数の要因に影響を受けており、主要な要因が場所により異なることが明らかになった。一方、本システムを用いて、アマモ場に生息するマクロベントス群集やオオハクチョウ個体群のアマモ場利用様式を解析することもできた。最終的に、サブテーマ（1）と（2）の結果を統合的に扱うことにより、アマモの生物量、安定性、および動物群集の多様性など異なる生物多様性・生態系機能を統合した海域の重要性の空間評価を導出した。本課題で開発したシステムは、海洋生物多様性の保全および海洋生物資源の持続的利用や、地球温暖化対策分野関連の諸事業にも既に利用されており、さらに今後、国内外のさまざまな沿岸生態系の保全・管理、環境教育プログラム等に活用されていくことが期待される。

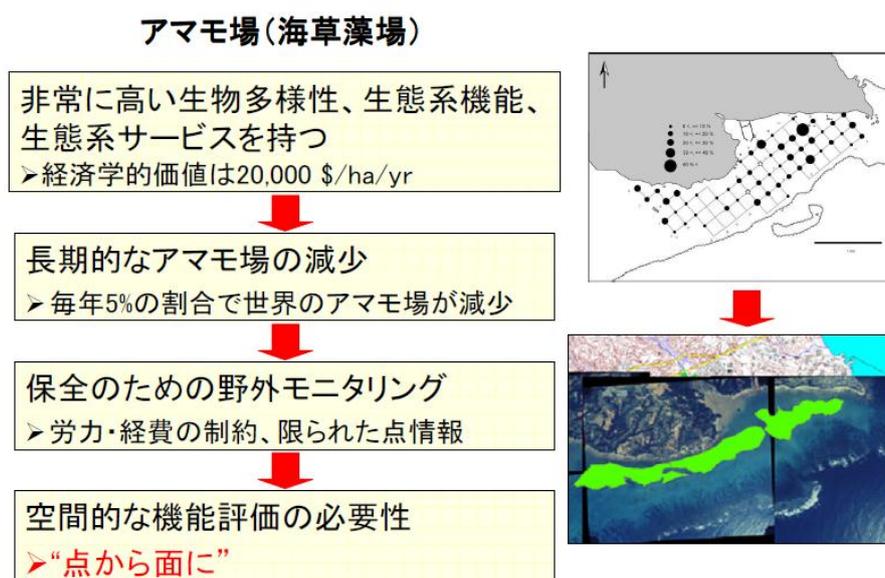
**【キーワード】**沿岸生態系、空間動態、リモートセンシング、地理情報システム、モニタリング

## 1. はじめに

沿岸域にある藻場のうち、種子植物である海草類（アマモ類）を主体として静穏な砂底や泥底に形成されるものを「アマモ場（海草藻場、seagrass bed）」と呼ぶ。アマモ場は、生産性が非常に高く、有用魚介類や絶滅危惧種を含む生物多様性のホットスポットとなっている<sup>1),2),3)</sup>。さらに、水質の浄化や底質の安定化に貢献するなど、沿岸生態系の中で多様な機能を果たしている<sup>4)</sup>。人類がアマモ場から享受する生態系サービスの経済学的な価値は、サンゴ礁の3倍、熱帯雨林の10倍にも達するとの試算もある<sup>5)</sup>。

しかしながらアマモ場を含む沿岸生態系は、日本各地および世界各地において、水質や底質の悪化、海岸線の開発、さらに地球温暖化など、さまざまな人間活動の影響を受けて劣化の一途をたどっている<sup>6),7),8)</sup>。Global Seagrass Trajectories Databaseという世界規模のデータベースを用いた解析では、アマモ場の消失率が、1980年代以降では年5%に達すると報告している<sup>8)</sup>。しかし長期的かつ定量的なデータのほとんどは、以前より研究が盛んに行われている欧米やオーストラリアで観測されたものであり、日本を含むアジア諸国のアマモ場から提供された長期データは非常に少ない。東南アジアから日本にいたる沿岸域は、熱帯性および温帯性の海草の種多様性が最も高い海域であり、この海域のアマモ場生態系の長期変動に関するデータの集積、すなわちモニタリングの持続的な実施が世界的にも求められている<sup>9)</sup>。

このような状況を反映して、沿岸生態系の長期変動を把握しようとする事業が世界各地で行われるようになった<sup>10)</sup>。わが国では、環境省が「モニタリングサイト1000（重要生態系監視地域モニタリング推進事業）」において、全国の代表的な沿岸生態系（干潟、アマモ場、磯、海藻藻場）から数十地点を選定して、統一されたプロトコルによる野外モニタリングを長期間継続する事業を2007年度より開始している<sup>10),11)</sup>。しかし、そのようにして得られた生物多様性や生態系に関する野外観測データは、あくまでも特定の点における情報であり、この成果を沿岸域の保全・自然再生の諸施策に有効に生かすためには、調査結果をいかにして面的な広がりを持つ沿岸域全体に展開するかという課題を克服しなくてはならない（図(1)-1）。



図(1)-1 本研究課題の背景となるアマモ場の状況とそれに対する解決策

## 2. 研究開発目的

前述の背景を受けて、本研究課題では、沿岸生態系の重要な構成要素であるアマモ場を対象に、現地観測データとリモートセンシングデータを統合したGISデータベースを作成し、これをもとに環境・生物多様性・生態系機能間の関連性の解析を行うことにより、アマモ場の生物多様性と生態系機能の広域かつ長期にわたる変動を監視するシステムを構築することを目指した。本サブテーマにおいては、その基盤となるべきデータベースを作成すること、そのデータベースを利用して、アマモ場の変動を広域かつ長期的に把握すること、さらに、サブテーマ（2）の成果を含めて統合的な解析を行うことにより、生態系機能や生物多様性の広域評価を行うことを目的とした（図(1)-2）。

本プロジェクトは2009～2011年度の3ヵ年で実施された。まず初年度においては、上記データベースの対象スケール、入力データの分類法などを含むデザイン設計を行い、実際のデータベースを作成した。また、既存の航空写真、衛星画像からのアマモ場の判別方法を検討した。さらに、試行的なデータ解析を行い、アマモ場の長期変動を明らかにした。

2010年度においては、データベースの充実化を図ると共に、アマモ場の時空間変動様式およびその要因について、複数の空間スケールで解析した。さらに、統合的解析として、アマモ場の生態系機能を表す諸変数の空間異質性と環境要因の関係性を解析し、その結果を、GISデータベース上で内挿することにより、アマモ場全域の生態系機能を空間的に評価する方法を開発した。

最終年度においては、公開版データベースの運用を開始すると共に、新たな海域および新たな指標を対象に、前年度までに開発した生態系機能の広域空間変異評価の方法を拡張して適用し、その有効性を検証した。さらに、サブテーマ（1）と（2）の結果を統合的に扱うことにより、アマモ場の生産量や安定性などに代表される生態系機能や、主要動物のアマモ場利用様式など生物多様性に関わる諸特性の総括的な評価を行なった。



図(1)-2 本研究課題の目的と利用用途

### 3. 研究開発方法

#### (1) 統合GISデータベースプラットフォームの作成

気候・環境条件および人為的開発の程度が異なる3海域（北海道東部、東京湾、瀬戸内海）を対象域とした。それぞれの海域において入手可能なアマモ場および周辺環境の空間データ、および現地モニタリングデータについて、空間スケール（情報の範囲および解像度）を調べ、データベースで設定する空間スケールの階層を決定した。また、データベースに搭載するために入手・作成した空間情報データの種別については、情報のソース（本課題で作成したオリジナルデータか、他の成果の引用データか）、著作権や版権の有無、公開の可否などの情報に基づき分類を行なった。

続いて空間情報データと現地におけるモニタリングデータを効率的に関連付けるための管理形式を検討した結果に基づき、統合GISデータベースの構築を行なった。データベースは将来の汎用性を考えて、Windows OS上で市販あるいは無料のソフトウェアを用いて開発した。作成したデータベースに対して、対象海域の環境情報、アマモ場の空間情報および現地観測データを、上記で検討・設定した空間スケールおよび情報種別毎に整理した上で、入力・収納した。

公開版データベースについては、基本設計、表示方法、および統合GISデータベースからのリンク方法を検討後、Windows OS上で汎用されるhtml編集ソフトウェア類を利用して作成を行なった。また、公開するデータの選定基準についてのデータポリシーを作成し、その基準に基づき、実際に公開する情報を選定し、平成24年3月より公開を開始した。

#### (2) 衛星画像、空中写真によるアマモ場判別方法の検討

収集・撮影した衛星画像・航空写真画像より、アマモ場の空間分布を判別する方法を検討した。航空写真からアマモ場の判別方法については、東京湾で行われた先行研究により、目視判別および教師付分類判別が高い精度で一致することが確認されている<sup>12)</sup>。本研究では、上記方法が高解像度衛星画像(ALOS, JAXA)および無人係留型気球により撮影された空中画像からのアマモ場の判別にも適用できるかどうかを検討した。高解像度衛星画像については、2008年7月に厚岸湖を含む北海道東部で撮影された画像に対して、2008年度および2009年度に行われたアマモ場の現地定量的調査、および2009年度に行われたアマモ場以外の景観の分布調査結果を元に、教師付分類判別を行い、アマモ場の分布および海草の種構成、被度・現存量の空間分布を解析した。気球撮影画像については、2008年8月、2009年8月に厚岸湖北岸のカムイワにおいて、高度200-300 mから撮影された画像を元に、同時期に行われた分布調査結果を元にした教師付分類を行い、局所スケールでのアマモ植生の空間異質性およびその経年変動について解析した。

#### (3) アマモ場の長期変動様式および変動機構の解析

瀬戸内海、東京湾、北海道東部厚岸湖において、データベースに収集した既存のアマモ場分布データ、および上記(2)の方法により判別したアマモ場分布情報データを元に、対象3地域におけるアマモ場の面積の長期変動の解析を行った。瀬戸内海では、広島湾で1954年、1960年、1971年、1991年に行われた聞き取り調査と、2008年の現地調査を元に作成したアマモ場の分布マップ<sup>13)</sup>を解析することより、アマモ場の長期変動を明らかにした。北海道東部厚岸湖では、1967、1975、1980、1985、1992年に得られた航空写真、および2008、2010年の衛星画像(ALOS, JAXA)からのア

アマモ場面積の判別結果を組み合わせて解析した。東京湾では、1989年から2005年までに撮影された航空写真から、10地点のアマモ場について面積の変動を追跡した。

最も多数の空間分布情報データが取得できた東京湾のアマモ場について、その時間変動パターンの空間変異、およびその要因を、異なる2つ空間スケールで解析した。まず、中規模の空間スケール（メソスケール）の解析として、上記で求めた東京湾東岸の10地点のアマモ場の面積変動のパターンおよびその要因の検討を行なった。東京湾の環境要因として、千葉県環境研究センターおよび日本海洋データセンターのデータベースより水質と風向・風速のデータを入手し、水温、透明度、全窒素量、全リン量について各アマモ場の最寄りの観測点の年変動を求めた。また、波の強度については、風向・風速データと地形データより、各地点における風波の指標（weighted effective fetch；以下WEF）を次式により年毎に算出した<sup>14)</sup>。

$$\text{WEF} = \sum_{i=1}^{16} F_i w_i f_i,$$

ただし、 $i$  は方位（16方位、北回り1～16）、 $F$  は重み付けされたfetch、すなわち各方位における岸までの距離、 $w$  は年間積算風速（ $5 \text{ m s}^{-1}$ より強いもの）、 $f$ は方位からの風の相対頻度を表す。なお、風速 $5 \text{ m s}^{-1}$ 未満のデータは解析からは除外した。各アマモ場の面積の同調性は、時間パターンの類似度をBray-Curtis非類似度指数を用いて求めた。地点間で求めた類似度行列については、地理的距離との相関をマンテル検定で求めた。アマモ場面積と水質およびWEFの時間変動の関連性については、ステップワイズ法による重回帰分析により検討した。

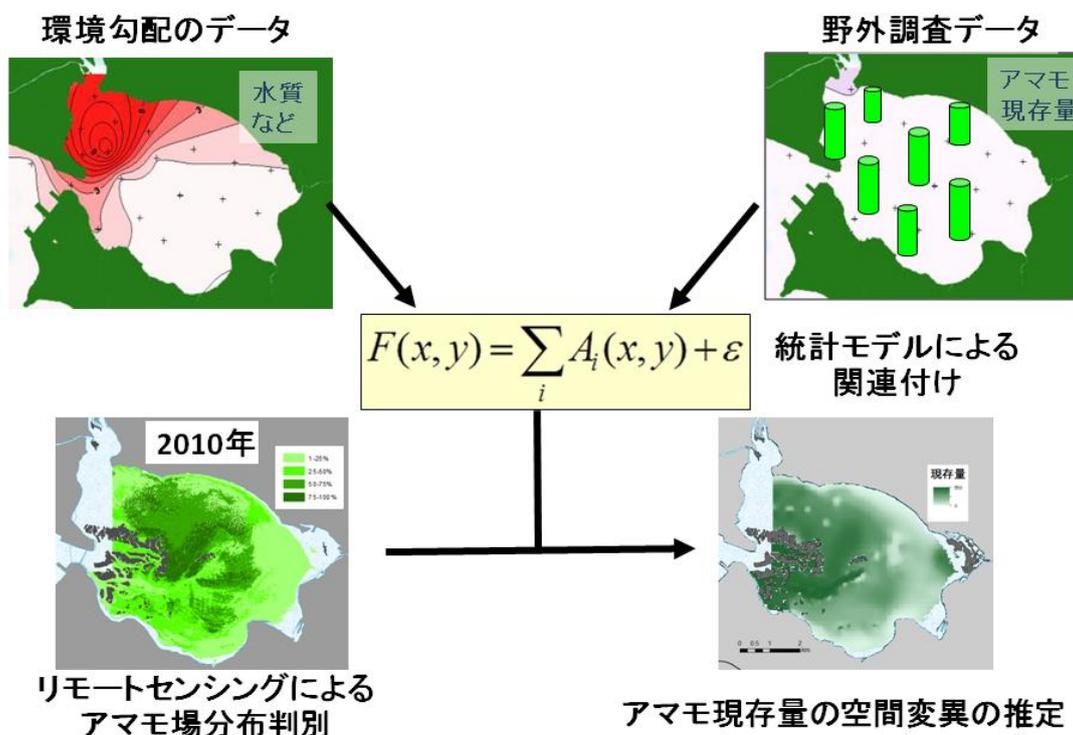
次に小空間スケールでの解析として、東京湾最大の面積を持つ富津干潟沖のアマモ場について、アマモ場内の局所的な時間変動パターンの同調性と環境要因との関連性を解析した。ここでは、過去26年間に毎年冬季に撮影された航空写真よりアマモ場の植生の有無の判別を行ったデータ<sup>15)</sup>について、200m四方に区切った局所区画ごとに植生面積の時間変動パターンを解析した。その変動パターンについて、上記で同様に求めた水質、水温、風力等の環境要因との関連性を上記と同様に重回帰分析により検討した。

#### （4）アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：アマモの機能の評価

データベースに集積された空間情報を用いて、東京湾富津干潟および北海道東部の厚岸湖と風蓮湖を対象域として、アマモ場の生態系機能を空間的に連続して推定・評価する方法の開発を行なった。まず、アマモ場の主要植物であるアマモ類による生態系機能を表す指標（目的変数）として、サブテーマ（2）の検討結果に基づき、アマモの光合成能力、生物量、生産量、および生物量の安定性を選択した。アマモの光合成能力については、水中型パルス振幅変調クロロフィル蛍光測定器（Diving-PAM）によるクロロフィル蛍光測定を富津干潟、厚岸湖のアマモ場の複数の地点で行った。各地点において10株のアマモを選択し、各株の最も若い葉を10分間暗馴化させてから最大光合成収率を測定した。この指標が低い場合は、様々なストレスに起因する光合成活性の低下を示す。生物量については、各アマモ場内の複数の調査点で定量的採集を行い、面積あたりの乾燥重量を求めた。さらに富津干潟沖においては、標識法<sup>16)</sup>によるアマモの生産量の直接計

測を行った。

以上で求めた目的変数の変異について、環境の物理的要因（水温と塩分）、地形的要因（水深と海岸からの距離）を説明変数としたGLMを作成した。その予測値と、GISデータベース上の環境要因の空間変異情報を用いて、各目的変数の広域空間変異を評価した。富津干潟沖では、GLMモデルを150m間隔で設置したグリッド点ごとに適用し、各点における目的変数の値を求め、その上で、スプライン補間法で内挿することにより、空間変異を視覚化した。厚岸湖については、GLMモデルを50m四方のグリッドで区切られた面ごとに適用して、その空間変異を視覚化した。風蓮湖については、衛星画像(ALOS, JAXA)から本研究課題で開発した判別法によりアマモ植生の有無を抽出し、その後は厚岸湖と同様の方法で、アマモ生物量の空間変異と環境要因との関連性を解析すると共に、視覚化した。厚岸湖を例とした解析プロセスを図(1)-3に示す。



図(1)-3 本研究で開発したアマモ場生態系機能の空間評価方法のフローチャート

生態系機能の1つであるアマモ場の安定性については、GISデータベースに収納したアマモ植生の分布マップを統合的に解析することにより評価した。北海道東部の厚岸湖においては、1967年以降のアマモ場の空間分布情報について、10m四方に区切ったグリッドごとにアマモ植生の有無の履歴を集計した。これによりグリッドごとにアマモ植生が何回あったかを求め、これをアマモ場の安定性を表す指標として利用した。東京湾富津干潟沖の潮間帯下部～潮下帯上部においては、

0.375km<sup>2</sup>（東西方向に500 m、南北方向に750 m）の調査エリアを設け、5mごとに設けたグリッド点ごとに、2002年～2007年における植生の面積を10mあるいは15m単位で求め、その時間的変動の大きさを変動係数(CV)として求めた。この値が小さいほどアマモ植生が安定して存在していることを示す。

(5) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：動物のアマモ場利用様式の評価

アマモ場を利用する主要消費者群集の生物多様性と生態系機能の空間評価は、本サブテーマで開発した手法を用いて、サブテーマ(2)で実施したが、本サブテーマではさらに生物多様性と関連するアマモ場の生態系機能として、異なる2タイプの動物グループのアマモ場の利用様式を解析した。具体的には東京湾富津干潟沖のアマモ場に生息する内在性マクロベントス、および厚岸湖で越冬し、アマモを摂食するオオハクチョウを解析対象とした。

東京湾富津干潟沖の内在性マクロベントスについては、(1) アマモ植生が動物の生物量と種多様性に与える正の効果はどの空間スケールで最も認められるか、(2) 動物の生物量と種多様性はアマモ植生の安定性と関連しているか、という2点に着目した解析を行なった。まず、上記(4)で空間変動の解析対象とした潮間帯下部～潮下帯上部の面積0.375km<sup>2</sup>の調査エリア内において、異なる3つの植生タイプ(アマモ植生、コアモ植生、無植生)から10反復ずつ採集を行なった。採集には、直径15cm(面積177cm<sup>2</sup>)のコアサンプラーを用い、動物を底質ごと深さ10cmまで定量的に採集した後、0.5mmの篩の上に残った無脊椎動物すべてを保存した。各採集地点の位置をGPSで5mの精度で記録し、後にGISデータベースに空間情報として入力した。採集したマクロベントスについては、同定後計数し、コアごとに構成種とその個体数を記録し、総個体数、シンプソンの多様度指数を求め、この2つを目的変数として、以下の統計解析を行なった。まず、海草植生が正の効果を与える空間スケールについては、マクロベントス採集各地点周辺の海草の被度をアマモ植生について、GISデータベース上で、各地点から直径1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 mの範囲内にあるアマモの被度(2003～2007年の平均)を求めた。この被度および植生タイプを説明変数とした一般化線型モデルにおいて、最もAICが高くなる空間スケール(直径)を求めた。また、目的変数と安定性との関係については、上記で選択された空間スケールにおける海草被度の5年間の変動を変動係数(CV)として求めると共に、最後に無植生だった時点からの経過時間、すなわちアマモ植生の存続時間を求めた。最後に、マクロベントスの個体数、多様度指数の変異について、目的変数、海草被度、CVおよび植生タイプを説明変数とした一般化線型モデルにより解析し、AICを用いて最適なモデルの選択を行った。

厚岸湖のオオハクチョウのアマモ場利用様式については、(1) 採餌のしやすさ(水深)と資源量(アマモ量)のどちらが重要か、(2) 湖面の結氷による影響をうけるかという2つの点に着目した。これまでに厚岸町水鳥観察館で記録されたオオハクチョウの分布データ、および2011年10月～2012年2月までの目視観測データからオオハクチョウの空間分布を可視化した。さらに、本事業で得られたアマモ場の水深その他の環境条件、およびアマモ場現存量の空間分布のデータを独立変数として用い、本GISデータベース上においてオオハクチョウの分布との関連性を解析した。解析に当たっては、湖面が結氷する前(10～12月)、および結氷後(1～3月)に分けて、関連性の変異を検討した。関連性の解析にあたっては、まず各独立変数間の多重共線性の有無をVIFと相関係数により確認した。続いて、一般化線型モデル(GLM関数)を用いて、ロジスティック

回帰モデルへの当てはめを独立変数を増減させながら行い、AICと対数尤度比検定を用いて最適なモデルの選択を行った。

#### (6) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：統合評価法

これまでのサブテーマ（1）の解析で得られたアマモ場の現存量および安定性の空間分布評価のデータ、およびサブテーマ（2）との共同解析で得られたアマモ場の生物多様性の空間分布評価データを用いて、アマモ場の多重機能の総合的評価を行った。対象域は今回最も多項目にわたる情報が得られた厚岸湖を選定した。アマモ場の生態系機能として、アマモの生物量、アマモ場の安定度を選定した。前者は生物量そのものの値を使い、また、安定度については各サイトにおけるアマモ植生の出現回数を用いた。また生物多様性の変数としては魚類の機能群の出現頻度を用い、底生・浮遊魚類、あるいは葉上魚類のいずれかのみが優占する場所のスコアを1、両機能群が共存するところのスコアを2とランク付けした。これら3つの空間情報を掛け合わせた値を多重機能の総合評価点と定義し、その空間分布を可視化した。

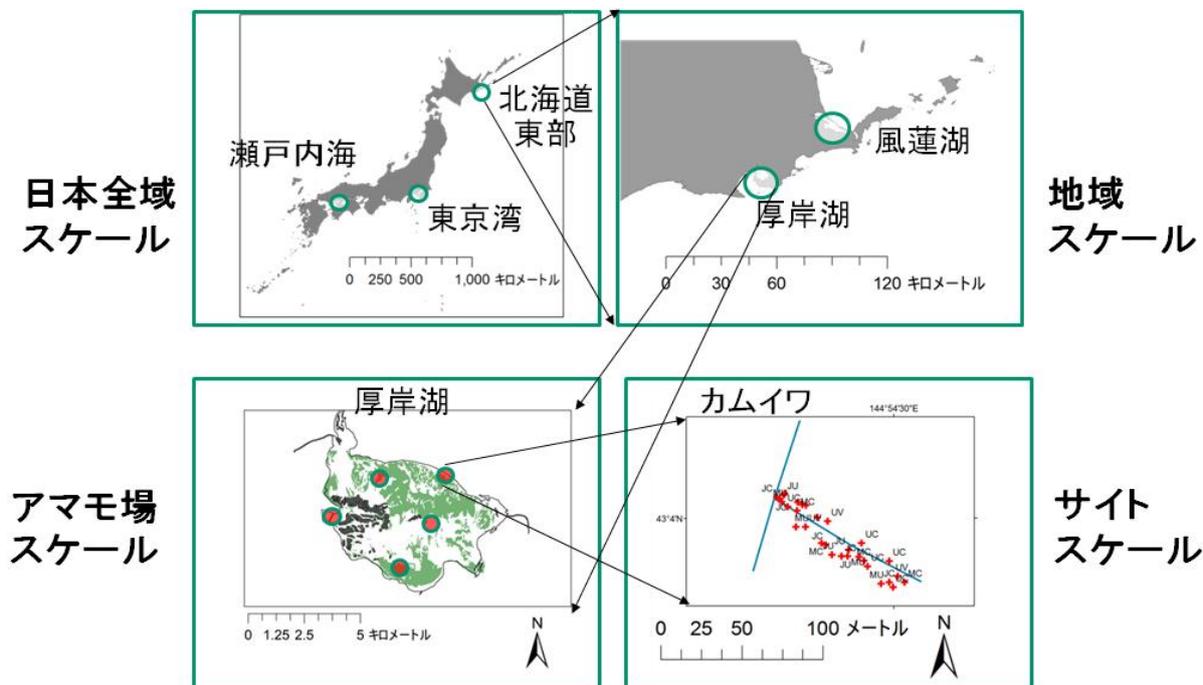
## 4. 結果及び考察

### (1) 統合GISデータベースプラットフォームの作成

データベースに取り入れる各空間情報がカバーする空間スケール（範囲）は、日本全域スケール（1000 kmスケール）から1つのアマモ場内のパッチ分布を示す局所スケール（100 mスケール）まで大きく変異した。そこで、本データベースにおいては、これらを4つの空間階層に整理することにした。すなわち、1) アマモ場内の局所的な個体群・群集の特徴・動態を生態学的に分析するため選択された各調査サイト（サイトスケール）、2) 生活史を共有するアマモ群集の特性を俯瞰しうる空間スケール（アマモ場スケール）、3) 海流などのメソスケールの環境動態により直接影響を受ける空間スケール（地域スケール）、および4) 各地域スケールを包括する空間スケール（日本列島スケール）の4段階に設定した（図(1)-4）。それぞれの階層の実際の距離スケールは、1) サイトスケールが100m～1km、2) アマモ場スケールが1km～20km、3) 地域スケールが20km～500km、4) 日本列島スケールが500km～2000km程度である。日本列島スケールの空間情報はGISの基盤となる地形図、海図等に限られるため、アマモ場の空間情報として入力・管理したものは上記1)～3)の3つの空間階層になった。

データベースに搭載するために入手・作成した空間情報データの種別については、オリジナルデータか、他のソースからのデータであるか、および入手方法や著作権の有無、公開の可否などの基準に基づき以下の5つに分類して整理した。

- A) 本プロジェクトの野外調査により得たデータ
- B) 本プロジェクトの経費で購入した空間情報データ（衛星画像、航空写真等）
- C) 本プロジェクト以外の情報のうち公開されているデータを取り込んだもの
- D) 本プロジェクト以外の情報のうち非公開であるものを許可を得て入手したもの
- E) 以上のA)-D)の資料を基に新たに本プロジェクトで二次的に作成したもの

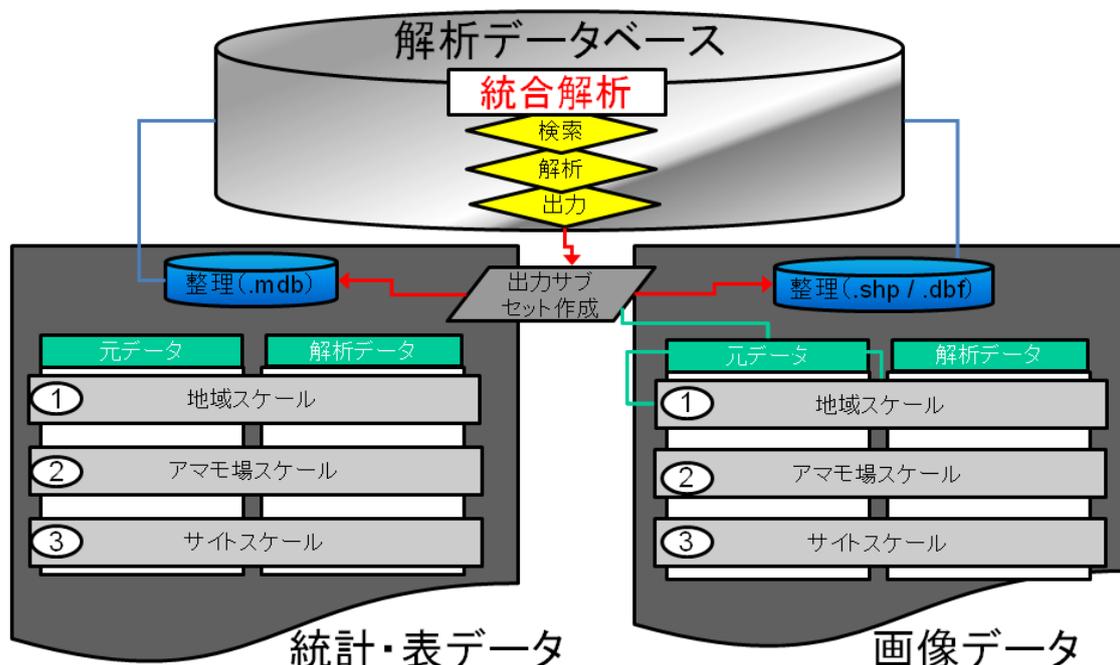


図(1)-4 本データベースで設定した4つの空間階層スケール。左上：日本列島における調査地域を示す空間スケール（日本列島スケール）、右上：各地域における調査対象の複数のアマモ場を示すスケール（地域スケール）、左下：1つアマモ場内の複数の調査地を示すスケール（アマモ場スケール）、右下：1つの調査地内における調査ラインおよび調査点の位置を示すスケール（サイトスケール）。

