

# 電磁式地震計の倍率曲線 (1)\*

宇津 徳 治\*\*

550.341:534.647

## Response Curves of Electromagnetic Seismograph (1)

T. Utsu

(Seismological Section, J. M. A.)

Tables for the calculation of the magnification and phase angle of electromagnetic seismograph (Galitzin type) are prepared. An example of response curves is shown in Fig. 4.

### § 1.

動コイル型変換器 (Moving coil type transducer) と検流計 (Galvanometer) を Fig. 1 のように、抵抗の組合せからなる減衰器 (Attenuator) を介してつないだとき、変換器および検流計の運動方程式は、地面の動きを  $x(t)$ , それぞれのふれの角を  $\theta(t)$ ,  $\varphi(t)$ , それぞれのコイルを流れる電流を  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  とすれば

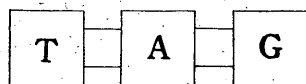


Fig. 1

$$-K_1\ddot{\theta} + D_1\dot{\theta} + U_1\theta = -MH\ddot{x} + G_1i_1, \dots\dots\dots (1)$$

$$K_2\varphi + D_2\dot{\varphi} + U_2\varphi = G_2i_2, \dots\dots\dots (2)$$

ただし、記号は次のとおりである。

	変換器	検流計
回転軸のまわりの慣性能率	$K_1$	$K_2$
流体抵抗の係数	$D_1$	$D_2$
復元力の係数	$U_1$	$U_2$
振子の質量	$M$	
振子の回転軸と重心との距離	$H$	
相当振子の長さ	$l$	
電磁的常数***	$G_1$	$G_2$

\* Received Feb. 28, 1957.

\*\* 気象庁地震課.

\*\*\* 変換器に円筒形の磁石とコイルを使ったものでは

$$G_1 = 2\pi a_1 N_1 B_1 L.$$

ただし、 $a_1$ : コイルの半径,  $N_1$ : コイルの巻数,  $B_1$ : 磁束密度,  $L$ : コイルの中心と回転軸との距離。  
検流計では

$$G_2 = a_2 b_2 N_2 B_2.$$

ただし、 $a_2, b_2$ : コイルの縦横の長さ,  $N_2$ : コイルの巻数,  $B_2$ : 磁束密度。

	変換器	検流計
コイルの抵抗	$R_1$	$R_2$
減衰常数	$h_1$	$h_2$
流体抵抗による(制振器付のものはそれによる)減衰常数	$h_{01}$	$h_{02}$
電磁的(自己)制振による減衰常数	$h_{e1}$	$h_{e2}$
固有周期	$T_1$	$T_2$

$i_1, i_2$  は一般的に

$$i_1 = Y_{11}G_1\dot{\theta} + Y_{12}G_2\dot{\varphi}, \dots\dots\dots(3)$$

$$i_2 = Y_{21}G_1\dot{\theta} + Y_{22}G_2\dot{\varphi} \dots\dots\dots(4)$$

で表わされる。

いま、減衰器の四端子基本マトリックスを  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  とすれば、 $Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$  は次のようになる。<sup>\*</sup>

$$Y_{11} = P_1/Q, \dots\dots\dots(5)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = 1/Q, \dots\dots\dots(6)$$

$$Y_{22} = P_2/Q, \dots\dots\dots(7)$$

ただし

$$P_1 = CR_1 + A, \dots\dots\dots(8)$$

$$P_2 = CR_2 + D, \dots\dots\dots(9)$$

$$Q = CR_1R_2 + AR_2 + DR_1 + B. \dots\dots\dots(10)$$

(3)~(7) 式を用いて運動方程式 (1), (2) を簡単になると、

$$\ddot{\theta} + 2h_1n_1\dot{\theta} + n_1^2\theta = -\frac{1}{l}\ddot{x} - f\dot{\varphi}, \dots\dots\dots(11)$$

$$\ddot{\varphi} + 2h_2n_2\dot{\varphi} + n_2^2\varphi = -k\dot{\theta} \dots\dots\dots(12)$$

となる。ただし

$$h_i = h_{0i} + h_{ei}, \quad (i = 1, 2 \text{ 以下同じ}) \dots\dots\dots(13)$$

$$h_{0i} = D_i/2n_iK_i, \dots\dots\dots(14)$$

$$h_{ei} = \frac{G_i^2}{2n_iK_i} \frac{P_i}{Q}, \dots\dots\dots(15)$$

\*  $\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$  は右図のような四端子を考えたときのアドミッタンスマトリックスである。この四端子の基本マトリックスは

$$\begin{pmatrix} 1 & R_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CR_1 + A & CR_1R_2 + AR_2 + DR_1 + B \\ C & CR_2 + D \end{pmatrix}$$

