

壁乱流の内層構造に及ぼす空間的干渉の影響Ⅱ

東大工学部 (院) 丸山 茂夫・田中 宏明

THE EFFECT OF SPATIAL RESTRICTION ON THE INNER LAYER STRUCTURE OF WALL TURBULENCE (2ND REPORT)

Shigeo Maruyama and Hiroaki Tanaka, Department of Mechanical
Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

The inner layer structure of wall turbulence developing on a moving flat-plate was spatially restricted by a fixed array of fences. The nondimensional gap h^+ between the flat-plate and the tips of the fences as well as the nondimensional interval p^+ of the fences were systematically changed. From hot-film anemometer measurements, states of flows were distinguished into three regions in the h^+ vs. p^+ plane, i.e., laminar, transitional, and fully turbulent regions. With increase in the interval p^+ , the gap h^+ needed to maintain turbulence decreased mildly from $40 \nu/u^*$. This was explained with a view of the distribution of sizes of the coherent structures.

1. はじめに

壁乱流の内層には、バースティング、低速ストリーク、縦渦構造等と呼ばれる秩序だった運動が存在し、これが乱流エネルギーの生成に大きく寄与していることが明らかにされている。従来は、円管、二次元チャネル、平板境界層といった理想的な流れをとりあげた研究が多く、これらの系においては、内層と外層は自然に定まる関わり合いで比較的自由に結びつけられているために相互の関連について調べようとするとかえってつかみ所がない。著者らは既報(1)において、内層の構造に注目してその境界条件である外層の流れを人為的に変えることを試みた。具体的には、平板と走行する干渉板列との間の流れを測定し、平板上に発達する壁乱流の内層構造の占めうる空間に干渉板列による系統的な制約を加えたときの内層構造の挙動に着目した。壁乱流内層の空間的スケールが粘性長さスケール ν/u^* で無次元化されると仮定し、干渉板先端と平板との無次元すきま h^+ と干渉板列の無次元ピッチ p^+ がそれぞれ高さ方向と流れ方向に内層構造が受ける空間的制約の大きさを表すと考え、 $h^+ - p^+$ の平面上に流れの状態を区別した実験点をプロットした。低速ストリークの長さが $1000 \nu/u^*$ 程度と見積られているが、これと較べて p^+ が小さい範囲、即ち、内層構造が次々に空間的干渉を受ける場合、すきま h^+ が40以上であれば十分に発達した壁乱流が観察でき、 $h^+ \leq 20$ でようやく乱流構造が維持できなく

なることを実証した。さらにこのことより、内層構造が非常に強固なものであり、外層の影響はほとんど受けない自立的な構造であるとの結論を得ている。本報においては、隣合う干渉板の間隔をさらに広範囲に変えて同様の実験を行い、秩序構造の流れ方向の特性に関する検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要を図1に示す。既報(1)と同じ水槽を用いているが、本実験においては、干渉板を固定して、58枚の平板要素から成る走行平板との間に各種の流れ場を実現し、走行平板上に発達する壁乱流に注目した。測定部の詳細を図2に示す。干渉板先端と個々の平板要素のすきまのばらつきは、平均すきま h に対して $\pm 0.4\text{mm}$ 以内に抑え、連続する要素間の高さの急変を防ぐために高さが順に変化するように各平板要素を配置した。さらに、各平板要素間のすきまからの流れを防ぐために各平板要素端にはスポンジテープを貼り付けて隣の要素と密着するようにした。平均すきま h と平板の走行速度 U_c を変えて、各種の実験条件を実現し、熱膜流速計のプローブを上下にトラバースさせて流速変動を測定した。流速計出力は、アナログの温度補償回路、一次の直線化回路を経てデータレコーダに記録され、その後ミニコンによってA/D変換されて各種の処理に供せられる。プローブの較正は、回転円筒形水槽を用いて行った。平均流速に関する不確かさは、各実験条件でかなりばらつくが、おおよそ $\pm 5\%$ (20:1) 程度である。

3. 実験結果

表1に実験条件を示す。表中のSeriesにおいて頭一文字のFは既報において干渉板列を走行させた場合を表し、Pは平板が走行する場合(本報)である。それぞれの h と p の組合せに対して4~6通りの相対速度 U_c を選んで実験を行った。 $h=0(\text{mm})$ の場合は、各干渉板間で独立した流れとなり、1組の干渉板の先端にスポンジテープを貼り付け、平板要素と常に接するようにした。P003のシリーズは、装置の制約により4枚の干渉板を設けることができずに、1組の干渉板のみで実験を行ったものである。

