れることがない。このため、いったん投入されたトレーサーが過去のいろいろなコヒーレントな乱れ構造の残骸として過去のすべてを含めて画面の中に写されている。したがって、この画面から現

在その瞬間に生じている乱れの構造を見出すためにはまだいろいろな考察が必要となる。このようなことも考え合わせるとき、筆者も上述の討論者の意見には少からざる共感をおぼえたのである。

乱流と可視化——境界層を中心として*

日野 幹雄**

Turbulence Research and Flow Visualization

Mikio HINO

1. 夜明け

乱流研究において流れの可視化が果す役割の重要さは、Hagen (1839) や Reynolds (1883) のような乱流研究の初期の研究にもみられる。しかし、現在の乱流研究の中心テーマともいうべきバースティングや乱れの組織構造の究明に可視化の

図1 後流の渦構造 (Corrsin, 1954)

図2 境界層壁面上の染料の streak (Hama, Corrsin (1957) より)

果した役割はそれ以上に大きいであろう。

Corrsin と Hama

現在のこうした研究の魁けとなったのは Corrsin (1943, 1957) による噴流の塊状構造と super layer を境にした乱流域と非乱流域の明確な区分の存在の指摘である (図1)。また、同時期に Corrsin (1957) は Hama (浜良助) の撮った平板に沿って流した色素による可視化写真により平板上の境界層流れの streak 構造の存在を指摘している。この Hama の仕事が現在の盛んな乱流研究の始まりである (図2)。

2. バースティングの発見

Kline と Brodkey

しかし、Corrsin, Hama らの研究が現在の bursting や organized eddy の研究の隆盛に発展するためには、Kline らの粘り強い努力が必要であった。1959年に始まり (図3) 10年に亘る彼らの仕事は主に水素気泡や色素によるものであったが、1960年代の終りになると Brodkey らは写真や映画によって得られた定性的な乱流像について熱線計の記録を新たな統計処理の概念 (条件付き抽出法) により、定量的に解析して論じるようになった。

Einstein—Li と Hanratty の renewal モデル

このバースティング研究の夜明け時代の研究のうち、是非とも挙げておきたいのは Kline らの1959年の論文発表に先立つこと数年前の1956年に土木工学者である Einstein & Li および数ヶ月

*原稿受付 昭和58年9月20日

**東京工業大学

図3 Kline & Runstadler (1959)
の境界層壁面上の乱れの構造
に関する初期の記念モデル

遅れて化学工学者 Hanratty により独立に発表された乱流境界層の **renewal** モデルである。これは上から下まで一定の流速分布(乱流状態)を初期状態として、粘性のために層流粘性底層が時間とともに厚さ $\delta(t)$ を増し、 $\delta(t)$ に関する Reynolds 数 $Re_* = U_* \delta / \nu$ がある限界値に達すると一瞬にして粘性底層が崩壊し、また振出しにもどるという考えで、彼らは巧みにこれを数式化し、粘性底層内の流速分布、レイノルズ応力や圧力変動の周期などを説明した。これは明らかにその後の **bursting** の **primitive model** であるが、残念ながら当時は理解者を得ることができなかった。この時代 (1957~60) 私は大学院博士コースで乱流の研究をしていた (ついでに書くと当時はその必要性などまるで認められなかった)。未だコンピューターも図体だけは大きかったが、オモチャのようなものでメモリーは命令語も入れて1024、プログラムは FORTRAN も Basic もなく一つ一つ

細かな手順を示す必要があった。このメモリーの少ないこと (確か一つのメモリーを半分に割って2倍にして使ったと思うが) が幸いして、相関やスペクトルに現在でいう **second mild maximum** を見出し、Einstein—Li のモデルと比較しはば良いのではないかということを示した (図4)。

