

海洋気象学

浅井 富雄*

1. はじめに

海洋気象学 (marine meteorology) はこれまで海上気象学 (maritime meteorology) とも呼ばれ、航海や漁業に貢献してきた。近年、大気と海洋を一つの結合した流体地球系として総合的に把握する必要に迫られ、両者の接点に位置する海洋気象学は海面を通して、運動量、エネルギー、物質などを交換しながら相互に作用し合う大気・海洋系の科学に変貌しつつある。このような状況をふまえ、小倉 (1975) は「海洋気象」(海洋学講座, 3) の巻頭で次のように述べている。

「海洋気象学がめざすものは、まず海面における物理量・物質の変換の大きさを決定するとともに、その交換の物理過程を明らかにすることである。海面から大気に与えられた物理量は乱れと対流により次第に上層に運ばれ、やがて大規模な大気の構造と運動を支配する。同じようなことが下向きに海洋中でも行なわれている。この過程を明確にすることも課題の一つである。そして、このように起こされた大気および海洋中の大規模な運動は海面近くの気象状況や海況を変え、そこにおける交換量を変動させる。こうした大気の変動に対する海洋の応答、海洋の変動に対する大気の応答、そして最後に大気と海洋を合わせたものを一つの物理系として、その変動のメカニズムを明らかにすることが海洋気象学の大きな課題である」。

このように、海洋気象学は、大気・海洋間の相互作用を中心に据え、それにかかわるスケールの異なる種々の運動とそれらの相互作用を通して緊密に結びつきながら変動する一つの流体地球系として大気と海洋を把握し、その短期・長期さまざまな変動を解明することを窮極の目的としている。それは、また、大気物理学や海洋物理学そのものの課題でもある。したがって、海洋気象学の学習には本講座アドヴァーンスト・コースの他分野、とりわけ、回転流体力学、対流論、大気境界層の物理、中小規模現象の気象、大気大循環論、気候変動論、熱帯気象

学なども参照することが望ましい。本項は、それらとの重複を避けるために大気より海洋の方に力点を置いて学習の便を供することにする。

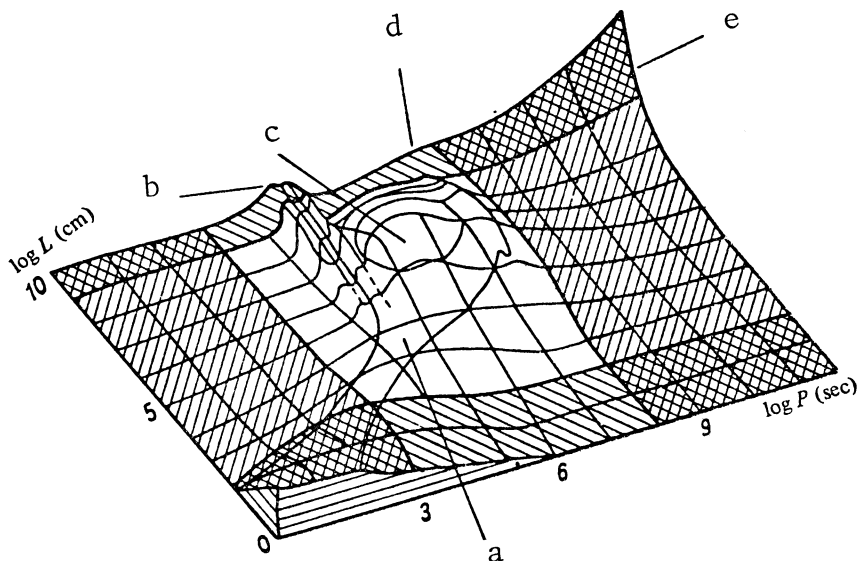
2. 気象・海象の variability

前述のように、大気や海洋中には種々の時間・空間スケールの現象が共存することの認識は、大気・海洋間相互作用にも、広範に互る時間・空間スケールの過程の考察を必要とし、これまでの海面近くの大気と海洋の科学から大気・海洋系の科学へと発展するのは当然のなりゆきであろう。

最初に、気象・海象の変動、すなわち variability に関する概念を一通り把握しておくことが望ましい。海洋のそれは、**Monin・Kamenkovich・Kort** (1974, 英訳版 1977) が最適である。第1図に示されているようなさまざまな時・空間スケールの海洋現象の記述と、それらの基本的な力学が簡明に記述されている。最近のMODE (Mid-Ocean Dynamics Experiment) などを通して明らかにされつつある海洋中規模渦の観測成果も含めて、ほとんどあらゆる時間・空間スケールの海洋変動とその力学的特性の他にそれらのモデル化、研究の動向なども示されている。**Roll** (1965) は、大気-海洋の相互作用を扱っているが、海洋上の大気境界層の平均構造の記述に力点があり、やや古いがその後同種の教科書は出ていない。大気・海洋相互作用に関する最初の本格的教科書は、**Kraus** (1972) である。従来の海洋気象学は、海面ごく近傍における気象とその熱力学・力学が中心であり、相互作用という時には、海面の力学、風波 (秒、分のオーダー)、混合層などに重点が置かれ、長周期波、海洋循環等の大規模な流れの海洋力学にかかわる部分が欠落していた。**Kraus** (1972) はより長周期にも目を向けているが、数ヶ月より長い変動についてまとめるのは時期尚早のようである。

