

## 海流研究の半世紀をふりかえる

付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

### 宮澤 泰正

#### 海流とは

海流は、水温と塩分で決まる海水密度の場所による違いによって生じる水平方向の圧力と地球自転によって生じるコリオリ力がつりあうようにしてできる流れ(地衡流)が大半であると考えていいでしょう。ごくおおざっぱに言えば地衡流は、1日以上の間隔にわたって同じ方向に水平的には1kmを越えるような幅で海水が流れるような現象です。海水密度の場所による違いは、風や大気との熱や水のやりとりによって作られ、地衡流を生み出します(風成循環と熱塩循環)。地衡流に、潮汐や風によってできる流れが波やゆらぎ(潮汐流、内部波)として加わり海流は複雑な様相を示します。世界の海にはたくさんの海流が流れていて、その周辺に満ちている活発な渦とともに、酸素、炭素、無機塩類などの物質の海中分布、海洋生物活動などあらゆる海の現象や、世界の気候におおきな影響を及ぼしています。

#### 半世紀前のこと

さて、海洋研究開発機構の前身である海洋科学技術センターが設立された1971年当時、海流の研究者が主な活動の足場としていた日本海洋学会は創立30周年を迎えていました。当時の宇田道隆学会長が書かれた「日本における海洋学最近10年の歩み」[1]にもセンター設立について記載があります。海流の研究動向について宇田氏はそこで、「海洋物理学はコンピューターを利用しシミュレーションの数値的研究と実測の進歩から物理的機巧に基く数値予報に向っている」と述べており、半世紀前に現在の状況を正確に予言していたといえます。その実現には長い道のりがありましたが、宇田氏が的確に指摘していたとおり、海流の数値予報は、半世紀にわたる「コンピューター」、「研究」、「実測」の進歩があって達成されたことなのです。

同じ1971年には海洋物理学の国際研究誌 Journal of Physical Oceanography (JPO)が米国気象学会から発刊されました。当時の論文リストを眺めると、冷水の湧昇など様々な海洋現象の理論的な考察や、海洋大循

環モデルによる世界の海流シミュレーション、Nimbus-IIという人工衛星が観測した海面水温からの海流推定、「内部波」という海流のゆらぎを表現する理論式などの話題があり、今日までの海流研究の基本的な道具立てはすべて出そろっていたことが印象的です。発刊間もないJPOに掲載された最新の論文成果を包含しつつ1974年に出版された「海洋物理学I」(東京大学出版会)[2]に詳しく海流の研究成果が紹介されています。筆者の関心に近いところで「2章 大規模な海水運動の数値実験」(高野健三)の末尾には「大気との相互作用を含めた大循環の計算はすでに始まったが、今後、あらたに扱われる問題は(イ)海況予報、(ロ)潮汐と海流の相互作用、(ハ)密度変化がある場合の潮汐、内部潮汐、あるいはさらに広く内部波全般(その一部はすでに扱われているが)であろう」と書かれていて、とても興味深く思います。筆者が研究してきた(イ)海況予報の分野では最近になってようやく(ロ)(ハ)の探求に進み始めているからです。(高野氏が言及している「大気との相互作用を含めた大循環の計算」は2021年になって真鍋淑郎氏がノーベル物理学賞を受賞した仕事の一部を直接示していることも興味深いです。)

1970年代初頭は、船舶による水温と塩分の観測データを多く用いて様々な場所の海水の密度を計算し、「無流面」という深さ1,000m-2,000mほどの海流がごく弱いとされた層をゼロ流速であると仮定し、密度の水平方向の勾配から海流を推定すること(地衡流推定)がよく行われていました(現在もよく行われていますが)。日本のまわりの海で同じ場所で観測を定期的に長期継続する定線観測体制が確立されたのもこの頃です。1960年代から70年代にかけて行われた「黒潮海域の共同調査 Cooperative Study of Kuroshio (CSK)」の成果からこの手法によって亜熱帯反流という海流が新発見されたのもこの頃でした。