公開データベースでのデータ提供にあたっては、基本的に上記のA)とE)を対象とし、そのほかの情報については、必要に応じてリンク先を提示するなどの方法で対応することとした。

本プロジェクトで構築したデータベースの構造を図(1)-5に示す。データベースは、大きく分けると、1) 画像（空間）データ、2) 統計・表データ、および3) 統合解析ユニットの3つから構成される。1)で収集・作成した空間情報データのうち、衛星画像と航空写真画像については、幾何補正・輝度補正したものをArcGISのGRID形式(.vat)でスケール・データ種別に整理してデータベースに収納した。アマモ場の判別結果や、内挿済み水深データ等の二次処理後のデータも同形式で集積した。一方、2)に収納する、現地観測などにより得られたモニタリングデータについては、統一書式を用い、mdb形式（マイクロソフト・アクセス）で整理・関連付けして収納した。

上記で開発したGISデータベースに各種空間情報・野外情報を継続的に入力し、整理と管理を行った。平成24年3月現在で、合計435件のデータが登録されている(表(1)-1)。



図(1)-5 本研究で開発したアマモ場GISデータベースの構成

表(1)-1. アマモ場GISデータベース搭載のデータベースの種別と件数。  
データ種別(A~E)については、本文を参照のこと

データ形式	スケール	データ種別					合計
		A	B	C	D	E	
ベクタ形式	地域スケール	0	0	0	18	0	18
	アマモ場スケール	34	0	0	5	1	40
	サイトスケール	2	0	0	0	13	15
ラスタ形式	地域スケール	0	14	7	115	2	138
	アマモ場スケール	5	8	0	159	36	208
	サイトスケール	13	0	0	0	3	16
合計		54	22	7	296	55	435

公開版データベースは、通常のインターネット上のホームページ形式に対応したhtml言語で作成し、平成22年3月より運用を開始した。平成22年5月現在で、北海道大学北方生物圏フィールド科学センターのサーバー（同植物園に設置）の厚岸臨海実験所割り当てのスペースに設置している。インターネット上の表紙ページ（図(1)-6）から対象地域を選択すると、入手可能な情報のリストが表示される（図(1)-7）。利用者は希望する情報を選択するとその空間情報をkml形式で各自の端末にダウンロードすることができ、Google Earthなどの汎用のソフトウェアでその情報を閲覧することができる形式となっている（図(1)-8）。なお、公開にあたっては、利用者のガイドラインとなるデータポリシーを作成し、公開用データベースに掲載している（表(1)-2）。

表(1)-2 公開版データベースのデータ利用ポリシー

## アマモ場空間情報データベース データ利用ポリシー

本データベースは、環境省環境研究総合推進費プロジェクト「現地観測データとGISの統合的利用によるアマモ場の生態系総合監視システムの構築(B-0910)」により作成、公開しているデータベースです。データ使用の際は下記の利用上の注意を必ずお読みください。

## 調査成果の使用にあたって

本データベースで公開している情報について、その著作権は、特に記述がない場合、すべて北海道大学厚岸臨海実験所海洋生態学研究室および情報作成者（収録データ詳細情報一覧に記載）が有しています。これらの調査成果については、下記に示す手続きによりどなたでもご自由に使用していただくことができます。ただし、法令等に違反する目的、手段、方法での使用、公序良俗に反するような使用については一切禁止します。また、調査成果の使用により損害が生じた場合において、事由の如何を問わず、当方は一切の責任を負いません。

なお、写真・イラスト等については、環境省が著作権を有していない場合がありますので、使用の際には、事前にデータ管理者にお問い合わせ下さい。

## 調査成果の使用等のための手続き

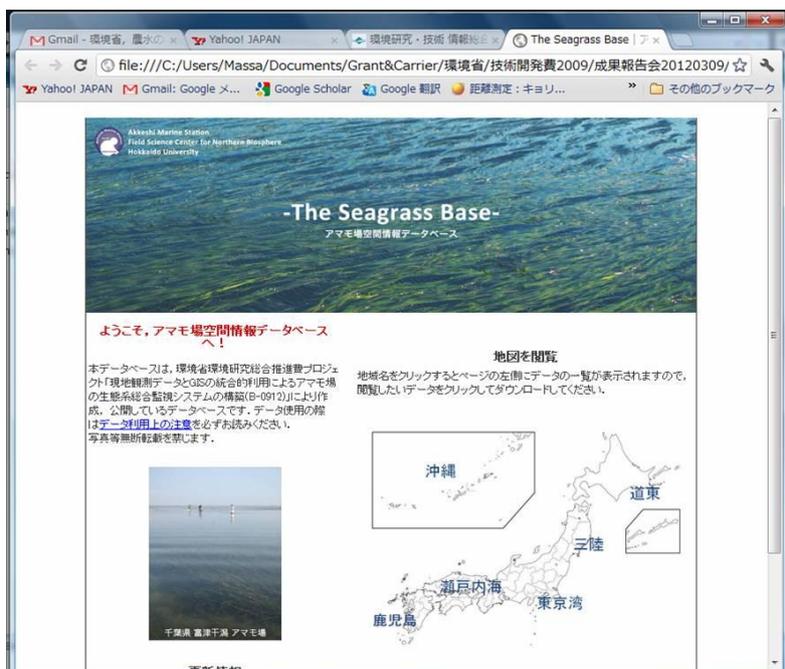
本ウェブサイトで公開している調査成果を使用して作成した成果を公表される場合には、例えば、「アマモ場空間情報データベース（北海道大学厚岸臨海実験所海洋生態学研究室）の成果を使用した。」といった、出所の明示をしていただきますようお願いいたします。その際に、公表した成果又はその写しを当方に送付していただきますようお願いいたします。また、ウェブサイトで公開される場合は、そのURLをお知らせください。また、調査成果の全部又は一部について複製して頒布すること（有償か無償かは問いません）を希望される場合も、事前にお問い合わせしていただきますようお願いいたします。

## 使用上の手続き（事例集）

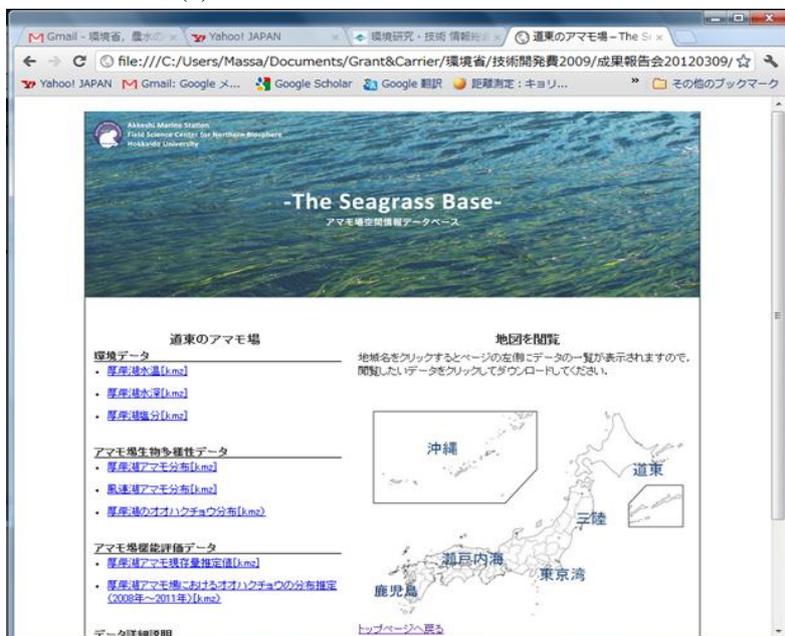
いくつかの事例と必要な手続き等について、以下に示しますのでご参考にしてください。

<事例>	<手続き>
成果の内容を変更しないで、論文や書籍の一部として引用したい	手続きは必要ありませんが、出所の明示をしてください。「アマモ場空間情報データベース（北海道大学厚岸臨海実験所海洋生態学研究室）」
調査成果を解析、集計、図示した結果を、学会で発表したい、論文や書籍に掲載したい、インターネットのサイトで公開したい。	手続きは必要ありませんが、出所の明示をしてください。「アマモ場空間情報データベース（北海道大学厚岸臨海実験所海洋生態学研究室）」
調査成果の内容を変更しないで、書籍の主要部となるような形で使いたい。	複製頒布に該当しますので、管理者に承認を受けてください。
調査成果の内容を変更しないで、CDなどにコピーして配布したい、またはインターネットのサイトで提供したい。	複製頒布に該当しますので、管理者に承認を受けてください。
調査成果の内容を変更しないで、外国語に翻訳して、	複製頒布に該当しますので、管理者に承認を受け

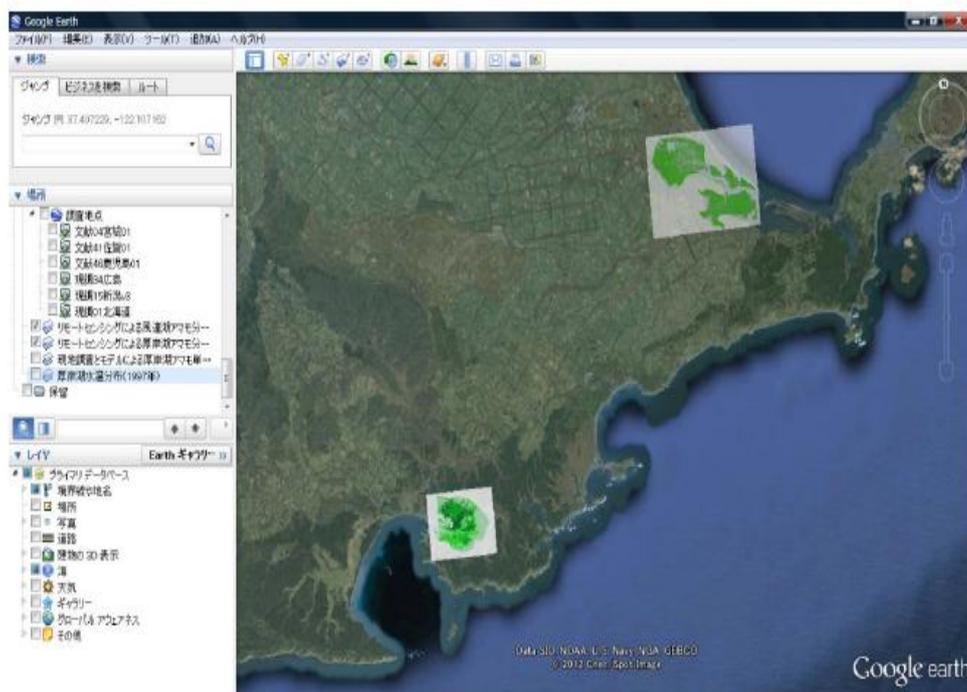
それを配布したい。	てください。
調査成果の内容を変更しないで、フォーマット変換をして、それを配布したい。	複製頒布に該当しますので、管理者に承認を受けてください。
ウェブサイトで公開されていない調査成果を使用したい。	データ管理者および作成者との協議の上、可否を判断します。



図(1)-6 公開用データベースの表紙ページ



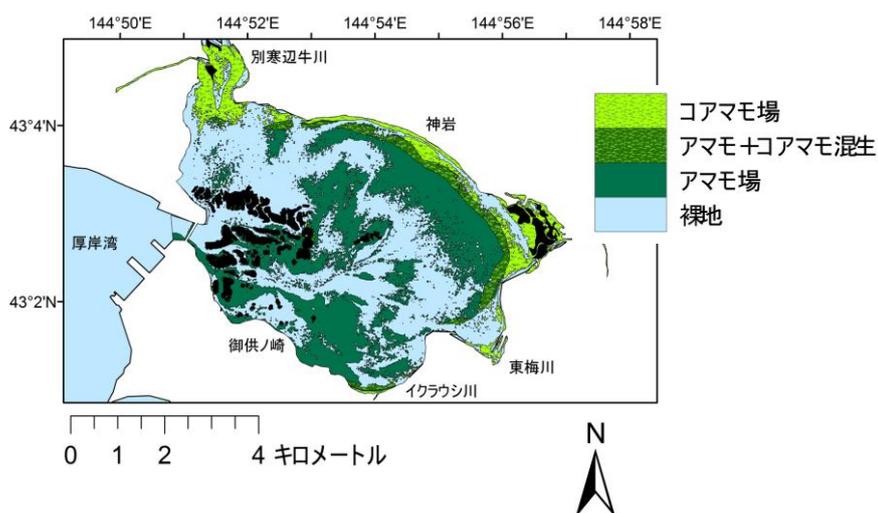
図(1)-7 公開用データベースの情報のリストを表示したページ



図(1)-8 ダウンロードしたkmlによる公開データの表示

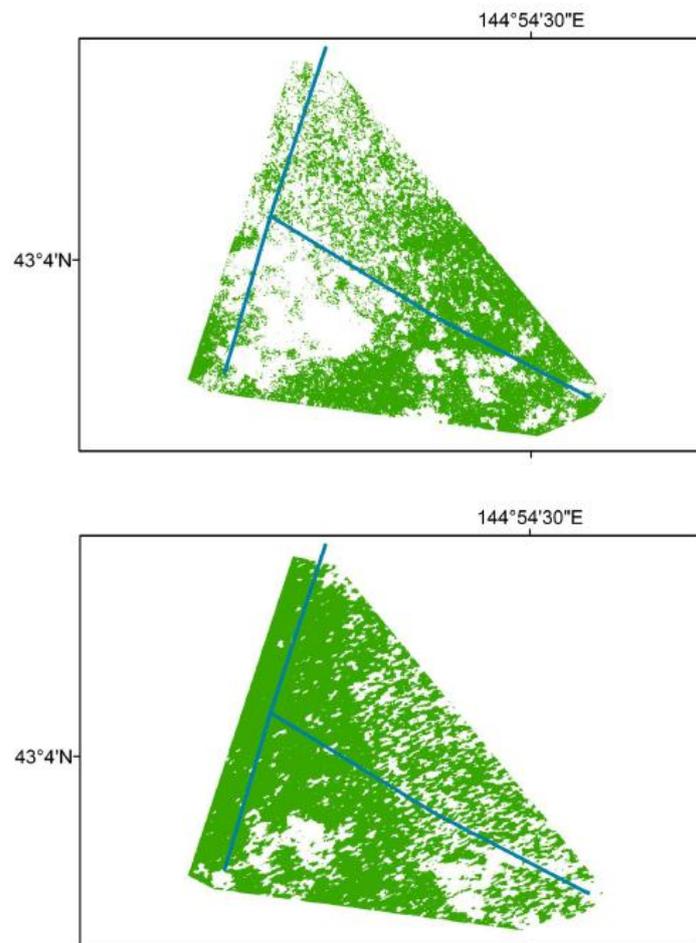
## (2) 衛星画像、空中写真によるアマモ場判別方法の検討

厚岸湖で2008年、2009年に行われた野外調査では、計20点において海草類の種構成および種ごとの被度が記録されている。これらの地点、およびアマモの被度が0%の地点として選定した厚岸湖のアサリ場を地上検証サイトとして、教師付分類により衛星画像（ALOS, JAXA）からアマモ場の空間分布の判定を行った（図(1)-9）。これにより、アマモ植生の分布を解像度2m以下で判別することができた。



図(1)-9 衛星画像(ALOS, JAXA)から抽出されたアマモ場分布図（厚岸湖、2008年）

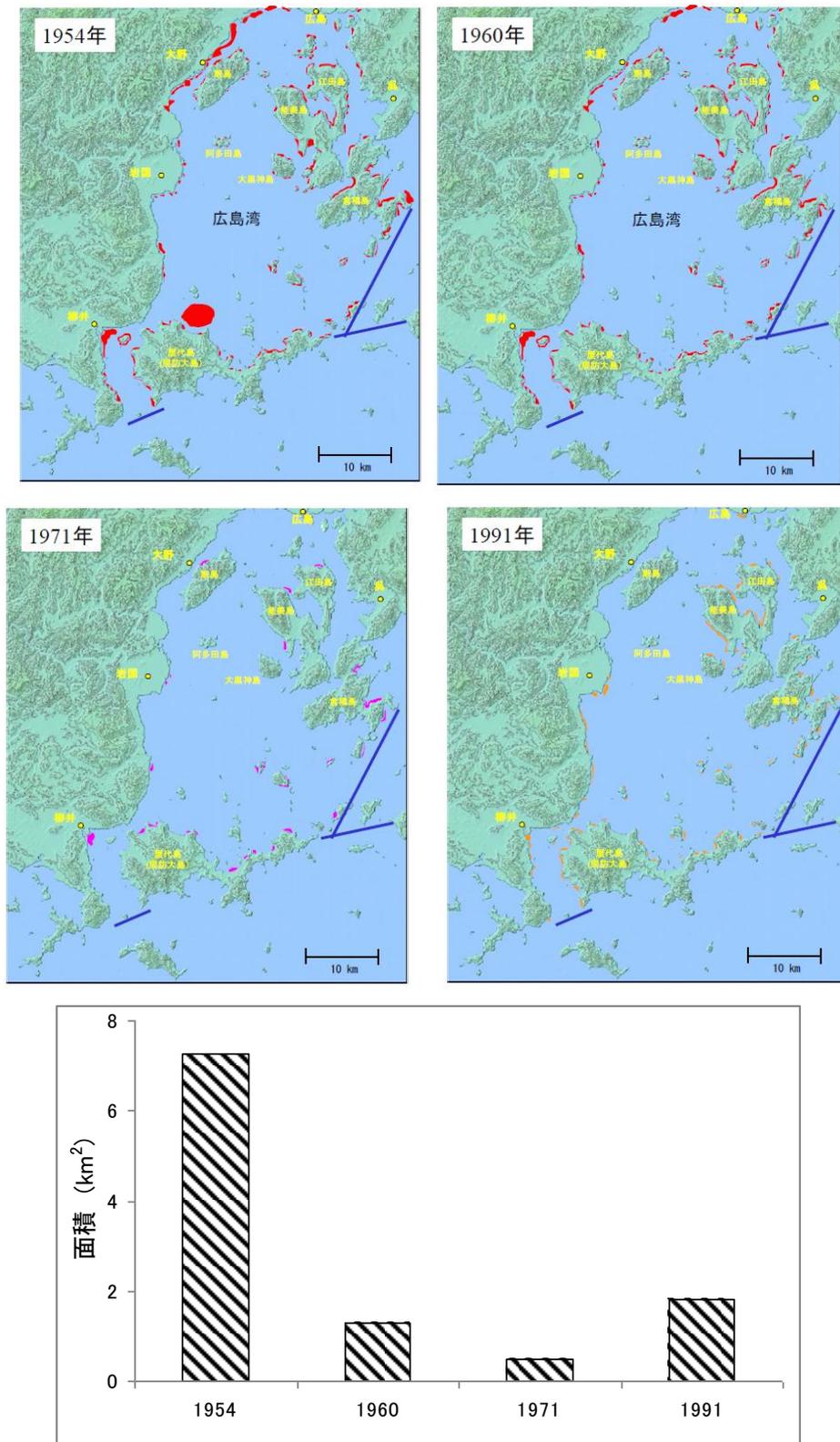
2008年から2009年に厚岸湖北岸のカムイワで観測気球によって得られたアマモ植生の空中撮影画像についても、同様に現地調査による地上検証データを元に判別を行った。その結果、範囲5000 m<sup>2</sup>における海草植生の分布を解像度1 m以下で判別することができた（図(1)-10）。2年間のデータの比較の結果、調査地におけるアマモ植生の面積は2008年に3397m<sup>2</sup>だったものが、2009年には4148m<sup>2</sup>まで増加したことが明らかになった。



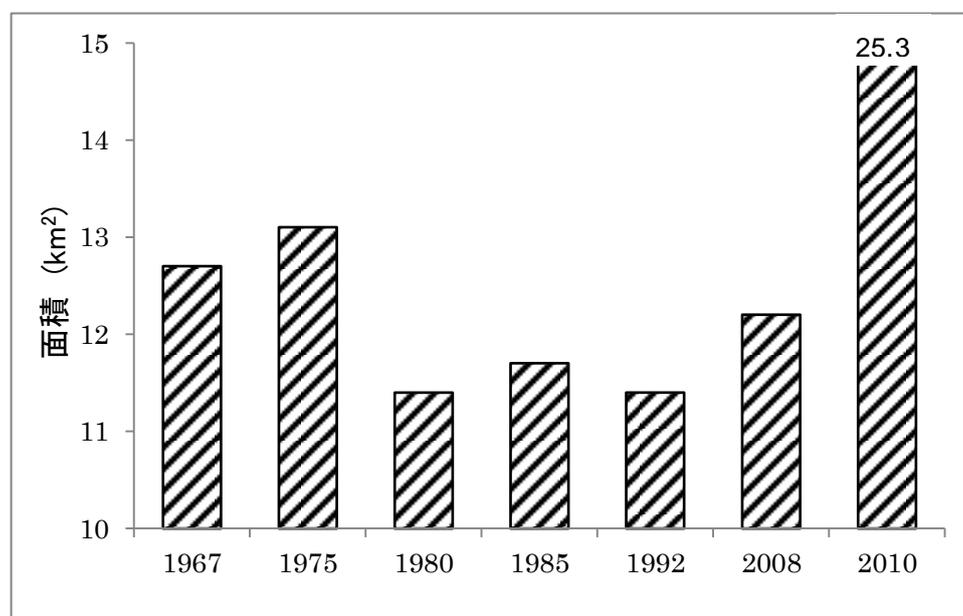
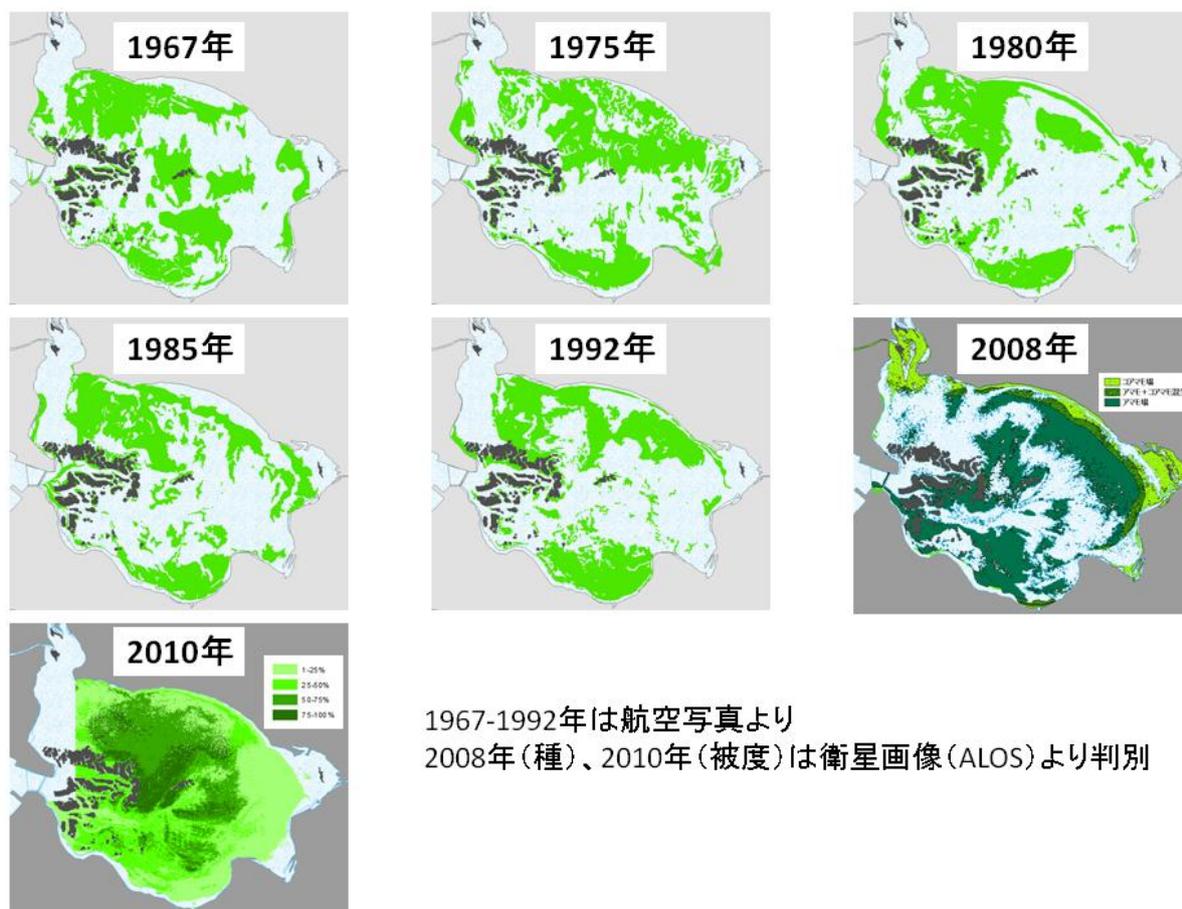
図(1)-10. 2008年・2009年の厚岸湖北岸のカムイワにおいて撮影された観測気球画像から判別されたアマモ場分布図。各地図の2本のラインは現地に設置した100 mのトランゼクトを示す。

### (3) アマモ場の長期変動様式および変動機構の解析

航空写真、衛星画像、および既存の聞き取り調査や現地調査などの空間情報をもとに、各地域のアマモ場の面積の長期変動を推定することができた。瀬戸内海の広島湾では、1950年代後半にアマモ場の面積が激減したのち、1990年代まで顕著な回復が見られないことが明らかになった（図(1)-11）。一方、道東の厚岸湖では、1970年代から1980年代にアマモ場面積が減少したのち、2000年代後半以降急激に回復しつつあることが判明した（図(1)-12）。

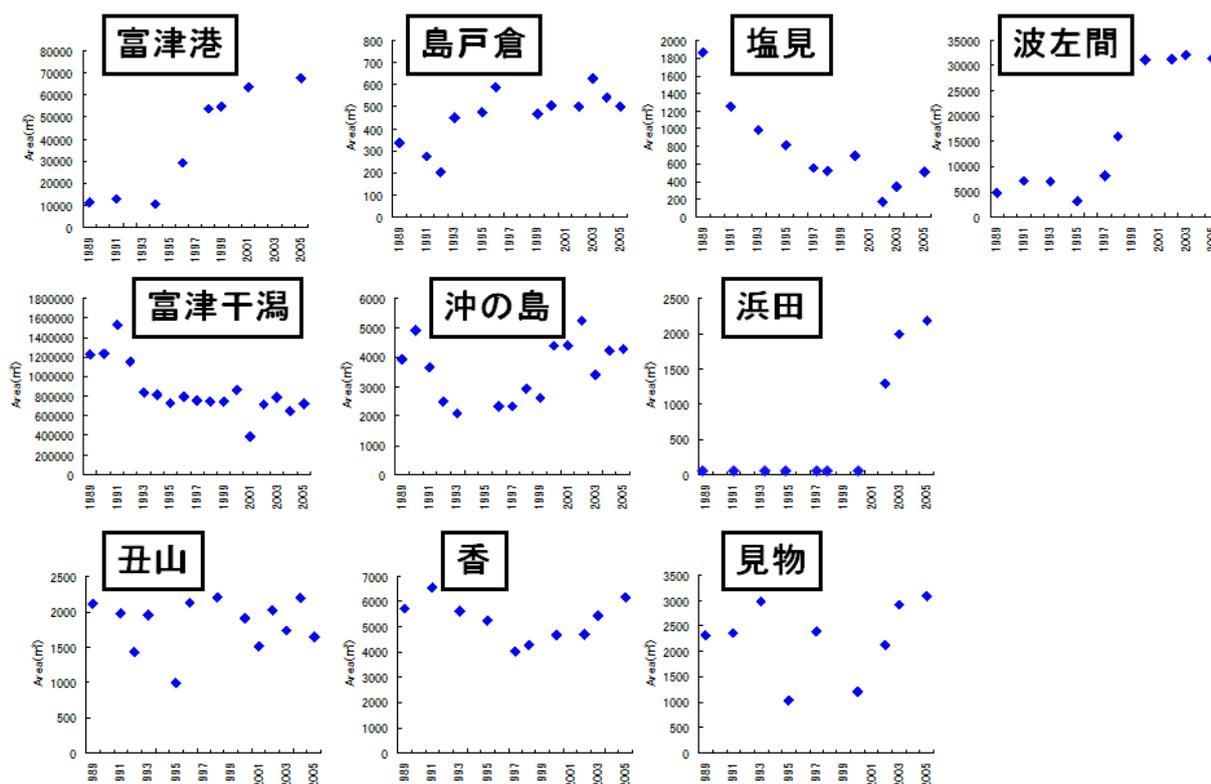


図(1)-11.瀬戸内海の広島湾におけるアマモ場面積の長期変動。



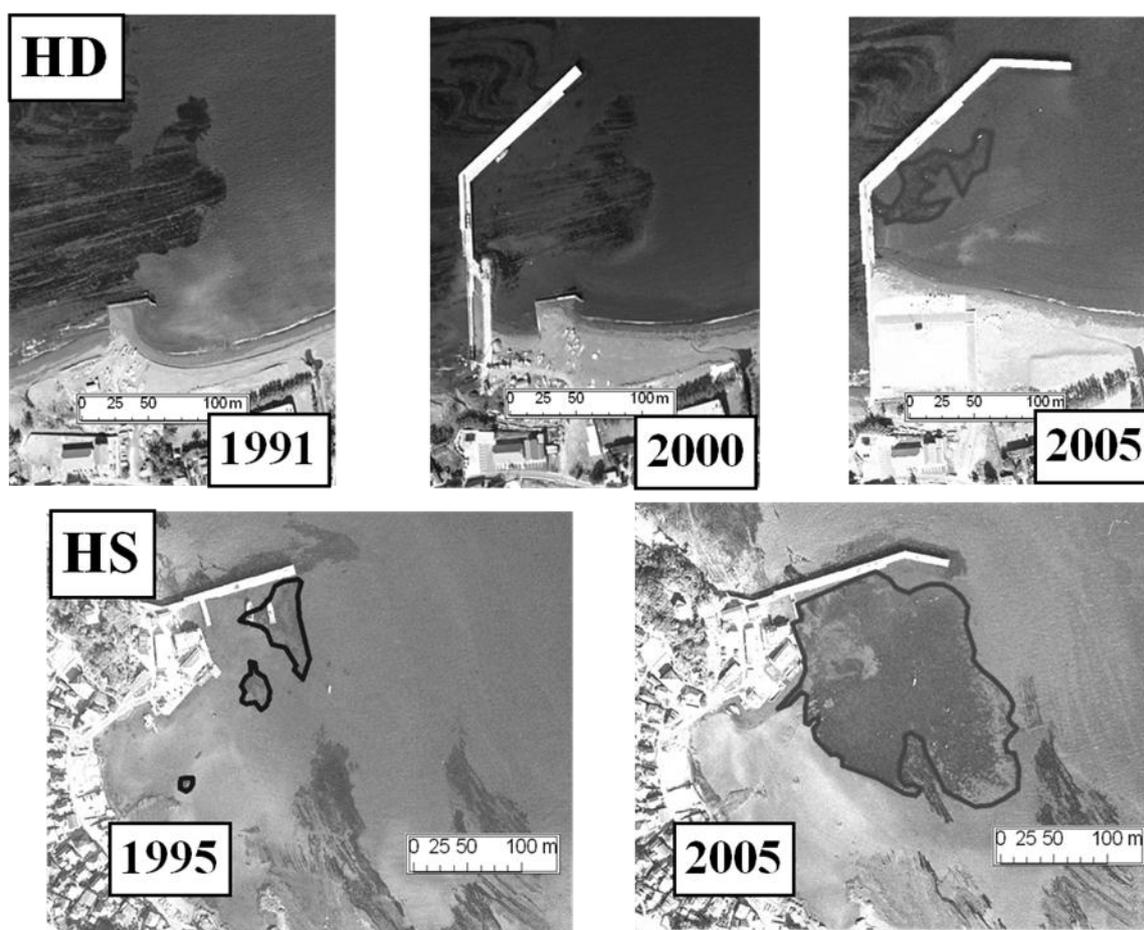
図(1)-12.北海道東部厚岸湖におけるアマモ場面積の長期変動。

東京湾の10点のアマモ場における1989年から2005年の面積の長期変動のパターンは、アマモ場により異なる傾向を示した。富津港、波左間、浜田のように、ある時期に急激に面積が増加するアマモ場がある一方、富津干潟や塩見のように徐々に面積が減少するアマモ場、さらに島戸倉や沖ノ島のように不規則に増減するアマモ場などがあった（図(1)-13）。



