

後流の影響を受ける非定常平板境界層に関する研究*

(第3報, 熱線流速計による非定常境界層計測)

船崎 健一^{*1}, 目黒 俊勝^{*2}
山脇 栄道^{*3}, 山下 嘉宏^{*4}

Studies of the Unsteady Boundary Layer on a Flat Plate Subjected to Incident Wakes

(3rd Report, Hot-Wire Probe Measurement of the Unsteady Boundary Layer)

Ken-ichi FUNAZAKI, Toshikatu MEGURO,
Shigemichi YAMAWAKI and Yoshihiro YAMASHITA

Detailed hot-wire probe measurements of unsteady boundary layer on a flat plate, which is affected by wakes generated from the rotating circular cylinders, are made. These measurements are organized in order, firstly, to investigate wake-boundary layer interaction behavior, considering the forced boundary layer transition model proposed in the previous paper, and secondly to determine the transition starting point and wake duration time by defining the threshold value for the wake-induced turbulent region in comparison with the data of time-averaged heat transfer distribution. It is consequently found that the forced transition tends to occur where Reynolds number based on the momentum thickness is around 160.

Key Words: Unsteady Flow, Boundary Layer, Wake Hot-Wire Probe Measurement, Transition, Turbulence Intensity, Intermittency Factor

1. 緒言

著者らは第1報および第2報において⁽¹⁾⁽²⁾, 円柱後流の影響を受ける平板境界層の時間平均熱伝達特性の計測を行い, 後流の熱伝達促進効果を明らかにした。そして, 実験結果から, 間欠度に基づく境界層強制遷移モデルを提示し, これにより実験結果をほぼ予測できることを確認した。しかし, 前報の研究だけでは複雑な流れ場の機構を把握することは困難である。また, 熱伝達促進に寄与する乱流領域の定義も不明であり, さらに, 後流強制遷移開始点の位置また後流持続時間などの決定に関する検討も不十分であった。これらの問題点を解決するためには, 熱線流速計による境界層の非定常特性計測を行う必要がある。

本研究では, 回転円盤に取り付けられた円柱からの後流の影響を受ける非定常平板境界層をI型熱線プローブで計測し, それからアンサンブル平均乱れ度を求めることにより時空間上での乱流領域の成長, また各瞬間での後流と境界層との干渉を詳細に調べた。さらに, 前報での伝熱実験の結果との比較から, 約4%以上の乱れ度を有する部分を後流による乱流領域として定義できることを示し, これを用いて強制遷移開

始点を算出し, モデルとの比較を行いながら, 遷移開始点予測法に関する検討を行った。

主な記号

d : 円柱径
 L : 平板長さ
 l_D : 円柱と平板との距離
 n : 回転数

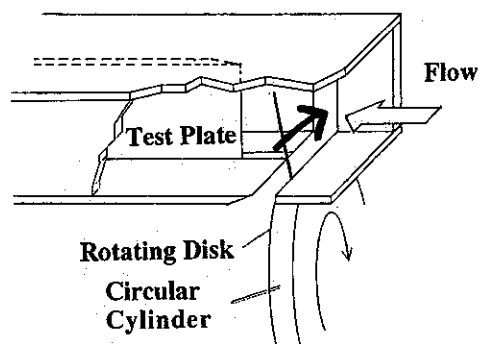


図1 供試部および回転円柱

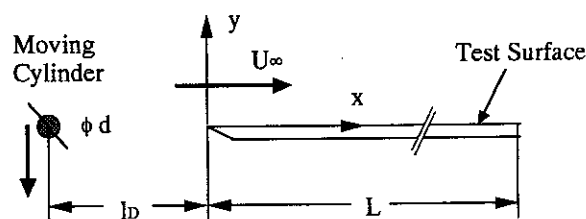


図2 座標系

* 原稿受付 平成4年6月15日。

^{*1} 正員, 岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田 4-3-5)。

^{*2} 准員, (株) 本山製作所 (〒981 仙台市青葉区堤町 1-12-1)。

^{*3} 正員, 石川島播磨重工業(株) (〒190-12 東京都西多摩郡瑞穂町)。

^{*4} 学生員, 岩手大学大学院。

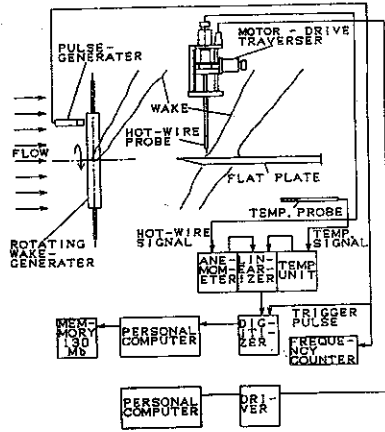


図3 計測システム

- n_c : 円柱本数
- S : ストローハル数 ($= n_c L / (60 U_\infty)$)
- T : 後流通過周期
- $Tu(t_j)$: アンサンブル平均乱れ度
- x : 平板前縁より流れ方向への距離
- x_{TW} : 強制遷移開始点
- y : 平板から垂直方向への距離
- β_E, β_F : 後流による乱流領域後縁, 前縁移動速度係数
- δ_{95} : 主流速度の95%速度の位置
- τ_w : 後流持続時間

2. 実験方法

2.1 実験装置および計測方法 実験装置, 計測方法は前報と同様である。図1に供試部, 回転円盤および円柱を, 図2には供試部の座標系を, さらに図3には非定常境界層計測システムを示す。熱線プローブ(I型)の設置法は境界層計測には必ずしも最適ではないが, Addisonらの研究⁽⁶⁾で同様の設定での境界層計測が行われており, 問題のないことが確認されている。プローブの移動は, 平板垂直方向へはコンピュータ制御されたトラバース装置および流れ方向へは手動トラバース装置により行う。平板垂直方向の距離を決定する場合, アクリル平板の面精度や平板と流れ方向トラバース装置との平行度が十分には高くないので, 各流れ方向計測位置ごとに熱線プローブ先端が平板に接触する点を原点としている。

