HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 測深鋼線の傾斜から風壓流又は海流の近似的推定法 |
| Author(s) | 福富, 孝治 |
| Citation | 低温科學, 1, 95-104 |
| Issue Date | 1944-12-15 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/17387 |
| Type | bulletin (article) |
| File Information | 1_p95-104.pdf |

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# 測深鋼線の傾斜から風壓流又は海流の近似的推定法

福　富　孝　治

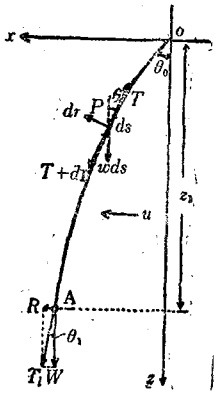
## 緒　言

海洋觀測に際しては，採水測溫作業や鋼索測深作業で先端に重錘を附けた鋼線を用ひる．ところが洋上に於ける觀測では風壓に基く船の偏流や海潮流に原因して鋼線は普通傾斜する．此の場合海面に於ける鋼線の傾斜角は鋼線の長さや風壓流及び海流の流速に依つて變化するから，逆に或る鋼線の長さに對する傾斜角を測定すれば風壓流又は海流の流速を推定し得る理である．然し乍ら此の方法による流速の推定法は未だ海洋觀測に實用されて居ない樣であるが，此の方法は操作が極めて簡單であるのと船上で直ちに流速が判るのであるから，近似的であつても其の解決が望ましいのである．

それで筆者は船の風壓流のみ又は海流のみの場合に其の流速を近似的に推定する方法を考究し，其の一例として B.W.G. 24 番七子撚亞鉛引鋼線の先端に 12.5 kg（空氣中）の鐵製重錘を附けた場合の實例を揭げた．又採水測溫作業や鋼索測深作業の場合に觀測深度の推定には鋼線の形を知る事が必要であるから，上の實例に就いて鋼線の形と深度補正圖表をも參考までに求めて置いた．

## §1. 理論的考察

先づ鋼線の海面に於ける傾斜角 $\theta_0$ と鋼線の長さ $S$ と流速 $u$ との關係式を求める．$u$ を船に對する水の流れとし，鋼線の吊點に座標原點 $o$ をとり，海面で流れの方向に $x$ 軸をとり，鉛直下方に $z$ 軸をとる．$W$, $w$ を夫々重錘 $A$ 及單位長さの鋼線の海水中の重さ，$R$ 及 $dr$ を夫々重錘及 $ds$ なる鋼線の部分に働く水の抵抗，$Tl$ 及 $T$ は夫々線の末端 $A$ 及線の中途の任意の點 $P$ に働く張力，$\theta_0$, $\theta_1$, $\theta$ は夫々線の兩端 $o$, $A$ 及線の中間の任意の點 $P$ に於いて線に引いた切線と鉛直線との爲す角即ち鋼線の傾斜角とする．又水の抵抗は次の式で表し得るものと考へる．




第 1 圖

$$R=ku^2(z_1) \qquad (1)$$

$$dr=k'ds(u\cos\theta)^2=k'u^2\cos\theta\,dz\equiv\lambda\cos\theta\,dz \qquad (2)$$

（線に働く抵抗 $dr$ の大きさや方向に就いては種々な取り方[1]が考へられるが，此處では大きさは (2) 式で表されるものとし方向は線に直角に働

北海道帝國大學低溫科學研究所報告 No. 10. 日本海洋學會誌 第 2 卷，第 3 號，19 頁

(1) 例へば 奥野博：沈降板の模型實驗 [日本水產學會誌 5 (昭和 11 年), 155～157.]

くものと考へたのである.）又此處で考へてゐる海流は吹送流の如く流向が深さと共に變化するものは考へず，普通の密度流の如く流向が深さに對して變化しない場合である．本邦附近の海流は先づ此の樣な海流と考へて差支へない.

