

19. 多重露光ホログラフィー干渉法によるベナール対流速度場の可視化とヒステリシスの観測

福井大 工 角田 篤勇 重盛 和也 原田 義文
福井大 教 宮阪 憲治 上田 正紘

§ 1. はじめに

Benard対流系の速度場の空間構造を瞬時に観測し、その逐次遷移過程を明らかにするため、我々はこれまでに速度場の瞬時計測と同時にその可視化が出来る新しい計測手段として多重露光ホログラフィー干渉法の開発を進めてきた。¹ 従来の測定法 (Laser Doppler, Photon correlation spectroscopy, etc...) はいずれもある空間の一点における速度場の情報からその空間構造を推定していたため、その全体的な速度場の観測には適していなかった。

ここでは三次元映像化の可能なホログラフィーの原理を応用した多重露光ホログラフィー干渉法によるベナール対流速度場の瞬時計測と同時に速度場の空間構造の可視化が出来る計測法の開発に成功したのでその測定方法を紹介し、これを用いてあとに述べる条件下でのいくつかの実験を行ない興味ある結果がえられたのでこれらについて報告する。

§ 2. 測定原理と方法¹

ホログラフィー干渉法を透明な流体中の速度場の計測に応用するためには人為的な粗面を形成しそこにシート状に整形したレーザービームを照射する必要がある。図1に測定光学系の概要を示す。Arレーザーからのビームをビーム・スプリッターで参照光と物体光の二光束に分け、物体光はさらにシリンドリカル・レンズCLによりシート状に整形して容器内を照射する。照射位置はシリンドリカル・レンズCLを上下に動かすことによって自由に移動出来る。また図示の場合は水平シート光を生じる光学系となっているが、垂直シート光は各シリンドリカル・レンズをビーム軸に垂直な面内で90°回転することによって得られる。この容器内にはアルミナ微粒子の懸濁された試料液体がみたまされている。このアルミナ微粒子からの散乱光が物体光としてホログラム乾板面H上で参照光と干渉してホログラムに記録される。トレーサーとしてのこの微粒子は試料液体の運動に追従するので、電磁シャッターEMSで多重露光されたホログラフィー干渉法によ

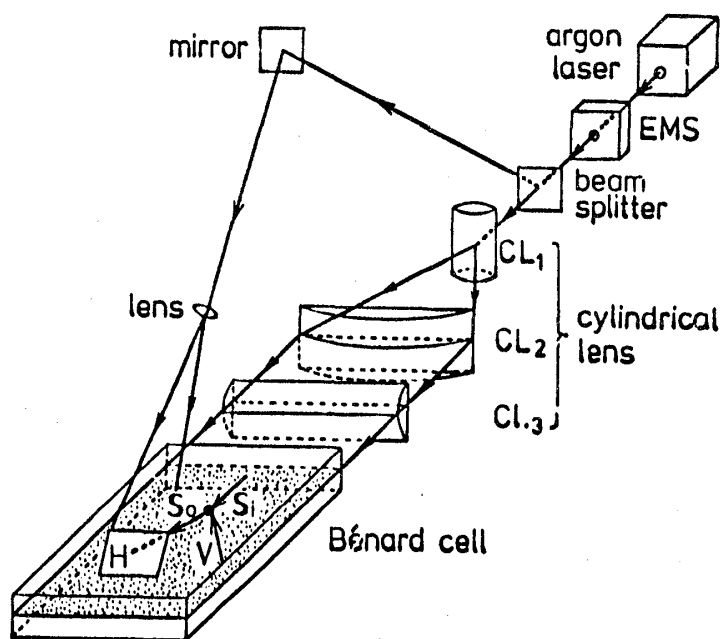
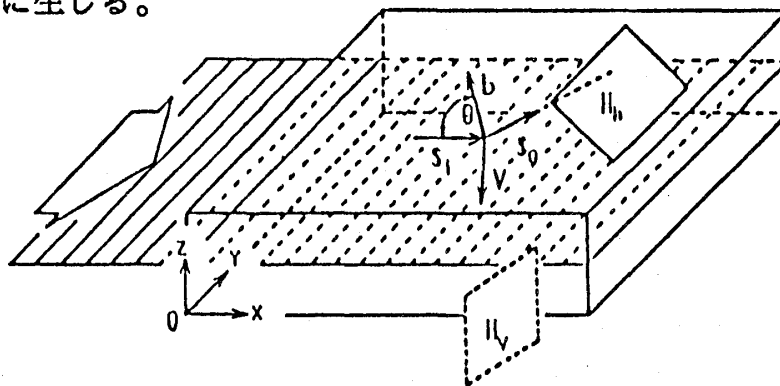


図 1. 光学系のアライメント

って、その作業液体の速度場のあたえる流速分布を記録することが出来る。このように記録されたホログラムからの再生像内には各場所の流速分布に応じた明暗の縞が生じる。シート状光の入射方向の単位ベクトルを S_i 、アルミナ微粒子によって散乱された散乱光の乾板面方向への単位ベクトルを S_0 、微粒子の流速ベクトルを V 多重露光の各露光間隔を ΔS とすると明暗の縞のうち明かるい縞は次式を満たす領域に生じる。