となるから、これを  $\begin{pmatrix} P_1 & Q \\ C & P_2 \end{pmatrix}$  とおけば、四端子回路の公式から (5)~(7) 式が得られる。

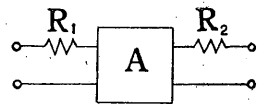


Fig. 2

$$n_i = \sqrt{U_i/K_i}, \quad T_i = 2\pi/n_i = 2\pi\sqrt{K_i/U_i}, \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$l = K_1/MH, \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$f = \frac{G_1 G_2}{K_1} \frac{1}{Q}, \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$k = \frac{G_1 G_2}{K_2} \frac{1}{Q}. \quad \dots\dots\dots(19)$$

これらの量の名称は前表のとおりである。

(11), (12) 式を解けば、地面の動き  $x$  に対する検流計のふれ  $\varphi$  が求められる。記録のふれ  $y$  は、記録紙と検流計の鏡との距離を  $A$  とすれば

$$y = 2A\varphi. \quad \dots\dots\dots(20)$$

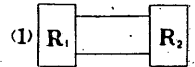
**減衰器の例**

Fig. 3 (1)–(6) のような減衰器について  $P_1, P_2, Q$  を求めてみると次のようになる。

(1) 減衰器のないとき

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

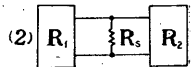
$$\therefore P_i = 1, \quad Q = R_1 + R_2.$$



(2) 短絡抵抗 (shunt)

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_s & 1 \end{pmatrix}.$$

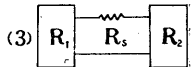
$$\therefore P_i = (R_i + R_s)/R_s, \quad Q = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_s + R_s R_1}{R_s}.$$



(3) 直列抵抗

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$\therefore P_i = 1, \quad Q = R_1 + R_2 + R_s.$$



(4) T 型

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_5 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{R_3}{R_5} & \frac{R_3 R_4 + R_4 R_5 + R_5 R_3}{R_5} \\ \frac{1}{R_5} & 1 + \frac{R_4}{R_5} \end{pmatrix}.$$

$$\therefore P_1 = \frac{R_1 + R_3 + R_5}{R_5}, \quad P_2 = \frac{R_2 + R_4 + R_5}{R_5},$$

$$Q = \frac{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}{R_5} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4.$$

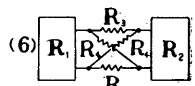
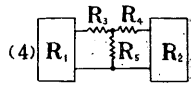


Fig. 3

(5) II 型

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_5 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_4 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{R_5}{R_4} & R_5 \\ \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3 R_4} & 1 + \frac{R_5}{R_3} \end{pmatrix}.$$

$$\therefore P_1 = \frac{(R_3 + R_4 + R_5)R_1 + (R_4 + R_5)R_3}{R_3 R_4}, \quad P_2 = \frac{(R_3 + R_4 + R_5)R_2 + (R_3 + R_5)R_4}{R_3 R_4},$$

$$Q = \frac{(R_3+R_4+R_5)R_1R_2+(R_4+R_5)R_2R_3+(R_3+R_5)R_1R_4+R_3R_4R_5}{R_3R_4}$$

(6) ブリッジ型

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R_3+R_4}{R_3-R_4} & \frac{2R_3R_4}{R_3-R_4} \\ \frac{2}{R_3-R_4} & \frac{R_3+R_4}{R_3-R_4} \end{pmatrix}$$

$$\therefore P_1 = \frac{R_3+R_4+2R_1}{R_3-R_4}, \quad P_2 = \frac{R_3+R_4+2R_2}{R_3-R_4}$$

$$Q = \frac{(R_1+R_2)(R_3+R_4)+2(R_1R_2+R_3R_4)}{R_3-R_4}$$

## § 2.

地面が周期  $T$  で正弦的な運動をするとき、すなわち、

$$x = e^{j\omega t}, \quad j = \sqrt{-1}, \quad \omega = 2\pi/T, \quad \dots \dots \dots (21)$$

のとき

$$\theta = \Theta e^{j\omega t}, \quad \varphi = \Phi e^{j\omega t} \quad \dots \dots \dots (22)$$