以下、例としてP007のシリーズについての結果を説明する。表2には、このシリーズ

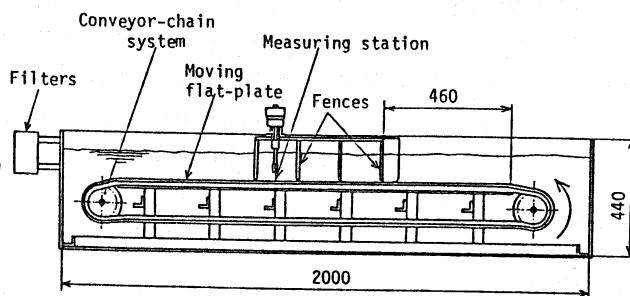


図1. 実験装置概要

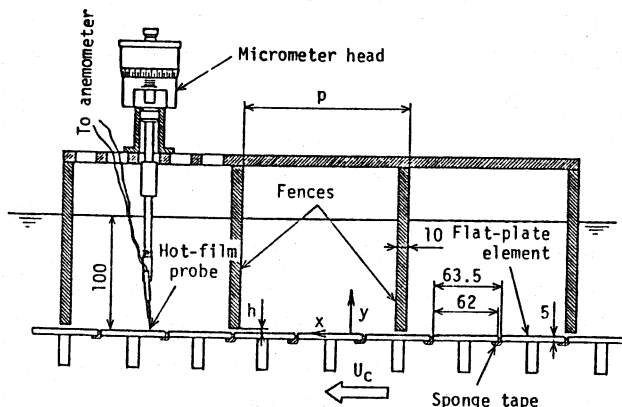


図2. 測定部詳細

の主要な実験条件を示す。コロンのあとの数字は、相対速度の小さい順につけた番号である。測定結果の比較のために、二次元チャンネル内で十分に発達した空気流の実験条件(2)を最下欄に掲げる。

表1. 実験条件

Series	h (mm)	p (mm)	U _c (mm/s)
F315	20	63.5	30.9 ~ 196
F236	15	63.5	35.2 ~ 100
F118	15	127	29.9 ~ 101
F039	5	127	16.7 ~ 158
P040	6.36	160	49.9 ~ 151
P016	2.6	160	50.9 ~ 302
P007	1.1	160	112 ~ 443
P003	1.6	480	63.2 ~ 300
P000A	0.0	160	149 ~ 302
P000B	0.0	480	101 ~ 300

図3は、時間平均速度分布を普遍速度分布の形で表現したものである。摩擦速度u*は、この形のプロットにより決定した。

図4に乱れ強さの分布を示す。壁面速度が大きくなると、順に乱れ強さが大きくなっていく様子がよく分る。図には発達した二次元チャンネルでの測定結果(2)を参考として加えてある。レイノルズ数に対する依存性、流れの形態の差異を考慮すると、厳密な比較は差控えねばならないが、P007:5においては、これに近いレベルの乱れ強さが実現されていることが分る。

図5には、乱れのパワースペクトルを示す。横軸の周波数fは、流速計プローブを平板に固定した測定(既報(1)及び二次元チャンネルの場合)と干渉板に固定した測定(本報)とを共通の周波数スケールで比較するために、局所平均流速Uを用いて、擬波数k = f/Uとして、こ

表2. 実験条件(P007シリーズ, h=1.1mm, p=160mm)

Run No.	h ⁺	p ⁺	U _c (mm/s)	u* (mm/s)	Re _h =hU _c /ν	Re _p =pU _c /ν	ν/u* (mm)	ν/u* ² (msec)
P007:1	7.73	1120	112	7.5	115	16800	0.142	19.0
P007:2	9.63	1400	150	9.3	155	22600	0.114	12.3
P007:3	12.5	1810	221	12.0	229	33300	0.0883	7.36
P007:4	16.1	2340	301	15.5	313	45500	0.0683	4.41
P007:5	22.3	3250	443	21.5	460	66900	0.0493	2.29
Channel	113	-	4240	233	2070	-	0.0661	0.284