図 2. ホログラフィー干渉法による流速分布
測定の実理と光学系の配置

$$V \cdot \Delta S \cdot (S_0 - S_i) = m \lambda \quad (1)$$

ここに λ はレーザー光の波長、 m は縞次数を表す整数である。したがって実際に観測される方向の速度成分 V_m は次式のように表される。

$$V_m = m\lambda / (|\mathbf{S}| \cdot \Delta S), \quad \mathbf{S} = \mathbf{S}_0 - \mathbf{S}_i \quad (2)$$

ベクトル $\mathbf{S}$ は $\mathbf{S}_i$ と $\mathbf{S}_0$ のなす角の二等分線上にあり、その大きさ $|\mathbf{S}|$ は $\mathbf{S}_i$ と $\mathbf{S}_0$ のなす角によって決定される。

§ 3. Side Wall 効果と Imperfect Bifurcation

以上に述べた測定手段を用いて Benard 対流系の逐次遷移過程の一連の実験に応用し、特に Chaos の空間構造を詳細に互って観測することを主眼において実験計画を立てた。しかし、それに至るまでの Threshold 近辺すなわち低流速域の重要な問題が意外と解決されておらず、特に高粘性液体で Prandtl 数が Rayleigh 数に依存する系においても線形安定性解析の範囲で多くのことが理解されてきたが従来の理論的予言とは異なる興味ある事実が本実験の速度場の可視化より明らかになった。このような非線形性のつよい Supercritical Regime では Busse と Whitehead³⁾ らにより Bimodal Convection と呼ばれる第一のロールの組 (first Bifurcation) のロールの軸に直交する軸をもった第二のロールの組が出現することが知られており、これは Cross Roll Instability と関連して大変重要である。

この Bimodal Convection の特殊な場合で互に直交したロールの波長がそれぞれ等しい場合がよく知られている Square Convection に対応するのである。これらの流れのパターンは誘導法でそのプラン・フォームは観測されているが、その速度場の全体像は観測されていない。これと関連して Busse らにより予言されているロールの形をとった Square 対流のパターンは現在までに実験では見出されていなかったがこのことも本実験で明らかになった。このような二次元ロールから三次元対流

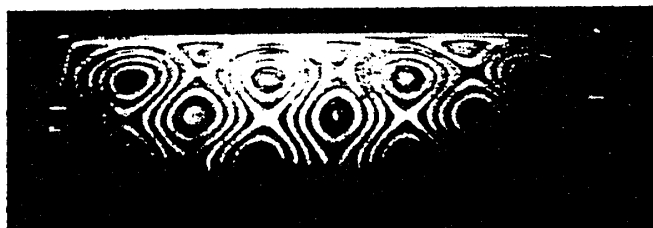


図 3. スクエア・セル の速度場 ($\Gamma_R=8.2$)

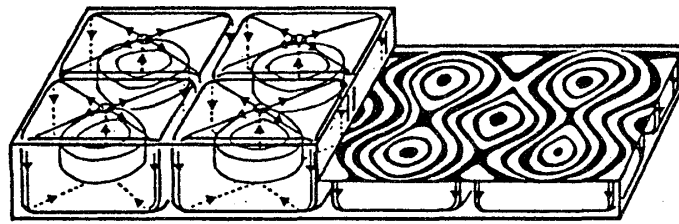


図 4. スクエア・セル の速度場と流線 ($\Gamma_x=8.2$)

への遷移といった非線形領域では、様々なモード競合が現れる可能性があり大変興味深い。Proctorらは最近容器の Slabの熱伝導率が作業液体のそれよりも低い場合にレーリー数増大方向で R_c 近傍でSquare対流が観測されることを予言している。このことは境界条件によっては分岐はImperfect Bifurcationとなり熱伝導状態から定常ロールへの鋭い遷移とはならず滑かな分岐で三次元対流(Cellar構造)いきなり現れることを示唆している。このことはSide Wall効果でImperfect Bifurcationを起こす可能性が期待出来る。Side Wall 効果の従来から行なわれてきた実験に関してもかならずしも十分な理解がなされていなかった。



図 5. 非定常ロールの速度場 ($\Gamma_x=8.2$)

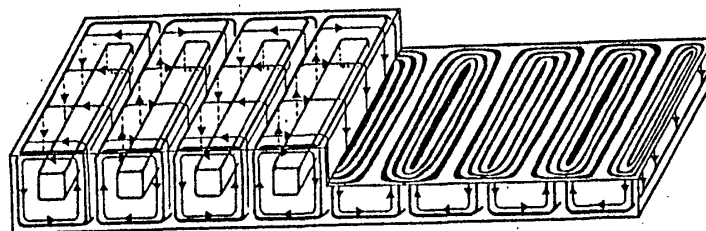


図 6. パラレルロール流の立体的形状と速度場
(ガラス容器)

