

# 浮子の運動機構と竿浮子の補正係数について

正員 春日屋 伸 昌\*

## THE MECHANICS OF DRIFTING FLOATS AND THE CORRECTION COEFFICIENT OF A ROD FLOAT

By Nobumasa Kasugaya, C.E. Member

**Synopsis :** The author refers to the results of preceding experiments made by others on some kinds of floats and he expresses his opinion that the reasonable value of the correction coefficient of a surface float should be 0.85. Regarding a rod float, he gives a relation between the correction coefficient ( $\lambda$ ) and the ratio ( $n$ ) of the depth of immersion of the float to the actual depth of the water. This relation has been theoretically derived by applying the author's equation for the vertical velocity distribution to the mechanics of the motion of the rod float in running water. If the wind may be neglected and  $n=0.60\sim 0.95$ , the above relation is reduced to a formula,  $\lambda=1.053-0.214\sqrt{1-n}$ , which coincides satisfactorily with the results of the author's experiments.

**要 旨** 各種の浮子についての既往の実験結果について略述し、表面浮子に対する補正係数  $\lambda$  は 0.85 とするのが合理的であることを結論し、竿浮子についてはその運動機構から、筆者の垂直流速曲線式を用いて、補正係数  $\lambda$  と竿浮子の吃水比  $n$  との理論的な関係式を誘導し、無風時において  $0.60\leq n\leq 0.95$  の範囲内で使用される式  $\lambda=1.053-0.214\sqrt{1-n}$  を誘導し、96 個の実験資料は十分満足すべき程度に合致することを示す。

### 1. まえがき

開水路での流速を直接に測定する 1 つの計器として古来浮子が用いられてきた。これには、表面浮子、2重浮子、繫留浮子および竿浮子がある。

表面浮子は表面流速  $v_s$  を直接に測定して、これに補正係数  $\lambda$  を掛け、垂直線にそつての縦平均流速  $v_m$  を求めるものである。補正係数  $\lambda$  の値に関して、Wagner<sup>1)</sup> は 0.64~0.97, 平均 0.84 であるとし、Addisson<sup>2)</sup> はこの値は水深が増大すればするほど増大し、河底粗度が増大すれば減少し、ほぼ 0.82~0.92 の範囲にあるが、風によつて大きく影響されるといい、表面浮子は普通の場合最大  $\pm 8\sim 10\%$  の誤差をとまらうと述べている。もし、Bazin の垂直流速曲線の方程式、 $v=v_m+[8-24(z/h)^2]\sqrt{hI}$  を用い、 $v_m=C\sqrt{hI}$  ( $C$ : Chézy の流速係数) とおけば、 $\lambda=v_m/v_s=1/\{1+(8/C)\}$  となり、 $C$  が大きいほど  $\lambda$  の値は大きくなる。すなわち、 $C=30\sim 90$  とすれば、 $\lambda=0.79\sim 0.92$  となる。しかし、Bazin の公式は、最大流速が水表面に存在する場合であつて、水面以下に存在する場合には、 $\lambda$  の値は上記のものより大きくなり、 $\lambda=0.82\sim 0.95$  となる。<sup>3)</sup> また、物部博士<sup>4)</sup> は、 $\lambda$  の値は水路の水面幅  $b$  と平均水深  $h$  との比  $b/h$  の値が大きくなるに従つて小さくなり、 $b/h=5\sim 100$  に対して  $\lambda=0.98\sim 0.83$  であると述べておられる。また、同博士は、 $\lambda$  の値は一般に Chézy の流速係数  $C$  の大きいほどすなわち潤辺が平滑で水深が大きいほど大きくなり、各国での  $\lambda$  の値を挙げておられる。筆者<sup>5), 6)</sup> はかつて U.S. Geological Survey の 679 個の資料を統計的に処理した結果、 $1/k=v_m/v_s$  は正規分布をし、その母平均は 0.85, 母分散は 0.0064 であつて、しかも  $1/k$  は水深、粗度、水面勾配などの諸因子とはほとんど無相関で、主として風向と風速によつて変動すると述べた。表面浮子の補正係数  $\lambda$  は、表面浮子があらかじめ定められた流下距離を流下する時間内での  $v_m/v_s$  の平均値であるから、無風時における値としては、正規分布の母平均としての 0.85 を採用すればよいが、表面浮子は横からの風や渦によつて偏流する傾向があるため大きな誤差を招きやすい。

2重浮子は 1869 年 D.F. Henry により St. Clair 河で用いられてより、1874 年には T.G. Ellis により Connecticut 河で、1879 年には G.A. Marr により Mississippi 河で用いられたことが報告されている<sup>7)</sup>。Ellis は流速計と 2重浮子とを用いて垂直線の各 10 等分点での流速測定をおこなつてその精度を比較し (縦平均流速が 1.86 ft/sec 以下のものと以上のものとの 2組にわけて処理してある)、縦平均流速は 2重浮子によるものの方が流

\* 工学博士、中央大学教授、工学部土木工学科教室

速計による値よりも 6~26% 大きく、この差は流速が減少するほど大きくなることを報告した。Marr は流速計と 2 重浮子との比較実験をおこなった (河幅は 2000 ft, 2 重浮子は流れの中央部付近を流下させ、ここでの水深は約 16.4 ft)。全流下距離 200 ft を 50 ft ずつに 4 等分し、10 本の浮子 (水中浮子は水深の中央) を使用し、流下距離の長短による比較もおこなった。この結果によると、2 重浮子による縦平均流速は、流下距離の長短にかかわらず、流速計による値よりも約 3.5% 大きかった。Henry も流速計と 2 重浮子との比較実験をおこなった。これによると、水面下 10 ft までは 2 重浮子による流速は流速計のそれより小さく、10 ft より深い点では流速計のそれより大きくなり、この差は河底に近くなるほど増大する。この理由は次のように考えられる。すなわち、表面流速と等しい流速を示す垂直流速曲線上の点を考えると、水中浮子がこの点よりも上方にあるときには、水中浮子は表面浮子によつて減速され、したがつて過小な値を与える。これに反し、上記の点よりも深いところに水中浮子があれば、表面浮子によつて加速され過大な値を与えるのである。したがつて、Henry の実測は垂直流速曲線における最大流速の位置が水面下にあり、表面流速に等しい流速の点が水面下 10 ft, したがつて、最大流速の位置が水面下約 5 ft (全水深は 45 ft) の点にある場合についてのものであつたと想像される。このように、2 重浮子は水中浮子の位置によつて過小または過大な値を与え、縦平均流速に換算するための補正係数もまだ発表されていないようである。その上、水中浮子の位置は風向と風速および 2 つの浮子を連結する索条の長さによつて変化するため、その正しい位置を定めるのがきわめて困難である<sup>9)</sup>。

