

(昭和 36 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

Waveless Stern の研究 (その 2)

正員 熊野道雄*

A Study on the Waveless Stern (Part II)

By Michio Kumano, Member

Summary

This paper deals with the comparison between the calculated and measured ΔC_{wA} of the Waveless Stern, where ΔC_{wA} means the difference of the wave-making resistance between the models without and with the stern bulb.

The observed position of the stern flow separation (named X_s) is presented, together with the comparison between the observed and the calculated area of separation by Buri's method.

The conclusions obtained are as follows.

- (1) The reduction factor β for the stern wave of the finer model C-101 falls by fitting the stern bulb, while for the fuller model C-201, it keeps same.
- (2) The area aft the observed X_s seems to be an actual separation area. The time-mean and the fluctuation are affected according to the phase (and amplitude) of the bow wave observed at the vicinity of the separation point.

1 緒言

著者は第 1 報¹⁾において、Waveless Stern の抵抗試験の成績を報告した。この第 2 報においては、船尾バルブを付けることにより期待できる造波抵抗変化量を理論的に計算し、前記測定値との比較を行なつた。また Waveless Stern 設計の前提条件として、Stern Wave そのものの詳細な機構を知る必要があるので、このような目的で行なつた船尾局部流の瞬間的および連続的写真観察、ならびにその観察記録を船首波の影響を考慮した剥離域計算と比較検討した結果について報告する。

2 造波抵抗変化量の計算および実験との比較

抵抗試験により船尾バルブ付き造波抵抗係数 (C_w と略称する) が実験的に求められる。それと計算された C_w を比較することにより、理論がどの程度まで適用できるかがわかる。船首バルブの場合はこの方法がとられている。しかし、船尾バルブにおいては、この方法は採用できない。船尾波にまつわる造波干渉の機構が、粘性影響により複雑となること、および、船尾バルブは原則として船首バルブ付き船型に取付ける関係上、この方法では絶対値の格段に大きい船首バルブ計算の誤差が混入するからである。以下これにかわる方法として、船尾バルブなしと船尾バルブ付きの C_w の差、すなわち造波抵抗変化量 (ΔC_{wA} と略称する) を計算し、実験より求めた ΔC_{wA} と比較することにした。この方法によれば、まえにのべた誤差の混入がさけられる点で便利である。

2-1 ΔC_{wA} の計算法

ΔC_{wA} を求める基本的な考え方は文献²⁾付録 3 の方法に準ずる。ただし、そこには船首バルブに関連して、理想流体としてのとり扱いが許される船首波のみが対象とされているが、いまの場合は粘性影響を無視できない船尾波を対象としているので、いわゆる粘性修正をここにとり入れる必要がある。Fig. 1 に C-101 および C-201 の粘性修正係数 β , δ を示す。

計算に当つて、実際には、fairing 部分をもつ船尾バルブ全体としての効果を近似的に単独球、すなわち 1 ボ

原稿受付 昭和 35 年 12 月 19 日

* 香川大学学芸学部

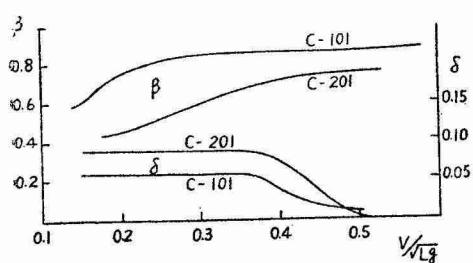


Fig. 1

これに粘性修正をとり入れるので、船尾バルブに関する限り正確な a_e はわからない。供試船型である cos 船型の船首尾波および球の波の振幅関数は長さの次元をもち、それぞれ $A_F(\theta)$, $A_A(\theta)$ および $B_A(\theta)$ とする。そのほか記号の意味については前報通りとする。

$$A_A(\theta)/L = \beta \frac{a_1}{\pi} K_0 L \frac{U(K_0 T, \theta) \sec^2 \theta}{(K_0 L \sec \theta)^2 - \pi^2} = \beta A_F(\theta)/L \quad (1)$$

$$B_A(\theta)/L = 2 \lambda (K_0 L)^2 (a_0/L)^3 \exp(-K_0 f \sec^2 \theta) \sec^4 \theta \quad (2)$$

