

壁面領域内乱流構造の立体的可視化

THREE DIMENSIONAL FLOW VISUALIZATION OF WALL REGION IN AN OPENCHANNEL TURBULENT FLOW

大成博文*・佐賀孝徳**・斎藤 隆***

By Hirofumi OHNARI, Takanori SAGA and Takashi SAITO

Three dimensional coherent structure of turbulent channel flows near the wall is investigated. The hydrogen bubble method is used in experiments.

Low speed streaks lifted from the viscous sublayer make a pair. Transverse interval between two streaks in the pair is about $(10-30) \nu/u_*$, where ν is the kinematic viscosity, u_* the friction velocity.

In the buffer layer and log region the pair concentrate and separate from the wall. Three dimensional behavior of the pair is similar to that of the streamwise vortex.

1. 緒論

乱流現象内の秩序構造(coherent structure)の解明は、それが乱流現象の本質的な理解に関することにとどまらず、諸物理量の輸送、乱流制御、微視的混合機構などの工学上の問題に深くかかわるきわめて重要な課題である。

従来から、壁近くの流れの秩序構造には、streak¹⁾, bursting²⁾⁻⁴⁾, pocket⁵⁾, sweep⁶⁾をはじめ数多くの現象⁷⁾が知られている。これらは、乱れの発生機構や輸送過程に深く関与し¹⁾、壁面領域(wall region)内の乱流運動を支配するのみならず、外層(outer layer)内の大規模な秩序運動とも相互作用を繰り返すことから、流れ場全体の構造を決めるにも重要な役割を果たす^{4), 8)}。

streak構造およびbursting現象は、Klineを中心とするスタンフォード大グループによって発見され詳しく検討されてきた¹⁾⁻⁴⁾。前者は、粘性底層内に最も顕著に形成される低速と高速の流体運動に関するものであり、

その存在は流れ場が乱流であることの普遍的な特徴⁴⁾と考えられた。後者は乱れの発生機構自身と考えられ¹⁾、low speed streakが粘性底層からlift-upし、oscillationと統いてbreakupで終了するという連続的な過程と定義された^{2), 4)}。pocket module, sweep現象はいづれも壁付近の局所的な高速流体運動に関するものであり、高レイノルズ応力の発生に寄与すること、さらにはbursting現象との相互作用をもつことなどが明らかにされた^{5), 6), 12)}。

これらの秩序構造に関する膨大でかつ詳細な検討が2つのワークショップ^{7), 8)}で行われた。これらのレポートは、その後それらを踏まえてまとめられたCantwellのレビュー⁹⁾と合わせて、おそらく現時点で最も秩序構造に関する議論を集約し課題を明示したものと思われる。

なかでも、本論のテーマと関係してKline⁴⁾とFalco¹⁰⁾のレポートが重要である。Klineは、自らの20年にわたるbursting現象に関する一連の研究を総括し、特に、粘性底層内のstreak構造とbursting現象が本質的に異なる挙動であり、それらを区別して検討する必要性や、内層内のbursting現象が外層内の運動との相互作用モデルとして考えられるべきものであり、その妥当性を證明する重要性などを強調した。一方、Falcoは、2つのワークショップの議論をまとめた報告を行い、pocket

* 正会員 工修 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒745 徳山市久米高城 3538)

** 正会員 徳山工業高等専門学校講師 土木建築工学科 (同上)

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

module と bursting 現象の個々の形成機構や相互関係に関する多数の疑問点を示した。

本研究は、これらの強調点や疑問点のなかでも重要と思われる low speed streak の粘性底層からの lift-up 前後の挙動の区別、streak の三次元構造とスケール則、壁近傍の縦渦 (streamwise vortex) の挙動などに注目し、それらの解明を行うために従来にない立体的可視化法の適用を試みたものである。

すでに、壁乱流の三次元的な把握を試みた可視化には、乱流境界層での Kim²⁾, Praturi¹¹⁾, Falco¹²⁾, Head¹³⁾, Smith¹⁴⁾らの研究、洪水流での木下の研究¹⁵⁾、開水路二次流に関する宇民・上野の研究¹⁶⁾などがある。ところが、壁面領域内の三次元的な乱流構造の把握に関して、これらの研究のはほとんどが不十分さを残しており、詳細な解明に至っていない。

本論の目的は、壁乱流の壁面領域において立体可視化を行い、秩序運動の三次元的な構造の解明を試みることにある。そのために、水素気泡膜法による実体視および横断面視を行い、得られた可視化の形象の三次元構造、スケール則および時間的変動過程などについて詳細に考察した。その結果、秩序構造に関するいくつかの新しい知見が得られた。なお、本論で用いた記号、秩序運動の用語法および壁面領域内の流れの区分法は、前述のワークショップで行われた “definition”¹⁷⁾ にすべて従うこととした。

2. 流れの可視化法

(1) 水路および流速計測装置

実験は、長さ 10 m、幅 60 cm、深さ 15 cm の総アクリル製滑面開水路で行われた。水路の上下流端には、それぞれ整流装置（径 4 mm、長さ 3.2 cm、幅 60 cm のハニカム）と水位調節用堰が設けられた。撮影および流速計測位置は整流装置より 5 m 下流付近であり、そこ至るまでに流れ場は十分発達している。

流速計測には前方散乱方式のレーザー流速計 (DISA 55 X シリーズ、最大出力 2 W のアルゴンレーザー) が用いられた。信号処理には周波数シフターおよび周波数トラッカーが用いられ、可視化が行われる低流速での計測が精度よく行われた。平均流速分布、乱れ強度分布は最近の Purtell らの結果¹⁷⁾と一致し、本壁面領域内の流

