

論文の内容の要旨

論文題目 Thermal Convection and Stability in a Natural Circulation Loop
(自然循環ループにおける熱対流と安定性)

氏名 姜 玉 雁
ジャン ユヤン

本研究は、ソーラーエネルギー、地熱、原子炉、各種サーモサイフォン等における熱対流の基本系である環状自然循環ループ（下部加熱、上部冷却）内の熱対流とその安定性に関し理論的、実験的に研究し、ループを構成する材質の熱物性、熱的境界条件、流体（単相、多孔層）の影響等を明らかにしたものであり、論文の構成は全6章よりなっている。

第1章は序論であり、これらの問題の解明が本研究の研究目的であることを述べている。

Creveling et al. (1975) はガラス製の環状ループにおいて、継続的な逆転を伴うカオス的な循環流が生じることを見出した。また、Sano (1991a) は部分的な加熱、冷却を行なった場合、間欠カオスに至るセル状流れの構造と分岐について報告している。しかし銅製環状ループで予備実験を行なったところ、カオス的な流れ（ローレンツカオス）は観察されなかった。このことは、環状ループ内の流れとその安定性は、流体や壁面の物性はもちろん、加熱や冷却の仕方によるものであることを示唆している。しかるに、こうした物性や境界条件の影響に関する研究はこれまでなされていない。また、地熱などへの応用と関連して、ニュートン流体と見なせない多孔質媒体内の流れが重要であるが、これまで研究が報告されていない。そこで本研究では、(1) 実験および数値モデル計算によりローレンツカオスの発生に及ぼす壁面境界条件の影響を明らかにすること、(2) 多次元解析を通して、流れのパターンに及ぼす境界条件の影響、ならびにカオスへの分岐ルートを明らかに

すること、(3) 環状多孔質媒体内の流れについて、数値シミュレーションと実験を行なって流れの安定性について調べること、などを研究目的としている。

第2章は熱対流の安定性に及ぼすループ壁材質と熱的境界条件の影響について、1次元ローレンツモデルと3次元数値解析により検討したものであり、軸方向熱伝導と壁面熱伝達の違いにより安定性が大きく異なることを明らかにして、それらの結果を壁材質を3種に変えた実験を行って確認している。

壁も熱伝導の影響を考えた1次元モデルは次のように記述できる

$$\dot{x} = \sigma(y - x) \tag{1}$$

$$\dot{y} = -zx + Ra_q x - yf_2(x) \tag{2}$$

$$\dot{z} = xy - zf_2(x) \tag{3}$$

ここに、 x, y, z は無次元の流速、温度差 $T_3 - T_9$ および $T_3 - T_9$ である。理論結果は、図1に示す如く、熱伝導率の高い壁面は流れを安定させる上で望ましいと結論している。

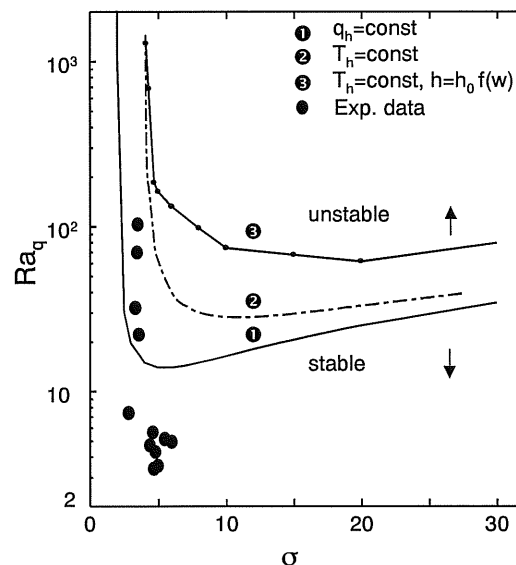


図1 熱対流の安定性に及ぼすループ壁材質の影響に関する実験結果と理論の比較
 黒点は銅材質ループの実験データ、曲線は理論的予期であり、曲線の上方が安定領域、
 下方が不安定領域である。また、① 壁面熱伝導率を考えない場合、② 軸方向熱伝導
 を考えた場合、③ 壁面と流体の熱伝達を考えた場合であり、 Ra_q はレイリー (Rayleigh)
 数、 σ は熱慣性パラメーターである。