ここに $\lambda = \beta_B (a_e/a_0)^3$, $\beta_B < 1$, $a_e/a_0 > 1$

λ は内接球（半径 a_0 ）の造波効果を船尾バルブの造波効果にひとしくさせるための係数であり、 β_B は船尾バルブの粘性修正係数である。 λ は 2-2 に述べるように、速度により大きさが変わるものであるが、一応一定として計算する。cos 船型の造波抵抗のうち、基本項を $C_w(1)$ 、干渉項を $C_w(2)$ とすれば、肩波がないため簡単で

$$C_w = C_w(1) + C_w(2) \quad (3)$$

$$C_w(1) = C_{wF} + C_{wA} = \frac{2\pi}{L^2} \int_0^{\pi/2} [\{A_F(\theta)\}^2 + \{A_A(\theta)\}^2] \cos^3 \theta d\theta \quad (4)$$

C_{wF} , C_{wA} はそれぞれ船首尾受け持ち分である。 C_{wA} のみとりだして

$$C_{wA} = \frac{2\pi}{L^2} \int_0^{\pi/2} \{A_A(\theta)\}^2 \cos^3 \theta d\theta \quad (5)$$

$$C'_{wA} = \frac{2\pi}{L^2} \int_0^{\pi/2} \{A'_A(\theta) - B_A(\theta)\}^2 \cos^3 \theta d\theta \quad (6)$$

ここに C'_{wA} は船尾バルブ付きの C_{wA} で、(6) より (5) を差し引くと

$$\Delta C_{wA}(1) = C'_{wA} - C_{wA} = \frac{2\pi}{L^2} \int_0^{\pi/2} [\{A'_A(\theta) - B_A(\theta)\}^2 - A_A^2(\theta)] \cos^3 \theta d\theta \quad (7)$$

$\Delta C_{wA}(1)$ は船尾バルブ付加による造波抵抗変化量 ΔC_{wA} のうちの基本項であり、 $A'_A(\theta)$ は船尾バルブを付加した場合の船尾波振幅関数である。船尾バルブにより β が変わるかも知れないため'を付け $A_A(\theta)$ と区別したわけである。 ΔC_{wA} の干渉項 $\Delta C_{wA}(2)$ を計算するには、 C_w 曲線より hump-hollow の F 数を求め、その振幅を $C_w(2)$ とすれば

$$\Delta C_{wA}(2) = \{B_A(\theta)/A_A(\theta)\}_{\theta=0} \times C_w(2) \quad (8)$$

$C_w(2)$ は hump のとき負、hollow のとき正とする。

$$\Delta C_{wA} = \Delta C_{wA}(1) + \Delta C_{wA}(2) \quad (9)$$

以上の計算方法にもとづき、前報において実測 C_w 曲線を示した 3 種の船尾バルブ*について、 ΔC_{wA} の理論計算を行ない、これを実測値と比較した。

2-2 C-101F×A1, C-101F×A9

Fig. 2, 3 にそれぞれの船尾バルブについて、比較を示す。

Fig. 2 の船尾バルブ A1 を内接球の半径 $a_0 (a_0/L = 0.02)$ を変えないで fairing 部をけずりとつたのが Fig. 3 の A9 である。A1 は $\lambda = 2.2$ で 1 点鎖線①となり、実線で示す測定値に近づいた。A9 は $\lambda = 1$ でほぼ妥当な曲線を示している。これより A9 の程度まで fairing 部をけずれば、 $\beta_B (a_e/a_0)^3 = 1$ 、すなわち、 $a_e/a_0 (> 1)$ は 1 にはほぼ等しくなり、3 乗で効くとしても β_B と cancel して $\lambda = 1$ となつたと思われる。A1, A9 共通にい

* 模型 C-101 については船首バルブ 1 種、船尾バルブ 2 種 (C-101F×A と C-101F×A9)、模型 C-201 については船首バルブ 2 種、船尾バルブ 1 種 (C-201F×A4 と C-201F2×A4)，合計 4 種の組合せがある。