繫留浮子<sup>9)</sup>は表面浮子の下部に伸縮自在なズック製のスカートを付属させ、水深に応じてスカートの長さを容易に調節しようように考案された浮子である。浮子には軽い索条が結びつけられ、その他端は船上のリールにとりつけられる。船を所定の位置に止め、浮子の流れにつれて索条の弛みがないようにリールの回転を調節し、浮子が流下距離を流下する時間を測定し終れば、リールによつて浮子を捲き上げる。この繫留浮子は使用が簡単で観測者は 1 名でよく成績がすこぶるよいとされているが、十分な実験報告がまだないため、その精度は不明というほかはない。

最も信頼するに足る浮子は竿浮子である。J.B. Francis<sup>10)</sup> は、1856 年、Lowell における水路で竿浮子と標準堰との比較実験をおこなった。水路は木製で 63 個の実験のおこなわれた場所の水面幅は 27.75 ft, 52 個の実験のおこなわれた場所の水面幅は 14 ft で、全断面平均流速は 0.5~5 ft/sec, 漸近流下距離は 28 ft, 流下距離は 70 ft である。浮子は直径 2 in のブリキ製の筒で下端に錘をつけ、鉛直に立つて流下するように調節された。浮子は水面幅にそつて 1 ft の間隔ごとに投入され、観測流速を方眼紙上に打点して水面幅全体にわたつての平滑な横断流速曲線を描き、これより全断面平均流速  $V_m'$  を算出した。個々の浮子の観測流速の横断流速曲線よりの偏差は -11.4~+8.57% であつた。Francis はこの実験結果より観測流速  $V_m'$  から真の全断面平均流速  $V_m$  を算出するための補正係数  $\lambda$  として、次の有名な Francis の公式を誘導した。すなわち、 $\lambda = 1 - 0.116(\sqrt{(h-nh)}/h - 0.1) = 1.0116 - 0.116\sqrt{1-n}$  である。ここに、 $h$  は水深で、 $n$  は浮子の水中の長さの水深に対する比すなわち吃水比である。実験は  $n$  の値が 0.871~0.996 にわたつておこなわれた。この補正係数を用いると 115 個の実験値はきわめてよく堰による流量と合致し、誤差は 0.1% のものが 9 個、0.1~1% のものが 79 個、1~1.9% のものが 23 個、2~2.9% のものが 2 個、3.69% のものが 1 個であつた。この実験が示すように、Francis の公式は実験のおこなわれた状況のもとにおいてのみ適用されるべきもので、しかも重要なことは、上の補正係数は矩形水路の全断面平均流速したがつて流量に対するものであつて、個々の垂直流速曲線にそつての縦平均流速に対する補正係数ではないということである。すなわち、自然河川にこの公式を適用し、しかも垂直線にそつての縦平均流速への補正係数として採用することは公式の正しい適用ではない。

1900 年、G.S. Williams の指揮下で、E.C. Murphy と W.P. Boright その他の人達が Cornell 大学の水理実験室 (水面幅 16 ft, 長さ 415 ft, 側壁と底はコンクリート、底勾配は 1/500) において竿浮子と標準堰との比較実験をおこなつた結果によると<sup>11)</sup>、竿浮子による流量は、水深 (5.847~9.356 ft), 流速 (0.235~1.983 ft/sec), 吃水比 (0.75 と 0.90) のいかにかわらず堰による値よりも大きく、吃水比 0.75 および 0.90 の浮子に対して最大誤差はそれぞれ 6.11%, 3.54%, 平均誤差はそれぞれ 3.54%, 2.14% で、誤差は水深、流速および吃水比が減少するにつれて増大した。このように、吃水比が小さくなるにつれて誤差が大きくなるのは、短い浮子ほど底部の低流速の影響をうけなないためであると考えられる。

以上のほか、Brown や Massachusetts 工科大学などによつてそれぞれ発表された補正係数<sup>12)</sup>があるが、竿浮子の運動機構について考察し、理論的な補正係数を誘導したのは、物部博士<sup>13)</sup>と安芸博士<sup>14)</sup>である。物部博士は竿浮子が一定の速度で流下するためには、浮子の各部分に作用する力の総和は 0 でなければならぬから、ある点の動水圧を竿浮子と流水との速度差の 2 乗に比例するとすれば、垂直流速曲線の方程式を適当にえらぶことに

よつて、補正係数を理論的に誘導しようと述べ、円筒形竿浮子と回転放物線形竿浮子につき、Humphreys および Bazin の式を使用して  $\lambda$  の値を誘導された。安芸博士も物部博士の理論に基づき、安芸博士の仮定した垂直流速曲線の方程式を用いて、円筒形浮子につき補正係数の値を誘導された。ところで、両博士とも浮子に働く外力は動水圧と浮子の重さであるとし、浮子に働く浮力を考慮しておられないが(林泰造博士の指摘による)、筆者は物部博士の理論に基づき、浮子に加わる外力として浮力をも加え、かつ筆者がかつて誘導した垂直流速曲線の方程式<sup>(15),(16)</sup>を使用して、円筒形竿浮子による観測流速より縦平均流速を推定するための補正係数を理論的に誘導し、実験値と照合しようと試みるものである。