図(1)-12.東京湾における10点のアマモ場の面積の長期変動

アマモ場の面積の長期変動パターンの類似度とアマモ場間の地理的距離の間には有意な相関は認められなかった(Mantel test  $p > 0.05$ )。アマモ場のうち、期間中に急激に面積が増加した3箇所（富津港、浜田、波左間）については、港湾建設に伴う周辺地形の大きな変化が認められた。特に浜田と波左間については、堤防の建設および延長の後に、アマモ場の面積が増加することが確認された（図(1)-13）。堤防建設の前後でアマモ場の拡大が見られた地点の WEF は大幅に減少しており、海況の静穏化によってアマモ場が急激に拡大したことが示唆された。富津港においては、堤防建設はアマモ場面積の増加期間より前に起こっており、堤防建設後、海底の堆積物の増加に伴うアマモ場の拡大には、時間的な遅れを伴うことが示唆された。



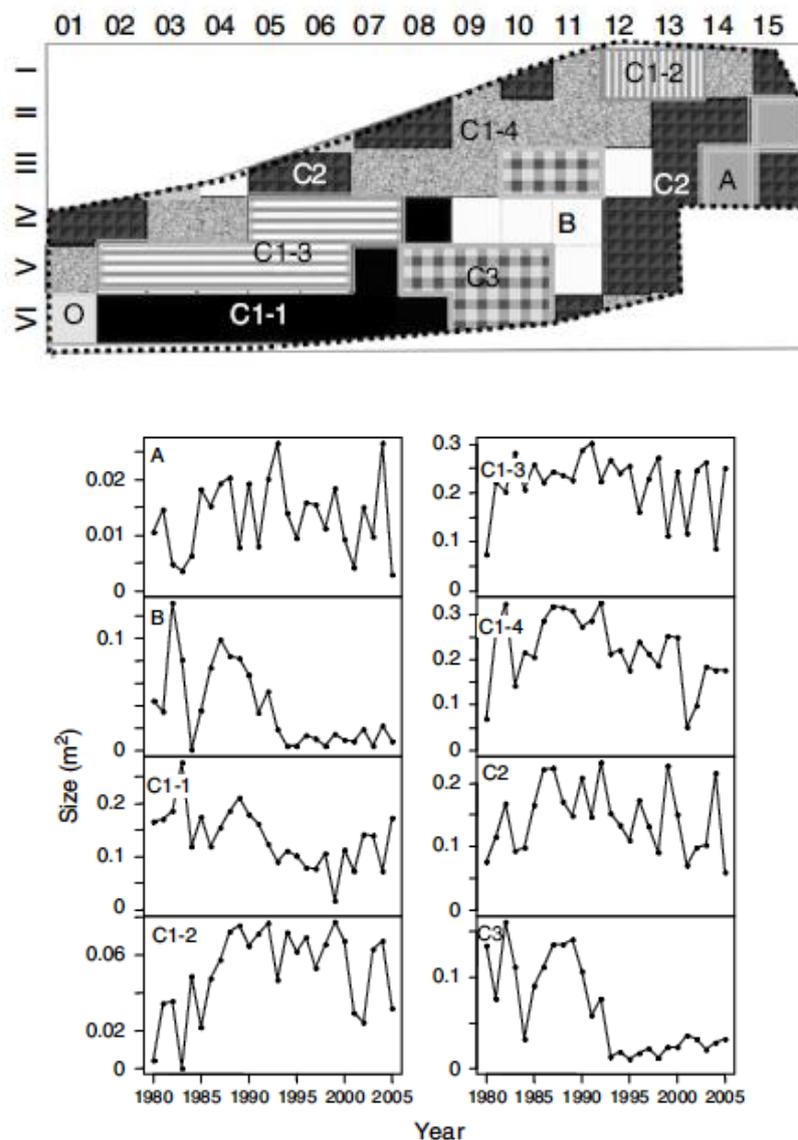
図(1)-13.浜田(HD)と波左間 (HS) における港湾建設に伴うアマモ場の面積の変動パターン

アマモ場の急激な増加が認められなかった残り7点のアマモ場について、水質および WEF との関連性を解析したところ、アマモ場の面積変動に関連すると思われる環境要因は場所により異なった(表(1)-3)。丑山ではアマモ場の面積変動は水温の変動と有意な負の相関を示したのに対し、香では反対に両者には正の相関が認められた。一方、富津干潟では窒素量が正の相関を、島戸倉と塩見では WEF が負の相関を示した。沖ノ島と見物では、アマモ場の面積変動と関連する環境要因は検出されなかった。

表(1)-3 重回帰分析によるアマモ場面積の時間変動に影響を与える環境要因の検出。Nitrogen: 水中の全窒素濃度、WT: 平均水温、WEF: 波浪指数。

	富津干潟	丑山	島戸倉	沖ノ島	香	塩見	見物
目的変数	Nitrogen	WT	WEF	-	WT	WEF	-
標準係数	0.809	-0.632	-0.643		0.801	-0.844	
R <sup>2</sup>	0.654	0.400	0.414		0.641	0.712	
p	<0.001	<0.05	<0.05		<0.01	<0.01	

東京湾最大の面積を持つ富津干潟沖のアマモ場においては、その時間変動パターンがアマモ場内の位置により大きく異なることが明らかになった（図(1)-14）。区画ごとの時間変動パターンには異なる環境要因の組み合わせが関連していた（表(1)-4）。例えば、アマモ場の浅いところ(B, C1-1, C3)では、砂州の地形変化に代表される物理的な攪乱が植生の変動と相関している一方、水深の深い区域(C1-3, C1-4)では、透明度や栄養塩濃度など水質を表す要因が関連していた。また、各区画におけるアマモ植生面積の変動係数は0.33~1.14であるのに対し、全体における変動係数は0.27と低かった。このことより、アマモ植生がアマモ場内の各サイト間で非同期的な変動を示すことにより、アマモ場全体が安定に存続していることが示された<sup>15)</sup>。



図(1)-14. 富津干潟沖のアマモ場の各地点（上：A, B, C1-1~4, C2, C3）におけるアマモの植生面積の長期変動（下）

表(1)-4 重回帰分析による富津干潟沖アマモ場の区画ごとの面積の時間変動に影響を与える環境要因の検出。  
Sealevel: 平均海水面, Sandbar: 砂州の位置、WEF: 波浪指数、Trance.: 透明度、NH<sub>4</sub>N: 水中のアンモニウム  
塩濃度、Temp: 平均水温

区画	R-sq	Adj R-sq	F	P	AIC	説明変数	Beta	t	P
A	0.23	0.12	2.07	0.14	-176.69	Sealevel	-0.43	-1.85	0.08
						Sandbar	0.38	1.43	0.17
						WEF	0.40	1.74	0.10
B	0.48	0.43	10.20	<0.01	-103.65	Sandbar	-0.43	-2.55	0.02
						Trance.	-0.40	-2.37	0.03
C1-1	0.48	0.40	6.43	<0.01	-81.75	Sealevel	0.44	2.30	0.03
						Sandbar	-0.96	-4.34	<0.01
						WEF	-0.51	-2.72	0.01
C1-2		No predictor							
C1-3	0.40	0.32	4.76	0.01	-72.13	NH <sub>4</sub> N	0.36	2.10	0.05
						WEF	-0.54	-3.17	<0.01
						Temp.	-0.25	-1.47	0.16
C1-4	0.41	0.38	15.95	<0.01	-65.28	Trance.	-0.64	-3.99	<0.01
C2	0.37	0.24	2.93	0.05	-75.52	Sealevel	-0.47	-2.07	0.05
						Sandbar	0.36	1.39	0.18
						Trance.	-0.34	-1.60	0.13
C3	0.56	0.50	8.99	<0.01	-90.05	Sealevel	0.25	1.35	0.19
						Sandbar	-0.68	-3.77	<0.01

#### (4) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：アマモの機能の評価

アマモ場の生態系機能のうち、アマモ自身の機能を示す目的変数として利用した最大光合成収率、現存量、生産量はいずれも、アマモ場内で大きな変異を示した。

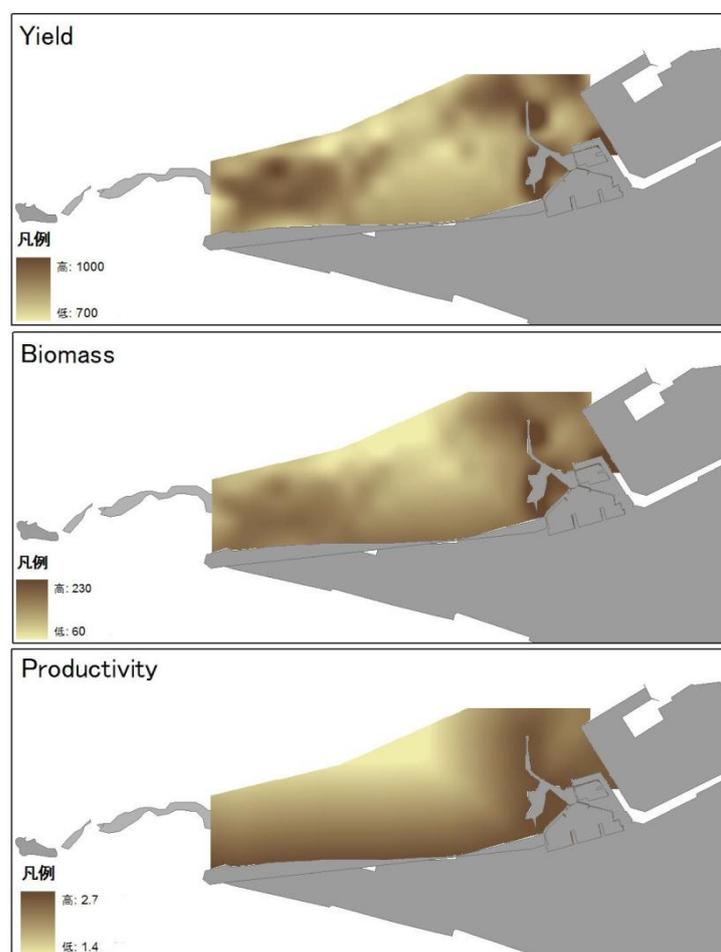
東京湾富津干潟沖を対象としたGLMモデルでは、アマモの最大光合成収率、現存量、生産量のいずれについても決定係数(R<sup>2</sup>)が0.69以上と高く、その変異の大部分が、水深および離岸距離の組み合わせで説明できることが判明した(表(1)-5)。ただし、データ数が少ないことから5%有意水準でモデルは有意であるとは判定されなかった。最大光合成収率と現存量は水深と共に増加し、離岸距離と共に減少する傾向にある一方、純生産量については、離岸距離と共に高くなるものの、水深との関係は認められなかった。

GLMモデルの結果を元に、生態系機能を示す各目的変数の広域空間変異を評価したところ、いずれも変数も富津干潟沖のアマモ場のなかで著しい空間変異を示した(図(1)-15)。最大光合成収率、現存量、生産量は同様の空間変異を示し、アマモ場東部および西部で高い値を、中央部で低

い値を示した。

表(1)-5. 富津干潟のアマモ場における生態系機能を表す指標と環境諸要因の関連性

目的変数	水深(m)	離岸距離(m)	y 切片	R <sup>2</sup>	p
最大光合成収率	38.4	-0.099	748	0.855	0.145
現存量 (gDW m <sup>-2</sup> )	13.5	-0.103	136	0.933	0.067
純生産量 (g DW m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )	-	0.0128	2.67	0.691	0.081



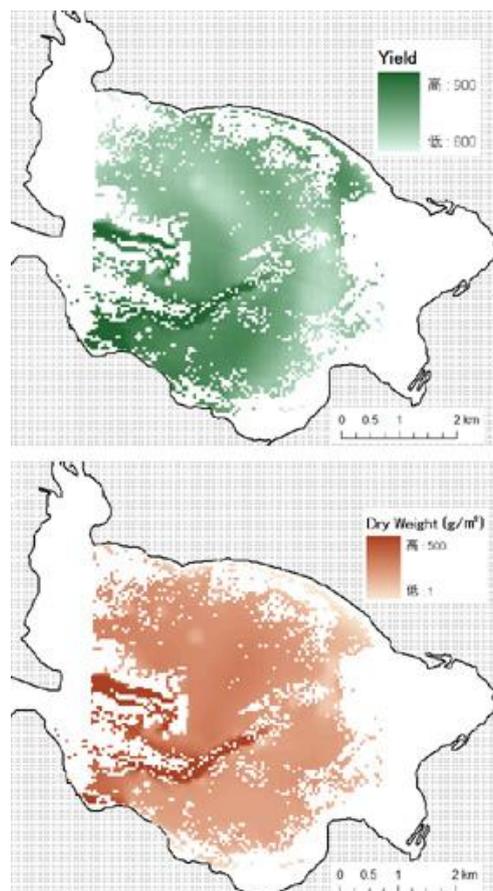
図(1)-15. 生態系機能を示すアマモの諸変数の広域空間変異の評価。上：富津干潟沖における最大光合成収率、中：富津干潟沖における現存量(g/m<sup>2</sup>)、下：富津干潟沖における純生産量(g/m<sup>2</sup>/d)

厚岸湖のアマモ場を対象としたGLMモデルでは、アマモの最大光合成収率と現存量共に、決定係数は0.77以上と高く、その変異の大部分が、水深および夏季の水温・塩分の組み合わせで説明できることが判明した（表(1)-6）。ただし、最大光合成収率については、5%水準で有意ではなかった。最大光合成収率と現存量はいずれも水深と共に増加するが、前者は水温および塩分と共に増加する一方、後者は減少する傾向が検出された。

GLMモデルの結果を元に評価した各目的変数の広域空間変異については、最大光合成収率、現存量共に、湖南西部で高い傾向があること、最大光合成収率は湖北部で、現存量は湖南東部で低い傾向があることが明らかになった（図(1)-16）。

表(1)-6. 厚岸湖のアマモ場における生態系機能を表す指標と環境諸要因の関連性

目的変数	水深(m)	平均水温	平均塩分	y 切片	R <sup>2</sup>	p
最大光合成収率	21.7	38.5	30.4	-783	0.983	0.164
現存量 (gDW m <sup>-2</sup> )	72.8	-21.5	-3.99	520	0.771	0.003

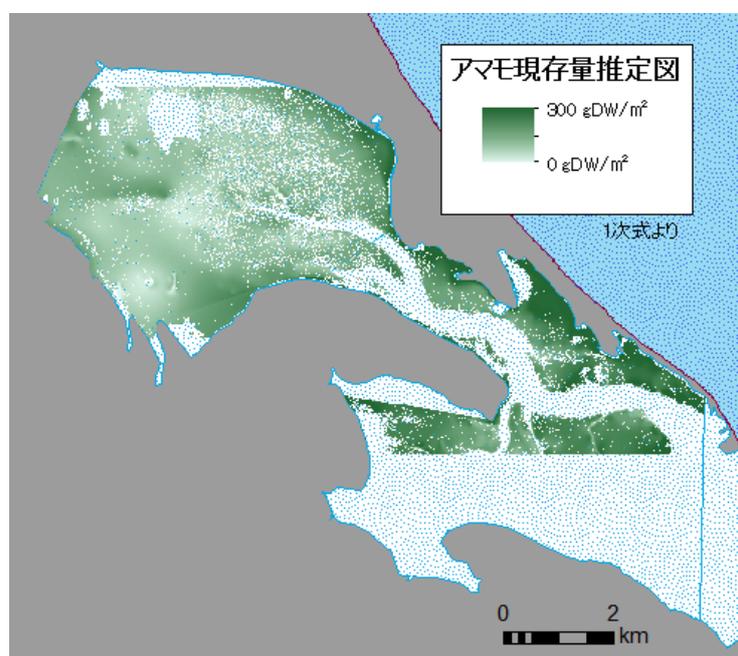


図(1)-16. 生態系機能を示すアマモの諸変数の広域空間変異の評価。上：厚岸湖における最大光合成収率、下：厚岸湖における生物量(g/m<sup>2</sup>)

風蓮湖のアマモ場の野外調査で求めたアマモの生物量は、アマモ場内の地点間で大きな変異を示した。水深、塩分、水温を独立変数として利用したGLMモデルでは、前2者の変数が選択され、アマモの生物量は水深と共に減少し、塩分と共に増加することが判明した（表(1)-7）。風蓮湖におけるアマモの判別結果と環境勾配の空間情報をもとに推定したアマモの生物量の空間分布は、湾口に近い東部および、湖の北部で高かった（図(1)-17）。

表(1)-7. 風蓮湖のアマモ場における生物量と環境諸要因の関連性

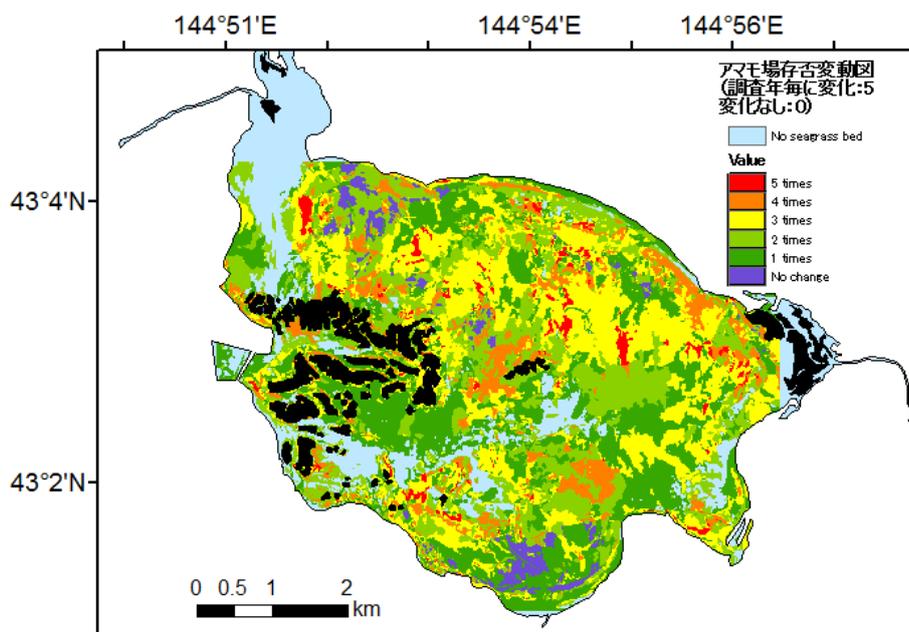
目的変数	水深(m)	平均塩分	y 切片	R <sup>2</sup>	p
生物量 (gDW m <sup>-2</sup> )	-89.5	12.8	-132.5	0.386	<0.001



図(1)-17 風蓮湖におけるアマモの生物量（現存量）の空間変異の評価結果

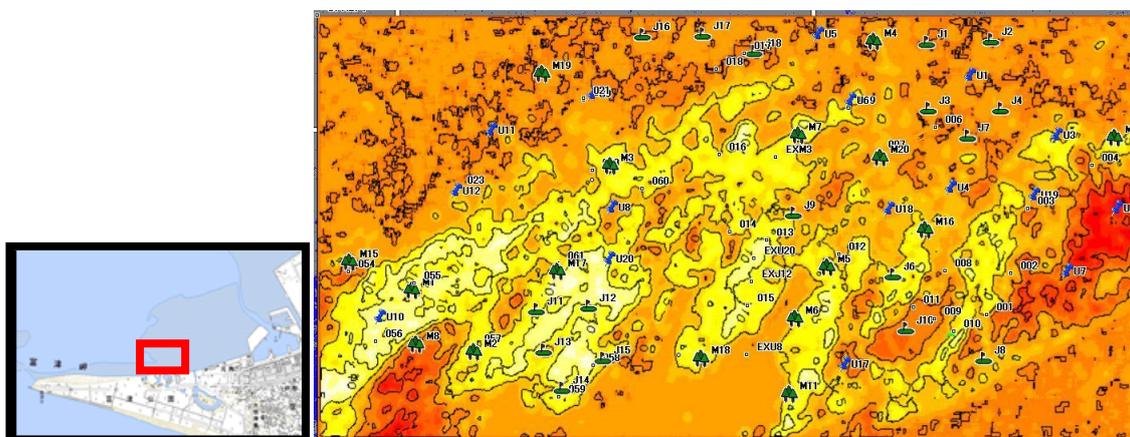
一般に、アマモの光合成や現存量は水深の増加に伴う光の減衰と共に減少することが予想されるが<sup>17)</sup>、東京湾と道東においては反対に水深と共に増加した。いずれのアマモ場も潮間帯から水深1~2m程度の比較的浅い海域に分布することから、水深に伴う光の減衰は光合成の制限要因ではなく、逆に潮間帯における干出等のストレスが制限要因となっており<sup>18)</sup>、これが水深との正の相関をもたらした可能性が考えられる。一方、富津干潟沖に最大光合成収率と現存量が離岸距離と共に減少した点については直接的な証拠はないが、アマモ場の沖合ほど波浪や風による物理的攪乱が強いことが関連しているかもしれない<sup>15)</sup>。汽水湖である厚岸湖・風蓮湖での結果は、湖奥部における水温の上昇および塩分の低下が光合成能力や現存量の制約になっている可能性を示す<sup>19)</sup>。しかし、厚岸湖で利用した2つの目的変数は反対の傾向を示すことからその作用機構については現段階では不明である。

厚岸湖のアマモ場の安定性について、1967年以降のアマモ植生の置換頻度から空間的に評価した結果、置換頻度が低く安定している場所と置換頻度が高く不安定な場所が厚岸湖全域にモザイク状に分布していることが判明した（図(1)-18）。当初は、河川水流入に伴い頻繁な攪乱を受ける別寒辺牛川河口付近の方が、湖中央部より安定していることを予測した。しかし実際には、河川の影響の強度に応じた安定性の傾向は認められなかった。



図(1)-18 厚岸湖のアマモ場の植生と非植生の置換回数の空間変異

富津干潟沖アマモ場潮間帯下部～潮下帯上部の2002年～2007年における変動係数も時空間スケールで大きく変化した（図(1)-19）。潮下帯部分の植生のほうが、潮間帯部分より時間的変動が少なく安定している傾向が認められた。



図(1)-19 東京湾富津干潟沖の潮間帯下部～潮下帯上部に設けたプロット（左図赤枠）におけるアマモ植生の変動（右図）。色が濃い部分ほど変動係数が大きい（安定性が低い）ことを示す。

## (5) アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：動物のアマモ場利用様式の評価

東京湾富津干潟沖アマモ場のマクロベントス群集については、全体で132分類群が採集された。多毛類が最も多く、ついで端脚類、軟体動物の順であった。

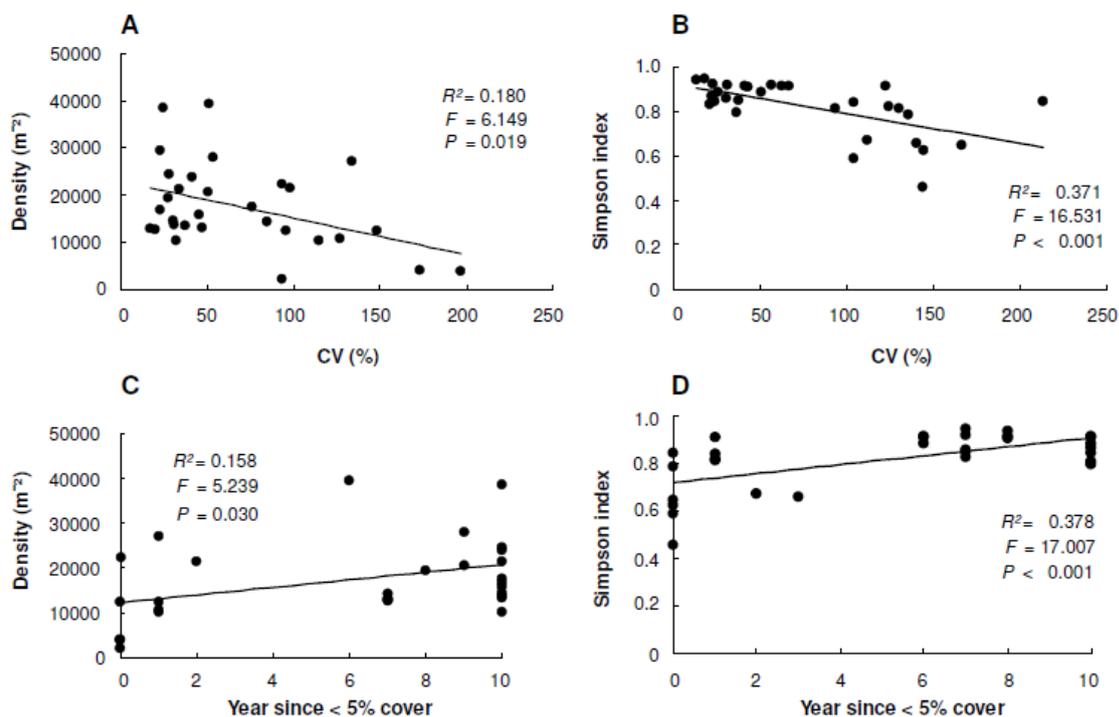
マクロベントスの密度はどの空間スケールにおいても海草の被度と正の相関を示した。相関係数は調査地点の周囲直径15mのスケールで海草の被度を測定した場合に最も高かった（表(1)-8）。多様度指数もすべての空間スケールで海草の被度と正の相関を示し、相関係数は調査地点の周囲直径10mで最大となった。

マクロベントスの個体数と多様度指数はいずれも海草被度の変動係数と負の相関を示した（図(1)-20）。すなわち、安定した植生においてより高い値を示した。また両変数は、最後に植生が無かった時期からの経過時間、すなわちアマモ植生の存続時間と正の相関を示した。