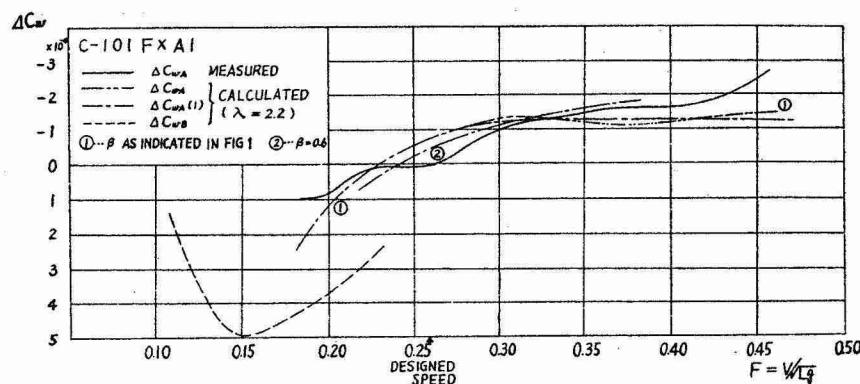


Fig. 2

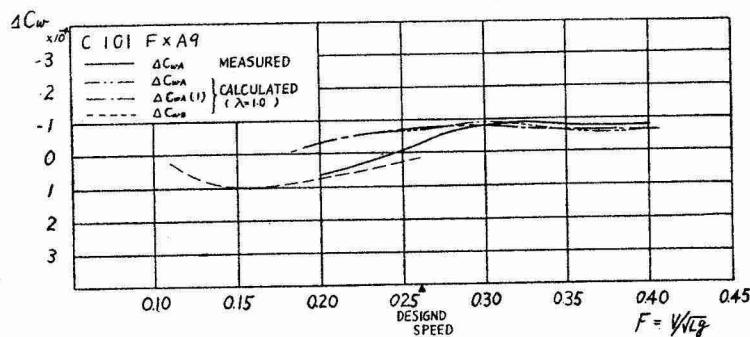


Fig. 3

えることは、 $F=0.30$ を境として、測定値が計算値にくらべ、高速域においては大きめに、低速域においては小さめにでていることである。特に、A1にあつては $F=0.2$ 以下で測定 ΔC_{wA} の絶対値が小さくなっている。これは次の原因によると思われる。

- (a) 船尾バルブを付けることにより、主船体船尾波の β が低下する。(δはやや増加する、後述)
- (b) λ は一定でなく、低速においては明らかに低下する。
- (a)あるいは(b)または(a)と(b)が同時に起こり、上述の不一致になつてあらわれたと考える。しかしこれは実験より与えられる ΔC_{wA} のみからは(a), (b)がいかなる組合せでおこるか分離できない。そこでA1をとり上げ、次のように仮定する。
- (1) 問題とする速度領域 $F=0.25\sim0.35$ においては現象(b)はおこらない。すなわち $\lambda=2.2$ 一定とする。
- (2) $\beta=0.6$ に低下したとする。

(1), (2)の仮定にもとづく $\Delta C_{wA}(1)$ が1点鎖線②である。傾向として測定値に近づいたこと、 $F=0.30$ 以下ではまだかなりの差があること、および破線で記入した球の固有造波抵抗 C_{wB}^* を参照することにより、次に挙げる点は確実にいえると思う。

- (1) C-101程度のfineな船型($\Delta/(L/10)^3=3.968$)にあつては、船尾バルブにより β が低下する。その割合はおよそ7割程度である。

- (2) λ は高速域では一定値であるが、 $F=0.25$ 以下ではかなり急激に低下する。

2-3 C-201F×A4, C-201F2×A4

Fig. 4, 5にその比較を示す。

$\lambda=1$ として、実験と計算はかなりよく一致している。これもC-101F×A9の $\lambda=1$ と同じ理由によるのであろう。また、 β もFig. 1のままで、変つていないようである。 λ がやはり低速で急激に低下することはC-101の船尾バルブと同じである。次に、干渉項 $\Delta C_{wA}(2)$ に着目する。これは両船型とも船首バルブにより船首波が

* 本報告における船尾バルブの場合は(6)式において $F < 0.20$ では $A_A(\theta) \ll B_A(\theta)$ であるから、近似的に $C'_{wA} \rightarrow C_{wB} = 2\pi \int_0^{\pi/2} \{B_A(\theta)\}^2 \cos^3 \theta d\theta$ となり、これは F 数が小さいほど近似度がよくなる。