2.2 データ処理法 境界層は後流による周期的な非定常性および主流乱れ等による非周期的な非定常性を有するが, 今回の実験では主流乱れが約0.5%と低いことを考え合わせ, コヒーレントな現象への影響は後流に起因する非定常性が支配的であると判断する(このことは前報での伝熱試験においても確認されている)。そこで, この周期的な現象を明確に捉えるため, 非定常境界層計測データのアンサンブル平均(位相固定平均)手法による信号強化を行う。即ち, 円盤の回転に同期した1回のトリガー信号により熱線流速計からの信号を50kHzで2048word分高速サンプリングし, 各計測点ごと合計27=128個(=m個)の速度の時系列データ $v_i(t_j)$ ($j=1, \dots, 2048$)を保存する。そして, off-lineでアンサンブル

表1 実験条件と乱流領域後縁速度係数

No.	d mm	n rpm	n_c	S	t_{DM}	x/L	β_E
1	2	1500	3	2.5	0.12	0.3~0.6	0.54
2	2	1260	3	2.1	0.12	0.3~0.6	0.54
3	2	1020	3	1.7	0.12	0.3~0.6	0.55
4	2	900	3	1.5	0.12	0.3~0.6	0.54
5	5	1500	3	2.5	0.12	0.3~0.6	0.50
6	5	1260	3	2.1	0.12	0.3~0.6	0.59
7	5	1020	3	1.7	0.12	0.3~0.6	0.52
8	10	1020	3	1.7	0.12	0.3~0.6	0.54
9	2	1020	3	1.7	0.24	0.3~0.6	0.53
10	5	1020	3	1.7	0.24	0.3~0.6	0.57
11	2	1020	3	1.7	0.24	0.0~0.15	0.53
12	5	1020	3	1.7	0.24	0.0~0.15	0.51
13	10	1020	3	1.7	0.24	0.0~0.15	0.59
14	2	1020	3	1.7	0.48	0.0~0.15	0.53
15	5	1020	3	1.7	0.48	0.0~0.10	—
Average							0.54
Deviation							0.03

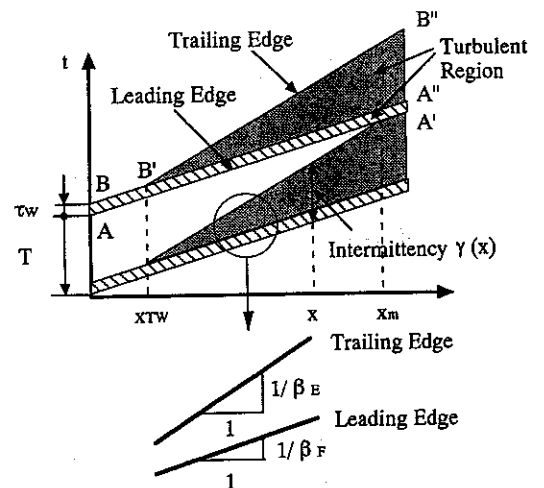


図4 時間空間上での後流による強制遷移モデル図

平均 $\tilde{v}(t_j)$ およびアンサンブル分散 $v^2(t_j)$ を次式のよう

$$\tilde{v}(t_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i(t_j) \tag{1}$$

$$v^2(t_j) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \{v_i(t_j) - \tilde{v}(t_j)\}^2 \tag{2}$$

非定常流での乱れ度 $Tu(t_j)$ は式(2)から

$$Tu(t_j) = \frac{(v^2(t_j))^{1/2}}{U_\infty}, \quad U_\infty; \text{一様流速} \tag{3}$$

と定義される。式(1)~(3)により, 後流自身および後流に起因して発生する現象を明確に捉えることができる。

計測点数は, 平板から垂直方向距離 $y=0.2 \times 10^{-3} \text{m} \sim 4.8 \times 10^{-3} \text{m}$ の間に10点, また, 流れ方向には, 平板前縁近傍および後流が引き起こす乱流領域が合体する近辺に計測の重点を置いて, $x=0 \sim 0.6 \text{m}$ の間に22点の合計220点である。

2.3 実験条件 非定常流に関する実験は, 先に行われた熱伝達特性計測と同様に, 一様流速 $U_\infty=30 \text{m/s}$ (平板長さ $L(=1 \text{m})$ に関するレイノルズ数は約 2×10^6)に限定して行われた。各種実験条件を表1に示す。ここでは, 同一ストロー

ハル数に対し円柱径 d や円柱と平板との距離 l_D を変えることにより、後流特性の差が強制遷移に与える効果を見る。なお、 l_D が $0.12m$ の場合、トラバース装置と円柱とが干渉するため、平板前縁近傍での計測は行うことができなかった。

2.4 不確かさ解析 熱線プローブによる計測値（アンサンブル平均速度・乱れ度）について、不確かさ解析を標準的手法⁽⁸⁾に基づき行った。その結果、各計測値の不確かさの範囲は約±6%（約95%包括度）である⁽⁴⁾。

3. 強制遷移モデル

以下で行う考察の理解のため、前報の伝熱試験の結果から得た後流による強制遷移モデルを図4の時空間図で概説する。

後流がある点を通過する間、後流はその強い乱流拡散効果により後流内の乱れエネルギーを境界層内にすばやく拡散し境界層を乱流状態にするが⁽⁹⁾（図中斜線部A-A'-A''-B）、前縁近傍では粘性効果が支配的なため、供給されたエネルギーが層流境界層内で散逸し乱流スポットは発生しない。しかし、境界層が発達するにつれ、後流からの乱れエネルギーが境界層内で過剰となり、乱流スポット発生へと推移する（強制遷移の開始）。ここで、後流内の高レベルな乱れ度を考慮すると、境界層の不安定状態から強制遷移への変化は素早く起こるものと考えられるので、強制遷移開始点は境界層不安定点に近い、その前縁と後縁との移動速度が異なるため、下流側に次第に成長する。これを図4の時空間図上で表すと、強制遷移

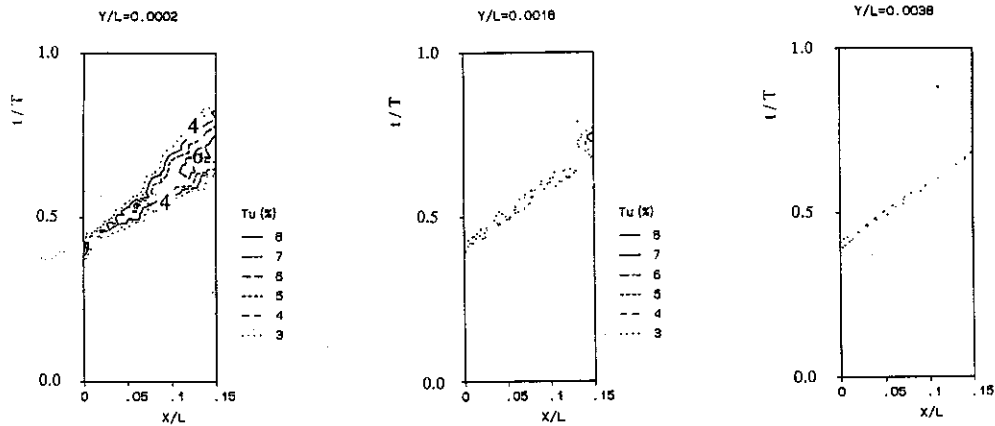


図5 平板前縁近傍での時空間上のアンサンブル平均乱れ度分布 ($d = 2 \text{ mm}$, $l_D = 0.24 \text{ m}$, $S = 1.7$)