れが乱流境界層の壁近くの流れとほぼ同じものであるとみなした。実験条件を表-1 に示す。

(2) 水素気泡膜法

水素気泡膜法とは、陰極線に直流電圧を印加することによって水素気泡を連続して膜状に発生させる方法である。この方法は、従来からよく用いられているタイムライン法と比較してより豊富な情報を流れ場に与える特徴を有する。この特徴に注目して、タイムライン法ではとうてい不可能な streak の詳細な三次元構造の検討が可能となった。図-1 に示すように陰極線が壁に平行に張られ、壁からの高さが自由に変えられるようにした。左側方からは 1 kW のスリット光源が、同時に右側方からは 2 本のレーザー光線がそれぞれ高さを変えて照射された。これらの工夫は、水素気泡の三次元的な挙動を把握する際に非常に有効であった。

(3) 実体視法

実体視法を用いて流れの構造を本格的に解明しようとする手法の確立は木下¹⁵⁾によって行われた。彼は洪水流の表面付近の流れがつくる可視化の形象に注目し、カメロン効果による実体視によって表面流速の可視化に成功した。本手法の採用はこれら木下の研究に多くの示唆を受けたものであり、著者らは、トレーサーの三次元的な挙動をそのまま正確にとらえるという観点から、カメロン効果を利用しない通常の実体視を壁面近くの流れに適用した。実体視の特徴は、木下¹⁵⁾も指摘したように「驚くほどの立体表現」が過高感の形成によって可能なものである。著者らはこの過高感を利用して、従来にない精度

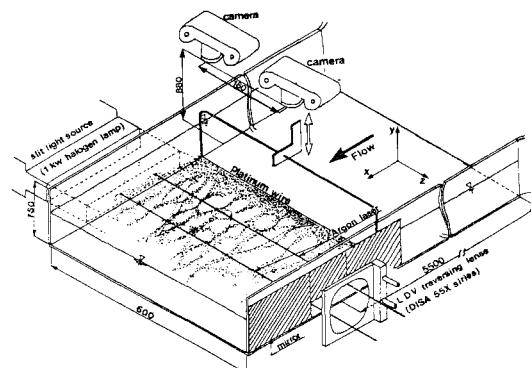


図-1 実験装置

表-1 実験条件

E.C. CASE	Mean velocity U_m (cm/s)	Shear velocity U_* (cm/s)	Water depth H (cm)	Momentum thickness θ	$R_r \left(= \frac{U_m H}{\nu} \right)$	$R_* \left(= \frac{U_* H}{\nu} \right)$	$R_s \left(= \frac{U_* \theta}{\nu} \right)$
A	7.13	0.47	6.57	0.66	4 650	307	467
B	4.75	0.29	6.62	0.64	3 120	190	301
Kim ²⁾	7.62 (= U_∞)	0.36	7.87 (= δ)	0.94		283 ($= \frac{U_* \delta}{\nu}$)	666 ($= \frac{H_\infty \theta}{\nu}$)

で水素気泡の三次元的な挙動を観察した。

撮影は2台の同時シャッター回路をもつ35mmカメラでモータードライブ装置とともに連続して行われた。カメラの位置関係は図-1に示されている。

(4) 横断面視法

三次元的な乱流構造の把握にもう一つの有効な方法として横断面視法がある。この方法は、乱流境界層で種子田^[18]、Head^[19]、乱流斑点に関してPerry^[20]、開水路二次流に関して宇民・上野^[21]などによって適用されたが、いずれも壁面領域内については鮮明な可視化の結果をもとに詳細な考察が行われていない。本研究では詳細な横断面可視化を実現するためにレーザースリット法を採用した。

レーザースリット法とは、強力なレーザー光線をプリズムを通してスリット平面に変換し、それを流れの断面に挿入スリット面を過ぎるトレーサー（この場合は水素気泡）が描く模様を瞬間に可視化する方法である。この方法は、強力なレーザー光の直進性を利用して、きわめて薄い（1mm程度）が断面全体に均一で明るいスリット面を形成し、適切なトレーサーを用いて鮮明な可視化を可能とする点に特徴があり、壁近くの流れのみならず各種の流れ構造の把握にきわめて利用価値の高いものである。

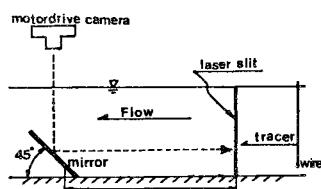


図-2 レーザースリット法の概略

装置の概略を図-2に示す。スリット面は気泡が三次元的な挙動を呈し始める陰極線より55mm下流に置いた。撮影は壁面に45度に傾いて置かれた鏡（9×9cm）の反射を通して行われた。鏡の位置は、スリット面の気泡の挙動を注意深く観察しながらその影響が十分なくなつたと思われる位置まで下げた。陰極線の高さは7種類変えてそれぞれ撮影が行われた。

3. 壁面領域内の秩序構造

(1) streakの秩序性と三次元構造

streak構造は、低速と高速の領域が横方向に一定の間隔で交互に細長く並ぶ特徴をもち、粘性底層（ $0 \leq y^+ \leq 7 - 10^{[7]}$ ）、 $y^+ = u_* y / \nu$ 、 u_* ：摩擦速度、 y ：壁からの高さ、 ν ：動粘性係数）に最も顕著に形成されるほか、バッファー層（ $7 - 10 \leq y^+ \leq 30^{[7]}$ ）から対数領域（ $y^+ \geq 30^{[7]}$ ）におよぶ範囲まで存在する。そこでこれら3つの領域に

