

進行波表面に沿う流れの可視化実験

種子田, 定俊
九州大学応用力学研究所 : 教授

天本, 肇
九州大学応用力学研究所 : 助手

石井, 幸治
九州大学応用力学研究所 : 技官

友成, 義正
九州大学大学院学生, 工学部

<https://doi.org/10.15017/4743493>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 39, pp.67-75, 1973-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



進行波表面に沿う流れの可視化実験†

種子田 定 俊* 天 本 肇**
石 井 幸 治*** 友 成 義 正****

概 要

一様流の中で進行波運動を行なう物体表面に沿う流れを、水槽および風洞を使用してフロービジュアリゼーションにより測定した。

波速が一様流の速度の程度よりも小さいときには山の背部で剝離がおり、剝離渦は波と同じ速度で後方へ運ばれて後端から後方へ吐き出される。一方、波速が一様流の速度の程度よりも大きいときには進行波の全表面について剝離は全くおこらなくなり、物体の表面近くには一様流よりも早い流れが後方に向かって形成される。そのとき後端からは周期的に渦が放出され、カルマン渦列とは逆向きの渦列が形成される。

1. 緒 言

海に住む「いるか」や「かます」は普通の動物の筋肉の能力から予想されるよりもはるかに早く泳ぐことが知られている。そのことからいるかやかますが泳ぐときの流体摩擦抵抗は同じ形の剛体が同じ速度で進行するときよりもはるかに小さいのではないかと推測されている¹⁾。摩擦抵抗の小さい理由として表皮のやわらかさ^{2)~8)}や表面の粘液^{9)~11)}が境界層におよぼす作用が考えられるがまだ確証は得られていない。

ところで、魚が泳ぐときには推力を得るために身体全体で進行波運動を行なっている。この強い非定常運動が魚の抵抗を小さくしているのではないであろうか。本論文はこの考えを確かめるための第1歩として、進行波運動がまわりの流れにどのような影響を与えるかをフロービジュアリゼーションにより調べた結果の報告である。

2. 実験装置と方法

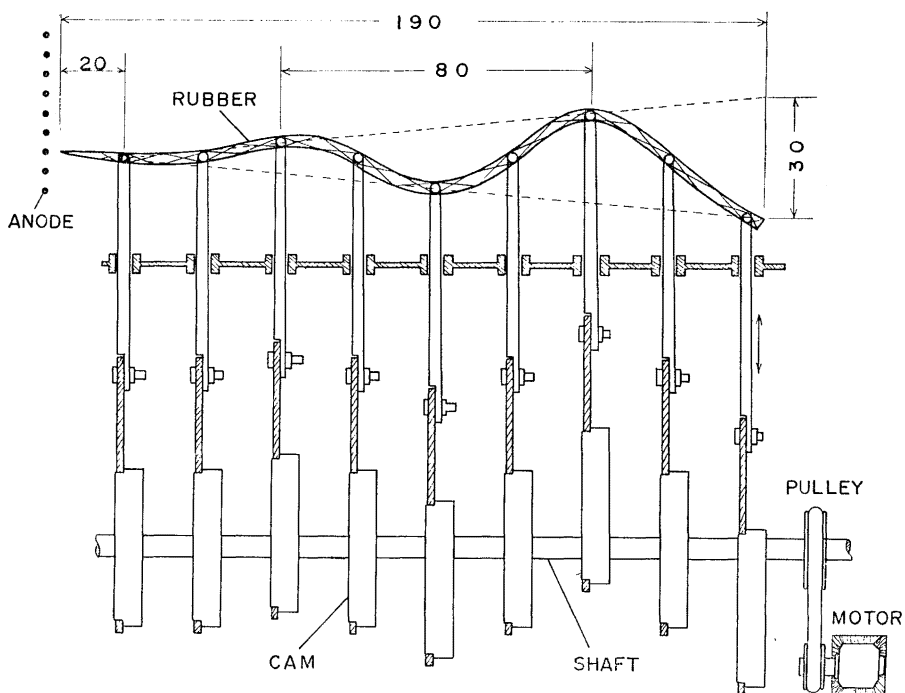
実験は水槽(断面 50 cm×50 cm, 長さ 600 cm)および大型低速風洞(測定部 4 m×2 m)で行なわれた。

