翼車型流速計の動作特性について*

正会員　田　崎　　亮**，　正会員　北　川　弘　光**
小　山　鴻　一**，　岡　本　三千朗**

Note on Characteristics of Blade Wheel Current Meter

By Ryo TASAKI (*Member*), Hiromitsu KITAGAWA (*Member*),
Koichi KOYAMA and Michio OKAMOTO

By using a non-dimensional equation of motion, the responses of the blade wheel current meter are calculated to the step, linear and sine changes of current speed. The results elucidate dynamic characteristics of the current meter, which are of use for estimating errors in measurements and designing new one suitable to the purposes of experiments. The errors are also discussed in the case where the speed of rotation of the blade wheel is calculated on the inverse of the time interval for a finite number of rotation.

1. 緒　　言

翼車型流速計は流量計，海流計，風力計等として土木，海洋，気象関係で従来から盛んに使用されており，また船舶試験水槽では伴流計[1),2)]，模型船用対水速度計[3),4),5),6),7)]，水槽中の微小流れ[9),10)] あるいは船体まわりの流れの測定[11)]に使用されている．使用目的から前者が測定精度よりも堅ろうさ，取り扱いの簡便さを主眼として設計され，製品として市販されているのに対し，後者は測定精度を主眼として設計され，各試験水槽でそれぞれ独自に設計製作されている[6),7),8),9),11)]．土木関係の翼車型流速計については，例えば粟谷[12),13)] 船型試験水槽用の伴流計の静的特性については研野[2)]の研究がある．本文では船型試験水槽用のものを念頭において，翼車型流速計の静的および動的特性について調査した結果を報告する．

2. 運動方程式

翼車型流速計の動作を模型的に示すと Fig. 1 のようになる．図において

V：流速，$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$

Q：水から翼車に作用するトルク，kg·m

I：流速計の回転部分の軸心まわりの慣性能率，$\mathrm{kg\cdot m\cdot s^2}$

Q_F：翼車の回転速度に比例する摩擦抵抗，kg·m

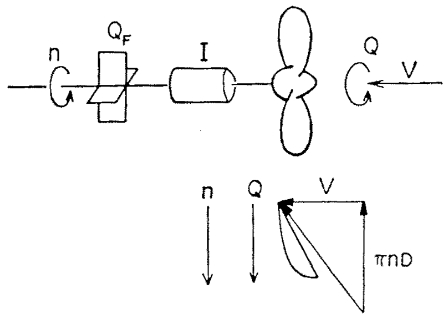

Fig. 1. Schema of blade wheel current meter.

n：翼車の回転速度，$\mathrm{rev.\cdot s^{-1}}$

である．さらに，

ρ：水の密度，$\mathrm{kg\cdot m^{-4}\cdot s^2}$

D：翼車の直径，m

K_Q：トルク係数，$K_Q=Q/(\rho D^5 n^2)$

J：前進係数，$J=V/(Dn)$

J_1：$K_Q=0$ となる J の値

$\left(\dfrac{dK_Q}{dJ}\right)$：$K_Q-J$ 曲線の $J=J_1$ における勾配

とすると，回転部分の運動方程式は

$$2\pi I\frac{dn}{dt}=\rho D^5 n^2\left(\frac{dK_Q}{dJ}\right)(J-J_1)-F_F \qquad (1)$$

で与えられる．ここで，流速計の特性を示す係数として，

$$a=-\frac{\rho D^4}{2\pi I}\left(\frac{dK_Q}{dJ}\right),\qquad \mathrm{m^{-1}} \qquad (2)$$

$$k=DJ_1=\left(\frac{V}{n}\right)_1,\qquad \mathrm{m\cdot rev.^{-1}} \qquad (3)$$

---

* 昭和44年10月11日　関西造船協会秋季講演会において講演
** 船舶技術研究所

$$\mu=\frac{Q_F}{2\pi a I n},\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}} \tag{4}$$

とおくと，(1)式は

$$\frac{1}{n}\frac{dn}{dt}=a(V-\mu-kn),\quad \mathrm{s^{-1}} \tag{5}$$

となる[14]．静的な較正式は，$dn/dt=0$ として，

$$V_n=\mu+kn,\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}} \tag{6}$$

で与えられる．以後，V_n を**指示流速**と呼ぶことにする．また，**偏差**を

$$E=V-V_n,\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}} \tag{7}$$

で定義する．一定速度 V_0 を用いて無次元値

$$\left.\begin{array}{l} E_1=E/V_0,\ V_1=V/V_0,\ V_{n1}=V_n/V_0 \\ \mu_1=\mu/V_0,\ k_1=ak, \\ t_1=aV_0\cdot t \end{array}\right\} \tag{8}$$

を作れば，(5)式は

$$\frac{dV_{n1}}{dt_1}=E_1(V_{n1}-\mu_1) \tag{9}$$

となる．この方程式を用いて，流速計のまわりの流速が次に述べるように変化した場合の応答および計測方式に伴う誤差を検討してみる．

なお，模型船用対水速度計に使用される流速計[8]について数値例を示すと，

$a=70$	$\mathrm{m^{-1}}$
$k=0.0958$	$\mathrm{m\cdot rev.^{-1}}$
$\mu=0.0387$	$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$

である*.