とすれば、この地震計の振動倍率  $V$  と位相のずれ  $\delta$  は

$$V = 2A|\Phi|, \quad \delta = \arg \Phi. \quad \dots \dots \dots (23)$$

(21), (22) 式を (11), (12) 式に入れて  $\Phi$  を求めると、

$$\Phi = \frac{(k/l)(j\omega)^3}{\{(j\omega)^2 + 2h_1n_1(j\omega) + n_1^2\}\{(j\omega)^2 + 2h_2n_2(j\omega) + n_2^2\} - fk(j\omega)^2}. \quad \dots \dots (24)$$

$$\text{いま, } S = \frac{fk(j\omega)^2}{\{(j\omega)^2 + 2h_1n_1(j\omega) + n_1^2\}\{(j\omega)^2 + 2h_2n_2(j\omega) + n_2^2\}} \quad \dots \dots (25)$$

$$\Phi_0 = \frac{(k/l)(j\omega)^3}{\{(j\omega)^2 + 2h_1n_1(j\omega) + n_1^2\}\{(j\omega)^2 + 2h_2n_2(j\omega) + n_2^2\}} \quad \dots \dots (26)$$

$$\text{とおけば, } \Phi = \frac{\Phi_0}{1-S} \quad \dots \dots \dots (27)$$

となる。そこで、まず、

$$V = \frac{V_0}{|1-S|}, \quad \delta = \delta_0 - \arg(1-S) \quad \dots \dots \dots (28)$$

として、 $V_0, \delta_0$  を求める。 $|S| \ll 1$  のときは  $V \doteq V_0, \delta \doteq \delta_0$  となる。これは、いわゆる coupling の影響が無視できる場合である。

$$\begin{aligned} V_0 &= 2A|\Phi_0| \\ &= \frac{2Ak}{l} \cdot \frac{\omega^3}{\sqrt{(1-u_1^2)^2 + 4h_1^2u_1^2} \sqrt{(1-u_2^2)^2 + 4h_2^2u_2^2}} \\ &= \frac{4Ak}{ln_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-u_i^2)^2 + 4h_i^2u_i^2}} \cdot \frac{u_i}{u_2^2} \cdot \frac{u_2^2}{\sqrt{(1-u_2^2)^2 + 4h_2^2u_2^2}}, \quad (i=1 \text{ or } 2) \quad \dots \dots (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \arg \Phi_0 \\ &= \tan^{-1} \frac{2h_1 u_1}{1-u_1^2} + \tan^{-1} \frac{2h_2 u_2}{1-u_2^2} - 90^\circ. \end{aligned} \quad (30)$$

ここに、  
いま、

$$u_i = n_i/\omega = T/T_i. \quad (i = 1, 2) \quad (31)$$

$$F(h, u) = \frac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2}} \quad (32)$$

とおけば、

$$F(h, 1/u) = \frac{u^2}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2}} = u^2 F(h, u). \quad (33)$$

また、

$$V_s = 2Ak/l n_i \quad (n_i \text{ は } n_1 \text{ と } n_2 \text{ のうち、大きいほう}) \quad (34)$$

とすれば、

$$V_0 = V_s u_i F(h_i, u_i) F(h_j, u_j), \quad (u_i \geq u_j) \quad (35)$$

となる。したがって、 $F(h, u)$  の値をいろいろな  $h, u$  について計算しておけば、(35) 式によって  $V_0$  を計算するのに便利である。

Table 1 は  $\log F(h, u)$  の表である。ただし  $u > 1$  の範囲は計算してないが、これは (33) 式によって  $F(h, 1/u)$  から求めればよい。すなわち、

$$\log V_0 = \log V_s + \log u_i + \log F(h_i, u_i) + \log F(h_j, u_j), \quad (u_i \leq 1) \quad (36)$$

$$\log V_0 = \log V_s - \log u_i + \log F(h_i, 1/u_i) + \log F(h_j, u_j), \quad (u_i \geq 1 \geq u_j) \quad (37)$$

$$\log V_0 = \log V_s - 3 \log u_j + \log F(h_i, 1/u_i) + \log F(h_j, 1/u_j) - \log(n_i/n_j), \quad (u_j \geq 1) \quad (38)$$

である。

位相のずれのほうは

$$\phi(h, u) = \tan^{-1} \frac{2hu}{1-u^2} \quad (39)$$

とすれば、

$$\phi(h, 1/u) = -\phi(h, u) + 180^\circ, \quad (40)$$

$$\delta_0 = \phi(h_1, u_1) + \phi(h_2, u_2) - 90^\circ. \quad (41)$$

Table 2 は  $\phi(h, u)$  の表である。ただし、 $u > 1$  の範囲は計算してないが、これは (40) 式によって  $\phi(h, 1/u)$  から求めればよい。すなわち、

$$\delta_0 = \phi(h_i, u_i) + \phi(h_j, u_j) - 90^\circ, \quad (u_i \leq 1) \quad (42)$$

$$\delta_0 = -\phi(h_i, 1/u_i) + \phi(h_j, u_j) + 90^\circ, \quad (u_i \geq 1 \geq u_j) \quad (43)$$

$$\delta_0 = -\phi(h_i, 1/u_i) - \phi(h_j, 1/u_j) + 270^\circ. \quad (u_j \geq 1) \quad (44)$$