おいて streak の三次元構造を詳細に調べた。

写真-1は、粘性底層、バッファー層、バッファー層外端、対数領域のそれぞれに陰極線を置いて気泡を発生させ、そのステレオ写真を示したものである。これらを実体鏡でのぞくと、複雑な streak の三次元構造がみごとに浮かび上がった。気泡が二次元性を保つのは陰極線直下流の部分のみであり、流下とともにすぐに三次元的な挙動を示す。「マーカーは常に低速の部分にはいってくる。^[4]」ことから、流れ方向に長い筋状の、気泡が白く映る部分が低速の領域（LSS）に相当する。側方からのスリット光の照射により、相対的に高い位置のLSSはより白く、低いのは逆により黒く映し出されており、この相対的なコントラストによってもおよその高さ表現が可能である。また、陰極線の下流に横に伸びた2本のレーザー光線が見える。レーザー光線の中心の高さが写真的右側にそれぞれ示されている。これは前述したように気泡の三次元的な挙動を把握するための一つの工夫であり、レーザー光線の位置にある気泡を確認するためのものである。すなわち、気泡がレーザー光と交差するとひとときわ輝いた鮮点が形成され、その鮮点に注目して前後左右の気泡の挙動を観察すれば、およその三次元構造が識別可能である。

写真-1 (a) には粘性底層から lift-up する LSS の挙動が示されている。陰極線は粘性底層内の $y^+ = 5$ の位置にあり、粘性底層外端に置かれた最初のレーザー光線の位置にくるまでに多数の LSS がレーザー光線を越えている。この挙動は bursting 現象の第1過程(lift-up)^[4]に相当し、その構造を実体視で詳しく調べた。図-3 (a) ~ (c) はその結果をスケッチしたものである。側面図は、陰極線および2本のレーザー光線の高さ、さらには代表点のいくつかに視差測定桿を用いて高さを求め、それらを参考に実体視上の判断に基づいて描かれた。

図-3 (a) には、LSS が対で粘性底層からともに lift-up しながら、その後は互いに異なるという挙動が示されている。すなわち、LSS の①と②は対で粘性底層から lift-up し、その後①は左右に鋭く揺れながら急激にバッファー層を飛び出している。一方②はともにバッファー層内まで lift-up しながら再び粘性底層内に戻っている。この①の lift-up 後の挙動は、bursting 現象の第2過程 (oscillation)^[4]によく似ている。ところが、oscillation の発生領域は同じ Kline らによって $y^+ = 8 - 12$ の領域と報告^[1]されており、①の LSS の挙動はその形成領域で明らかな相違を示す。

(b) には LSS と高速流体運動の相互作用の結果が示されている。高速流体が粘性底層に到達したことは底層内の気泡が局所的に急に剥がれることによって示されるが、それが図中では交差斜線を施した部分に相当する。

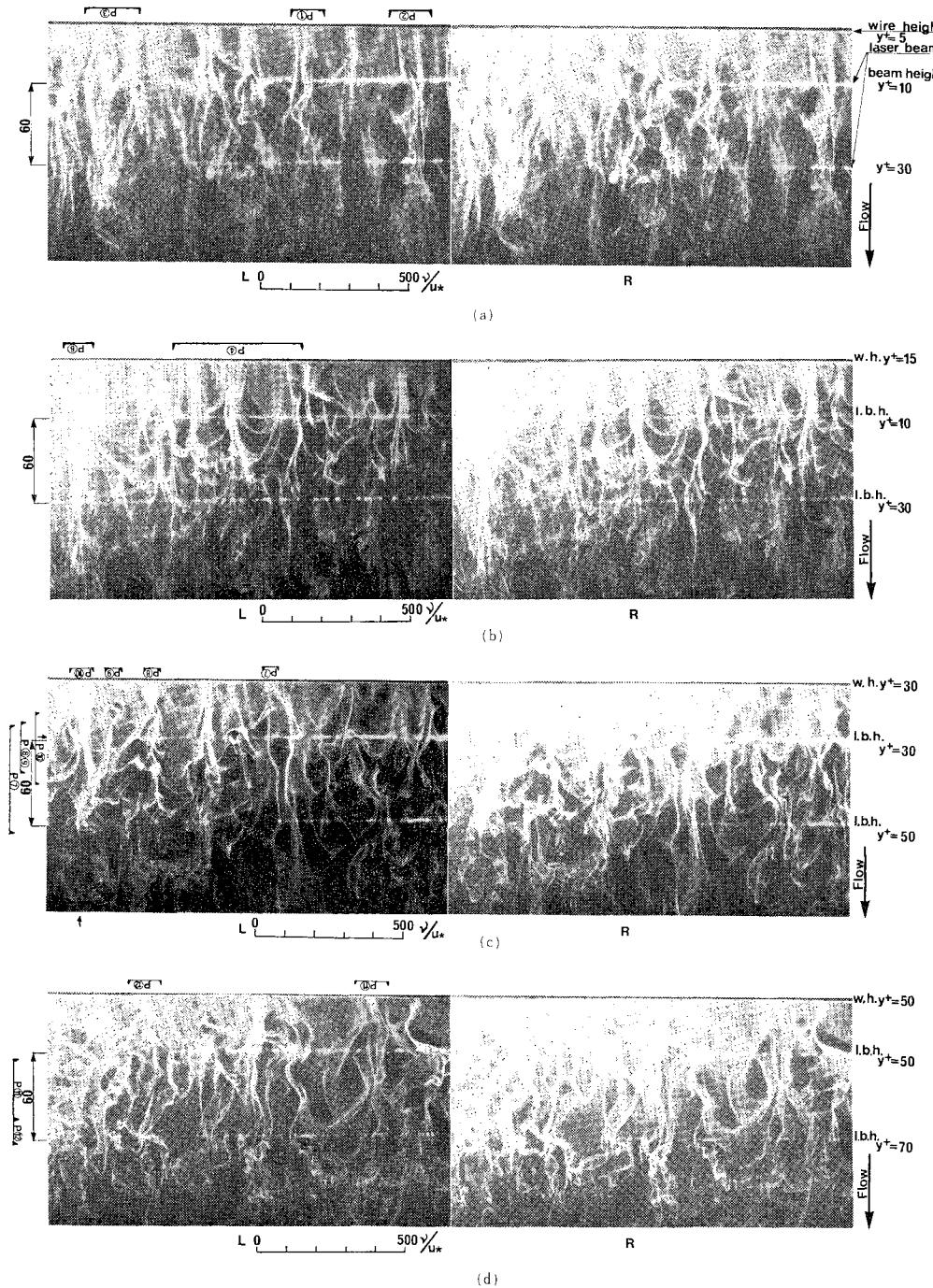
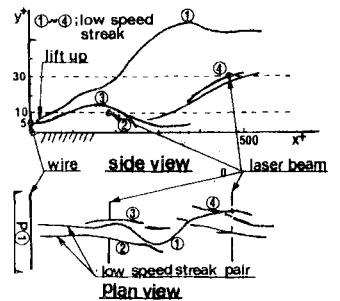