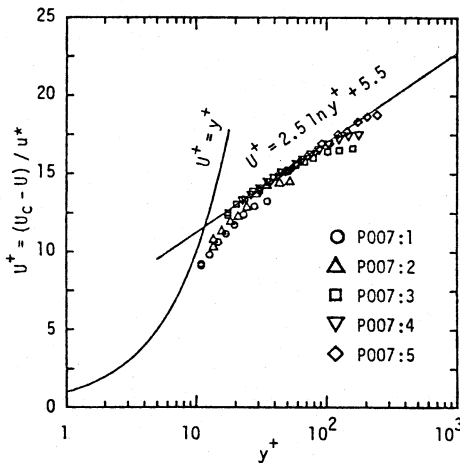


図3. 平均速度分布

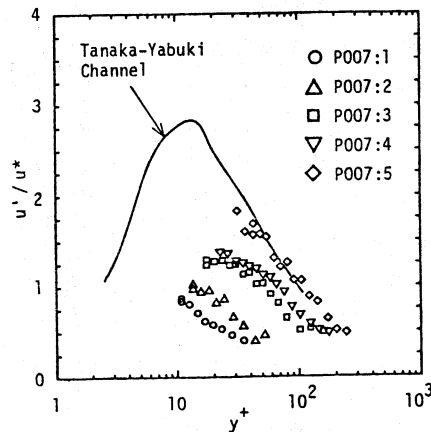


図4. 乱れ強さ分布

れを粘性長さスケールで無次元化したものである。また、縦軸は、この無次元周波数 $k^+ = (f/U) \cdot (\nu/u^*)$ で積分すると無次元乱れエネルギー $(u'/u^*)^2$ となるようにスペクトル密度 $E(f)$ を無次元化し、乱れエネルギーに対する波数成分の寄与を直観的に示すように次式より定めた。

$$\frac{u'^2}{u^{*2}} = \frac{1}{u^{*2}} \int_0^\infty E(f) df = \int_0^\infty \frac{E(f) U}{u^{*2} \nu} d\left(\frac{f \nu}{U u^*}\right) = \int_{-\infty}^\infty \frac{\ln(10) E(f) f}{u^{*2}} d\left\{\log_{10} \left(\frac{f \nu}{U u^*}\right)\right\}$$

図5より、壁面速度が大きくなると、ほぼ同じ無次元周波数範囲で乱れのエネルギーへの寄与が順に大きくなり、P007:5では二次元チャンネル内乱流の場合に近くなっていることが分る。

このような検討を他のシリーズの場合についても行い、ほぼ同様の結果が得られた。

4. 考察

既報(1)と同様に、 $h^+ - p^+$ の平面に実験点を流れの状態で区別してプロットしたマップを図6に示す。流れの状態の判別は流速変動波形を補助的に見ながら、乱れのスペクトルを二次元チャンネルのデータと比較して行った。二次元チャンネル内乱流で乱れエネルギーの大きい波数領域において、エネルギーがほとんどない実験点を層流とし

(黒塗り)、ある程度のエネルギーを持つ場合はそのレベルに応じてシンボルを塗り分け、二次元チャンネルと同じレベルのエネルギーを持つときに完全な乱流とした(白抜き)。

