

京大地物教室が貢献した海洋物理学研究の流れ

杉本隆成・柳 哲雄・遠藤修一・今脇資郎・市川 洋

1. 水理模型実験

杉本隆成 (1966 年卒)

速水頌一郎門下による海面と沿岸境界層の実験的研究の手段として、1960 年頃、防災研究所宇治川水理実験所に風洞水槽と平面水槽が設置され、風波の発生・発達過程と沿岸海域の潮流等の構造と力学に関する研究が活発に行われた。言うまでもなく、風洞水槽は風波等の切り出し原寸模型であるのに対し、平面水槽は波浪や津波、潮流の力学的に相似な縮小模型である。ここでは主に後者の研究活動と成果について述べたい。

1960 年前後は頻発する津波、高潮災害の水理学的究明のため、また日本経済高度成長期の 1960 年代半ば以降は、沿岸コンビナートの建設が海洋環境に与える影響予測のアナログ・シミュレータとして水理模型実験が活用された。その中心を担ったのが、当時防災研究所助教授の樋口明生で、宇治川水理実験所に自動制御の起潮機と屋舎を備えた大型の海洋河口実験施設を設置し、広島湾や名古屋港等を対象にして、潮流に対する海底摩擦効果の相似律を確立した(樋口、学位論文、1963)。また、大学院生の杉本隆成を指導しつつ、有明海や備讃瀬戸を対象に、潮流による渦動拡散現象に対する相似律(水平縮尺 L_r と鉛直縮尺 H_r と時間縮尺 T_r の関係式、 $L_r = H_r^{3/2} = T_r^{3/2}$; 杉本学位論文、1974)を提唱した。さらに、杉本と柳哲雄等が、大阪湾中央部や笠戸湾等で見られる潮汐残差環流の発生機構(潮流の陸岸摩擦に起因する渦度の地形性非線形効果による集積)、及び環流が海水交換に及ぼす効果について先駆的な成果を収めた(杉本や柳の学位論文)。1970 年頃までの問題意識は各県の地先海域に限られていたが、その後、瀬戸内海全域規模での海水交換が問題にされるようになった。速水・宇野木(1970)は水平一次元の数値モデルから、見かけの水平拡散係数の値を $10^3 \text{m}^2/\text{sec}$ と見積った。これに対して、杉本・樋口(1971)が写真 1 に示す潮流水理模型を用いた染料拡散実験から見積った水平一次元の見かけの水平拡散係数もほぼ同程度の値を示し、その結果、潮流に起因する灘規模の水平残差環流(恒流)が海水交換に果たす役割と潮汐残差環流の力学的生成機構が注目されることになった。さらに、杉本と武岡英隆が小港湾や突堤周辺部の非定常な地形性渦流の発生機構と海水交換に果たす役割を解明した。それらの研究の展開はいずれも 1970 年代のことであった。これらの成果は、樋口を中心に進められた通産省中国工業試験所の大型水理模型の制作(1973 年竣工)に取り入れられ、実験的研究に生かされた。

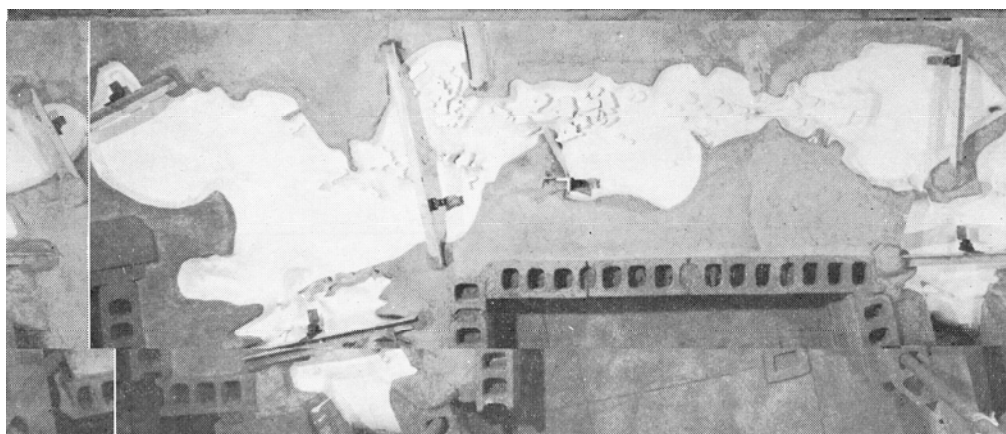


写真 1. チリ津波の挙動の研究で製作され、潮汐残差環流研究の端緒を切り開いた水平縮尺 10 万分の 1 の瀬戸内海小型水理模型 (杉本・樋口、防災研年報、1971)。

