

沿岸の海洋物理学における三つのパラダイム*

磯 辺 篤 彦**

Three Paradigms for the Physical Oceanography in Coastal Waters

Atsuhiko Isobe

沿岸の海洋物理学における第一のパラダイムは、海況情報の博物学的収集を目指したものである。第二のパラダイムでは、潮流や吹送流のような物理素過程の重ね合わせとして、沿岸海洋物理過程の探究を行う。これら二つのパラダイムに加えて、ROFIや成層域といった物理素領域の組み合わせで沿岸海洋過程を考える、第三のパラダイムを示した。

In the first paradigm of the physical oceanography in coastal waters, oceanographers have just collected information on currents and hydrographic properties in specific oceans as naturalists. In the second paradigm, they have explored the physical oceanography in coastal waters as a superposition of physically elemental processes such as tidal and wind-driven currents. Emphasized in the present study is the third paradigm, where oceanographers recognize coastal waters as a combination of physically elemental regions such as ROFI and stratified oceans.

キーワード：パラダイム, 物理素過程, 物理素領域

1. はじめに

ニュートンのプリンキピアのような、ある科学者集団にとって規範となる業績を、Kuhn(1962)¹⁾はパラダイムと定義した。そして、科学とは、過去の研究成果が累積して継続的に発展するものではなく、一つのパラダイムが限界を迎えたとき、他のパラダイムへと、科学革命を通して段階的に移行(パラダイム・シフト)するものと結論付けた。このような科学史の視点に立つとき、現代海洋学のパラダイムの一つとして Stommel (1948)²⁾を挙げることに、異を唱える海洋研究者はいないだろう。大洋を矩形模型に置き換えた鮮やかな単純化によって、表層海流の西岸強化現象を解き明かした5ページ足らずの大論文である。海洋循環の単純化と数値模型による検証といった Stommel (1948)²⁾の様式は、その後の記念碑的論文、すなわち深層循環論の Stommel and Arons (1960)³⁾や、中層循環論の Rhines and Young (1982)⁴⁾と Luyten, Pedlosky and Stommel (1983)⁵⁾などに引き継がれていった。

この小論では、沿岸の海洋物理学におけるパラダイムと、その移行を概観してみたい。本来のパラダイムとは

規範となる業績を指す¹⁾が、ここでは、こんにち用いられることの多い「考え方の枠組み」といった意味を含める。本稿が目指す沿岸の海洋物理学小史の記述に便利だからである。特定の科学者集団は、研究成果を上げるのに最も有利な過去の業績(あるいは考え方の枠組み)を、パラダイムとして選択する¹⁾。そして、この小論では、パラダイムを選択する科学者集団に、国内外の区別はしていない。そもそも、普遍性を求める科学(本稿では、沿岸の海洋物理学)において、国内に限定したパラダイムなど矛盾した概念である。

2. 第一のパラダイム—海況情報の博物学

海流は何処から来て何処へ向かうのだろうか。この海洋学に向けられる素朴な疑問は、沿岸の海洋物理学において一つのパラダイムであった。たとえば、瀬戸内海東部における養殖ノリの色落ち問題の原因究明にあたって、栄養塩輸送を支配する海洋循環の把握は重要である⁶⁾。あるいは、有明海問題に関連して、諫早干拓に伴う海洋循環の変化が盛んに論じられている⁷⁾。このような学術的・社会的要請を受けて、沿岸の海洋物理学には、海域に散在する渦の向きや強弱、および、これらに応じた輸送系や水温・塩分分布の変化といった情報の提供が求められてきた。このような、海況情報の博物学的収集というパラダイムに則った業績に、我が国においては、日本沿岸海洋誌⁸⁾や続日本沿岸海洋誌⁹⁾を挙げるこ

* 2013年7月6日受領, 2013年7月8日受理

** 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

連絡先: 磯辺篤彦, 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

〒790-8577 愛媛県松山市文京町2-5

E-mail: aisobe@chime-u.ac.jp

とができる。そして沿岸の海洋物理学とは、このような“博物誌”に記載される海況情報を、精緻に正確に、そして多くの沿岸海域で収集することであった。

上述のノリの色落ち問題や有明海問題など、このパラダイムは依然として地域貢献に有用である。しかし、研究成果を上げる有利さといった観点から見れば、パラダイムの限界は明らかであろう。科学者集団が有能であるほどに、海域の海況情報は速やかに収集し尽くされ、たちまち研究の題材が枯渇する。そして、科学者集団の興味が不要ほどに細密な海況に向かうとき、沿岸の海洋物理学は箱庭的な海況情報のコレクションに陥ってしまう。そして、沿岸海域の多彩な地形や、時空間変化の大きな風や浮力による強制を考えれば、ある海域で得た精緻な海況情報を他の海域に援用することは難しく、結果として、海域の数だけ科学者集団が細分化されていく。