実験装置は図2に示すように環状である。下方半分を熱流束一定で加熱し、上方半分を一定温度で冷却している。壁の影響を調べるため、三つのループについて実験している。図3は実験の結果であり、ガラス流路では不安定な流れが生じるのに対し、他の2つのループ

ープは安定した流れとなることが示されている。

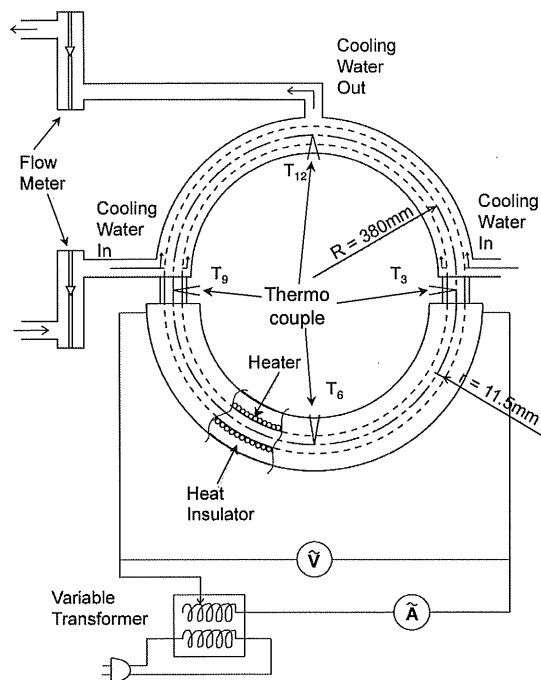


図2 実験装置概略図。下方はヒータで加熱され、上方は循環水で冷却されている。

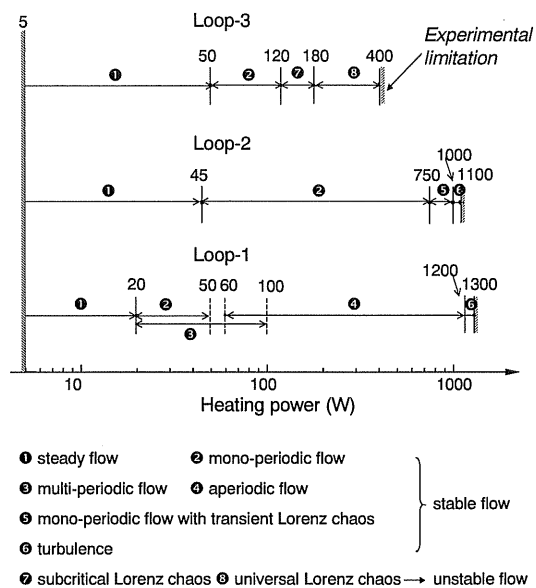


図3 三つのループで観察される異なった流れの挙動。ループ1はガラス製、ループ2は上半分が銅製、下半分がガラス製、ループ3は銅製。

第3章は、3次元対流のパターン、流れの3次元性、カオス流れの発生条件と分岐現象、カオスに至るルート等について考察したものであり、三次元モデルを数値計算で解明している。すなわち、非平衡相転移の研究などで知られる synergetic な新しい解析手法を適用して、流れのパターンに及ぼす熱的境界条件の影響について考察し、それから4つの流れモードが生起する可能性のあることを示している。そして、そのモードを支配方程式に導入(図4参照)して3次元モデルを構成し、数値的に解いている。その結果、図5に示す如く、熱的境界条件の影響を反映するパラメーター δ が重要であり、 δ が小さい場合は1次元ローレンツ系で扱えること、 δ が大きい場合は3次元流れとなり、間欠カオスが生じることを明らかにし、第2章の扱いの妥当性を示している。また、ローレンツカオスからセル状流れへの遷移が起こることを明らかにしている(図6参照)。