水槽実験で使用された進行波発生装置は図1に示される通りで、長さ 19 cm のゴム膜を 2 cm 間隔の金属製肋骨の両面に張り、それぞれの肋骨はカムを介して電動機により駆動される。この装置によって作られる進行波の波長は 8 cm, 振幅は前端でゼロ、前端から 2 cm の位置から後方に向かって一様に

† 日本物理学会(1972年10月)において講演

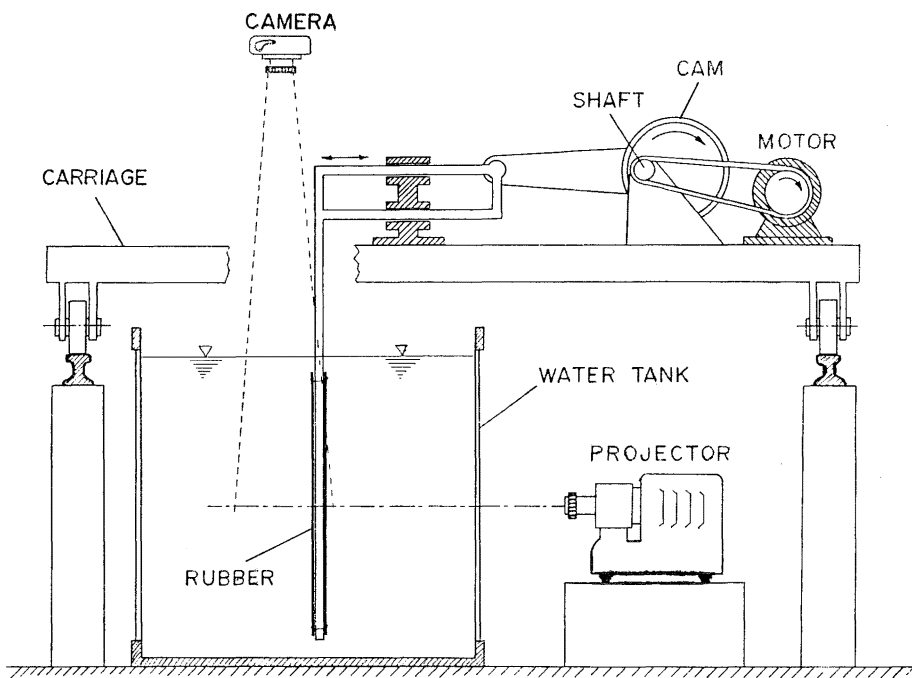
* 九州大学教授, 応用力学研究所 ** 九州大学助手, 応用力学研究所

*** 九州大学技官, 応用力学研究所 **** 九州大学大学院生, 工学部



(a) ゴム膜と駆動装置

単位：mm



(b) 水槽にセットされた装置

図 1 水槽実験用進行波発生装置

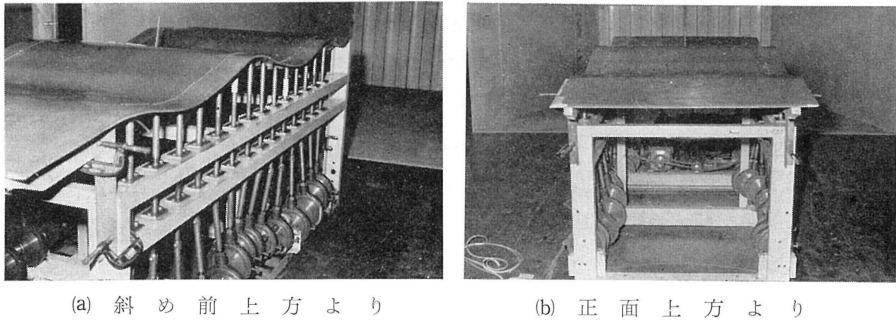


図 3 風洞実験用進行波発生装置写真

進行波を発生することができる。ゴム膜の全長は 292 cm, その前端約 40 cm は平板部で, その後方で振幅を次第に増し, 前縁から測って 80 cm の位置から一様振幅 10 cm になっている。一様な振幅の部分の長さは約 150 cm, その後方で再び振幅を減少して後端は振幅ゼロである。なお, 後端の影響を調べるために, ゴム膜を前縁から 222 cm の位置で切断した場合についても実験を行なった。風洞実験における流れの可視化は煙法によって行なわれた。流動パラフィンの煙をゴム膜の先端または平板部と進行波部との境目の細いすき間から後方へ向って流し出した。煙の筋は streak line を示し, 時間とともに変動する境界層の剝離の状況を見ることができる。