一般化線型モデルによる解析により、マクロベントスの個体数と多様性は植生タイプと海草被度を説明変数とした場合に最もその変異が説明できることが判明した（表(1)-9）。一方、海草被度の変動係数はモデルの適合度の向上に貢献しなかった。

表(1)-8. マクロベントスの個体数と多様度指数に対する海草植生の被度の効果。海草の被度は採集地点の周囲1m～50mまでスケールを変化させて測定している。

目的変数	異なる空間スケールにおける被度 (m)	df	F	p	r
マクロベントスの密度	1	1, 28	6.57	0.016	0.436
	5	1, 28	8.14	0.008	0.475
	10	1, 28	12.28	0.002	0.552
	15	1, 28	17.84	< 0.001	0.624
	20	1, 28	15.60	< 0.001	0.598
	30	1, 28	13.36	0.001	0.568
	40	1, 28	8.45	0.007	0.481
	50	1, 28	8.50	0.007	0.483
シンブソン多様度指数	1	1, 28	12.74	0.001	0.559
	5	1, 28	19.12	< 0.001	0.637
	10	1, 28	22.40	< 0.001	0.667
	15	1, 28	18.02	< 0.001	0.626
	20	1, 28	13.60	0.001	0.572
	30	1, 28	12.91	0.001	0.562
	40	1, 28	9.93	0.004	0.512
	50	1, 28	7.93	0.009	0.470



図(1)-20 東京湾富津干潟沖アマモ場のマクロベントスの密度および多様度指数に対する海草被度の変動係数の効果 (A, B)、および両変数に対するアマモ植生の存続時間の効果 (C,D)。

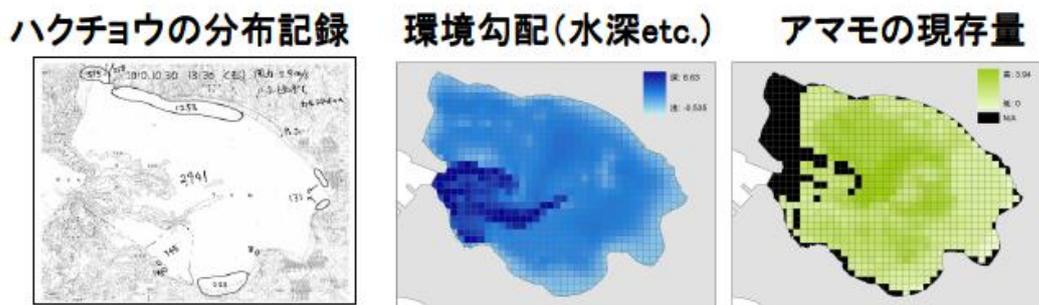
表(1)-9. マクロベントスの個体数と多様度指数に対する海草植生の被度の効果。海草の被度は採集地点の周囲1m～50mまでスケールを変化させて測定している。

目的変数	GLM モデル	R <sup>2</sup>	df	F	p	AIC
マクロベントスの密度						
Dn	Veg +Cover.in.15m.2006 +CV.5yr.at.15m + Cover.in.15m.2006*CV.5yr.at.15m	0.333	5, 24	3.89	0.010	626.524
Dn	Veg +CV.5yr.at.15m	0.222	3, 26	3.76	0.023	629.520
Dn	Veg +Cover.in.15m.2006	0.370	3, 26	6.68	0.002	623.204
Dn	Veg	0.223	2, 27	5.17	0.013	628.620
シンプソン多様度指数						
Simp	Veg +Cover.in.10m.2006 +CV.5yr.at.10m + Cover.in.10m.2006*CV.5yr.at.10m	0.478	5, 24	6.30	0.001	-54.042
Simp	Veg +CV.5yr.at.10m	0.441	3, 26	8.62	<0.001	-53.603
Simp	Veg +Cover.in.10m.2006	0.517	3, 26	11.36	<0.001	-58.020
Simp	Veg	0.387	2, 27	10.17	0.001	-51.734

Dn: 密度; Simp: シンプソン多様度指数; Veg: 植生タイプ; Cover.in.15m.2006: 採集地点周囲直径 15m における海草被度; Cover.in.10m.2006: 採集地点周囲直径 10m における海草被度; CV.5yr.at.15m: 採集地点周囲直径 15m における 5 年間の変動係数; CV.5yr.at.10m: 採集地点周囲直径 15m における 5 年間の変動係数

海草植生がアマモ場に生息する動物群集の生物量と多様性に正の効果を与えることは以前より知られていたが<sup>20),21)</sup>、本研究で空間情報を利用した統合的解析を行うことにより、その正の効果認められる空間スケールが特定できた。また、アマモ場の空間分布の時系列情報を取り入れることにより、アマモ植生の安定性がベントス群集に正の効果を与えることも明らかになった。これらの成果は、アマモ場における生物多様性の保全や資源利用においても時空間スケール依存性を考慮することが有効であることを示している。

厚岸湖で越冬をするオオハクチョウのアマモ場利用様式については、まず、ハクチョウの各時点における分布記録、水深等の環境勾配、アマモの現存量などについて、空間的な分布を求めた(図(1)-21)。



図(1)-21 厚岸湖におけるオオハクチョウの分布記録、およびそれに影響を与える環境要因、生物学的要因の空間分布

一般化線型モデルにより求めた厚岸湖の各地点におけるオオハクチョウの存否確率 $y$ は、結氷前については下記の式で表された。

$$y = 1 / \{1 + \exp(-Z)\}$$

$$Z = 0.932 - 1.39A - 0.138B - 0.633C - 0.198D$$

ただし、 $A, B, C, D$ はそれぞれ、岸からの距離、別寒辺牛川河口からの距離、観測時の朝夕で修正した水深、2010年6月のアマモ現存量を示す。

一方、結氷後のオオハクチョウの存否確率については、下式のモデルが最適モデルとして選択された。

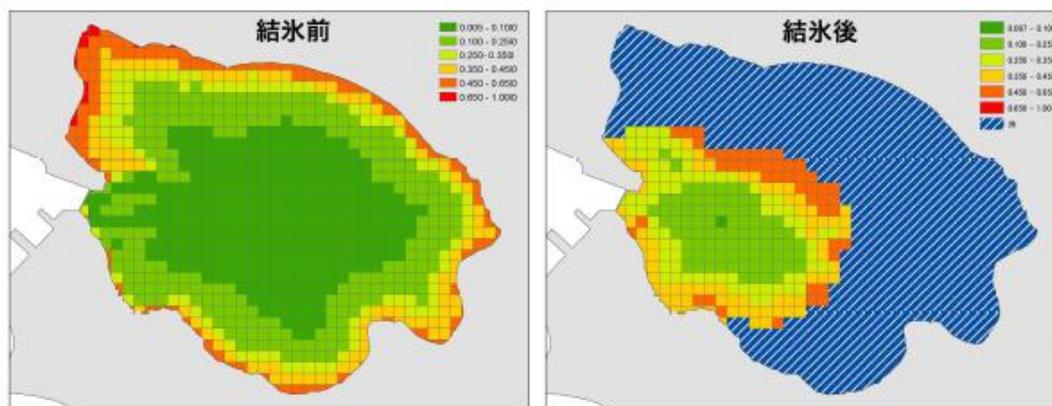
$$y = 1 / \{1 + \exp(-Z)\}$$

$$Z = -0.190 - 1.73E - 0.0620B + 0.298D$$

ただし、 $E$ は岸からの距離か氷の端からの距離の近い方の距離を示す。

最適モデルに厚岸湖全域を200mメッシュで区切った各格子での独立変数情報を当てはめると、

厚岸湖内全域でのオオハクチョウの分布確率は、北側の氷との境目で高く、結氷していない部分の中心に向かうにつれて低くなった（図(1)-22）。



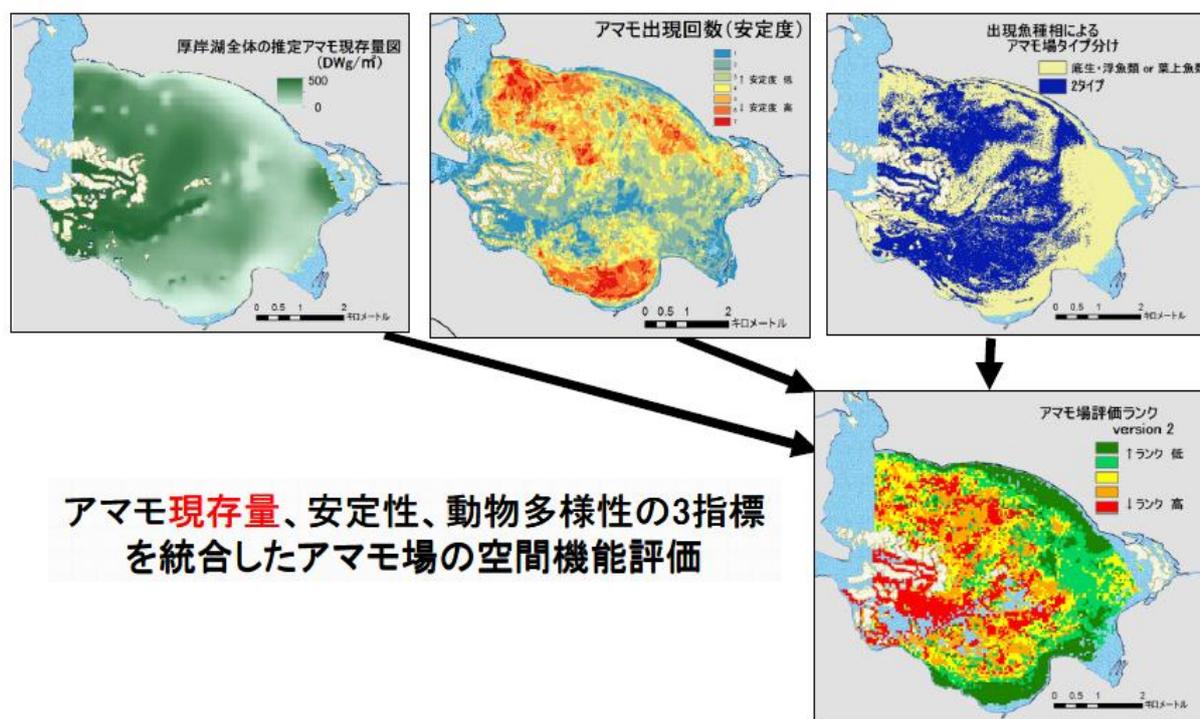
図(1)-22 厚岸湖におけるオオハクチョウの分布確率の評価

以上より、厚岸湖でのオオハクチョウの利用場所決定要因は、岸からの距離（または、岸からの距離か氷の端からの距離の近い方の距離）が大きく影響し、結氷前では水深の影響、結氷後ではアマモ分布の影響も大きいことが判明した。厚岸湖は冬期に湖面が大規模に結氷するため、アマモ場の一部を利用できなくなるため、結氷の前後で決定要因に変化が現れたと考えられる。結氷前に岸沿いで存在確率が高いのは、北岸沿いには波・風を避けられる地形があること、南岸沿いでは小川の流入があり、飲水のために塩分濃度の低いところを利用しているためと考えられる。一方、結氷後に北側の氷との境界で存在確率が高いのは、未結氷部でアマモの現存量が多い部分が北側に集中していること、結氷前に利用していた南側の小川が結氷により利用できないためと考えられる。

これらの成果は厚岸湖の環境変動に伴うオオハクチョウの変動予測や、バードウォッチングなどのエコツアーの基礎的資料として活用できることが期待される。

#### （6）アマモ場の生態系機能の空間評価法の開発：統合評価法

サブテーマ（1）とサブテーマ（2）で得られたアマモ場の生態系機能と生物多様性の空間分布の統合的評価の結果、厚岸湖のアマモ場では、現存量、安定性、魚類の機能群多様性に着目した場合、湾中央部の水深が比較的深いアマモ植生帯の総合評価ランクが高く、岸沿いの潮間帯部分が低いことが判明した（図(1)-23）。



図(1)-23 アマモ現存量、安定性、魚類の機能群多様性を統合して求めた厚岸湖のアマモ場の統合的空間機能評価

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究により、アマモ場の空間構造およびその時間的変動に関して、空間画像データと現地モニタリングデータを関連付けながら、アマモ場生態系の変化を統合的に追跡できるシステムが開発された。リモートセンシング画像によるアマモ場の判別については、高精度衛星画像と現地モニタリングデータを組み合わせた解析により、アマモ場の空間分布のみならず、種構成や現存量の空間的に推定・評価することもできるようになった。特に、現地観測データの関連性を統計モデルで解析した上で、GIS上で内挿するという統合的なアプローチの開発により、アマモ場の基本的な生態系機能を表す変数類の広域空間変異の評価が可能となった点は、従来の解析の多くがアマモ植生の有無を判別する段階にとどまっていたことに対して格段の進歩である。

アマモ場の長期変動については、場所によりその変動様式が異なること、特に詳細な解析が行われた東京湾および厚岸湖、風蓮湖においては、変動に関連する要因も局所的に大きく異なることが判明した。また、アマモ場の生態系機能および生物多様性は、地域間、地域内の異なるアマモ場間だけでなく、1つのアマモ場内の環境勾配によっても大きく変わること、さらにアマモ場内で変動パターンが非同期的に変化することにより長期的な安定性が維持されること、マクロベントスや鳥類などアマモ場を利用する消費者個体群・群集には、アマモの現存量だけでなくアマ

モ植生の空間配置や安定性が影響を与えていることなど、アマモ場の生態学に関する基本的な知見が本研究により新たに加わった。これらの成果は、沿岸生態系の保全・持続的利用を促進するための管理計画、自然再生事業、気候変動に伴う沿岸生態系の変動予測や適応策の設定など、多様な環境政策の立案・実施に貢献することが期待される。

本研究課題で開発したアマモ場データベースの運用により、さまざまな時空間スケールでのアマモ場の現状把握および時間変動の追跡が可能になった。環境情報が豊富な海域においては、アマモ場の変動をもたらす環境要因の作用機構も明らかにすることができた。この成果は当該分野で国際的に評価の高いジャーナルに掲載され<sup>15)</sup>、海外の沿岸生態系研究者からも着目されている。

さらに、本サブテーマとサブテーマ（2）で得られたさまざまなタイプの生態系機能の空間評価結果を統合的に解析することにより、アマモ場の多機能統合評価を行う方法が開発された。本方法は、従来手法<sup>22)</sup>に比べ、対象海域のアマモ場全域にわたり空間連続的に評価を行える点で画期的であり、今後世界各地のアマモ場で同様のアプローチによる解析が進むことが期待される。

## （2）環境政策への貢献

本事業により、アマモ場に関する既存のさまざまな異なるタイプのデータソースを階層的に整理・検索することが可能になり、今後の多方面にわたる社会的なニーズに応じて、必要な情報を効率的に検索、利用するための基盤が整った。また、公開版データベースを通じてアマモ場の生物多様性および生態系機能の空間評価結果を広く発信することができるようになった。現時点では日本の3地域のアマモ場を対象とした限定的な取り組みであるが、今後、関連省庁や国際機関と連携して、本システムをさらに広域に拡大することにより、保全や持続的利用に関する施策のための基礎的資料として活用すると共に、環境教育やエコツアーなどに利用できることが期待される。

本システム、およびそれを利用して解析した成果は既に下記のような環境政策に関連する多数の事業・研究プログラムに適用され、実績を挙げつつある。

- ▶ 平成21年度にまとめられた地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第2号「地球温暖化観測における連携の促進を目指して－雲・エアロゾル・放射および温暖化影響評価に係わる観測－」（地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁）において、本サブテーマに基づく沿岸生態系の観測指針およびデータベース構築の有用性が取り上げられ、その推進に貢献した<sup>23)</sup>。
- ▶ 地球温暖化対策分野関連では、水産庁地球温暖化対策推進費委託事業「藻場・干潟の炭素吸収源評価と吸収機能向上技術の開発」において、本研究で開発したGISデータベースを実際に運用して、各海域の藻場の面積や生産性の変動評価が行われつつある。また、港湾空港技術研究所が北海道大学と共同で実施している沿岸域における炭素動態に関する研究においても本システムが利用されている。
- ▶ 環境省重要生態系監視モニタリング推進事業・沿岸域調査（アマモ場）において、限られた点で得られたモニタリングデータを、本研究によって得た手法により空間的に展開することで、当該事業のデータの一般性、有効性が検証された。当該事業で得られた生態情報については、環境省生物多様性センターのデータベースで管理、公開される予定であるが、本課題で作成された公開版データベースはそのシステムと同じ形式で作成されており、近い将来に連携して運用する可能性について、関係諸機関と検討中である。

- ▶ 海洋生物多様性の保全および海洋資源の持続的利用にかかる以下の3つの研究開発事業、「漁場環境・生物多様性評価手法等開発事業（水産総合研究センター）」、「藻場の資源供給サービスの定量・経済評価と時空間変動解析による沿岸管理方策の提案（環境省・環境研究総合推進費）」、「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究（環境省・環境研究総合推進費）」において、アマモ場および海藻藻場の変動様式解析に本システムが利用されている。
- ▶ 2011年3月に発生した東日本大震災において激甚な被災を受けた東北～関東の沿岸域の被害状況の把握と影響評価を行う水産庁、文部科学省および環境省の各事業において、本研究の手法を用いた解析が行われている。
- ▶ 国際的な取り組みとして、GEO-BON (Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network)やILTER (International Long-term Ecological Research Network)などの国際学術組織による生態系・生物多様性情報のデータベース整備が現在進められているが、本研究課題は沿岸域の空間情報の提供源として貢献することが期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

### (1) JST-JICA地球規模課題「熱帯多島海域における沿岸生態系の多重環境変動適応策」

研究代表者：灘岡和夫(東京工業大学教授)、カウンターパート：Miguel D. Fortes (University of the Philippines)

研究概要：急速に劣化が進行しつつあるフィリピン及びその周辺海域における沿岸生態系を対象として、その合理的な保全策の立案に資する様々な科学的な知見を提供するとともに、その成果の社会実装プロセスを通じて人材育成にも寄与することを目的とする。

参加・連携状況：本研究課題の代表者である仲岡は当該プロジェクトに2009年～2014年まで参加する予定である。ここでは、東南アジアの沿岸生態系保全の諸事業の立案・実施に際し、本研究課題で日本沿岸域を対象に開発される統合データベースを東南アジア沿岸域のデータベースと連携させる予定で、現在フィリピンにおける野外調査データ、生態系空間情報を集積中である。

### (2) 国際長期生態系ネットワーク研究プロジェクト「生態系サービスイニシアティブ」

研究代表者：Patrick Bourgeron (Plymouth State University)

研究概要：地球規模の環境変動による生態系の変動が、生態系サービスの変化を通じて人間社会に与える影響について、気候帯や人間社会の構造が異なる世界各地のフィールドにおいて共通のフレームワークで統合的に解析を進めることにより、その一般性と特異性を明らかにしようとする研究プロジェクト課題である。

参加・連携状況：日本からは北海道東部厚岸海域が研究サイトとして参加しており、本研究課題のGISデータベースを用いて行う生態系機能の広域評価を基に、生態系サービスの変化が沿岸生態系の利用方法に与える影響について解析を行っている。また、本プロジェクトのアジア版として、日本を含むアジア諸国の代表的な研究者12名を招聘したワークショップを2010年11月にタイで開催し、共通フレームワークのアマモ場への適用を試みた。その成果については2012年度末に出版予定の書籍(AP-BON Biodiversity Outlook Book 2)にて発表されることになっている。

(3) 国際共同研究プロジェクト「アマモ実験ネットワーク (Zostera Experimental Network)」

研究代表者：Emmett J. Duffy (Virginia Institute of Marine Science)

研究概要：北半球温帯域の浅海域に普遍的に分布するアマモ場を対象に、世界各地で共通の野外操作実験を行うことにより、アマモ場の生物群集と生態系プロセスの一般性の解明を目指す。

参加・連携状況：本プロジェクトは世界の代表的なアマモ場十数地点を対象とするが、北西太平洋沿岸海域の拠点として、本プロジェクトの担当者である仲岡（サブテーマ1）と堀（サブテーマ2）が平成23年度より参加している。実験は、本課題の対象域（厚岸湖と瀬戸内海西部）のアマモ場で行い、本課題のデータベースに集積したデータも利用している。

(4) 国際共同研究プロジェクト「変動する海洋の生命 (Life in a Changing Ocean)」

研究代表者：Paul Snelgrove (Memorial University of Newfoundland)

研究概要：2001年～2010年にかけて行われた国際海洋生物多様性プロジェクトである「海洋生命のセンサス (Census of Marine Life)」の後継プログラムとして立案中の大型国際共同研究である。海洋生物多様性の時空間変動の把握、生物多様性と生態系機能の関連性解明、人間活動の影響評価の3つを研究の柱として企画されている。

参加・連携状況：当該プロジェクトは世界各地のアマモ場および岩礁潮間帯を対象とした共通プロトコルによる観測および操作実験を立案中である。本研究課題の代表者である仲岡は平成23年度より当該プロジェクトの企画立案に関連しており、本課題で構築したデータベースを拡張した研究についても検討中である。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) T. YAMAKITA, K. WATANABE and M. NAKAOKA: *Ecography*, 34, 519-528 (2011)  
DOI: 10.1111/j.1600-0587.2010.06490.x  
“Asynchronous local dynamics contributes to stability of a seagrass bed in Tokyo Bay”
- 2) T. YAMAKITA and M. NAKAOKA: *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 21, 177-183 (2011)  
“Importance of considering grain and extent for the analysis on spatial dynamics: perspectives from comparison between theory and empirical example on seagrass bed dynamics in Tokyo Bay”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 仲岡雅裕：遺伝、63, 11, 80-86 (2009)  
「沿岸域の生態系・生物多様性モニタリング」
- 2) 仲岡雅裕(共著)：地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第2号「地球温暖化観測における連携の促進を目指してー雲・エアロゾル・放射および温暖化影響評価に係わる観測ー」、地球温暖化観測推進ワーキンググループ（地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁）

105-138 (2010)

「第5章 生態系分野」

- 3) 小路淳、堀正和、山下洋編：水産学シリーズ169 浅海域の生態系サービス. 海の恵みと持続的利用、恒星社厚生閣, 129-143 (2011)

「第10章 地球環境変動と生態系サービス、人間活動の関連性の解明に向けて（執筆担当：仲岡雅裕、松田裕之）」

- 4) 仲岡雅裕、渡辺健太郎：海洋と生物、33, 315-322 (2011)  
「アマモ場の生物多様性・生態系モニタリング」

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) M. Nakaoka, M. Ishihara, A. Toyokawa, T. Hiura: 10<sup>th</sup> International Congress of Ecology, Brisbane, Australia (2009)  
“Contribution of JaLTER to long-term, broad-scale ecosystem monitoring in Japan”
- 2) M. Nakaoka, M. Hori: Coastal and Estuarine Research Federation 2009 Biannual Meeting, Portland, U.S.A. (2009)  
“The linkage between biodiversity and ecosystem functions: regional perspectives.”
- 3) N. Whanpetch, T. Yamakita, K. Watanabe, M. Nakaoka: Coastal and Estuarine Research Federation 2009 Biannual Meeting, Portland, U.S.A. (2009)  
“Effect of spatial structure of seagrass vegetation on macrofaunal benthic community in Futtsu, Tokyo Bay, Japan: an integrated approach using field sampling and remote sensing analysis.”
- 4) 仲岡雅裕：東京大学海洋研究所共同利用研究集会「沿岸海洋生物の広域動態研究の最前線」(2010)  
「地球規模の環境変動に対する沿岸生態系の保全：海洋生物の広域動態解析を通じた指針作りに向けて」
- 5) 仲岡雅裕：第57回日本生態学会東京大会 (2010)  
「アマモ場の生物多様性：沿岸生態系におけるその役割」
- 6) 仲岡雅裕：2010年度日本水産学会春季大会シンポジウム「魚介類生産の場としての浅海域の生態系サービス」 (2010)  
「地球環境変動と生態系サービス」
- 7) M. Nakaoka, M. Hori, Y. Tanaka, H. Mukai, K. Yokoi, T. Inoue, M. Fujita: World Seagrass Conference 2010, Phuket, Thailand (2010)  
“Monitoring sites 1000: a nationwide long-term monitoring of seagrass beds in Japan”
- 8) M. Nakaoka, M.D. Fortes: 9th International Seagrass Biology Workshop, Trang, Thailand (2010)  
“Towards an integrated coastal ecosystem conservation and adaptive management of coastal areas of Southeast Asia”
- 9) M. Nakaoka: International Symposium on the Sustainability and Productivity of Coastal Resources, Nagasaki, Japan (2011)  
“Scaling up our (your?) research for better understandings of coastal ecosystem dynamics”
- 10) M. Nakaoka: ILTER 2012 Science Meeting, Sapporo, Japan (2011)  
“How can LTER contribute to impact assessment of catastrophe in coastal area?”

- 11) M. Nakaoka, N. Tojo, K. Watanabe, M. Hori, Y. Tanaka, T. Yamakita, N. Whanpetch: World Congress of Marine Biodiversity 2011, Aberdeen, U.K. (2011)  
 “The linkage between biodiversity and ecosystem functions in seagrass beds: a multiple spatial-scale approach in Japan”
- 12) 渡辺健太郎、仲岡雅裕: 日本生態学会第59回全国大会 (2012)  
 「内湾砂泥底に発達する海草藻場メタ個体群プロセス」
- 13) M. Nakaoka: East Asian Federation of Ecological Societies 5th International congress, Otsu, Japan, (2012)  
 “Board-scale variation in biodiversity and functions of seagrass beds along the Pacific coast of eastern Asia”
- 14) M. Nakaoka, T. Suzuki, A. Dazai, Y. Sakanishi, K. Yokoi, M. Nakagawa, N. Sato: 41<sup>st</sup> Benthic Ecology Meeting, Norfolk, U.S.A. (2012)  
 “Effect of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami on benthic ecosystems in northeastern Japan”

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

### (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

### (6) その他

特に記載すべき事項はない

## 8. 引用文献

- 1) Kikuchi, T. and J. M. Perès. 1977. Consumer ecology of seagrass beds. In: McRoy, C. P. and C. Helfferich (eds), Seagrass ecosystem. A scientific perspective. Marcel Dekker, New York, pp 147-193.
- 2) Williams, S. L. and K. L. Heck Jr. 2001. Seagrass community ecology. In: Bertness, M. D., S. D. Gaines and M. E. Hay (eds) Marine community ecology. Sinauer, Sunderland, pp. 317-337.
- 3) Nakaoka, M. 2005. Plant-animal interactions in seagrass beds: ongoing and future challenges for understanding population and community dynamics. *Pop. Ecol.* 47: 167-177.
- 4) 小路淳・堀正和・山下洋. 2011. 水産学シリーズ 169 浅海域の生態系サービス. 海の恵みと持続的利用、恒星社厚生閣、東京
- 5) Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburge, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.

- 6) Steneck, R. S. and J. T. Carlton. 2001. Human alterations of marine communities: students beware! In: Bertness, M. D., S. D. Gaines and M. E. Hay (eds) Marine community ecology. Sinauer, Sunderland, pp. 445-468.
- 7) 仲岡雅裕. 2008. 気候変動にともなう沿岸生態系の変化—生物群集から考える. In: 大串隆之・近藤倫生・仲岡雅裕編、シリーズ群集生態学4：生態系と群集をむすぶ、京都大学学術出版会、京都、pp. 179-204.
- 8) Waycott, M., C. M. Duarte, T. J. B. Carruthers, R.J. Orth, W.C. Dennison, S. Olyarnik, A. Calladine, J. W. Fourqurean, K. L. Heck, Jr, A. R. Hughes, G. A. Kendrick, W. J. Kenworthy, F. T. Short and S. L. Williams. 2006. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 106: 12377-12381.
- 9) 仲岡雅裕・渡辺健太郎. 2011. アマモ場の生物多様性・生態系モニタリング. 海洋と生物、33: 315-322
- 10) 仲岡雅裕. 2009. 沿岸域の生態系・生物多様性モニタリング. 遺伝、63(6): 80-86.
- 11) 仲岡雅裕. 2010. アマモ場の生物多様性と機能. In: 日本生態学会編、エコロジー講座3：なぜ地球の生きものを守るのか、文一総合出版、東京、pp. 6-17.
- 12) 山北剛久・仲岡雅裕・近藤昭彦・石井光廣・庄司泰雅. 2005. 東京湾富津干潟における海草藻場の長期空間動態. 保全生態学研究、10: 129-138.
- 13) 堀正和・吉田吾郎・浜口昌巳・山崎誠. 2008. 陸－海相互作用系における藻場の役割. 水産海洋、72: 301-304.
- 14) Frederiksen, M., D. Krause-Jensen, M. Holmer and J. S. Laursen. 2004. Long-term changes in area distribution of eelgrass (*Zostera marina*) in Danish coastal waters. Aquat. Bot. 78: 167-181.
- 15) Yamakita, T., K. Wanatabe and M. Nakaoka. 2011. Asynchronous local dynamics contributes to stability of a seagrass bed in Tokyo Bay. Ecography 34: 519-528.
- 16) Short F. T. and C. M. Duarte. 2001. Methods for the measurement of seagrass growth and production. In: Short, F. T., C. A. Short and R. G. Coles (eds.), Global seagrass research methods, Elsevier, Amsterdam, pp. 155-182.
- 17) Duarte, C. M. 1991. Seagrass depth limits. Aquat. Bot. 40: 363-377
- 18) Tanaka, Y. and M. Nakaoka. 2004. Emergence stresses and morphological constraints affect the species distribution and growth of subtropical intertidal seagrasses. Mar. Ecol. Prog. Ser. 284: 117-131.
- 19) Lirman D. and W. P. Cropper. 2003. The influence of salinity on seagrass growth, survivorship, and distribution within Biscayne Bay, Florida: Field, experimental, and modeling studies. Estur. Coast. 26: 131-141.
- 20) Hemminga, M. A. and C. M. Duarte. 2000. Seagrass ecology. Cambridge University Press, Cambridge, U. K.
- 21) 野島 哲. 1996. 海草藻場群集の多様性と安定化機構. 日本生態学会誌、46: 327-337.
- 22) Short F. T., R. C. Davis, B. S. Kopp, C. A. Short and D. M. Burdick. 2002. Site-selection model for optimal transplantation of eelgrass *Zostera marina* in the northeastern US. Mar. Ecol. Prog. Ser., 227: 253-267.