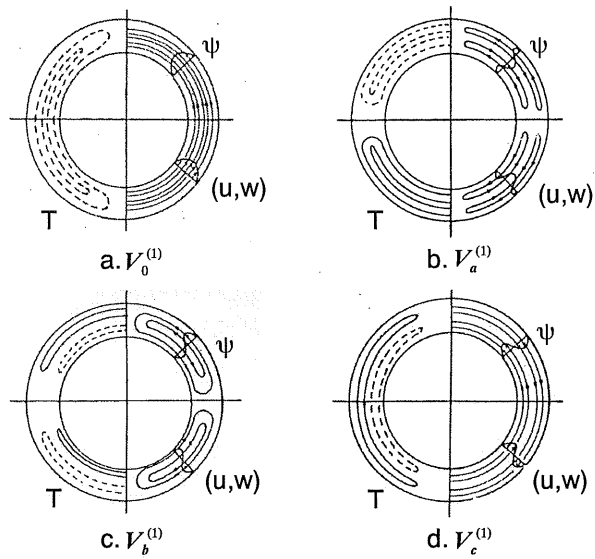


図4 多次元解析から得られた幾つかの基本モードにおける速度場と温度場。右図は流れ関数 ψ を、中央の図は速度成分 (u, w) を、左図は等温線（実線は正值を、破線は負値を表す）である。

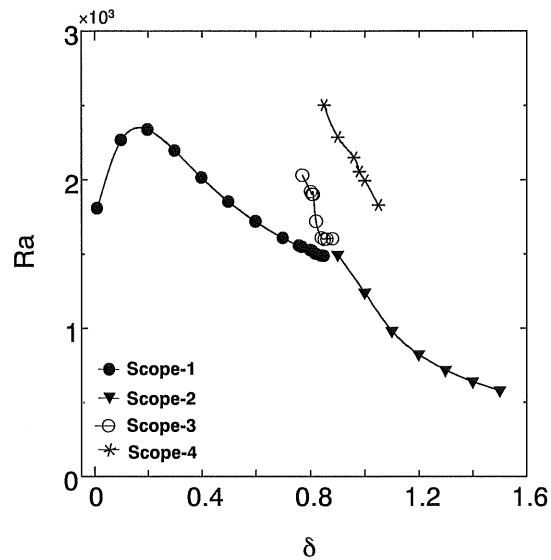


図5 オスに至るルートについて熱的境界条件の影響

曲線はモデル計算から得られる流れの安定性の転移点であり、各点は：1. 1次元安定流れからローレンツカオスに転移、2. 1次元安定流れから3次元流れに転移、3. ローレンツカオスから3次元流れに転移、4. 間欠カオスに転移である。Raはレイリー（Rayleigh）数であり、 δ は熱的境界条件の影響を反映するパラメーターである。

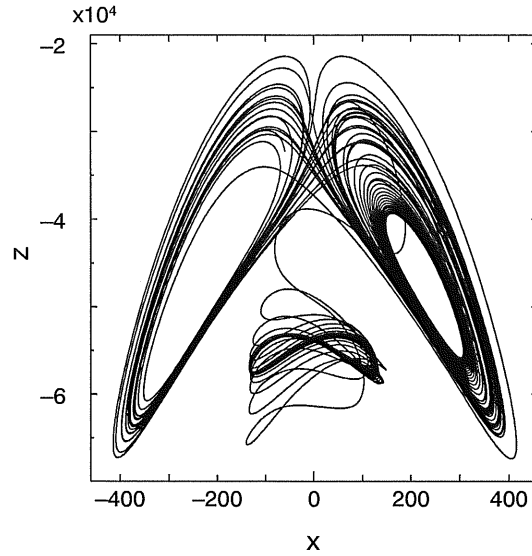


図6 $Ra = 1630$ 、 $\delta = 0.86$ で生じるローレンツカオスからセル状周期流れへの遷移。 x は流速、 z は無次元温度 $T_6 - T_{12}$ 。

第4章および第5章は、多孔質流体層の場合について行なった数值的、理論的と実験的研究の結果について記している。すなわち、第4章では3次元数値計算を行ない、多孔質対流のパターン、パラメーターによつての遷移、ニュートン流体の場合の対流との違いを調べたものであり、3次元対流パターン、局所対流の存在を発見している。図7は3次元流れを示す典型的な結果である。2つの局所的再循環流れが流路の接続部に存在している。温度と速度は最循環流れによつて歪められている。この結果をニュートン流の場合と比べると、多孔質流路では3次元性の影響は顕著でなく、系全体の速度および熱伝達に及ぼす影響は小さい。