3. 簡単な形の流速変化に対する応答

3.1 段状の流速変化に対する応答

まず最も簡単な場合として回転速度

$$n_0=\frac{V_0-\mu}{k},\quad \mathrm{rev.\cdot s^{-1}} \tag{10}$$

で定常回転をしている流速計のまわりの流速が Fig. 2 に示すように，$t=0$ で $V=V_0$ から段状に $V=V$ に変化したとすると，指示流速の無次元値 V_{n1} は(9)式を解いて，

* I は関西造船協会編，造船設計便覧（昭和30年版），365頁の近似式による．$(dK_Q/dJ)\doteqdot 0.056$ は船研 M.P. No. 1316 単独試験成績（矢崎敦生，"AU型プロペラ設計法に関する研究"，運研報告，第11巻，7号，昭和36年8月）による．この値は厳密には翼車の単独試験結果がなければ求められないものであるが，$K_Q=0$ 付近の挙動はあまり変わらないものとして，上記のデータによった．

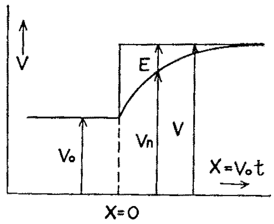

Fig. 2. Step change of current.

$$\frac{V_{n1}-\mu_1}{V_1-\mu_1}=\frac{n}{n_\infty}=\frac{1}{1+\dfrac{V_1-1}{1-\mu_1}e^{-(V_1-\mu_1)t_1}} \tag{11}$$

ここで，$n_\infty=\lim_{t\to\infty} n$

で与えられる．

この数値例を，$\varDelta V_1=V_1-1$, $\varDelta V_{n1}=V_{n1}-1$ として Fig. 3 に示す．同図から同量の流速変化でも，増加の場合と減少の場合とでは流速計の応答が異なることがわかる．すなわち，増加の場合の方が減少の場合よりも応答が早い．これは翼車に作用するトルクが回転速度の2乗に比例すると仮定しているからである．$t_1=0$ における V_{n1} 曲線の接線と $V_1(=\lim_{t_1\to\infty} V_{n1})$ 直線との交点の t_1 座標 T_1 は図に示すように

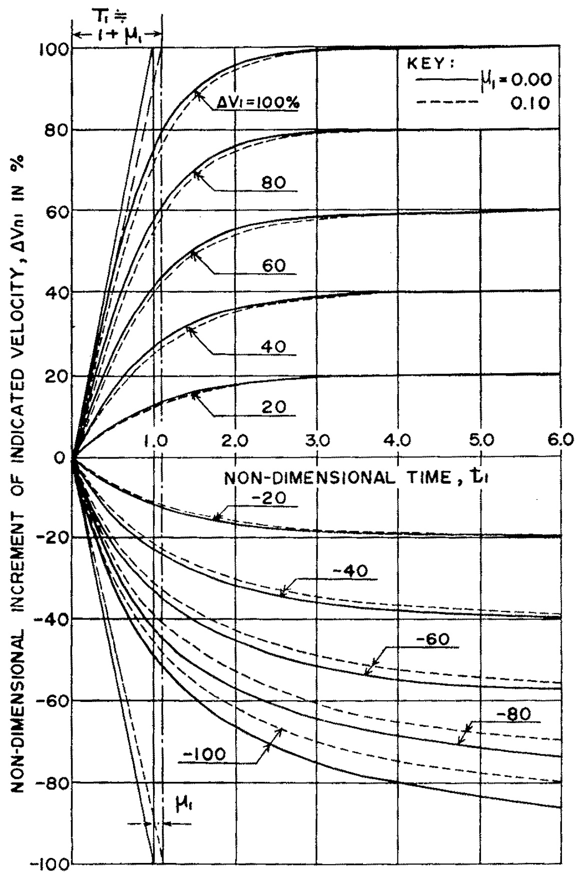

Fig. 3. Response of current meter to step change of current.

$$T_1=\frac{1}{1-\mu_1}\fallingdotseq 1+\mu_1 \tag{12}$$

となる．これは有次元値Tになおすと，

$$T=\frac{1}{a(V_0-\mu)}=\frac{1}{akn_0},\quad \mathrm{s} \tag{13}$$

となる．Fig. 3 および(12),(13)式から次のことがわかる．$x=t=0$ における V_n 曲線あるいはn曲線の立ち上り角の正接は流速変化（$V-V_0$）に比例する．また，立ち上り角は同じ大きさの流速変化に対しては，初期速度 V_0 あるいは回転速度 n_0 が大きいほど大きくなる．従って，初期速度 V_0 あるいは回転速度 n_0 が大きいほど終端指示流速 V に早く近づくが，走行速度（初期速度）V_0 も大きくなるから，終端速度からの偏差が同じになるまでに流速計が走行する距離は，次の距離定数の項で述べるように大体一定になる．摩擦抵抗係数μが大きくなると，上記の立ち上り角はFig. 3 に示すように若干小さくなる．しかし船型試験水槽で用いられる翼車型流速計で考えられる μ_1 の範囲は高々同図に示す程度であって，流速が大幅に減少する場合（例えば40%程度）以外 V_n 曲線の挙動はμの値にあまり影響されない．なお影響の程度は次に述べる距離定数で示される．