#### 1970年代～1980年代

1971年には太平洋岸で「異常潮位」と呼ばれる高い潮位が生じる現象が現われ社会不安となり、1975年にはそ

の後5年間にわたって続く黒潮大蛇行とそれに伴う異常潮位が生じ社会的な関心を集めました。研究者たちはこうした海流変動現象の解明に意欲的に取り組みはじめました。海流の分布について平均的な状態はおおよそわかってきたから、変動を知りたいという趨勢があったように思います。1970年代には団塊の世代にあたる若者たちが続々と参入し、1981年に書かれた海洋学会創立40周年の総括[3]では博士課程修了者の増加による研究の活況について触れられています。

海流の変動を知るための研究には、1970年代から80年代にかけて、宇宙からの観測というアプローチによって大きな進展がありました。すでに1971年に宇田氏が「マイクロ波によって水位傾斜変化から海流の消長を探る海洋衛星も1975年実現を予想される」[1]としていたとおり、宇宙からのマイクロ波照射によって海面水位(海面高度)を測るSEASAT衛星が1978年に米国によって打ち上げられその後1985年にGEOSAT衛星が打ち上げられました。海面高度は海面の圧力を示す量であり、海面圧力の水平勾配に沿って流れる地衡流を推定することに使われます。とくにGEOSAT衛星データの解析から、日本の南岸を流れる大海流である黒潮が千葉沖で離岸したあとにできる東向きの海流(黒潮続流)の構造や周りの渦のふるまいが明らかになりました。続けて1992年に打ち上げられたTOPEX/Poseidonは計測誤差がはじめて海流変動による水位変化の大きさを下回るような計測を10年以上にわたって続けることに成功し、その後現在に至るまで常に二つ以上の海面高度計測衛星が海流の観測を続ける体制が確立されました。こうして外洋の海の表層については、数日おきの海流の変化が100km程度の間隔でわかるようになりました。

海面高度衛星観測の問題のひとつは、時間変化はわかるけれども時間変化しない平均的な海流の分布がわからないということでした。これを解決したのが人工衛星通信を利用した漂流ブイ計測でした。米国と欧州が主導し1990年代に始まった世界海洋循環実験(World Ocean Circulation Experiment(WOCE))の一環として、ある深さの海流で動くように重りをつけた漂流ブイ(ドリフター)が世界の海に展開されました。漂流ブイの動きから海流を推定し長い期間で平均することで平均的な表層海流が推定できこれから平均海面水位が決定されました。こうして表層に関しては海流の様子が詳しくわかるようにな

ったのです。このように米国と欧州では、人工衛星と現場観測を組み合わせた大規模な最先端の海洋観測プロジェクトが国レベルの規模で組織的に進められていました。これらのプロジェクトは国際共同研究計画でもあり、もちろん日本の研究者たちも積極的に参画していました。

地衡流を知るには海水の密度を知ることがもっとも重要ですが、海流そのものを知るには直接海流を測ることが必要です。このため、海中で伝わりやすい波動である音波のドップラー効果を利用したAcoustic Doppler Current Profiler (ADCP)が1970年代末に開発され海洋観測の重要な道具として普及しました。地上から海面にレーダー電波を照射しそのドップラー効果を利用して表面の海流を直接測る海洋短波レーダー海流観測技術も同様に1970年代末に開発されました。こうした新しい観測により、沿岸近くから深海までの様々な海域で、地衡流だけでない海流の複雑な変動の様子が明らかになってきました。

海流の変動メカニズムの研究においても1970年代から1980年代にかけて大きな進展がありました。それまでに、黒潮大蛇行に限らず海流の蛇行は普遍的な現象であり、さらに海は中規模渦という渦に満ちていることがわかってきましたが、理論と数値シミュレーションによってこうした蛇行と渦の発生や消長のメカニズムがさかんに研究されました。例えば、衛星によって表面の水位変動がわかっただけで下層の流れまで推定できる蛇行現象があることが理論モデルによって解析され、海面高度計観測による海流推定の原理が示されました。地球流体力学の枠組みによって蛇行や渦の特徴づけが行われ現象の持続時間のスケールも明らかになり、海流の予測可能性に関する基礎的な理解が進みました。観測データをシミュレーションモデルに同化してモデルを改良するデータ同化の研究も積極的に進められました。