3. パースティングと渦構造

Sweep と ejection

平板に沿う境界層の壁面近くの乱流構造を特徴付けるのは、パースティングと呼ばれる一連の運動である。これは熱線のトレースでみると、流速が低い値から急激に速い流速にジャンプし、細かい乱れを伴いながら徐々に流速が減衰するという形で示される。このパターンを **ramp 型** (ライオンが獲物に跳びかかる様子) の変動ということもある。これは Brodkey ら (1972) によると、まず壁面上方からの流速の速い流体塊の壁面への進入運動 (**sweep**) で始まり、流体塊が壁面で反射して上方に向う運動 (**outward interaction**) である。

一方壁面にへばり付くように流れている速度の遅い流体塊が **sweep** 運動に促されて壁面からと

図4 開水路乱流のスペクトルと自己相関 (second mild maximum か) の例 (日野, 1959, 1961)

び出す運動は **ejection** といわれ、この流速の遅い流体塊が上方の流体により下方にはね返される過程を **wall ward interaction** という。熱線による条件付きサンプリングにより、レイノルズ応力を生み出すのは、この **sweep** と **ejection** であることが明らかにされている (図5, 6)。

縞構造

平板の壁面近くに流れを横断する方向に張られた線からの水素気泡膜や平板上の横断方向スリットからの色素膜の挙動をみると、これらの作る膜がある間隔のリボン状ないしはバンド状、筋状の縞構造 (**streaky structure**) をなし、リボンの先はヒラヒラと巻き上っているようにみえる (Kline & Runstadler は1959年彼らの最初の論文ではこの壁面にへばり付くような部分を **island of hesitation** と呼んだが、現在はこの名称はもはや使われていない)。このバンドの幅 λ は乱れの内部パラメーターで無次元化され、平均的には

$$\lambda^+ = \frac{U_* \lambda}{\nu} \cong 100$$

の関係を満たす。しかし、バースティングの発生周期 T_B は外部パラメーターにより無次元化される。

図5 ストリーク構造 $y^+ = 4.5$. (Kline, Reynolds, Schraub and Runstadler, 1967)

図6 バースティング (Kim, Kline and Reynolds, 1971)

$$U_\infty T_B / \delta \cong 2.5$$

バナナ渦

こうした渦構造は平板に沿う層流の乱流への遷移過程の非線型領域での **horse shoe vortex** や **hair pin vortex** (図7, 西岡他, 1981) を素形とするものであろうと考えられている。また、佐藤 (浩) ら (1983) は熱線による条件付抽出法によりバナナ渦との名称を与えている (図8)。

Bandyopadhyay & Head (1977) は、照明をこの渦の方向に沿って (流れ方向に約45°傾く方

(a)

(b) Peak位置

図7 層流から乱流への遷移過程の渦構造 (西岡・浅井, 1981)

図8 乱流境界層の渦構造——バナナ渦 (佐藤・福西)

REYNOLDS NUMBER $Re_\theta = 600$

図9 境界層の渦構造——光による切断面方向による可視化写真の違い
(Bandyopadhyay & Head, 1979)

図10 層流境界層の中で乱流後流の buffet で造られるポケット (Falco, 1979)

向) あてた場合の舌状の形 (図9 a) と、この渦を断層的に切る照明のキノコ形の断面形 (図9 b) を示している。

一方, sweep の可視化は比較的少ない。また, 平板に沿ってトレーサーを流すとき, いわゆる2層成層流となり, 不安定波としての波との区別が難しい。台風など強風時に稲穂の揺れで見られる大きな凹みなどは sweep の可視化とみられよう。

4. 境界層外線の organized eddy

バースティングは平板に沿う境界層を特徴付ける乱流運動の素過程であるが, これは主に壁面近傍の運動であって, 境界層外縁の運動については別に論じなければならない。しかし, 与えられた頁数も尽きたので Kovasznay 他 (1970), Falco (1977) や種子田 (1981) の文献を挙げるに留めよう。

種子田 (1981) は乱流境界層の中で軸を流れの横断方向に設置したペーンを回転させて, 乱流境界層の応答が回転周期により異なることを示している。

5. まとめ

可視化が最近の乱流研究に果たした役割として, 私は次の2つの点を挙げよう。①可視化によって乱流がスペクトルとか相関で論じられるよりわかり易くなった。②可視化の技術の進歩は, 計測技術とコンピューターの進歩とあいまって, 条件付サンプリングなどで乱流の測定技法の進歩を促した。

