

陸奥湾の異常高水温発生メカニズムの解明に向けて

伊藤進一（東北水研）・田中淳也（青森水総研）・川村宏（東北大）・磯田豊（北大）・竹内一浩（いであ）・笥茂穂・和川拓（東北水研）

1. はじめに

2010年の記録的な猛暑は陸上での異常昇温だけでなく、沿岸域の水温においても異常昇温をもたらした。とりわけ陸奥湾では、26℃以上の高水温が10日間以上続く記録的な異常高水温が発生し、ホタテガイが大量へい死し、へい死率が通常の約10%から約70%に上昇した。このため、養殖業のみならず地域の関連産業に甚大な被害が発生した。

この対策を立てるために、陸奥湾ホタテガイ高水温被害対策専門家委員会が組織され、検討が行われた。同時に、農林水産省の「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業研究」に、地方独立行政法人青森県産業技術センター・水産総合研究所の吉田達氏が研究代表となり、2011年度～2013年度の3年間の計画で、「猛暑時のホタテガイへい死率を低減する養殖生産技術の開発」が課題提案され、採択された。このプロジェクトには、共同研究機関として、国立大学法人東北大学大学院理学研究科、国立大学法人北海道大学大学院水産科学研究院、いであ株式会社、独立行政法人水産総合研究センター東北水産研究所、宮城県水産技術総合センター気仙沼水産試験場、国立大学法人東北大学大学院農学研究科が加わり、また普及支援担当としてむつ湾漁業振興会が参画している。

これまで、ホタテガイの増養殖に関する様々な研究が行われてきたが、残念ながら、異常高水温に対する研究は十分には行われていない。また、陸奥湾は、3つの定点観測ブイが展開され、その中の東湾ブイは気象要素まで計測しており、その他にも浅海定点における調査船調査が行なわれてきており、日本でも有数のモニタリング網を有している。それにもかかわらず、

水温変動メカニズムの解明や、水温予測を行うには至っていない。しかし、一方で、地球温暖化に伴って、陸奥湾を始めとする東北地方のホタテガイ生産地では、2010年のような異常高水温被害が起こる可能性が高くなることが予想されるため、本プロジェクト研究では、

- ・水温予測技術の開発
- ・養殖生産技術の改善

の2つを進めることとした。後者では、ホタテガイのへい死メカニズムや養殖適正環境の解明を進め、これらの知識をもとに、異常高水温時における養殖管理技術をマニュアル化するとともに、へい死率を低減するための養殖施設を開発する。前者では、異常高水温発生メカニズムを解明し、その知識をもとに、漁場内モニタリング水温、湾内観測ブイデータ、大気データおよび湾外海況データを用いて、漁場内の異常高水温の発生を1ヶ月前に予測するシステムを構築することを目的としている。これらの成果をもとに、異常高水温発生時にも、ホタテガイのへい死率を2010年度の半分（35%）以下に減少させる技術を開発するという挑戦的な数値目標を設定した。

ここでは、陸奥湾で行われてきた湾内循環に関する研究のレビューを行い、本プロジェクトのうち「水温予測技術の開発」の計画について紹介する。

2. 陸奥湾内の夏季の循環に関する研究

陸奥湾内の夏季の循環に関しては、漁業者の聞き取り調査から西湾に反時計回りの循環が存在し、西湾と東岸を結ぶ領域（夏泊半島と下北半島の間の領域）で西向きの流れが、そして湾口部西側で湾外への流出流があることが示され

ている (Yamaguchi and Kawamura, 2005)。このような循環は、夏季に卓越し、やませに相当する東風と密接に関係していることが示されている。Yamaguchi and Kawamura, (2005)は、気象庁の AMeDAS データから、陸奥湾周辺では、東西風が卓越し、特に東風 (やませ) が卓越することを示した。陸奥湾周辺は、小高い山に囲まれているが、下北半島の付け根部分 (六ヶ所周辺) に平野部が広がっており、やませはこの平野部から湾口に向けて吹き抜ける特性を持つことが、合成開口レーダーの画像からも示された。また、合成開口レーダーのデータから風応力の分布を推定した結果、西湾の中央部に強い正の回転成分 (低気圧回転) が存在することが示された。Yamaguchi and Kawamura, (2005)は、約 500 m の水平解像度 (鉛直方向には 25 層) の数値モデルを用いた実験も行い、六ヶ所から湾口部を吹き抜けるやませによって、西湾に反時計回り循環、東湾に時計回り循環が形成されることを示した。同時に、単なる一様風では、このような二重循環は形成されないことを示した。