2. 竿浮子の運動機構

竿浮子は流水に投入されてから動水圧のため加速され、ある時間を経過した後は、一定の速度  $v_f$  を以つて流下する。竿浮子に作用する外力は、流水の速度  $v$  と竿浮子の速度  $v_f$  との差に基因する動水圧と、竿浮子の自重と、竿浮子に働く浮力と、水表面上の竿浮子の一部に働く風圧とである。風圧は微小であるからこれを無視し、竿浮子は鉛直に立って流下するものとすれば、自重と浮力とは釣合つているためこれらを考慮する必要はない。したがつて、竿浮子が一定の速度  $v_f$  に達して以後は、流水の速度  $v$  が  $v_f$  より大きい点での動水圧を正、 $v$  が  $v_f$  より小さい点での動水圧を負とすれば、力の平衡より、正の動水圧の総和は負の動水圧の総和とその大きさが等しくなければならない。

いま、垂直流速曲線の方程式として、筆者がかつて誘導した次の式、

$$v = (v_m/p)\{pk + 2\alpha(z/h) - (z/h)^2\}, \quad p = (1-3\alpha)/3(k-1) \dots\dots\dots (a)$$

を用いる。ここに、 $v$  は水表面より  $z$  の深さでの流速、 $h$  は水深、 $\alpha$  は最大流速の位置の水深に対する割合、 $k$  は表面流速  $v_s$  と縦平均流速  $v_m$  との比である。 $\alpha$  と  $k$  との2つのパラメータによつて上の方程式は定まるが、これらの値が水深、水面勾配、水面幅、河底粗度、風向と風速などの諸因子によつてどのように変動するかについては前に発表した論文<sup>9)</sup>で考察したとおりである。

図-1 は竿浮子の速度  $v_f$  と垂直流速曲線の形状との関係を3つに分類して示したものである。竿浮子の水中の長さ(吃水)を水深で割つたものを吃水比と名づけて  $n$  とおき、垂直流速曲線上で竿浮子の速度  $v_f$  と等しい速度を有する点までの深さの水深に対する比を  $m$  とおく。

図-1 の (I) は  $m > \alpha$  の場合、(II) は垂直流速曲線上で  $v_f$  と等しい速度を有する点が2つ存在する場合であつて、上方の点の深さの割合を  $m (m < \alpha)$  とすれば、下方の点でのそれは  $2\alpha - m$  となる。(III) は  $m < \alpha$  でしかも垂直流速曲線上で  $v_f$  に等しい点がかた1つ存在する場合である。

これら3つの場合のいずれにおいても、(a)式より、次の関係がえられる。

$$v_f = (v_m/p)(pk + 2\alpha m - m^2) \dots\dots\dots (b)$$

さて、動水圧は相対速度の2乗に比例するものとし、竿浮子は直径が全長にわたつて一様な円筒形であるとするれば、(I)においては次の式が成り立つ。

$$\int_0^{mh} (v - v_f)^2 dz = \int_{mh}^{nh} (v_f - v)^2 dz$$

$$\therefore 2 \int_0^{mh} (v - v_f)^2 dz = \int_0^{nh} (v_f - v)^2 dz \dots\dots\dots (c)$$

(a)式と(b)式とより、

$$(v - v_f)^2 = [(v_m/p)\{pk + 2\alpha(z/h) - (z/h)^2\} - (v_m/p)(pk + 2\alpha m - m^2)]^2$$

$$= (v_m^2/p^2)\{m^2 - 2\alpha m + 2\alpha(z/h) - (z/h)^2\}^2 \dots\dots\dots (d)$$

(d)式を(c)式に入れて積分し整理すれば、

$$\{16m^4 - 5(3n + 10\alpha)m^3 + 20(3n + 2\alpha)\alpha m^2 + 10(n^2 - 3\alpha n - 6\alpha^2)nm - 20(n - 3\alpha)\alpha n^2\}m$$

$$= (20\alpha^2 - 15\alpha n + 3n^2)n^3 \dots\dots\dots (e)$$

(I)の場合には、明らかに次の不等式が成り立つ。

$$m \geq 2\alpha \dots\dots\dots (f)$$

そこで、吃水比  $n (0.00 < n < 1.00)$  と最大流速の位置の割合  $\alpha$  との種々な値に対し、(f)式の条件のもとで、(e)式を解き  $m$  の値を定めれば表-1がえられる。表に数値の記入してないところでは、(f)式の条件が満足されていないことを表す。すなわち、(I)の場合には属さないものである。 $\alpha$ の値としては、筆者がかつて考察したように<sup>9)</sup>、 $-0.10 \sim 0.30$ の範囲に生ずる確率が70%以上であるから、この範囲だけでほぼ十分なわけであ

るが、ここでは $\alpha$ の全区間  $-0.30 \sim 0.30$  にわたつて 0.10 おきにとり、そのおのおのに対して  $m$  の値を計算しておいた。

表-1 (I) の場合の  $m$  の値

$n$	$\alpha$							$n$	$\alpha$						
	-0.30	-0.20	-0.10	0.00	0.10	0.20	0.30		-0.30	-0.20	-0.10	0.00	0.10	0.20	0.30
1.00	0.574	0.583	0.595	0.610	0.631	0.658	0.694	0.50	0.278	0.283	0.292	0.303	0.329	—	—
0.95	0.544	0.553	0.565	0.580	0.599	0.628	0.665	0.45	0.249	0.253	0.261	0.275	0.299	—	—
0.90	0.514	0.523	0.534	0.550	0.570	0.598	0.637	0.40	0.220	0.224	0.231	0.244	0.270	—	—
0.85	0.494	0.493	0.504	0.519	0.539	0.569	0.609	0.35	0.191	0.195	0.201	0.214	0.241	—	—
0.80	0.455	0.463	0.474	0.488	0.509	0.540	—	0.30	0.162	0.166	0.171	0.183	0.212	—	—
0.75	0.425	0.433	0.443	0.458	0.479	0.510	—	0.25	0.134	0.137	0.142	0.153	—	—	—
0.70	0.395	0.403	0.413	0.427	0.449	0.482	—	0.20	0.106	0.108	0.112	0.122	—	—	—
0.65	0.365	0.373	0.383	0.397	0.419	0.453	—	0.15	0.079	0.080	0.083	0.092	—	—	—
0.60	0.336	0.343	0.352	0.366	0.389	0.427	—	0.10	0.052	0.052	0.054	0.061	—	—	—
0.55	0.307	0.313	0.322	0.336	0.359	—	—	0.05	0.025	0.026	0.026	0.031	—	—	—

