

海の未来を予測する

気候変動、海、魚資源



Produced by

日本財団—ブリティッシュコロンビア大学

ネレウスプログラム

海の未来を予測する

The Nippon Foundation - University of British Columbia

NEREUS PROGRAM

Predicting Future Oceans



NEREUS PROGRAM

Predicting Future Oceans

ネレウスプログラムについて- About the Nereus Program:

ネレウスプログラムは、2011年に日本財団とブリティッシュコロンビア大学によって設立された分野横断的の海洋プログラムである。プログラムは、日本財団、ブリティッシュコロンビア大学(カナダ)、ケンブリッジ大学(イギリス)、デューク大学(アメリカ)、プリンストン大学(アメリカ)、ストックホルム大学(スウェーデン)、ユトレヒト大学(オランダ)、世界自然保全モニタリングセンター(国際連合環境計画、イギリス)の8つの大学・研究機関のパートナーシップを基盤とし、下記3つの項目を目的として活動している。

- 1、海の未来に関する研究を分野横断的に、自然科学と社会科学の領域を超えて発展させる。
- 2、海の持続可能性に関する複雑かつ多様な問題の解決に寄与する海洋エキスパートを育成し、新たなネットワークを構築する。
- 3、実践的な解決につながる知見を世界の政策形成の場へと周知する。

「海の未来を予測する」レポートについて-About this report:

海洋科学者は近年の研究の中で、地球規模で起こる海洋環境変化が海の魚資源に与える影響についての懸念を強めている。特に環境の変化が地球規模で起こるからこそ、国際的なスケールでの海洋管理が不可欠となる。その中でも利害関係者が最新の科学的知見を持ち、海と生態系と魚資源の関わりをグローバルな視点で明確に理解する事が最重要課題である。

本レポートは、気候変動と持続可能な海の未来を実現するための解決策となり得る科学的知見を国際的に共有することを目的とする。とりわけその科学的概要として、二酸化炭素排出と海、そして魚資源との関係を明確にすることに焦点を当てている。また、複雑な情報を簡潔にまとめることで、「今、海で何が起こっており」「未来の海で何が起こるのか」についての科学的理解をできるだけ多くの人々に伝えることを目指している。

本レポートは、「海の未来のキーポイント」を掲げる7つの章によって構成されている。各章は、キーポイントに関する科学的知見の概要とネレウスプログラムの研究結果の二つの部分に分かれる。また、レポートの内容は、全てネレウスプログラム参加メンバーの科学的見解および意見を基に記述されている。前述の通り、メンバーは、海の未来についての創造的で分野横断的な研究をグローバルな視点から行っている。

本レポートで記述された概要の補助的説明および引用された学術論文の詳細については、ネレウスプログラムのウェブサイトから閲覧可能。

www.nereusprogram.org.

パートナー



統括執筆責任者：

ウィリアム・チュン、太田義孝、ウィルフ・スワーツ

執筆協力者：

ネレウスプログラム参加メンバー

編集：

ウィリアム・チュン、太田義孝、ウィルフ・スワーツ、リンジー・ラフレニャー、
エミリー・フィスター、ミランダ・ジョーンズ

ネレウスプログラム参加メンバー：

研究責任者（ステアリングコミッティー）

ウィリアム・チュン（ブリティッシュコロンビア大学）
ヴァイリー・クリステンセン（ブリティッシュコロンビア大学）
パトリック・ハルピン（デューク大学）
ホルヘ・サルミエント（プリンストン大学）
チャールズ・ストック（アメリカ海洋大気庁）
カール・フォルケ（ストックホルム大学）
ヘンリック・オスタブロム（ストックホルム大学）
ルイーザ・ウッド（世界自然保全モニタリングセンター）
クリス・マクオーウェン（世界自然保全モニタリングセンター）
トム・スペンサー（ケンブリッジ大学）
マイク・ピセル（ケンブリッジ大学）
アレックス・オウド・エルフェリック（ユトレヒト大学）
エリック・モレナー（ユトレヒト大学）
海野光行（日本財団）

プログラム統括

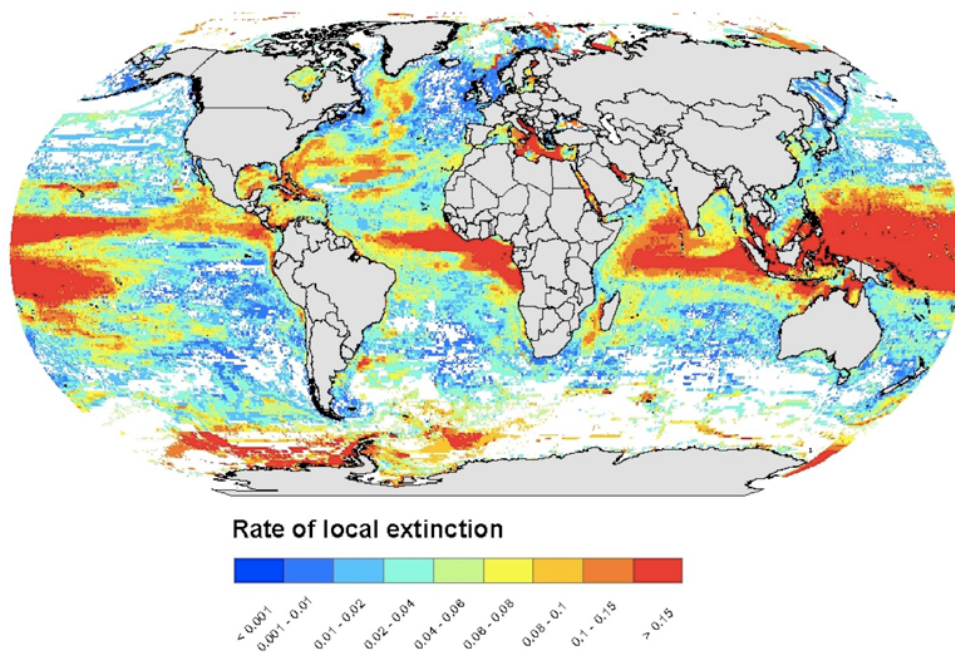
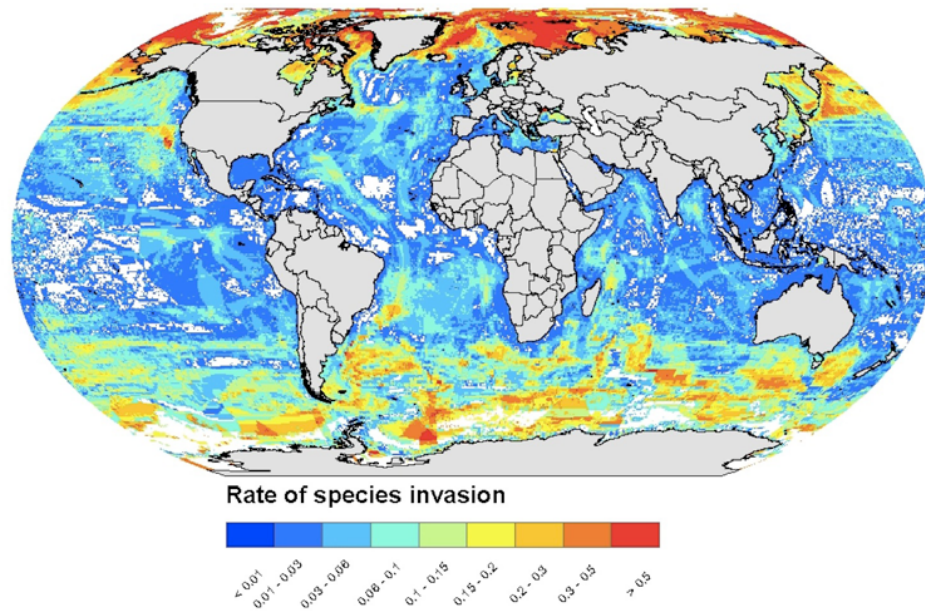
太田義孝（ブリティッシュコロンビア大学）
ダニエル・ポーリー（ブリティッシュコロンビア大学）