ただ、水理模型実験において、後流渦に関わる剥離点の再現性は、陸岸地形が突堤や埋立地のように角形に近い場合は良いとしても、円形に近い場合に剥離点を再現する陸岸粗度の与え方は課題として残された。また、密度成層と地球自転の効果が無視できない現象は、非回転の水平 2 次元模型の適用範囲を越えている。そのような条件の影響の究明は、数値シミュレーション技術が発達した 1980 年代になってから、

地球物理学教室の今里哲久や淡路敏之等によってなされた。

その他の水理模型実験としては、二層系密度流の鉛直混合に関する岡崎守良や平野敏行の研究や、高波の越波に関する柿沼忠男の研究がある。また回転水槽による研究として、今脇資郎(北極海の海流パターン)、柳(斜面上の潮汐残差流)、杉本(黒潮前線波動通過に伴う沿岸域の流況変動、冬季陸棚上の密度流と海水交換、津軽暖流の流路の季節変動機構)、酒井敏(内部ケルビン波等への教育的活用)が挙げられる。また今後に残された沿岸海洋の水理模型実験の課題としては、諸波動の崩れや混合土砂礫の選択的輸送等、数値実験では困難な現象の素過程の解明等が挙げられよう。

2. 沿岸海洋学

柳 哲雄 (1972 年卒)

沿岸海洋学は水深 200m より浅い浅海域の海洋学である。世界の海の平均水深は約 4000m で、浅海域は面積的には世界の海洋のわずか 3% に過ぎない。しかし、浅海域は栄養塩濃度が高く、浅くて有光層の占める割合が大きいので、世界の海の漁獲量の約半分は浅海域で得られている。

日本の沿岸海洋学は 1962 年に創立された日本海洋学会・沿岸海洋研究会 (かつての名称は沿岸海洋研究部会) を中心に進展してきた。この研究会の創立者で初代会長は速水頌一郎であるが、以後歴代の会長は主に京都大学地球物理学教室卒業生が担ってきている (表 1)。沿岸海洋研究会は春と秋の日本海洋学会開催時に特定のテーマに関する沿岸海洋シンポジウムを開催し、その報告と投稿原著論文からなる「沿岸海洋研究」(かつての名称は「沿岸海洋研究ノート」) を年 2 冊発行してきている。研究会の会員には日本海洋学会の会員でなくてもなれる。2010 年 8 月現在の会員数は約 500 名である。

日本の沿岸海洋学の中で京大・理・地物関係者による主な業績としては、速水による瀬戸内海全域の拡散係数の見積もり、国司による白浜における海水交換の間欠性の発見、杉本による水理模型実験結果をもとにした海洋拡散現象の解明、柳による潮汐残差流の発見と里海概念の提唱、武岡による平均滞留時間を中心にした海水交換概念の整理などが上げられる。また柳は日本の沿岸海洋学の成果を中心に「沿岸海洋学」(恒星社厚生閣) を 1989 年に発刊し、その英訳本 "Costal Oceanography" (Terra Pub) を 1999 年に発刊した。

京大・理・地物・海洋のこの豊かな伝統が後輩にも受け継がれ、日本のみならず世界の沿岸海洋学をリードし続けてもらいたいと思う。

表 1 日本海洋学会・沿岸海洋研究会・会長

会長名	(所属)	期間	卒業大学
速水頌一郎	(京大・理)	1962-1972	京大・理・地物
佐々木忠義	(東京水産大)	1972-1983	北大・理・物理
国司秀明	(京大・理)	1984-1989	京大・理・地物
宇野木早苗	(東海大・海洋)	1990-1993	気象大学校
和田明	(日大・理工)	1994-1997	信州大・工・土木
福田雅明	(三洋テクノ)	1998-2001	北大・理・物理
杉本隆成	(東大・海洋研)	2002-2005	京大・理・地物
柳 哲雄	(九大・応力研)	2006-2009	京大・理・地物
武岡英隆	(愛媛大・沿岸研)	2010-	京大・理・地物

3. 琵琶湖

遠藤修一 (1974 年卒)

琵琶湖の地球物理学調査は、1925 年の神戸海洋気象台による総合観測のあと、戦争等による研究の空白が続くが、1960 年代になって岡本巖と森川光郎は漂流ビンや漂流板を使用した湖流観測を開始するとともに、水温変動のメカニズムに関する調査を精力的に実施した。この中で、琵琶湖の環流が地衡流の性格を有することが見出され、1960 年代後半に国司秀明、岡本巖、佐藤英夫らは BT による水温観測を導入し、