3. 第二のパラダイム—物理素過程の重ね合わせ

80年代前半に出版された Csanady (1982)¹⁰⁾ や Bowden (1983)¹¹⁾ にある考え方の枠組みは、明らかに第一のパラダイムとは異なっている。およそ、そのテキストが則るパラダイムは、それぞれの章立てに反映されるだろう。例えば、第一のパラダイムに依る日本沿岸海洋誌では、博物誌といった性格上、当然ながら海域ごとに章が立てられている。一方で、Csanady (1982)¹⁰⁾ や Bowden (1983)¹¹⁾ では、密度流や吹送流など「物理素過程（特定の強制に対する海洋の力学的応答）」に章が割かれており、ここには、素過程の重ね合わせとして、沿岸の海洋物理過程を理解するパラダイムが鮮明である。すなわち、沿岸の海洋循環は潮流と平均流（密度流、吹送流、潮汐残差流）の総和であり、強制の強弱に応じた素過程の重ね合わせが海域の海洋循環を決める。ここで探究されるべきは、各海域の独自性ではなく、外洋潮汐や浮力、そして風の強制に伴う浅海域の普遍的な応答である。ここにおいて、沿岸の海洋物理学は、博物学から流体力学の一分野へと立場を変えるに至った。この物理素過程の重ね合わせという第二のパラダイムは、柳 (1989)¹²⁾ や宇野木 (1993)¹³⁾ にも通底しているようである（物理素過程で構成される両テキストの目次を参照のこと）。

沿岸の海洋物理学に携わる研究者は、しかしながら、前述のテキストが出そろった90年代には、このパラダイムの限界を感じ始めたのではないかと。Yanagi (1976)¹⁴⁾ や Zimmerman (1978)¹⁵⁾ による潮汐残差流の研究は、新たな物理素過程の発見という華々しい成功を取めたが、これを最後に、今後新たな素過程が発見される可能性は低い。その他の物理素過程においても、風や浮力の強制

に対する浅海域の応答は探究を尽くされ^{10~13)}、かといって海域の形状や強制に多彩な変化を求めれば、これは、むしろ第一のパラダイムへと回帰してしまう。

なによりも、沿岸海域で重要な幾つかの物理過程が、素過程の線型的な重ね合わせでは記述しづらい。たとえば、河川水の振る舞いについて考えよう。河口での淡水負荷に伴い、まず、回転系の密度流が河口前面に高気圧性の渦を形成する^{16~18)}。これまでの理論的研究^{19, 20)} や、あるいは数値的研究^{21~24)} によれば、この渦は、時間の経過につれて河口から沖合方向への不安定成長（ballooning²⁰⁾）を示す。ところが興味深いことに、実海域で ballooning が観測されることはない²³⁾。海陸風強制的吹送流など適当な平均流^{24, 25)} や潮流^{26, 27)} が背景に加わって ballooning を阻害し、実海域に見られる淡水影響域（Region of Freshwater Influence (ROFI); Simpson, 1997²⁸⁾）の平衡状態が達成されるらしい。このように、素過程の複合的な寄与で形成される ROFI は、テキストにおいて、たとえば密度流の章では座りが悪い。あるいは、急潮現象は、広義の吹送流である黒潮の一部が密度流として沿岸海域に侵入しつつ²⁹⁾、潮流混合によって侵入距離が制御される過程³⁰⁾ であって、やはり形成には素過程の複合的な寄与が必要である。

4. 第三のパラダイム—物理素領域の組み合わせ

古典的な Simpson and Hunter (1974)³¹⁾ の潮目形成論や、Simpson (1997)²⁸⁾ に示されている海域分類図（Simpson, 1997の Fig. 1）は、上記二つとは別のパラダイムに示唆的である。Simpson (1997) の海域分類図に加筆した