- 23) 仲岡雅裕(共著). 2010. 第5章 生態系分野. In: 地球温暖化観測推進ワーキンググループ(編)、地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第2号「地球温暖化観測における連携の促進を目指してー雲・エアロゾル・放射および温暖化影響評価に係わる観測ー」、地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁、pp. 105-138

## (2) アマモ場の生物多様性と生態系機能の関連性解析

独立行政法人水産総合研究センター

瀬戸内海区水産研究所 生産環境部 藻場・干潟グループ 堀 正和

<研究協力者>

独立行政法人 水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所

生産環境部 藻場・干潟グループ 島袋寛盛

吉田吾郎

浜口昌巳

独立行政法人 海洋研究開発機構 むつ研究所

田中義幸

国立大学法人 東京大学農学生命科学研究科

宮下 直

山北剛久

平成21～23年度累計予算額： 4, 090千円（うち、平成23年度予算額： 1, 490千円）  
予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** アマモ場の有する高い生物多様性と高い生態系機能は沿岸生態系の中でも卓越しており、その機能は基盤種(Foundation species)であるアマモの形態形質や現存量・生産量により制限されている。本研究はアマモ場の生物多様性と主要な生態系機能の関係を統計的手法や野外・室内の操作実験により解明することを目的としている。北海道東部海域、東京湾、瀬戸内海西部海域から重点調査海域を設定し、初年度はアマモ形態形質・現存量・生産量と各栄養段階（小型無脊椎動物群集および魚類）の種多様性・現存量との相関関係を把握し、サブテーマ（1）のデータベースに組み込むデータの種類・指標とその測定手法を確定させることを目的とした。各重点調査海域で定量採集を行った結果、アマモの形態形質および魚類群集のいくつかのパラメータで海域間の違いが認められた一方、葉上動物・内在性動物群集ではすべてのパラメータにおいて地域間に差がなく、地域内での差が大きい傾向があった。また、魚類や葉上動物群集の現存量と種多様性はアマモの株数や株の分岐数、あるいは葉長や葉面積といった形態形質に関する変数と相関を示し、動物群集全体の現存量と多様性は魚類のパラメータで代表される傾向が確認された。これらの結果は、複数の栄養段階の多様性を評価軸に用いる場合、一般的に生態系機能の指標として用いられるアマモの現存量や生産量に加えて、形態形質の指標値もデータベースに加える必要性を示唆する。

次に2010年度には、アマモ場の生態系機能の指標として有効であったアマモ群落構造パラメータ、生物多様性の指標値として有効であった魚類群集パラメータを主要な対象とし、物理環境・生態系機能・生物多様性の関係を把握することを目的とした、まず水温、水深、流速条件を操作したアマモ生育実験を行い、物理環境とアマモ群落構造の関係を把握した。次に、各重点調査海

域において水深と流速条件の異なる複数の調査点を対象にアマモ群落構造と魚類相の調査を行った。最後に各海域でアマモ群落構造（生態系機能）と魚類相（生物多様性）の関係式を作成し、サブテーマ（1）で作成したデータベース上のアマモ場の空間分布を用いて魚類相の空間外挿の試行を行った。操作実験の結果、水温変化に伴う群落構造の変化は確認されなかった。その一方で水深勾配および流速勾配に伴うアマモ群落構造の可塑的な変化が確認され、強い流速条件下では全長が小さく葉が細い形態を示すが株数が多くなる群落構造を呈した。また、アマモ群落構造と魚類群集の関係を把握する共分散構造解析では、全長が小さく株数が多い群落を好む魚種と、全長が大きく株数が少ない群落を好む魚種が確認され、双方の群落構造が形成されるような大きな流速・水深環境勾配を持ったアマモ場が高次消費者まで含めた生物多様性の保持に重要であることが示唆された。これらの結果から厚岸湖を対象に空間外挿を試行したところ、中央部に葉上魚類中心の分布域、周辺に底魚類中心の分布域が形成され、その中間域に多様性の高い海域が分布する結果となった。

最終年度の2011年度には、前年度より継続している物理環境要因とアマモ形態形質との関連を調べる野外実験により、最も形態形質の変化が顕著であった流速の勾配に伴う形態形質の変異を解明すること、生物多様性と生態系機能の関連性に関する最終結果として、アマモ場の主要機能から高次消費者までの生物多様性・食物網構造が予測する手法を完成させ、その手法による重点調査海域での解析結果を統合解析へデータ提供することを主目的とした。野外実験の結果、昨年度確認された流速勾配に伴う形態変異は群落のすべての株が新株に更新した後も継続されることが明らかとなった。また、各重点調査海域でのアマモ群落構造と魚類群集構造の関係を示す結果では、魚種によって好むアマモ群落構造が異なることから、群落構造の違いから底魚類、中層（葉上）魚類、浮魚類の3タイプに分類できること、それによってアマモ群落構造から食物網を介して高次消費者まで予測が可能であることが示唆された。この成果により、サブテーマ（1）との統合解析において、リモートセンシングを用いた広域なアマモ場の空間分布と群落構造のモニタリングからアマモ場の生物多様性と生態系機能の広域分布を評価する基盤を提供できるようになった。

[キーワード] アマモ場、生物多様性、生態系機能、形質変化、栄養段階

## 1. はじめに

沿岸生態系は藻場や干潟など生態系機能が高い生態系を含み、特にアマモ場はその高い生物生産から様々な生態系機能を発揮することで知られている。その機能は基盤種(Foundation species)であるアマモによって制限されており、主要な生態系機能である純一次生産力を他の生態系と比較すると、陸上で最も生産性が高いといわれる熱帯雨林（約2000gDW/m<sup>2</sup>/yr）とほぼ同様の値を示す<sup>1)</sup>。この高い一次生産力を原動力に、アマモ場は栄養塩固定や炭素固定を行い、草体が作り出す立体構造が海水流動を抑制することで水中の懸濁粒子の沈降を促進させる<sup>2),3)</sup>。一説によれば、沈降により堆積させる炭素の総量は約1tC/ha/yrにもなると言われている<sup>4)</sup>。また、この沈降物は海草の草体が枯死したもののだけでなく、陸域からの栄養塩を豊富に含む水塊や懸濁粒子を大量に含むことに加え、例えばMiyajima et al. (2007)<sup>5)</sup>で報告されているように沖合域などからも流入してくるプランクトンや懸濁粒子をも含むことが報告されている。したがって、アマモ場では海草の一

次生産とこれらの懸濁粒子の双方が藻場のベントスや魚類等に利用され、高い生物生産が生み出されていることが容易に想像される。さらには、海草の立体構造は多くの沿岸生物に好適な生息場所を提供する効果も大きく、その効果は生物生産と生物多様性をさらに助長している<sup>6),7),8)</sup>。

このようにアマモ場の生態系機能の多くは海草の作り出す植生の立体構造に制限されることが多く、その植生構造の特徴は海草の形態形質によって作り出されている。しかしながら、これまでの藻場のモニタリングでは海草の一次生産量や株密度など、その現存量に関するパラメータを中心に調査が行われており、形態形質まで考慮したアマモ場の生態系機能のモニタリングは行われていない。ベントス類や魚類など複数の栄養段階を含めた生態系全体を対象とする場合、その複数の栄養段階が総合的に生み出す二次生産等の全体の生態系機能は海草の有する形態形質の多様性とも関連することが予測される。また、逆に海草群落が有する構造や一次生産など、群落の有する生態系機能が、ベントス類や魚類の多様性を維持していることも予想される。いずれの場合においても、その形態形質と生態系機能・多様性との関連性が解明されることで、生態系全体での海草藻場の生物多様性と生態系機能の関係をモニタリングする指標の構築につながることを期待される。

その一方、海草そのものの成長や形態形質を制限する環境要因に目を向ければ、陸上から海洋へ進出した維管束植物である海草が分布するためには、適度な塩分・水分などの海洋環境、根を張ることができる底質、生長を維持するための光が不可欠であると指摘されている<sup>6)</sup>。渡辺・仲岡<sup>9)</sup>は、海草の分布に強い影響を与える環境要因として、1)深度に伴い変化する光、2)海況により大きな変異を示す栄養塩濃度、3)嵐などに代表されるかく乱、4)潮間帯において深刻なストレスになりうる乾燥、の4つを上げている。海草の分布上限では乾燥<sup>10-13)</sup>のため、分布下限では弱光<sup>14)</sup>のため海草各種の分布が制限されていることが操作実験などにより明らかにされている。日本の温帯域ならびにその周辺においては、浅いところから順にコアマモ、アマモが海岸線に平行に帯状に分布することが多く、より深い地点にはタチアマモなどの地域固有種が分布する事がある。それぞれの種には、その分布に好適な環境要因の範囲があり、分布中心から周辺へ以降するにつれ、いずれかのストレスが増加し分布しにくくなると考えられる。

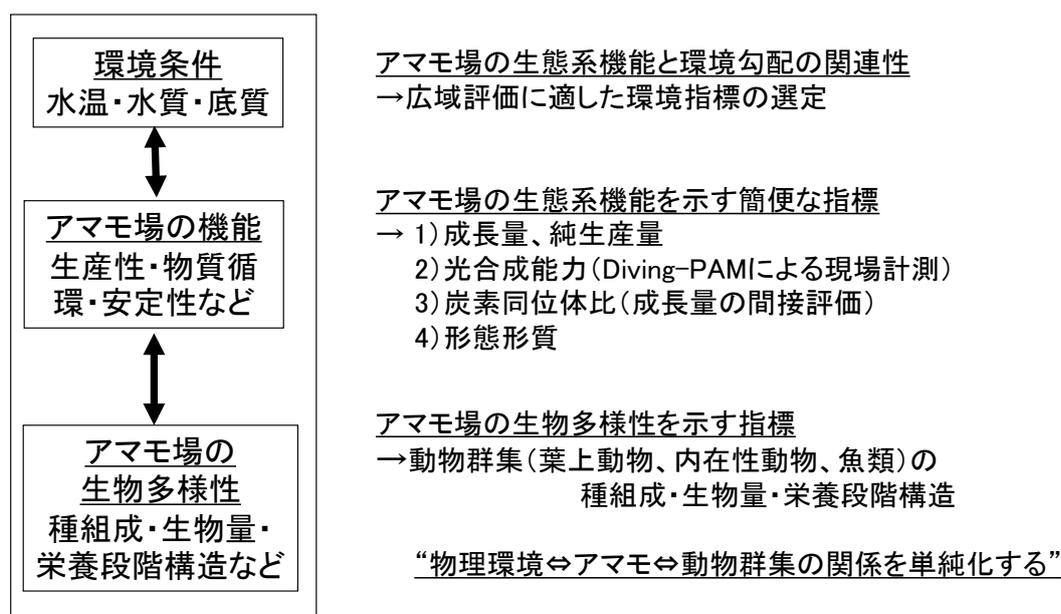
北半球の温帯域に広く分布するアマモ (*Zostera marina*) を主な対象として、面的な広がりを持つアマモ場における生態系機能を評価するにあたり、まず水深とアマモの分布・生物量・生長量との対応関係を明らかにすることは有効な手段であると考えられる。それを基本として、栄養塩、塩分、水温、かく乱などのさまざまな時空間スケールにおいて海草に影響を与える要因を考慮する必要があるだろう。たとえば、ある地点の栄養塩濃度は、供給源からの距離や潮汐などによる海水交換の影響をうけて時間的に変化する<sup>15)</sup>。集水域の規模や土地利用形態によりその影響力は異なるが、一般的に栄養塩の供給源であることの多い河川、特にその河口域において栄養塩濃度は大きく変化する。本研究の主要調査地点の中では、厚岸の調査地点が河口域に隣接しているため、相対的に河口からの栄養塩の流入の影響が顕著に認められる地点であると考えられる。

面的に、環境要因と海草の生長との対応関係を検証するためには、それぞれの項目を簡便に測定できる手法を検討することも不可欠である。たとえば、海草の生長に関しては、現状、最も確実に数週間程度の時間スケールにおける生長量を計測できる方法は標識法<sup>16)</sup>であろう。しかしながら、標識を設定してから2週間程度後に株を回収してサイズを計測しなくてはならないため、結果を得るまでに多大な労力と時間がかかる。更に海況の悪化などにより、標識した試料が散逸し

たり、予定した期日に用船が困難であったために標識した部位が生長にともなって脱落してしまい、正確な見積もりが不可能になるなどの危険性も伴う。一方、近年海草の生長量の測定に利用されるようになってきた水中型パルス振幅変調クロロフィル蛍光測定器（Diving-PAM）は、10分以上の暗馴化を行う間水中で待機する必要はあるものの、実際の測定はボタンを押すだけで終了し、データも本体に記録することが可能である。そのうえ、葉に専用クリップを取り付けるだけで非破壊的に測定できるため、試料採集を伴う他の方法と比較してアマモ場に与えるダメージはほとんどないと考えることができる。この方法は、乾燥に伴う葉の光合成の低下の種間変異<sup>5)</sup>や病気への感染による葉の光合成能の低下がおよぶ範囲の測定<sup>17)</sup>などのように、きわめて限定された環境要因の変化に対する海草の光合成能の変化を検証する用途で活用されてきた。この方法が、一定の広がりをもった時空間スケールにおいても応用可能であれば、アマモ場の生態系機能の広域評価に対して強力なツールになるであろう。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマではアマモ場の物理環境、アマモ植生構造、さらにアマモ場の生物群集構造の三者間の関係を解明し、アマモ場の生物多様性と生態系機能の関係を指標化することを目的とした（図(2)-1）。アマモ場の周辺環境とアマモ場の主要機能の相関を統計的手法により解析するとともに、得られた相関をもたらず因果関係について野外観測・実験により明らかにした。また、アマモ場の生物多様性や食物網構造と、アマモ場の主要機能との相関を統計的手法により解析し、環境勾配に伴うアマモ場の変遷と生物多様性・生態系機能の関係を解明した。最後にこれらの関係を簡便化して指標とし、アマモ場の生物多様性および生態系機能を広域的に推定・評価するためのGISベースの空間情報解析モデルに提供することを目指した。年次計画は以下のとおりである。



図(2)-1 本サブテーマの概要と目的.

2009年度：予備的解析による生物多様性と生態系機能の関連性の推定と指標の開発および環境条件とアマモ場の生態系機能の関連性解析

2010年度：完成したデータベースを利用した本格的な解析。操作実験によるアマモ場の生物多様性・生態系機能関係の把握

2011年度：生物多様性と生態系機能の関連性に関する最終結果の導出。統合解析へのデータ提供

2009年度においては、重点海域である北海道東部、東京湾および瀬戸内海において、まず海草の生態系機能とそれに影響を与える環境要因との対応関係を推定するために、以下の3つの項目について予備的実験を行った。(1) アマモの生物量や生長量の水深に伴う変異を調べ、光量などの環境勾配との対応関係を検討する。(2) 水中型パルス振幅変調クロロフィル蛍光測定器(Diving-PAM)を用いて、環境要因(塩分と水深)と海草の光合成能力との関係を検証する。(3) 海草の分布に局所的に影響を与える指標として栄養塩に着目し、海草の葉の元素分析を行い、栄養塩の欠乏の程度を評価する。次にサブテーマ1のデータベースに組み込むデータの種類とその測定手法を確立し、そのデータを用いて(4) 生物多様性と生態系機能の指標となる変数を選出し、それら変数間の比較からアマモ場の生物多様性と生態系機能の関連性を確定することを試みた。アマモ場に見られる栄養段階(生産者・消費者・分解者)の種構成・生物量や食物網構造など生物多様性に関する指標をアマモ場間で比較するとともに、アマモ場の主要機能(現存量、生産量や群落構造を生み出す草体の形態形質など)をあらわす変数との関連性を統計解析した。さらに屋外水槽・野外において、物理環境勾配に伴う生物多様性・生態系機能関係の海域間変異を明らかにした。その形態形質と生態系機能・多様性との関連性が解明されることで、生態系全体でのアマモ場の生物多様性と生態系機能の関係をモニタリングする指標の構築につながる事が期待される。

また、2010年度は2009年度の解析によりアマモ場の生態系機能の指標値として有効であることが示されたアマモ場のアマモ群落構造のパラメータ(アマモの成長量・現存量・形態など)、アマモ場の生物多様性・食物網構造の指標値として有効であることが示された高次栄養段階の魚類群集のパラメータ(現存量、個体数、種数など)を主要な対象とし、物理環境・生態系機能・生物多様性関係を把握するために以下の調査・操作実験を行った。

まず物理環境とアマモ群落構造の関係を把握するために、(5) アマモ形態形質機能の変異の実験的検証として、アマモの群落構造を変化させると言われている水温、水深、流速条件を操作した環境下でのアマモ生育実験を行った。次に、(6) アマモ群落構造と魚類群集の関連性解析を行い、相関関係の把握を行った。北海道東部、東京湾、瀬戸内海の各重点調査海域において、各海域全域の環境を網羅するように水深と流速条件の異なる複数の調査点を設定し、各調査地点においてアマモ群落構造の把握と魚類相の定量採集を行った。最後にこれらのデータから各海域でアマモ群落構造(生態系機能)と魚類相(生物多様性)の関係式を作成し、この関係式を用いてサブテーマ1で作成したデータベース上のアマモ場の空間分布と統合させ、魚類相の空間外挿の試行を行った。

2011年度は、2010年度より継続している物理環境要因とアマモ形態形質との関連を調べるアマ

モ形態形質機能の継代可塑性に関する実験的検証の最終結果を得た。アマモの機能の指標となる形態形質に影響を及ぼす環境要因のうち、最も形態形質の変化が顕著であった流速を操作し、流速の勾配に伴う形態形質の変異を解明した。次に、生物多様性と生態系機能の関連性に関する最終結果として、アマモ場の主要機能から高次消費者までの生物多様性・食物網構造が予測する手法を完成させ、その手法による重点調査海域での統合解析として（8）動物群集多様性の広域分布評価を行った。

### 3. 研究開発方法

北海道東部の重点調査海域である厚岸湖、東京湾の重点調査海域である富津干潟、瀬戸内海の重点調査海域である安芸灘生野島の3海域において、海域全域の物理環境特性（水深・流速）とアマモ群落の空間分布を網羅するように調査地点を配置した（図(2)-2）。半閉鎖的汽水湖で大河川（別寒辺牛川）の河口域に位置する厚岸湖では計10調査点、東京湾中央部の砂州の内湾側に位置する半開放的な富津干潟では計10点、島嶼部の半閉鎖的内湾である生野島で計7調査点とした。野外調査は各海域のアマモ最盛期に相当する6月中旬（富津干潟）、6月下旬（安芸灘生野島）、8月上旬（厚岸湖）に以下の手順により行った。



図(2)-2 各重点調査海域（左：厚岸湖、中央：富津干潟、右：安芸灘生野島）における調査地点の配置。

2009年度においては、まず本研究の主要調査地域である厚岸湖・厚岸湾，東京湾富津ならびに安芸灘生野島において、アマモならびにその近縁種が良好に分布する代表的な地点を選定し、アマモの生態系機能の指標となりうる複数の環境要因について、その空間変異の大きさおよび環境要因との関連性を把握するための予備的検討を行った。

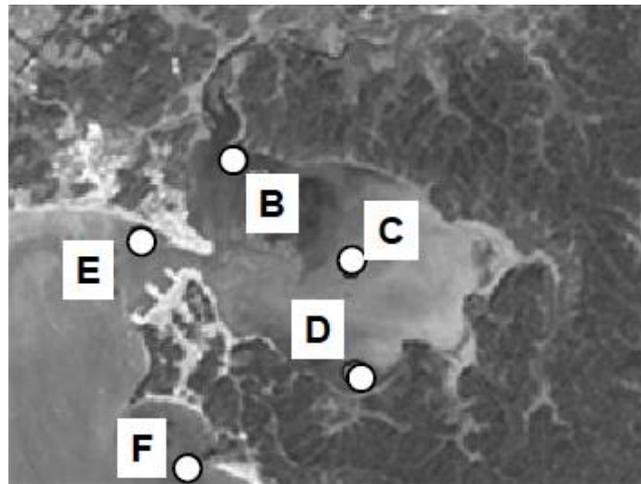
#### （1）アマモの生長量と水深勾配の関連性

2009年11月に安芸灘生野島の水深の異なる3地点（アマモ分布域の上限付近：水深推準±0m・中央：水深基準-1.0～1.3m・下限付近：水深約-5m）において、標識法<sup>16)</sup>によりアマモ地上部の生長量を測定した。試料は標識後、16日後に回収し、付着藻類などを丁寧に取り除いた後、冷凍保存した。実験室にてサイズや標識の位置を計測したのち、標識以後に生長した部位とそれ以前の部

位とに区分し、60℃で一定重量になるまで乾燥させ重量を計測した。株ごとの全体重量、生長した部分の重量、生長した部分の面積、全体の生物量に対する1日当たりの生長重量を比較検討した。

## (2) アマモの光合成能の空間変異と環境勾配との関連性

アマモの光合成能力の指標としてクロロフィル蛍光を測定した。2009年8月には厚岸湖およびその周辺海域において物理環境条件（塩分・水深・流速など）との関連を検証した。アマモ場は一般的に河口域に形成されることの多いため、河口からの距離に伴う環境勾配によって形質に変異が生じやすいと考えられる。別寒辺牛川河口からの距離が異なるB, D, E, Fの各地点（図(2)-3）にて、無作為にアマモの株を選択し、各株とも新しい方から2枚目の葉の基部に専用クリップを設置し約10分の暗馴化を行った後、Diving-PAM（水中型パルス振幅変調クロロフィル蛍光測定器、Walz社）を用いてクロロフィル蛍光を測定した。2009年12月には東京湾富津において、水深の異なる3点（アマモ分布上限付近・中央・下限付近）を設定し、各点アマモ10株に対し、厚岸と同様に暗馴化をさせた後にクロロフィル蛍光を測定した。



図(2)-3 アマモの光合成能測定のために設定した厚岸湖の調査地点。厚岸湖に流入する主要河川である別寒辺牛川の河口のSt. 2をB地点、St. 9をC地点、St. 7をD地点とし、河口からの環境勾配を得るために新たにE・F地点を太平洋に面した厚岸湾に設定した。

## (3) アマモの元素組成と栄養塩勾配の関係

厚岸湖ならびにその周辺海域において河口からの距離が異なる4地点（図(2)-3、B, C, E, F）にて2004年に採集し冷凍保存していたアマモ葉部試料の元素分析を行い、アマモ葉部が窒素欠乏の状態にあるかどうか検討した。Duarteは、アマモ葉部のC/N比が20以上、窒素含有量が $1.3 \text{ mmol g}^{-1}$ 以下であれば、窒素欠乏の状態になっていると指摘している<sup>18,19</sup>。この値を踏まえ、厚岸における海草の栄養塩欠乏状態を評価した。

## (4) 各重点調査海域でのアマモ植生・植生内の動物相・魚類相とその現存量の把握

まず、約50m<sup>2</sup>の範囲で魚類を定量採集できる小型巻き網を用いた魚類採集を行った。採集した魚類は現地で船上に挙げ、直ちに5%海水ホルマリンにより固定した。次に、魚類採集を行った範囲内でコドラートを用いたつぼ刈り法により、アマモ地上部と葉上動物群集の定量採集を行った。採集サンプルは目合いが約300 $\mu$ mのメッシュバックで回収し、実験室に持ち帰ったのちに直ちに冷凍保存を行った。最後に、つぼ刈りを行ったコドラート内に円形コアサンプラーを差し込み、アマモ地下部と内在性動物の定量採集を行った。採集サンプルはつぼ刈り法と同規格のメッシュバックに回収し、実験室に持ち帰ったのちに直ちに冷凍保存した。

収集サンプルの測定では、アマモについては形態形質（栄養株葉数、分岐数、葉長、葉面積）・株密度および現存量の計測を行い、これらの値をアマモ場の群落多様性および生態系機能の指標値として用いる変数に確定した。また、葉上動物・内在性動物については種数・個体数・密度および現存量の計測を行い、これらの値を一次消費者および分解者の多様性・生態系機能指標値の算定に用いた。また、魚類についても種数・個体数密度および現存量の計測を行い、これらの値を二次消費者の多様性・生態系機能指標値の算定に用いる変数とした。したがって本研究ではアマモを主体とする生産者から、一次消費者、二次消費者および分解者の4つの栄養段階を対象としている。これらの変数のうち、サンプル数が解析に耐えうるものについては多様性指標値と生態系機能の指標値との関係について栄養段階内と栄養段階間での予備的な統計解析を行った。

#### （5）アマモ形態形質機能の変異の実験的検証

2010年度においては、前年度に行った野外調査の結果からアマモの形質には物理環境が複合的に作用することが明らかとなったため、個々の物理環境に対する形質の変化を操作実験により検証することとした。実験では、水深・流速・水温を個別に操作した屋外・海上設備を用いて、アマモ栄養株の生育状況と形態形質の計測を行った。屋外水槽施設および海上実験施設は本業務の委託先である（独）水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所所有のものを用いた。まず、実験に用いるアマモ群落の実験株の作成を以下のように行った。実験を行う際に野外のアマモ株・群落をそのまま持ち込んだ場合、群落構造が実験前の野外成育環境の影響を蓄積してしまうことが考えられる。そのため、実験前のアマモ群落の条件をすべての実験において同一にそろえることができない。そこで、単一の花株から採集した種子を発芽させた実生株を作り、これを同一環境下で一定期間初期生育させたものを実験に用いた。種子の採集は瀬戸内海安芸灘生野島において行い、あらかじめ同一ジェネットではないことが判明している2つの群落（株数が多く各株の全長が小さい潮間帯群落と株数が少なく各株の全長が大きい潮下帯群落）から成熟した花株を4株ずつ持ち帰った。この4つの花株から採集した種子を株ごとに分離して同一環境下で発芽させ、各群落で4タイプの実生株を全長50mm～70mmになるまで生育させた。同株由来の検証には各実生株から葉片を切り取った後、島袋ら<sup>20)</sup>の手法に従ってマイクロサテライトマーカーによる遺伝子解析を行った。これらの実生株を砂泥が敷き詰められた海中プランター（30cm×20cm）に群落別に各タイプ1株ずつ移植し、各群落で計4株が植えられたプランターを複数作成し、これらを実験開始時の実験株（以後、実験株と呼ぶ）とした。

つづいて各群落（潮間帯群落および潮下帯群落）の実験株プランターを水温・流速・水深をそれぞれ段階的に操作した実験区に設置した。水温については開始時の水温が13度前後の対照区、対照+1度区、対照+2度区、対照+4度区となるよう昇温装置を取り付けた個別の水槽を準備し

た。流速については屋外の大型流水水槽を用い、水槽の海水噴出口を起点に一定の距離間隔で電磁流速計による流速の測定を行い、次に噴出口から実験株プランターを設置する位置までの距離をかえることで平均流速30cm/秒区、15cm/秒区、5cm/秒区の3段階の流速勾配をつけた。また水深については海上実験施設において実験株プランターを水深3m、水深2m、水深1mの3段階の水深に設置した。これら3つの操作実験は5月中旬から同時に開始して約6カ月後の12月中旬まで継続し、その期間中に各プランターで株数や各株の草丈および分岐数などの群落構造パラメータの計測を行った。

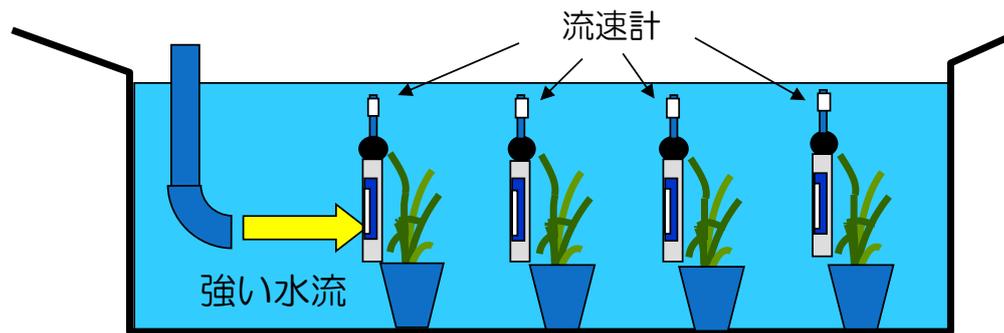
#### (6) アマモ植生構造と魚類群集の関連性解析

次に、アマモ群落構造と魚類群集の関係把握のために、北海道東部の重点調査海域である厚岸湖、東京湾の重点調査海域である富津干潟、瀬戸内海の重点調査海域である安芸灘生野島の3海域において野外調査を行った。まず各海域で海域全域の物理環境特性（水深・流速）とアマモ群落の空間分布を網羅するように配置した調査地点において、各地点でアマモ群落内の魚類相とその現存量を把握するために、約50m<sup>2</sup>の範囲で魚類を定量採集できる小型巻き網を行った。採集した魚類は現地で船上に挙げ、直ちに5%海水ホルマリンにより固定した。次に、魚類採集を行った範囲内でコドラートを用いたつぼ刈り法により、アマモ地上部の群落構造計測用のサンプルを採集した。採集サンプルは目合いが約300 $\mu$ mのメッシュバックで回収し、実験室に持ち帰ったのちに直ちに冷凍保存を行った。収集サンプルの測定では、アマモの生態系機能の指標として前年度の解析結果により有効性が示されたアマモの形態形質（葉数、分岐数、葉長）および株密度の計測を行った。また、昨年度の解析結果により生物多様性の指標としての有効性が示された魚類についても、種数および現存量の計測を行った。

最後に、野外操作実験により明らかになった物理環境（水深・流速・水温）とアマモ群落構造との関係、および野外調査により明らかになったアマモ群落構造と魚類群集との関係について、単純な数式化を試みた。魚類群集とアマモ群落構造間で有意な数式が得られた場合、サブテーマ（1）で作成したデータベース上にある各重点海域のアマモ場空間分布図を利用し、本調査で得られた点での魚類群集データ（生物多様性指標）を得られた数式を用いて空間的に広く外挿する試みを行った。

#### (7) アマモ形態形質機能の継代可塑性に関する実験的検証

2011年度においては、まず2010年度に開始した流速を操作した環境下でのアマモ生育実験を継続して行った。引き続き、本業務の委託先である（独）水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所の屋外水槽施設を用い（図(2)-4）、実験に用いているアマモ株には、昨年度に単一の花株から採集した種子を発芽させた実生株を用いた。2011年度は、この実生株が成長して新しい栄養株群落を形成するまで実験を継続し、新しい栄養株を比較することで、実生株そのものの比較では問題となる発芽環境および初期実生飼育環境がアマモの形態形質に及ぼす影響を除外した。この継代生育条件下での形態形質への流速の影響を評価した。



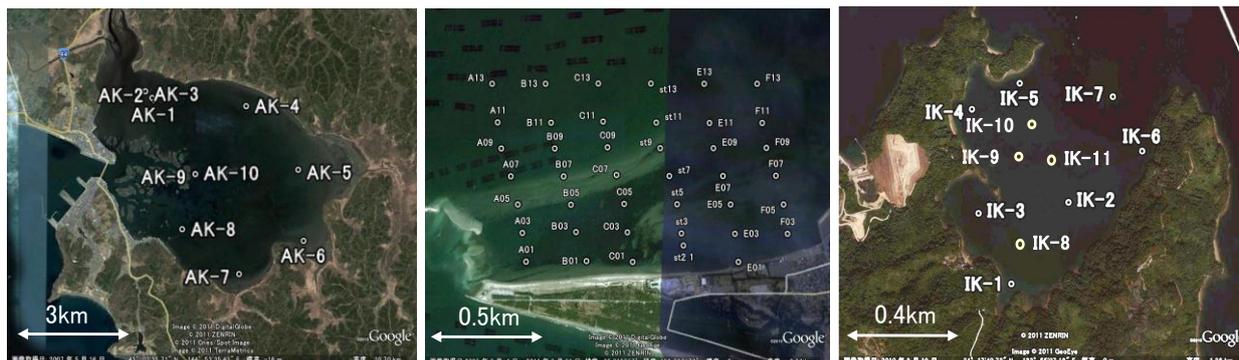
図(2)-4. 流速操作実験の概念図.