アドバイザー

フィリップ・キューリー（フランス外務省開発研究局）
ジェフ・ポロビーナ（アメリカ海洋大気庁）

研究員

レベッカ・アッシュ（プリンストン大学）	ヴィッキー・ラム（ブリティッシュコロンビア大学）
アンドレ・ブスタニー（デューク大学）	マーク・メティアン（国際原子力機関）
リチャード・カデル（ユトレヒト大学）	アンドリュー・メリエ（ストックホルム大学）
アンドレアス・シソネロス・モンテメイヤー（ブリティッシュコロンビア大学）	マリアデ・オカ（デューク大学）
マシュー・コルテル（ブリティッシュコロンビア大学）	ムハンマド・オイニョーラ（ブリティッシュコロンビア大学）
リサ・デルマス（ストックホルム大学）	コリーン・ペトリク（プリンストン大学）
ダニエル・ダン（デューク大学）	ガブリエル・レイゴンドー（ブリティッシュコロンビア大学）
トーマス・フロリッシャー（チューリッヒ工科大学）	ライアン・リカクツェヴスキー（サウスカロライナ大学）
ローレンス・ジェフファート（ケンブリッジ大学／世界自然保全モニタリングセンター）	ウィルフ・スワーツ（ブリティッシュコロンビア大学）
ナターシャ・ヘンシュケ（プリンストン大学）	フィリップ・アンダーウッド（国連環境計画－世界自然保全モニタリングセンター）
ケリー・キアニー（ワシントン大学／アメリカ海洋大気庁）	オードリー・バルズ（ムーリ生態実験研究所）
ミランダ・ジョーンズ（国連環境計画－世界自然保全モニタリングセンター）	ジェームス・ワトソン（ストックホルム大学）



気候変動による海洋環境の変化から魚資源の分布が変わる。上記の図は、科学的な予測によって2050年までに新たな魚種が侵入する海域そして元来の魚種が絶滅する海域を示している。

(Source: Jones and Cheung 2015)

気候変動、海の未来そして魚資源

海の温度が上がると、水の動き、海洋生物の分布、海洋生態系の構造に変化が現れる。また、継続的に二酸化炭素が排出されることにより、地球の大気および海洋環境の化学的特性の変化を余儀なくされる。後者に関して言えば、海洋の酸性化や海中の酸素濃度の低下を示す徴候が強まっているのに伴って、海洋生物の存続や多様性に関する危機が指摘されている。私たちが認識すべきことは、海の変化は、海に棲む生命にとっての危機というだけでなく、漁業を支える未来の海的能力へも大きな影響を及ぼすという事実だろう。

2014年に公表されたIPCC第5次評価報告書では、海と気候変動に関する記述が新たな章として追加された。これは気候変動と海、そして魚資源のつながりを認識する国際的合意の表れである。この報告書を受け、国際社会は世界規模の海の変化を考慮した責任のある海洋管理を今こそ実行するべきである。

責任ある海洋管理を実現するためには、気候変動と海の関係の科学的理解を深めることが最も重要である。さらに、過剰漁業や汚染など、人間活動によって引き起こされる直接的な海洋環境への打撃との相互作用、また、気候変動によってこれらの打撃がより増大し、今以上に海洋環境の破壊が進むのかという問いに対して、科学者はより正確な知識を得よう努力すべきである。何より、海の未来とその持続可能性を考えた時に、これらの知識が広く一般社会に共有される事によってローカルからグローバルまであらゆるレベルで海の未来を守るための策が「実行」されるようにしていく必要がある。

下記の7つのキーポイント(Key statement)は、海の未来と魚資源に関わる変化の過程と課題を提示している。また、これらのキーポイントが提示する「課題」への回答として、海の持続可能性を守るために私たちが、今、何をすべきなのかという対応策が本レポートの最後に記されている。

海の未来にむけた7つのキーポイント

1. 二酸化炭素排出の影響により海洋の環境特性、特に海水温、酸性度および酸素濃度は世界規模で前例のない変化を示している。
2. 海洋の環境特性の変化は、プランクトンから大型魚まで海の生物学的生産力に影響を与える事が予測される。
3. 気候変動により世界の海洋生態系および魚資源への影響が既に確認されているが今後も温室効果ガス排出の継続による更なる影響が予測される。
4. 海洋生態系における生物多様性や食物連鎖の構成の変化が漁業によって引き起こされている。その結果、国際合意に示される持続可能性に関する保全目標の達成が非常に困難である。
5. 過剰漁業や生息域の破壊などの海洋問題は、超過する漁船数や漁獲能力、沿岸域開発や市場の拡大などに因る場合が多く、気候変動の影響と複合的に作用する。
6. 養殖業は劇的な発展を遂げており、今後漁業による水産供給を上回る可能性がある。しかしながらその持続可能性は養殖される魚種やスケールなどの実施要素によるため不確実である。
7. 未来の持続可能な漁業の実現には、漁業に関する国際的な法的枠組みの強化と包括的な海洋ガバナンスの基盤が必要とされる。

1. 二酸化炭素排出の影響により海洋の環境特性、特に海水温、酸性度および酸素濃度は世界規模で前例のない変化を示している。

上記のキーポイントに関する科学的知見の概要

大気(CO₂など)中の温室効果ガス濃度の上昇により地球規模での気候の温暖化が進み、それに伴って海の温度も上昇すると予想される。現在の温室効果ガスの排出率が継続された場合、今世紀の終わりまでに、平均海面水温は、現在の温度から(1990年から1999年の平均値)2.0–3.5 °C高くなると予測される。

また、水が熱を取り込む特性と海域全体に温かい表層水を転送する海洋循環との複合的效果により、たとえCO₂排出量が低い水準で推移したとしても、海洋の温暖化が継続する可能性は高い。

熱を取り込む機能に加えて、海は大気からCO₂を除去する二酸化炭素の貯留の機能も果たす。熱を取り込む機能により、海洋は大気の温度変化の幅を軽減する。同時に、二酸化炭素の貯留により、海水中の二酸化炭素量を増加させ、結果と

して海の酸性化(海洋酸性化)を急激に進行させることになる。水の酸性化が進むと、サンゴ、甲殻類や貝類などカルシウム系の物質によって形成される海洋生物の存続が脅かされる。二酸化炭素排出量が高水準で継続することを仮定した場合、海洋酸性度は、今世紀の終わりまで、これまで人類が数百万年の間に経験したことのない異常なスピードとスケールで進行すると予測される。

さらに、亜寒帯地域の氷冠(陸上淡水の水)の融解と表層水の希釈とともに、暖かく軽い水と冷たく重い深層水との階層化(塩分濃度などの特性が異なる事によって起こる海水層の形成。水混合に対する障壁として作用する)が増大することが予想される。この海水の階層化は、深海生物に必要とされる深海から海洋表面への栄養素の移動を制限し、また海洋表面から深海への酸素の拡散を妨げることが予想される。

政策戦略は何か？ - What is the policy strategy?

