La mer 26: 170-172, 1988
Société franco-japonaise d'océanographie, Tokyo

重力場における対流・カオス・乱流について*

中 村 重 久**

A note on chaos between convection and turbulence in the gravity field*

Shigehisa NAKAMURA**

Abstract: A mathematical term "chaos" was recently introduced to the world of physics in order to discuss various nonlinear problems. The chaos is also discussed in relation to geophysical problems as Lorenz did in meteorology and Vallis remarked about El-Niño. The author here gives a brief note on chaos between convection and turbulence in the gravity field referring to Khurana's remark. A scope of chaos in oceanography is also considered.

1. 緒 言

ここでは，最近の研究に関する情報を参考にして，対流・カオス・乱流を，海洋学の視点からとらえてみる。

最近，流体の運動に関連して，カオスの問題がとりあげられるようになり，多数の概説書がみられるようになった（たとえば山口，1986; BERGÉ *et al.*, 1984; THOMPSON, 1986; MOON, 1987)。著者の限られた範囲での理解によってみても，これらの概説書では，乱流とカオスとの関係を数学的手法によって明らかにしようとする方向にあるものと受けとられる。代表的な気象学の例として LORENZ (1963, 1964, 1980) の研究成果が紹介されている。BENZI and NICOLS (1988) は，地球物理的視点にたって"カオスと乱流"についてシンポジウムを開いた。とくに，海洋に関連して，VALLIS (1987) は，エル・ニーニョをカオスの問題としてとらえることを述べている。また，著者は，カオスの手法を用いた高潮・津波・潮汐の検討の可能性を試みつつある。

ここでの"カオス"は，数学的に定義されたものであり，言語学的な"混沌"と異なるものである。単なる混沌とした概念ではない。このカオスによって重力場の流体にみられる乱流運動の位置づけが試みられている段階であるという説明にしておこう。

ところで，KHURANA (1988) は，シカゴ大学の研究グループが，レーリー・ベナール渦の実験から，対流・カオス・乱流の関係が理論的にも実験的にも明らかになったと述べている。本文では，この KHURANA (1988) にしたがって対流・カオス・乱流の関係の要点を記し，さらに，海洋学的視点からみたカオスについても考えてみたい。

2. レーリー・ベナール渦の実験例

KHURANA (1988) によれば，過去約10年の間にカオスによっていろいろの実験結果と理論との対応関係が明らかになってきたという。しかし，乱流に関するかぎり我々の理解の程度は10年前と大差ない。ただ，最近，シカゴ大学の Albert LIBCHABER らは1987年に，レーリー・ベナールのセルに乱流が存在することを明らかにしたことにも論及している。そもそも，レーリー・ベナール渦の実験は，重力場の流体運動のなかでも対流に関連したもので，それも平らな表面と底面との間の流体にみとめられる。しかも，この場合，底面で加熱するという条件が必要である。

ところで， LIBCHABER らの実験では，普通の運動は時間的に周期的であり，したがって，その時系列のフーリエ変換で得られるスペクトルには鋭いピークが認め

* 1988年8月5日受理 Received August 5, 1988
** 京都大学防災研究所附属白浜海象観測所
〒649-22 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田畑崎
Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Katada-Hatasaki, Shirahama, Wakayama, 649-22 Japan

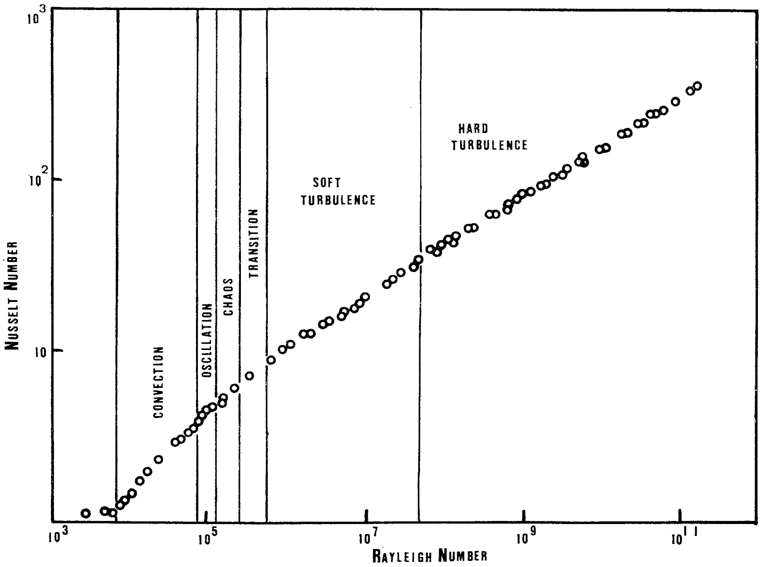

Fig. 1. Zoning of chaos in a recent Rayleigh-Benard experiment (referred to KHURANA, 1988)。