力学計算による湖流推定を可能とした。その後、1970年代に遠藤修一らによる診断モデルの適用により流速場の推定精度が向上した。また、今脇資郎と遠藤修一は水温観測データから環流と内部波の分離を試みた。湖流の直接測定としては、1970年代の山本敦之や奥村康昭による電波漂流ブイや自記流速計の開発、奥田節夫・横山康二による連続測流、1980年代の遠藤修一と岡本巖によるレーダを利用したブイ追跡、および1980年以降の遠藤修一と奥村康昭による流速計群の展開、熊谷道夫と焦春萌による ADCP 曳航観測などが挙げられる。

流れの時間変動に関しては、1970年代に今里哲久が静振を、金成誠一が内部波を主な対象としてそれぞれ観測と数値実験を行い、風による湖流形成のメカニズムを調べた。また、大西行雄は風や密度差が引き起こす湖水の運動に関する数値実験を行った。1980年代には熊谷道夫と大久保賢治が回転水槽を使用して環流の形成に関する水理模型実験を行った。2000年代になって、秋友和典は琵琶湖の湖流と水質変動に関する詳細な数値計算を行い、琵琶湖の環流の形成・維持に湖上の風の過度が重要であることを示した。

1970年代より奥田節夫と横山康二は、人工衛星や航空機を使用したりリモートセンシング技術を応用し、河川水や湖水の分散について観測を行った。河口沖における観測としては、1970年代の山本敦之や奥村康昭による姉川調査、西勝也と藤田政伸らによる天野川調査、1980年代の岡本巖と遠藤修一らによる芹川調査などが挙げられる。また、1980年代に吉岡龍馬らは、流入河川の水質の地域特性と季節変化を調べた。赤野井湾と南湖との湖水交流に関して、奥田節夫、國司秀明、岡本巖、樋口明生、畠山祐二らによる共同観測が1971～72年に実施された。2000年前後に戸田孝と板倉安正は赤外線リモートセンシングにより赤野井湾の湖水流動について観測を実施した。塩津湾では岡本巖による長年にわたる観測が行われたほか、2000年代に熊谷道夫と焦春萌によって流動場調査がなされた。また、余呉湖においては今里哲久、國司秀明、鳥羽良明らによる水収支と熱収支の観測が1970年代に行われた。

琵琶湖および滋賀県の気象特性に関して、1980年代より中島暢太郎と枝川尚資は湖上の風系の分類を行うとともに湖陸風に関する調査を行った。1990年より約10年間にわたり、遠藤修一は調査艇によって湖上の風の分布を繰り返し観測している。湖周辺では、大西行雄、戸田孝、遠藤修一らがメンバーとなってピワコダスという風の観測が1997年より継続されている。

堀江正治と國司秀明は琵琶湖古環境実験施設を1977年に創設し、湖底ボーリングによる堆積環境の調査を行った。1980年代より山本淳之、金成誠一、福尾義昭、柏谷健二らは湖底堆積物の分析を行うとともに古気候について解析を行った。1970年代より奥田節夫と横山康二は懸濁物質や湖底堆積物の調査方法について新しい手法を考案し、神山孝吉は湖底堆積物からの窒素溶出についての研究を行った。2001年より熊谷らは自律型潜水ロボット「淡探」による湖中探査を行った。

琵琶湖の水文水質や生態系に関する総合研究としては、1960年代のBST(琵琶湖生物資源調査)、IBP(国際生物学事業計画)、IHD(国際水文学十年計画)、および1993年のBITEX(琵琶湖国際共同観測)などが挙げられる。

なお、海洋物理学講座では1970年以来長きにわたって、3回生配当の授業「課題演習」に琵琶湖の調査が取り込まれ、多くの学生が琵琶湖の現実に触れてきたことも特筆すべきであろう。

以上、京大海洋物理学講座およびその出身者による琵琶湖研究は長い歴史と大きな成果を有している。琵琶湖の汚染が叫ばれて久しいが、安易なマスコミ報道に惑わされることなく、今後もより高い精度の観測と緻密な理論により、琵琶湖の謎が解明されることを切に望む。

4. 海洋中規模渦

今脇資郎(1968年卒)

1960年代までは、黒潮などの西岸境界流が存在する海域を除いた海の真ん中(海央)における流れは弱いと考えられていたが、1970年代に入って、中立ブイの追跡などの断片的な流速観測によって、海央には時間的に大きく変動するかなり強い流れがあるらしいことが分かってきた。この流れは簡単に中規模渦(mesoscale eddies)と呼ばれている。中規模渦の研究には、流速の長期にわたる連続観測が不可欠である。海中で流速を精度よく測る技術は、米国ウッズホール海洋研究所によって、やっと1970年代にほぼ完成された。今脇資郎は、1975年にウッズホール海洋研究所の観測船チェーンの係留航海に参加して、係留系の設置と回収に関する当時最新の技術を学んだ後、國司秀明や高野健三(当時、理化学研究所)と共に、1977年に伊豆海嶺東方において、係留した流速計による長期流速観測を開始した。流速計の設置と回