(II) の場合には、図-1 の (II) より次の式が成り立つ。

$$\int_{nh}^{(2\alpha-m)h} (v-v_f)^2 dz = \int_0^{nh} (v_f-v)^2 dz + \int_{(2\alpha-m)h}^{nh} (v_f-v)^2 dz$$

$$\therefore 2 \int_0^{nh} (v_f-v)^2 dz = 2 \int_0^{(2\alpha-m)h} (v-v_f)^2 dz - \int_0^{nh} (v_f-v)^2 dz \dots\dots\dots (g)$$

(d) 式を (g) 式に入れば次の式がえられる。

$$\{32m^4 - 5(32\alpha - 3n)m^3 + 20(16\alpha - 3n)\alpha m^2 - 10(32\alpha^3 - 6\alpha^2 n - 3\alpha n^2 + n^3)m + 20(8\alpha^3 - 3\alpha n^2 + n^3)\alpha\}m = 32\alpha^5 - 20\alpha^2 n^3 + 15\alpha n^4 - 3n^5 \dots\dots\dots (h)$$

また、この場合には、 $n \geq 2\alpha - m$  より、

$$m \geq 2\alpha - n > 0 \dots\dots\dots (i)$$

ゆえに、(i) 式の条件のもとで (h) 式を解き  $m$  の値を定めれば、表-2 がえられる。

表-2 (II) の場合の  $m$  の値

$n$	$\alpha$			$n$	$\alpha$		
	0.10	0.20	0.30		0.10	0.20	0.30
0.85	—	—	—	0.45	—	0.058	—
0.80	—	—	0.019	0.40	—	0.078	—
0.75	—	—	0.047	0.35	—	0.081	—
0.70	—	—	0.074	0.30	—	—	—
0.65	—	—	0.098	0.25	0.016	—	—
0.60	—	—	0.117	0.20	0.039	—	—
0.55	—	0.004	0.128	0.15	—	—	—
0.50	—	0.031	0.131	0.10	—	—	—

(III) の場合には、図-1 の (III) より次の式が

成り立つ。

$$\int_{nh}^{nh} (v-v_f)^2 dz = \int_0^{nh} (v_f-v)^2 dz$$

$$\therefore 2 \int_0^{nh} (v_f-v)^2 dz = \int_0^{nh} (v-v_f)^2 dz \dots\dots\dots (j)$$

(d) 式を (j) 式に入れてえられる式は (I) の場合の (e) 式とまったく同じになるが、この場合の条件式は、

$$m < 2\alpha - n \dots\dots\dots (k)$$

(k) 式の条件のもとで (e) 式を解き  $m$  の値を定めれば表-3 がえられる。

さて、 $\alpha \leq 0.00$  の場合、すなわち最大流速が水表面下に存在しない場合には、竿浮子の速度  $v_f$  と垂直流速曲線との関係は (I) の場合しか考えられないが、 $\alpha > 0.00$  の場合には、(I)、(II)、(III) の3つの場合が考えられ、一定な  $\alpha$  に対して、吃水比  $n$  が 1 に近いときには (I) の場合に属するが、 $n$  がある限界以下となると (II) の場合に移行する。このような限界となる  $n$  を仮りに限界吃水比と名づけ  $n_0$  で表わそう。 $n_0$  の値を求めるには、(e) 式において  $n = n_0$ 、 $m = 2\alpha$  とおくと、あるいは (h) 式において  $n = n_0$ 、 $m = 0$  とおいてえられる次の方程式を解けばよい。

$$3n_0^5 - 15\alpha n_0^4 + 20\alpha^2 n_0^3 - 32\alpha^3$$

$$\therefore 3(n_0/\alpha)^5 - 15(n_0/\alpha)^4 + 20(n_0/\alpha)^3 - 32 \dots\dots\dots (l)$$

(l) 式の根は  $n_0/\alpha = 2.78$  であるから、 $\alpha = 0.10, 0.20, 0.30$  に対する限界吃水比  $n_0$  の値は表-4 のようになる。

表-4  $n_0$  の値

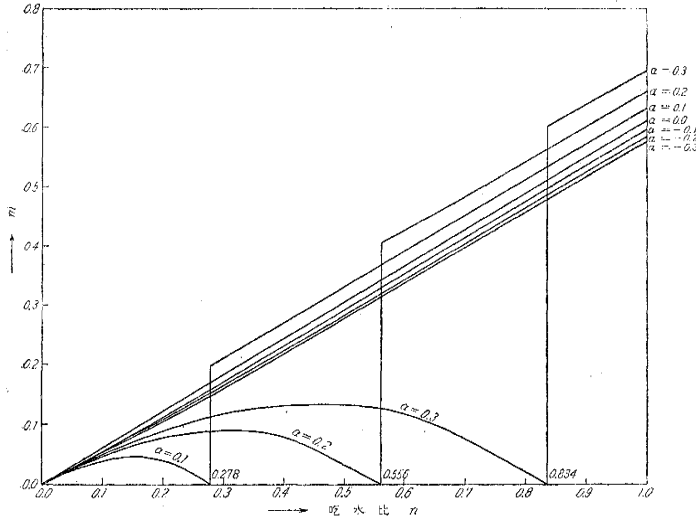
$\alpha$	0.10	0.20	0.30
$n_0$	0.278	0.556	0.834

表-3 (III) の場合の  $m$  の値

$n$	$\alpha$			$n$	$\alpha$		
	0.10	0.20	0.30		0.10	0.20	0.30
0.50	—	—	—	0.25	—	0.086	0.104
0.45	—	—	0.132	0.20	—	0.078	0.088
0.40	—	—	0.130	0.15	0.044	0.064	0.069
0.35	—	—	0.126	0.10	0.039	0.046	0.049
0.30	—	0.088	0.117	0.05	0.023	0.024	0.024