られる。一方，時間的にカオスの状態の系では，スペクトルには広帯域にわたってノイズ様のものがあらわれ，鍋冠山型のスペクトルが得られる。

3. 対流・カオス・乱流

レーリー・ベナール渦の実験についての要点を記すと，流体の運動は，つぎのように分類される。すなわち，

a. 境界層に平行な運動
b. 対流（convection）
c. 周期的運動（oscillation）
d. カオス―非周期的運動（chaos）
e. 過渡的現象（transitional）
f. 弱い乱流（soft turbulence）
g. 強い乱流（hard turbulence）

ここで，Nusselt 数（N）をたて軸に，Rayleigh 数（R）をよこ軸にとった図上で，レーリー・ベナール渦の壁を通して輸送された全熱量をみることとしよう。海洋についてこのようなことは不明のようなので，とくに最近シカゴ大学で液体ヘリウムを用いた例をとりあげることとし，その結果を Fig. 1 に示した。弱い乱流の状態では図中の曲線は 1/3 の勾配とみられる。一方，強い乱流の状態では，その曲線は 2/7 の勾配で示される。このような液体ヘリウムに関する実験は，一見，海洋学とは何の関係もないようにみられるが，流体の動的特性をとらえる目的に焦点をおくかぎり，Fig. 1 に示した結果は海洋学にとつても有意義であると思われる。

ただし，N数およびR数は以下のように定義されるものとする。すなわち，

$$N \approx d/\lambda \tag{1}$$

ここに，表面と底面との間がdであるとき，レーリー・ベナール渦のセルは境界層厚λがdより小さくなった場合のみ生じるものと考える。また，

$$R=\frac{a \cdot g \cdot d \cdot \Delta}{D_T \cdot \nu} \tag{2}$$

ここに，aは熱膨張係数，gは重力加速度，dは距離（層厚），Δは層の表面と底面との間の温度差，D_Tは熱拡散係数，そして，νは動粘性係数である。また，さらに，

プラントル数

$$P_r=\nu/D_T \tag{3}$$

も考えられるが，その詳細は KHURANA（1988）にゆずる。

4. カオスと海洋の現象

以上にみたように，今や，カオスは地球規模の現象に関連した問題であるとみられる。とくに，海洋の現象の

なかにカオス的なものがとらえられる可能性は高いと予想される。気象学においては，カオスの概念が確立する前に，LORENZ (1963, 1964, 1980) はカオス的問題にとり組んでいた。初期条件がごくわずか異なるだけで解は全く別の特性を示す点は，従来，非線型問題の宿命であるとして片づけられてきたようである。しかし，その特性のどれが非線型性によるものであり，どれがカオス的問題に属するものであるかは，遠からず明らかにされることであろう。

たとえば，日本列島の南の黒潮は，その流軸を時々刻々と変えていることは，わが国の過去50余年の海洋観測の成果によって周知のことである。この黒潮について，直進型と蛇行型との２つの安定な状態があるといわれている。これは流体運動の非線型問題における分岐解 (bifurcation) に関連づけて説明できるかもしれない。しかし，その流軸が直進型から蛇行型へ，あるいは，蛇行型から直進型へ変るのはいつかという点については，著者の知るかぎりにおいて，不明であり予測できないのが現状のようである。しからば，カオスと関連づけて説明できるだろうか。今後の検討にまたねばならない。あるいは，この検討の結果が，黒潮とエル・ニーニョ (VALLIS, 1687) とをカオス的現象としてとらえる手がかりを与えることになるかもしれない。

いずれにしても，海洋におけるカオス的現象をとらえるのは，今後の問題である。

文　　献

BENZI, R. and C. N. NICOLS (1988): Chaos and turbulence in geophysics. Symposium JS.l, Annales Geophysicae, 1988-Special Issue, Geophysical Society of Europe. p. 205-212.

BERGÉ, P., Y. POMEAU and C. VIDAL (1984): Order within chaos—towards a deterministic approach to turbulence. John Wiley and Sons, N.Y. 329pp.

KHURANA, A. (1988): Rayleigh-Benard experiment probes transition from chaos to turbulence. Physics Today, **41**(6), 17-21.

LORENZ, E.N. (1963): Deterministic nonperiodic flow. J. Atmospheric Sci. **20**, 130-141.

LORENZ, E. N. (1964): The problem of deducing the climate from the governing equations. Tellus, **16**, 1-16.

LORENZ, E.N. (1980): Noizy periodicity and reverse bifurcation. p. 282-291. *In* R. H. G. Hellermann (ed.), Nonlinear Dynamics. N.Y. Acad. Sci., N.Y.

MOON, F.C. (1987): Chaotic Vibrations—An Introduction for Applied Scientists and Engineers. John Wiley and Sons, N.Y. 309pp.

VALLIS, G.K. (1987): Oceanography, El-Niño and chaos. *In* "Physical news in 1986", Physics Today, s40-s41.

山口昌哉 (1986): カオスとフラクタル—非線型性の不思議 (ブルー・バックス). 講談社，東京. 197pp.