近年、気象学の発展の結果、また、気象の長期変化や気候変動の研究と関連し、海・気相互作用の研究は非常に活発になり、大規模な国際共同研究観測も実施されるようになった。BOMEX (1968, Barbados Oceanogra-

* T. Asai, 東京大学海洋研究所。



第1図 海洋の水温変動の測定から得られた時間・空間スケールに伴う海洋変動のパワースペクトルの概念図 (Stommel, 1963). 縦軸, 横軸はそれぞれ波長 L (cm), 周期 P (sec) の対数である. (a) は内部波, (b) は潮汐, (c) は準地衡流波動・渦動 (ロスビー波, 中規模渦など), (d) は季節変化, (e) は気候変動を示す. 図の手前のピークは海面における重力波であり, その他に1日より短い周期のものとしては, 内部重力波, 内部慣性重力波, 潮汐波などがある.

phic and Meteorological Experiment), GATE (1974, GARP Atlantic Tropical Experiment), AMTEX (1974, 1975, Air Mass Transformation Experiment), JONSWAP (1968, 1969, 1973, 1975, Joint North Sea Wave Project), NORPAX (1970年代, North Pacific Experiment), IDOE-International Decade of Ocean Exploration), ATEX (1969, Atlantic Trade Wind Experiment), JASIN (1972, 1977, Joint Air-Sea Interaction), MONEX (1979, Monsoon Experiment) などがある例であり, 海・気相互作用を主目的とするしなずに拘らず, 境界層の微視的過程のみでなく, より大規模な擾乱と関連づけて考察しようとするところに最近の特色がある. これらの観測に基づく成果は出始めつつある. JONSWAP について Hasselmann *et al.*, (1973), ATEX について Augstein *et al.*, (1973, 1974), Prümm (1974) ら, AMTEX については最近の気象集誌, BOMEX, GATE などについては JAS, JPO, MWR 誌などに掲載されつつある. Boundary-Layer Meteorology の第6, 7巻 (1974) は Brocks の記念号で海・気相互作用の論文を特集しており, 上記国際共同観測に基づく成果の一部

が盛り込まれている.

3. 海面とその近傍

大気・海洋間の熱, 水蒸気, 運動量などの変換は最も重要な課題の一つである. Kitaigorodskii (1970, 英訳 1973) は, 風波の発達, 大気と海洋の境界層の構造などの観測や理論をとりまとめている. 特に, 大気境界層中の顕熱・潜熱の鉛直輸送, 海洋境界層中での運動量やエネルギーの熱的・力学的な混合, 季節的躍層など小規模相互作用を論じているのが特徴であり, ソ連の研究者の成果に詳しい. 鳥羽 (1970) の「海面境界過程」, 竹田 (1975) の「海洋上の大気境界層過程」は, それぞれ海洋科学基礎講座, 海洋学講座の一章である. 近藤 (1973) の解説「海面境界層研究における最近の動向」とともに, 微細過程の基礎の体系的な理解や問題点の把握に役立つ.

Phillips (1966) は, この分野の標準的教科書として有名であった. 1977年の改版では, その後10年間の観測・理論両面の進歩を導入して大幅に改訂されている. 海面の重力波, 風波, 海洋内部波, 海洋乱流などに関する数学的記述が整然としており, 理論的学習の出発点とし

て好適であろう。前述の Kraus (1972) は Roll や Kitai-gorodskii らの観測記述, Phillips の数学的記述に片寄ることなく, 数学は物理過程の基礎や従来の理論の記述に必要な最小限の使用にとどめてわかり易い。これらは気象学や海洋学を一通り学んだ学生に対するアドヴァンスト・テキストとして, 大気・海洋間のエネルギーや運動量の交換, 海面近くでの気象・海象の物理を学ぶのに好適である。

風波については Kinsman (1965) が詳しく, 平 (1975) が問題の定式化, Phillips (1957) や Miles (1957) らの古典理論を要領よくまとめている。Titov (1971, 英訳版) はレニングラード水理気象研究所における風波の理論・計算技術についての講義ノートがもとになっている。