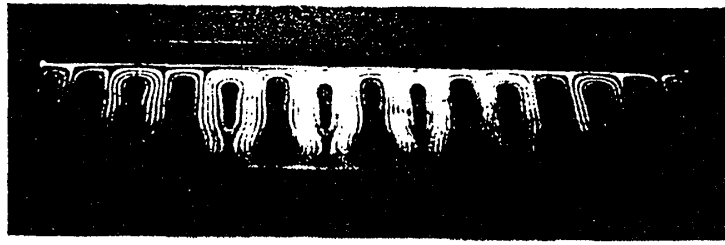


図 7. 混合モードの速度場 ($\Gamma_x=15.2$)

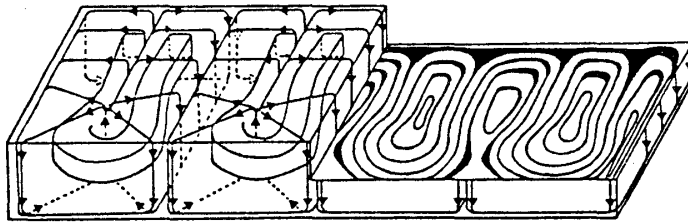


図 8. 混合モードの速度場と流線 ($\Gamma_x=8.2$)

このことをふまえてベナール対流系の非線系安定性の問題を明らかにするため、その初期過程において低流速度域で境界条件の不安定化に果たす役割の重要性を考慮してつぎの条件下でその実験を行い興味ある結果が得られた。1) アクリル樹脂を側壁に用いた対称容器:アスペクト比 $\Gamma_x=8.2$, $\Gamma_y=4.0$ 、2) アクリル樹脂と光学ガラスを対向させた2種類の非対称容器:アスペクト比 a) $\Gamma_x=8.2$, $\Gamma_y=4.0$ b) $\Gamma_x=15.2$, $\Gamma_y=4.2$ 。それぞれレーリー数増大方向では非定常パラレル・ロール (Subcritical Convection) が観測され1) の条件下ではスクェア・セルに至り、2) の条件下では定常ロールとスクェア・セルの混合モードに至る。b) では混合モードのセル波長の増大がみられる。1) ではレーリー数減少方向でスクェア・セルは横ロールに遷移する。特に 2) では既存のロールと異なる波長モードをもち、それと直角に交わる横ロールが重なりあってBimodal Convectionが発生する事を確認した。これは、臨界レーリー数 R_c 以下で発生したもの (Subcritical Convection) であるが、理論的に予言されたレーリー数22,600以上での速度場パターンと酷似しており、興味ある結果が得られた。更にレーリー数を減少させると1)と同様横ロールが支配的となり、無流へと至る。以上の過程でいずれもヒステリシスが観測された。この実験でわかった重要なことはスクェア・セルの発生に必要な要因としてサイド・ウォールの効果がその役割を演じていることである。これらの結果は、粘性が温度に強く依存しかつプラントール数が大きい場合の速度の瞬時計測の重要なデータを与えている。



図 9. BIMODAL CONVECTION の速度場 ($\Gamma_K=15.2$)

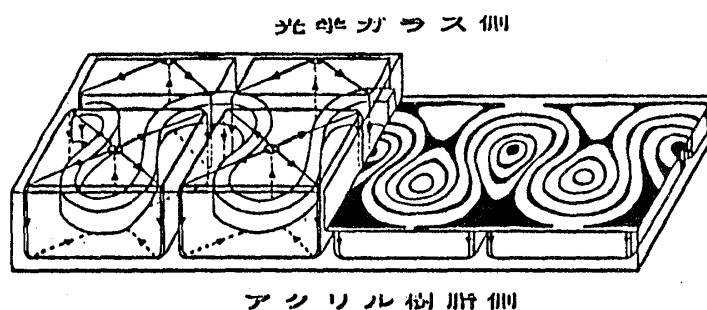


図 10. バイモーダル対流の立体的形状と速度場

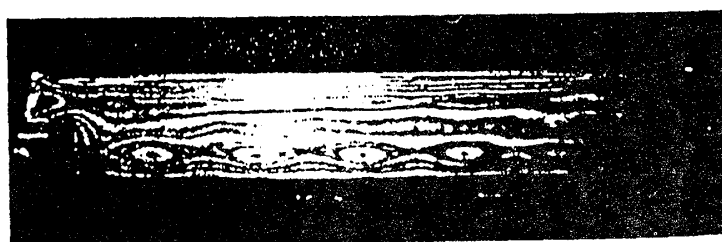


図 11. 横モードの速度場 ($\Gamma_K=15.2$)

[参 考 文 献]

1. M. Ueda, K. Kagawa, K. Yamada C. Yamaguchi and Y. Harada, Applied. Optics. 21, 3269 (1982).
2. M. Ueda, M. Hosono and Y. Harada, OPTIK 63, 363 (1983).
3. F. H. Busse, Rep. Prog. Phys. 41, 1930 (1978)