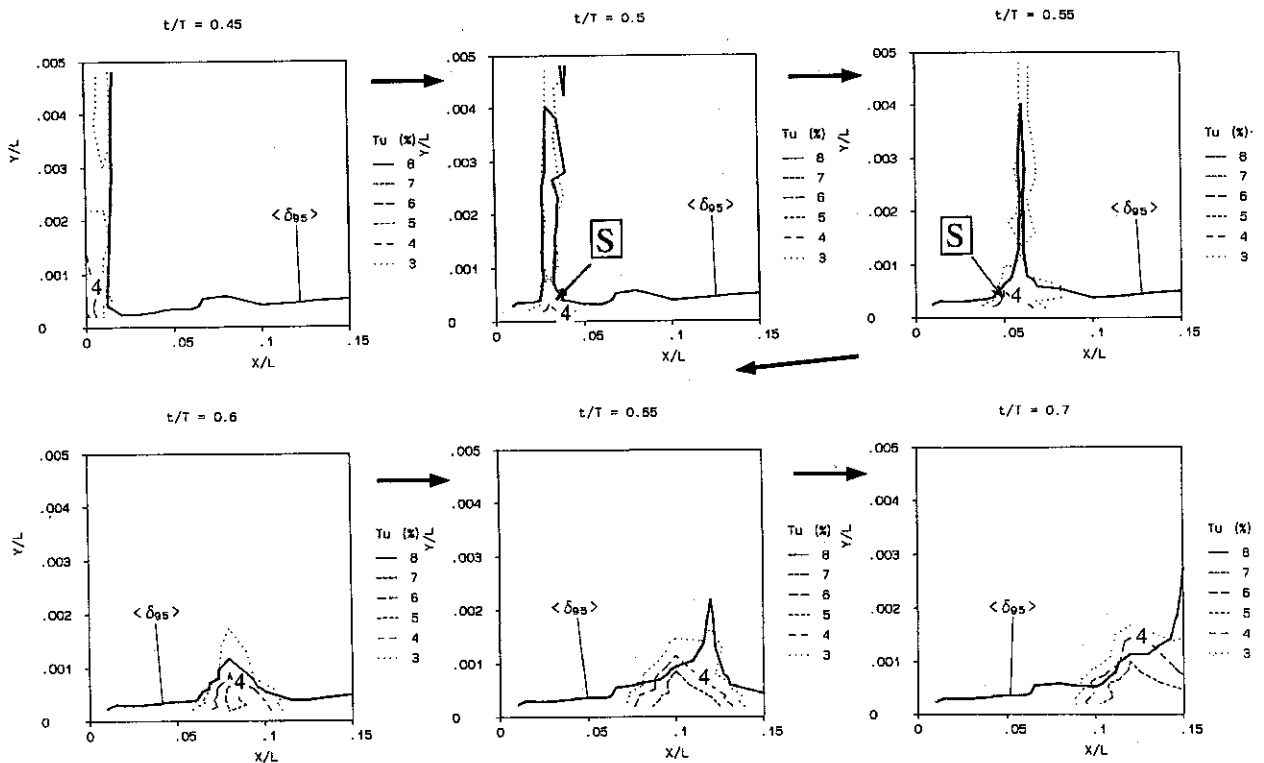


図6 平板前縁近傍での x - y 内アンサンブル平均乱れ度分布の瞬間図 ($d = 2 \text{ mm}$, $l_D = 0.24 \text{ m}$, $S = 1.7$)

似される。発生した乱流スポットは、よく知られているよう
開始点 x_{rw} から乱流領域前縁 (A-A') に対して後縁 (B-B'-B
") が時間的に遅れ始め、間欠度 $\gamma(x)$ が下流側に増加し、最
最終的に後縁が後発の乱流領域前縁に追いつかれた $x=x_m$ で遷
移が終了する。なお、このモデルでは、乱流領域後縁の移動
速度の変化が時空間上で顕在化する点 (B') を強制遷移開始
点としており、必ずしも乱流スポット発生点とは一致しない。

なお、本実験範囲での最大後流周波数は150Hzであり、一方、
いわゆるTS波の周波数は1KHz以上のオーダーになる。従っ
て、後流に起因する二次元攪乱波の発生は考えなくともよい。

4. 非定常境界層計測

4.1 非定常境界層計測の方針 強制遷移開始点および発
生した乱流領域の成長過程の観測に重点を置いて、非定常境
界層計測およびデータ整理を以下のように行った。

- (1) 強制遷移開始点近傍 $x/L = 0 \sim 0.15$ の境界層を、円柱
3種類についてをそれぞれ計測し、後流による乱流スポ
ット発生状況を観測する ($l_D = 0.24m$)。
- (2) 円柱径 $d = 2mm, 5mm$ について、平板前縁と円柱との
距離をさらに広げ、後流中の乱れ度と強制遷移開始点と
の関連を調べる ($l_D = 0.48m$)。