表-1~表-4 の結果を、横軸に吃水比  $n$ 、縦軸に  $m$  をとつて図示したものが図-2 である。 $\alpha \leq 0.00$  の場合はすべて (I) に属し、曲線は原点を通

図-2



つてほとんど直線的に増加する。 $\alpha > 0.00$  の場合は、 $n$  が小さいと上方に凸な増加曲線でこの範囲が(Ⅲ)に属し、ある値より $n$ が大きくなると上方に凸な減少曲線となり、この範囲が(Ⅱ)に属する。この曲線が横軸を切る点が限界吃水比  $n_0$  を与え、ここで曲線は不連続となり、 $n > n_0$  ならば、 $\alpha \leq 0.00$  の曲線群とほぼ平行な曲線に移行し、これはほとんど直線的に増加する。この直線部が(Ⅰ)に属するのである。

3. 竿浮子の補正係数の理論的誘導

前節において、垂直流速曲線における最大流速の位置の割合  $\alpha$  および竿浮子の吃水比  $n$  がわかれば、竿浮子が一定の速度  $v_f$  を保つて流下するとき、 $v_f$  と等しい流速を与える垂直流速曲線上の位置の水深に対する割合  $m$  が表-1~表-3 あるいは 図-2 から定められることを述べた。このようにして  $m$  の値が求められれば、竿浮子の補正係数  $\lambda$  は、前節の (b) 式を用いて、次の式より計算される。

$$\lambda = v_m / v_f = p / (pk + 2\alpha m - m^2), \quad p = (1 - 3\alpha) / 3(k - 1) \dots\dots\dots (1)$$

表-1~表-3 あるいは 図-2 および (1) 式より種々の  $\alpha, k, n$  に対する  $\lambda$  の値を求めれば 表-5 をうる。ただし、図-1 の (Ⅰ) の場合には  $v_f \leq v_s$  であるから  $\lambda \geq 1/k$ 、(Ⅱ) および (Ⅲ) の場合には  $v_f > v_s$  であるから  $\lambda < 1/k$  である。筆者がかつて述べたように<sup>6)</sup>、 $k$  の値はほとんど 1.0~1.4 の範囲にあつて、強い順風が吹い

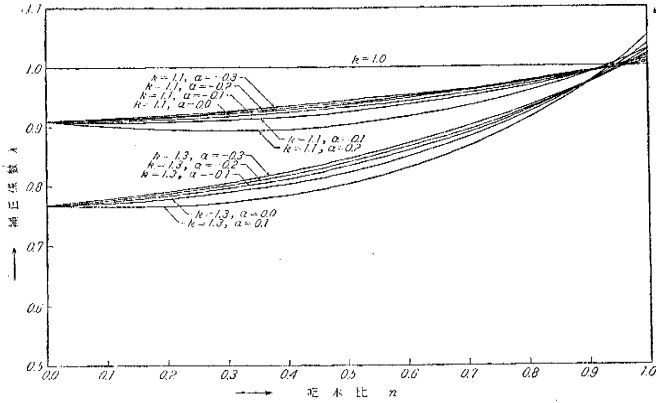
表-5 竿浮子の補正係数の値

n \ k		$\alpha = -0.3$				$\alpha = -0.2$				$\alpha = -0.1$			
		k=1.4	k=1.3	k=1.2	k=1.1	k=1.4	k=1.3	k=1.2	k=1.1	k=1.4	k=1.3	k=1.2	k=1.1
1.00		1.026	1.020	1.013	1.006	1.031	1.023	1.015	1.008	1.038	1.028	1.019	1.009
0.90		0.963	0.972	0.981	0.991	0.963	0.972	0.981	0.991	0.963	0.972	0.981	0.991
0.80		0.912	0.932	0.954	0.976	0.909	0.930	0.952	0.976	0.905	0.927	0.950	0.974
0.70		0.868	0.898	0.929	0.963	0.864	0.894	0.927	0.962	0.857	0.889	0.923	0.960
0.60		0.832	0.869	0.909	0.952	0.827	0.865	0.905	0.950	0.819	0.858	0.901	0.948
0.50		0.803	0.844	0.891	0.942	0.797	0.839	0.887	0.940	0.789	0.833	0.882	0.937
0.40		0.778	0.823	0.875	0.933	0.772	0.819	0.871	0.931	0.764	0.812	0.867	0.928
0.30		0.756	0.805	0.861	0.925	0.752	0.802	0.859	0.924	0.745	0.796	0.854	0.921
0.20		0.739	0.791	0.850	0.919	0.736	0.788	0.848	0.918	0.731	0.784	0.845	0.916
0.10		0.725	0.779	0.841	0.914	0.723	0.777	0.839	0.913	0.721	0.775	0.838	0.912
0.00		0.714	0.769	0.833	0.909	0.714	0.769	0.833	0.909	0.714	0.769	0.833	0.909

n \ k		$\alpha = 0.0$				$\alpha = 0.1$				$\alpha = 0.2$			$\alpha = 0.3$		
		k=1.4	k=1.3	k=1.2	k=1.1	k=1.4	k=1.3	k=1.2	k=1.1	k=1.3	k=1.2	k=1.1	k=1.2	k=1.1	k=1.05
1.00		1.049	1.036	1.024	1.012	1.071	1.052	1.034	1.017	1.089	1.058	1.028	1.237	1.106	1.050
0.90		0.964	0.973	0.982	0.991	0.963	0.972	0.981	0.990	0.968	0.978	0.989	0.945	0.972	0.986
0.80		0.897	0.921	0.946	0.972	0.885	0.911	0.939	0.968	0.885	0.920	0.958	0.790	0.883	0.938
0.70		0.847	0.880	0.917	0.957	0.828	0.865	0.906	0.950	0.826	0.877	0.934	0.698	0.822	0.902
0.60		0.807	0.848	0.893	0.944	0.785	0.829	0.880	0.936	0.785	0.846	0.916	0.650	0.788	0.881
0.50		0.776	0.822	0.874	0.933	0.753	0.803	0.859	0.924	0.754	0.822	0.902	0.637	0.779	0.876
0.40		0.753	0.802	0.859	0.924	0.731	0.784	0.845	0.916	0.737	0.806	0.894	0.638	0.779	0.876
0.30		0.735	0.787	0.848	0.917	0.717	0.771	0.835	0.910	0.734	0.806	0.892	0.650	0.788	0.881
0.20		0.724	0.777	0.840	0.913	0.709	0.765	0.830	0.907	0.737	0.808	0.894	0.680	0.810	0.895
0.10		0.717	0.771	0.835	0.910	0.709	0.765	0.830	0.907	0.748	0.817	0.899	0.734	0.847	0.917
0.00		0.714	0.769	0.833	0.909	0.714	0.769	0.833	0.909	0.769	0.833	0.909	0.833	0.909	0.952