釣合の條件は $z$ 方向及 $x$ 方向に就いて

$$\lambda \sin\theta \cos\theta\, dz + T\cos\theta = (T+dT)\cos(\theta+d\theta) + w\sec\theta\, dz \tag{3}$$

$$T\sin\theta = (T+dT)\sin(\theta+d\theta) + \lambda\cos^2\theta\, dz \tag{4}$$

$$\therefore\quad -T\sin\theta d\theta + \cos\theta dT + (w\sec\theta - \lambda\sin\theta\cos\theta)dz = 0 \tag{5}$$

$$T\cos\theta d\theta + \sin\theta dT + \lambda\cos^2\theta dz = 0 \tag{6}$$

(5) 及 (6) から　　$dT + wdz = 0$

$\therefore$　$z = z_1$; $T = Tl$ として積分すれば

$$T = Tl + w(z_1 - z) \tag{7}$$

又 (5) 及 (6) から

$$dS = dz\sec\theta = -\frac{Td\theta}{\lambda\cos^2\theta - w\sin\theta} \tag{8}$$

$$\therefore\quad S = \int_{\theta_1}^{\theta_0} \frac{Td\theta}{\lambda\cos^2\theta - w\sin\theta} \tag{9}$$

が得られる．これが求める關係式である.

ところが風壓流のみの場合は $\lambda$ は常數であるが，張力 $T$ は

$$T = Tl\left[\frac{\sqrt{4+\alpha^2}+\alpha+2\sin\theta}{\sqrt{4+\alpha^2}+\alpha+2\sin\theta_1}\cdot\frac{\sqrt{4+\alpha^2}-\alpha-2\sin\theta_1}{\sqrt{4+\alpha^2}-\alpha-2\sin\theta}\right]^{\frac{\alpha}{\sqrt{4+\alpha^2}}} \tag{10}$$

但し　$\alpha = \dfrac{w}{\lambda}$

であるから

$$S = \frac{Tl}{\lambda}\left[\frac{\sqrt{4+\alpha^2}-\alpha-2\sin\theta_1}{\sqrt{4+\alpha^2}+\alpha+2\sin\theta_1}\right]^{\frac{\alpha}{\sqrt{4+\alpha^2}}} \int_{\theta_1}^{\theta_0}\left[\frac{\sqrt{4+\alpha^2}+\alpha+2\sin\theta}{\sqrt{4+\alpha^2}-\alpha-2\sin\theta}\right]^{\frac{\alpha}{\sqrt{4+\alpha^2}}}$$

$$\times\frac{d\theta}{(\cos^2\theta - \alpha\sin\theta)} \tag{11}$$

となるが，此の積分を求めることは數式的には困難であり，$\alpha$ が小さい場合に $\alpha$ の自乘以上の項を捨てても出來難い.

海流のみの場合には更に $\lambda$ は深さ $z$ の函數として與へられるから到底數式的には解けさうもない．それで何れの場合に於ても數値計算によつて此の關係を求める外に方法はないが，此の爲には (9) 式を用ひるよりも (8) 式を變形して (7) 式を代入した次の (12) 式を用ひる方が却つて都合がよい.

$$-\left(\frac{d\theta}{dz}\right)=\frac{k'u^2\cos\theta-w\tan\theta}{Tl+w(z_1-z)} \tag{12}$$

即ち (12) 式に於いて $k'$, $w$ は既知の常數であり, $u$ も一般に $u=u(z)$ の形で與へられてゐるとすれば $T_l$ も次の式で表はせられる.

$$Tl=\sqrt{W^2+ku^2(z_1)}=W\sec\theta_1 \tag{13}$$

$$\tan\theta_1=\frac{ku^2(z_1)}{W} \tag{14}$$

故に先づ鋼線の末端 $A$ の深さ $z_1$ が判つて居れば $k$ も既知常數であるから $\theta_1$, $Tl$ が (13)及 (14) 式から定つて來る. それで $z_1$ の深さを等しい間隔 $\Delta z$ 宛に $n$ 個に分け $\Delta z$ の間に入る線の長さを $\Delta S$ とし, 其の區分點に第2圖の如く夫々 1, 2, 3……$n$ の番號を附ければ線の末端 $A$ 即ち 1 に於ける $\left(\frac{d\theta}{dz}\right)$ の値は (12) 式から

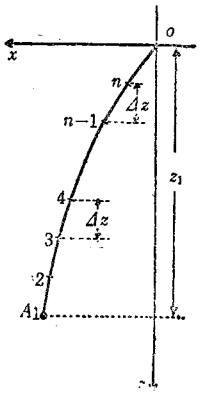
$$\left(\frac{d\theta}{dz}\right)_1^{*}=\frac{k'u^2(z_1)\cos\theta_1-w\tan\theta_1}{Tl}$$