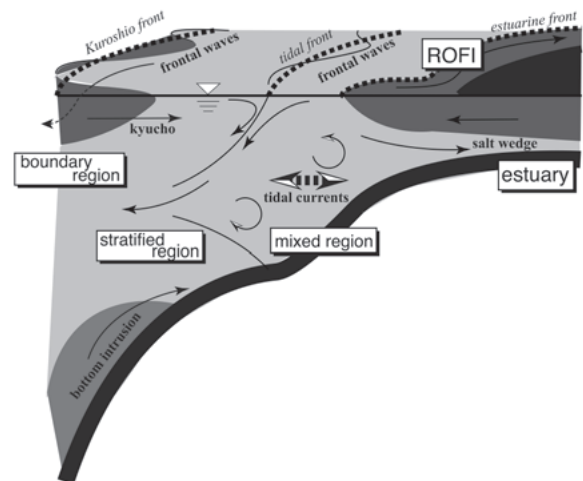


Fig. 1 Schematic view of coastal waters as a combination of physically elemental regions. Physical processes that are remarkable in coastal waters are also depicted in the figure. Oceanic fronts are shown by the bold broken curves.

Fig. 1では、河口域、ROFI、混合域、成層域、そして境界域といった「物理素領域」で沿岸海域を区分けしている。ここで河口域は感潮河川と同義であり、ROFIとは、浮力フラックスへの河川水負荷の寄与が、海面熱フラックスの寄与を上回る水域²⁸⁾と定義される。混合域と成層域は、潮流振幅に応じた鉛直混合の程度によって成層強度が異なる水域³¹⁾で、境界域は、文字通り外洋循環と沿岸海域の境界部である。たとえば日本南岸においては、急潮（黒潮フロントの前線不安定）の影響範囲で区分けすることが適当だろう。これら物理素領域は、いずれも、ある物理過程によって他とは異なる水塊特性を持つに至った、沿岸における特定の水域である。したがって、物理素領域と沿岸海洋前線の分類³²⁾は関連付けやすい。たとえば、ROFIと混合域との境界は河口フロントで、混合域と成層域の境界は潮汐フロントである。

このパラダイム候補において、海洋物理学が目指すものは、それぞれの素領域形成過程や、素領域内の海洋循環を支配する力学機構、あるいは素領域間の海水輸送過程（海水交換過程）の探求である。ここにおいて、第一のパラダイムでは博物学的に記述された沿岸海域の多様性は、物理素領域の多様な組み合わせとして理解される（Fig. 2に模式図）。

これがパラダイムとして成立するには、特定の科学者集団が、成果を上げるための有利さを認識する必要がある。そして、実際に、ROFIの形成過程^{16~27)}や、沿岸海域における鉛直混合論や成層形成論（最近のわが国の研究例にはTsutsumi and Matsuno, 2012³³⁾）など、物理素領域内の力学過程には、多くの研究例を挙げるができる。素領域間の海水輸送とは、すなわち前線横断方向の輸送過程であり、古くは潮汐フロント周辺の定常二次流を論じたGarrett and Loder (1981)³⁴⁾がこれに当たる。沿岸海洋前線に発達するサブメソスケールの前線不安定も、素領域間の海水輸送過程として重要であろうが、既存観測体制では実態を捉えにくいいため、これまで研究が進んでこなかった。その中において、潮汐フロント周辺での植物プランクトン分布を前線不安定と関連付けたPingree *et al.* (1979)³⁵⁾は先駆的である。ようやく最近になって、潮汐フロント周辺の前線不安定や、これに伴う海水輸送過程について、いくつかの研究結果^{36, 37)}が提出され始めた。

5. おわりに

若い研究者は、沿岸の海洋物理学を、箱庭的な海況情報のコレクションと幻滅しないほしい。もし、そのような“研究”があったならば、それは限界を超えて第一のパラダイムに固執した袋小路である。若い研究者は、