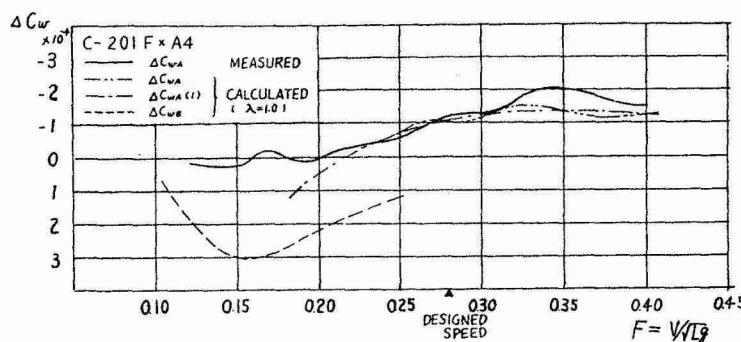


Fig. 4

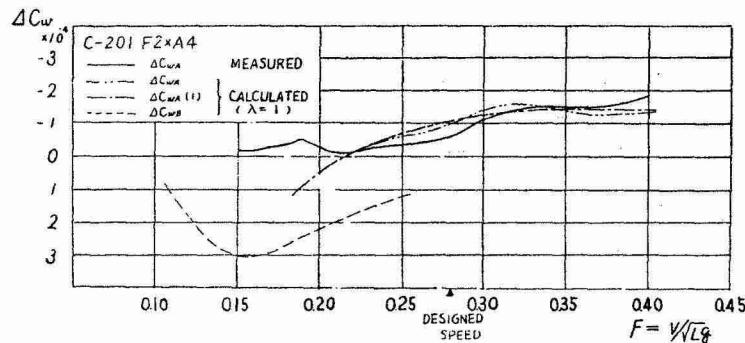


Fig. 5

察より求めることができ、Fig. 1 に示されている。このような間接的手段によつても、船尾波に対する粘性影響を察知できるが、この間接的方法による結果を、ステレオ写真なり、AP より後方に板をのばし船尾波形をとる等、直接的方法による資料と比較することにより、粘性影響についての知識が完全になつてゆくものと思われる。船尾波のステレオ写真は目下解析中であり、波形測定はその振幅が小さいため意味のある資料が得られるかどうか検討中である。上述のように、船尾波を立体的に調べることのほかに、船尾局部流の写真を AP 直上より撮り、平面的に船尾波の波紋をとらえることによつても、前記立体的方法にくらべ、手軽な割合に有用な知識を得ることができる⁽⁴⁾。粘性影響は具体的には船尾における剥離現象としてあらわれ、それは船尾波紋写真より推察できる。文献⁽⁴⁾にしたがい、船尾付近において明瞭な 1 組の crest line が船側より diverge しあげる起点と AP 間の船体中心線に沿つた距離を X_s とする。前記文献に詳述されているように、 X_s と δ を直接関連付けることは物理的には見かけ以上に困難であるにしても、実験的には関連があるよう見える。本報においては、以下 Wave-less Stern の予備的実験として剥離現象が比較的顕著にあらわれる full な方の模型 C-201 (および C-201 F2) を供試船型とし

- (1) 抵抗試験よりの δ - F 数関係を写真観察による X_s/L ～ F 数関係により check する
- (2) 乱流境界層計算による剥離域と X_s/L との比較
- (3) 船首バルブの有無による X_s/L ～ F 数関係の相違について
- (4) 航走中の X_s/L の時間的変動および安定性

以上の 4 点にわたり調べた結果について述べる。

3-1 剥離域の推定計算

C-201 について、Buri の方法により剥離域を計算した。文献⁵⁾に示されているように、船型計算の過程において、各流線 (LWL , $SL(z=0.05)$, $SL(z=0.08)$, KL の 4 本) について u , v , w が与えられているので、それを利用する。Buri の方法における形状母数 Γ の具体的な数値については、田宮教授⁶⁾の数値をそのまま使わせて頂いた。すなわち

$$\Gamma = 0.017 \frac{H}{U^5} \frac{dU}{dS} \quad (10)$$

ここに $U^2 = u^2 + v^2 + w^2$, $H = \int_0^S U^4 dS$, S は船体表面と沿つて測つた長さで、FP よりとるものとする。

cancel されているため、もともと測定された $C_w(2)$ そのものが小さく、従つてそれより導いた $\Delta C_{wA}(2)$ は非常に小さいので、正確な比較は困難であるが、理論と実験の間には若干の位相差がみられ、これは δ をもとの値 (Fig. 1) より若干大きくとることにより傾向的に正されることがわかる。結論として C-201 程度の full な船型 ($\nabla/(L/10)^3 = 5.968$) にあつては、船尾バルブにより β はもとの値のまま、また A4 程度の fairing 部をもつ船尾バルブでは $\lambda=1$ であるといえよう。