3.2 距離定数

次に指示流速 V_n の終端付近，すなわち無次元時間 t_1 が十分大きな値での流速計の挙動を示すものとして距離定数の概念を導入する．

段状の流速変化に対して，**流速変化率**γおよび**限界値**αを次のように定義する．

$$\gamma=\frac{V-V_0}{V_0}=\frac{n_\infty-n_0}{n_0+\dfrac{\mu}{k}}=V_1-1 \tag{14}$$

$$\alpha=\frac{V-V_n}{V-V_0}=\frac{n_\infty-n}{n_\infty-n_0}=\frac{E_1}{V_1-1} \tag{15}$$

さて，偏差 $E=V-V_n$ が流速変化 $\Delta V=V-V_0$ の $100\alpha\%$ になるまでに流速計が走行する距離を**距離定数** $D_{100\alpha}$ と定義すると，無次元値 $aD_{100\alpha}$ は(11), (14)および(15)式から，

$$aD_{100\alpha}=\frac{1}{1+\gamma-\mu_1}\ln\frac{1+\gamma-\mu_1-\alpha\gamma}{\alpha(1-\mu_1)} \tag{16}$$

$$\fallingdotseq(1+\mu_1)\{(-\ln\alpha)-(-\ln\alpha-1)\gamma\},$$

$$\text{ただし}\qquad \mu_1,\ \alpha,\ \gamma\ll 1 \tag{17}$$

で与えられる．これからわかるように，距離定数$D_{100\alpha}$は α, γ 等の比率を示す量にのみ関係して絶対値には関係しない．しかも(17)式からわかるように，γ は通常（$-\ln\alpha$）に比べて 1/10 以下のオーダーであるから，$D_{100\alpha}$ はγの値に対してあまり急激に変化しない．したがって $D_{100\alpha}$ は流速計の応答の速さを示す目安として便利な量であろう．(16)式の関係を Fig. 4 に示す．なおこの図は $\mu_1=0$ として計算したものである．前述のように摩擦抵抗係数 μ_1 の指示流速 V_n の終端付近での挙動に及ぼす影響は小さく，(17)式が示すように μ_1 によって $D_{100\alpha}$ が $100\mu_1\%$ だけ増加する．

次に限界値を比率αではなく，絶対値で規定した場合を考える．これは測定精度が例えば曳引車の速度制

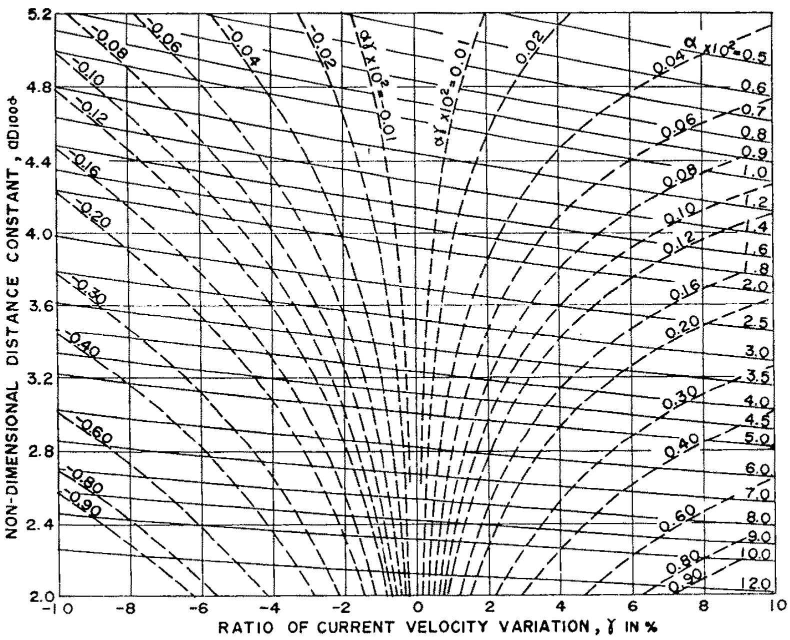

Fig. 4. Non-dimensional distance constant, $aD_{100\alpha}$.

Table 1. Non-dimensional distance constant, $aD_{1mm/s}$.