第5章では多孔質対流の安定性を研究したものである。第2章と同様の方法で、多孔質流路の流れの安定性に関し次に示す1次元モデルを導出した。

$$dx/dt^* = Pr'(0.5Ra \cdot y - x - C'_E x|x|) \quad (4)$$

$$dy/dt^* = -f_3 Nu \cdot y - xz/R \quad (5)$$

$$dz/dt^* = -2Nu/\pi - f_3 Nu \cdot z + xy/R \quad (6)$$

このモデル計算によつて、安定性が多孔質流体層を規定する修正プラントル数 Pr' に支配されること、 Pr' が無限大のダルシー系では流れが完全に安定であること、 Pr' が有限の実際系では、局所的な2次流れは生ずるものの、全体的な流れは加熱入力に極端に大きな場合を除くと安定であることを示している。

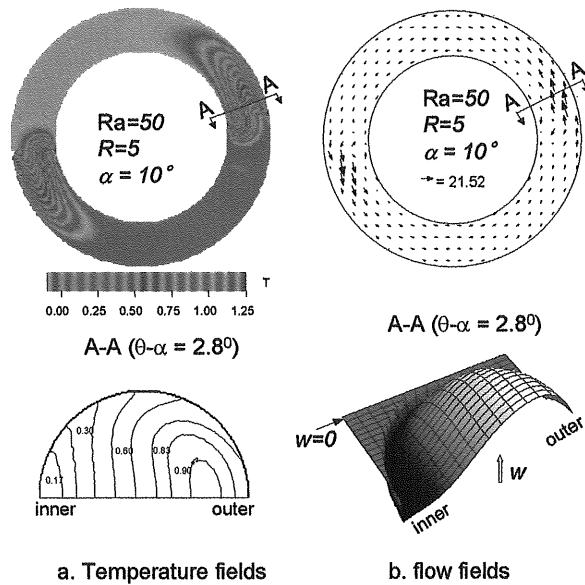


図7 典型的な温度場と速度場

($Ra = 50$, $Pr = 1$, ダルシー数 $Da=10-4$, ループ径 $R = 5$, 空隙率 $\Gamma = 0.4$, 管傾斜角 $\alpha = 10^\circ$)

それらの結果を、ガラス球および銅球からなる多孔質系で実験を行なって確かめている。実験は図2に示したガラスループで行なった。ループを水で満たし、修正プラントル数 Pr' の影響を調べるために、多孔粒子としてガラス球 (ループ PM1) および銅球 (ループ PM2) を用いた。ニュートン流れの場合と異なり、流れはいずれの場合も安定していた (図8参照)。熱入力がずっと高い場合には不安定な流れが発生すると予想されるが、その場合は試験液体 (水) の沸騰が生じる。したがって高圧下で実験をする必要がある。

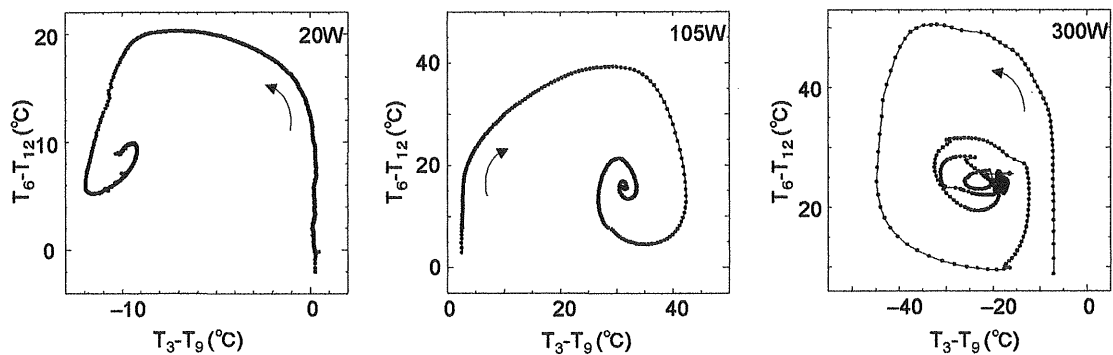


図8 ループ PM2 (Loop-PM2) の実験で得られた流れの様子。

第6章は結論であり、上記の研究を総括し、得られた主要な結果について纏めている。