写真-1 水素気泡膜法のステレオ写真 (CASE A)

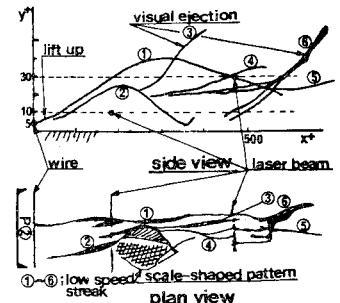
剥がれた気泡は斜め横に掃き出され、すぐ横のLSSの上昇に寄与している。この高速流体の到達によって形成される形状が Falco の “pocket”^{5), 12)} や著者らのいう「鱗形状」²⁰⁾に相当し、この挙動が横方向にLSSと相互作用をもつことが注目に値する。LSS②は高速流体によっ

てLSS①の方に押しやられ、①と②はともに上昇しその後再び壁面に向かって下がっている。①と②の間からはLSS③が飛び出し、下流の⑥も同様であり、これが“visual ejection”⁷⁾に相当する。

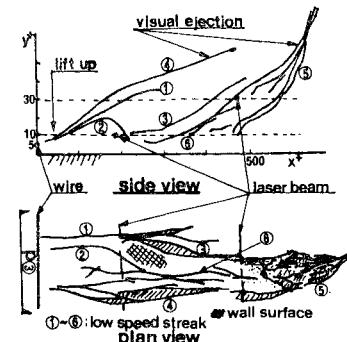
(c)にはLSSが集中して大規模に上昇運動する過程



(a) LSS の三次元的な挙動 (CASE A)



(b) 高速流体と LSS の相互作用 (CASE A)



(c) LSS の急激な上昇 (CASE A)

図-3 LSS の三次元構造

が示されている。ここでも LSS ①と②が対で粘性底層から lift-up し、①は急激に上昇するが②はその後壁に向かって下がるという先に示したパターンが存在する。①と②が別れはじめた後には高速流体の到達を示す壁面露出部分があり、その下流では③、④、⑥の LSS が横方向に束ねられるように集中して⑤の visual ejection⁷⁾の挙動を形成している。これらの観察結果は、sweep の発生後に低速流体の上昇があるという offen らの結果³⁾とも一致する。

写真-1 (b) にはバッファー層内に陰極線を置いた場合が示されている。粘性底層内に陰極線を置いた場合と比べて細長い筋状の streak が一層明瞭に対をなして形成され、それらが複雑な集中や交差を示す。図-4 にはこの図の P④の部分の三象限スケッチが示されてい

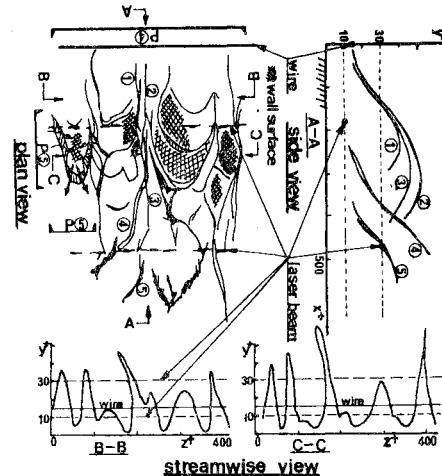


図-4 LSS の集中現象と三次元構造 (CASE A)

る。LSS ①～③は両横の高速流体によって互いに接近させられ、streak の集中が形成されている。①～③はともにバッファー層を越えて再び下降し、その後には LSS ④、⑤の飛出しがみられる。もう一つの注目点は P⑥に示す部分であり、矢印は次のような判断で示されたものである。すなわち、高速流体の侵入の跡を 2 つの LSS 対が覆いかぶさるように埋め戻そうとし、その下流では逆の向きで気泡が飛び出している。2 つの横断面スケッチは、流れ方向に LSS の高さを比較したものである。また、流れ方向に長い LSS 対の典型的な集中現象が P⑥に示されている。この挙動は、流れ方向に長くより緩やかな勾配で上昇している。