#### 1990年代～2000年代

1990年代には地球温暖化のリスクが認知され始め、気候変動の全球的な把握とその予測が国レベルの課題として議論されるようになりました。この課題に具体的に取り組むため、宇宙からの観測、海洋の現場観測、気候プロセス研究を融合させて気候変動の予測に貢献するプロジェクト「地球フロンティア研究システム」が1997年に発足し、当時の宇宙開発事業団と海洋科学技術センタ

ーが共同で運営するようになりました[4]。その後、地球フロンティア研究システムは超大型の高速計算機である「地球シミュレータ」の開発を支える、観測、シミュレーション、プロセス研究の三位一体の研究者集団として2004年に発足した海洋研究開発機構の一組織となりました。とくに「地球シミュレータ」を最大限に活用した全球の海洋大循環シミュレーションモデルである Ocean Model for Earth Simulator (OFES)による数十年間にわたる高解像度海流シミュレーションデータが作成され、地球フロンティア研究システムの一拠点でもあったハワイ大学国際太平洋研究センター(IPRC)の研究者によって利用され、またIPRCのデータセンターからも公開されたことで世界中の研究者に利用されるようになりました。地球フロンティア研究システムでは、Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE)グループによる黒潮流路変動予測研究も行われてきました。

2000年には国際的なArgo計画が始まり、表面ではなく海面下1000m-2000mまで潜航して漂流し浮上する際に水温塩分の鉛直プロファイルを計測し、衛星通信でリアルタイムにデータを地上まで送るフロートの展開が進みました。TOPEX/Poseidonを引き継ぐ海面高度計衛星はギリシア神話にちなんでJasonシリーズと名づけられ、Argoとの一体性が強調されました。ArgoとJasonを補完する観測手段として海洋短波レーダー網の沿岸展開も構想され、米国沿岸では海洋短波レーダーが隈なく沿岸を包含するようになりました。全球レベルの現場観測と宇宙からの衛星観測を融合し社会に貢献する有効な手段として、観測データの海洋循環モデルへのデータ同化による海況推定とそれに基づく海流予測の実現が世界の海流研究者コミュニティの目標となりました。これは全球海洋データ同化実験(Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE))という国際的な取り組みとして進められました。日本では主に気象庁・気象研究所、水産庁・水産研究所、海洋研究開発機構において地球フロンティア研究システムの流れを引き継ぐ研究者の諸グループ、京都大学や九州大学の研究者たちが参画し海流予測の実現に尽力しました。

## 2010年代～現在

こうして2010年頃までには、海面高度計、ドリフター、定線観測、Argoフロート、海洋短波レーダーによる海況観測網とコンピューターを駆使した海洋大循環モデル開

発予測研究分野(オペレーショナル海洋学)が世界各国において確立し、20年間にわたる全球レベルでの高解像度海流観測データやシミュレーションデータが蓄積されてきました。1971年に宇田氏が示した予言が世界レベルで実現したと言えます。オペレーショナル海洋学は研究的な側面と、現業的な側面の双方を含んでおり、成果を十全に生み出すには両者の適切なバランスをとることが重要です。こうした点を含め、海洋研究開発機構がオペレーショナル海洋学に対し大きな貢献を果たしてきたことは言うまでもありません。2011年に起きた東日本大震災によって生じた津波による漂流物や、福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の海流による移流拡散を把握し、そのメカニズムを理解するため、観測とシミュレーションの両面で機構の研究者たちが取り組んだことも、機構のオペレーショナル海洋学による貢献のひとつと言ってよいでしょう。海底の調査、資源開発、掘削のオペレーションに海流予測情報が使われるようになったのもこの時期のことです。