が得られる. 故に 2 に於ける $\theta$ の値は

$$\theta_2=\theta_1+\left(\frac{d\theta}{dz}\right)_1\Delta z$$

で求められる. $\theta_2$ の値を (12) 式に代入すれば $\left(\frac{d\theta}{dz}\right)_2$ は

$$\left(\frac{d\theta}{dz}\right)_2=\frac{k'u^2(z_1-\Delta z)\cos\theta_2-w\tan\theta_2}{Tl+w\Delta z}$$



第 2 圖

で與へられ, $\theta_3=\theta_2+\left(\frac{d\theta}{dz}\right)_2\Delta z$ となる. 此の様な操作を順次繰返せば

$$\theta_0=\theta_1+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{d\theta}{dz}\right)_i\Delta z \tag{15}$$

で求められ, 鋼線の全長 $S$ は

$$S=\sum_{i=1}^{n}\Delta z\cdot\sec\left(\frac{\theta_i+\theta_{i+1}}{2}\right) \tag{16}$$

で求められる. 即ち與へられた流れ $u(z)$ に對する線の長さ $S$ と海面に於ける傾斜角 $\theta_0$ の關係が判るのである. 鋼線の形も近似的には $A$ 點から $\frac{\theta_i+\theta_{i+1}}{2}$ を $\Delta S$ の間隔毎に順次に取つて連ねれば得られる.

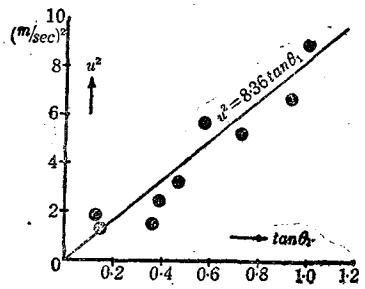
## §2. 計算の實例

* $\left(\frac{d\theta}{dz}\right)$ の前の負符號は角 $\theta$ が下方即ち $z$ の増す方向に減少することを意味する. 今 $z_1$ から $o$ の方向へ考へて行くのであるから符號は略す.

以下に例として線は本邦の海洋觀測に實際用ひられてゐる G.W.B. 24 番七子撚亞鉛引鋼線[1]を用ひ，重錘として 12.5 kg（空氣中）の鐵製のものを用ひた時の計算の結果を掲げる．

i) 常數 $k$ 及 $k'$ の決定　先づ重錘に働く抵抗 $R$ と流速 $u$ との間には $R=ku^2$　(1) なる關係があるものとして抵抗常數 $k$ を決定する．このために實際觀測船に於て上に述べた鋼線の先に問題の重錘をつけ，無風の日海潮流が殆どないと考へられる海面に於て重錘を水中にやつと隱れる位に沈め船を一定の速さで走らせた．船の速さはその際船の縱方向に凡そ 10 m 離して 2 點を選びその船首に近い點から木片を眞横の海中に投じその木片が第 2 の點を通過する迄の時間を測つて求めた．鋼線は重錘に働く水の抵抗のために後方に傾斜して靜止するから此の角 $\theta_1$ を測定した．この $\theta_1$ と $u$ との間には (1) 式から

$$u^2=\frac{W}{k}\tan\theta_1 \tag{17}$$



第 3 圖
重錘に働く抵抗の係數を求める實驗

なる關係が期待されるから縱軸に $u^2$ を横軸に，$\tan\theta_1$ をとつて圖を書けば $u^2$ と $\tan\theta_1$ との關係は原點を通る直線となり此の傾きから $W$ は既知であるから $k$ が求められる．實際に觀測値を圖示すれば第 3 圖中丸の如くであつてこの關係は先づ滿足せられてゐる．$W=10.33$ kg（海水の比重を 1.026 として）として $k/g=1.236$ kg/(m/sec)$^2$ が得られる．但し $g$ は地表に於ける地球引力の加速度である．