写真-1 (c), (d) は、バッファー層外端部、対数領域内にそれぞれ陰極線を置いた場合である。(c) では、さらに LSS 対の存在が明瞭であり、P⑦～P⑨が典型的である。これらを実体鏡で詳細に眺めると、流れ方向に軸をもつ縦渦の挙動の一部のように見える。P⑩では LSS の集中現象の形態が変化し、局所的な点(矢印)を中心に集中が起こり、そこでは気泡の隆起がみられる。(d) ではこの局所的な集中現象が一層明瞭である(P⑪、⑫)。また、streak の全体の形象は複雑となり、横方向に低速と高速の領域が交互に並ぶという壁近くの構造が見分けにくくなっている。

以上をまとめると、従来 LSS とよばれた領域内には、さらに細い筋状の LSS が対を形成する構造が存在し、その形成は LSS が粘性底層から lift-up する際に開始される。LSS 対の横幅はほぼ $10 \sim 30 \nu/u_*$ 程度であり、縦長は壁から離れるに従って短くなる。streak 構造の凹凸が最も顕著なのはバッファー層内であり、LSS の急激な飛び出しと関係する。LSS 対の挙動は縦渦に類似している。

(2) streak の横断方向構造

実体視法の特色は、平面視の挙動を水深方向に拡大して観察することにあったが、それを横方向に比較するにはかなりの労力を有する。そこで、レーザースリット法によって横断面の形象の可視化を試みた。

写真-2にその結果の一部を示す。6枚の写真には、陰極線の高さをそれぞれ変えた場合の気泡の挙動が、かなりの鮮明度で可視化されている。一瞥すれば、streak構造の明らかな横断方向不均一性が存在し、それが壁近くほど顕著である。注目すべき点は最も不均一性が顕著な部分(印)であり、その挙動は小スケールの径をもつ縦渦の存在を示唆する。そのうち(b)と(c)では、壁に向かう高速流体運動によって気泡が押し下げられ、逆に(d)～(f)ではその気泡の挙動が顕著な上昇運動の存在を示している。これらの壁面近くで急上昇する挙動が、平面視でみられるLSSの挙動に対応する。そのことは実体視されたstreakの挙動からも推測できるが、すでに、著者らによって二象限同時可視化法を用いて確かめられている²⁰⁾。

さて、壁近くで気泡の横断面形象が最も顕著に縦渦の挙動を示すのは、陰極線を粘性底層内に没入させた場合である。このことは、壁面付近に縦渦が形成される際に粘性底層内のトレーサーを巻き上げることを意味するが、それを一層明らかにするために、陰極線を粘性底層内に置いてstreakの横断面形象の時間的変動過程を追

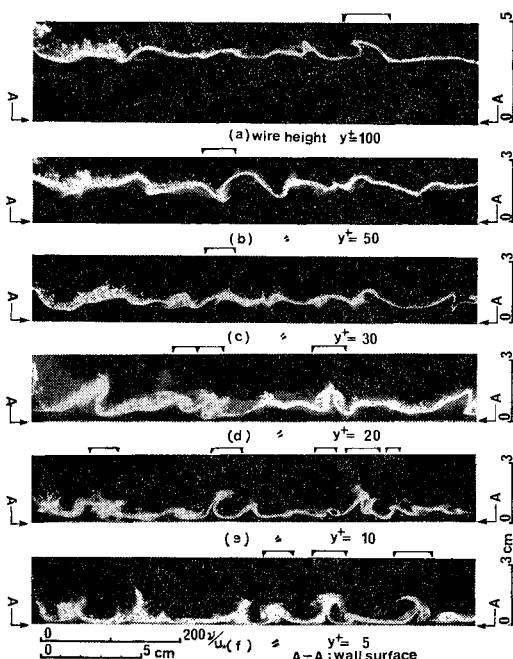


写真-2 水素気泡膜法の横断面可視化
(レーザースリット法, CASE B)

跡した。

図-5はその一例であり、モータードライブカメラで0.26秒ごとに連写して得られた形象をトレースして並べている。気泡の上昇部は横方向に約 $100 \mu/u_*$ の間隔で並ぶが、その間隔は常に時間的に変化している。写真中央部にはstreakの合体現象が発生しており、平面視での中川ら²¹⁾、室田ら²²⁾の観察結果と一致する。この上昇部の形象を連続的に追跡すると、それらはますます縦渦の挙動に似ている。この縦渦の挙動は、刻々とわずかずつ変化しながらも、全体のパターンは比較的長く流れ方向にはほぼ保持されている。テラー仮説を用いて、秩序構造が1コマ間で凍結されるとし、気泡上昇部の中心位置 ($y^+ = 30$) の平均流速値に1コマ時間間隔を乗じて1コマ間の長さとしながら、それらを連ねてstreakの三次元構造を描いた。その一例が図-6であり、この三次元構造はこのような変換操作によって、 $y^+ = 30$ より上で流れ方向に圧縮され、逆にその下で伸長されて描かれ、その分だけひずみを受けている。この図から、横方向にいくつも発生したLSSが流れ方向に発達、あるいは減衰してさまざまな空間構造を形成しているが、それが実は縦渦的空間構造の形成であると考えられる。気泡は縦渦が形成されてもその一部にしか入り込まないであろうから、完全な縦渦の挙動とはみなせないが、明らかにLSSは流れ方向に軸をもつ回転運動をし、しかもそのほとんどが対称形で形成されている。この縦渦的挙動の