3 船尾局部流の写真観察

第 1 報に詳述したように、船尾バルブの中心位置および大きさを決め、また ΔC_{wA} の計算を行なうため、 β , δ の値および船首波の (理論値よりの) 前進量を知る必要がある。

これは抵抗試験および船側波形の観察

$$\Gamma < -0.06 \quad (9)$$

で剥離するとして計算したのが Fig. 6 の 1 点鎖線である。

つぎに $F=0.223\sim0.316$ の船側波形を参考とし、船首波 (free wave の成分のみ) の AP 附近における wave slope により dU/dS を修正して得た剥離域を 2 点鎖線で示す。①はもつとも剥離域の前進した場合で、Fig. 6 には便宜上 hump としてあるが、一般にはその peak は一致しない。②も同様であり 3-2 に述べる。

3-2 計算剥離域と X_s/L の比較

F 数を base として、C-201 の X_s/L および WL における計算剥離域を示したのが Fig. 7 である。

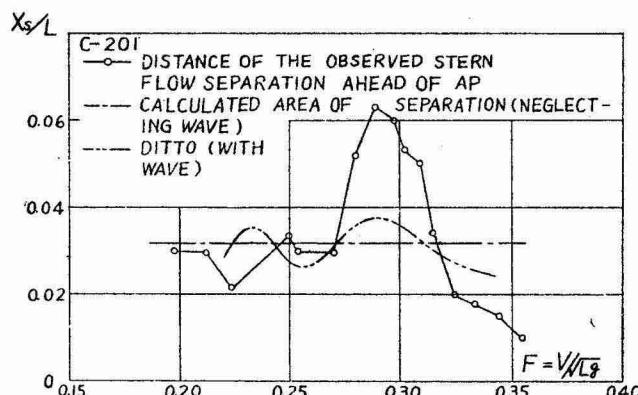


Fig. 7

接な関係があり、断定はできないが、 X_s より後方は剥離域であるといつてよいと思う。しかし、これは船体表面上の圧力測定または水中写真等の実験により確かめなければならない問題である。

3-3 C-201 と C-201F の X_s/L および δ, δ_A との比較

Fig. 8 は C-201 の X_s/L を実線で C-201F2 を 1 点鎖線で示してある。 X_s/L は瞬間的および連続的撮影によるものの混合であるが、両者よく一致し、瞬間的撮影による X_s/L も信頼がおけることがわかる。それは後出 Fig. 10 を見ても了解できることである。船首バルブが船首波を cancel して、wave slope による追加速度勾配が小さくなる。そこで F 数による X_s/L の山谷の急峻度が幾分緩和されるだろうと予想したが、事実その傾向が明瞭にあらわれている。しかし、 X_s のもつとも前進する $F=0.28\sim0.30$ 付近の X_s の値はあまり変化ないようである。Fig. 8 には船尾バルブ付き C-201F2×A4 の X_s/L も示してあるが、 $F=0.20\sim0.35$ の間 $X_s/L=0$ である。破線は δ および、 δ より船首波前進量 δ_F を差し引いた δ_A であるが、 δ_A は X_s/L の mean を通りその