収を合計9回繰り返し、1985年まで観測を続けた。

まず、1978年から1979年にかけて実験海域内の5地点の深層に係留した流速計のデータから、相対渦度の時間変化率と惑星渦度の水平移流の時系列を求め、両者がほぼ釣り合っていることを見出した(Imawaki, 1983; Nature, 303, 606-607)。この研究は、それまでの観測データの解析からはもっぱら中規模渦の非線型性が強調されていたが、場所と深さによっては線型に近い渦度バランスも存在していることを示した。また、この海域のある地点の深層で、最終的に約7年にわたる連続記録を得た。これは海央での係留した流速計の連続記録としては世界でも屈指のものである。この流速記録から周波数スペクトルを求め、中規模流速変動の特徴を詳しく調べた。その中間報告として、この流速変動が、中程度の長さの波長をもつ傾圧ロスビー波が異った方向に位相伝播していることによって説明できることを示した(Imawaki and Takano, 1982; Science, 216, 1407-1408)。この成果は、中規模流速変動に関する代表的な観測例として、多くの論文で引用された。

人工衛星に搭載した海面高度計は、海面高度という、海面での地衡流などに直結する力学的に極めて重要な物理量を全球的に繰り返し測定することができるので、現在、海洋観測において絶大な威力を発揮している。今脇資郎は、1987年の米国マサチューセッツ工科大学での研究を基にして、当時大学院生であった市川香や青木茂らと共に、まず、1985年に打ち上げられた海面高度計衛星GEOSATのデータを解析した。黒潮続流域での海面力学高度のアノマリー(1年間の平均値からのずれ)の水平分布の時間変化を調べ、特徴的な三つの低気圧性アノマリーがほぼ一定の速度で西向きに並進していたことを示した。さらに、それらはある時、合体してより強い渦になるなど、極めて興味深い振舞をすることを示した。次に、北太平洋西部の広い範囲にわたって、中規模渦に伴う海面力学高度のアノマリーの東西方向の位相速度を統計的に求めた。海域を西海域と東海域に分けてその緯度変化を調べたが、どちらの海域でも、アノマリーは西向きに伝播していた。その速さは、傾圧第一モードのロスビー長波の理論値にほぼ一致するが、その緯度変化はかなり複雑であり単純な理論では説明できないことを示した。これらの研究は、その後の、TOPEX/POSEIDON海面高度計データによるさらなる海洋物理学の展開につながった。

5. まとめにかえて

市川 洋 (1972年卒)

1960年代以降に京大地物教室が貢献した海洋物理学に関わる分野の研究は、その手法と対象から以下の8つに大きく分類される。

- ・海面境界過程研究の系譜
- ・白浜観測塔観測の系譜
- ・沿岸海洋学研究の系譜
- ・水理模型実験の系譜
- ・リモセン観測研究の系譜
- ・数値モデル研究の系譜
- ・琵琶湖研究の系譜
- ・海洋中規模渦研究の系譜

これらの多くは、速水頌一郎の発案・主導で始められ、國司秀明の下で展開・推進され、その一部が今里哲久・淡路敏之の時代へと引き継がれた。本稿は、これらの中の4項目について、関係者が分担して執筆したものである。他の項目については、本誌所収の鳥羽良明による寄稿「京大海洋物理学分野の歴史的展望 — 講座の始まり、野満・速水・国司・今里教授の時代から現在への発展 —」を読みたい。

國司秀明が教授であった時代に行われた多種多様な海洋物理学に関わる研究の多くは、その後、京大地物教室の内外で飛躍的に発展した。それは、この時代が観測・測定技術や電子計算機性能の急速な発展期であったことに加えて、当時、黎明期にあった海洋物理学が直面する諸問題に対して、講座メンバーの各々が抱いた独創的なアイデアや野心的な構想を尊重し、それらを実現するために、観測機器の確保・手配、観測航海の立案・実施、学内外研究者との共同研究の推進などの種々の対応を積極的に進めた國司秀明のオープン・マインド(固定観念を排し、異なる価値観を持つ相手を認める開かれた心)な個性が大きく作用した結果だと思う。なお、本誌の他の寄稿と史料を読むと、野満隆治も速水頌一郎も、オープン・マインドの持ち主であったようである。このような第二講座(海洋学および陸水学)の伝統が國司秀明にも引き継がれ、大きく開花したのだろう。

残念ながら、本稿の構成などを検討中の6月28日未明に國司先生はご逝去された。本稿が國司先生の優れたメンターとしての足跡を後世に伝える一助となることを願っている。