次に $k'$ 即ち (2) 式に於て線に働く抵抗の常數を決定するために，上に述べた實驗に於て船を一定速度で走らした儘鋼線を或る長さ繰出して角が定常狀態になつた時傾斜角 $\theta_0$ を測定し，一定速度に對し $\theta_0$ の値が鋼線の長さ $S$ の値に依つて如何に變化するかを吟味した．第 4 圖中の丸は其の實測値の數例を示したものである．此の實驗の場合は流速 $u$ が深さに對して變化せず一定の場合で風壓流の場合と同樣であるが，(9) 式の積分は前に述べた通り出來ない．故に此處では近似的方法として少し亂暴ではあるが $T$ を常數即ち $z$ が $o$ から $z_1$ までの平均値

$$T_m=Tl\left(1+\frac{wz_1}{2Tl}\right)^{(2)} \tag{18}$$

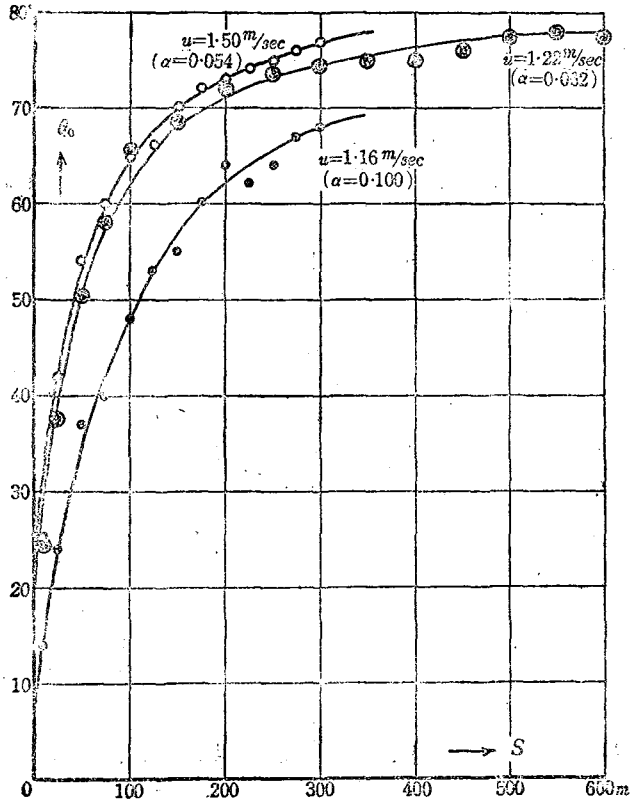
であると考へ，且上述の實驗では $\frac{w}{\lambda}$ 即ち $\alpha$ は 1 に比較して小であるから $\alpha$ の自乘以上の項を捨てて (9) 式の積分を求めることにする．

$$\therefore S\fallingdotseq\frac{Tl\left(1+\frac{w}{2Tl}S\right)}{\lambda}\{f(\theta_0)-f(\theta_1)\} \tag{19}$$

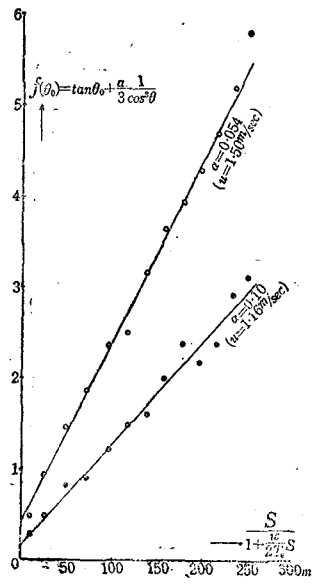
(1) 22 番七子撚鋼線が用ひられることもあり，深海の測深用にはピアノ線が用ひられる．
(2) 凡そ $z_1<300$ m であれば $z_1\fallingdotseq S$ と置いても近似的に差支へない．

$$\text{但し}\quad f(\theta)=\tan\theta+\frac{\alpha}{3}\frac{1}{\cos\theta} \qquad (19)$$

$$\therefore\quad f(\theta_0)=\frac{w}{\alpha Tl}\left(\frac{S}{1+\frac{w}{2Tl}S}\right)+f(\theta_1) \qquad (20)$$