二酸化炭素排出量を制限する:気候変動の進行や規模、また海洋酸性化や他の海洋環境の変化を軽減する事ができる。

ネレウスプログラムの研究成果

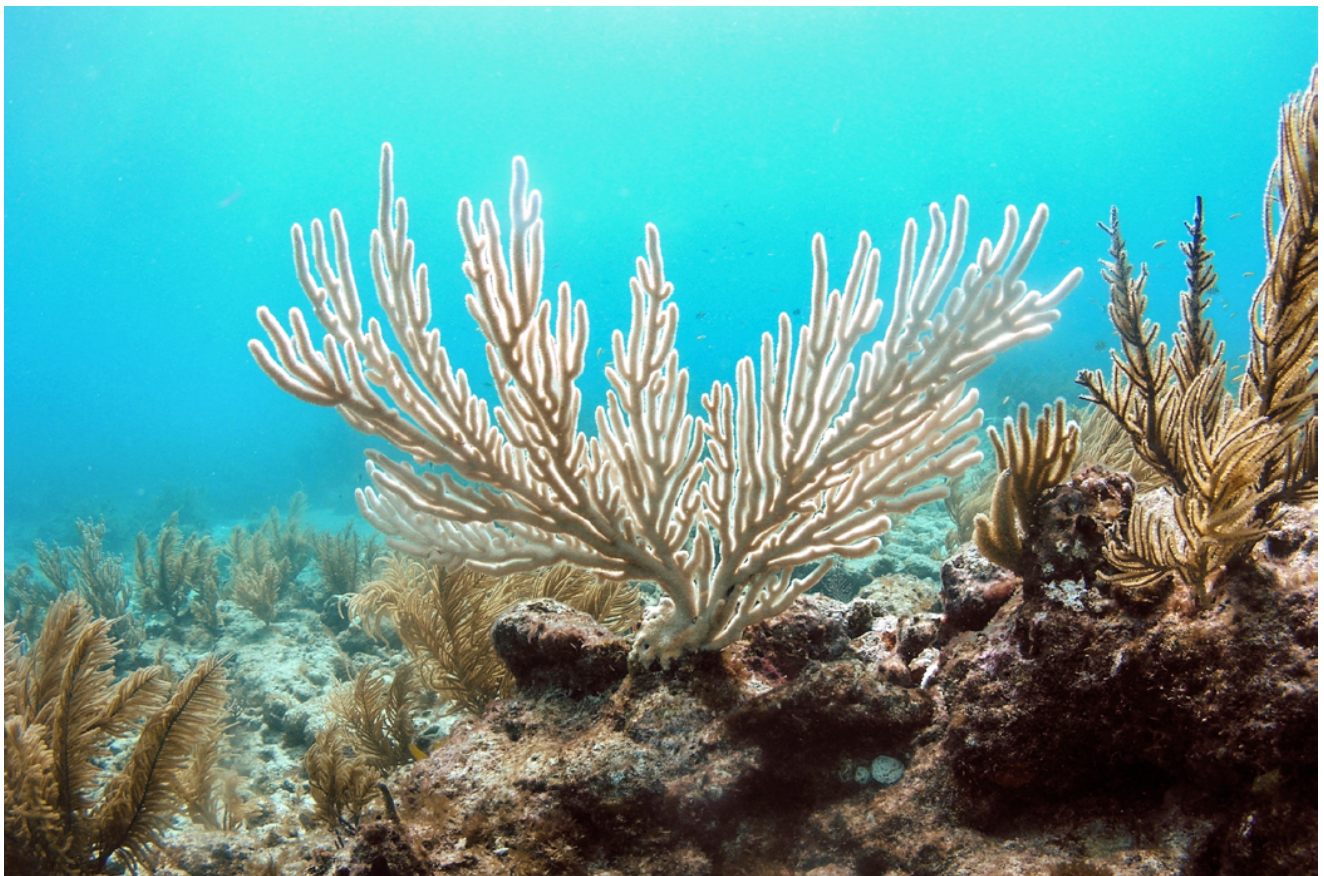
フロリッシャーらは、海洋酸性化が、温度や酸素濃度など他の海洋特性の変化より早い段階で起こる事が予測されると発表した。彼らはこの研究手順として、二酸化炭素排出による海洋環境の変化を温暖化、酸性化、脱酸素化、生物的生産性の妨害の4つのタイプに区分した。その上で、地球システムモデルのアンサンブル分析を用い、2100年を目処に排出量シナリオを多様な条件下で定め、海の未来の変化を予測した。

また、フロリッシャーらはこの研究の中で、海洋環境の変化に地域的な差がある事を示した。例えば、熱帯地域では、海面温度の変化は早期に表象するが、次表水（表層水の下の海水層）の酸素濃度の上昇は、かなり後になって現れる。逆に、海洋表水の酸素濃度の変化が、南極海ではかなり早い時期に現れる。4つのすべての海洋環境の変化（温度、酸度、酸素度、生物生

産）の表出を総合的に予測すると、2005年から2014年の間に起こった海洋環境の変化は地球全体の海域の41%で見られ、その後2075年から2084年には63%の海域において変化が起こるとシミュレーションされている。また、これらの総合的な変化は、南極海や北太平洋、および大西洋において今世紀末までに顕著に現れるが、熱帯や南太平洋に渡る海域では比較的不明瞭であるとしている。海洋生態系への影響に関して言えば、温暖化や酸性化は熱帯地域において顕著に現れる事が予想されており、これらの変化に脆弱な珊瑚礁への影響が強く懸念される。一般的には、海洋環境の変化が最も顕著な海域においては、生態系が自然界に備わる生態的適応力を超えてしまう状況におかれる可能性が高い。

Reference

Rodgers, K. B., Lin, J., & Frölicher, T. L. (2015). Emergence of multiple ocean ecosystem drivers in a large ensemble suite with an Earth system model. *Biogeosciences*, 12(11), 3301–3320. <http://doi.org/10.5194/bg-12-3301-2015>



2. 海洋の環境特性の変化は、プランクトンから大型魚まで海の生物学的生産力に影響を与える事が予測される。

上記のキーポイントに関する科学的知見の概要

気候変動が海の生物学的生産性に与える影響は、海の物理的条件、生息域の構造、また生物種の分布により、地域(海域)によって異なる。しかし、海洋環境の変化による海洋の基礎生産性の変動は、植物性プランクトンを食性とする動物(魚や貝などの無脊椎動物)の個体数や生態の変化をもたらし、最終的にその漁業に影響を与える。

また、気候変動によって海水層の階層化が増大し、そのため海洋表面にもたらされるべき深海の栄養塩が減少すると予想される。海中の栄養塩が限られる中低緯度域では、その減少によって生物生産性、特に海洋表面における植物プランクトンの生産性が低下

すると予測される。海中の栄養塩が高い温帯または亜寒帯水域では、海水の融解と海水の混成によって植物プランクトンの成長期間の長期化と生産性の向上が見られる。

地域レベルでは、気候変動が海洋生産性に与える影響は強く、海域特性(温度、栄養塩、階層化等)によって大幅に変わる可能性がある。例えば、一部の地域では、陸地と海洋表面間の熱の相互作用によって強い風の流れが作られ、深海から海洋表面への“湧昇”(海中の緩やかな上昇流)が増大、その結果として海洋表面の植物プランクトンの生産性が高まる。

政策戦略は何か？ - What are the policy strategies?