Carriage speed, V_0 in m/s	$\alpha\gamma=\frac{1\ \mathrm{mm/s}}{V_0\ \mathrm{m/s}}$	Velocity change, ΔV in cm/s											
		+1.0	−1.0	+2.0	−2.0	+4.0	−4.0	+6.0	−6.0	+8.0	−8.0	+10.0	−10.0
0.5	20.0×10^{-4}	2.3	2.3	2.9	3.1	3.5	3.9	3.7	4.5	(3.8)	(4.6)	(5.5)	(8.3)
1.0	10.0×10^{-4}	2.3	2.3	3.0	3.0	3.6	3.8	3.9	4.3	4.1	4.7	4.3	5.0
2.0	5.0×10^{-4}	2.3	2.3	3.0	3.0	3.6	3.7	4.0	4.2	4.3	4.5	4.4	4.8
3.0	3.3×10^{-4}	2.3	2.3	3.0	3.0	3.7	3.7	4.0	4.2	4.3	4.5	4.5	4.7
4.0	2.5×10^{-4}	2.3	2.3	3.0	3.0	3.7	3.7	4.1	4.2	4.3	4.5	4.5	4.7
5.0	2.0×10^{-4}	2.3	2.3	3.0	3.0	3.7	3.7	4.1	4.1	4.3	4.4	4.5	4.7

Numbers in brackets are calculated by using Eq. (16)

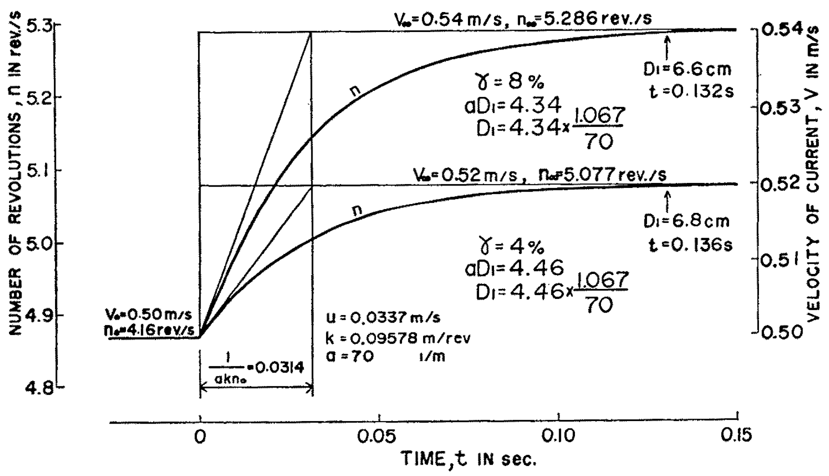

Fig. 5. Example of response of a current meter to step change of current.

御の精度――通常 ±1 mm/s 程度といわれる――で限られた場合に相当する．この場合は Fig. 4 に点線で示した $\alpha\gamma$ が一定の曲線から応答を推定することができる．測定精度を ±1 mm/s として，偏差がこの範囲にはいるまでに走る距離を無次元の形 $aD_{1mm/s}$ で求めると Table 1 のようになる．これから精度を ±1 mm/s 程度にした場合も，距離定数 $D_{1.0}$ 程度の助走で十分なことがわかる．

以上では無次元値を用いて表現したが，これを 2. で示した実例について有次元値で示すと Fig. 5 のようになる．

3.3 線型の流速変化に対する応答

3.1 の場合と同様に，回転速度

$$n_0=\frac{V_0-\mu}{k},\quad \mathrm{rev\cdot s^{-1}} \tag{18}$$

で定常回転をしている流速計のまわりの流速が Fig. 6 に示すように $t=0$ で $V=V_0$ から線型に

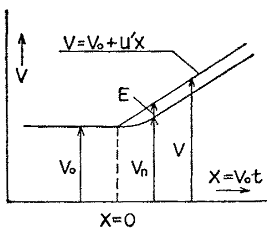

Fig. 6. Linear change of current.

$$V=V_0+u'\cdot V_0 t,\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}} \tag{19}$$

で変化したとすると，(9)式は

$$\frac{dV_{n1}}{dt}=(1+u_1't_1-V_{n1})(V_{n1}-\mu_1) \tag{20}$$

ここで，

$$u_1'=u'/aV_0 \tag{21}$$

となる．t_1 の広い範囲にわたって一般的な性質を把握できるような，この方程式の解析的な解を求めること

はできないので，ここでは数値例から解の性質を調べてみる．

船型試験水槽用の翼車流速計で考えられるような各定数値に対して解を求めたものがFig.7 である．この図においても **3.1** の段状の流速変化に対する応答 Fig.3 と同様のことがいえる．すなわち流速が増加する場合と減少する場合とでは応答が異なり，増加する場合は偏差が次第に減少するのに対し，減少する場合には次第に増加する．また同図からわかるように，試験水槽で実用に供されている流速計では摩擦抵抗係数 μ の応答に及ぼす影響は極めてわずかである．Fig.7 によると，$u'\leqq 0.002$ の場合には $t_1=aV_0t\geqq 4.6$ で偏差 E_1 はほぼ一定になる．これは Fig.4 で大体 $aD_{1.0}$ に対応しているから，流速が直線的に変化する場合も距離定数 $D_{1.0}$ 程度の助走をすると偏差は一定となり，その値は走行速度（初期速度）V_0 の 1/1,000 ないし 2/1,000 程度である．また，Fig.7 から，