3. 実験結果

3.1 水槽実験

図 4 の写真は進行波の速度 C が一様流の速度 U_0 よりも小さいときの流れの状況を電解法で観察した

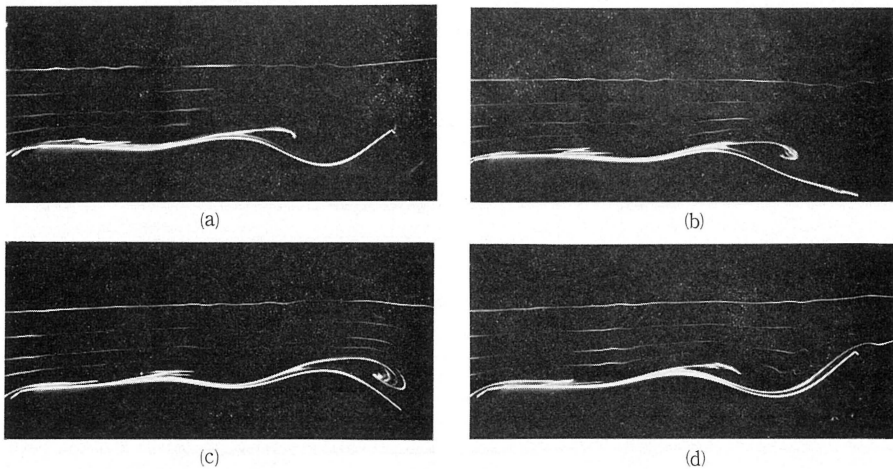


図 4 波速が一様流よりも小さい場合の流れ（白い線は電解法によって作られた色素の線で streak line を示す）。
 $U_0=1.42$ cm/s, $C=0.62$ cm/s, $C/U_0=0.43$, ゴム膜の全長でとった Reynolds 数 $R_L \sim 3 \times 10^3$, 流れは 1 サイクルの間に (a), (b), (c), (d) の順に変化する。

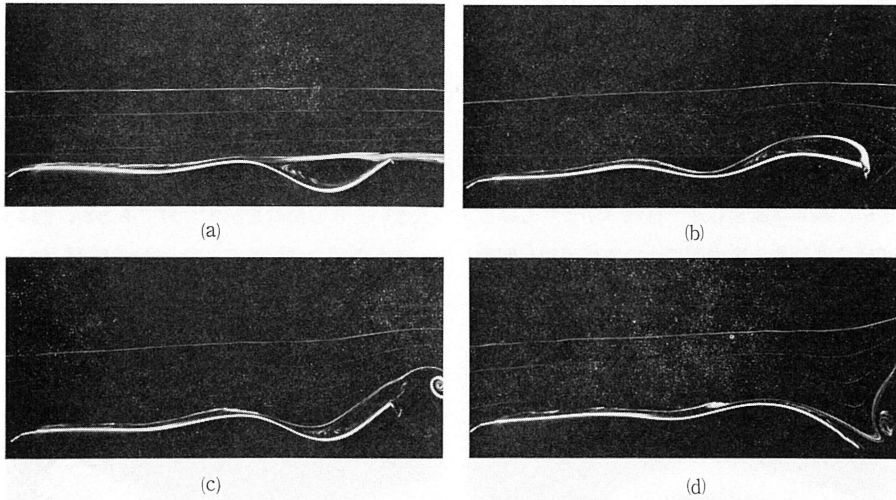


図 5 波速が一樣流の速度と等しい場合の流れ（電解法）
 $U_0=1.42 \text{ cm/s}$, $C=1.40 \text{ cm/s}$, $C/U_0=0.99$, (a)は進行波運動開始前の流れ，進行波発生と同時に(b), (c), (d)の順に変化する。