図-3



て  $k$  の値が大きくなれば  $\alpha$  の値は小さくなるから、 $\alpha \leq 0.1$  に対しては  $k=1.1 \sim 1.4$ 、 $\alpha=0.2$  に対しては  $k=1.1 \sim 1.3$ 、 $\alpha=0.3$  に対しては  $k=1.05 \sim 1.2$  とつた。 $\alpha=0.3$  の場合にだけ  $k=1.05$  について計算したのは、 $k=1.05$  と  $k=1.1$  との間の変動がこの場合にはいちじるしいからである。表-5 の結果から代表的なものをとりまとめて図示したものが 図-3 である。

表-5 あるいは 図-3 より明らかなことは次の諸点である。

(1) 竿浮子の補正係数  $\lambda$  は、竿浮子の吃水比  $n$  および竿浮子が流下する鉛直面内での垂直流速曲線の形状すなわち最大流速の位置の割合  $\alpha$  および表面流速と縦平均流速との比  $k$  によつて定められるが、 $\alpha$  と  $k$  との2つのパラメータのうち、 $\lambda$  の選定により大きな影響を及ぼすものは  $k$  の値である。このことは 図-3 において、 $k$  が等しく  $\alpha$  の異なる曲線群は密集しているが、 $\alpha$  が等しく  $k$  の異なる曲線群は相当な開きを示していることから明らかである。

(2)  $\lambda$  の値はほぼ 0.8~1.0 の範囲にあり、吃水比  $n$  が 0.5 以上の場合には  $n$  の値が増大すれば  $\lambda$  の値は増大し、 $n$  が一定な場合には  $k$ 、 $\alpha$  が減少するほど増大する。すなわち、竿浮子の速度は、吃水比  $n$  が 0.5 以上ならば、吃水が長いほど、また吃水比が一定な場合には、逆風が吹き ( $k$  は減少)、河底粗度が大きくなるにつれ ( $\alpha$  は減少)、いずれも真の縦平均流速に近づく (竿浮子の速度は減少する)。

(3) 最も有効な吃水比は  $n=0.93$  付近である。このような吃水比を用いれば、補正係数  $\lambda$  は  $k$ 、 $\alpha$  の値のいかにかわからず一定で、しかもその値は 1.0 である。 $n < 0.93$  ならば  $\lambda < 1.0$ 、 $n > 0.93$  ならば  $\lambda > 1.0$  となる。

(4) 有効吃水比  $n=0.93$  を採用しえないときにも、なるべくこれに近い吃水比を用いるのがよい。吃水比が 0.85 以上ならば  $\alpha$  の値の選定は  $\lambda$  の値にほとんど無関係で、 $k$  の値による  $\lambda$  の値の変動も僅小であり、 $\lambda$  は 0.94~1.00 の範囲にある。

#### 4. 実験値との照合および無風時における竿浮子の補正係数

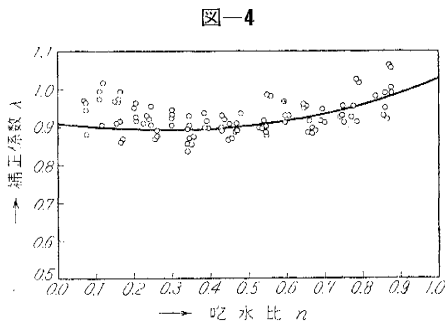
さて竿浮子が流下距離を流下する瞬間々々において、浮子の位置における垂直流速曲線の形状は種々に変化すると考えるのが妥当である。ところで、竿浮子の補正係数  $\lambda$  は、浮子が流下距離を流下する時間内での浮子の平均速度  $v_f$  から、それが通過した鉛直面内での縦平均流速  $v_m$  を推定しようとするものである。この  $v_m$  は瞬間々々の垂直流速曲線を考へて、その縦平均流速の時間的平均値であるから、考へるべき垂直流速曲線の方程式としては、平均的なものあるいは最大の確率で生ずると考えられるものをとるのが合理的である。すなわち、垂直流速曲線の方程式に含まれる2つのパラメータ  $k$  と  $\alpha$  の値は、それらがそれぞれ最大の確率を以つてとる値あるいは正規分布をする  $1/k$  と  $\beta = \alpha \cdot \sqrt{\alpha^2 - \alpha + (1/3)}$  とについての母平均から計算される値をえらぶこととする<sup>3)</sup>。筆者がかつて論じたように<sup>4)</sup>、 $\alpha$  の値は河底粗度、風向と風速によつて大きく支配され、河底が粗く、強い順風が吹くほど小さくなり、 $k$  の値は強い順風が吹くほど大きくなる。そして、無風時の場合には  $k=1.1 \sim 1.2$  と考えられる。