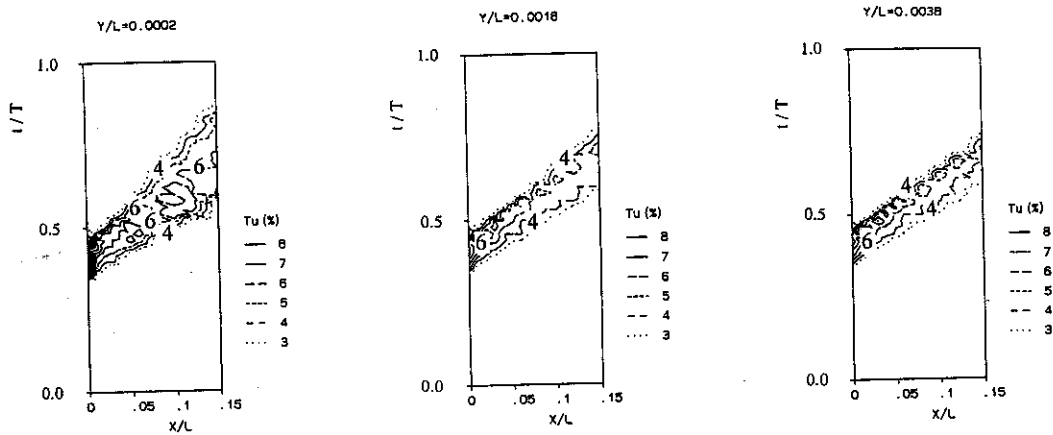


図7 円柱径をかえた場合の時空間上のアンサンブル平均乱れ度分布
($d = 5mm, l_D = 0.24m, S = 1.7$)

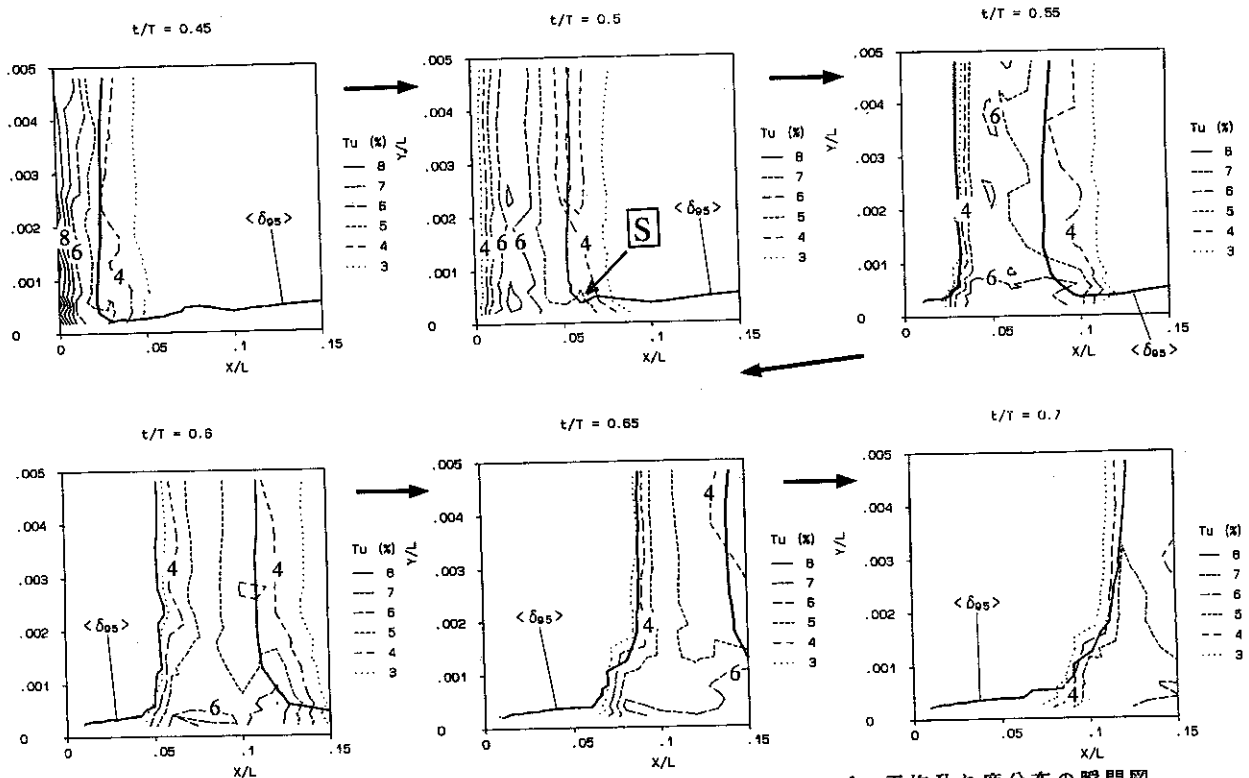


図8 円柱径を変えた場合の平板前縁近傍でのx-y内アンサンブル平均乱れ度分布の瞬間図
($d = 5mm, l_D = 0.24m, S = 1.7$)

- (3) $x/L = 0.3 \sim 0.6$ の区間の境界層を、円柱3種類について計測し、後流による乱流領域の時空間上での成長過程を観察する。そして、乱流領域が合体して強制遷移が終了する位置 x_m を各乱れ度について時空間図から読みとり、前報での伝熱データ⁽²⁾での強制遷移終了点と比較し、しきい値となる乱れ度を決定する ($l_D = 0.12m/0.24m$)。
- (4) (3)を用いて境界層強制遷移開始点 x_{TW} を推定する。

4.2 強制遷移開始点近傍での計測

4.2.1 円柱-平板距離 $l_D = 0.24$ の場合 図5に円柱径2mmで得られたアンサンブル平均乱れ度分布を時空間上で表した結果を、高さ方向3カ所について示す (Case No.11)。最も平板に接近した $y/L = 0.2 \times 10^{-3}$ 面内での分布には、平板前縁直後で後流乱れ度が減衰した後、 $x/L = 0.05$ の位置まで乱流領域の前・後縁がほぼ平行な形を保つ様子が読み取れる。さらにはその領域内 $x/L \approx 0.03$ の位置を原点とする新たな高い乱れ度の発生が確認される。ここで、乱流領域が $x/L = 0.05$ を過ぎたところから次第に時間方向に拡大、即ち領域の後縁がその前縁に対して遅れ始めているが、この現象は図4に示した強制遷移モデル図に近い形で現れている。この領域拡大現象は計測平面が平板から離れるにつれ弱まり、後流幅の流れ方向への変化程度になってくる。

以上の現象は、図6の $t/T = 0.45 \sim 0.70$ の時間内における $x-y$ 平面内乱れ度分布でより明確に理解される。図中の実線 ($\langle \delta_{95} \rangle$) は、アンサンブル平均速度が主流の95%とな

る位置を示している。この線は、近似的な境界層厚みを表す一方、後流が存在するときは、後流のおおよその位置を示す。なお、縦軸と横軸のスケールが異なる点に注意されたい。