4. 大気・海洋境界層

大気については「大気境界層の物理」を参照して欲しい。大気中と同様, 風による攪拌や熱対流によって海洋混合層が形成される。熱エネルギーや運動エネルギーの保存則から混合層の深さ, 換言すれば温度躍層の季節的变化の予測を試みたのは, Turner・Kraus (1967) である。躍層などの微細構造については永田 (1974) が詳しい。Turner (1973) の「Buoyancy effects in fluids」は, 対流混合層の物理的基礎を熱塩対流なども含めて一般的に論じている。一方, 風に起因する運動量の付加と混合によって乱流 Ekman 境界層が形成されるが, その物理的なモデルが Kraus (1972) や Stern (1975) に紹介されている。1975年 Urbino で開かれた Modelling and prediction of the upper layers of the ocean に関するシンポジウムのプロシーディング (Kraus 編, 1977) は, この分野の現状や動向把握に適している。

5. 大規模な海洋循環

潮汐を除けば, 海洋の運動は多かれ少なかれ気象の影響を受けている。海洋大循環は風によるストレス, 海面の大規模加熱・冷却の分布によって駆動される。その変動は, ロスビー波 (順庄および傾庄モード) によって伝達される。風はまた, 内部重力波, 沿岸や赤道にトラップされた渦や重力波などほとんどすべての海洋波動を駆動する。海洋深層大循環は, 南北両高緯度での密度の大きい水の沈降によって駆動され, 各大洋の中程で生じる上昇流による冷水の移流と熱や風による表層の混合とがバランスして永久躍層 (permanent thermocline) が維持されると考えられている (Robinson・Stommel 1959)。したがって, 海洋の長周期波, 海洋大循環, 永久躍層などは海洋物理学の問題であるが, また海洋気象学

の重要課題ともなる。

海洋物理学 (1974, 1976, 海洋学講座 1 と 2) に, 宮田 (1974) が長周期波一般に関して, 梶浦 (1976) は内部慣性重力波に関して詳しい。Roberts (1975) は海洋における内部波の理論と観測の総合報告である。海洋大循環に関しては膨大な数の文献があるが, 最近の Holland (1977) の総合報告から出発するとほとんどの文献に行き当たるであろう。Stommel (1966) の「The Gulf Stream」は古典的教科書であるが一読に値する。中規模渦と大循環との関連は, 現在でも論争中で決着がついていない (高野, 1976)。永久躍層の維持の問題は海洋の深層大循環と関連して理論モデルがいくつかあり, 前掲の Stern (1975) や Stommel (1966) の教科書が簡明な物理的説明を試みている。

海洋循環を駆動する仲介役を果たす海洋 Ekman 層のバンピング作用に対しては Stern (1975), 熱帯性低気圧などの渦状気象擾乱による Ekman 湧昇流は Kraus (1972), 沿岸および赤道での Ekman 輸送による湧昇の問題は吉田 (1974) の総説がよい。

大気大循環の数値モデルに対応する海洋大循環モデルの開発が進められつつある。1972年米国 NAS が開いたシンポジウムのプロシーディング Numerical Models of Ocean Circulation (1975) には, オリジナル論文だけでなく総合報告も含まれており, 海洋循環のモデリングに関する現状がうかがえる。

6. 大規模・長期相互作用

話は古くなるが, The Sea の第 1 巻, Deacon・Webb (1962) の「小規模相互作用」との姉妹編である Malkus (1962) の「大規模相互作用」は, 当時としては他に類がないユニークな総説であった。その後, この種の総説や教科書は出ていないので, 原著論文によらざるを得ない。

Namias (1971, 1972, 1973) は, 太平洋の海面温度と大気循環, とりわけ中緯度ジェット気流の変動との関連についての仮説, Bjerknes (1970, 1972) は, Walker 循環—Hadley 循環—赤道海域での湧昇の間のフィードバック, ひいては高緯度の大気循環に影響するという teleconnection に関する仮説, Wyrтки (1973, 1974) は太平洋の赤道海流が貿易風の変動に応答して変動することや, 南米沖の異常高温表層水の強化—El Niño の発現と赤道逆流の強化との関連, Manabe・Bryan (1969) は海水と気候との正のフィードバックなど, 続々と興味深い研究課題が提起されている。季節風とほぼ同方向に

夏と冬とで流向が逆転するソマリー海流は特異な例で、夏季ソマリー海流に伴うソマリー沖湧昇流とインドのモンスーンに影響するソマリージェット気流との関係は、MONEXの重要課題の一つとなっている。Lighthill (1969) や Cox (1970) が参考になる。