いま、無風時に竿浮子を用いて流量測定をおこなうとき、 $\alpha$ 、 $k$  の値をどのようにえらんだらよいかについては、すでに述べた基準に従えばよいわけであるが、河底粗度が普通の場合には  $\alpha$  はその生起の確率が最大であるような値 0.2 とすればよい。たとえ  $\alpha$  の値が 0.1 や 0.3 であつたにしても、 $\alpha$  の値は補正係数に大きな影響を与えないから、 $\alpha=0.2$  として十分であろう。次に、無風時のときの  $k$  の値として 1.1 とするのと 1.2 とするのでは 表-5 からわかるように補正係数の値に相当な違いがある (吃水比  $n$  が  $n \leq 0.50$  のときこの相違は約 10% で、 $n$  が有効吃水比 0.93 に近づくにつれてこの相違は減少し、 $n=0.80$  では約 4%、 $n=0.90$  では約 1% である)。そこで、 $k=1.1$  とすれば  $k=1.2$  とするよりも真の補正係数に近い値を与えるであろう。なぜならば無風であつても水表面上の竿浮子の一部には空気の抵抗力が働き、そのため竿浮子は減速され、浮子の速度は縦平均流速に近づく。したがつて、補正係数は空気の抵抗力を無視して誘導した理論値よりも大きくなる (1 に近

づく)。ゆえに、 $\alpha$  と  $n$  とが同じときには、 $k$  の小さい場合ほど大きな (1 に近い) 補正係数を与えるのであるから、 $k=1.2$  とするよりも  $k=1.1$  とした方が合理的である。なお、空気の抵抗力は吃水が短い浮子に対して大きく影響するから (浮子の水表面上の長さは吃水の長さにほとんど無関係に一定であると考えれば)、 $n$  の小さい範囲では真の補正係数の値は理論値よりもいくぶん大きくなることが予想され、これは次に述べる筆者の実験においても認められた。この点からも、 $n$  の小さい竿浮子は使用すべきでないと考えられる。

筆者は昭和31年8月23日と25日の両日(晴天, 無風), 静岡県浜名用水の2号開渠と中央幹線開渠とにおいて竿浮子の補正係数についての実験をおこなった。2号開渠の横断面形状は水面幅が約11m, 水深が約2m, 側壁勾配が1:1の, コンクリートで被覆した梯形で, 漸近流下距離を30m, 流下距離を250mとした(この前後を含めて相当距離の間水路は直線)。竿浮子は径5~7cmの真直ぐな青竹を切つて, 全長が0.20mより1.90mまで0.10mおきに18組, 各組は4本, 計72本を作製し, 吃水比 $n$ は全長から水表面上の長さを引いた値を水深で割つて求めた。縦平均流速は流速計を使用して流下区間の中央にある橋桁上より平均値3点法<sup>16)</sup>によつて求め, 各点での観測時間は乱流の影響を僅小にするため3分以上とした<sup>17)</sup>。縦平均流速の測定は実験開始時と終了時との2回おこなつたが, その値はそれぞれ0.614 m/sec, 0.616 m/secであつたので, これらの平均値をとつて,  $v_m=0.615$  m/secとした。23日には竿浮子は水面幅の中央を流下するものだけを採用し, 偏流したものはこれを再三にわたつて流し, 水路の中央の垂直線についての補正係数を算出しようように意を用いたが, 実験にきわめて多くの時間を要したため, 25日には水面幅を中央部, 右岸部, 左岸部の3つに区分し, 各区間の中央での縦平均流速を測定しておいて, 浮子が中央部を流下するときには中央部での縦平均流速を用いて補正係数を算出し, 右岸または左岸に偏流するときにはそこで縦平均流速を用いるようにし, 甚だしく偏流するものについてだけ実験をやり直した。25日には更に場所を中央幹線に移し, 漸近流下距離を20m, 流下距離を150mとして実験をおこなつた。ここでの横断面形状は水面幅が2.15m, 水深が0.96m, 側壁勾配が1:0.3の, コンクリートで被覆した梯形で, 使用した竿浮子は全長0.20mより0.10mおきに0.90mまで8組, 1組4本, 計32本で, これらを順次水面幅の中央にそつて流下させた(偏流したものはほとんどない)。流下区間の中央しかも水面幅の midpoint における縦平均流速を2点法で(各点での観測時間は約3分)測定した( $v_m=1.107$  m/sec)。2点法を用いたのは水深が平均値3点法を用いるのに十分なほど深くなかつたからである<sup>18)</sup>。

以上の実験資料96個を打点したものが図-4である。理論曲線は前に述べたところから従つて $\alpha=0.2, k=1.1$



に対するものである。実験値はほぼ理論曲線の上下にちらばつてゐるが, 吃水比 $n$ が小さい範囲では実験値は理論値よりも上方に偏る。これは前に述べたように水表面上の浮子の部分に働く空気の抵抗力が吃水の短い浮子に対してより大きく影響し, 浮子が減速され, したがつて補正係数が理論値よりも大きくなつて1に近づくためであると考えられる。

以上, 理論および実験より, 無風時ときの竿浮子の補正係数 $\lambda$ と吃水比 $n$ との簡単な関係式を導くことができる。前に述べたように小さな吃水比は使用されないとし, また, 最大吃水比は0.95ぐらいであるから,  $0.60 \leq n \leq 0.95$  において理論

曲線(図-4の実線)によく適合する表示式を求めて, 筆者は Francis の公式に類似する次の式をえた。

$$\lambda = 1.053 - 0.214\sqrt{1-n} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式は無風時において, 竿浮子の吃水比 $n$ が0.60~0.95の範囲にあるとき, それが通過する鉛直面内での縦平均流速の時間的平均値に対する補正係数 $\lambda$ を与える。

また, 吃水比が0.60~0.95にある上記の実験資料33個に上と同形の実験式を最小2乗法によつてあてはめた。このとき, 竿浮子の全長の等しいものを1組とし(ただし, 実験日の異なるものは違つた組として10組), 同じ組に属する各竿浮子の吃水比の平均値をその組の吃水比, 各補正係数の平均値をその組の補正係数とする。ただし, 実験中に沈んだ浮子があるため, 各組の本数は必ずしも始めの本数4つではないから, 平均値としての補正係数に重みをつけ, 3つの資料からのものならば重みは3とし, 4つの資料からのものならば4とする。そこで, 吃水比には誤差がなく補正係数の精度は異なる場合の実験式の定め方から<sup>19)</sup>, 次の式をえた。

$$\lambda = 1.073 - 0.257\sqrt{1-n} \dots\dots\dots (3)$$

表-6は(1)式から理論的に誘導された $\lambda$ の値, 近似式(2)からの計算値, 実験式(3)からの計算値および Francis の公式からの計算値を比較したものである。表より明らかなように, (1)~(3)式ではどれを使用しても