まず、 $t/T = 0.45$ で乱れ度約4%の後流中心が平板前縁に達する。その際、後流中心の強い乱れは急激に減衰するが、 $t/T = 0.5$ で $x/L = 0.03$ 付近で新たに乱れ度4%の強い乱れを有する部分図が後流中心の位置に現れ、時間の進行とともに流れ方向および高さ方向に成長しながら下流側に移動している。この乱れの領域は、境界層厚み程度の高さであることから、後流によって引き起こされた乱流スポットと考えるとよいだろう。この乱流スポットは、 $t/T = 0.6$ あたりまでは後流幅の内側に存在しているため、乱流領域全体としては、前縁・後縁はほぼ平行を保ちながら主流速度で移動している。その後、後流との移動速度との違いにより、後流によって発生した乱流スポットが後流に対し $x/L = 0.06$ 以降から遅れ始め ($t/T = 0.65$)、結果として平板表面近傍での乱流領域が拡大していく。後流中心 ($\langle \delta_{95} \rangle$ のピーク; 低速部を表す)に着目すると、後流速度欠損の減衰に伴ってピーク値が $t/T = 0.45 \sim 0.60$ にかけて減少するが、その後次第にピーク値が増加し、低速部の拡大現象が確認される。そして、この低速部の拡大は乱流スポットの成長と密接な関係があることが図6から理解される。

図7、8には、円柱径5mmの場合の時空間上での乱れ度分布および各瞬間での $x-y$ 面内の乱れ度分布を示す (Case N

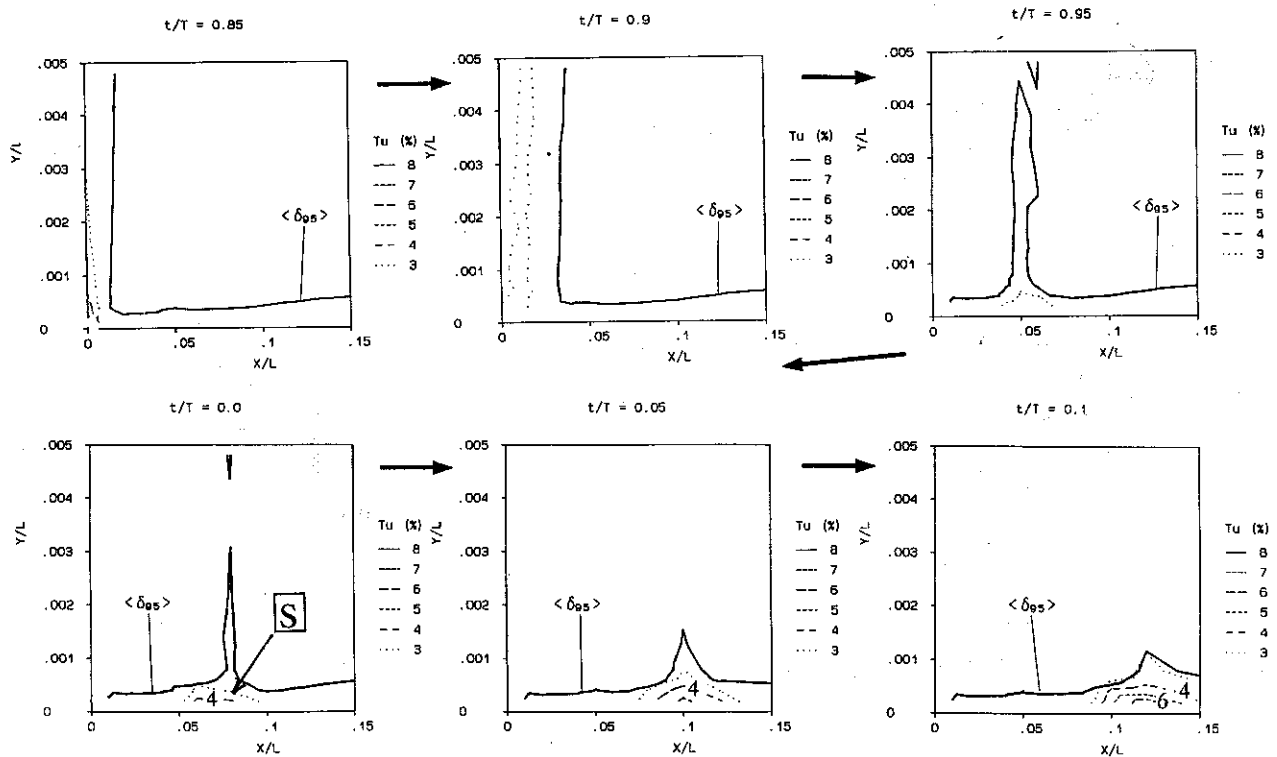


図9 円柱と平板との距離を拡大した場合の平板前縁近傍での $x-y$ 内アンサンブル平均乱れ度分布の瞬間図 ($d = 2 \text{ mm}$, $l_D = 0.48 \text{ m}$, $S = 1.7$)

0.12) . なお, 後流中心の時間的な位置関係は 2mm の場合とほぼ同じである. この場合, 円柱径の増加とともに時空間上での後流幅が拡大し, また乱流領域全体の乱れ度が若干高くなっている. 円柱径 2mm の場合は, ある点を原点として乱流スポットが発生成長したが, 5mm の場合では特定の乱流スポットを識別することは困難で, ある幅をもって乱流領域が拡大するように見える. 一方乱れ度の瞬間図には, 2mm の場合に確認されたような後流中心での乱流スポットの発生およびその成長は見られないが, 乱流領域前縁近くに乱流スポットと思われる乱れ度の高い部分 **B** が発生, 成長する様子が読み

取れる ($t/T = 0.5 \sim 0.6$). また, これより遅れて別の乱流スポットが発生し, 両者が合体するような現象も見られる. ($t/T = 0.55$) そして, $t/T = 0.6$ 以降乱流領域が後流に対し遅れ始め領域の拡大が顕在化する.

後流中心に先行して乱流スポットが発生する現象は, Addison, Hodson⁽⁶⁾ の研究でも指摘されており, 後流がその周辺部においても十分に高い乱れ度 (乱れエネルギー) を保持していることに起因すると考えられる.