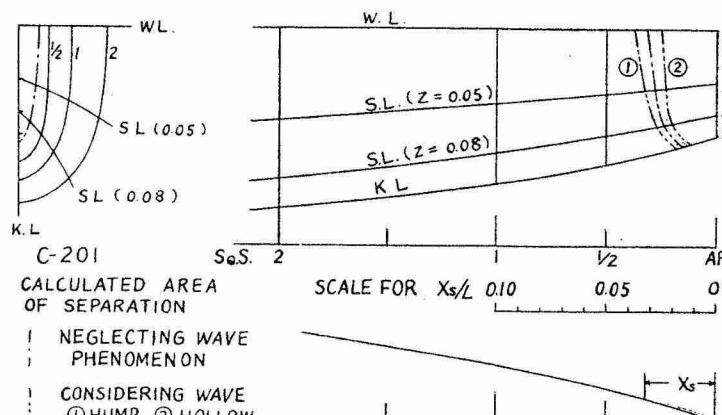


Fig. 6

波を考慮しない場合の WL 剥離域と船首波前進量とは 3~4% でほぼひとしいため、文献⁶により AP における free wave の位相を考え、WL の剥離域を推定したのが Fig. 7 中の 2 点鎖線で波を考慮しない剥離域が 1 点鎖線で F 数 (あるいは Re 数) に無関係に一定である。これはすこし問題があるが使った定数の関係のため止むを得ない。 X_s/L と比較するに振幅はかなり小さいが、mean としてはいい所で、位相では抵抗試験においてもつとも重要且、loop 現象等の問題の多い second hump の上り坂、この船型では $F=0.29$ 付近においては完全に一致している。これより X_s より出発する crest line は剥離域と極めて密

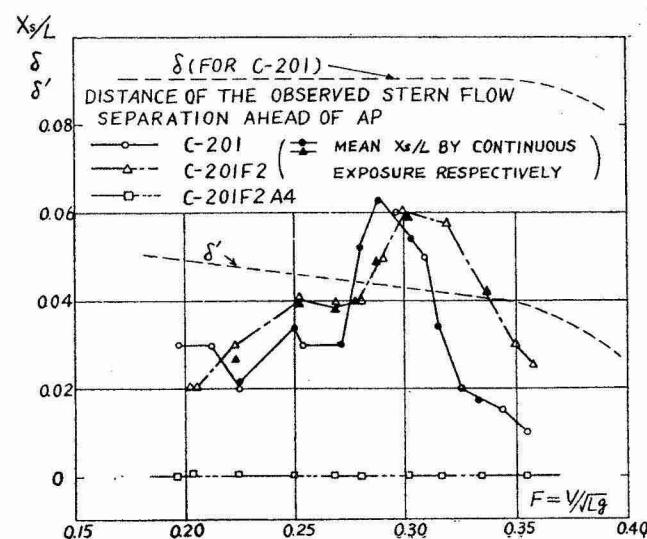


Fig. 8

関連がよくわかる。(Fig. 8 の δ' は δ_A と読みかえることにする。)

3-4 C-201 と C-201F2 の X_s/L の時間的変動

X_s/L の時間的変動を調べるため、1航走、約10秒を1本のフィルムに撮る。もちろん撮影中定常速度に保つ必要がある。3.6コマ/秒の速さでニコンF・モータードライブにより連続撮影を行ない、そのフィルムの各コマの X_s/L を読む。その時間的変動の様相の記録の中より、3コの速度を選んだのが Fig. 9 である。