#### (8) 動物群集多様性の広域分布評価

次に重点調査海域（厚岸湖、富津干潟、安芸灘生野島）を対象に、アマモ群落構造と生物多様性の関係に関する評価を行った（図(2)-5）。2010年度は空間外挿可能な数式が得られたのは厚岸湖のみで、他の2海域については調査地点不足が一因となり明確なモデルは作成できなかった。そこで本年度は東京湾富津海域、瀬戸内海安芸灘生野島の両海域において調査地点数を増やすことで野外データの精度を向上させ、アマモ群落構造と生物多様性の関係を詳細にモデル化することを試みた。物理環境要因・生物多様性としては、高次消費者が存在できる海域は栄養段階やその餌料生物となるベントス類が存在していることに着目し、高次消費者である魚類を指標に用いた。2011年度は、2010年度に有意な関係が見いだせなかった東京湾海域・瀬戸内海域において重点的に以下の調査を行い、北海道東部においては2010年度と同様の調査を行った。

まず東京湾においては、富津干潟の海岸線に対して垂直に潮間帯から水深6m付近までの沖合に向けて6本のライントランセクトを引いた。次に各トランセクト上に潮間帯から等間隔で7つの調査地点を配置し、各点において約50㎡の範囲で魚類を定量採集できる小型引き網による魚類採集を行うとともに、水質（DO、濁度、水温、塩分、PH）、水深、底質、アマモ場の被度の測定を行った。次に、魚類採集を行った範囲内でコドラートを用いたつぼ刈り法により、アマモ地上部の群落構造計測用のサンプルを採集した。サンプルは昨年度と同様にメッシュバックで回収したのちに直ちに冷凍保存し、アマモの形態形質（葉数、分岐数、葉長）・株密度の計測を行った。その後、採集された魚類相と環境データおよびアマモ場の被度データとの関連性に関して共分散構造解析を用いた統合解析を行い、環境データおよびアマモ場の被度分布から予測された魚類相の分布マップを作成した。

瀬戸内海の生野島海域においては、湾内に2010年度の7調査地点に2011年度は新たに4点を加え、計11点の調査地点を設置した。各調査地点において、富津干潟と同様に物理環境およびアマモ群落被度および魚類相の調査を行い、統合解析を行った。



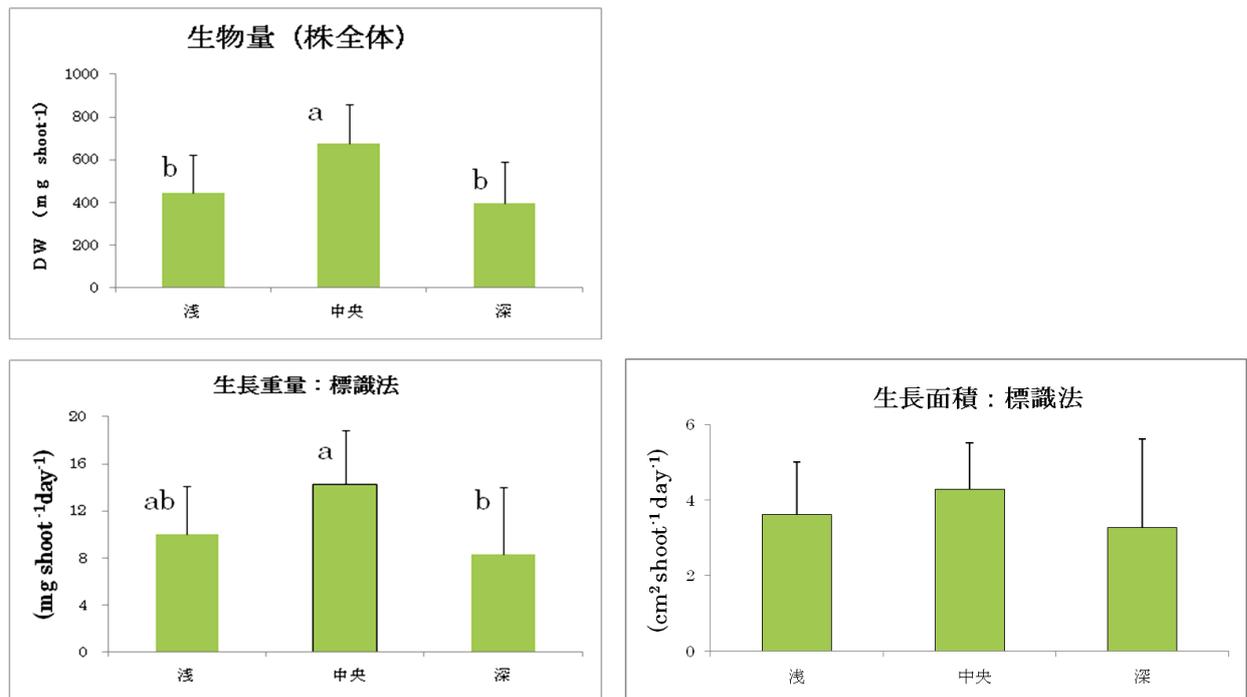
図(2)-5 各重点調査海域（左：厚岸湖、中央：富津干潟、右：安芸灘生野島）における調査地点の配置。

#### 4. 結果・考察

##### (1) アマモの生物量および生長量と水深勾配の関連性

株あたりの乾燥重量は、浅い地点（分布上限）において平均446 mg、分布中央において677 mg、深い地点（分布下限）において397 mgであり、中心域において、ほかの地点よりも有意に大きな値を示した（図(2)-6）。標識法において新たに生長した部分の株あたり1日あたりの重量は、上限において平均9.9 mg、中央付近で14.2 mg、下限において8.3 mgであり、中心域が、下限と比較して有意に大きかった。また、新たに生長した部分の株あたり1日あたりの面積は、分布中心地点で最も大きく4.3 cm<sup>2</sup>、岸側で3.6 cm<sup>2</sup>、沖側で3.3 cm<sup>2</sup>の順に小さくなる傾向があったが、地点間に有意差は検出されなかった。深い地点においては、渡辺らが指摘するように<sup>9)</sup>、葉を薄く広くして集光効率をあげ、弱光に対応していると考えられた。瀬戸内海の海草は夏季に生長量の最大期を、冬季に最小期を迎える。11月に計測した今回のデータは、厚岸において2004年9～11月に計測した値とほぼ同等であった。全体の生物量に対する1日当たりの生長重量の割合はすべての試料の平均で2.1%で、地点間に有意差はなかった。

Diving-PAMに準ずる測定法として、Gaeckle et al.<sup>21)</sup>がアマモ (*Z. marina*) を対象として開発した葉鞘の長さから生長量を推定する方法が応用できる。厚岸においてこの方法を適用したところ、良好な結果が得られている<sup>22)</sup>。Gaeckle et al.<sup>21)</sup>は、標識法に基づいて地点ごとに葉鞘の長さとし生長量との間の回帰式をその都度作成することを推奨しているが、多地点で行う場合は多大な労力を必要とする。広域比較を行う場合など、相対的な変異を解明する目的では、ある程度精度が下がったとしても広域データを集約した回帰式を作成し、その回帰式で各地点の推定を行うほうが地点間の差の比較が容易な可能性がある。また、同一地点においても水深に応じた形態変異が見られるため、地域別の回帰式を作成したとしても、広域比較を行う場合と同様の問題が生じる。広域データを集約した回帰式を作成した後、各地点の特性や地点内の水深特性など応じて、一定の係数を乗ずるなど若干の補正を行うことが現実的かもしれない。



図(2)-6. 安芸灘生野島におけるアマモの生物量・生長量と水深の関係。一元配置の分散分析で有意差が認められた場合には、Scheffeの多重比較を行った。エラーバー横のアルファベット表示が異なる場合は、多重比較で有意差があることを示す。

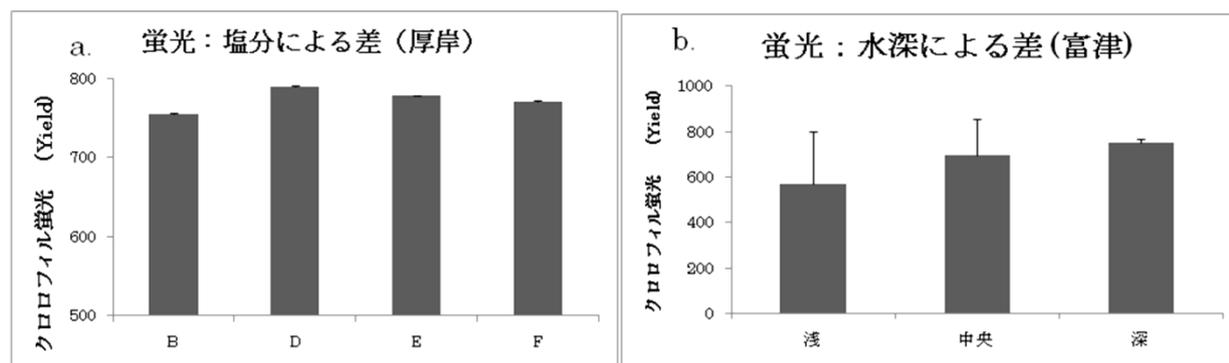
## (2) アマモの光合成能の空間変異と環境勾配との関連性

厚岸では、地点間でクロロフィル蛍光に有意な差が検出されず、塩分との線形的な対応も見られなかった (図(2)-7a)。塩分の差が顕著な地点を選択し測定を行ったが、塩分勾配以外の要因も複合的に作用していることを示唆する結果となった。また、今回実験に供したアマモは分布する地点それぞれの塩分の変異幅に既に適応していたため、塩分の低い地点においても光合成能の低下は顕著でなかった可能性も考えることができる。

東京湾富津では、水深が深い地点ほどクロロフィル蛍光が高くなる傾向があったが、地点間に有意差は認められなかった (図(2)-7b)。2009年度は、富津において標識法による生長量の測定を行わなかったため、直接比較検討することはできないが、後述するように、安芸灘における標識法の結果では、主に光が減衰することによって、分布下限域においてアマモの生長量が低下するとの考えに整合するデータが得られている。今回の富津においても、面的に連続して分布していたアマモが深度の増加に伴いパッチ状の分布に変化し、より光の弱い環境に適応していると考えられるタチアマモが卓越し始める地点で測定を行っている。有意差はないものの、深い地点でクロロフィル蛍光の平均値が最も高かった理由に関しては、今のところ解釈が困難である。

Bjork et al.<sup>12)</sup>は、熱帯性海草を対象に実験室において条件を一定に保った上での測定を行い、葉の乾燥に伴いクロロフィル蛍光が低下していく様子が種により異なることを明らかにしている。本研究の平成21年度の結果は、野外における海草のクロロフィル蛍光の測定では複合的な環境要

因が作用するために、特定の環境要因に対するアマモの生長量の対応関係を明確に捉えることができない場合があることを示唆している。しかしながら、クロロフィル蛍光の測定は標識法と比較して簡便にアマモの生産性の指標を得ることができる上、非破壊的な方法であるため調査対象であるアマモにほとんど悪影響を与えないという点で有効な方法であることに変わりはない。今後、同所における標識法とのクロスチェックによる検討や、実験室において環境要因を複合的に操作した計測を行うことにより、野外におけるアマモのクロロフィル蛍光測定の精度を向上させることが、アマモの生態系機能の解明に対して有効であろう。



図(2)-7 アマモ葉部のクロロフィル蛍光の地点間変異。a. 厚岸湖・厚岸湾における塩分の変動幅の異なる地点において計測したアマモ葉部のクロロフィル蛍光。b. 富津干潟において異なる水深に分布するアマモ葉部のクロロフィル蛍光。

### (3) アマモの元素組成と栄養塩勾配の関係

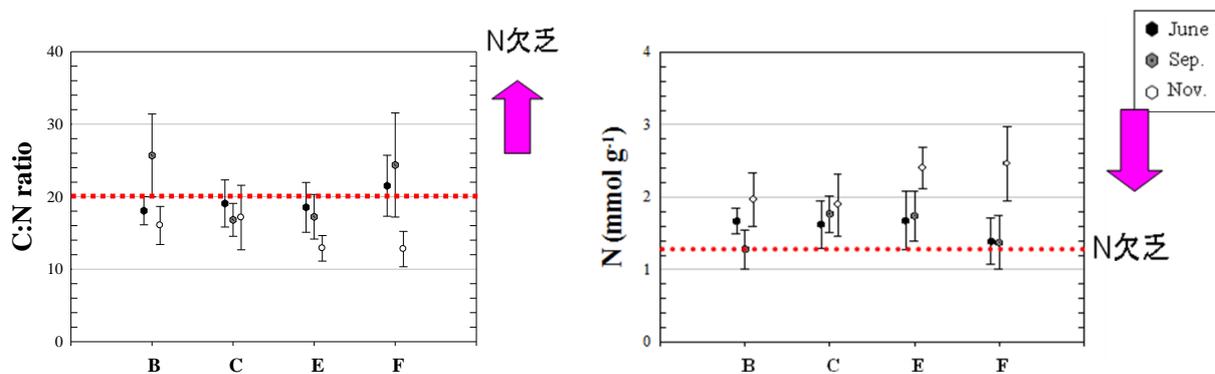
厚岸湖の河口域（B地点）において9月に、最も外洋側（F地点）にて6月と9月にC/N比が20以上の値を示した。一方、窒素含量は閾値である1.3を下回ることにはなかったが、他の地点より低い傾向をしめした（図(2)-8）。各地点ともアマモの生長量は春季に最も大きい値を示すため、アマモの栄養塩要求量も春季に最大になる。台風起因する出水などの非定常状態を除けば、別寒辺牛川を通じた融雪水の影響で、河川を通じた窒素の流入は3月頃が年間を通じて最大である。このことが、生長量が最も大きい春季に河口域で窒素が欠乏していない理由であると考えられる。中央のC地点では、海草の生長量も他の地点より大きく（図(2)-7b参照）、珪藻を主体とする藻類が葉上に大量に付着することが多いにも関わらず窒素の欠乏は認められなかった。河口域から最も遠いF地点においては、夏季だけでなく、春季にも窒素が欠乏することが判明した。

### (4) 各重点調査海域でのアマモ植生・植生内の動物相・魚類相とその現存量の把握

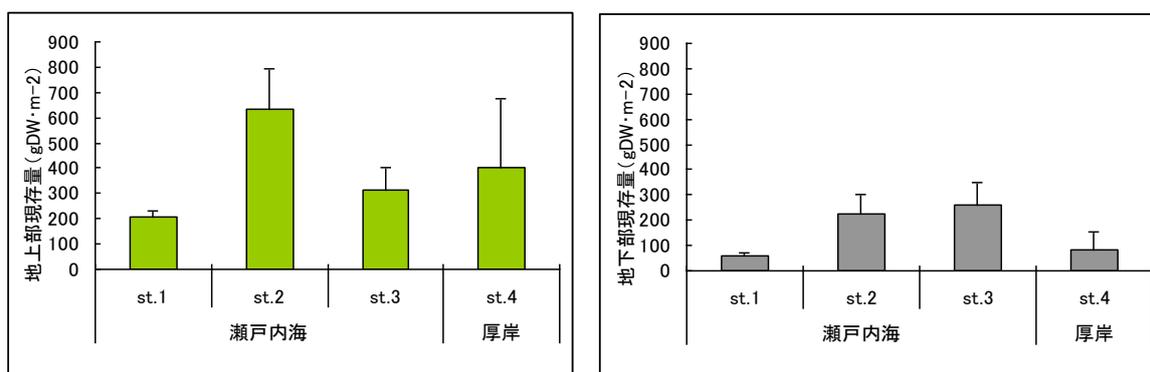
次に、アマモ植生に関する野外調査の結果を図(2)-9および図(2)-10に示す。図中のst. 1は瀬戸内海のアマモの分布水深上限付近(水深推準±0m)の群落、st. 2は瀬戸内海分布水深中心付近（水深基準-1.0～-1.3m）の群落、st. 3はその中間の水深（水深基準-0.5m）の群落であり、st. 4は厚岸湖の分布水深の中心付近の群落である。st. 5およびst. 6については十分なサンプル数が得られなかった

ため、解析から除外した。一般線型モデル解析の結果、現存量においては(図(2)-9)、地上部現存量で地点間に若干の差がある傾向が見られ ( $F=3.619$ ,  $P=0.065$ )、地下部現存量では有意な差が認められた ( $F=6.734$ ,  $P=0.014$ )。ただし、瀬戸内海と厚岸湖といった海域間での差より海域内での差が大きくなった。また、形態形質においては(図(2)-10)、葉長 ( $F=34.02$ ,  $P<0.001$ )、分岐数 ( $F=4.676$ ,  $P=0.036$ )、葉面積 ( $F=18.351$ ,  $P<0.001$ )、で地点間に有意な差が認められ、瀬戸内海では厚岸湖より有意に分岐数が多く、葉長が短く、葉面積が少ないと判断された。

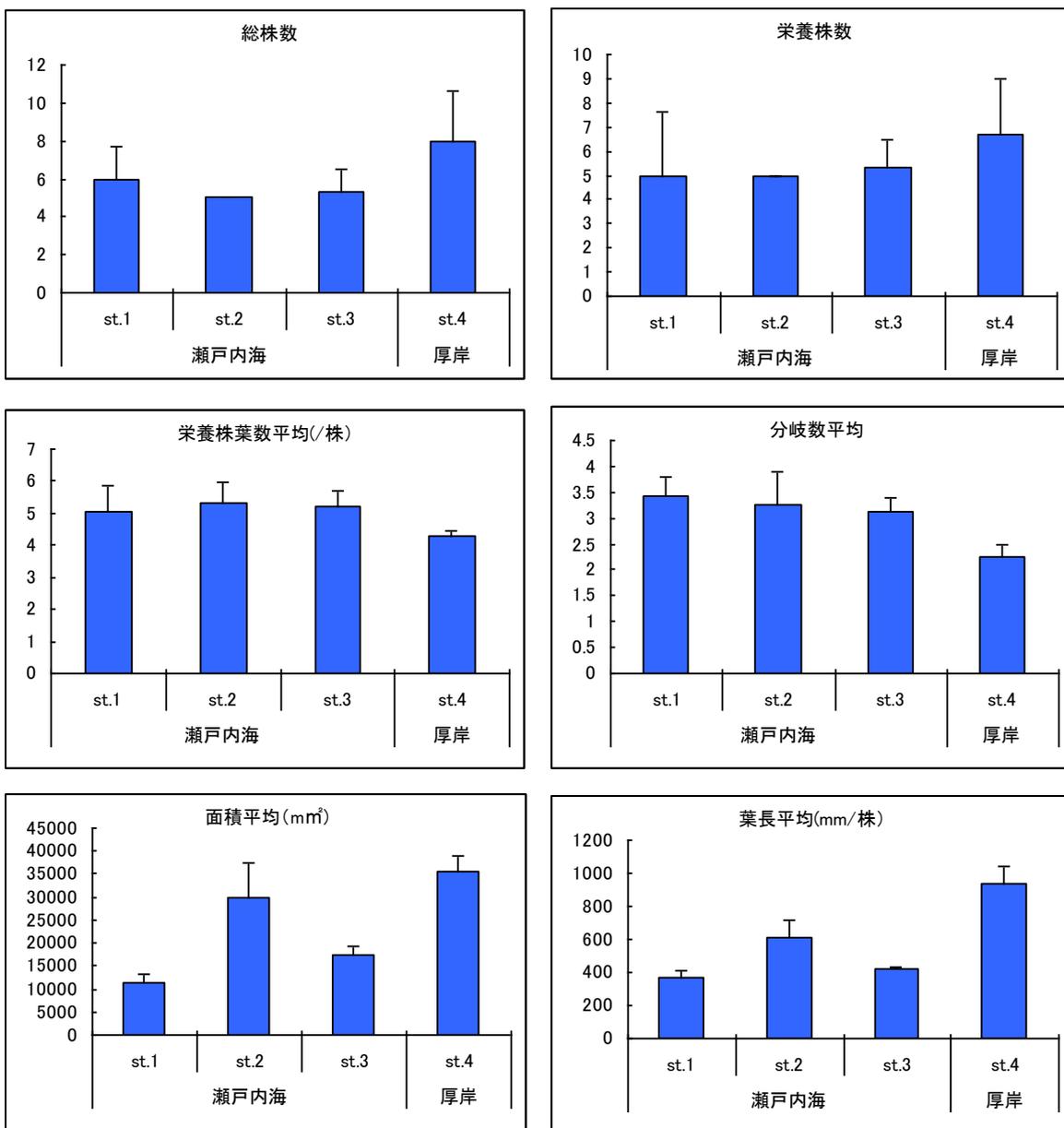
葉上動物 (図(2)-11) と内在性動物に関する同様の予備解析では、すべての変数において地点間に差が見られず、海域間での差より海域内での差が大きい傾向が確認された。魚類における予備解析結果では (図(2)-12)、種数は海域間より海域内の地点間での差が大きい一方で ( $F=14.237$ ,  $P<0.001$ )、現存量は海域間での差が大きかった ( $F=10.006$ ,  $P=0.003$ )。これらの結果は、生物多様性および生態系機能の指標となりうる変数は、栄養段階間で異なる空間スケールの要因によって制限されている可能性を示唆している。



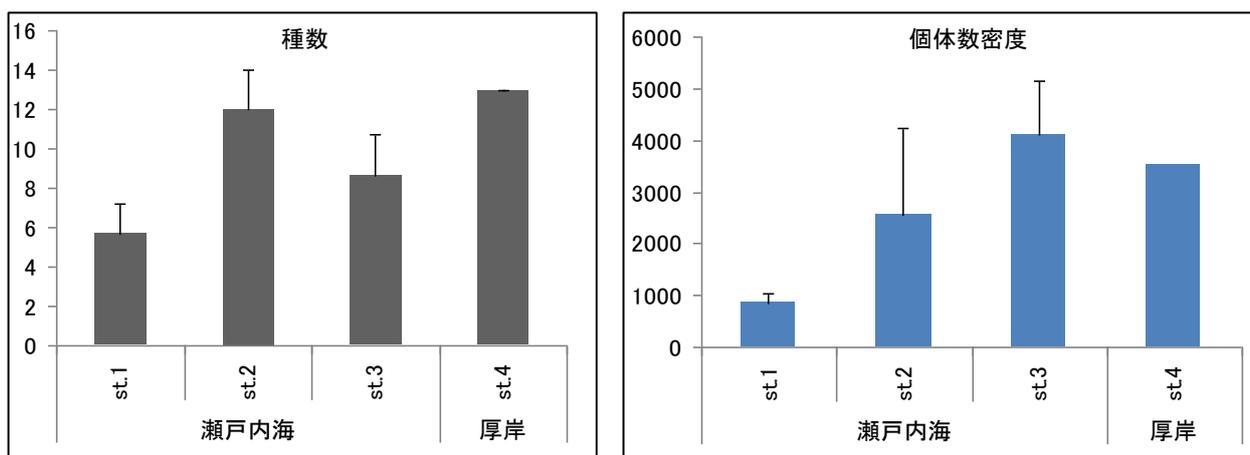
図(2)-8 厚岸湖・厚岸湾におけるアマモのC N比と窒素含有量の時空間変異。



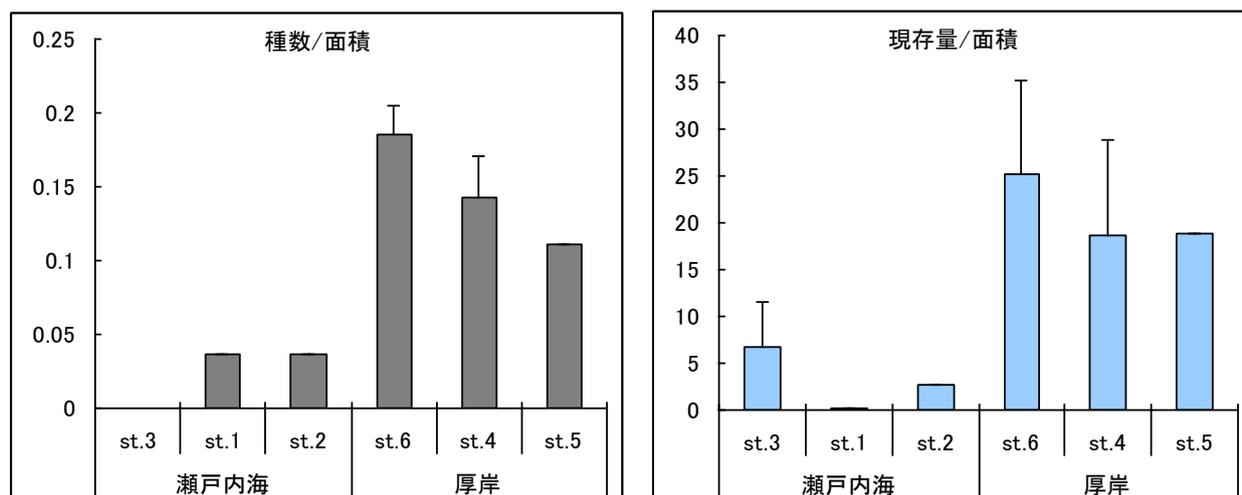
図(2)-9.アマモ地上部および地下部の現存量の地点間比較。



図(2)-10 アマモの形態形質の変数の地点間比較.