二酸化炭素排出量を制限する:それによって気候変動の進行や規模、また海洋酸性化や他の海洋環境の変化を軽減する事ができる。

海洋生態系の生物多様性、生息域そして生態系構造を保持する:気候変動や酸性化などに見られる人間活動を起因とした海洋環境変化の規模を縮小する。

ネレウスプログラムの研究成果

商業漁業の生産性に対する基礎生産と漁業活動の相対的な効果を理解するために、マクオウエンらは世界的な漁獲量の歴史的傾向を大規模海洋生態系ごとに算定した。結果として、基礎生産と漁業努力量は、漁業生産に対して一貫した効果を示す傾向が見られた。特に、基礎生産は、生産性は高いが過剰漁業が進む海域でその漁業生産に対する効果を示し、一方の漁業努力量は、相対的に基礎生産性が低く、過剰漁業の対象とならなかった海域において、その商業漁業に対する効果が見られた。

また、魚の資源量に関する基礎生産の重要性について考察するため、キアニー、ストックそしてサルミアント

は海洋条件と生態的な動力(植物プランクトン、魚、他の海洋生物間の食物連鎖)を組み合わせた生態系モデルを作成した。彼らは亜北極東部地域の事例を用いて、複雑な被食者と捕食者の関係により、基礎生産の増加が必ずしも食物連鎖における上位の生物量の増加にはつながらない事を理解した。また、ストックからもプランクトンの生態系に対する地球規模のアセスメントから同様の結果を導きだした。

一方、リカクツェヴスキーらは、二酸化炭素排出量の増加が、ペルー沖のフンボルト海流など一部の沿岸海洋環境で「湧昇」をより活発にしているという仮説を検討した。考察された「湧昇」は、

(その栄養塩を海洋表面にもたらす機能によって)世界的に最も生産性の高い商業漁業を支えており、湧昇が活発化することによって漁業生産量が増加する。彼らは、風の動きと湧昇の関係性を分析し、カリフォルニア、ペングエラ、フンボルト海流において、風と湧昇の活発化に強い相関性がある事を認識した(つまり、湧昇の活発化が必ずしも二酸化炭素排出のみに言及されるのではない)。しかしながら、イベリア海流では逆の相関性が見られ、カナリー海流では相関性が全く見られなかった。また、湧昇の活発化は高緯度地域に多く見られる事も認識した。リカクツェヴスキーらは、CO₂が湧昇の活発化をもたらすという仮説を支持する結論に達した。

そして、ワトソン、ストックとサルミエントは、生き物の大きさを基準とした生態系モデル(サイズベースモデル)

を使って、海洋生物が人間活動のストレスによってその活動(特に移動などの動き)に対して、どう影響を及ぼされるのかを明らかにした。またサルミエントとリカクツェヴスキーらは、海洋基礎生産の分布傾向を明らかにする際に、元となるデータが継続性を欠く為に、解析が困難になる事を示した。その解決策として、彼らは継続的に人工衛星データを保持する必要性を述べた。

また、気候変動モデル作成に関する研究の不確実性については、ネレウスプログラムは現在海洋モデルを包括的に組み合わせ、定量的予測の向上に関する共同研究を行っている。

References

Beaulieu, C., Henson, S. A., **Sarmiento, J. L.**, Dunne, J. P., Doney, S. C., **Rykaczewski, R. R.**, & Bopp, L. (2013). Factors challenging our ability to detect long-term trends in ocean chlorophyll. *Biogeosciences*, 10(4), 2711–2724. <http://doi.org/10.5194/bg-10-2711-2013>

Kearney, K. A., Stock, C., & Sarmiento, J. L. (2013). Amplification and attenuation of increased primary production in a marine food web. *Marine Ecology Progress Series*, 491, 1–14. <http://doi.org/10.3354/meps10484>

McOwen, C. J., Cheung, W. W. L., **Rykaczewski, R. R.**, Watson, R. A., & Wood, L. J. (2014). Is fisheries production within Large Marine Ecosystems determined by bottom-up or top-down forcing? *Fish and Fisheries*. <http://doi.org/10.1111/faf.12082>

Stock, C. A., Dunne, J. P., & John, J. (2014) Global-scale carbon and energy flows through the planktonic food web: an analysis with a coupled physical biological model. *Progress in Oceanography*, 120, 1-28. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.07.001>

Sydeman, W. J., Garcia-Reyes, M., Schoeman, D. S., **Rykaczewski, R. R.**, Thompson, S. A., Black, B. A., & Bograd, S. J. (2014). Climate change and wind intensification in coastal upwelling ecosystems. *Science*, 345(6192), 77–80. <http://doi.org/10.1126/science.1251635>

Watson, J. R., Stock, C. A., & Sarmiento, J. L. (2014). Exploring the role of movement in determining the global distribution of marine biomass using a coupled hydrodynamic – size-based ecosystem model. *Progress in Oceanography*. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.09.001>

3. 気候変動により世界の海洋生態系および漁業への影響が既に確認されているが、今後も温室効果ガス排出の継続による更なる影響が予測される。

上記のキーポイントに関する科学的知見の概要

植物プランクトンから魚、そして大型海洋生物をつなぐ食物連鎖に加えて、気候変動が海に与える影響は、生態系の構造また漁業活動へと及ぶ。魚や無脊椎動物(甲殻類や貝類)は棲息する水の温度さらには酸素濃度に敏感であり、耐えうる条件の幅を超えた環境に置かれると、生殖力の低下のみならず最悪の場合はその生命が脅かされる。

気候変動によって引き起こされる海洋環境の変化、特に水温、酸性度の変化を予測した結果を見る限り、この先、海洋生物は、それぞれに適した海洋条件から外れた環境に身を置かざるを得なくなる可能性が高い。その結果、個体のレベルで言えば、魚は成長率が低下しサイズが小さくなる事も考えられる。また、種の

レベルで言えば、魚によっては、生存が保障される海洋条件に見合った海域に移動するため、全体的な生物種の分布が変わってしまう。すると、海洋コミュニティや食物連鎖間の相互作用に影響が与えられる。加えて、気候変動によって珊瑚礁などの重要な海洋生息域が消滅すると、このような生態系の構造的変化が助長されると考えられる。

気候変動および海洋酸性化によって起こる海洋生物の生態的、生物的反応は、漁業においてはその漁獲の魚種分布、多様性、獲れる魚種の組み合わせ、そして獲れる魚の量として反映される。これらの変化が未来の漁業、特にその漁業生産性に与える影響は大きい。

政策戦略は何か？ - What are the policy strategies?