4.2.2 円柱-平板距離 $l_D = 0.48$ m の場合 図9には円柱径 2mm の場合の乱れ度分布瞬間図を示す. まず, $t/T = 0.85$ で平板前縁に後流中心が到達し, $t/T = 0.95$ において $x/L = 0.05$ 付近に乱れ度 3% 程度の乱れの領域が現れ, 以後徐々にその乱れの領域が成長している. 時空間上での乱流スポットおよび乱流領域の成長過程に関して, $l_D = 0.24$ m の場合と比較すると, $l_D = 0.48$ m の場合は平板前縁直後の乱れの領域の広がり若干大きい, 全般的な特徴には大差はなく, このことは, 平板を円柱から離れた場合でも時間平均熱伝達分布には大きな変化が生じない, という前報の伝熱計測の結果と符合している. ただし, 後流の瞬間図を詳細に検討すると, 例えば図6の $t/T = 0.45 \sim 0.65$ 間の変化と図10の $t/T = 0.85 \sim 1.05$ ($= 0.05$) 間の変化から明らか

のように, 乱流スポットの高さ方向への成長速度が $l_D = 0.24$ m の場合よりも遅い, という現象的な差異は生じている.

図10は, 上での観測結果をもとに作成した, 後流および乱流スポットとの関係についての模式図である. この図では, 平板上での間欠度の流れ方向への変化が, 強い乱れを伴う後流の移動およびそれにより誘発された乱流スポットの成長に起因していることが示されている. そして, 乱れ度の比較的弱い後流 ((a) Weak Wake) では乱流スポットはほぼ後流中心で発生するのに対して, 乱れ度の高い後流 ((b) Strong Wake) では後流の先行する周辺部からも乱流スポットが発生する様相も示されている.

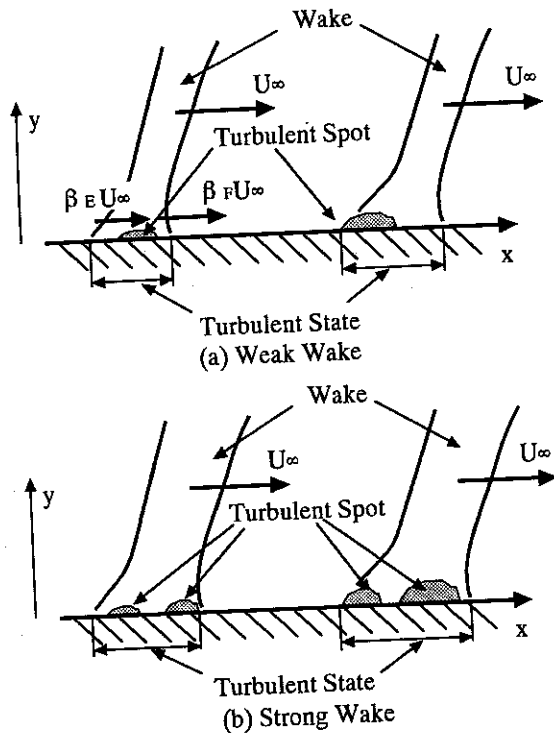


図10 後流による乱流スポット発生 の 模式図

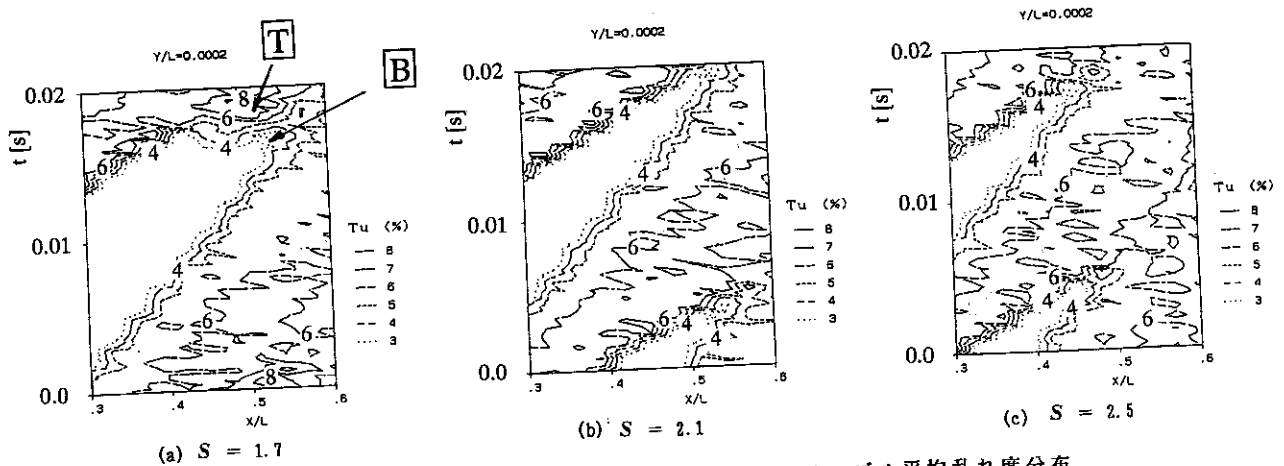


図11 強制遷移終了点近傍での時空間上のアンサンブル平均乱れ度分布 ($d = 2$ mm, $l_D = 0.24$ m)

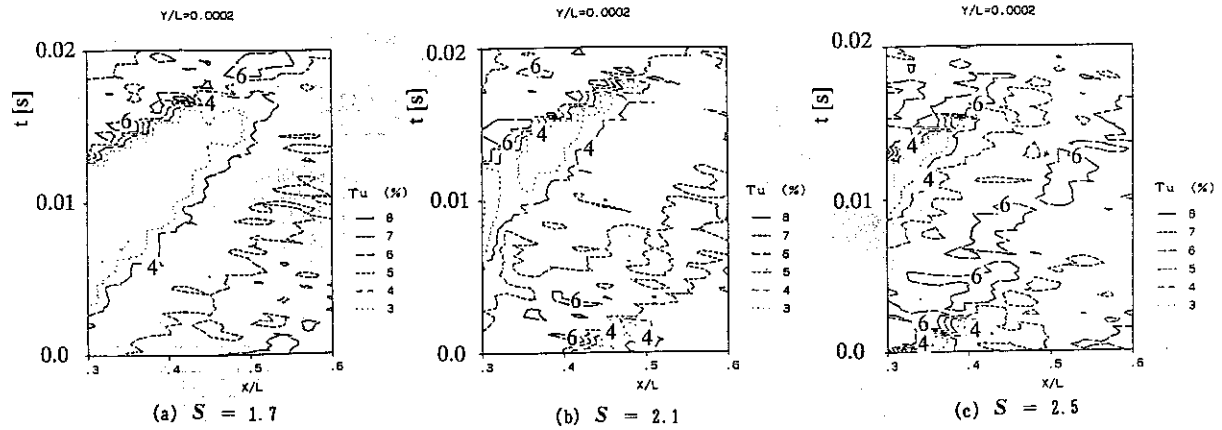


図12 強制遷移終了点近傍での時空間上のアンサンブル平均乱れ度分布 ($d = 5 \text{ mm}$, $l_D = 0.24 \text{ m}$)