図(2)-11 葉上動物群集の種数および個体数密度（個体数・m<sup>-2</sup>）の地点間比較。



図(2)-12 魚類群集の種数（種数・m<sup>-2</sup>）および現存量（gWW・m<sup>-2</sup>）の地点間比較。

また、地点間で各栄養段階の現存量を相対的に評価するためにランク表示した結果を表(2)-1に示す。この結果から4地点の栄養段階構造を相対評価すると、st. 2はアマモが多く、一次消費者および二次消費者が少なく分解者が多いといった、低次生産中心の栄養段階構造をしていると言える。その一方、st. 3ではアマモと分解者は相対的に少ないが一次消費者および二次消費者が多い高次生産中心の栄養段階構造をしていると予測される。また、st. 1およびst. 4はすべての栄養段階が均質に含まれる点は同等であるが、st. 1は全体的に現存量が少ないため脆弱な栄養段階しかもたないことが予測される。一方でst. 4はすべての栄養段階で現存量が多く、頑強な栄養段階構造によって高次生産への健全な食物連鎖が形成されていると予測される。

最後に、予備的に行った変数間の単相関関係の評価結果を表(2)-2に示す。2009年度の予備的調

査で得た少ないデータ数（地点数）での解析にも関わらず、いくつかの変数間で有意な相関が得られた。中でも、アマモの生態系機能の指標値である現存量あるいは形態形質の変数と相関が得られた魚類、葉上動物、内在生動物の変数では、魚類の種の豊度(多様性)が地上部現存量と負の相関を示し、現存量は株数や葉数・分岐数と相関を示した。葉上動物では、種の豊度が葉面積と正の相関を示し、現存量も栄養株数や分岐数、葉長と相関を示した。これらの結果は、複数の栄養段階の多様性を評価軸に用いる場合、一般的に生態系機能の指標として用いられるアマモの現存量や生産量に加えて、形態形質の指標値もデータベースに加える必要性を示唆している。

表(2)-1. 各栄養段階の現存量の相対ランク。1が最も少なく、4が最も多い。

	瀬戸内海			厚岸
	St.1	St.2	St.3	St.4
生産者	1	4	2	3
一次消費者	1	2	4	3
二次消費者	1	2	3	4
分解者	1	3	2	4

表(2)-2. 変数間の単相関関係の結果。赤字が統計的に有意な相関係数を示し、青字は弱い相関傾向を持つ（有意水準で5%以上、10%未満）係数を示している。影部はアマモの生態系機能指標値とアマモ場に生息する動物類・魚類の種多様性および現存量の相関関係を示している。

	アマモ								魚類		葉上動物		内在性動物	
	地上部現存量	地下部現存量	総株数	栄養株数	分岐数	葉数	葉長	葉面積	種豊度	現存量	種豊度	現存量	種豊度	現存量
地上部現存量	1	0.479	-0.698	-0.364	0.287	0.648	-0.255	0.042	<b>-0.947</b>	-0.651	0.213	-0.201	0.956	0.715
地下部現存量		1	-0.233	-0.014	-0.103	0.179	0.436	0.723	-0.444	-0.176	0.776	0.121	0.787	0.982
総株数			1	<b>0.921</b>	-0.881	<b>-0.997 *</b>	0.766	0.485	0.889	<b>0.997 **</b>	0.367	0.839	-0.983	-0.958
栄養株数				1	<b>-0.993 **</b>	<b>-0.945</b>	0.875	0.677	0.639	<b>0.944</b>	0.615	<b>0.984 *</b>	0.367	-0.100
分岐数					1	<b>0.913</b>	<b>-0.917</b>	-0.756	-0.569	<b>-0.912</b>	-0.704	<b>-0.995 **</b>	-0.811	-0.453
葉数						1	-0.805	-0.539	-0.855	<b>-1.000 **</b>	-0.428	-0.875	0.968	0.975
葉長							1	<b>0.934</b>	0.482	0.806	<b>0.874</b>	<b>0.899</b>	0.763	0.974
葉面積								1	0.160	0.541	<b>0.985 *</b>	0.756	0.837	<b>0.995</b>
魚類:種豊度									1	<b>0.816 *</b>	0.001	0.497	<b>-0.989</b>	-0.812
魚類:現存量										1	0.429	0.874	-0.975	-0.969
葉上:種豊度											1	0.720	0.918	<b>0.998 *</b>
葉上:現存量												1	0.798	0.432
内在性:種豊度													1	0.889
内在性:現存量														1

\*\* : 相関係数は1%水準で有意

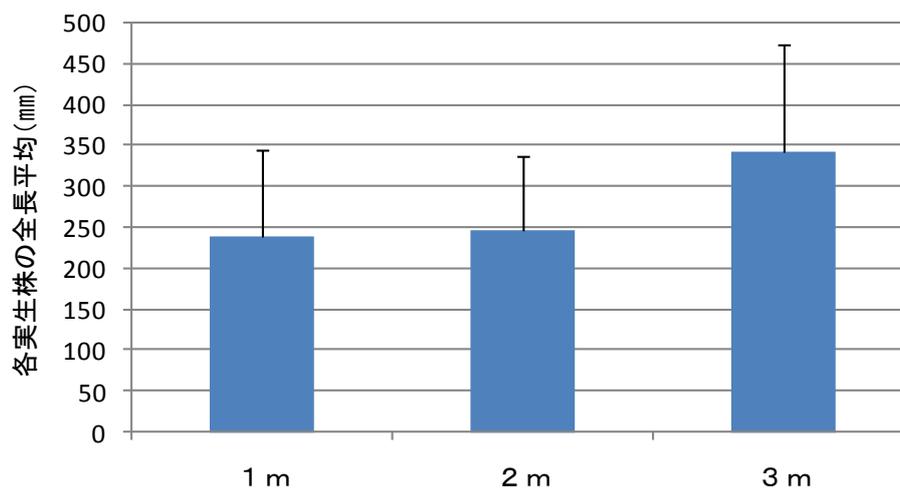
\* : 相関係数は5%水準で有意

2009年度の調査では、データベース入力および統計解析にとって容易なデータ構造とするために、アマモを代表とする一次生産者、葉上動物群集を一次消費者、魚類を二次消費者、内在性動物群集を分解者として4つの栄養段階で栄養段階構造（食物網）を構築したが、この構造であっても変数の評価に特段に支障がなかった。このことから、2010年度以降の生物多様性と生態系機能の関連性の検討では、複数階層での栄養段階モデルの適合を視野にした本調査、本格的解析、および操作実験を継続して行うこととした。

#### （5）アマモ形態形質機能の変異の実験的検証

2010年度は2009年度の結果を反映して形態形質も含めたアマモ群落の生態系機能評価を行うとともに、水温・水深・流速の物理環境勾配とアマモ群落構造との関連を調べるために操作実験を行った。これらの結果では、水温変化に伴う群落構造の変化は確認されなかったが、水深勾配および流速勾配に伴うアマモ群落構造の変化が確認された。また、すべての実験において群落間（潮間帯群落および潮下帯群落）での差は検出されなかったため、現場海域での群落構造の由来に関わらず、実生株は環境に応じて可塑的に群落構造を変化させていたと考えられる。

水深勾配実験においては、2ヶ月後の7月中旬の計測データにおいて分岐数、株数に水深間で差が確認されなかったものの、各実生株の全長において注目すべき変異があり、統計的には有意な差ではないが水深3mの実験株が他の水深に比べて大きくなる傾向が確認された（図(2)-13）。残念ながら、この後8月上旬に発生した高温水塊の影響によりすべての実験株が枯死してしまったため、その後の計測は行えなかった。



図(2)-13 実験開始から2ヶ月後の水深別の実生株の全長平均（平均値+標準偏差）。

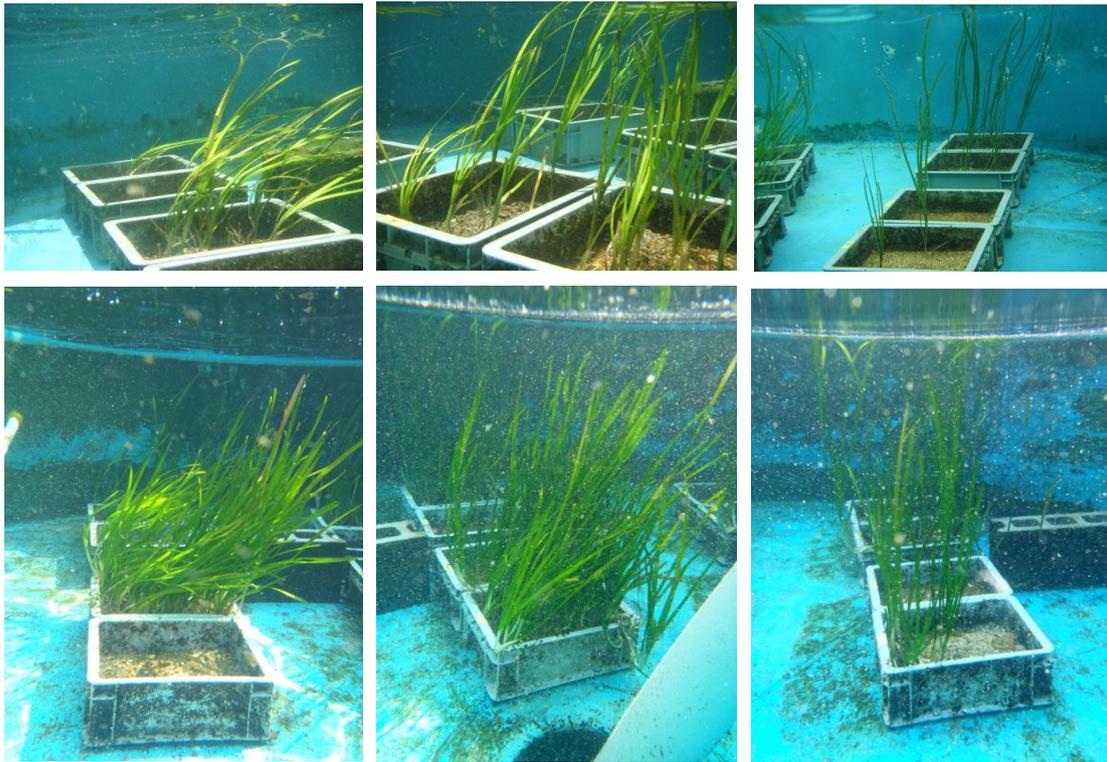
流速勾配実験においては、各流速条件下の実験株間で群落構造に大きな変異が確認された（図

(2)-14)。群落構造パラメータのうち、分岐数は統計的に有意な差は検出されなかったが、中程度の流速条件下で分岐数が少なくなる傾向が確認された(図(2)-15)。他の群落構造パラメータでは、株数、実生株全長、葉幅のすべてのパラメータにおいて有意な変異が観察され(株数:  $F=5.992$ 、 $P=0.037$ 、 $r^2=0.666$ 、実生株の全長:  $F=8.500$ 、 $P=0.018$ 、 $r^2=0.739$ 、葉幅:  $F=18.492$ 、 $P=0.003$ 、 $r^2=0.860$ )、一番弱い流速条件下で有意に全長が大きく、株数が少なく、葉幅が大きくなっていた。これらの結果を総合的に解釈すると、強い流速条件下では全長が小さく葉が細い形態を示すが株数が多くなる群落構造になり、弱い流速条件下では全長が大きく葉が太い形態で株数が少ない群落構造になると言える。

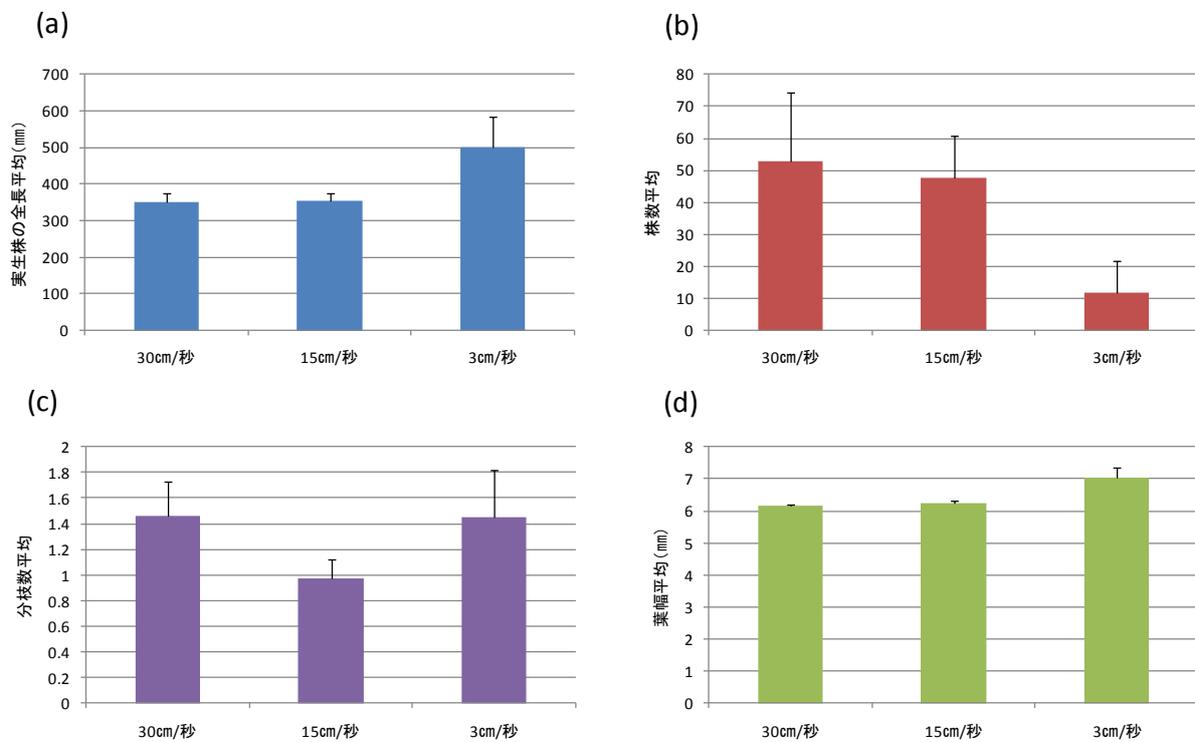
この群落構造の変異による魚類群集への影響については、他の研究課題において、本サブテーマ担当者により詳細な操作実験が行われた<sup>23)</sup>。その研究では全長が小さく株数の多い群落構造を示すアマモ群落と全長が大きく株数の少ないアマモ群落を比較し、各群落での魚類生産量の変異を検証している。各群落を別々の屋外実験水槽内に設置し、同じ量・種組成の無脊椎動物群集を投入して順致した後、アマモ場に生息する魚類の代表種であるメバルを投入して無給時による成長量を測定した結果、全長の大きい群落では有意に無脊椎動物の種多様性が高い状態で維持され、メバルの成長量も大きくなる結果が得られていた。また、本課題と同様の手法を用い、全国のアマモ場を対象としたアマモ群落構造と魚類群集の関係解析では、全長が小さく株数が多い群落を好む魚種と、全長が大きく株数が少ない群落を好む魚種があり、そのため双方の群落構造が同時に形成されるアマモ場で魚類群集の多様性が高くなることが予測されている。したがって、これらの既存知見と本課題の実験結果を統合的に解釈すると、全長が小さく株数の多い群落と全長が大きく株数の少ない群落の双方が形成されるような大きな流速・水深環境勾配を持ったアマモ場が高次消費者まで含めた生物多様性の保持に重要であること、少なくとも弱い流速環境下では小型無脊椎動物群集の高い多様性が維持され、いくつかの魚種にとっても好適な生息環境を提供すると考えられる。ただし、全長が小さいアマモ群落の生物多様性への寄与は、全長が大きい群落と比較して相対的に低いというだけであり、アマモ場が成立していない場所と比較すれば、全長が小さいアマモ場が圧倒的に高い生物多様性への寄与を示している。

#### (6) アマモ植生構造と魚類群集の関連性解析

次に、各重点調査海域の各調査点で採集したサンプルを用いて分析したアマモ群落構造と魚類群集構造の関係に関する結果を示す。以下の結果では、アマモの群落構造のパラメータを単純化させるために、2010年度の解析により指標値として有効であることが示され、さらに2010年度の操作実験で物理環境勾配に伴い明瞭な変化を示した株全長および株密度の2つのパラメータに限定した。また魚類の現存量については、魚種によって好むアマモ群落構造が異なることから(図(2)-16)、出現魚種の生息場所の違いから底魚類(底層魚)、葉上魚類(中層魚)、浮魚類(表層魚)の3タイプに分類して評価した<sup>24)</sup>。まず厚岸湖での魚類群集全体とアマモ群落構造との関係では、群落の株数が多くなるほど魚類群集の多様性が減少する傾向(Spearman's rank correlation:  $r=-0.570$ )、および株平均全長が大きいほど魚類全体の現存量が減少する傾向が確認された( $r=-0.564$ )。



図(2)-14 各流速条件下（左：30cm/秒、中央：15cm/秒、右：3cm/秒）における実験株の群落構造．上段：実験開始から2ヶ月後、下段：6ヶ月後を示す（撮影のために流速を少し弱めている）。



図(2)-15 流速勾配実験における各流速条件下の実験株の群落構造パラメータ．(a)実生株全長、(b)株数、(c)分岐数、および(d)葉幅。



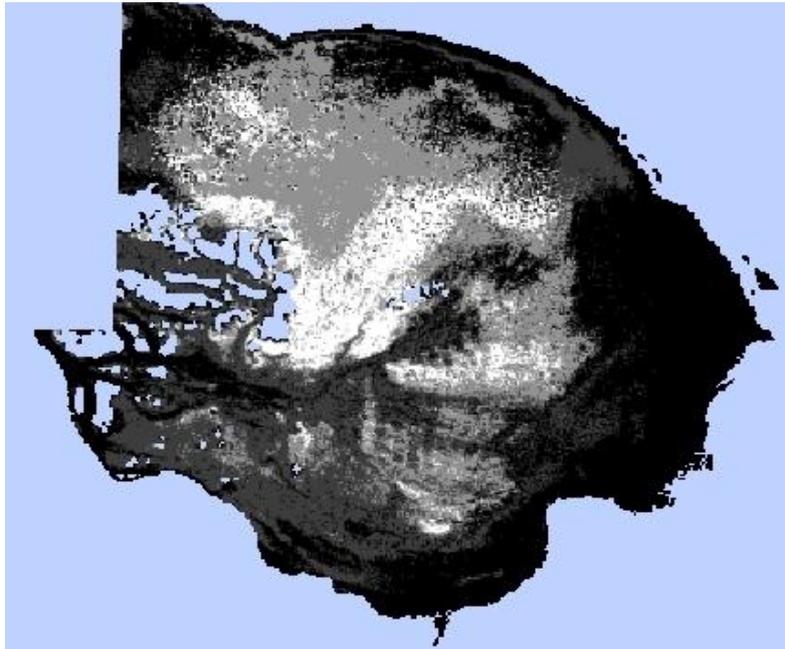
図(2)-16. アマモ場の植生構造と出現魚種の主要タイプとの関係を示す模式図.

個々の魚種タイプで見ると、底魚類の現存量は群落構造に関係なくすべての調査点に多く、そのため群落パラメータとの有意な相関は得られなかったが、全体現存量と正の相関関係にあった ( $r=0.648$ )。その一方で葉上魚類の現存量は株全長と正の相関があり ( $r=0.576$ )、全体種数とも正の相関をも有していた ( $r=0.698$ )。また、浮魚類も全体種数と正の相関を有していたことから ( $r=0.627$ )、おそらくこの2タイプの魚類の出現が魚類群集全体の種多様性の空間分布を制限していると考えられる。

これらの結果を総合的に解釈すると、厚岸湖では魚類全体に占める底魚類の割合が大きいことに加えて、全長が大きく株密度が小さい群落が形成されている場所でのみ、底魚類に加えて葉上魚類と浮魚類が出現し、その結果として多様性が高くなっていることが示唆される。そのため厚岸湖の魚類群集の分布は、全長の小さい群落の分布域に相当する底魚類のみの分布域と、全長の大きい群落の分布域に相当する魚類群集全体の分布域の2タイプとして単純に表すことができると考えられる。そこで、サブテーマ(1)で作成されたデータベースを用い、この魚類群集の分布を模式的に示した結果を図(2)-17に示した。

データベースから利用した厚岸湖の藻場分布図はアマモの被度をランクで示しており、このランクと株全長間に正の相関が確認されたため、この関係式を用いた空間外挿により被度分布から株全長分布を作成した。その分布図を用い、魚類相と株全長の関係式により魚類相の空間外挿を行った。その結果、厚岸湖中央部に葉上魚類が優占する株全長の大きい分布域が形成され、周囲に底魚類中心の分布域が形成されており、その中間域がすべての魚種が出現する分布域、すなわち多様性の高い分布域が集中する結果となった。つづいて、富津干潟において厚岸湖と同様の解析を行った結果、残念ながら魚類群集全体でも、個々の魚種タイプにおいても、アマモ群落構造との有意な関係は見出されなかった。富津干潟では海岸線に垂直方向に明瞭な水深勾配があり、また水平方向に流速勾配があるため、群落構造の場所間での変異は他の2海域と同等程度生じている。そのため、群落構造の変異が小さい等は、有意な関係が得られない原因とならないと思われる。また、魚類群集の多様性は3海域のうち最も高く、現存量も厚岸湖には及ばないものの安芸灘生野島より圧倒的に多く採集されているので、アマモ場を利用する魚類が少ないために関係が見

いだせないわけではないと思われる。その他の原因としては、厚岸湖の魚類群集は成魚と稚魚の双方が含まれていたのに対し、富津干潟の魚類群集の殆どが利那的に藻場を利用する稚魚類であったために、群落構造への特殊化が小さく、結果的に藻場をランダムに利用しているかもしれないこと、富津干潟には隣接して別種のタチアマモがさらに広大な群落構造を形成しており、他の海域との比較のためにアマモの単一藻場での群落構造調査に限定したため、その影響を加味していないなどが考えられるが、的確な理由は不明である。この原因究明も含め、今後も引き続き精査する必要がある。



図(2)-17 魚類群集多様性の空間外挿の試行例。底生魚類と浮魚類が好む形態を有するアマモ植生ほど黒色が強く、葉上魚類が好む形態を有するアマモ植生ほど白色が強く示してある。

最後に安芸灘生野島での解析の結果、富津干潟と同様に魚類群集全体でも、個々の魚種タイプにおいてもアマモ群落構造との有意な関係は見出されなかった。本海域の魚類群集はアマモ群落を生息場所として利用する葉上魚類が大半を占め、魚類群集全体の現存量及び種数は葉上魚類現存量と正の相関を示していた（種数： $r=0.842$ 、現存量： $r=0.941$ ）。そのため、群落構造との関連が期待された海域であった。今後も富津干潟と同様に調査点を増やすなど精査を行い、群落構造と生物多様性の関係の解明を行う予定である。

結論として、2010年度の成果により、いくつかの海域において物理環境勾配とアマモ群落構造の関係およびアマモ群落構造と生物多様性の関係を示すことができた。このことから、アマモ群落構造によって生態系機能と生物多様性を空間外挿できる可能性が示されたと考えられる。そこで2011年度は、まず2010年度に関係が見いだせなかった東京湾海域および瀬戸内海域でも再解析・再調査により物理環境勾配、アマモ群落構造、生態系機能、生物多様性の4つの要因の関係

についてさらなる精査を行い、可能な限り現実的かつ詳細な空間外挿手法を完成させることとした。

#### (7) アマモ形態形質機能の継代可塑性に関する実験的検証

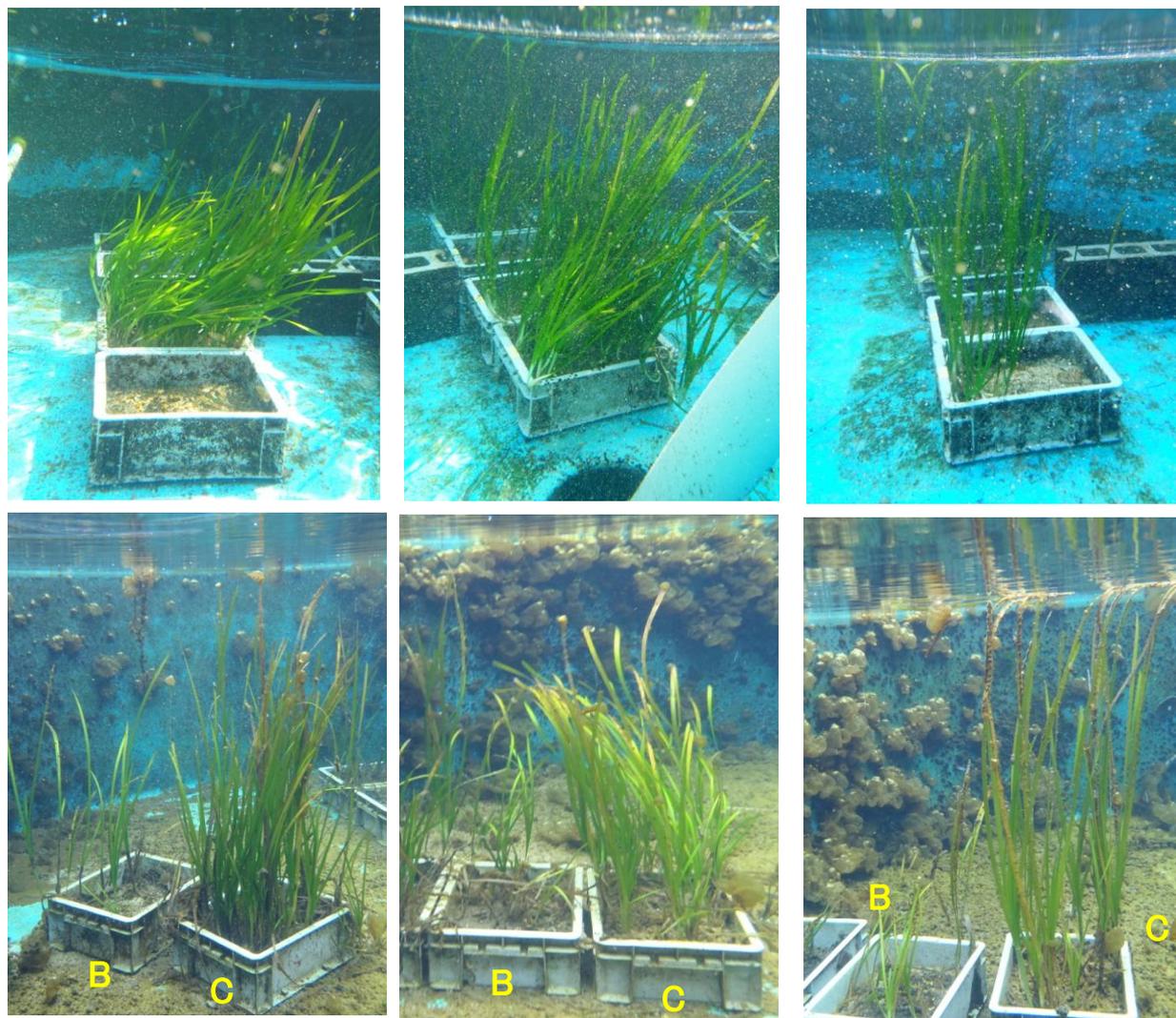
2011年度の結果では、まず流速勾配実験においては、潮下帯から採集された実生株では、前年度の株が脱落し、コンテナ内の株のほとんどが新しい株に生え換わったにも関わらず、前年度の結果と同様に各流速条件間で構造に大きな変異が確認された(図(2)-18)。流速が最も早い群落では株密度が大きく、草丈が短く、葉幅が細くなる傾向があり、流速が遅くなるにつれて株密度が小さく、草丈が長く、葉幅が太くなる傾向が確認された。その一方で、潮間帯から採集された実生株では、すべての流速条件下で小型化し、株密度も小さくなっており、各流速条件下で有意な差が見られなくなっていた。

一般に、同所的に存在するアマモであっても、潮間帯に分布する草体と潮下帯に分布する草体では、干潮時のストレスなど草体にかかる物理環境が大きく異なることから、遺伝的に異なる発現をしていることが検証されつつある。この実験では流速を操作する制約上、潮汐の干満は再現しておらず、常に草体が水面下となるようになっている。生野島の潮間帯株も既存文献と同様に潮間帯の環境条件に対して遺伝的に適応している場合、常に水面下におかれるといった実験条件は潮間帯株にとってストレスになっていた可能性が考えられる。この潮間帯由来の株と潮下帯由来の株間での形態形質変化の違いは、アマモ場の保全上重要な知見であることから、今後の課題としてさらに詳細な検証を行う必要がある。