表-6 各式からの  $\lambda$  の値

$n$	(1) 式	(2) 式	(3) 式	Francis式
0.60	0.916	0.918	0.911	0.938
0.65	0.924	0.926	0.921	0.943
0.70	0.934	0.936	0.932	0.948
0.75	0.945	0.946	0.945	0.954
0.80	0.958	0.957	0.958	0.957
0.85	0.973	0.970	0.974	0.967
0.90	0.989	0.985	0.992	0.975
0.95	1.007	1.005	1.015	0.986

実用上はほとんど同じで、Francis の式からの計算値は、同氏の実験範囲  $0.871 \leq n \leq 0.996$  において、筆者の値よりも 1~2% 小さい。このような違いは、前に述べたように、筆者の補正係数は縦平均流速に対するもの、Francis のそれは全流量に対するものであるという相違にその因の 1つがあるようである。

5. 結 語

(1) 表面浮子の無風時における補正係数  $\lambda$  としては、0.85 を採用するのが最も合理的である。2重浮子について

は従来多くの実験がなされたが合理的な  $\lambda$  を定めることは困難で、繫留浮子の精度は未だ不明である。

(2) 竿浮子については種々な実験公式があるが、筆者は竿浮子に働く外力として、自重、浮力および流水と浮子との速度差の 2 乗に比例する動水圧とを考え、浮子が一定速度となつて後は、これら外力は釣り合うべきことより、浮子が通過する鉛直面内の瞬間々々における縦平均流速の時間的平均値に対する補正係数  $\lambda$  を理論的に誘導した。このとき、垂直流速曲線式としては筆者の式を用い、これに含まれる 2つのパラメータ  $\alpha$  (最大流速の位置の割合。強い逆風が吹くほど、また河底粗度が減少するほど大きくなる) と  $k$  ( $k = v_s/v_m$ 。強い順風が吹くほど大きくなる) および竿浮子の吃水比  $n$  の種々な値に対して、 $\lambda$  の値が表-5 および 図-3 に示されている。

(3)  $\lambda$  の値はほとんど 0.8~1.0 の範囲にあり、 $n$  が 0.5 以上の場合には  $n$  が増大すれば  $\lambda$  は増大し、 $n$  が一定な場合には、 $k$ 、 $\alpha$  が減少するほど増大するが、 $\lambda$  に大きく影響するものは  $k$  である。しかし有効吃水比 0.93 を使用すれば、 $\alpha$ 、 $k$  のいかににかかわらず  $\lambda = 1.0$  としてよい。有効吃水比を採用しえないときにも、 $n$  を 0.85 以上とすれば  $\alpha$  は  $\lambda$  にほとんど無関係で  $k$  による変動も僅小である。小さな  $n$  の浮子は使用すべきでない。

(4) 無風時においては、 $\alpha = 0.2$ 、 $k = 1.1$  に対応する  $\lambda$  を採用するのが合理的で、筆者の 96 個の実験資料からも裏書きされる。無風時における  $\lambda$  と  $n$  ( $0.60 \leq n \leq 0.95$ ) との簡単な表示式は (2) 式で表わされ、筆者の実験結果にあてはめた実験式は (3) 式である。いずれを採用しても結果はほとんど同じである。

参 考 文 献

- 1) 近藤泰夫, 石原藤次郎, 米谷栄二: 測量学 (応用編), 1954, p.167.
- 2) Addisson, H.: Hydraulic measurements, 1949, p.211.
- 3) 物部長徳: 水理学 (増補改訂版), 1954, p.108~p.109.
- 4) 同上, p.343.
- 5) 春日屋伸昌: 開水路の垂直流速曲線における平均流速の位置の分布性について, 土木学会誌, 第 40 卷, 第 5 号, 1955, p.24~p.29.
- 6) 春日屋伸昌: 開水路の垂直流速曲線に及ぼす諸因子間の相関性について, 土木学会誌, 第 40 卷, 第 10 号, 1955, p.44~p.51.
- 7) Murphy, E.C.: Accuracy of stream measurements, U.S. Geological Survey Water Supply Paper, No.95, 1904, p.48~p.52.
- 8) Gibson, A.H.: Hydraulics and its applications, 1952, p.357~p.358.
- 9) Gramberg: Der Fesselschwimmer, ein neues Wassermengenmessgerät, Die Bautechnik, Vol.38, 1937, p.487~p.491.
- 10) Francis, J.B.: Lowell hydraulic experiments, 1909, p.146~p.208.
- 11) Murphy, E.C.: Accuracy of stream measurements, U.S. Geological Survey Water Supply Paper, No.95, 1904, p.55~p.58.
- 12) 安芸成一: 流量測定法, 1954, p.81~p.82.
- 13) 物部長徳: 水理学 (増補改訂版), 1954, p.344~p.348.
- 14) 安芸成一: 浮子特に竿浮子に依る観測流速の更正係数に就て, 土木学会誌, 第 18 卷, 第 1 号, 1932, p.105~p.129.
- 15) 春日屋伸昌: 開水路における垂直流速曲線について, 土木学会誌, 第 38 卷, 第 9 号, 1953, p.15~p.20.
- 16) 春日屋伸昌: 縦平均流速算定式の精度について, 土木学会論文集, 第 54 号, 1958, p.26~p.34.
- 17) 春日屋伸昌: 流量測定における二, 三の問題, 中央大学工学部研究報告, 第 1 号, 1957, p.19~p.29.
- 18) 春日屋伸昌: 流量算定式の精度と測定方式の提唱, 土木学会論文集, 第 57 号, 1958, p.12~p.19.
- 19) 春日屋伸昌: 最小 2 乗法と実験式, 応用数学講座, 第 5 卷, 第 2 部, 1957, p.255~p.258.

(昭. 32. 7. 9)

正 誤 表

土木学会論文集第 54 号 (昭.33.2) 掲載

正員 春日屋伸昌: 縦平均流速算定式の精度について

頁	行	誤	正
28	25	ど	は