西湾での反時計回り循環の傍証として、合成開口レーダーで観測された螺旋渦の存在が指摘されている (Yamaguchi and Kawamura, 2009)。東風 (やませ) が連吹した後に風が弱くなると西湾に発生し、直径 15km 程度の反時計回り循環を形成する。これは、東風によって作られた西湾の低気圧循環の上に、養殖いかだ由来などの油膜が収束し、顕在化したものと考えられている。表層では、下層の低気圧渦が作る圧力傾度と、コリオリ力、下層との摩擦、大気との摩擦がバランスして渦中心へ偏針するため、螺旋渦となることが示された。

3. 陸奥湾内の冬季の循環に関する研究

矢幅ほか(2009a)は、係留流速計のデータなどから、冬季には西湾に反時計回りの循環が存在し、湾口西側に湾外からの流入が、そして西湾と東湾を繋ぐ海域には強い西向き流があること

を示した。気象庁客観解析値 (MANAL) の風応力を用いて、約 1 km の水平解像度の順圧モデルを駆動し、陸奥湾の冬季の循環について調べた結果、西湾と東湾それぞれの反時計回り循環、両湾を繋ぐ海域での時計回り循環の三重循環構造が形成され、係留流速計の結果と整合的であることを示した。しかし、夏季の場合とは違い、この三重循環構造は、風を一様な北西風に変えても、移流項を無視した線形モデルでも再現された (矢幅ほか, 2009a)。したがって、冬季の陸奥湾の循環は、北西風が卓越することが重要であると言える。

4. 陸奥湾内の循環の季節変化

矢幅ほか(2009b)は、係留流速計データなどを用いて、陸奥湾の循環の季節変動を記述した。それによると、前述の通り、夏季には西湾で反時計回り、東岸で時計回りの二重循環を形成し、冬季には三重循環を形成し、秋季と春季は両者の間の遷移期になっていることが示された。

5. 陸奥湾口部の流出入に関する研究

陸奥湾と津軽海峡を結ぶ湾口部での交換流については、精力的に研究が進められてきた。福島ほか(1996)は、1995年8月に行った13時間30分の往復観測から、湾口部における残差流と残差塩分フラックスを算出した。その結果、流出部分は、中央部の上層、底層および西岸の一部に存在し、流入部分は東側上層および下層と、東岸に存在することが示されている。移流パターンと塩分フラックスは酷似しており、移流が物質循環を規定していることが示唆された。ただし、このときの観測では、600kHzのADCPを使用していたため、底層流出を正確に測ることができていない。流入が流出を超過しており、流出流の過小評価の可能性が指摘されている。これらのことから福島ほか(1996)は、300kHzのADCPを用いた13時間以上の繰返観測の必要性を訴えている。また、湾口部の塩分の変化の特徴として、湾口中央部では平均的な潮汐変

動成分が卓越するのに対し、東岸と西岸では振幅が大きく、逆位相になっていることが示されている。

この研究を皮切りに同じ大阪大学のグループによる夏季湾口部での観測が繰り返されている。崔ほか(1997)では、1996年8月の東風が卓越する時期の残差流の流入パターンは、1995年とは違う構造になっており、東風による吹き寄せ効果によって西岸での低塩分水の流出が卓越することを示した。また Chl-*a* が東岸中層の流入部で極大を示すことから、湾外の方が Chl-*a* 濃度が高く、栄養塩濃度も高いことを指摘している。さらに湾内部の断面観測から、上層流出、中層流入、下層流出の3層構造をしていることを報告している。

その後、西田ほか(1999)で、微風時の1997年8月、西風が卓越した1998年8月の流出観測例が報告され、東風が卓越した1996年8月と比較され、1996年と1998年が類似していることが示された。潮位変動に関しては、太平洋側で日潮不等が大きく、下げ潮時に日本海側との潮位差が最大となり、西高東低となるが、1997年8月は東高西低になっていた。太平洋と日本海の気圧差によって潮位逆転が発生したと思われるが、この潮位逆転によって、親潮水が津軽海峡に流入し、海峡内の暖水が湾内へと押し込まれる形で流入し、急潮現象を発生させたことを指摘している。