$$\mu_1\leqq 0.1,\ |u_1'|\leqq 0.002,\ t_1\geqq 4.6 \qquad (22)$$

で，ほぼ

$$E_1(\%)\fallingdotseq 100u_1' \qquad (23)$$

が成り立つことがわかる．この関係を次元値になおすと，E m/s までの精度で流速を測定するとして走行速度に無関係に，

$$u'=a\cdot E,\quad \mathrm{s}^{-1} \qquad (24)$$

の流速変化まで測定できることになる．

例えば，$E=\pm 1$ mm/s, $a=70\mathrm{m}^{-1}$ とすると，(24)式から $u'=70\times 0.001=0.07\ \mathrm{s}^{-1}$ となり，**2** で例にあげた流速計では，1 m あたり 7 cm/s の流速変化まで，±1 mm/s の精度で測定できることがわかる．

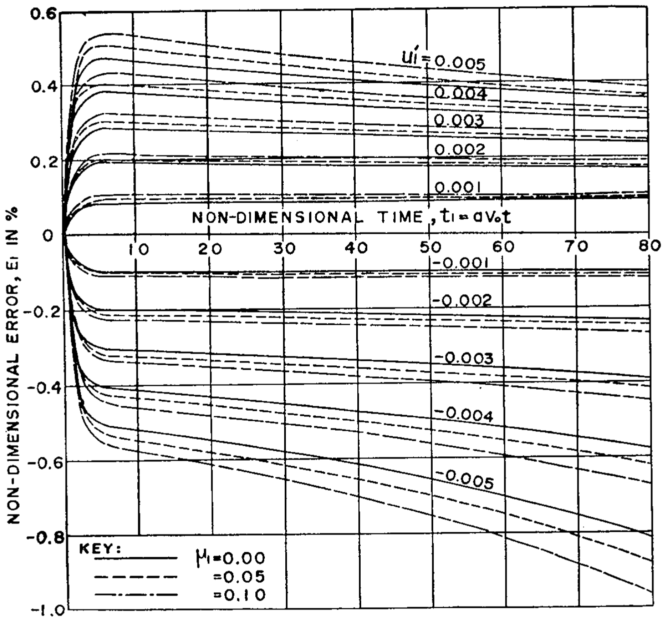

Fig. 7. Response of current meter to linear change of current.

3.4 正弦状の流速変化に対する応答

翼車型流速計は主として静的あるいは準静的な測定に使用されているが，波動状の流速変化に対する応答特性を調べておけば，波浪中の水槽試験あるいは乱れの測定等の変動量の測定にも積極的に利用できるであろう．このために，本節では正弦状の流速変化に対する応答を求めてみることにする．

前の場合と同様に，回転速度

$$n_0=\frac{V_0-\mu}{k},\quad \mathrm{rev.\cdot s^{-1}} \qquad (25)$$

で定常回転している流速計のまわりの流速が，Fig. 8 に示すように，振幅を $\bar{u}$，波長を λ，あるいは周波数を f として正弦状に

$$V=V_0+\bar{u}\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)=V_0+\bar{u}\sin(2\pi ft) \qquad (26)$$

で変化したとすると，(9)式は

$$\frac{dV_{n1}}{dt_1}=\left\{1+\bar{u}_1\sin(2\pi f_1t_1)-V_{n1}\right\}(V_{n1}-\mu_1) \qquad (27)$$

ここで，

$$\bar{u}_1=\bar{u}/V_0,\ f_1=1/(a\lambda)=f/(aV_0) \qquad (28)$$

となる．

3.3 と同様に適当な μ_1 および V_1 の値について数値解を求めたものが Fig. 9 である．元の微分方程式が非線型なので，Fig.8 に示すように応答は正弦状ではなく，正側と負側では振れ幅が異なる．これをそれ

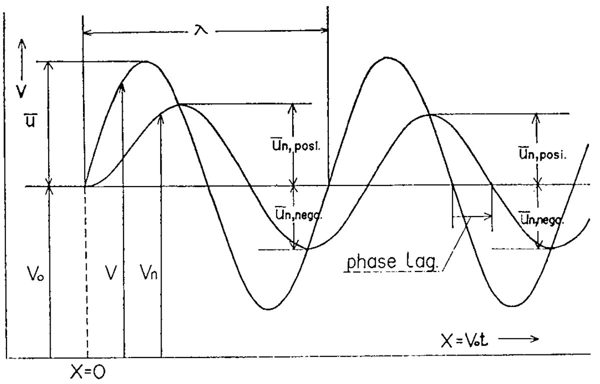

Fig. 8. Sine change of current.