4.3 乱流領域の成長過程の計測 乱流スポットを含む乱流領域の成長過程を、 $x/L = 0.3 \sim 0.6$ の区間で計測する。

4.3.1 乱流領域の成長 図11, 12には、円柱径2mmおよび5mmの場合の時空間上乱れ度分布 ($\gamma/L = 0.2 \times 10^{-3}$)を、円柱回転数を変えて計測した結果を示す (Case No. 1, 2, 3およびNo. 5, 6, 15)。これらの結果から、後流により引き起こされた乱流領域は、図4の遷移モデルと同様に、時空間上で周期的にほぼ三角形に成長していることがわかる。ここで、図11について、ストローハル数が低い(a) ($S = 1.7$)の場合、後流による乱流領域の間に、明らかに別の乱流領域 \square が発生し、この存在により結果としてストローハル数の高い(b) ($S = 2.1$)の場合よりも完全乱流への移行が早くなっている。このような逆転現象は前報での伝熱計測でも確認されており、この二次的な乱流領域 \square は、周期的な後流間に発生した定常流遷移に関連する現象と考えられる。また、図11(a)中で、後流による乱流領域と領域 \square の間に比較的乱れ度の低い領域 \square ($x/L = 0.5 \sim 0.55$)が確認できるが、その発生形態およびアンサンブル平均のデータで確認されたことから判断して、これはPfeilらが指摘した、後流に付随して発生する、遷移現象を抑制する領域、即ち“Be-calmed Region”⁽¹⁷⁾と考えられる。

4.3.2 乱流領域の定義に関する考察 図13には、前報で示した熱伝達率分布の例を示す。この図で、後流の影響を受ける場合の熱伝達率が乱流境界層の状態に達する位置を強制遷移終了点とする。例えば、図13(a) ($S = 2.1$)の円柱径5mmの場合には $x/L \approx 0.52$ で、また図13(b) ($S = 2.5$)円柱径5mmの場合には $x/L \approx 0.45$ で熱伝達率が完全乱流状態の値になり強制遷移が完了している。これらの値と図11, 12から読みとった乱流領域合体点 x_m とを比較すると、4%の乱れ度の等高線が熱伝達率計測とほぼ同じ位置に合体点を与えることがわかる。

図11, 12に示すような時空間上での乱流領域の前縁・後縁移動速度係数 β_F , β_B (前縁, 後縁移動速度と主流速度との

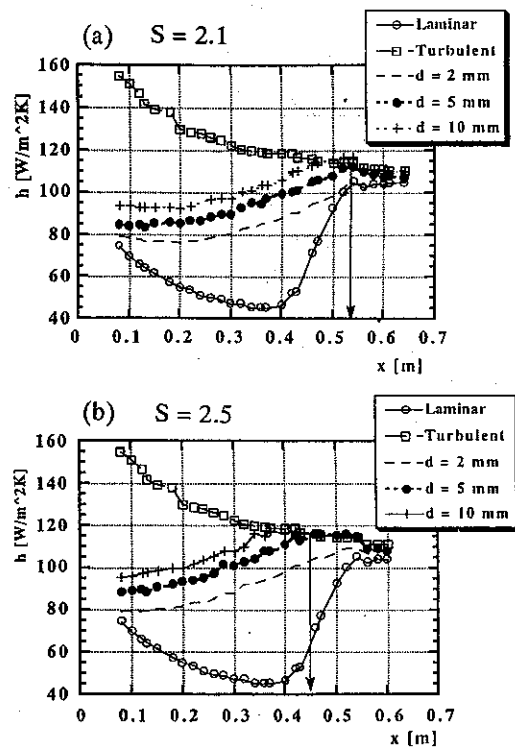


図13 時間平均熱伝達率分布からの遷移終了点の決定

比)を、上の結果を基に乱れ度4%以上の領域に着目し図式的に求めた。その結果、 β_F はほぼ1であり、遷移モデルでの値と等しいことが確かめられた。また、 β_B については、表1に示してあるように、各計測条件ごとに若干のばらつきが生じているが、平均値としては $\beta_B = 0.54$ で、モデルでの推定値0.55にはほぼ一致する結果となっている。

以上の考察から、4%以上の乱れ度の領域を乱流領域と定義することとする。この値は、前報での熱伝達率と平板に最接近した位置でのデータとの比較から得られた値であり、若干の誤差や任意性を含むものの、乱流領域に関する指標としては十分意味のある値と考えられる。

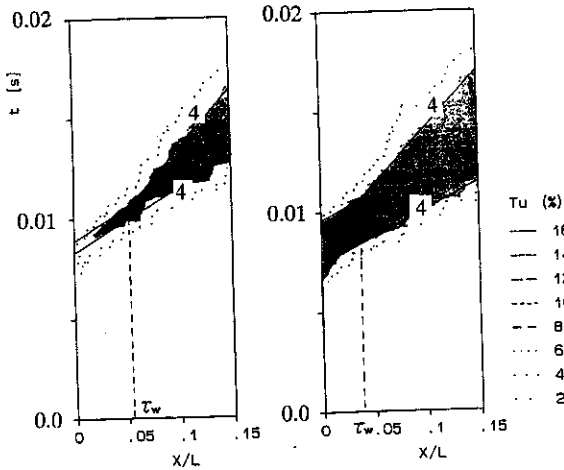


図14 強制遷移開始点 x_{TW} の決定

表2 強制遷移開始点

d mm	2	5	10	Ave.	Model
x_{TW} m	0.054	0.038	0.032	0.041	0.045

4.4 強制遷移開始点 図14には、2mmおよび10mmの各円柱径の場合の時空間上乱れ度分布を示す (Case No. 11, 13)。

ここで、図中のハッチング部は乱れ度4%以上の領域であり、この乱流領域後縁が主流速度に対して遅れ始め、時空間上で傾きが変化する位置を遷移開始点 x_{TW} として定める。