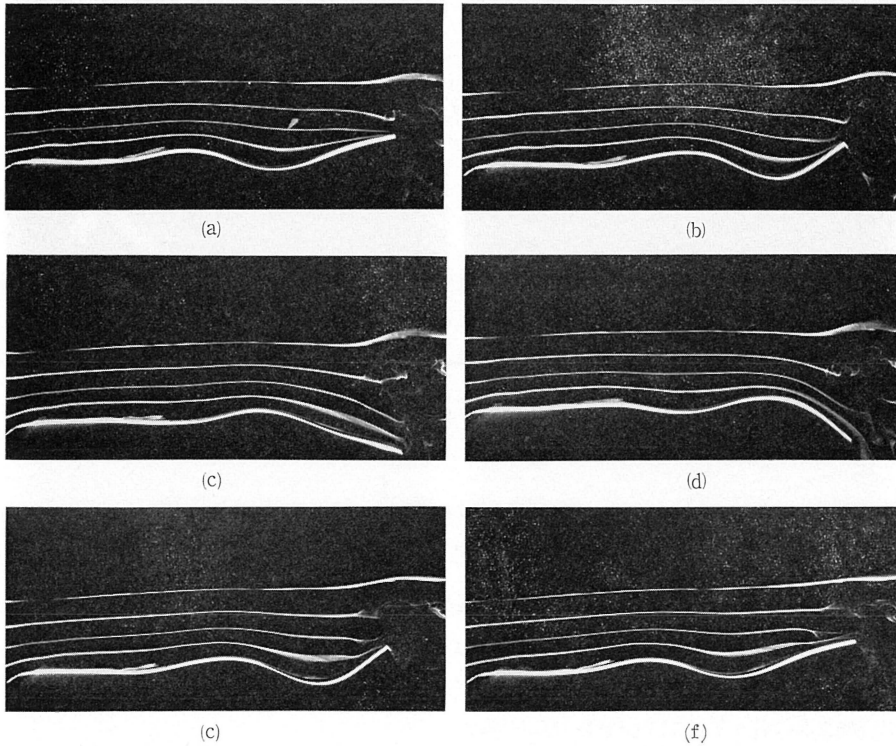


図 6 波速が一樣流の速度よりも大きい場合の流れ（電解法）
 $U_0=0.39 \text{ cm/s}$, $C=1.56 \text{ cm/s}$, $C/U_0=3.95$, 流れは(a), (b), (c), (d), (e), (f)の順に変化する。

ものである。最初の山の背部で剥離がおり、そこで形成された渦は成長しながら波と同じ速度 C で後方へ運ばれてつきつぎと後流中へ吐き出される。

図 5 は波速 C と一様流の速度 U_0 が等しいときの流れて、波速 $C=0$ のとき谷のところに形成されていた渦が進行波発生と同時に後方へ運ばれて、そのあとは全表面にわたって流れは表面に沿って流れるようになり、境界層の剥離が消滅することを示している。

つぎに、図 6 は波速 C が一様流 U_0 よりもはるかに大きいときの流れを示す写真であるが、図 5 の場合と同様に進行波の全表面について境界層が剥離しないことを示している。このように C/U_0 が 1 の程度よりも大きいとき境界層は剥離しない。

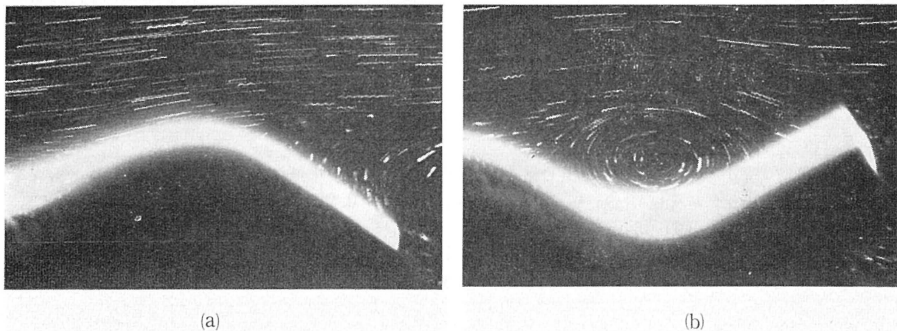


図 7 波速が一様流よりも小さい場合の流れ (アルミ粉法)
 $U_0=2.0$ cm/s, $C=0.46$ cm/s, $C/U_0=0.23$, (a) 山付近の流線, (b) 谷付近の流線