二酸化炭素排出量を制限する:それによって気候変動の進行や規模、また海洋酸性化や他の海洋環境の変化を軽減する事ができる。

海洋生態系の生物多様性、生息域そして生態系構造を保持する:気候変動や酸性化などに見られる人間活動を起因とした海洋環境変化の規模を縮小する。

漁業管理のための多様な「ツールキット・管理手法」:多様な管理手法を用いれば、人間活動が海に与える多層的な影響や海洋生態系の不規則な変化に対してより柔軟な対応が可能になる。

ネレウスプログラムの研究成果

チュンとポーリーは、既に1970年代から気候変動による漁業への影響が世界の漁獲量に表れている事を示した。またピンスキーとサルミエントらは、海洋生物の分布が地域的な温度差の傾向や幅に伴って変化を遂げている事を明らかにした。さらに、ジョーンズとチュンは、気候変動によって、海洋生物種が両極の冷たい水域や深海の水域に移動する傾向にもとづく、地球規模の海洋生物の再分布が2050年まで続くという予測を立てた(2050年は科学的予測の範囲であり、この傾向はそれ以降も継続する)。

海洋温暖化、酸素濃度の低下または酸性度の増加などに見る、海の物理的、化学的な特性の変化は、魚のサイズや分布、また成長過程(成熟期など)や生存率に影響を与える。チュンらは、シミュレーションモデルを用い、また異なった二酸化炭素排出量をベースにしたシナリオを元に600魚種の生態的变化を予測した。その結果、世界の二酸化炭素排出量が最も高く設定された場合、2000年～2050年の50年間で、魚の大きさ(体重)が14～24%縮小する事が予測された。これは、気候変動によって海水温が上昇するのに

伴って、魚の分布や成長過程(成熟期など)が変化し、結果として魚のサイズ(体重)に影響が現れたためである。

チュンは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書において、気候変動の海洋に与える影響が不均衡である事を指摘している。特に、熱帯海域においては、その地域固有の種の絶滅が高い比率で起こる事やそれによって漁獲量が低下し、魚のサイズが小さくなる事が予想される。熱帯地域の沿岸社会は、漁業によって生計をたて、食料安全保障の面においても漁業に強く依存するので、気候変動による海の変化によって最も強い社会経済的な影響を与えら

れる事が予想される。

一部の沿岸社会では、短期的には気候変動の影響による海洋変化が有益な結果をもたらす事も予測されている。北極海域の沿岸社会は、気候変動による海水温の上昇や海水の融解に伴って漁獲量が増えることから経済的利益がもたらされるだろう、とラムとチュンらは生物経済モデルを使って予測した。しかしながら彼らは、同時に、これらの海域でおこる海洋酸性化の影響により、この予測が多大な不確実性を伴う事も指摘している。

References

Cheung, W. W. L., Sarmiento, J. L., Dunne, J., Frölicher, T. L., Lam, V. W. Y., Palomares, M. L. D., Watson, R., & Pauly, D. (2013). Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems. *Nature Climate Change*, 3(3), 254–258. <http://doi.org/10.1038/nclimate1691>

Cheung, W. W. L., Watson, R., & Pauly, D. (2013). Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 497(7449), 365–368. <http://doi.org/10.1038/nature12156>

Jones, M. C., & Cheung, W. W. L. (2015). Multi-model ensemble projections of climate change effects on global marine biodiversity. *ICES Journal of Marine Science*, 72(3), 741–752. <http://doi:10.1093/icesjms/fsu172>

Lam, V. W. Y., Cheung, W. W. L., & Sumaila, U. R. (2014). Marine capture fisheries in the Arctic: winners or losers under climate change and ocean acidification? *Fish and Fisheries*. <http://doi.org/10.1111/faf.12106>

Pörtner, H. O., Karl, D., Boyd, P.W., Cheung, W. W. L., Lluich-Cota, S.E., Nojiri, Y., Schmidt, D.N., & Zavialov, P. (2014). Ocean systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., Barros, P., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., & White, L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 411–484.

Pinsky, M. L., Worm, B., Fogarty, M. J., Sarmiento, J. L., & Levin, S. A. (2013). Marine taxa track local climate velocities. *Science*, 341(6151), 1239–1242. <http://doi.org/10.1126/science.1239352>

4. 海洋生態系における生物多様性や食物連鎖の構成の変化が漁業によって引き起こされている。その結果、国際合意に示される持続可能性に関する保全目標の達成が非常に困難である。

上記のキーポイントに関する科学的知見の概要

漁業は、魚資源の生産性と豊富さを左右する。過剰な漁業は、これまで魚資源の生産性を持続不可能なレベルに低下させ、世界的に見て現在でもその傾向は続いている。世界の魚資源のうちの30%近くが、過剰開発によって、つまり生物的に持続不可能であるレベルで漁獲されている。また、過剰開発の影響は、生態系の他の海洋生物、特に過剰開発の対象となる魚と捕食関係にある生物にまで及ぶことがわかっている。

成長過程の遅い大型魚種は、世界中の多くの海洋生態系で激減しており、結果としてこれらの生態系では、小型で成長過程が早く、食物連鎖では位置が低い魚が支配する形態へと変化している。このような変化によって、小型魚を対象とした漁業においては、漁獲量の増大など短期的な利

点が認められるが、長期的には生物多様性が損なわれるという結果を招く。また、これらの大型魚種は、その生態系の持続可能性の保全において重要な役割を担うことも多く、これらの種の絶滅また枯渇は生態系のバランスに予想外の影響を与える可能性も高い。

海洋生態系が、人間活動からくるストレス、特に過剰な開発を行う漁業に対して脆弱であることを認識して、国際社会はこれまで資源の持続可能な利用と保存に関わる多様な取り組みを行ってきた。しかしながら、魚資源の現状とその減少傾向を鑑みした場合、国際社会がこれまで定めた海洋生物資源および多様性の保存および持続可能な利用についての目標を達成できる可能性は低い。



政策戦略は何か？ - What are the policy strategies?

海洋生態系の生物多様性、生息域そして生態系構造を保持する：気候変動や酸性化などに見られる人間活動を起因とした海洋環境変化の規模を縮小する。

漁業管理のための多様な「ツールキット」：人間活動が海に与える多層的な影響や海洋生態系の不規則な変化に対してより柔軟な対応が可能になる。

ネレウスプログラムの研究成果

クリステンセンとポーリーは、多様な海域の海洋生態系モデルをメタ分析し、世界的に見て、大型の捕食魚が過去100年間で3分の2減少したことを示した。また、この減少の半分が過去40年で起こっており、生物量の低下が近年加速している事が、この研究によって示唆された。同時に、捕食魚の減少により、小型の被捕食魚の生物量が増加しており、「フィッシングダウン(大きな魚から獲り始める事により、食物連鎖の高度の大型魚種から資源枯渇していく。その結果として漁業の対象が食物連鎖の低度属する小さな魚へと移る現象。ダニエル・ポーリーが提唱)」が世界的なスケールで起こっている事を結論として示した。

幾らかの生物は、海洋生態系の変化や動きにおける中心的な役割を担う、「キーストーン(要石)的生物」として認識されている。これらの生物を過剰に獲る事は、その生態系の構造に大きな影響を与える。バルズらは、これらの「キーストーン(要石)的生物」