表2には、上記のように求めた x_{TW} を示す。前報で示したモデルでは、層流境界層の不安定点を遷移開始点と考え、 $x/L = 0.045$ の位置を遷移点としている。一方、非定常境界層計測での結果では平均の位置が $0.041 (\pm 0.005)$ となり、前報でのモデル値とほぼ一致している。ただ、モデルでは遷移点を後流特性によらず一定と仮定しているが、表2の結果では、円柱径の増加とともに強制遷移点が上流側に移動している。この違いには、4%というしきい値の選定法、図からの読み取りに伴う誤差なども関与しているが、モデルでの遷移開始点と乱流スポット発生位置が一致しないことが主な原因である。即ち、今回の計測では、乱流スポットは $x/L = 0.03 \sim 0.04$ の区間で発生しており、後流乱れ度が高い場合には後流後端近傍においても乱流スポットが発生し、そのまま乱流領域拡大につながっている。一方、後流乱れ度が弱い場合には乱流スポットは後流中心で発生するため、乱流領域拡大が顕在化するのに若干の距離を必要とするためである。

今回検出された乱流スポット発生点は、運動量厚さに関するレイノルズ数 Re_δ では $160 \sim 220$ 程度の位置であり、平均では Abu-Ghannamらの式⁽⁹⁾ による推定値 ($\approx 181, Tu \geq 4\%$) に比較的近い結果となっている。ただし、後流の乱れ度との関係はまだ十分には解明されておらず、モデルの予測精度の向上のためにも、今後関連する実験結果の蓄積を行いながらモデルの改良を行う必要がある。

4.5 後流持続時間 4.2節および4.3節の結果を基に、後

表3 (a) 後流持続時間 τ_w ($n = 1020$ rpm)

d mm	2	5	10	$L_D = 0.24$ m
τ_w msec	0.479	2.125	3.962	$L_D = 0.12$ m
Model	0.15	1.77	3.40	$L_D = 0.12$ m

(b) 後流持続時間差

	$\tau_w / 5 - \tau_w / 2$	$\tau_w / 10 - \tau_w / 2$
Exp.	1.646 msec	3.483 msec
Model	1.62 msec	3.25 msec

表4 乱流領域持続時間 ($n = 1020$ rpm)

x/L	$\tau_{w2} / 2$		$\tau_{w2} / 5$	
	$L_D = 0.12$	$L_D = 0.24$	$L_D = 0.12$	$L_D = 0.24$
0.3	7.427	7.388	9.205	9.113
0.4	10.228	10.151	12.049	11.709

流持続時間 τ_w を算出する。まず、図11にある乱れ度4%以上の乱流領域 ($L_D = 0.24$ m) で、平板前縁直後の乱流領域前縁、後縁の時間差 τ_w を図から読みとる。この結果を表3 (a) に前報の伝熱計測 ($L_D = 0.12$ m) で推定した後流持続時間とともに示す。前述したように、試験装置の関係で $L_D = 0.12$ mでの計測ができず、前報との直接的な比較はできないが、実験値とモデル値との差は、 $L_D = 0.24$ mの場合に現れる若干の後流幅拡大効果を除けば、乱流領域全体が占める時間と比べて大きくはなく、前報で推定した後流持続時間は概ね妥当であると判断される。また、5mm、10mmの円柱の場合の τ_w と2mmの円柱の場合の τ_w との差についてのモデル値と実験値との違いは小さい (表3 (b))。

$x/L = 0.3 \sim 0.6$ の区間での乱流領域について、 $x/L = 0.3$ および 0.4 の乱流領域前縁、後縁の時間差 τ_{w2} を、図11, 12から読みとり、各条件についての平均した結果を表4に示す。ここで、円柱と平板との距離 L_D を拡大した場合の結果を見ると、 τ_{w2} はわずかに減少する程度であり、乱流持続時間 (間欠度) としてはほとんど差がないと考えてよい。このことは、4.2.2節でも述べたように、伝熱試験で L_D を拡大した場合にも熱伝達率分布には大きな変化がなかったという結果を裏付けている。

5. 結 言

後流の影響を受ける非定常平板境界層を熱線流速計で計測し、その強制遷移挙動を詳細に調べ、強制遷移モデルとの比較により現象を詳細に検討した。本研究で得られた知見は以下のようになる。

- (1) 強制遷移開始点近くでは、比較的乱れ度の低い後流の場合、後流による乱流スポットはほぼ後流中心で発生する一方、乱れ度の高い (5mm, 10mmの円柱径) の場合、乱流スポットは初めに後流先端部から発生する。
- (2) 発生した乱流スポットは下流側に成長を続け、時空間上での乱流領域の合体により完全乱流への遷移が完了する。
- (3) 比較的後流周波数の低い場合に、後流による乱流領域の間に別の強い乱流領域が発生し、高周波数の場合よりも完

全乱流状態への移行が早まる場合がある。

- (4) 伝熱計測での強制遷移終了点に基づいて乱流領域を定義するため、乱れ度に関するしきい値を検討した。その結果、4%以上の乱れ度を有する領域を乱流領域とした。さらに、これを用いて強制遷移開始点、後流持続時間を算出した。強制遷移開始点の平板前縁からの距離は $x/L = 0.03 \sim 0.05$ であり(運動量厚さのレイノルズ数 Re_δ では160~220)、平均値としてモデル値とほぼ対応することを確認した。

終わりに臨み、本研究に対し終始ご指導戴いた岩手大学渡邊番教授に感謝の意を表す。

参考文献

- 1 船崎, 目黒, 山脇, 機論, 58-549, B(1992), 1400
- 2 船崎, 目黒, 山脇, 機論, 58-550, B(1992)
- 3 ANSI/ASME PTC 19.1-1985, 1985, ASME
- 4 目黒, 岩手大学大学院修士論文, 1992
- 5 Addison, J. S. and Dong, Y., Proc. Fifth int'l Sympo. on Aeroelasticity (Beijing), ed. Pan, T. et al., Pergamon Press, 1989, 239
- 6 Addison, J. S. and Hodson, H. P., Trans. ASME Paper 91-GT-282, 1991
- 7 Pfeil, H., Herbst, R. and Schroder, T., Trans. ASME, Vol. 1, 1983, 130
- 8 Abu-Ghannam, B. J. and Shaw, R., J. Mech. Eng. Sci. 22-5, 1980, 213