なお、(34) 式の  $V_s$  の値は (13)~(19) 式を使って書き改めると、

$$\begin{aligned}
 V_s &= \frac{4A}{l} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} \frac{n_j}{n_i} h_{e_1} h_{e_2} \frac{1}{P_1 P_2}} \\
 &= \frac{4A\sigma}{l} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} \frac{n_j}{n_i} h_1 h_2} \dots\dots\dots (45)
 \end{aligned}$$

ただし、
$$\sigma^2 = fk/4h_1h_2n_1n_2 = \frac{h_{e_1}h_{e_2}}{h_1h_2} \cdot \frac{1}{P_1P_2} \dots\dots\dots (46)$$

§ 3.

(25) 式の  $S$  は

$$\begin{aligned}
 |S| &= \frac{fk}{\omega^2 \sqrt{(1-u_1^2)^2 + 4h_1^2 u_1^2} \sqrt{(1-u_2^2)^2 + 4h_2^2 u_2^2}} \\
 &= \frac{fk}{n_i^2} \left(\frac{u_i}{u_2}\right)^2 \frac{1}{\sqrt{(1-u_1^2)^2 + 4h_1^2 u_1^2}} \frac{u_2^2}{\sqrt{(1-u_2^2)^2 + 4h_2^2 u_2^2}} \dots\dots (47)
 \end{aligned}$$

$$C = fk/n_i^2 \quad (n_i \text{ は } n_1 \text{ と } n_2 \text{ のうち大きいほう}) \dots\dots\dots (48)$$

とおけば、

$$|S| = C u_i^2 F(h_i, u_i) F(h_j, u_j) \quad (u_i \geq u_j) \dots\dots\dots (49)$$

$$= (C/V_s) u_i V_0 \dots\dots\dots (50)$$

また、

$$\begin{aligned}
 \gamma = \arg S &= \tan^{-1} \frac{2h_1 u_1}{1-u_1^2} + \tan^{-1} \frac{2h_2 u_2}{1-u_2^2} - 180^\circ \\
 &= \phi(h_1, u_1) + \phi(h_2, u_2) - 180^\circ \\
 &= \delta_0 - 90^\circ \dots\dots\dots (51)
 \end{aligned}$$

$|S|$  および  $\gamma$  は Table 1, 2 から求めることができる。実際は  $V_0, \delta_0$  がわかっているから、(50)、(51) 式によって簡単に求められる。

$|1-S|$  および  $\arg(1-S)$  は

$$|1-S| = \sqrt{1 + |S|^2 - 2|S|\cos\gamma} \dots\dots\dots (52)$$

$$\arg(1-S) = \sin^{-1} \left( \frac{\sin\gamma \cdot |S|}{|1-S|} \right) \dots\dots\dots (53)$$

である。 $|S|$  と  $\gamma$  から  $\log \frac{1}{|1-S|}$ ,  $\arg \frac{1}{1-S}$  を求める表を作っておけば便利である。この表は紙数のつごうで、次報に掲げる。

以上で  $V_0, \delta_0, \frac{1}{|1-S|}, \arg \frac{1}{1-S}$  がわかったから、(28) 式によって、 $V, \delta$  が求められる。

なお、(48) 式の  $C$  の値は

$$C = 4 \frac{n_j}{n_i} \tilde{h}_{e_1} h_{e_2} \frac{1}{P_1 P_2}$$

$$= 4 \sigma^2 \frac{n_j}{n_i} h_1 h_2 \dots \dots \dots (54)$$

$V_s$  と  $C$  の関係は

$$V_s = \frac{2A}{l} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} C} \dots \dots \dots (55)$$

§ 4.