西田ほか(2000)では更に1999年8月の観測例を報告し、一連の研究から、96, 98, 99年では西側で流出するケースとなっており、95, 97年は異常潮位が発生し、残差流のパターンも違っていると総括した。ただし、これらの観測は任意の日の観測であるため、このような循環が夏季に継続的に維持されているかどうかは定かではない。

このため、これ以降数値実験による検証に主眼が置かれている。西田ほか(2000)では、まず潮位に注目し、松浦、鯨ヶ沢、戸井、大畑などの日本海、太平洋の南北の典型的な潮位を作成

し、線形補間して、東西の開境界で与えた(河川流入、海面熱交換、風による外力は与えず)計算を行っている。この結果、半日周潮外力を与えると1996, 98, 99年のような潮位パターンが海峡部で発生し、日周潮外力を与えると1995, 97年のような逆転潮位パターンが発生することを示した。半日周潮外力では、等潮位線が混み、竜飛岬付近の渦が扁平することが示された。また、傾圧モデルではこの特徴が強化された。一方、日周潮外力では、西岸で流出、東岸で流入という典型パターンが弱くなることがしめされた。

山中ほか(2001)では、境界条件として東西の開境界で主要6分潮(M2, S2, K2, K1, O1, P1)だけでなく、周辺8地点(函館、青森、江差、深浦、むつ、室蘭、八戸、浦河)のデータから空間補間した気圧、気圧経度から計算した風、53河川の平均流量、周辺5地点(函館、青森、江差、深浦、むつ)から空間内挿した気温・日射、青森の雲量6月平年値を用いて循環モデルを駆動した。水平解像度は1km、鉛直は25層のモデルを用い、6月の観測値を空間補間して作製した初期条件から計算を行った。種々の条件でこのモデルを駆動し、潮位変動には気圧が、湾内水温分布には風が、水交換には風、気圧の両方が、重要であることを示した。

矢幅ほか(2010)では、より長期の平均的な流入パターンを調べた。湾口西側の平館ブイの流向・流速データを22年間平均し、周年湾口西側から流入していることを示した。また、日本海洋データセンター(JODC)の流向・流速データから季節ごとの平均流速場を求め、このデータからも通年湾口西側で流入があることを示した。また、理想的なモデルを用いた湾口部での圧力応答から、湾口交換密度流の季節変化を調べ、冬春季には海峡側が低密度となり逆エスチュアリー循環が形成され、夏秋季には表層で湾内が低密度、中層で海峡側が低密度となり、変形エスチュアリー循環が形成されることを示した。

6. 「水温予測技術の開発」の計画

上記の陸奥湾における循環に関する研究のレビューによって、陸奥湾内の循環像及びその季節変化、湾口部での海水交換の季節変化については、かなりの部分がまとめられていることがわかった。一方で、熱収支についての研究が限定的であることも判明した。

2010年に生じた異常高水温は、大気からの加熱による影響が大きいことは否めないが、陸奥湾では夏季に上層と下層の間の成層が強く、大気からの加熱は上層だけに蓄えられる傾向にある。しかしながら2010年の異常高水温発生時には、海底まで高水温が及びホタテガイに大きな被害を及ぼしており、湾外からの暖水の移流や、成層を破壊する現象が伴っていたことが予想される。そのため、「水温予測技術の開発」では、①陸奥湾における熱収支を解析し2010年における特異性を明らかにし、異常高水温発生メカニズムを解明すること、②漁場内の水温をモニタリングし、統計的手法を用いて、湾内の水温予測手法を開発する方法を開発すること、そして、③異常高水温発生メカニズムの解明によって得た知識をもとに、漁場内モニタリング水温から漁場の水温を予測する手法に、湾内観測ブイデータ、大気データおよび湾外海況データを加えることによって高度化し、異常高水温の発生を1ヶ月前に予測するシステムを構築すること、を目標と設定した。

この目標達成のため、

- (1) 大気・海洋相互作用による熱収支解析
 - (2) 湾外と陸奥湾との熱交換過程の解析
 - (3) 陸奥湾内の河川流量・地形データ・潮位データの整備と海洋循環モデルによる海水交換過程の解明
 - (4) 陸奥湾の海洋循環モデルを用いた熱収支解析
 - (5) ホタテガイ漁場内の高温予測手法の開発
- の5つの小課題を設定し(図1)、(1)から(4)の小課題で、異常高水温発生メカニズムを解明し、