沿岸域における局地気象に関しては「中小規模現象の気象」を参照していただきたい。

本項をまとめるに際し、遠藤昌宏氏(東大海洋研)から貴重な意見をいただいたことを記して感謝する。

文 献

前回の入門講座には「海洋気象学」がなかったので、1970年以前のものも若干掲げることにした。個々の論文はできるだけ避け、教科書と総合報告にしぼってある。

教科書・総説

- 浅井富雄, 1978: 海洋気象学の課題と展望, 号外海洋科学, 1, 40-51.
- Holland, W.R., 1977: Oceanic general circulation models, *The Sea*, 6, 3-44, John Wiley & Sons.
- Kinsman, B., 1965: Wind waves, Their generation and propagation on the ocean surface, Prentice-Hall, 676 pp.
- Kitaigorodskii, S.A., 1970: The physics of air-sea interaction (英訳 1973, Israel Prog. Sci. Trans; Jerusalem).
- 近藤純正, 1973: 海面境界層研究における最近の動向, 天気, 20, 389-404.
- Kraus, E.B., 1972: Atmosphere-ocean interaction, Oxford Univ. Press, 275 pp.
- Kraus, E.B., (Ed.) 1977: Modelling and prediction of the upper layers of the ocean, Pergamon Press, 325 pp.
- Malkus, J.S., 1962: Large-scale interactions, *The Sea* (ed. M.N. Hill), 1, 88-294, Interscience.
- Monin, A.S., V.M. Kamenkovich and V.G. Kort, 1974: Variability of the oceans, John Wiley & Sons, Inc., 241 pp. (英訳).
- 小倉義光, 浅井富雄(編), 1975: 海洋気象, 海洋学講座, 3, 東大出版会, 191 pp.
- Phillips, O.M., 1977 (2nd Ed.): The dynamics of the upper ocean, Cambridge Univ. Press, 344 pp.
- Reid, R. O., et al., 1975: Numerical models of ocean circulation, Proc. Symposium on numerical models of ocean circulation, Durhan, N.H., National Academy of Sciences, Washington, D.C., 364 pp.
- Roberts, J., 1975: Internal gravity waves in the

- ocean, Marcel Dekker, Inc., 274 pp.
- Roll, H. U., 1965: Physics of the marine atmosphere, Academic Press, 426 pp.
- Stern, M. E., 1976: Ocean circulation physics, Academic Press, 246 pp.
- Stommel, H., 1966: The Gulf Stream., Cambridge Univ. Press, 248 pp.
- 高野健三, 1976: 海の大循環, 海洋出版KK, 126 pp.
- 寺本俊彦(編), 1974, 1976: 海洋物理学, I, II, 海洋学講座, 1, 2, 東大出版会, 248 pp, 251 pp.
- Titov, L. F., 1971 (英訳): Wind-driven waves, Keter Press, 244 pp.
- 鳥羽良明, 1970: 海面境界過程, 海洋科学基礎講座, 1, 海洋物理, I, 東海大学出版会, 145-264.
- Turner, J. S., 1973: Buoyancy effects in fluids, Cambridge Univ. Press, 367 pp.

論 文

- Bjerkness, J., 1969: Mon. Wea. Rev., 97, 163-172.
- Bjerkness, J., 1970: 天気, 49, 221-226.
- Cox, M.D., 1970: Q. J. R. M. S., 96, 91-114.
- Kato, H. and O.M. Phillips, 1969: J. F. M., 37, 643-665.
- Lighthill, M. J., 1969: Phil. Trans. R. Soc. London, A, 265, 45-92.
- Manabe, S. and K. Bryan, 1969: Mon. Wea. Rev., 97, 739-827.
- Manabe, S. and K. Bryan, 1969: J. Atmos. Sci., 26, 786-789.
- Miles, J.W., 1957: J. F. M., 3, 185-204.
- Namias, J., 1969: Mon. Wea. Rev., 97, 173-192.
- Namias, J., 1969: J. G. R., 75, 565-582.
- O'Brien, J. J., 1967: J. Atmos. Sci., 24, 208-215.
- Phillips, O.M., 1957: J. F. M., 2, 417-445.
- Robinson, A.R. and H.M. Stommel, 1959: Tellus, 11, 295-308.
- Stommel, H., 1948: Trans. Amer. Geophys. Union, 29, 202-206.
- Turner, J. S. and E. B. Kraus, 1967: Tellus, 19, 88-106.
- Wyrtki, K., 1975: J. Phys. Oceanogr., 5, 572-584.
- Yoshida, Y., 1955: Records of Oceanogr. Works in Japan, 2, 8-20.

関係論文が掲載される定期刊行物としては各国の気象学会や海洋学会発行の雑誌の他に、

Geophysical Fluid Dynamics, Boundary-Layer Meteorology, Journal of Fluid Mechanics, Dynamics of the Atmosphere and Ocean, Deep Sea Research, グリーンカバの Journal of Geophysical Research, Journal of Marine Research などがある。