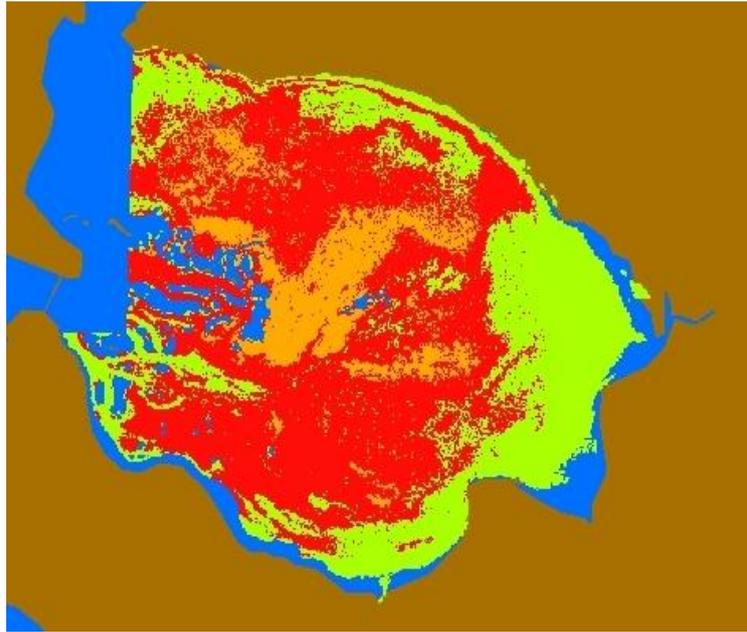
#### (8) 動物群集多様性の広域分布評価

次に、2011年度の各重点調査海域の各調査地点における詳細な再調査で明らかとなったアマモ群落構造と魚類群集構造の関係に関する結果を示す。以下の結果では、アマモの群落構造のパラメータを単純化させるために、2010年度の解析により指標値として有効であることが示された株全長(草丈)および株密度の2つのパラメータに限定し、また水深および他の物理環境パラメータもすべて統合した総合パラメータとした。また魚類の現存量については、魚種によって好むアマモ群落構造が異なることから、2010年度と同様に出現魚種の生息場所の違いから底魚類、中層(葉上)魚類、浮魚類の3タイプに分類して評価している。まず、厚岸湖での魚類採集の結果では、種組成・現存量とも2010年度と類似した結果が得られたため、アマモ群落と魚類群集構造との関係は2010年度・2011年度間で変化していないことが明らかとなった(図(2)-19)。

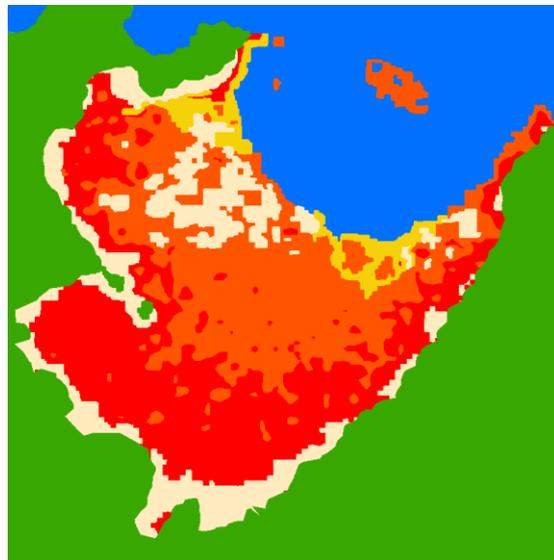
次に安芸灘生野島での解析の結果、群落の株数が多くなるほど魚類群集の多様性と現存量が減少する傾向が得られた( $r = -0.780$ (多様性),  $r = -0.651$ (現存量))。また、中層魚類の現存量は草丈と正の関係が得られた( $r = 0.413$ )。そこで、サブテーマ1で作成されたデータベースを用い、この魚類群集の分布を模式的に示した結果を図(2)-20に示した。湾奥部の株密度が高い海域ほど魚類が殆ど出現せず、湾口部になるほど魚類相の現存量が多く、すべての魚類が出現する多様性の高い分布域が形成される結果となった。



図(2)-18 流速勾配実験の各流速条件下（左：30cm/秒、中央：15cm/秒、右：3cm/秒）における実験株の群落構造．上段：実験開始から6ヶ月後の草体，下段：実験開始から20ヶ月後の草体（B:潮間帯由来株，C：潮下帯由来株）．最も弱い流速条件下では葉が水面にたなびいているのに対し、最も強い流速条件下では葉が水面まで到達していない．

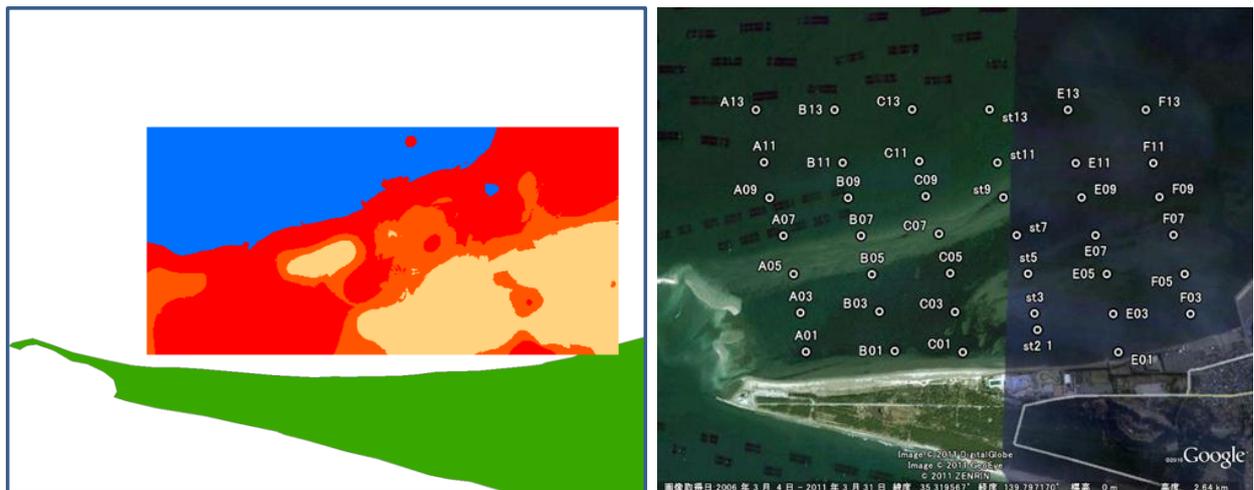


図(2)-19 北海道東部・厚岸湖での魚類群集多様性の空間内挿の結果。底生魚類と表層魚類が優占するアマモ群落（黄緑色），中層魚類が優占するアマモ群落（橙色），およびすべての魚類が出現する多様性の高いアマモ群落（赤色）を示す。



図(2)-20 瀬戸内海・安芸灘生野島での魚類群集多様性の空間内挿の結果。ごくわずかな底生魚類が出現する裸地（肌色），魚類が殆ど出現しないアマモ群落（赤色），中層魚類が優占するアマモ群落（橙色），およびすべての魚類が出現する多様性の高いアマモ群落（黄色）を示す。

最後に富津海域での共分散構造解析の結果では、アマモ群落構造・物理環境の統合パラメータと魚類群集間で有意な強い関係は得られなかったものの、中層魚類が株全長と正の関係を有しており、底生魚類はアマモの有無に関係なく広域に分布する傾向が得られた。そこでこれらの関係を用い、他海域と同様にサブテーマ1で作成されたデータベースから広域分布図を作成した（図(2)-21）。富津干潟は砂州が大きく発達しており、砂州上では水深が浅くアマモも分布しないため殆ど魚類が出現せず、次いでその周囲のアマモ群落の草丈が高くなる海域で中層魚類が優先する魚類群集となり、さらに水深の増加に伴いすべての魚類群集が出現するアマモ群落が続き、さらに水深が増加するとアマモが分布せず、底生魚類だけが出現する結果となった。



図(2)-21 東京湾・富津干潟での魚類群集多様性の空間内挿の結果。魚類が殆ど出現しない砂州（肌色），中層魚が優占するアマモ群落（橙色），すべての魚類が出現する多様性の高いアマモ群落（赤色），および底生魚類が少数出現するアマモが分布しない海域（水色）を示す。

このように、富津海域については強い関係は得られなかったものの、すべての重点海域でアマモ群落構造から食物網を介して高次消費者まで予測が可能であることが示唆された。本サブテーマの成果により、リモートセンシングを用いた広域なアマモ場の空間分布と群落構造のモニタリングを継続することで、アマモ場の生物多様性と生態系機能を予測する基盤を提供できると考えている。これらの結果はすべてサブテーマ1で行う統合解析に提供した。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

アマモの機能評価について、生長量の実測、Diving-PAMによるクロロフィル蛍光の測定、葉部試料の元素分析など、反応様式および時間スケールの異なる測定法を組み合わせた解析法の有効性を示すことができた。各方法には精度および測定効率の面で利点と欠点があるため、研究の目的に応じて観測項目を調整することが必要である。特に、本課題のような生態系機能の広域評価に利用する場合は、Diving-PAMなどの簡易手法を多数の点で行う一方、解析に時間のかかる生長

量の実測および元素分析を特定の重要な調査点で併用して行う方法が推奨される。本サブテーマで検討された複合的な方法は、特に環境勾配に伴うアマモ場の劣化の判定、すなわち「アマモ場の健康診断」のツールとして広く適用できることが期待される。

陸上植物では環境の変化に対して草体の形態や生活史形質が変化したり、あるいは環境の微弱な変動であってもフェノロジーの変化が生じることで生物間相互作用の変化が生じ、関わりを持つ多くの他の生物に少なからずの影響を及ぼすことが言われている。アマモは約1億年前に陸上から沿岸海洋域に回帰した顕花植物であり、陸上植物と同様に、環境の変化に対して敏感に形質を変化させる可塑性を有している。現に同所的に存在している場合でも分布水深によって異なる環境耐性が働くこと<sup>25)</sup>、それにより形態を変化させることが報告されている<sup>26)</sup>。本研究の成果では、アマモ場に生息する魚類・動物類の多様性や現存量はアマモの現存量よりも形態形質と相関することが示された。このことは、アマモの形態変化に伴って、アマモ場に生息する生物も何らかの影響を受けうることを暗示している。一般に形態形質の介した生物間相互作用は現存量や密度を介した通常の生物間相互作用よりも迅速に変化が生じるため<sup>27)</sup>、その影響は即座に他の生物へ影響を及ぼすことが懸念される。このような迅速な作用による他生物への影響に関して陸上生態系や湖沼生態系ではすでに報告されており、その深刻さに関する議論と研究が行われている<sup>28,29)</sup>。本研究の成果は沿岸生態系においても同様の懸念が必要とされることを示している。近年では温暖化に代表される地球規模での環境変動が進むにつれ、環境変動が沿岸生態系に及ぼす影響に対して社会的関心が集まりつつある。本研究を進めることで、その影響の一端を解明することに貢献できると考えている。

## (2) 環境政策への貢献

平成21～23年度環境省重要生態系監視モニタリング推進事業・沿岸域調査（アマモ場）において、本研究成果に基づいたモニタリング項目の設定および調査を行い、その推進に貢献した。また、平成21～23年度水産庁地球温暖化対策推進費委託事業「藻場・干潟の炭素吸収源評価と吸収機能向上技術の開発」において、本研究のサブテーマ1からサブテーマ2までの成果を集約した手法をアマモ場の生態系機能の広域調査に応用し、その推進に貢献した。以上の環境政策に関する事業は平成24年度も継続して行う予定になっており、次年度も本格的調査を進めることでより詳細かつ的確な成果をあげ、環境省・水産庁の藻場に関する事業・ワークショップ等や学会発表・論文発表を通じ、成果の広報・普及に努めたい。

## 6. 国際共同研究等の状況

「アマモ実験ネットワーク (Zostera Experimental Network)」

国際共同研究プロジェクト「アマモ実験ネットワーク (Zostera Experimental Network)」

研究代表者：Emmett J. Duffy (Virginia Institute of Marine Science)

研究概要：北半球温帯域の浅海域に普遍的に分布するアマモ場を対象に、世界各地で共通の野外操作実験を行うことにより、アマモ場の生物群集と生態系プロセスの一般性の解明を目指す。

参加・連携状況：本プロジェクトは世界の代表的なアマモ場十数地点を対象とするが、北西太平洋沿岸海域の拠点として、本プロジェクトの担当者である仲岡（サブテーマ1）と堀（サブテーマ2）が平成23年度より参加している。実験は、本課題の対象域（厚岸湖と瀬戸内海西部）の

アマモ場で行い、本課題のデータベースに集積したデータも利用している。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 堀正和・吉田吾郎・島袋寛盛・仲岡雅裕・浜口昌巳：平成21年度水産工学関係研究開発推進特別部会水産基盤分科会誌,47-53 (2010)  
「沿岸域の景観構造と魚類生産の関係評価：魚類の空間分布からのアプローチ」
- 2) 松田裕之・堀正和：日本の科学者，日本科学者会議，45，10，546-551 (2010)  
「特集：生物多様性と生態系サービスの論点 - 海洋・沿岸域の生物多様性」

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) M. Hori, Y. Tanaka, T. Miyajima, G. Yoshida, M. Hamaguchi : Coastal and Estuarine Research Federation 2009 Biannual meeting, Portland, U.S.A., 2009  
“Landscape diversity enhances secondary production of the associated community in seagrass/algal beds”
- 2) M. Nakaoka, M. Hori : Coastal and Estuarine Research Federation 2009 Biannual meeting, Portland, U.S.A., 2009  
“The linkage between biodiversity and ecosystem functions: regional perspectives”
- 3) 堀正和・吉田吾郎・島袋寛盛・山田勝雅: 第12回環境リモートセンシングシンポジウム(2010)  
「沿岸海洋景観のGISデータベースの構築：衛星画像を用いた藻場生態系の生態系機能評価」
- 4) Hori, M., T. Yamakita, K. Watanabe, G. Yoshida, M. Hamaguchi, and M. Nakaoka: World Seagrass Conference 2010, Phuket, Thailand 2010  
“Landscape analysis of the relationship between fish and seagrass spatial distribution associated with adjacent habitats”
- 5) M. Nakaoka, M. Hori, Y. Tanaka, H. Mukai, K. Yokoi, T. Inoue and M. Fujita: World Seagrass Conference 2010, Phuket, Thailand 2010  
“Monitoring sites 1000: A nationwide long-term monitoring of seagrass beds in Japan”
- 6) 堀 正和・島袋寛盛: 全国アマモサミット2010「海のゆりかご」の再生を目指して 鹿児島2010  
“西日本のアマモ場とその生産機構-アマモ場の分布と機能評価に関する話題を中心に-“
- 7) M. Hori, Y. Tanaka, T. Miyajima, G. Yoshida, M. Hamaguchi: Vulnerability of coastal ecosystems to global change and extreme events, Biarritz, France, 2011  
“Effects of coastal seascape diversity on seagrass-associated fish production.”
- 8) M. Hori, T. Yamakita, K. Watanabe, G. Yoshida, H. Sudo : East Asian Federation of Ecological Societies 5th International congress, Otsu, Japan, 2012

“Spatial classification of the suitable coastal seascape structure for fish species“

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

- 1) 田中義幸：第3回海洋環境モニター報告会、むつ市制施行50周年・合併5周年記念事業、特別講演、むつ来さまい館（2010）  
「環境と海草分布の現状」

8. 引用文献

- 1) Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburge, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- 2) Koch, E.W., J.D. Ackerman, J. Verduin and M. van Keulen. 2006. Fluid dynamics in seagrass ecology-from molecules to ecosystem. In *Seagrasses: biology, Ecology and Conservation*, eds. A.W.D. Larkum, R.J. Orth and C.M. Duarte, Springer, Dordrecht, 193-225.
- 3) Hasegawa, N., M. Hori and H. Mukai. 2008. Seasonal changes in eelgrass functions: current velocity reduction, prevention of sediment resuspension, and control of sediment-water column nutrient flux in relation to eelgrass dynamics. *Hydrobiologia* 596: 387-399.
- 4) Nellemann, C., E. Corcoran, C.M. Duarte, L. Valdes, C. DeYoung, L. Fonseca and G. Grimsditch. 2009. *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no, Birkeland Trykkeri, Norway.
- 5) Miyajima, T., Y. Tanaka, Y. Tsuboi and I. Koike. 2007. A preliminary study on carbon isotopic composition of bulk sediment and individual fatty acids extracted from tropical seagrass-bed sediments with various influence of river-borne detrital organic matter. In *Evaluation of Ecosystem function of Coastal Areas based on Biodiversity of Tropical Seagrass Beds*, ed. M. Nakaoka, Chiba University, Chiba, 18-29
- 6) Hemminga, M.A. and C.M. Duarte. 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 7) Williams, S.L. and K.L. Heck, Jr. 2001. Seagrass community ecology. In *Marine Community Ecology*, eds. M.D. Bertness, S.D. Gaines and M.E. Hay, Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 317-338.

- 8) Larkum, A.W.D., R.J. Orth and C.M. Duarte. 2007. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- 9) 渡辺雅子・仲岡雅裕. 2000. 海草の分布と生産に影響を与える環境要因・生物学的要因. 海洋と生物 (生物研究社) **131**: 533-541
- 10) Yabe, T., I. Ikushima, and T. Tsuchiya. 1995. Production and population ecology of *Phyllospadix iwatensis* Makino. I. Leaf growth and biomass in an intertidal zone. *Ecol. Res.* **10**: 291-299.
- 11) Yabe, T., I. Ikushima and T. Tsuchiya. 1996. Production and population ecology of *Phyllospadix iwatensis* Makino. II. Comparative studies on leaf characteristics, foliage structure and biomass change in an intertidal and subtidal zone. *Ecol. Res.* **11**: 291-297.
- 12) Björk, M., J. Uku, A. Weil and S. Beer. 1999. Photosynthetic tolerances to desiccation of tropical intertidal seagrasses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **191**, 121-126.
- 13) Tanaka, Y., M. Nakaoka. 2004. Emergence stresses and morphological constraints affect the species distribution and growth of subtropical intertidal seagrasses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **284**: 117-131.
- 14) Tanaka, Y. and M. Nakaoka. 2007. Interspecific variation in photosynthesis and respiration balance of three seagrasses in relation to light availability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **350**: 63-70.
- 15) Umezawa, Y., T. Miyajima, M. Yamamuro, H. Kayanne and I. Koike. 2002. Fine-scale mapping of land-derived nitrogen in coral reefs by  $\delta^{15}\text{N}$  in macroalgae. *Limnol. Oceanogr.* **47**: 1405-1416.
- 16) Dennison, W.C. and R.S. Alberte. 1982. Photosynthetic responses of *Zostera marina* L. (eelgrass) to *in situ* manipulations of light intensity. *Oecologia*, **55**, 137-144
- 17) Ralph, P.J. and F.T. Short. 2002. Impact of the wasting disease pathogen, *Labyrinthula zosterae*, on the photobiology of eelgrass *Zostera marina*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **226**: 265-271.
- 18) Duarte, C.M. 1990. Seagrass nutrient content. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **67**, 201-207
- 19) Duarte, C.M. 1992. Nutrient Concentration of Aquatic Plants: Patterns Across Species. *Limnol. Oceanogr.* **37**: 882-889.
- 20) 島袋寛盛・堀正和・仲岡雅裕ほか7名. 2012. 鹿児島湾に生育する一年生アマモ局所個体群間の遺伝的文化. 日本水産学会誌 **78**: 204-211.
- 21) Gaeckle, J.L., F.T. Short, S.E. Ibarra-Obando and A.E. Meling-Lo'pez. 2006. Sheath length as a monitoring tool for calculating leaf growth in eelgrass (*Zostera marina* L). *Aquat. Bot.* **84**: 226-232.
- 22) Y. Tanaka, Y., T. Miyajima, K. Yamada, M. Hori, N. Hasegawa, Y. Umezawa and I. Koike. 2008. Specific growth rate as a determinant of the carbon isotope composition of the temperate seagrass *Zostera marina*. *Aquat. Bot.* **89**: 331-336.
- 23) 堀正和・吉田吾郎・浜口昌巳. 2009. 内海域藻場の生物群集構造解析ならびに生態系機能評価. 水産庁「藻場資源調査等推進事業」成果報告書, 独立行政法人水産総合研究センター, 15-22.
- 24) Hori, M., T. Suzuki, Y. Monthum, T. Srisombat, Y. Tanaka, M. Nakaoka, and H. Mukai. 2009. High seagrass diversity and canopy-height increase associated fish diversity and abundance. *Marine Biology* **156**:1447-1458.
- 25) Oetjen, K. and T.B.H. Reusch. 2007. Genome scans detect consistent divergent selection among

subtidal vs. intertidal populations of the marine angiosperm *Zostera marina*. *Molecular Ecology* 16: 5156-5167.

- 26) 吉田吾郎・堀正和・浜口昌巳・星加章・高杉由夫・谷本照己. 2007. アマモ場の生態的特徴と機能に関する調査. 水産庁委託「生物多様性に配慮したアマモ場造成技術開発調査事業：アマモ類の遺伝的多様性の解析調査」最終報告書、独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所、197-218.
- 27) 堀正和. 2009. 相互作用の変異性と群集動態. シリーズ群集生態学 3：生物間ネットワークを紐とく（大串隆之・近藤倫生・難波利幸編）、京都大学学術出版会、93-122.
- 28) 工藤岳. 2008. ランドスケープフェノロジー - 植物の季節性を介した生物間相互作用. シリーズ群集生態学 4：生態系と群集をむすぶ（大串隆之・近藤倫生・仲岡雅裕編）、京都大学学術出版会、147-178.
- 29) 土居秀幸. 2008. 生物群集が支える湖沼生態系の物質循環. シリーズ群集生態学 4：生態系と群集をむすぶ（大串隆之・近藤倫生・仲岡雅裕編）、京都大学学術出版会、29-54.

## **Establishment of Monitoring System of Seagrass Beds by GIS Database Integrating Field Census Data**

Principal Investigator: Masahiro NAKAOKA

Institution: Akkeshi Marine Station, Field Science Center for Northern Biosphere,  
Hokkaido University  
Aikappu 1, Akkeshi, Hokkaido 088-1113, Japan  
Tel: +81-153-52-2056 / Fax: +81-153-52-2042  
E-mail: nakaoka@fsc.hokudai.ac.jp

Cooperated by: National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea,  
Fisheries Research Agency

[Abstract]

Key Words: Coastal ecosystem, Remote sensing, Geographic information system, Biodiversity, Ecosystem function

The present research project aims to develop and establish an integrated monitoring and evaluation system for major seagrass beds in coastal areas of Japan by combination of field census and remote sensing (RS) /geographical information system (GIS). To achieve this goal, we (1) established a broad-scale information database of seagrass beds, and (2) analyzed relationships between biodiversity and ecosystem functions of seagrass beds.

The database is designed to contain field data on seagrass beds at different spatial scales. Using the obtained data, we analyzed the spatial variability of seagrass vegetation within heterogeneous seagrass beds in Tokyo Bay (Futtsu) and Eastern Hokkaido (Akkeshi-ko estuary). The patterns of temporal change in seagrass vegetation area varied greatly among different seagrass beds within a region, and even among different positions of a single seagrass bed. The asynchronous dynamics within different areas of the beds contributed to overall stability of seagrass vegetation in the whole area.

We then carried out an integrated analysis for spatial evaluation of major ecosystem functions of the seagrass meadow (i.e. plant biomass, productivity, photosynthesis ability) by (1) relating variations in the ecosystem functions by environmental variables using general linear models and (2) interpolating the model prediction based on GIS-based database. The evaluated spatial patterns of the ecosystem functions at seagrass beds in Futtsu, Akkeshi-ko, and Furen-ko varied greatly and the variation was partly explained by the different combination of environmental factors such as water depth, the distance from the shoreline, water temperature and salinity. Using the same methods, we evaluated the spatial patterns of macrobenthic invertebrates and whooper swans using the seagrass meadows.

The laboratory and field experiments controlling environmental factors revealed that

variation in morphological structure of eelgrass bed was affected by depth and current gradients, but not by temperature variation. In the analyses of relationships between biodiversity and ecosystem functions of seagrass beds, the seagrass morphological indices positively correlated with the primary production of seagrass beds and moreover with those of the seagrass-associated animal community. The resultant variation in eelgrass morphology led to variation in species diversity and biomass of fish community in all regions, suggesting that the seagrass morphology is a good index of seagrass ecosystem functions and biodiversity.

The structural equation modeling revealed that the suitable characteristics of seagrass morphology differed among fish functional groups. The fishes found on the surface of the seagrass beds preferred beds with low seagrass density and high shoot height, those inside the beds preferred beds with high density and high shoot height, and those on the bottom of the beds preferred locations with low seagrass density and low shoot height. We interpolated fish biomass and diversity into seagrass distributions using regional GIS databases and the measured relationships between seagrass morphology and functional diversity and fish biomass.

The comprehensive evaluation of multiple ecosystem functions was finally made using the evaluation map of each single function developed by the two subthemes. The monitoring and evaluation system developed by this project is already utilized for various projects on conservation of marine biodiversity and sustainable use of marine resources, and will be useful for decision making for coastal environmental policies.

# アマモ場

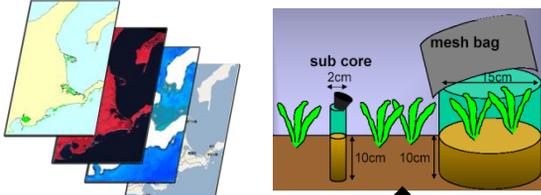


- ▶ 沿岸生態系で重要にも関わらず世界的に減少が懸念
- ▶ 制約の多い野外モニタリングを補間する空間的評価の必要性

## 目的

### 空間情報

### 野外観測データ



### GISによる統合解析

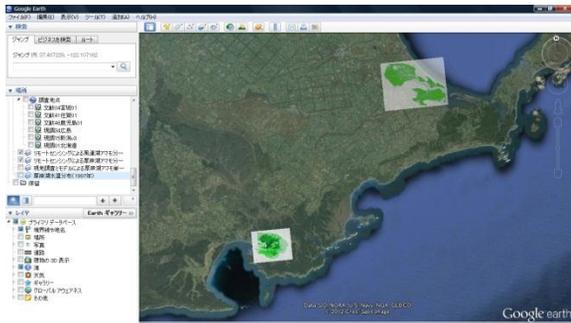
変動予測

保全・再生

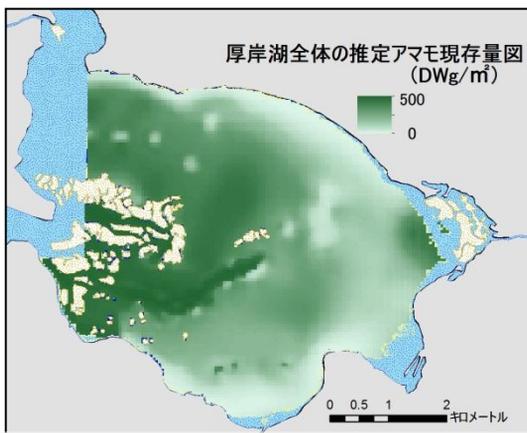
環境教育

さまざまな目的の事業に利用

## サブ課題1

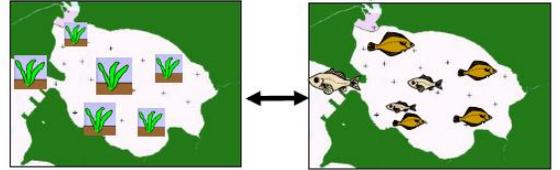
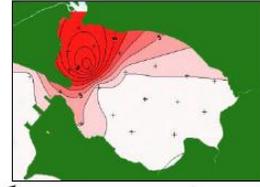


### 解析用・公開用データベースの作成

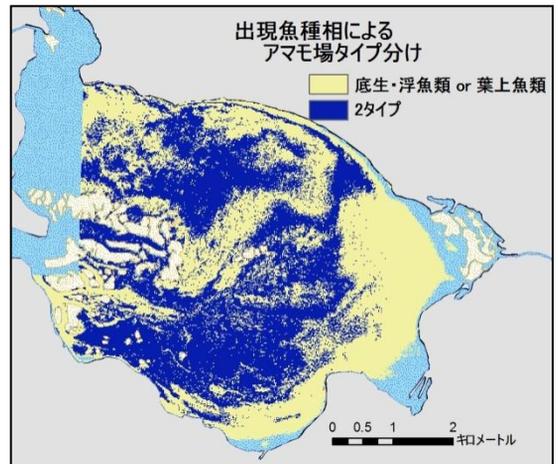
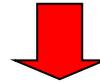


### 生態系機能の空間評価

## サブ課題2



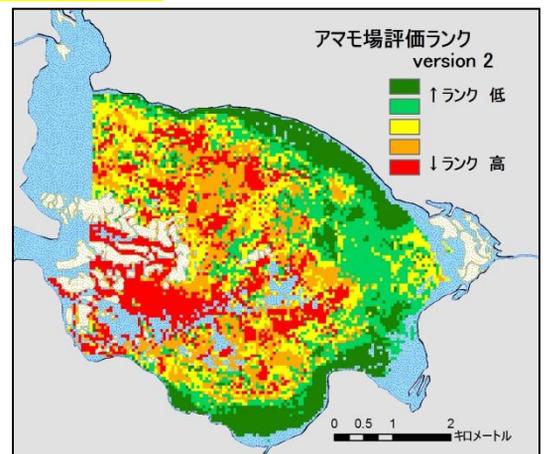
### 環境、生態系機能、生物多様性の関連性解析



### アマモ場の動物群集の空間評価



### 統合解析



### アマモ場の多重機能の統合評価