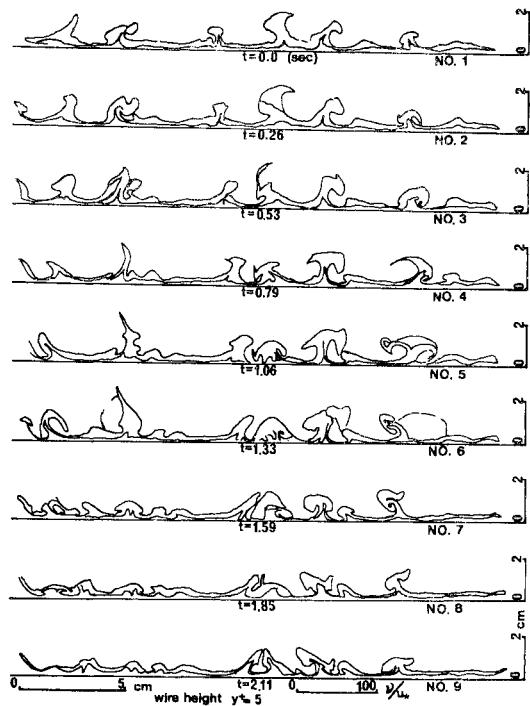


図-5 水素気泡の挙動の横断面連続撮影 (CASE B)

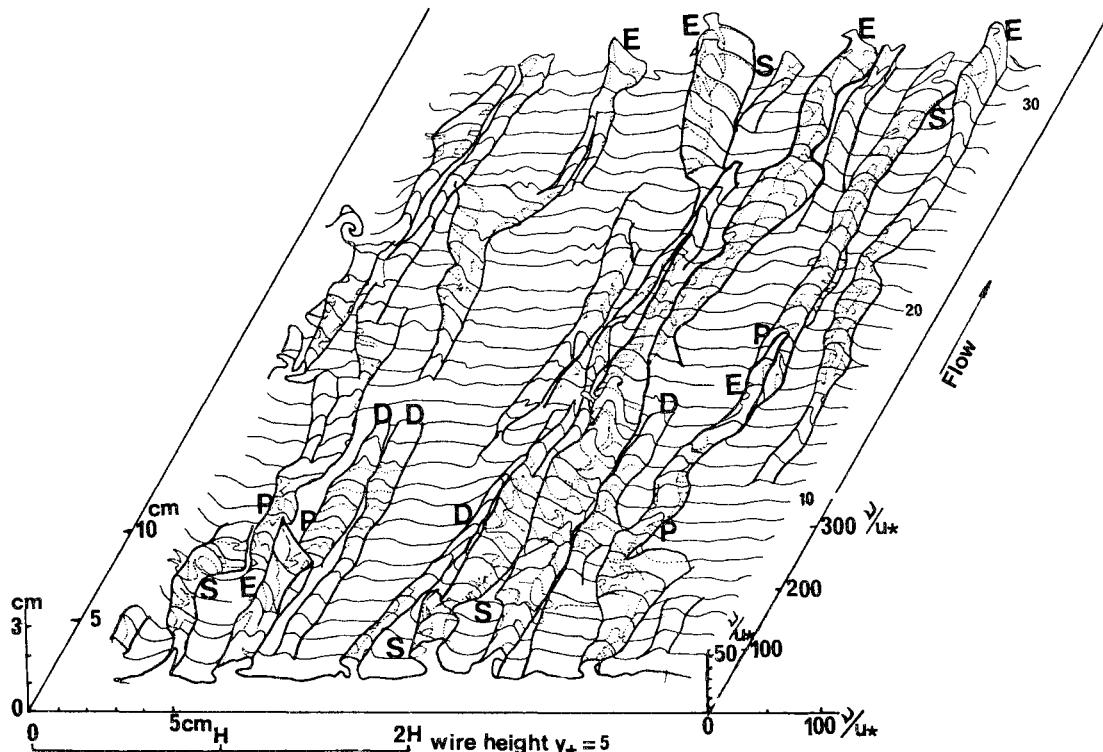


図-6 水素気泡の挙動の描く三次元構造 (CASE B)

ペアは互いに左右に揺れながら回転運動を行うが、その過程で発達してさらに上方に飛び出す場合（E印）と減衰する場合（D印）の両方がある。またペア同士の内側の挙動に注目すれば、縦渦が互いに壁に向かって掘れ込む挙動（S印）がいくつもみられるが、これらは図-4 P⑤の挙動と同じであろう。また、この縦渦的挙動の横方向の相互作用が、下流に新たな挙動の形成を促す。P印で示された部分は縦渦的挙動の発達後に新たなペアが下流に形成された部分である。室田ら²²⁾のいう低高速縞の合体・分裂・発生・消滅の機構は、これらのstreakの空間構造が発生・発達・減衰そして相互作用を繰り返す挙動の一部を平面的にとらえて得られたものと思われる。

(3) streak の横幅のスケール則

従来より、粘性底層内の low speed streak の横方向間隔の平均値および最頻値が $100 \nu/u_*$ と $80 \nu/u_*$ ⁹⁾であることが知られている。ところが、従来の LSS の領域内に実はさらに小幅の LSS 対が形成される構造があり、LSS 対の集中した部分が従来の LSS (低速縞) の領域に該当することなどが、前述の観察結果で明らかとなつた。しかも、LSS 同士は常に時間的に変動し、その間隔も常に変化する。この時間的な間隔の変化は、LSS 対間でも同様に存在しており、LSS 対の横幅ス