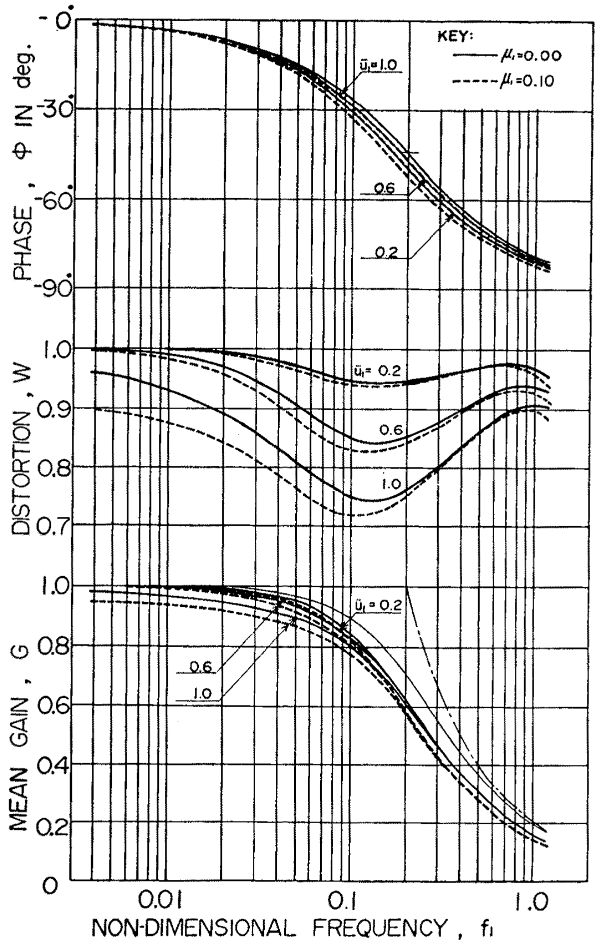

Fig. 9. Frequency response of current meter.

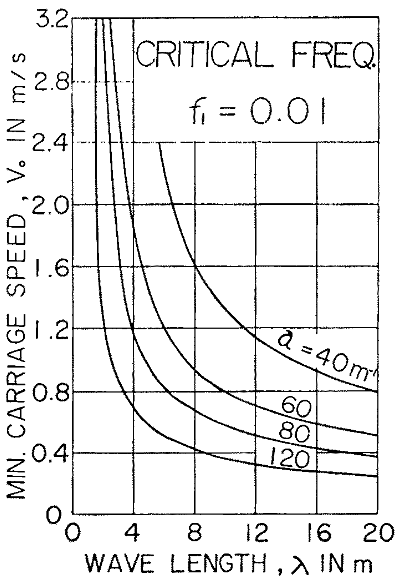

Fig. 10. Minumum carriage speed for measuring orbital motion of waves.

それぞれ $\bar{u}_{n,\,\mathrm{posi.}}$ および $\bar{u}_{n,\,\mathrm{nega.}}$ で表わし，**平均ゲイン** Gを

$$G=\frac{1}{2}(\bar{u}_{n,\,\mathrm{posi.}}+\bar{u}_{n,\,\mathrm{nega.}}), \tag{29}$$

正弦波形からの変化を表わすために，**変形**Wを

$$W=\bar{u}_{n,\,\mathrm{nega.}}/\bar{u}_{n,\,\mathrm{posi.}}, \tag{30}$$

また**位相**ϕを正側から負側に変わるゼロ点の位相差で定義する．$x=V_0t=0$ から過渡現象になるわけであるが，$f_1\leqq0.4$ では，振幅の各周期ごとの変化は3周期で0.1% 以下となり定常になる．Fig.9 に示した細実線および細破線は，それぞれ $\mu_1=0.0$ の場合の位相 $\phi=-45°$ における無次元周波数を折点とした1次系のゲインおよび漸近線（勾配－20 db/dc）を示したものである．この図から，翼車型流速計は，

$$\bar{u}_1\leqq0.6,\ f_1\leqq0.015 \tag{31}$$

の正弦状の流速変化に対して，

$$G\geqq98\%,\ W>97\%,\ \phi<5° \tag{32}$$

程度の忠実さで応答することがわかる．

実例として翼車流速計で波の軌道運動の水平方向速度成分を測る場合を考える．限界の無次元周波数 $f_{1c}=0.01$ として，aに対して最低の前進速度を求めると Fig.10 のようになる．この図から波長λが短くなるほど，またaが小すなわち慣性能率が大きくなるほど走行速度 V_0 を増して流速計の応答を早くしてやらなければならないことがわかる．また2m 以下の波長の波に対しては，慣性能率の特に小さな流速計を用意しなければならないことがわかる．

このようにして応答特性をあらかじめ調べておけば，変動量の測定に翼車型流速計を積極的に利用することができるであろう．

4. バッチング方式によって流速を算定する場合の誤差

較正式(6)によって指示流速を算定するためには翼車軸の回転速度nを検出しなければならない．現在，船型試験水槽では無接触，電気的検出に計数器を併用したディジタル方式が多く採用されている．これには一定時間内に回転速度に比例したパルスを発生させ，これを直接表示させる方式[6]と，翼車軸が一定数（以下，これをバッチング数と呼ぶ）N revs. だけ回転するに要する時間（以下，これをバッチング時間と呼ぶ）T_Ns を計測してこれから回転速度を逆算する方式[8]とがある．後者をバッチング方式と呼ぶことにする．流速に変動がある場合，バッチング方式によって算出された値はなにを示しているのであろうか．通常は T_Ns 間の平均値が得られるものとしているが，本文では真の平均値と上記の算定値との関係を調べてみる．