この種の電磁式地震計の常数としては、次の6個が必要である。

- (1) 変換器の固有周期  $T_1$
- (2) 検流計の固有周期  $T_2$
- (3) 変換器の減衰常数  $h_1$
- (4) 検流計の減衰常数  $h_2$

(5) 倍率を表わす常数——これには (34), (45) 式の  $V_s$  を用いればよいが、一般にはその他のものが用いられることが多い。Galitzin の書物では  $A, l, k$  の3個を別々に与えることにしているし、Tajime<sup>(1)</sup> は  $\frac{2A\sigma}{l} \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$  を静的倍率と称している。ソ連の地震報告では

$$\bar{V} = \frac{2A\sigma}{l} \sqrt{\frac{K_1 n_j h_j}{K_2 n_i h_i}}$$

を用いている。また、最大倍率  $V_m$  を用いることもあるが、これは式で表わすと複雑になる。しかし、 $n_i \gg n_j$  ( $T_i \ll T_j$ ) で  $h_j$  が 1 よりあまり大きくないときは

$$V_m \doteq V_s / 2h_i = \bar{V}$$

となる。

(6) Coupling を表わす常数——これには (48), (54) 式の  $C$  を用いればよいが (46) 式の  $\sigma$  を Coupling Constant と称して用いることが多い。

(1) K. Tajime: 地震 II, 8, (1955—6), 23—33, 138—148, 155—157. 本文は同氏のものど多少表現は違いますが内容は同じである。なお同氏論文中の  $\sigma$  は本文 (46) 式の  $\sigma^2$  と同じである。

Table 1  $\log F(h, u) = \log \sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2}$