の定義を生物学的に明確にした上で、世界中のあらゆる海域の生態系モデル(エコパスモデル)を分析し、漁業によってその種の生物量が減る事で生態系を保全とする要としての機能が存続不可能になるという事を示した。

これまでの海洋管理の歴史的傾向を鑑みると、国際社会が保全および持続可能性の発展目標を十分に達成しない傾向が強い。チュンとクリステンセンは、2010年に策定された生物多様性保全に関する世界的目標である「愛知目標」の進捗を検討し、国際社会が持続可能な漁業に関する目標を2020年の期限までに達成できる可能性が低い事を主張した。この研究では、過剰開発にさらされている魚資源が一部の先進国で回復に向かっていて一方で、現在持続可能な範囲内とされている魚資源に関しても、今後非持続可能な資源レベルに陥る危険が高い事が示された。

References

- Christensen, V., Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Buszewski, J., & Pauly, D. (2014). A century of fish biomass decline in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 512, 155–166. <http://doi.org/10.3354/meps10946>
- Tittensor, D. P., Walpole, M., Hill, S. L. L., Boyce, D. G., L. B. G., Burgess, N. D., Butchart, S. H. M., Leadley, P. W., Regan, E. C., Alkemade, R., Baumung, R., Bellard, C., Bouwman, L., Bowles-Newark, N. J., Chenery, A. M., Cheung, W. W. L., Christensen, V., et. al. (2014). A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science*, 346(6206), 241–244. <http://doi.org/10.1126/science.1257791>
- Valls, A., Coll, M., & Christensen, V. (2015). Keystone species: toward an operational concept for marine biodiversity conservation. *Ecological Monographs*, 85(1), 29–47. <http://dx.doi.org/10.1890/14-0306.1>

5. 過剰漁業や生息域の破壊などの海洋問題は、超過する漁船数や漁獲能力、沿岸域開発や市場の拡大などに因る場合が多く、また気候変動の影響と複合的に作用する。

上記のキーポイントに関する科学的知見の概要

漁船の数と装備を含め、世界の漁獲能力は発展し続けている。しかし半数以上の魚資源は、過剰な開発にさらされるか、これ以上漁獲量を上げる事が出来ない状態になっている。また、他の海洋の開発活動(資源開発や再生利用エネルギーなど)は、今後その発展とともに漁業との確執をうむかもしれない。これらの開発活動は、特に沿岸域の生態系や生息域に新たな脅威を与える可能性もある。

水産業のグローバル化と統合化によって、魚は世界で最も広く取引されている食料品の一つとなって

いる。そのため、魚資源の枯渇が世界的な水産経済に与える影響は大きい。また、気候変動による海洋生態系の変化および魚資源の生産性や多様性の低下は、漁業が魚資源に与える負荷を増加する可能性が高い。特に大型魚やキーストーン種など漁業圧に脆弱な魚資源に関しては、商業漁業の経済利益の追求と対象となる魚資源の保全との間で今後も引き続き競合が高まると予想される。

政策戦略は何か？ - What are the policy strategies?

海洋生態系の生物多様性、生息域そして生態系構造を保持する：気候変動や酸性化などに見られる人間活動を起因とした海洋環境変化の規模を縮小する。

漁業管理のための多様な「ツールキット」：人間活動が海に与える多層的な影響や海洋生態系の不規則な変化に対してより柔軟な対応が可能になる。

持続可能な経済システムを水産流通に適応する：人間活動による海への影響を認識することが可能な市場モデルを構築する。

ネレウスプログラムの研究成果

ダニエル・ポーリーが率いる「Sea Around Us Project (われらを巡る海)プロジェクト」は、世界すべての国の漁獲量の歴史的変化を再構築する取り組みを行っている。その大規模な研究の成果として、1950年から現在までの60年間の世界の漁獲量は、これまで国連機関などによって公表されている量よりもおよそ倍以上多いと試算された。この科学的な認識により、世界の海洋生態系にかかってきた負荷が、今後気候変動による海洋環境の変化を伴った複合的な負荷となる事でより増大するのではないかという見解が示される。また、チュンとスマイラの生物経済学的な研究では、経済学そして生物学の観点から今後魚資源の過剰開発に対して最も脆弱な海域はどこか、その地理的な分布を考察した。結果として、魚資源が脆弱で

ある海域は、カナダの北東海域、メキシコの太平洋側海域、ペルー沖海域、南アフリカの南東海域そして南太平洋および南極周辺であると予測された。

スワーツ、フォルケそしてオスタブロムらは、世界の水産流通システムにおいて、1) 魚の資源量(漁業対象となる魚の生物量)、2) 市場供給量(市場に出る魚の量)、3) 消費者価格(消費者が魚を購入する時に支払う値段)がどのような関連性を持つのかを考察した。その結果、技術革新や漁場の拡大または補助金などにより、魚資源の過剰開発が消費者価格に反映される事は稀にしか起こらず、それゆえ魚資源が減少している事実が消費者に知られる事なく過剰漁業が進んでしまうという考察を述べた。

References

Cheung, W. W. L. & Sumaila, U. R. (2015). Economic incentives and overfishing: a bio-economic vulnerability index. *Marine Ecology Progress Series*, 530, 223-232. <http://doi.org/10.3354/meps11135>

Crona, B. I., Daw, T. M., Swartz, W., Norström, A. V., Nyström, M., Thyresson, M., Folke C., Hentati-Sundberg, J., Österblom, H., Deutsch L., Troell, M. (2015). Masked, diluted and drowned out: how global seafood trade weakens signals from marine ecosystems. *Fish and Fisheries*. <http://doi.org/10.1111/faf.12109>

Sea Around Us Project (2015). www.seaaroundus.org



6. 養殖業は劇的な発展を遂げており、今後漁業による水産供給を上回る可能性がある。しかしながらその持続可能性は養殖される魚種やスケールなどの実施要素によるため不確実である。

上記のキーポイントに関する科学的知見の概要

現在、世界の水産消費（海水・淡水魚および貝類）の約半分が養殖によって供給されている。たんぱく質および微量栄養素を含む代替的な資源供給として、養殖は世界の食料システムの脆弱性を和らげる可能性を持っている。

しかしながら、養殖は未だ新興産業として認識されるべきであり、持続可能性ためには、戦略的な環境保全・評価計画を伴った責任ある管理計画とビジネスプランの構築が必要である。

養殖の発展を考慮する際、特に非規制下の事業拡大において最も懸念される事項として次の5点が挙げられる。1) 飼料や資源としての野生魚の過度な利用、2) 汚染物の廃棄、3) 地域生態系への影響、4) 生息域の破壊、5) 管理また事業体制の透明性。近年、これらの事項によって引き起こされる環境影響は、技術的な発展と地域的な管理能力の向上により幾らかは減少している。

政策戦略は何か？ - What are the policy strategies?