第 4 圖　鋼線に働く抵抗の係數を求める實驗




第 5 圖

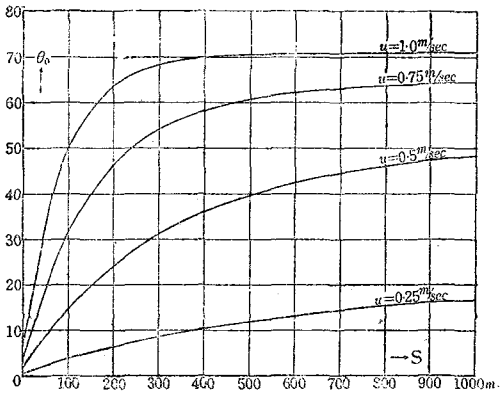
故に今實測値から $\alpha$ に種々な値を與へて $f(\theta_0)$ を計算して縱軸に之をとり，橫軸には $\dfrac{S}{1+\frac{w}{2Tl}S}$ をとつて點を圖示して之等の間に丁度直線的關係が存在する樣な $\alpha$ を求めた．この直線の傾きからも $\alpha$ が求められるが之等の $\alpha$ の値は可成りよく一致した．第 5 圖に其の 1 例を示した．此の結果得られた異つた $u$ の値に對する $\alpha$ の値は第 1 表の通である．此の $\alpha$ の値を (19) 式に代入して $S$ と $\theta_0$ との關係を求め第 4 圖（甲，乙）中に實線で之を示した．即ち計算値と實測値とは可成りの程度一致して居ることが判る．それから $k'=\frac{w}{\alpha u^2}$ に依つて $k'$ を求めた結果其の平均値として $k'/g=0.102[\mathrm{kg(sec)^2/m^3}]$ が得られた．但し 24 番七子撚鋼線の單位長さの重さは海水中で $\frac{w}{g}=1.14\times10^{-2}\mathrm{kg/m}$ として計算した．即ち同直徑の滑らかな圓

壔[1]に比較して抵抗が凡そ 1.3 倍である.

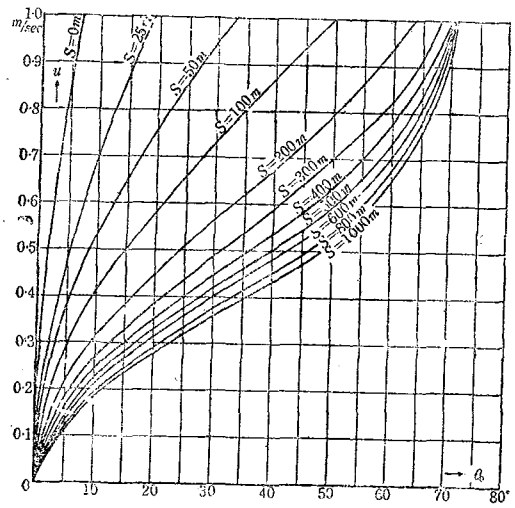
ii) 風壓流のみの場合　$W/g=10.33$ kg, $w/g=1.14\times10^{-2}$kg/m, $k/g=1.236$ kg/(m/sec)$^2$, $k'/g=0.102$(kg/m)/(m/sec)$^2$ として, $u$ が夫々 $u=0.25$, 0.5, 0.75, 1.0 m/sec の場合の鋼線傾斜角 $\theta_0$ と鋼線の長さ $S$ との關係を (15), (16) 式から計算して圖示すれば第 6 圖の通である. 即ち風壓流の場合は鋼線の傾斜角は鋼線の繰出した長さが小であるときにはどんどん增加するが或る深さに達すれば殆ど一定となることが判る. 實際の觀測に當つて傾斜角 $\theta_0$ の測定値から風壓流の流速 $u$ を直ちに求めるに便なるために横軸に $\theta_0$ を縱軸に $u$ をとり普通海洋觀測に用ひられる觀測層 $S=0$, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000 m に對して $u$ と $\theta_0$ との關

第 1 表

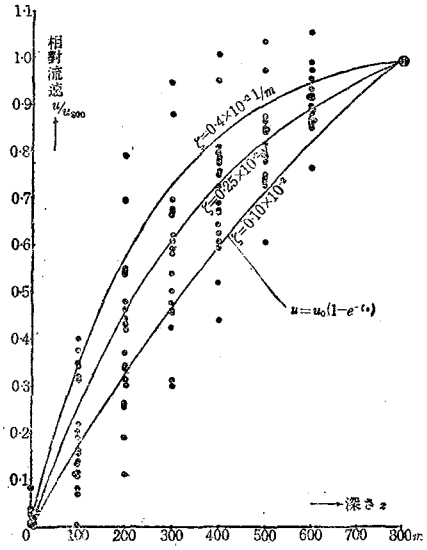
| $u$ | $\alpha$ | $k'/g$ |
|---|---|---|
| 1.16 m/sec | 0.100 | 0.086 |
| 1.22 | 0.062 | 0.124 |
| 1.375 | 0.059 | 0.103 |
| 1.50 | 0.054 | 0.095 |
| | 平均値 | 0.102 |




第 6 圖　流速一定なる風壓流の場合の傾斜角 $\theta_0$ と鋼線の長さ $S$ との關係




第 7 圖
風壓流速 $u$ と傾斜角 $\theta_0$ との關係




第 8 圖
海流の船に對する流速の深さに對する變化

(1) 宮城晋五郎: 水力學 (昭和 8 年) 135 頁

係を第 7 圖に示した.