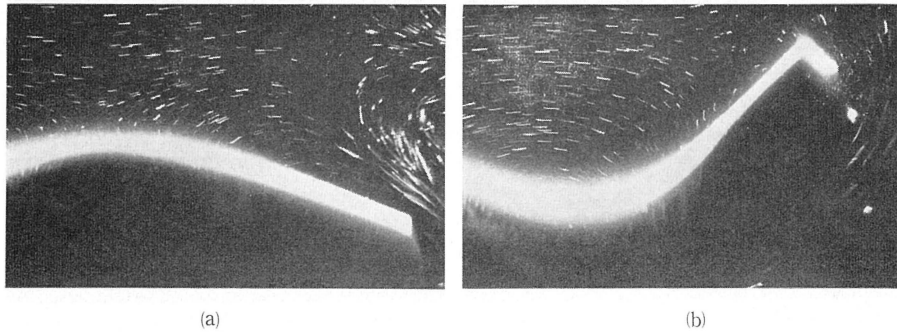


図 8 波速が一様流よりも大きい場合の流れ (アルミ粉法)
 $U_0=0.50$ cm/s, $C=0.98$ cm/s, $C/U_0=1.94$, (a) 山付近の流線, (b) 谷付近の流線

図 7, 8 はアルミ粉法による流線模様の写真である。進行波の流れは非定常流であるから電解法で得られた streak line の模様と一致しないことに注意すべきである。波速 C が U_0 の程度よりも小さいとき (図 7), 谷の部分に孤立した大きな渦巻が認められるが, C が U_0 の程度よりも大きいとき (図 8) には進行波表面に沿ってどこにも渦巻が存在しない。

3.2 風洞実験

図 9 は Reynolds 数 $\sim 10^5$, 後端の振幅ゼロの進行波表面に沿う流れを煙法で斜め方向から観察した

ものである。写真からわかるように、 $C/U_0=0$ のときには最初の山の背部で剝離して死水を形成するが、 $C/U_0 \sim 0.7$ ではほとんど全表面に沿って煙が表面に完全に張りついて流れる。

図 10 は後端の振幅 10 cm の進行波の流れを真横から見たときの写真である。図 9 の後端の振幅ゼロの場合と同じく、 $C/U_0 > 1$ のとき煙は進行波表面に完全に張りついて流れる。