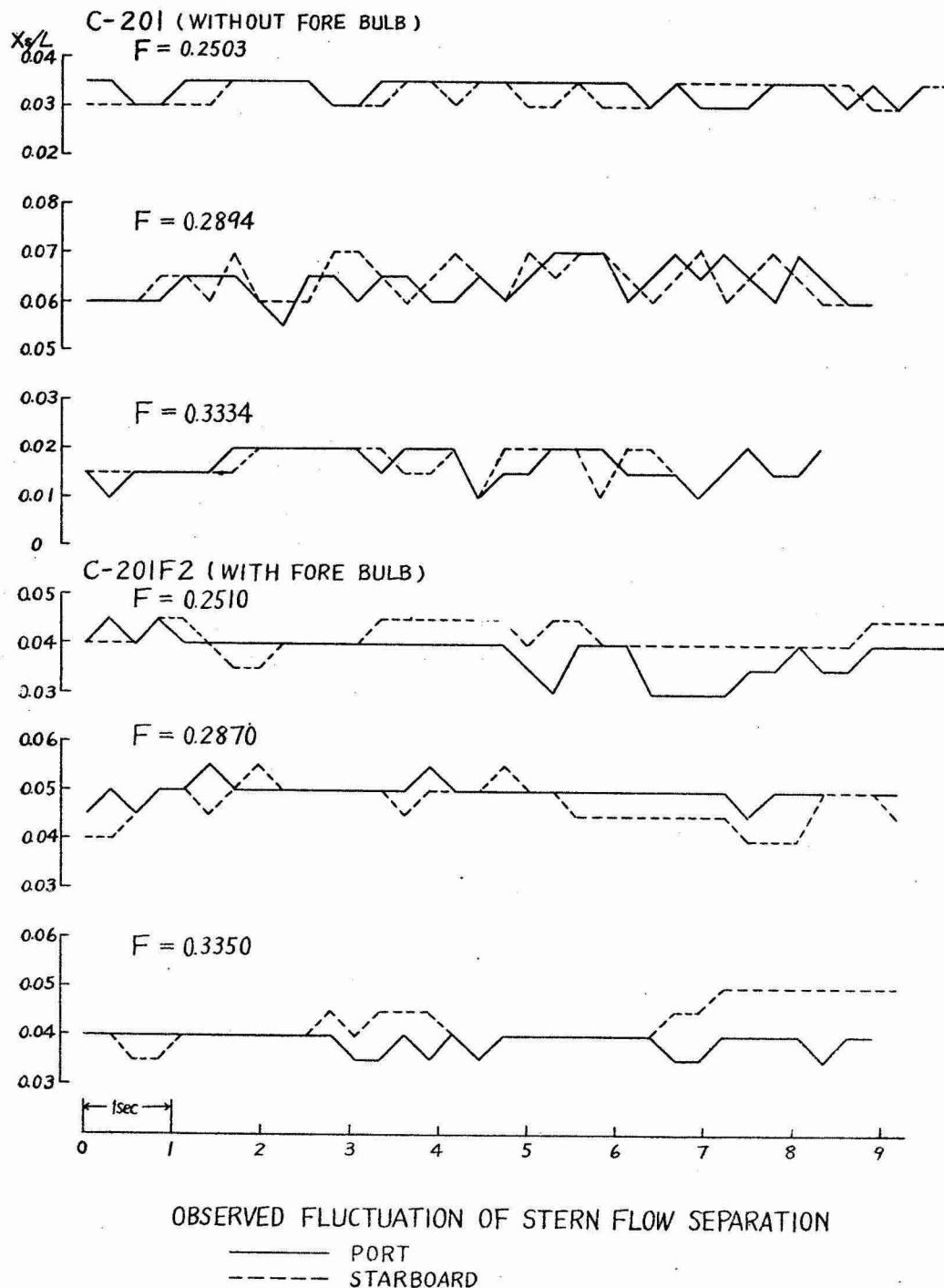


Fig. 9

C-201, C-201F2 より各3コゆえ、計6コで上3行がC-201、下3行がC-201F2で、 X_s/L は左玄右玄別々に示してある。 X_s/L を0.005より細かく読むことは、写真撮影・波紋の性質等の制約のため、およびFig 10に示す処理のため断念した。

そのため、変動の記録が折線となつてゐる。

Fig. 9 から次のことがわかる。

(1) C-201 と C-201F2 との比較……船首バルブ付きは時間的変動が小さい。船首波が cancel されてこうなるのであるから、 X_s/L の位置のみならずその時間的変動をも船首波が支配することがわかる。

(2) F 数によりどう変わるか……

(a) C-201 にあつては $F=0.28 \sim 0.29$ がもつともさかんに変動した。その上下 $F=0.20$ 付近も完全流体に近い流れとされている $F=0.33$ 以上も、時間的変動の様相そのものは変わらない。

(b) C-201F2 は F 数により変動の様相の変化がみられない。 $F \geq 0.30$ の高速で、やや小さくなるようである。

Fig. 10 は crest line がある特定の X_s/L から出発している時間の、全撮影時間に対する割合を示した。左右玄をいつしよにしてあり、ハッヂした矩形が C-201F2 で、矩形のままが C-201、両者の中央が予定速力に当る。変動の振幅が Fig. 10 よりわかるが、それは船首バルブの有無にあまり関係ないようである。やはり $F=0.27 \sim 0.30$ の間で振幅が大きくなつてゐる。

4 む す び

本報告により明らかにされたことを要約すると、次のようになる。

(1) 第 1 報むすびにおいては、推測の程度であつたものを、計算と比較して確かめた。すなわち

(a) full な模型 C-201 に船尾バルブを付けても、主船体船尾波の粘性修性係数 β は変化しないが、fine な C-101 にあつては β はさらに小さく（平均してもとの値の 7 割程度）なるとみてよい。両模型とも δ が幾分大きくなるが現在の解析の段階では定量的なことはいえない。