4.1 真の平均流速と算定流速との関係

バッチング数および時間をそれぞれ N revs. および T_N s とすると，較正式(6)は

$$V_N=\mu+k_N\frac{1}{T_N},\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}} \tag{33}$$

$$k_N=k\cdot N,\quad \mathrm{m} \tag{34}$$

となる．ここで，V_N は上式から算定された流速であって，以後これを**算定流速**と呼ぶことにする．N と T_N との間には

$$N=\int_0^{T_N} n\,dt,\quad \mathrm{revs.} \tag{35}$$

なる関係がある．T_N s 間の真の平均流速を $\overline{V}$ m/s とすると，(5)，(35)，(33)式を用いて，

$$\begin{aligned}\overline{V}&=\frac{1}{T_N}\int_0^{T_N} V\,dt=\frac{1}{T_N}\int_0^{T_N}\left(\mu+kn+\frac{1}{an}\frac{dn}{dt}\right)dt\\&=\mu+\frac{kN}{T_N}+\frac{1}{aT_N}\ln\frac{n_N}{n_0}\\&=V_N+\frac{1}{aT_N}\ln\frac{n_N}{n_0},\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}}\end{aligned} \tag{36}$$

ここで，n_0 および n_N はそれぞれ $t=0$ および $t=T_N$ における n の値である．これから真の平均流速 $\overline{V}$ と算定流速 V_N の間の偏差 E_N は次のようになる．

$$\begin{aligned}E_N&=\overline{V}-V_N\\&=\frac{1}{aT_N}\ln\frac{n_N}{n_0},\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}} \qquad (37)\\&\fallingdotseq\frac{1}{aT_N}\left(\frac{n_N}{n_0}-1\right),\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}}\end{aligned}$$

$$\text{ただし}\ \frac{n_N}{n}\fallingdotseq 1 \tag{38}$$

これから偏差は a が大きいほど，すなわち回転部分の慣性能率が小さく，一般に翼のピッチ比が大きいほど小さくなり，また当然のことであるが，バッチング数あるいは時間が大きいほど小さくなる．さらに上式の大きな特徴は，偏差が翼車の回転数を数え始める瞬間と数え終わる瞬間の回転速度にのみ関係し，途中の値には関係しないことである．したがって試験水槽で較正を行なう場合，たとえ残留流れがあったとしても，場所的な変化のない箇所で測られた往復の平均値を採用すればよいことがわかる[8),10)]．

相対偏差は

$$\frac{E_N}{\overline{V}}=\frac{1}{ak_N}\frac{V_N-\mu}{\overline{V}}\ln\frac{n_N}{n_0} \tag{39}$$

$$\fallingdotseq\frac{1}{ak_N}\left(\frac{n_N}{n_0}-1\right),\ \text{ただし}\ \mu\ll V,\ \frac{n_N}{n_0}\fallingdotseq 1 \tag{40}$$

で与えられる．

4.2 微小な流速変化を測定する場合の誤差

バッチング方式の流速計を用いて，船型試験水槽内の微小な残留流れを測定した例[9),10)]があるが，このような場合にどのような誤差が生じるかを検討してみよう．流速計の進行方向を x 軸とし，流速の微小な場所的変化を $u(x)$ cm/s，流速計の進行速度を V_0 m/s とすると，

$$\begin{aligned}\frac{n_N}{n_0}&=\frac{V_0+u(x+V_0T_N)}{V_0+u(x)}\\&\fallingdotseq\frac{V_0+u(x)+u'(x)V_0T_N}{V_0+u(x)} \qquad (41)\\&\fallingdotseq 1+T_Nu'(x),\ \text{ただし}\ \frac{u(x)}{V_0}\ll 1 \qquad (42)\end{aligned}$$

これと(38)式から，

$$E_N=\frac{1}{a}u'(x),\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}} \tag{43}$$

これは(24)式と同一である．この式から流速計の進行速度およびバッチング数あるいは時間は平均化するための距離 V_0T_N に関係するが，真の平均流速と算定流速との間の偏差には直接関係せず，流速計の特性係数 a と流速変化の割合のみがこれに関係することがわかる．なお(41)式の近似度を直線状の流速変化の場合について調べると

$$\left|\frac{n_N}{n}-\frac{V_0+u(x+V_0T_N)}{V_0+u(x)}\right|\leqq aV_0T_N|u_1'E_1| \tag{44}$$

となる．これから(22)式のような条件の場合 $|u_1'E_1|$ は 4×10^{-4} 程度であるから，この条件のもとでバッチング方式の場合も(24)式が十分成り立つことがわかる．

5. 結　　言

以上で翼車型流速計の動作特性について検討したわけであるが，その結果をまとめると次のようになる．

(1) 段状および線型の流速変化に対する応答の一般的な性質，すなわち指示速度 V_n，あるいは偏差 E に及ぼす走行速度 V_0，流速計の特性係数 a, k, μ の影響がわかった（**3.1** および **3.3**）．