図 11 は $C/U_0 > 1$ のときゴム膜の後端から周期的に後流中に放出される渦巻の有様を示す写真である。

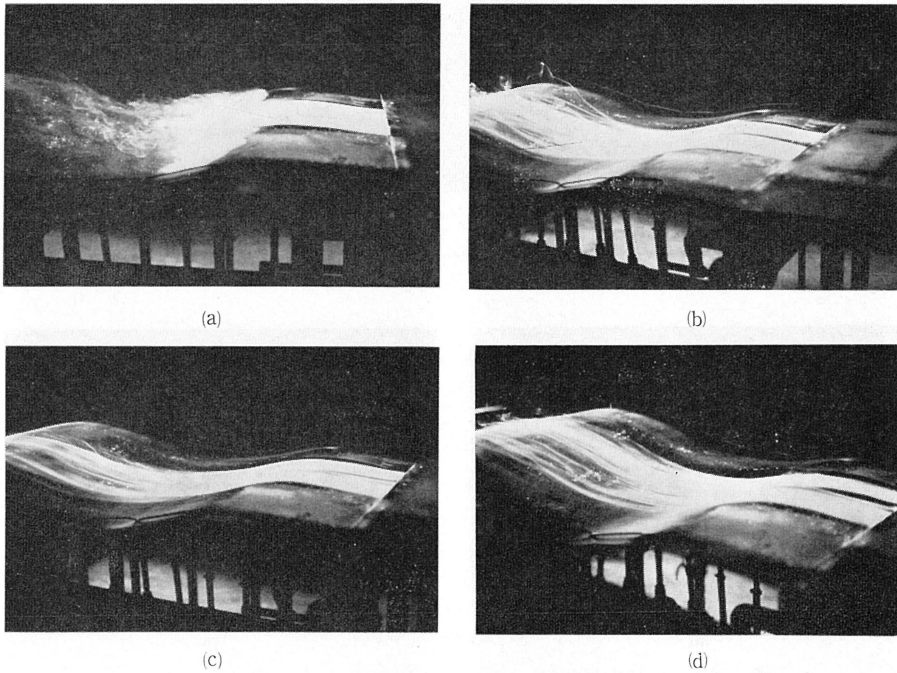


図 9 波速による流れの変化（後端固定）
 $U_0 = 0.35 \text{ m/s}$, $R_L \sim 10^5$; (a) $C/U_0 = 0$, (b) $C/U_0 = 0.70$,
 (c) $C/U_0 = 1.43$, (d) $C/U_0 = 2.86$

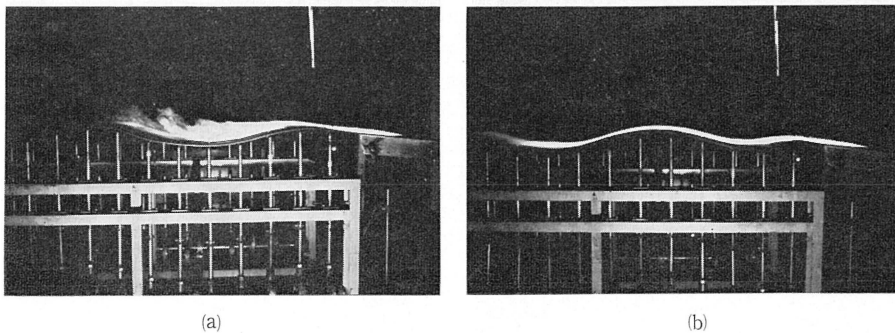


図 10 波速による流れの変化（後端振動）
 $U_0 = 0.30 \text{ m/s}$, $R_L \sim 10^5$; (a) $C/U_0 = 0$, (b) $C/U_0 = 2.5$

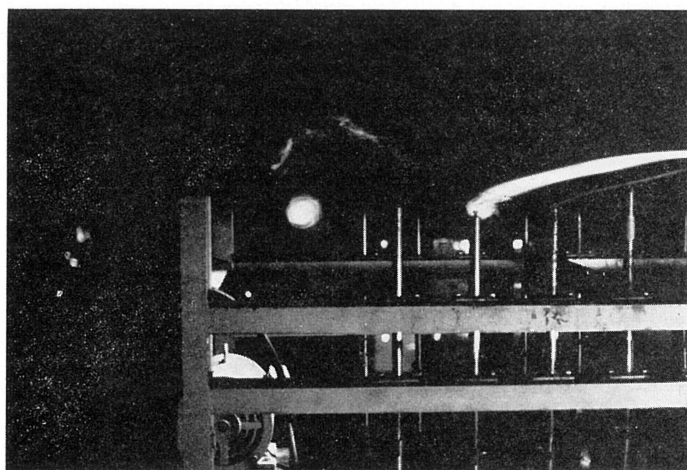
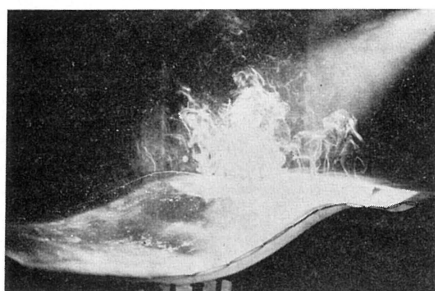
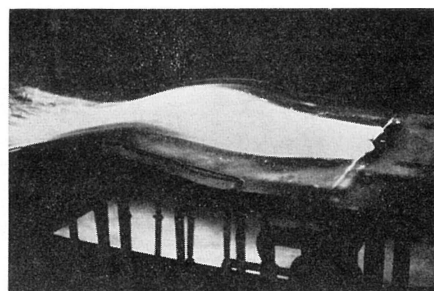


図 11 進行波後端から周期的に放出される渦
 $U_o=0.30 \text{ m/s}$, $R_L \sim 10^5$, $C/U_o=2.5$

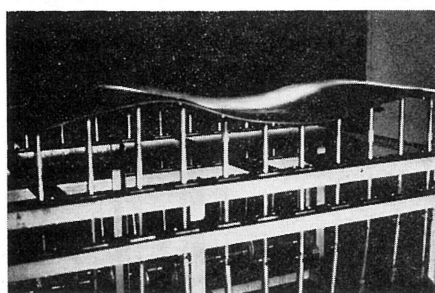


(a)