持続可能な経済システムを水産流通に適応する：人間活動による海への影響を認識することが可能な市場モデルを構築する。

漁業に関する国際的な法的枠組みと他の海洋活動に関わる法的枠組みの連携および協調：現行の世界および地域的な規制枠組みの調整により、世界的な環境変化への対処を行う。

脆弱な沿岸域社会への魚資源の公平な分配：海洋環境の変化に脆弱な沿岸域社会の（食料安全保障などに関する）権利を守る。



ネレウスプログラムの研究成果

メティアンとブスタニーらは、大型魚（クロマグロなど）を養殖する際に、その飼料確保のために他の漁業への依存が高いことを示した。彼らは、海洋養殖（淡水や陸上養殖ではない、海洋環境で行われる養殖）が、現在の漁業生産量に占める割合がごく限られたものであることを述べた上で、これらの養殖は経済的な価値の高い魚を（サーモンなど）対象にしているため、今後世界の水産経済で重要な位置を占める可能性が高いと指摘した。

例えば、大部分のマグロの養殖は、野生の幼魚を獲り、飼料を与え外部と隔絶させ人工的に育てることで成り立っている「畜養」である。そのため、海に生きる魚の資源量への影響に関する報告義務の基準が欠如していることなども含め、不十分な管理の元で発生する過剰な開発のリスクが懸念される。

養殖の社会経済的な影響に関して言えば、養殖が果たす食料安全保障の面での貢献度はアジアにおいては高いが、アフリカではほぼその役をなさないと、メティアンらは述べている。これは、アフリカでの養殖が地域の食料需要と合致

していない、そして多くの場合は、養殖で生産された魚が輸出されてしまい、地域で流通していないためである。

また、メティアンらは、中国の養殖業に関する初めての調査において、野生魚を養殖の飼料として利用するケースが増大しているとし、その非持続可能性を指摘するとともに、水産加工の際に出る有機副産物（廃棄など）の利用の必要性を説いている。

養殖は、陸海全てを含めた地球食料システムにさらなる耐性をもたらすとは言いがたい。それは、養殖が野生魚だけでなく陸上の作物、特に低所得層が食料としている作物に対する依存度が高いためである。メティアン、フォルケ、オスタブロムらは、陸上作物を養殖に利用する場合、その規模が大きくなればなるほど低所得層に対する負荷が増えるのではないかと予測する。その上で、養殖が食料安全保障に寄与できる可能性は、資源の利用効率、公平な資源配分そして環境保全に対する動機付けを、政府が戦略的な政策によっていかに与えられるかによると述べた。

References

- Beveridge, M. C. M., Thilsted, S. H., Phillips, M. J., **Metian, M.**, Troell, M., & Hall, S. J. (2013). Meeting the food and nutrition needs of the poor: the role of fish and the opportunities and challenges emerging from the rise of aquaculture. *Journal of Fish Biology*, 83(4), 1067-1084. <http://doi.org/10.1111/jfb.12187>
- Cao, L., Naylor, R., Henriksson, P., Leadbitter, D., **Metian, M.**, Troell, M., & Zhang, W. (2015). China's aquaculture and the world's wild fisheries. *Science*, 347(6218), 133-135. <http://www.sciencemag.org/content/347/6218/133.full>
- Metian, M.**, Pouil, S., **Boustany, A.**, & Troell, M. (2014). Farming of Bluefin Tuna—Reconsidering Global Estimates and Sustainability Concerns. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 22(3), 184-192. <http://doi.org/10.1080/23308249.2014.907771>
- Troell, M., Naylor, R. L., **Metian, M.**, Beveridge, M., Tyedmers, P. H., **Folke, C.**, Arrow, K. J., Barrett, S., Crepin, A., Ehrlich, P. R., Gren, A., Kautsky, N., Levin, S. A., Nyborg, K., **Österblom, H.**, Polasky, S., Scheffer, M., Walker, B. H., Xepapadeas, T., de Zeeuw, A. (2014). Does aquaculture add resilience to the global food system? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(37), 13257-13263. <http://doi.org/10.1073/pnas.1404067111>

7. 未来の持続可能な漁業の実現には、漁業に関する国際的な法的枠組みの強化と包括的な海洋ガバナンスの基盤が必要とされる。

上記のキーポイントに関する科学的知見の概要

現在の人間活動が海洋環境にかけている負荷と今後予想されるさらなる負荷、そしてその海洋生態系への影響を鑑み、漁業に関する国際的な法的枠組みおよび海洋ガバナンスの強化が緊要とされている。

特に、海洋生物資源管理における生態系アプローチを広範囲に適用することは必須である。また、漁業がもたらす利益と資源保全に関わる負荷(コスト等)は

関係する国や利害関係者間で公平に配分されるべきである。さらに言えば、このような取り組みは、地球規模での海洋ガバナンスの全体的枠組みの改善と並行して進められるべきである。そして、漁業管理を実施する機関は、他の海洋活動を管理する機関とより綿密な調整と質の高い協力体制を構築すべきであろう。

政策戦略は何か？ - What are the policy strategies?

持続可能な経済システムを水産流通に適応する：人間活動による海への影響を認識することが可能な市場モデルを構築する。

漁業に関する国際的な法的枠組みと他の海洋活動に関わる法的枠組みの連携および協調：現行の世界および地域的な規制枠組みの調整により、世界的な環境変化への対処を行う。

脆弱な沿岸域社会への魚資源の公平な分配：海洋環境の変化に脆弱な沿岸域社会の(食料安全保障などに関する)権利を守る。

ネレウスプログラムの研究成果

今後、海の未来の海洋生物の生産性や漁業規模の変化、そして水産物の供給量やその安定性の予測の精度が高まる事が期待される。同時に、海洋ガバナンスが如何に世界的な漁業そして社会経済に影響を与えるかに関して、一層の理解を深めていくことが求められる。

ネレウスプログラムの研究者は、この自然と社会システムとの複雑で動的な関係性に焦点をあてたコンセプトモデルをプログラムのガイドラインとして作成した。

メリエーと多数のネレウス研究者は、公海の利用に関する歴史的なレビューを行い先々多様な海域利用者間での対立が起こる可能性を論じた。また、太田は、ハニックとともに、中西部マグロ漁業委員会が為す国際マグロ類魚資源管理を事例にして、地域漁業管理機関の管理枠組みを考察した。彼らの研究は、魚資源の保全および管理政策に関わる多様な負荷と利益が、如何に関係国に配分されているのかを分析し、島嶼国の利益などを考慮に入れたより公平な配分を提唱した。

オストブロムとフォルケは、南極海の違法漁業



(IUU-Illegal Unreported Unregulated) の防止に対する国家および国際機関、またNGOの連携について考察した。彼らは、地域的な魚資源の管理責務は、管理行為体(管理者)、ネットワーク、機構、組織の仕組みによって大きく左右されると結論づけた。より地域的な研究として、ダン、ブスタニーそしてハル

ピンは、動的海洋管理(ダイナミックオーシャンマネジメント)のコンセプトを示すとともに、実際の時間軸で生態系の変化を認識し、その情報を漁業者と共有する重要性を述べた。動的海洋管理手法を用いれば、これまでの静止したままの海洋の状況について、より現状に近い情報を漁業者と共有する事ができる。

References

Dunn, D. C., Boustany, A. M., Roberts, J. J., Brazer, E., Sanderson, M., Gardner, B., & Halpin, P. N. (2013). Empirical move-on rules to inform fishing strategies: a New England case study. *Fish and Fisheries*, 15(3), 359–375. <http://doi.org/10.1111/faf.12019>