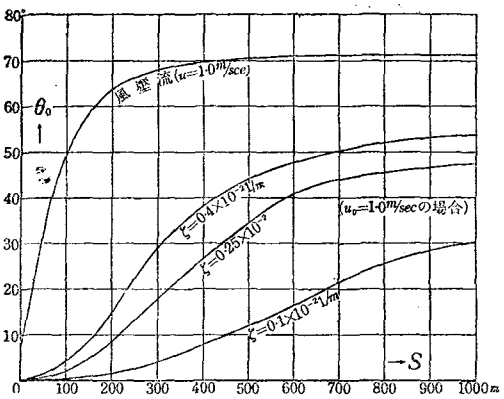
iii) 海流のみの場合　海流の場合について論ずる前に先づ海流の流速が深さとともにどう變化するかを知らなければならない. 黑潮と其の附近の海流に就て流に漂流してゐる船に對する相對流速 $u$ の垂直分布を示せば第 8 圖中黑丸である. (圖は 800 m 深の流速を 100 として示してある). この關係は決して簡單ではないが近似的には

$$u=u_0(1-e^{-\zeta z}) \tag{21}$$

で表されると考へても先づ差支へない. この式では深さ 0〜200 m 附近があまり合はない. この邊では實際はこの式で示される値より小なる値を示す. 而して $z=300$ m 及 600 m の値から $\zeta$ の値を計算してみると第 2 表の如くであつて $\zeta$ の値が $0.1\sim0.4\times10^{-2}$ のものが全體の略 70% でその mode の値は凡そ $0.25\times10^{-2}$ である.

第 2 表

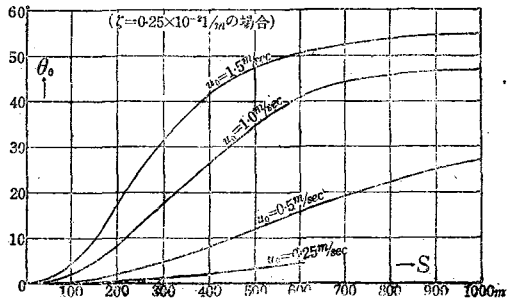
| $\zeta$ の 値 | 頻　度 |
|---|---|
| $0.1\times10^{-2}$以下 | 16.2% |
| $0.1\sim0.2\times10^{-2}$ | 13.5 |
| 0.2〜0.3 〃 | 40.5 |
| 0.3〜0.4 〃 | 16.2 |
| 0.4〜0.5 〃 | 2.7 |
| 0.5〜0.6 〃 | 2.7 |
| 0.6〜0.7 〃 | 2.7 |
| 0.7〜0.8 〃 | 5.4 |
| 0.8〜0.9 〃 | 0 |
| 計 | 99.9 |