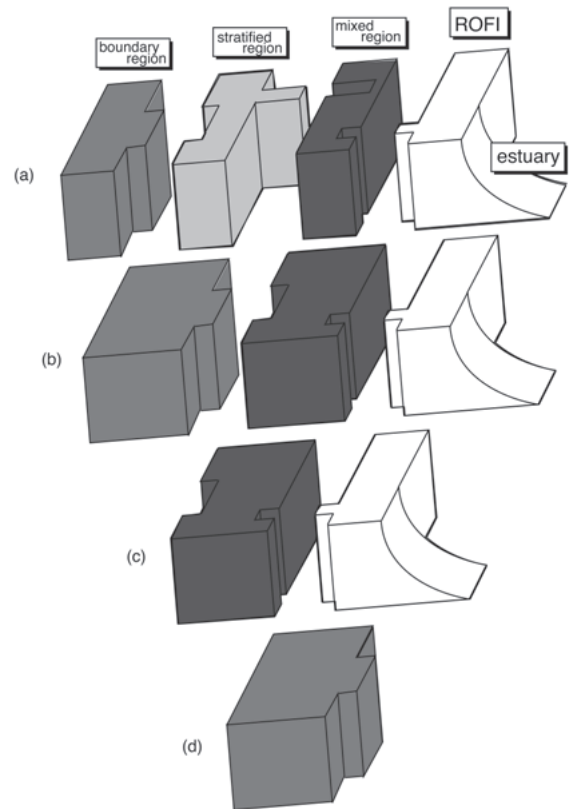


Fig. 2 Various combinations of physically elemental processes. Coastal waters are likened to a puzzle of which pieces are physically elemental processes. A standard form (a), winter coastal waters where the stratification is destroyed by vertical mixing (b), the same as (b) but for seas far from open oceans, such as Osaka Bay in winter (c), coastal waters facing directly on the open ocean such as Tosa Bay (d).

沿岸の海洋物理学を良書^{10~13)}に学んで、かえって流体力学としての先行きを見切らないでほしい。パラダイムの限界は学術分野の終焉ではなく、別のパラダイムへ移行する端緒である。本小論が、沿岸海洋研究を志す若い研究者にとって、一つの道標となれば幸いに思う。

謝 辞

本稿の執筆機会を頂いたコンピーナに感謝する。

参 考 文 献

- 1) Kuhn S. T. (1962) : 科学革命の構造 (第30版/中川茂訳). みすず書房, 東京, 277pp.
- 2) Stommel, H. (1948) : The westward intensification of wind-driven ocean currents. Trans. American Geophysical Union, **29**, 202-206.
- 3) Stommel, H. and A. B. Arons (1960) : On the abyssal circulation of the world ocean -I. Stationary planetary flow patterns on a sphere. Deep-Sea Research, **6**, 140-154.