ケール則を明らかにする必要がある。

そこで、陰極線直下流の気泡の時間的変化のみに注目して、LSS 対の横幅スケールの一つ一つを丹念に読み取り、それを壁からの高さごとに平面的情報として比較した。

図-7 は streak の横幅スケールの頻度分布を比較している。注目すべき点は最頻値の変化であり、粘性底層で $40 \sim 50 \nu/u_*$ を示したのがバッファー層以上では $20 \sim 30 \nu/u_*$ の領域へと移行している。この傾向は、LSS 対の形成が粘性底層外端で開始されるという前述の実体観の結果とも符合する。また、高速部 (HSS) の間隔が壁から離れるに従って徐々に増加している。図-8 は、読み取った陰極線直下流の LSS の位置の経時変化を比較したものである。流れ方向は上から下で、流れ方向の長さスケールは横方向と同じ縮尺にされている。太い点線が陰極線通過直後の LSS の一部であり、流れ方向の点線間隔は連写間隔に動いた距離に相当する。この比較からも、streak 対の形成に関して粘性底層内とバッファー層内とで相違のあることが明らかである。図中のハンチングの部分は、高速流体が壁面に到達して気泡が跳ねのけられた領域を示し、これらが LSS を横方向に移動させたり遮断したりしている。LSS の横幅、縦長スケールの時間変化は、LSS と高速流体運動とのこのような

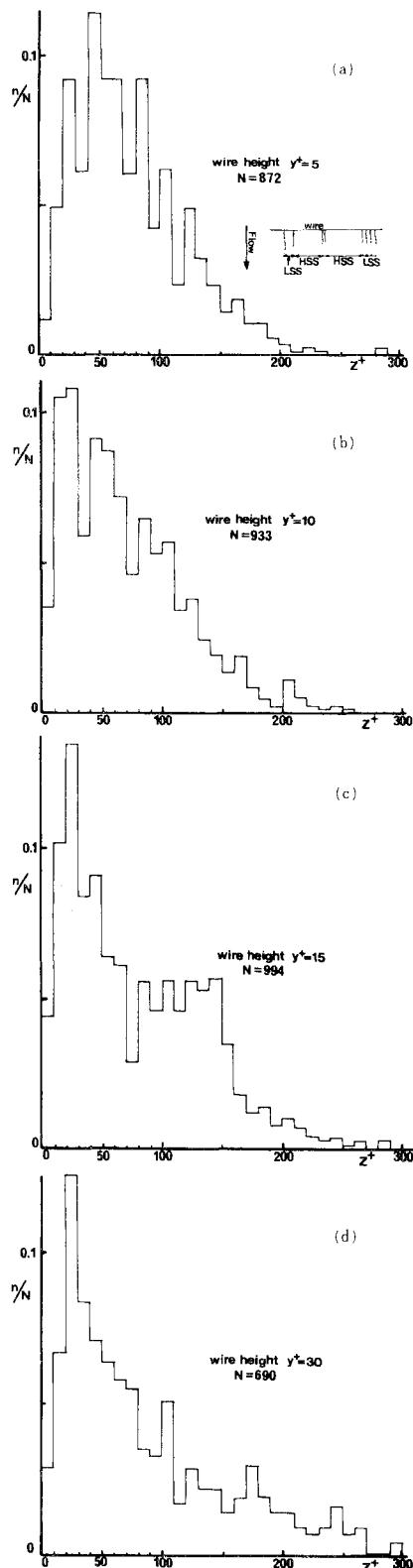


図-7 streak の横幅スケールのヒストグラム (CASE A)

相互作用によって形成されると考えられる。粘性底層内の縦長 λ_x は、この場合約 $800 \nu/u_*$ であり、従来説⁹⁾とほぼ一致する。また、 $y^+=15$ での同様のスケールをその高さの平均流速値で除して周期を求めるとき、それが従来の Bust 周期の値⁹⁾とほぼ一致する。

最後に本結果と bursting 現象の関係について若干述べる。Kline らの bursting 現象¹¹⁾とは、自らも強調するように LSS の主としてバッファー層内の挙動に関するものである。本結果は、LSS 対の形成という点で粘性底層とバッファー層の構造に重要な相違があることを、実体視およびスケール則の結果を検討することによって明らかにした。LSS 対の横幅は $10 \sim 30 \nu/u_*$ 程度であるが、bursting 現象の第 1 過程の横幅がこれと一致する²⁾。また、Kim ら²⁾は LSS の lift-up 後の挙動が縦渦の挙動を示すというモデルを示したが、本論の結果はそのモデルの正しさを示唆している。しかし、一方で