図6の縦軸に実験点が近づくとクエット流が実現されると考え、クエット流の実験結果より、層流域-遷移域(黒三角)、

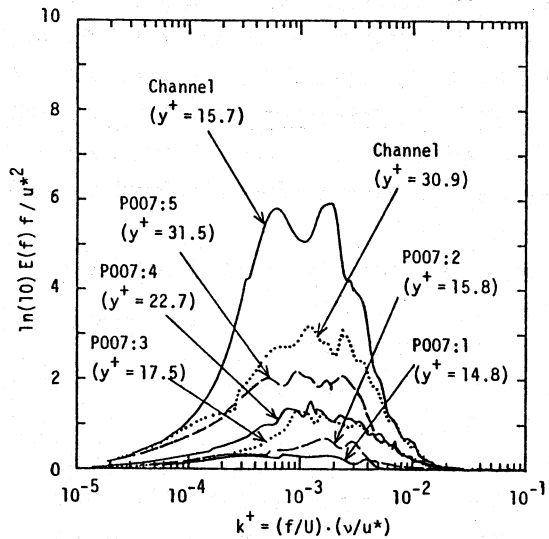


図5. 流速変動のスペクトル

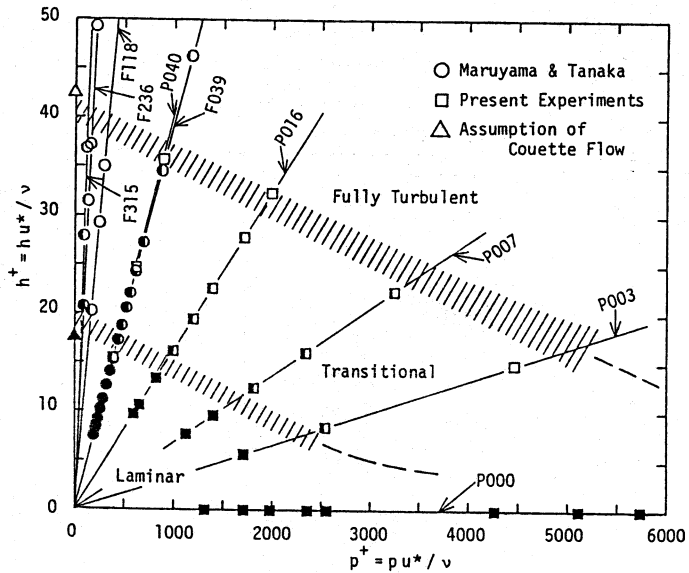


図6. $h^+ - p^+$ 平面における流動様式マップ

遷移域-乱流域(白三角)の境界を縦軸上にプロットした(1)。

壁乱流内層の秩序構造の流れ方向長さは、 $1000 \nu / u^*$ 程度といわれているが、図 6 中で p^+ がこれと較べて小さな所では、マップは h^+ によって 3 領域、即ち、層流域、遷移域、完全な乱流域に分けられ、これらの境界は、内層の秩序構造と関連し次のように解釈できる。壁乱流の内層に見られる低速ストリークのスパン方向の間隔 λ についてその出現頻度分布が測定され、平均 $100 \nu / u^*$ に対して $25 \sim 200 \nu / u^*$ 程度の間で広範囲に分布していることが知られている(3)。このことより、様々な大きさの秩序構造が存在することが予想される。 p^+ が小さい範囲、即ち、内層構造が次々に空間的干渉を受ける場合、 $h^+ \geq 40$ であればほとんどの秩序構造はこの影響を受けず、逆に、 $h^+ \leq 20$ の場合は大部分の秩序構造が崩れてしまうと考えられる。

p^+ がより大きくなると、内層構造が一つの干渉板を通過してから次の干渉板を通過するまでに回復するだけの余裕があるため、層流域、遷移域、完全な乱流域の境界は h^+ が小さい方へとずれていく。この場合の遷移域と完全な乱流域との境界は、一つの干渉板を通り抜けた秩序構造が元となって測定位置(干渉板から $p^+/2$)に達するまでに完全な壁乱流の構造へと回復できるか否かの境界である。一方、層流域と遷移域の境界は、一つの干渉板を通り抜けた秩序構造が元となってある程度回復し、次の干渉板を通り抜けるという過程を繰り返すときに、乱流状態が減衰して層流になるか否かの境界である。

図 6 の横軸は、 $h^+ = 0$ の極限であり、今回の実験点がすべて層流と判定されたことより、先の層流域と遷移域の境界の延長上より遙かに大きな p^+ において境界が現れることになる。干渉板と平板が接する点では、乱流構造は存在し得ないから、この点から下流に向って層流境界層が発達し、いずれ乱流へと遷移する過程を経ると考えられ、この過程に必要な長さ x^+_{cr} より干渉板のピッチ p^+ が小さければ流れは乱流とはなり得ない。これと似た過程を経て発達する平板境界層のデータ(4)を検討すると、 x^+_{cr} が 15000 ~ 26000 にもなると予想される。

具体的に個々の秩序構造がこのような空間的干渉に対してどのような挙動を示しているかに関しては、現在、流れの可視化によって検討中である。

引用文献

- (1)丸山茂夫・田中宏明：壁乱流の内層構造に及ぼす空間的干渉の影響、日本機械学会論文集 B52-476 (1986) 1642-1647.
- (2)H.Tanaka & H.Yabuki: Laminarization and reversion to turbulence of low Reynolds number flow through a converging to constant area duct, Trans. ASME: J. Fluids Engng. 108-3 (1986) in press.
- (3)入谷陽一郎・笠木伸英・平田賢：二次元チャネル内乱流におけるストリーク構造、日本機械学会論文集 B51-470 (1985) 3092-3101.
- (4)H.Schlichting: Boundary-Layer Theory (7th ed.) (McGraw-Hill, 1979).