$n$	$\log u$	$h=0$	$h=0.1$	$h=0.2$	$h=0.3$	$h=0.4$	$h=0.5$	$h=0.6$	$h=0.7$	$h=0.8$	$h=0.9$	$h=1.0$	$h=1.1$	$h=1.2$	$h=1.3$
1.0000	0.00	$\infty$	0.6990	0.3979	0.2218	0.0969	0.0000	-0.0792	-0.1461	-0.2041	-0.2553	-0.3010	-0.3424	-0.3802	-0.4150
0.8913	-0.05	0.6870	0.5653	0.3856	0.2419	0.1295	0.0397	-0.0371	-0.1020	-0.1586	-0.2088	-0.2539	-0.2948	-0.3322	-0.3667
0.7943	-0.10	0.4329	0.3965	0.3125	0.2198	0.1338	0.0576	-0.0095	-0.0688	-0.1217	-0.1693	-0.2124	-0.2519	-0.2882	-0.3218
0.7080	-0.15	0.3021	0.2853	0.2414	0.1837	0.1222	0.0625	0.0065	-0.0452	-0.0926	-0.1362	-0.1765	-0.2137	-0.2482	-0.2805
0.6310	-0.20	0.2205	0.2112	0.1853	0.1481	0.1048	0.0595	0.0145	-0.0289	-0.0702	-0.1090	-0.1455	-0.1799	-0.2121	-0.2424
0.5623	-0.25	0.1651	0.1595	0.1429	0.1179	0.0871	0.0530	0.0175	-0.0181	-0.0530	-0.0868	-0.1193	-0.1502	-0.1793	-0.2079
0.5012	-0.30	0.1256	0.1218	0.1106	0.0932	0.0709	0.0452	0.0175	-0.0112	-0.0403	-0.0691	-0.0973	-0.1248	-0.1511	-0.1769
0.4467	-0.35	0.0967	0.0940	0.0861	0.0726	0.0572	0.0378	0.0162	-0.0052	-0.0306	-0.0548	-0.0790	-0.1029	-0.1264	-0.1494
0.3981	-0.40	0.0749	0.0730	0.0673	0.0581	0.0459	0.0311	0.0143	-0.0036	-0.0234	-0.0435	-0.0639	-0.0844	-0.1049	-0.1252
0.3548	-0.45	0.0584	0.0570	0.0526	0.0459	0.0367	0.0253	0.0122	-0.0023	-0.0175	-0.0345	-0.0515	-0.0689	-0.0865	-0.1041
0.3162	-0.50	0.0457	0.0447	0.0415	0.0363	0.0292	0.0205	0.0102	-0.0012	-0.0139	-0.0273	-0.0414	-0.0560	-0.0709	-0.0860
0.2818	-0.55	0.0359	0.0351	0.0327	0.0285	0.0233	0.0165	0.0084	-0.0007	-0.0108	-0.0208	-0.0332	-0.0453	-0.0578	-0.0706
0.2512	-0.60	0.0283	0.0277	0.0258	0.0227	0.0185	0.0132	0.0069	-0.0003	-0.0084	-0.0173	-0.0286	-0.0360	-0.0469	-0.0570
0.2239	-0.65	0.0223	0.0219	0.0204	0.0180	0.0147	0.0106	0.0056	-0.0001	-0.0065	-0.0136	-0.0207	-0.0294	-0.0380	-0.0469
0.1995	-0.70	0.0176	0.0173	0.0161	0.0143	0.0117	0.0085	0.0046	0.0000	-0.0051	-0.0108	-0.0169	-0.0231	-0.0306	-0.0380
0.1778	-0.75	0.0140	0.0137	0.0128	0.0123	0.0093	0.0067	0.0037	0.0001	-0.0044	-0.0086	-0.0135	-0.0189	-0.0245	-0.0306
0.1585	-0.80	0.0110	0.0108	0.0101	0.0090	0.0074	0.0054	0.0030	0.0002	-0.0033	-0.0068	-0.0108	-0.0151	-0.0197	-0.0246
0.1413	-0.85	0.0088	0.0086	0.0080	0.0071	0.0059	0.0043	0.0024	0.0002	-0.0025	-0.0054	-0.0086	-0.0121	-0.0158	-0.0198
0.1259	-0.90	0.0069	0.0068	0.0064	0.0057	0.0047	0.0034	0.0019	0.0002	-0.0020	-0.0043	-0.0068	-0.0096	-0.0126	-0.0158
0.1122	-0.95	0.0055	0.0054	0.0051	0.0045	0.0037	0.0027	0.0015	0.0002	-0.0016	-0.0034	-0.0054	-0.0077	-0.0101	-0.0127
0.1000	-1.00	0.0044	0.0043	0.0040	0.0036	0.0029	0.0022	0.0012	0.0001	-0.0012	-0.0027	-0.0043	-0.0061	-0.0081	-0.0101
0.08913	-1.05	0.0035	0.0034	0.0032	0.0028	0.0023	0.0017	0.0010	0.0001	-0.0010	-0.0021	-0.0034	-0.0049	-0.0064	-0.0081
0.07943	-1.10	0.0027	0.0027	0.0025	0.0022	0.0019	0.0014	0.0008	0.0000	-0.0008	-0.0017	-0.0027	-0.0039	-0.0051	-0.0064
0.07080	-1.15	0.0023	0.0021	0.0020	0.0018	0.0015	0.0011	0.0006	0.0000	-0.0006	-0.0014	-0.0022	-0.0031	-0.0041	-0.0051
0.06310	-1.20	0.0017	0.0017	0.0016	0.0014	0.0012	0.0009	0.0005	0.0000	-0.0005	-0.0011	-0.0017	-0.0024	-0.0032	-0.0041
0.05623	-1.25	0.0014	0.0014	0.0013	0.0011	0.0009	0.0007	0.0004	0.0000	-0.0004	-0.0009	-0.0014	-0.0019	-0.0026	-0.0032
0.05012	-1.30	0.0011	0.0011	0.0010	0.0009	0.0007	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0003	-0.0007	-0.0011	-0.0015	-0.0020	-0.0026
0.04467	-1.35	0.0009	0.0009	0.0008	0.0007	0.0006	0.0004	0.0002	0.0000	-0.0002	-0.0005	-0.0009	-0.0012	-0.0016	-0.0020
0.03981	-1.40	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0003	0.0002	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0007	-0.0010	-0.0013	-0.0016
0.03548	-1.45	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0000	-0.0002	-0.0003	-0.0005	-0.0008	-0.0010	-0.0013
0.03162	-1.50	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0003	-0.0004	-0.0006	-0.0008	-0.0010
0.02818	-1.55	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0001	0.0000	-0.0000	-0.0002	-0.0003	-0.0005	-0.0006	-0.0008
0.02512	-1.60	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	-0.0000	-0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0006
0.02239	-1.65	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0005
0.01995	-1.70	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0004
0.01778	-1.75	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0003
0.01585	-1.80	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0003
0.01413	-1.85	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002
0.01259	-1.90	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002