- 4) Rhines, P. B. and W. R. Young (1982) : A theory of wind-driven circulation. I. Mid-ocean gyres. *Journal of Marine Research*, **40** (suppl), 559-596.
- 5) Luyten, J. R., J. Pedlosky and H. Stommel (1983) : The ventilated thermocline. *Journal of Physical Oceanography*, **13**, 292-309.
- 6) 多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫 (2010) : 瀬戸内海の水質環境とノリ養殖. *分析化学*, **59**, 945-955.
- 7) 門谷茂・中田英昭 (2004) : シンポジウム「沿岸海洋学からみた有明海問題」のまとめ. *沿岸海洋研究*, **42**, 1.
- 8) 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会 (1985) : 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 東京, 1106pp.
- 9) 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会 (1990) : 続・日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 東京, 862pp.
- 10) Csanady, G. T. (1982) : Circulation in the coastal ocean. D. Reidel, Dordrecht, 279pp.
- 11) Bowden, K. F. (1983) : Physical oceanography of coastal waters. Ellis Horwood, West Sussex, 302pp.
- 12) 柳哲雄 (1989) : 沿岸海洋学. 恒社厚生閣, 東京, 154pp.
- 13) 宇野木早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版会, 東京, 672pp.
- 14) Yanagi, T. (1976) : The fundamental study of the tidal residual circulation, I. *Journal of Oceanographic Society of Japan*, **32**, 1-31.
- 15) Zimmerman, J. T. F. (1978) : Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, **11**, 35-47.
- 16) Beardsley, R. C. and J. Hart (1978) : A simple theoretical model for the flow of an estuary onto a continental shelf. *Journal of Geophysical Research*, **83**, 873-883.
- 17) Minato, S. (1983) : Geostrophic Response near the coast. *Journal of Oceanographic Society of Japan*, **39**, 141-149.
- 18) Ikeda, M. (1984) : Coastal flows driven by a local density flux. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 8008-8016.
- 19) Pichevin, T. and D. Nof (1997) : The momentum imbalance paradox. *Tellus*, **49A**, 298-319.
- 20) Nof, D. and T. Pichevin (2001) : The ballooning of outflows. *Journal of Physical Oceanography*, **31**, 3045-3058.
- 21) Oey, L. -Y. and G. L. Mellor (1993) : Subtidal variability of estuarine outflows, plume and coastal current: a model study. *Journal of Physical Oceanography*, **23**, 164-171.
- 22) Kourafalou, V. H., L. -Y. Oey, J. D. Wang and T. N. Lee (1996) : The fate of river discharge on the continental shelf 11. Modeling the river plume and the inner shelf coastal current. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 3415-3434.
- 23) Garvine, R. W. (2001) : The impact of model configuration in studies of buoyant coastal discharge. *Journal of Marine Research*, **59**, 193-225.
- 24) Fong, D. A. and W. R. Geyer (2002) : The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume. *Journal of Physical Oceanography*, **32**, 957-972.
- 25) Whitney, M. M. and R. W. Garvine (2005) : Wind influence on a coastal buoyant outflow. *Journal of Geophysical Research*, **110**, C03014, doi: 10.1029/2003JC002261.
- 26) Isobe, A. (2005) : Ballooning of river-plume bulge and its stabilization by tidal currents. *Journal of Physical Oceanography*, **35**, 2337-2351.
- 27) Li, M. and Rong, Z. (2012) : Effects of tides on freshwater and volume transports in the Changjiang river plume. *Journal of Geophysical Research*, **117**, doi: 10.1029/2011JC007716.
- 28) Simpson, J. H. (1997) : Physical processes in the ROFI regime. *Journal of Marine System*, **12**, 3-15.
- 29) Takeoka, H. and T. Yoshimura (1988) : The kyucho in Uwajima Bay. *Journal of Oceanographic Society of Japan*, **44**, 6-16.
- 30) Takeoka, H., H. Akiyama and T. Kikuchi (1993) : The kyucho in the Bungo Channel, Japan - Periodic intrusion of oceanic warm water. *Journal of Oceanography*, **49**, 369-382.
- 31) Simpson J. H. and J. R. Hunter (1974) : Fronts in the Irish Sea. *Nature*, **250**, 404-406.
- 32) Yanagi, T. (1987) : Classification of "siome", streaks and fronts. *Journal of Oceanographic Society of Japan*, **45**, 149-158.
- 33) Tsutsumi, E. and T. Matsuno (2012) : Observations of turbulence under weakly and highly stratified conditions in the Ariake Sea. *Journal of Oceanography*, **68**, 369-386.
- 34) Garrett, C. J. R. and J. W. Loder (1981) : Dynamic aspects of shallow sea fronts. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **302**, 563-581.
- 35) Pingree, R. D., P. M. Holligan and G. T. Mardell (1979) : Phytoplankton growth and cyclonic eddies. *Nature*, **278**, 245-247.
- 36) Sun, Y. -J. and A. Isobe (2006) : Numerical study of tidal front with sharpness varying in spring and neap tidal cycle. *Journal of Oceanography*, **62**, 801-810.
- 37) Badin, G., R. G. Williams, J. T. Holt and J. Fernand (2009) : Are mesoscale eddies in shelf seas formed by baroclinic instability of tidal fronts? *Journal of Geophysical Research*, **114**, C10021, doi: 10.1029/2009/JC005340.

質 疑 応 答

問：第二のパラダイムではエネルギーソースとしての素過程が整理され、沿岸域の循環に関する素過程研究は尽くされたという趣旨であったが、エネルギーの減衰や拡散に関する素過程を組み入れれば、理解がさらに進む余地は、まだ、いろいろあるのではないか。

(九大応力研, 松野 健)

答：エネルギーの減衰や拡散に注目した第二のパラダイムの拡張は、考え方の枠組みとして十分に成立すると思う。ただ、研究成果の上げやすさといった観点から、これが多くの研究者に支持されるかどうかは、現段階では不明である。

問：新たなプロセスを見つけるためには、沿岸海洋に特化した測器の開発が必要ではないか。

(海洋大, 山崎 秀勝)

答：全く賛成である。パラダイムの限界を突破するものは、新たな沿岸海洋の描像を明示できる新しい測器であろう。

問：第三のパラダイムとして示した素領域は、ここに提

示したもので出そろったと考えているか。また、なぜ ROFI と河口域を別の素領域に分けたのか。

(佐賀大低平地セ, 速水 祐一)

答：異水塊を作るほどに異なった物理過程が形成に関与するならば、新たな素領域を定義することも可能であろう。藻場や干潟、あるいは流水域などは、候補と

して挙げられるかもしれない。ここでは、Simpson (1997)²⁸⁾の Fig. 1 に従って、河口域と ROFI を別の素領域とした。ほとんどの場合で非回転系の河口域循環と、回転系の取り扱いが必要な ROFI では、支配的な物理過程が明らかに異なる。分割することは妥当と考えている。