(2) 段状の流速変化に対し，

流速変化率 $\gamma=(V-V_0)/V_0=V_1-1$ (14)

限界値 $\alpha=(V-V_n)/(V-V_0)=E_1(V_1-1)$ (15)

を定義し，偏差が流速変化の $100\alpha\%$ になるまでに流速計が走行する距離を距離定数 $D_{100\alpha}$ とすると，

$$D_{100\alpha}=\frac{1}{a}\frac{1}{1+\gamma-\mu_1}\ln\frac{1+\gamma-\mu_1-\alpha\gamma}{\alpha(1-\mu_1)} \tag{16'}$$

$$=\frac{1}{a}(1+\mu_1)\{-\ln\alpha-(-\ln\alpha-1)\gamma\},\ \mathrm{m} \quad (17)'$$

となり，これは流速計の応答の速さを示す目安として便利な量である．また偏差の絶対値が曳引車の速度制御の精度 ±1mm/s 程度になるまでに流速計の進行する距離も $D_{1.0}$ 程度である (**3.2**)．さらに流速が線型に変化する場合も，この程度の走行距離で偏差は一定となる (**3.3**)．

(3) 一般的にいって同量の流速変化でも，増加の場合の方が減少の場合よりも応答が速い (**3.1** および **3.3**)．

(4) 正弦状の流速変化を測定する場合，変動の振幅と走行速度の比 $u_1=\bar{u}/V_0$ および無次元周波数 $f_1=1/(a\lambda)=f/(aV_0)$ の値，

$$u_1\leqq 0.6,\quad f_1\leqq 0.015 \quad (31)$$

に対して，

平均ゲイン $G\geqq 98\%$，歪率 $W\geqq 97\%$，位相差 $\phi\leqq 5°$ (32)

の精度で追従する (**3.4**)．

(5) バッチング方式によって流速を算定する場合，バッチング時間 T_N s 間の真の平均流速 $\bar{V}$ と算定流速 V_N との偏差は，(37)あるいは(38)式で与えられ，T_N s 間の始めと終りの回転速度 n_0 と n_N のみに関係し，途中の値には関係しない．またこの式から流速計の特性係数 a, k, μ およびバッチング数 N の偏差に及ぼす影響がわかる (**4.1**)．

(6) 線型の流速変化の場合，

$$\mu/V_0<0.1,\ |u'/(aV_0)|<0.002$$

ならば，偏差 E の範囲内で走行速度 V_0 に無関係に，

$$u'=aE,\quad \mathrm{s}^{-1} \quad (24),\ (43)$$

の流速変化まで測定できる．これはバッチング方式の場合も成り立つ (**4.2**)．

なお，本文中の数値計算は船舶技術研究所三鷹第2船舶試験水槽用解析設備 (TOSBAC-300B) によった．

参考文献

1) 山県昌夫：船型試験法，共立社，昭和12年
2) 研野作一：伴流測定用翼車型流速計，造船協会雑纂，第256号 p. 194～200，昭和18年7月．
3) Newton, R. N.: Standard Model Technique at Admirality Experiment Works,Haslar, RINA, Vol. 103, p. 435～464, 1960.
4) 谷口　中：世界の主要水槽の試験方法について，第1回試験水槽シンポジウム，造船協会，3·1·3，p.14～15，昭和39年11月
5) 神中竜雄：抵抗試験法，抵抗・推進シンポジウム，造船学会，p15～26 昭和42年6月．
6) 神中竜雄，山崎禎昭：横浜水槽における計測器と計測システム 石川島播磨技報，No. 29，p.48～59，1968
7) 鶴岡健介，小型流速計について，船舶技術研究所報告，第4巻，5号，p.33～35，昭和42年9月．
8) 田崎　亮，北川弘光，武井幸雄，小山鴻一，岡本三千朗：水槽試験法に関する研究（第1報）—— 流速計について ——，船舶技術研究所報告（未刊）．
9) Ferguson, A. M.: An Investigation into the Effects of Temperature Diffierence on Water Movement, RINA., Vol. 108, p. 165～171, 1966.
10) 田崎　亮，北川弘光，小山鴻一，岡本三千朗：水槽試験法に関する研究（第2報）—— 水槽内の残留流れについて ——，船舶技術研究所報告（未刊）．
11) 田古里哲夫，増永公明，岡本　恒，馬場信義：肥大船船尾ビルジ渦に関する実験的研究，日本造船学会論文集，第123号，p. 49～58，昭和43年6月．
12) 粟谷陽一：水槽実験用流速計に就て，九州大学応用力学研究所々報，第12号，p.33～38．昭和33年．
13) 粟谷陽一：風車型流速計の特性について，九州大学応用力学研究所々報，第16号，p.35～42，昭和36年．
14) Durand, W. F. ed., "Aerodynamic Theory", Vol. IV, Glauert, H., Division L, Chap. XI, Berlin, J. Springer, p. 324～341, 1935.