Table 2  $\phi(h, u) = \tan^{-1} \frac{2hu}{1-u^2}$

$\log u$	$h=0.1$	$h=0.2$	$h=0.3$	$h=0.4$	$h=0.5$	$h=0.6$	$h=0.7$	$h=0.8$	$h=0.9$	$h=1.0$	$h=1.1$	$h=1.2$	$h=1.3$
0.00	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'
-0.05	40 56	60 02	68 58	73 55	77 01	79 07	80 39	81 48	82 42	83 25	84 01	84 31	84 56
-0.10	23 17	40 43	52 15	59 51	65 05	68 50	71 38	73 48	75 32	76 55	78 04	79 03	79 52
-0.15	15 51	29 35	40 25	48 38	54 50	59 35	63 17	66 14	68 38	70 36	72 15	73 39	74 50
-0.20	11 51	22 45	32 10	39 59	46 21	51 31	55 44	59 12	62 05	64 30	66 34	68 20	69 51
-0.25	09 20	18 12	26 16	33 20	39 26	44 37	49 01	52 46	55 57	58 42	61 04	63 08	64 56
-0.30	07 37	14 59	21 53	28 10	33 48	38 46	43 10	47 12	50 18	53 14	55 49	58 06	60 07
-0.35	06 22	12 35	18 31	24 03	29 10	33 49	38 00	41 46	45 08	48 08	50 50	53 15	55 25
-0.40	05 24	10 43	15 51	20 44	25 19	29 35	33 31	37 07	40 25	43 25	46 09	48 38	50 54
-0.45	04 38	09 13	13 41	17 59	22 06	25 58	29 36	33 00	36 09	39 04	41 46	44 15	46 32
-0.50	04 01	08 00	11 54	15 42	19 22	22 51	26 12	29 21	32 19	35 06	37 42	40 08	42 25
-0.55	03 30	06 59	10 25	13 45	17 01	20 10	23 12	26 06	28 51	31 29	33 57	36 18	38 31
-0.60	03 04	06 07	09 08	12 06	15 01	17 50	20 34	23 13	25 46	28 12	30 32	32 46	34 53
-0.65	02 42	05 23	08 03	10 41	13 16	15 48	18 16	20 40	22 59	25 14	27 25	29 30	31 30
-0.70	02 23	04 45	07 06	09 26	11 44	14 00	16 13	18 23	20 30	22 34	24 34	26 30	28 23
-0.75	02 06	04 12	06 17	08 21	10 24	12 26	14 25	16 22	18 17	20 10	22 00	23 47	25 31
-0.80	01 52	03 43	05 34	07 25	09 14	11 02	12 49	14 35	16 19	18 01	19 41	21 19	22 51
-0.85	01 39	03 18	04 57	06 35	08 12	09 49	11 25	12 59	14 33	16 05	17 36	19 05	20 33
-0.90	01 28	02 56	04 23	05 51	07 17	08 44	10 09	11 34	12 58	14 21	15 43	17 04	18 24
-0.95	01 18	02 36	03 54	05 12	06 29	07 46	09 02	10 18	11 34	12 48	14 02	15 15	16 28
-1.00	01 10	02 19	03 28	04 37	05 46	06 55	08 03	09 11	10 18	11 25	12 32	13 38	14 43
-1.05	01 01	02 04	03 05	04 07	05 08	06 09	07 10	08 11	09 11	10 11	11 11	12 10	13 09
-1.10	00 55	01 50	02 45	03 40	04 34	05 29	06 23	07 17	08 11	09 05	09 58	10 52	11 44
-1.15	00 49	01 38	02 27	03 16	04 04	04 53	05 41	06 30	07 18	08 06	08 54	09 42	10 29
-1.20	00 44	01 27	02 11	02 54	03 38	04 21	05 04	05 47	06 30	07 13	07 56	08 39	09 21
-1.25	00 39	01 18	01 56	02 35	03 14	03 52	04 31	05 09	05 48	06 26	07 05	07 43	08 21
-1.30	00 35	01 09	01 44	02 18	02 53	03 27	04 03	04 36	05 10	05 44	06 19	06 52	07 27
-1.35	00 31	01 02	01 32	02 03	02 34	03 05	03 35	04 06	04 36	05 07	05 37	06 08	06 38
-1.40	00 27	00 55	01 22	01 49	02 17	02 44	03 12	03 39	04 06	04 34	05 01	05 28	05 55
-1.45	00 24	00 49	01 14	01 38	02 02	02 27	02 51	03 16	03 40	04 04	04 28	04 53	05 17
-1.50	00 22	00 44	01 05	01 27	01 49	02 10	02 32	02 54	03 16	03 37	03 59	04 21	04 42
-1.55	00 19	00 39	00 58	01 18	01 37	01 56	02 16	02 35	02 54	03 14	03 33	03 52	04 12
-1.60	00 17	00 35	00 52	01 09	01 26	01 44	02 01	02 18	02 35	02 53	03 10	03 27	03 44
-1.65	00 15	00 31	00 46	01 02	01 17	01 32	01 48	02 03	02 19	02 34	02 49	03 05	03 20
-1.70	00 14	00 28	00 41	00 55	01 09	01 22	01 36	01 50	02 04	02 17	02 31	02 44	02 58
-1.75	00 12	00 24	00 37	00 49	01 01	01 13	01 26	01 38	01 50	02 02	02 14	02 27	02 39
-1.80	00 11	00 22	00 33	00 44	00 55	01 05	01 16	01 27	01 38	01 49	02 00	02 11	02 22
-1.85	00 10	00 19	00 29	00 39	00 49	00 58	01 08	01 18	01 27	01 37	01 47	01 57	02 06
-1.90	00 09	00 17	00 26	00 35	00 43	00 52	01 01	01 09	01 18	01 27	01 35	01 44	01 52