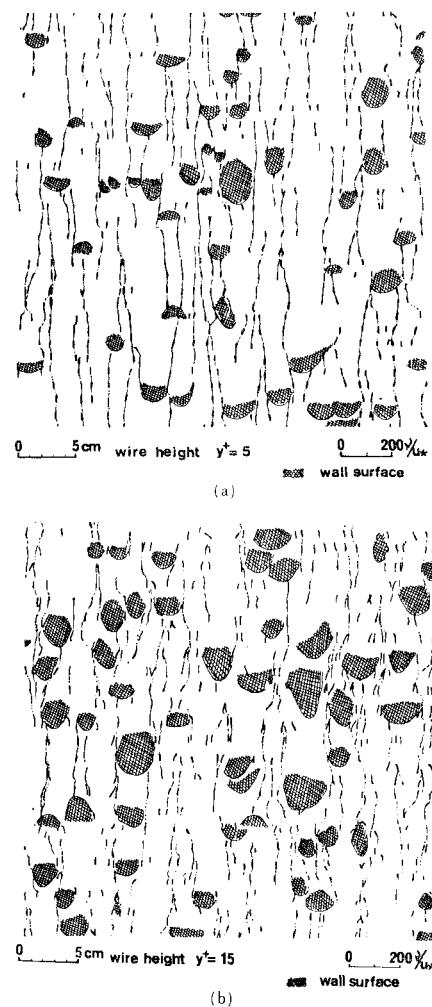


図-8 LSS の経時変化 (CASE A)

oscillation, breakup の挙動⁴⁾と一致するような観察結果は得られなかった。また、実体視および横断面視の結果のなかには、壁から急激にバッファー層を越えて飛び出す visual ejection の挙動⁵⁾が存在した。この挙動は Kline らの bursting 現象では説明できない。

4. 結 論

実体視法、横断面視法を用いて壁面領域内の立体的可視化を試み、その三次元的な把握に努めた。この 2 つの結果はかなりよい対応を示し、両手法が流れ場の三次元的な把握に不可欠であることが明らかとなった。本研究の結論を以下に示す。

(1) 壁面領域内には複雑な streak の三次元構造が存在する。低速部では streak 対の形成、集中現象があり、それらが高速部の運動と相互作用を行いながら上昇運動を形成する。

(2) LSS 対は粘性底層内の LSS が lift-up する際に形成され、その横幅は $10 \sim 30 \nu/u_*$ である。

(3) LSS 対は縦渦的挙動を示し、その有無がバッファー層と粘性底層の構造の相違に重要な役割を果たす。

(4) 粘性底層からバッファー層を越えて急に飛出す visual ejection 現象が存在した。この現象は bursting 現象と明らかに相違する。

最後に、本研究に協力していただいた徳山工業高等専門学校 山本恭子助手および卒業研究生の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Kline, S. J. et al. : The structure of turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, vol. 30, pp. 741~773, 1967.
- 2) Kim, H. T. et al. : The production of the wall region in turbulent flow, *J. Fluid Mech.*, vol. 50, pp. 133~160, 1971.
- 3) Offen, G. R. et al. : Combined dye-streak and hydrogen-bubble visual observations of a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, vol. 62, pp. 223~239, 1974.
- 4) Kline, S. J. : The role of visualization in the study of the structure of the turbulent boundary layer, Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, ed. C. R. Smith, D. E. Abott, pp. 1~26, 1978.
- 5) Falco : The production of Turbulence Near a Wall, AIAA-80-1356; pp. 1~15, 1980.
- 6) Corino, E. R. et al. : A visual investigation of the wall region in turbulent flow, *J. FluidMech.*, Vol. 37, pp. 1~30, 1969.
- 7) Smith, C. R. et al. : Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, 1978.
- 8) Kline, S. J. et al. : Summary of the AFOSR/MSU research specialists workshop on coherent structure in turbulent boundary layers., AFOSR-TR-80-0290, 1980.
- 9) Cantwell, B. J. : Organized motion in turbulent flow, *A.R. of Fluid Mech.*, Vol. 13, pp. 457~488, 1981.
- 10) Falco : A review of the current state of knowledge of turbulent boundary layer structure, Summary of the AFOSR/MSU research specialists workshop on coherent structure in turbulent boundary layers., AFOSR-TR-80-0290, pp. 32~56, 1980.
- 11) Praturi, A. K. et al. : A stereoscopic visual study of coherent structures in turbulent shear flow., *J. Fluid Mech.*, Vol. 89, pp. 251~72, 1978.
- 12) Falco : Structural aspects of turbulence in boundary layer flow, turbulence in liquids, pp. 1~15, 1981.
- 13) Head, M. R. et al. : New aspects turbulent boundary-layer structure, *J. Fluid Mech.*, Vol. 107, pp. 297~338, 1981.
- 14) Smith, C. R. : Visualization of turbulent boundary-layer structure using a moving Hydrogen bubble-wire probe, Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, ed. C. R. Smith, D. E. Abott, pp. 48~97, 1978.
- 15) 木下良作：並列らせん流に関する実験的研究，石狩川開発建設部, pp. 1~135, 1977.
- 16) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究(2)，京都大学防災研究所年報，第 20 号 B, pp. 288~331, 1977.
- 17) Purtelli, L. P. et al. : Turbulent boundary layer at low Reynolds number, *Phys. Fluids*, 24 (5), pp. 802~811, 1981.
- 18) 種子田定俊：乱流境界層の構造、ながれ, vol. 1.1, pp. 29~35, 1982.
- 19) Perry, A. E. et al. : A visual study of turbulent spots, *J. Fluid Mech.*, Vol. 104, pp. 285~403, 1981.
- 20) 大成博文ほか：壁面領域内乱流構造の比較可視化、流れの可視化, Vol. 3, No. 10, pp. 167~172, 1983.
- 21) 中川博次・禰津家久：開水路流れにおける横断方向の構造と大規模乱流, 土木学会報告集, 第 312 号, pp. 93~105, 1981.
- 22) 室田 明・福原輝幸：可視化法による壁面乱流に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 319 号, pp. 65~75, 1982.

(1983.8.31・受付)