(b) 船尾バルブの $\lambda (= \beta_B (a_e/a_0)^3)$ は 3 コのうち 2 コまで $\lambda = 1$ であつたが別に意味はない。 λ をさらに分解するためには B_B または a_e/a_0 の値が必要である。 λ は低速において小さくなる。

(2) C-201 を供試船型とする写真観察では、船首バルブなしと船首バルブつきの X_s/L を、計算剥離域を参考しながら比較した。そして

(a) $X_s/L \sim AP$ 間の船体表面は剥離域である公算が大きい。船尾付近の船側について直接実験で確かめる必要がある。

(b) X_s/L およびその変動は船首波の位相のみならず、その振幅と波長に影響される。すなわち X_s/L が同じ値であつても X_s/L 波長の大きい低速において、実効的に船尾波に対する粘性効果は大きい（具体的には β は小さく、 δ は大きい）

終りに、本研究に関し終始御指導を賜わつた東京大学乾崇夫教授ならびに茨城大学高常哲夫助教授に厚く感謝いたします。さらに直接、実験解析計算に協力された梶谷 尚君ほか東大船型水槽の方々ならびに香川大学溝淵勝 君にお礼を申し上げます。

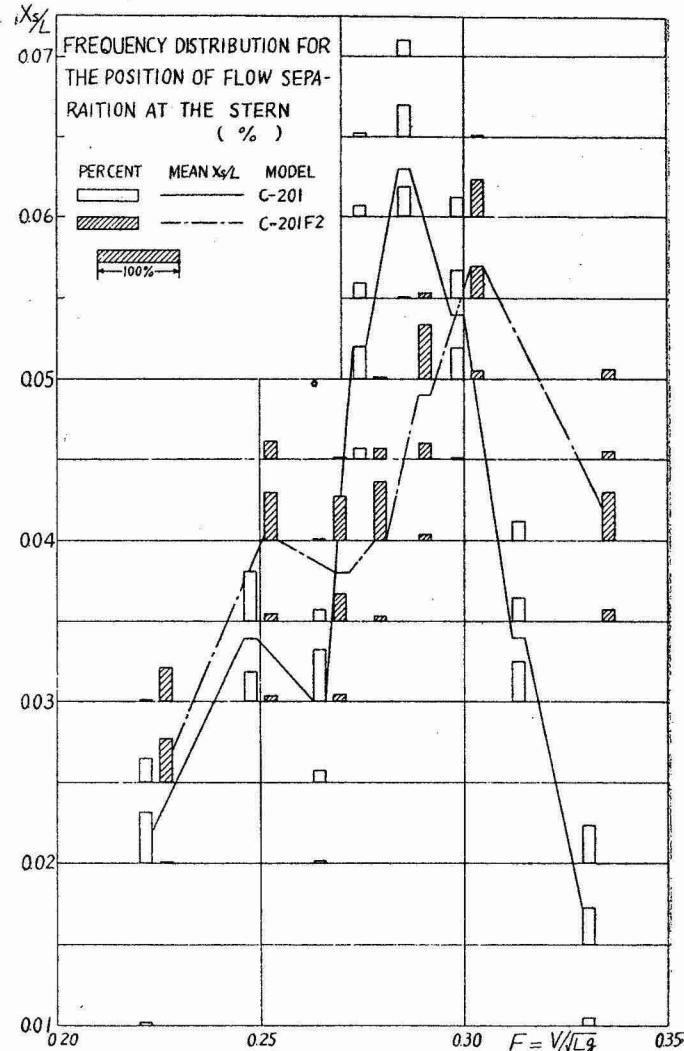


Fig. 10

文 献

- 1) 著者: Waveless Stern の研究(その1) 造船協会論文集 108号
- 2) 乾・高幣・熊野: 球状船首の造波効果に関する水槽試験 同 上
- 3) 高幣哲夫: Waveless Bow の研究(その1) 同 上
- 4) 乾・増永・三浦・大越: 写真による船尾造波機構の観察 造船協会論文集 101号
- 5) 高幣哲夫: 電子計算機による船型の計算 茨城大学研究報告
- 6) 田宮真: 摩擦抵抗に対する Form Effect(I) 造船協会論文集 88号
- 7) 梶谷・田賀野: 昭和35.3 東大船舶工学科卒業論文