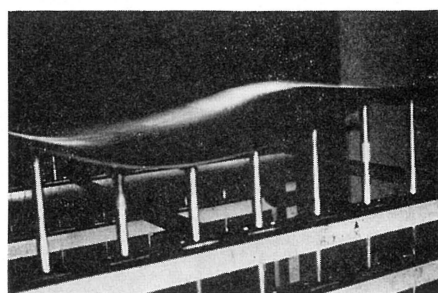


(b)

図 12 一様流が存在しないときの流れ
 $U_o=0$, $R_L=0$, (a) $C=0$, (b) $C=0.74 \text{ m/s}$



(a)



(b)

図 13 高レイノルズ数における流れ
 $U_o=10 \text{ m/s}$, $R_L \sim 2 \times 10^8$, (a) $C/U_o=0$, (b) $C/U_o=0.14$

。図12は一様流が存在しないときの進行波表面の流れを示す。 $C=0$ のとき流体は静止しているが進行波運動を開始すると煙は表面に沿って後方へ後方へと這うように移動し、流体が後方へ輸送されることを示す。

図13は一様流の速度 U_0 が大きく、進行波前端付近の平板の部分で乱流境界層に遷移した場合の流れを示す写真である。境界層が乱流であることは熱線流速計で確認される。乱流境界層は層流境界層にくらべて剝離し難く、 $C/U_0=0$ のときでも煙はほとんど表面に沿って流れているように見える。この状態で進行波運動を開始しても煙の筋は外見上あまり変化しない。

4. 結 言

静止または一様流の中で進行波運動を行なう物体表面に沿う流れを風洞および水槽を使用してフロービジュアリゼーションにより測定した。

一様流の速度ゼロすなわち静止流体中で進行波運動が行なわれる場合、進行波表面近くの流体は表面に沿って後方へ後方へと移動する。

一様流が存在する場合、 $C/U_0=0$ のときには最初の山の背部で剝離がおりその後方は乱れた流れになるが、 $0 < C/U_0 < 1$ では谷の部分に剝離渦が形成されるだけで山の部分では境界層が表面に付着する。さらに波速を上げて $C/U_0 \geq 1$ のときには進行波の表面全体について完全に剝離が消滅する。

今後は進行波表面に沿う流れの速後分布、圧力分布、乱れ、表面摩擦力などについて実験を進める予定である。

謝 辞

実験を補助して下さった高田三郎技官、深町信尊技官、渡辺公彦技官ならびに原稿を浄書して下さった岡世以子嬢および実験中いろいろとお世話になった方々に対してお礼を申し述べる。なお、本研究は文部省科学研究費（一般(C)「魚の抵抗に関する研究」）によって行なわれた。

文 献

- 1) 谷一郎, 魚の抵抗と推進, 科学, Vol. 34, 1964, pp. 471-476.
- 2) Kramer, M. O., J. Amer. Soc. Nav. Eng., Vol. 72, 1960, pp. 25-33.
- 3) Benjamin, T. B., J. Fluid Mech., Vol. 9, 1960, pp. 513-532.
- 4) Landhal, M. T., J. Fluid Mech., Vol. 13, 1961, pp. 609-632.
- 5) Dinkelacker, A., J. Sound and Vibration, Vol. 4, 1966, pp. 187-214.
- 6) Fisher D. H. & Blick E. F., J. Aircraft, Vol. 3, 1966, pp. 163-164.
- 7) 種子田定俊・本地弘之, 応用力学研究所所報, 第27号, 1967, pp. 25-30.
- 8) Takematsu, M., Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Vol. 18, 1970, pp. 87-100.
- 9) Toms, A. B., Proc. Inst. Int. Rheol. Congr., Vol. 2, 1949.
- 10) Dove, H. L., Proc. 11th Int. Towing Tank Conf., 1966.
- 11) 田古里哲夫・声立勲, 日本造船学会誌, 第479号, 1969, pp. 15-26.

(昭和47年10月31日 受理)