観測データと高解像度シミュレーションデータの解析によって、海流変動に対する理解が大きく進みました。黒潮やメキシコ湾流が、駆動力となる風の分布から予想される緯度よりずっと南で離岸し続流としてまっすぐ東に流れるメカニズムがわかりました。黒潮続流には、安定して流れる時期と不安定になり渦がさかんに発生する時期が10年くらいの間隔で入れかわって起きていることがわかってきました。太平洋の比較的深い層では木星や土星のように互い違いに方向の異なる海流が縞々状に分布し複雑な変動をしていることがわかりました。黒潮続流やメキシコ湾流続流といった強い大海流が海面水温の場所による違いを生み出し、それによって気候に大きな影響を与えていることもわかってきました。黒潮大蛇行の発生、持続、消滅のメカニズムも詳しく調べられ、その発生に寄与する太平洋全体の風系の変動と渦活動の具体的なメカニズムがわかりました。異常潮位の発生についても、黒潮流路のゆらぎや風の影響によって生じた流れが海洋波動のメカニズムによって岸沿いに伝わることによって生じることが明らかになりました。海が占める割合が大きく観測が行きとどかなかった南大洋の様々な海流についてもその分布が明らかになり、変動についての理解も大きく進みました。従来知られていた中規模渦や海流の蛇行(中規模現象)よりさらに小さな時空間のスケールで生じている渦活動(小中規模現象)が活発に生じて大きな鉛直流

を生じさせて海洋中の物質分布に大きな影響を及ぼし、中規模現象と相互に関連している様子が明らかになりました。潮汐を駆動力とする内部波による海流のゆらぎが、深さ数千mを越える深海を含め様々な海域で生じている様子も具体的に明らかになってきました。この50年間ではっきりしてきた地球温暖化によって海も温暖化しており海流変動もその影響を受けつつあることがわかってきました。スロースリップと呼ばれる地殻変動が海流変動の影響を受けていることもわかりました。海は、海流ひとつとってみても想像以上にダイナミックに変動しているのです。

## これからのこと

海洋変動の残された謎のひとつとして、太平洋10年規模変動があります。太平洋では10年以上の間隔で海面水温の分布が大きく変わり気候に影響を与えることが知られています。太平洋10年規模変動は黒潮大蛇行など海流の変動にも大きく影響を与えることがわかっており、また黒潮続流などでの海面水温の空間変化が大気に大きな影響を及ぼすことも関係していると考えられています。この現象の解明には海洋と大気が日本近海を含む中緯度域でどのように関連しているか詳しく知る必要があります。水温が比較的低い中緯度では海洋はあくまで受け身であり、活発な大気活動の影響をたんに蓄積して外に表しているだけ(赤色雑音仮説)という考えもありますが、最近はそうでもないということがわかってきているようです。これを正しく理解するためにシミュレーション研究の立場からは、海洋中規模現象を解像できる高解像度での海洋・大気結合モ

### 参考文献

[1] 宇田道隆(1971)、日本における海洋学最近10年の歩み—総括、日本海洋学会誌、27、237-247。

[2] 寺本俊彦 編(1974)、海洋物理学Ⅰ 海洋学講座 第1巻、東京大学出版会。

[3] 杉ノ原伸夫、遠藤昌弘、山形俊男、伊宗換、蓮沼啓一、長坂昂一、友定彰、深沢理郎、西田英男、小長俊二、杉本隆成、長嶋秀樹、大西行雄、柳哲雄、西勝也、河合三四郎、増田章、相田勇、小野延雄(1981)、日本における海洋学最近10年の歩み—海洋物理学、日本海洋学会誌、37、301-316。

[4] 海洋科学技術センター普及・広報課 情報業務課 編(2001)、海洋科学技術センター 創立三十周年記念誌。

[5] 鳥羽良明(2002)、危機に立つ地球環境—海洋学は人類を救えるか、海の研究、11、197-200。

 Tell me a bit about yourself.

筆者紹介



## 宮澤 泰正

1967年 長野県生まれ。

民間企業勤務を経て海洋研究開発機構に入所、今に至る。

原稿を書いているうちにお世話になった多くの方々の顔が思い浮かびました。半世紀の研究史のうち後半25年は自分が同時代で経験し見聞きしてきたことであり、記述のひとつひとつに関係者の名前を載せたい気持ちになりました。本稿執筆は、半世紀前の研究者たちの思いと現在の状況の確かな繋がりを確認することができ、良い経験となりました。