Hanich, Q., & Ota, Y. (2013). Moving Beyond Rights-Based Management: A Transparent Approach to Dis-tributing the Conservation Burden and Benefit in Tuna Fisheries. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 28(1), 135–170. <http://doi.org/10.1163/15718085-12341268>

Merrie, A., Dunn, D. C., Metian, M., Boustany, A. M., Takei, Y., Oude Elferink, A., Ota, Y., Christensen, V., Halpin, P. N., & Österblom, H. (2014). An ocean of surprises – Trends in human use, unexpected dynamics and governance challenges in areas beyond national jurisdiction. *Global Environmental Change*, 27, 19–31. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.012>

Österblom, H., Merrie, A., Metian, M., Boonstra, W. J., Blenckner, T., Watson, J. R., Rykaczewski, R. R., Ota, Y., Sarmiento, J. L., Christensen, V., Schluter, M., Birnbaum, S., Gustafsson, B. G., Humborg, C., Morth, C. M., Muller-Karulis, B., Tomczak, M. T., Troell, M., & Folke, C. (2013). Modeling Social–Ecological Scenarios in Marine Systems. *BioScience*, 63(9), 735–744. <http://doi.org/10.1525/bio.2013.63.9.9>

Österblom, H., & Folke, C. (2013). Emergence of Global Adaptive Governance for Stewardship of Regional Marine Resources. *Ecology and Society*, 18(2), 4. <http://doi.org/10.5751/ES-05373-180204>

海の未来を見つめて

人間活動が起す環境への影響がこれまでと同じ速さや規模で継続すれば、私たちが海とその生態系に与える影響は、今後前例のない範囲に拡大するであろう。気候変動、あるいは漁業など他の人間活動によって引き起こされる海の変化(酸性度、酸素濃度、温度)の変化は、海の基礎生産から魚資源の分布まで、海と漁業に直接的、間接的に影響を与える事が予測される。

世界的な水産消費の増加は、人口増加、経済的発展、そして食物への嗜好の変化(国外での刺身や寿司の消費、また国内ではサーモンの消費の増加など)に因るものである。生態系ベース、予防原則に基づいた責任ある魚資源の管理は、水産が今度も地球の食料システムの重要な構成要素であり続けるための最重要事項である。

海の未来は、過去に私たちが知り、経験した海とは異なるだろう。既に人類が経験した事のない速さと規模での変化が予想されており、過去の経験から実証された海洋自然の構造や仕組み、そしてそこに棲む生き物の分布は、未来には異なる形で現れるだろう。私たちは引き続き、海の未来の変化を予測する能力の発展(科学)とその変化に適応するための行動(政策)を、海という「進化する」生態的・社会経済的なシステムの理解と共に進めていかなければならない。

ネレウスプログラムは、これからも「海の未来」に関わる分野横断的研究を続けていく。今後の2年間は、特に下記の5つのテーマについて、さらなる研究を尾籠な行う予定である。

- 海の未来と魚資源の利用に関する地球規模での予測
- 気候変動と海洋酸性化に対する生物的、社会的適応
- 海と魚資源に関する国際法規の調整
- 現状の課題に対応するための海洋ガバナンス
- 小規模および文化的重要性をもつ漁業への気候変動の影響

最後に、本レポートで概要を述べた知見を、より責任のある、生態系ベースであり予防原則に基づいた管理体制へと応用する試みとして、6つの政策的戦略を以下に列挙する。ネレウスプログラムは、これらの戦略が、魚資源の持続可能性に関わる喫緊の課題解決、特に海の未来に関わるリスクの軽減に貢献すると考える。そのため、ネレウスプログラムは、これらの戦略に期待される効果や効率について、今後の研究の中でより深い考察を行っていくこととする。

戦略	課題の解決	リスク軽減への展望
二酸化炭素排出量を制限する	気候変動の進行や規模、また海洋酸性化や他の海洋環境の変化を軽減する事ができる。	二酸化炭素排出量の軽減は最も効果的である。しかし、これまでの排出量の影響により、中期的(40年前後)には気候変動による海洋環境の変化は継続する。
海洋生態系の生物多様性、生息域そして生態系構造を保持する	気候変動や酸性化などに見られる人間活動を起因とした海洋環境変化の規模を縮小する。	海洋生態系は本来、外的なストレス(生息域の破壊や過剰漁業の影響)を軽減する機能を持つ。例えば、多様性の保全や生態系の構造の保存によって、この能力を促進することができる。しかし、気候変動や酸性化といった世界規模のストレスを軽減し、全て取り除くことは出来ない。
漁業管理のための多様な「ツールキット・管理手法」	人間活動が海に与える多層的な影響や海洋生態系の不規則な変化に対してより柔軟な対応が可能になる。	生態系ベースアプローチは、人間活動を含めた生態系内のつながりを認識している。このアプローチを基盤とした多様な管理手法は生息域の破壊などのリスクを軽減する。しかし、適切な二酸化炭素排出量の制限が前提となる。
持続可能な経済システムを水産流通に適応する	人間活動による海への影響を認識することが可能な市場モデルを構築する。	持続可能な利用に関わる経済的な動機付けを促進することで、人間活動からくる影響の軽減への一般市民の理解と参加が促される。これは、地域、グローバルの両レベルにて有効である。
漁業に関する国際的な法的枠組みと他の海洋活動に関わる法的枠組みの連携および協調	現行の世界および地域的な規制枠組みの調整により、世界的な環境変化への対処を行う。	包括的な海洋管理、例えば生態系アプローチなどの実施により、国際海洋ガバナンスのギャップを埋め、多様な海域での人間活動からくるストレスを軽減できる。しかし、これらの管理・政策はより地域的な戦略とともに施行されるべきである。
脆弱な沿岸域社会への魚資源の公平な分配	海洋環境の変化に脆弱な沿岸域社会の(食料安全保障などに関する)権利を守る。	全般的に社会経済や食料安全保障に関わるリスクは軽減できるが、先住民社会や極度の貧困など、政治経済的に疎外される人々へのリスクは回避し難い。

IMAGE ATTRIBUTIONS

Cover: “Predicting Future Oceans” by Jenn Paul Glaser, Scribe Arts Founder/Director

p.9: [“Bent Sea Rod Bleaching”](#) by [U.S. Geological Survey](#) is licensed under [CC BY 2.0](#).

p.14: [“Small-scale fisheries, Malaysia, photo by Jamie Oliver, 2008”](#) by [WorldFish](#) is licensed under [CC BY-NC-ND 2.0](#).

p.17: [“Jagalchi fish market shells”](#) by [Romain Fouchard](#) is licensed under [CC BY-NC-ND 2.0](#).

p.18: [“Salmon at the underwater dome at The Seattle Aquarium”](#) by [Melissa Doroquez](#) is licensed under [CC BY-SA 2.0](#).

p.21: [“Bluefin Tuna”](#) by [Aziz SALTİK](#) is licensed under [CC BY-NC-ND 2.0](#).

日本財団－ブリティッシュコロンビア大学

ネレウスプログラム

海の未来を予測する

The Nippon Foundation - University of British Columbia

NEREUS PROGRAM

Predicting Future Oceans