(5)の小課題で異常高水温の発生を予測できるシステムの構築を目指してプロジェクトをスタートした。

陸奥湾のような内湾の水温を1ヶ月前に予想するのは、1ヶ月前の大気の状態がわからない場合、かなり困難であることは否めないが、陸奥湾のそして青森県の重要な水産業であるホタテ養殖の安定化のために、漁場内水温のモニタリングから一步一步積み上げ、目標に向かって計画を進める必要がある。

謝辞

陸奥湾のホタテ養殖業の実態については、地方独立行政法人青森県産業技術センター・水産総合研究所の吉田達氏に詳しく教えて頂いた。また、プロジェクトの申請についても、同氏の努力なしには実現できなかった。この場をかりて感謝の意を表す。

参考文献

福島博文・崔成烈・西田修三・中辻啓二・湯浅泰三, 1996, 陸奥湾湾口部における物質輸送機構, 海岸工学論文集, 43, 326-330.

崔成烈・入江政安・福島博文・西田修三・中辻啓二, 1997, 陸奥湾湾口部における流動・密度構造, 海岸工学論文集, 44, 381-385.

西田修三・中辻啓二・西尾岳裕・福島博文・西村和雄・田代孝行, 1999, 陸奥湾湾口部における流動構造の不定性に関する研究, 海岸工学論文集, 46, 421-425.

西田修三・山中亮一・西尾岳裕・福島博文・田代孝行・中辻啓二, 2000, 陸奥湾の流動構造とその影響因子に関する研究, 海岸工学論文集, 47, 416-420.

矢幅寛・磯田豊・磯貝安洋・吉田達・小坂善信・山内弘子, 2009a, 非成層期における陸奥湾の吹送流, 北海道大学水産科学研究彙報, 59, 47-57.

矢幅寛・磯田豊・吉田達・小坂善信, 2009b, 陸奥湾における表層水平循環流の季節変化, 北海

道大学水産科学研究彙報, 59, 59-65.

矢幅寛・磯田豊・吉田達・小坂善信, 2010, 陸奥湾湾口を通過する交換密度流の季節変化, 海と空, 85, 3-17.

Yamaguchi S. and H. Kawamura, 2005, Influence of orographically steered winds on Mutsu Bay surface currents, J. Geophys. Res., 110, C09010, doi:10.1029/2004JC002462.

Yamaguchi S. and H. Kawamura, 2009,

SAR-Imaged Spiral Eddies in Mutsu Bay and Their Dynamic and Kinematic Model, J. Oceanogr., 65, 525-539.

山中亮一・西田修三・鈴木誠二・川崎浩司・田代孝行・中辻啓二, 2001, 気象擾乱を考慮した陸奥湾の流動解析, 海岸工学論文集, 48, 401-405.

農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業研究」
「猛暑時のホタテガイへい死率を低減する
養殖生産技術の開発」

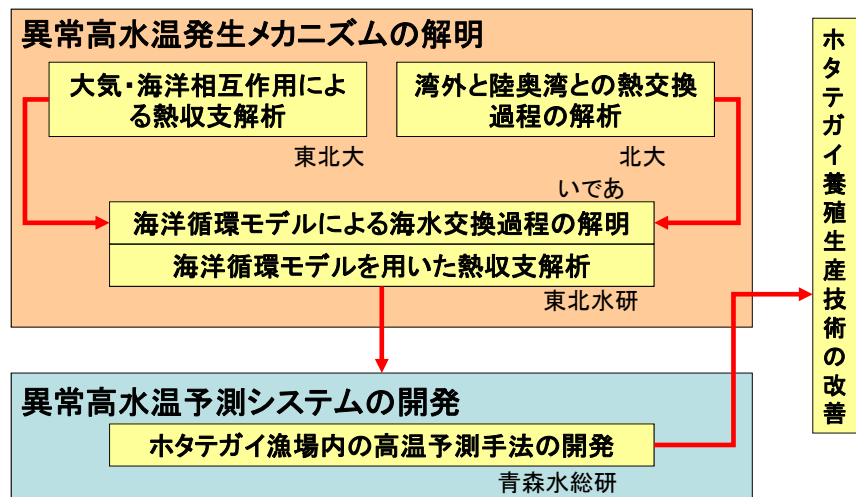


図1. 新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業研究(農林水産省)「猛暑時のホタテガイへい死率を低減する養殖生産技術の開発」の「水温予測技術の開発」中課題の課題構成。