文 献

- 1) Bandyopadhyay, P. & Head, M. R. (1979), *Turbulence in liquids*, 16-26.
- 2) Brodkey, R. S., Wallace, J. M. & Eckelmann, H. (1972), *J. Fluid Mech.*, 76, 89-112.
- 3) Corrsin, S. (1943), *N.A.C.A., ACR 3 L 23* (Wartime Rep. W. 94).
- 4) Corrsin, S. (1957), *Proc. of Symposium on Naval Hydrodynamics*, 373-407 (p. 394, p. 403), *Nat. Acad. Sci., Nat. Res. Council*.
- 5) Einstein, H. A. & Li, H. (1956), *Proc. ASCE*, 82, (EM2).
- 6) Falco, R. E. (1977), *Phys. of Fluids*, 20 (10) Pt II, S 124-132.
- 7) Hanratty, J. J. (1956), *A. I. Ch. E., Journ.*, 2, (3).
- 8) 日野幹雄 (1959): 水力学・水理学における境界層理論の応用に関するシンポジウム, 学術会議水力学水理学研究連絡委員会.
- 9) 日野幹雄 (1960): 開水路の乱流構造, 博士論文, 東京大学.
- 10) Hins, M. (1961), *Tech. Rep. C-6103, Tech. Lab., Cent. Res. Inst of Electric Power Induttry.* (P. 31)
- 11) Kim, H. T., Kline, S. J. & Reynolds, W. C. (1971), *J. Fluid Mech.*, 50, 133-160.
- 12) Kline, S. J. & Runstadler, P. W. (1959), *J. of Appl. Mech.* 26, Ser. E, (2)
- 13) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. & Runstadler, P. W. (1967), *J. Fluid Mech.*, 30, 741-773.
- 14) Kovaszny, L. S. G., Kibens, V. & Blackwelder, R. F. (1970), *J. Fluid Mech.*, 41, 283-325.
- 15) 浅井雅人: 西岡通男 (1981): 壁乱流の発生, 特定研究「乱流現象の解明と制御」研究成果報告集, 中津川集会, 29-37.
- 16) 大成博文, 佐賀孝徳, 齊藤隆 (1982), 流れの可視化, 第10回可視化シンポジウム, 2, (6), 529-532.
- 17) 佐藤浩, 福西祐, (1983): 日本流体力学会誌 (ながれ).
- 18) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治 (1981), 流れの可視化, 1, (2), 159-226.

管内乱流の可視化による検討*

鮎川 恭三**

Visual Investigation of Turbulent Structure in a Pipe

Kyozo AYUKAWA

可視化による乱れの研究は、壁乱流とくにその組織的構造の発見に大きな役割を果たしたことは周知のことである。これらの研究とその発展の概観は他に譲って、ここでは、著者の研究室で現在までに進めて来た可視化を中心とした乱れの研究を紹介してご批判を仰ぎたいと考えている。

乱流の特徴は、その不規則性とともに、それが非定常で三次元的な流れであることにあり、これが可視化を難しくしている。三次元的に流れを可視化する手法としては、写真の画面に直角方向の深さの判定を色で行うカラースリット法を用いた。この手法はすでに本誌に発表¹⁾しているので詳細は省くが、トレーサ法であり、深さ方向の精度は悪いものの、スリット幅の範囲で三次元的な流跡線の描像を得ることが可能である。

バースト周期 T_B を上記の可視化法で測定した

結果を図1, 2に示す。境界層流での熱線を用いた測定結果と比較するためには、本トレーサ法での観察がラグランジュ法であるのに対して熱線の場合オイラー法であり、その相互の関連を把握する必要がある。どの範囲で発生したバーストがオイラー法での測定点でバーストとして計測されるかをカラースリット法で得られた流跡線から求

図1 Bursting period

*原稿受付 昭和58年9月21日

**愛媛大学工学部