第 9 圖　海流の表面流速 $u_0=1$ m/sec の場合の $\theta_0$ と S との關係

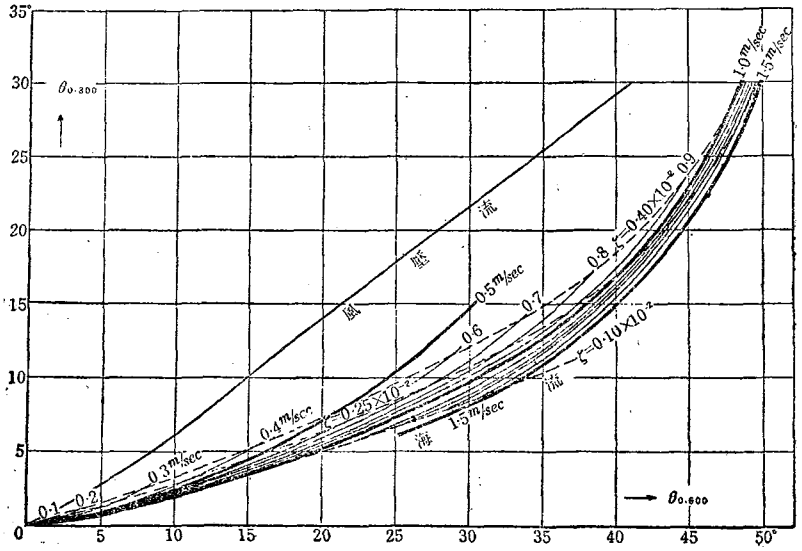
偖て $W/g=10.33$ kg, $w/g=1.14\times10^{-2}$ kg/m, $k/g=1.236$ kg/(m/sec)$^2$, $k'/g=0.102$ (kg/m)/(m/sec)$^2$, $\zeta=0.1$, 0.25, $0.4\times10^{-2}$ 1/m, $u_0=0.25$, 0.5, 1.0, 1.5 m/sec の場合に於ける傾斜角 $\theta_0$ と鋼線の長さ $S$ との關係を (15), (16) 式を用ひて計算した. その 1 例として $u_0=1$ m/sec の場合に $\zeta$ が $0.1\times10^{-2}$, $0.25\times10^{-2}$, $0.4\times10^{-2}$(1/m) の値で變化した時 $\theta_0-S$ の關係が如何に變るかを第 9 圖に示した. 圖には比較のために風壓流 $u=1$m/sec の場合をも記入した. 圖から明らかなる如く風壓流のみの場合に於ては $z=0$ に於て既に或る角度を有し最初 0〜200 m の淺層に於て角度の增加が著しく, 其の變化曲線は $\theta_0$ の大なる方に凸であり, 深層では殆んど一定値に達する. 海流のみの場合には $z=0$ に於ては常に角度零であつて 0〜150 m の淺層では其の增加が極めて少なく其の曲線は $\theta_0$ の大なる方に凹である. 200〜500 m の中間層で其の增加が著しく深層では殆んど一定値に達する. 即ち表面で同じ流速を示しても風壓流と海流ではその影響に著しい差がある. 次に第 10 圖に $\zeta=0.25\times10^{-2}$ 1/m で $u_0=0.25$, 0.5, 1.0, 1.5 m/sec である場合の $\theta_0-S$ の關係を示した.

實際無風の海面に於いて，海流を求めるに便なるため第 11 圖を作つた．第 11 圖には横軸に $S=600$ m に於て測定した傾斜角 $\theta_0$, $6P$ をとり，縱軸には $S=300$ m に於て測定した傾斜角 $\theta_0$, $6P$ をとつて，實線で海面に於ける流速 $u_0$ の等しい點を表はし，點線で $\zeta$ の値の等しい點が示してある．從つて $S=600$ m 及 300 m に於ける傾斜角が判れば此の圖から $u_0$ と $\zeta$ とを近似的に推定することが出來る．圖中には參考のため風壓流の場合も記入してある．




第 10 圖　$\zeta=0.25\times10^{-9}1/m$ の場合の $\theta_0$ と $S$ との關係

**iv）** 鋼線の形　採水測溫作業に於て各層




第 11 圖　$S=300$ 及 600 m の傾斜角を知つて海流の流速を求める圖表

毎に被壓顚倒寒暖計を防壓顚倒寒暖計と常に併用する事は諸種の事情から困難であるから，そんな場合にはそれに適當な補正を施さなければならない．又鋼索測深に於いても一般に線が傾斜するので傾斜角 $\theta_0$ の cosine を線の繰出した長さに乘じた値を以て其の深さとする向きもあるが，これはあまり正しい補正ではない．之等の補正をする爲には鋼線の形がどんなであるかを知らなければならない．

この意味から風壓流のみ又は海流のみの場合に鋼線が如何なる形になつて居るかを吟味して見た．上の計算で得られた線の形の中から風壓流 $u=1$m/sec（圖中點線）及海流 $u_0=1$ m/sec, $\zeta=0.25\times10^{-2}$（圖中實線）の場合を第 12 圖に示した．何れの場合に於ても日高博士，坂田氏[1]

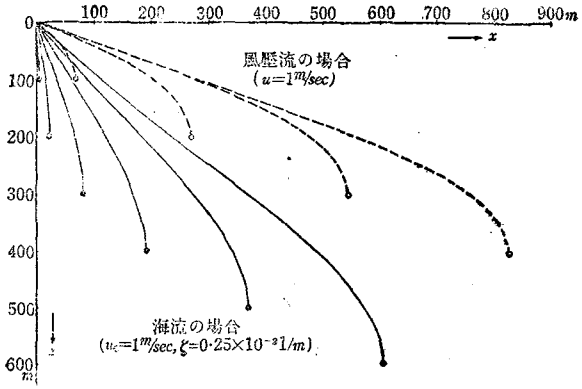
(1)　日高孝次，坂田誠：水中に於ける綱索の形に就いて（海と空 22（昭和 17 年），47～49）

指摘せられた如く

$$x = z\tan\theta_0 - Bz^2 \quad (B \text{ は正の常數}) \tag{22}$$

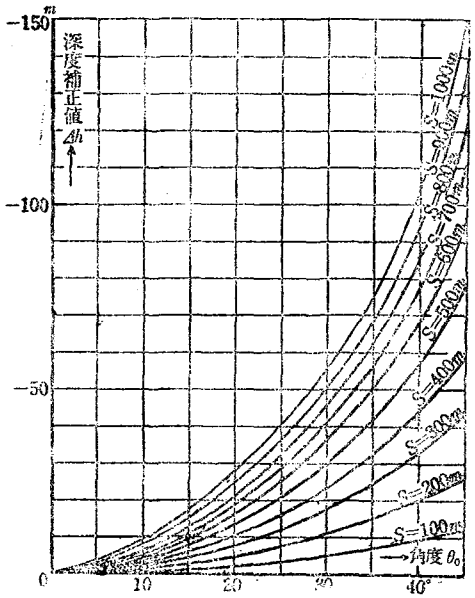
に近い形ではあるが，海流の場合では詳細には極く微弱ではあるが淺層の部分で上に凹になつて居る．

風壓流と海流とが同時に存在する場合には其の流向も一般には異なるから鋼線の形は一平面上にはない複雜な形となるであらう．之等の補正の問題に就いては別に論じたいと考へてゐる．




第 12 圖　風壓流又は海流のみの場合の鋼線の形

洋上では風速が 10 m/sec 內外であるのは稀でなく寧ろ普通の狀態である．從つて其の爲に生ずる船の風壓流[1] は 0.4 m/sec 內外と推定され，500～1000 m の線の長さに對して 30～40° 位の傾斜角が生ずることは第 7 圖から明らかである．實際海洋觀測に當つてはこれ位の鋼線の傾斜は稀ではなく普通なのである．500～1000 m の線の長さに對して 30～40° の傾斜角を生ずる海流は $u_0$ が 0.7～1.0 m/sec 位であつて，これは相當の海流域にのみ見られる値であつて洋上の到る處で見られる譯ではない．即ち實際海洋觀測に於て鋼線の傾斜する多くの場合は主として風壓流に原因するものと考へられるのである．それで今線の傾斜が風壓流にのみ原因して居る場合に重錘附鋼線を用ひて測深を行つたとし，其の際施すべき深度補正 $\Delta h$ と傾斜角 $\theta_0$ との關係を求めて見よう．




第 13 圖　鋼索測深の深度補正圖表
(風壓流のみの場合)

$z=0$ で鋼線に働く張力 $T_0$ は (10) 式中に $T$ を $T_0$，$\theta$ を $\theta_0$ と置けば直ちに得られる．又 (7) 式から $z_1=\dfrac{T_0-Tl}{w}$ であるから，これに上の $T_0$ を代入すれば與へられた $u$，$\theta_0$ の値に對し $z_1$ を求めることが出來る．一方第 7 圖の關係から與へられた $u$，$\theta_0$ に對し $S$ が求められるから深度補正即ち $\Delta h=z_1-S$ は求められるのであ

(1) 安井善一：船舶の風壓流に關する一實驗 [海洋の科學 1 (昭和 16 年), 292～294]

る．24 番七子撚鋼線に 12.5 gk（空氣中）鐵製重錘を用ひた場合の（$\Delta h-\theta_0$）圖表を示せば第 13 圖の如くである．此の様な圖表を實際の鋼索測深用の鋼線及重錘に就いて作つて置けば深度補正として線の長さに $\cos\theta_0$ を乘ずるのに比較して遙かに正しい補正値が得られるのではあるまいか．

*　　*　　*

終りに臨み，此の研究の中重錘並に鋼線の抵抗に關する實驗値は筆者が觀測作業に依つて得たものであり，海流流速の垂直分布に關する材料は水路部の資料から計算したものであることを御斷りしておく．尙水中に於ける鋼線の抵抗に關し有益なる御助言を賜つた中谷教授に對し厚く感謝の意を表する次第である．