Table 1 (continued)

log u	h=1.4	h=1.5	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7	h=8	h=9	h=10	h=11	h=12	h=15	h=20
0.00	-0.4472	-0.4771	-0.6021	-0.7782	-0.9031	-1.0000	-1.0792	-1.1461	-1.2041	-1.2553	-1.3010	-1.3424	-1.3802	-1.4771	-1.6021
-0.05	-0.8987	-0.4284	-0.5533	-0.7785	-0.8533	-0.9501	-1.0293	-1.0962	-1.1542	-1.2053	-1.2511	-1.2925	-1.3303	-1.4272	-1.5521
-0.10	-0.3431	-0.3823	-0.5051	-0.6794	-0.8038	-0.9005	-0.9795	-1.0464	-1.1043	-1.1554	-1.2011	-1.2425	-1.2803	-1.3772	-1.5021
-0.15	-0.3105	-0.3388	-0.4587	-0.6312	-0.7548	-0.8511	-0.9300	-0.9967	-1.0546	-1.1056	-1.1513	-1.1926	-1.2304	-1.3228	-1.4522
-0.20	-0.2710	-0.2981	-0.4141	-0.5836	-0.7062	-0.8020	-0.8806	-0.9472	-1.0049	-1.0559	-1.1015	-1.1429	-1.1806	-1.2774	-1.4022
-0.25	-0.2346	-0.2601	-0.3712	-0.5369	-0.6580	-0.7536	-0.8313	-0.8977	-0.9553	-1.0062	-1.0518	-1.0931	-1.1307	-1.2274	-1.3522
-0.30	-0.2016	-0.2252	-0.3304	-0.4912	-0.6105	-0.7048	-0.7825	-0.8486	-0.9060	-0.9568	-1.0022	-1.0434	-1.0810	-1.1777	-1.3024
-0.35	-0.1717	-0.1934	-0.2918	-0.4467	-0.5637	-0.6569	-0.7340	-0.7997	-0.8568	-0.9074	-0.9528	-0.9939	-1.0314	-1.1278	-1.2525
-0.40	-0.1451	-0.1646	-0.2555	-0.4035	-0.5177	-0.6095	-0.6858	-0.7510	-0.8079	-0.8582	-0.9034	-0.9444	-0.9819	-1.0782	-1.2027
-0.45	-0.1216	-0.1390	-0.2219	-0.3620	-0.4727	-0.5628	-0.6381	-0.7027	-0.7592	-0.8093	-0.8543	-0.8951	-0.9325	-1.0285	-1.1529
-0.50	-0.1012	-0.1170	-0.1910	-0.3222	-0.4289	-0.5169	-0.5909	-0.6549	-0.7108	-0.7606	-0.8053	-0.8460	-0.8832	-0.9790	-1.1031
-0.55	-0.0838	-0.0969	-0.1630	-0.2845	-0.3865	-0.4720	-0.5446	-0.6076	-0.6627	-0.7123	-0.7567	-0.7971	-0.8341	-0.9296	-1.0534
-0.60	-0.0688	-0.0801	-0.1379	-0.2491	-0.3458	-0.4283	-0.4992	-0.5605	-0.6156	-0.6644	-0.7085	-0.7486	-0.7854	-0.8805	-1.0040
-0.65	-0.0562	-0.0657	-0.1158	-0.2162	-0.3070	-0.3860	-0.4548	-0.5153	-0.5689	-0.6171	-0.6606	-0.7004	-0.7369	-0.8315	-0.9546
-0.70	-0.0457	-0.0536	-0.0964	-0.1860	-0.2701	-0.3452	-0.4115	-0.4703	-0.5229	-0.5702	-0.6132	-0.6525	-0.6887	-0.7826	-0.9051
-0.75	-0.0370	-0.0436	-0.0797	-0.1585	-0.2357	-0.3063	-0.3698	-0.4267	-0.4779	-0.5242	-0.5665	-0.6053	-0.6410	-0.7341	-0.8560
-0.80	-0.0298	-0.0353	-0.0655	-0.1341	-0.2040	-0.2697	-0.3299	-0.3845	-0.4341	-0.4793	-0.5207	-0.5588	-0.5941	-0.6861	-0.8072
-0.85	-0.0240	-0.0285	-0.0536	-0.1126	-0.1730	-0.2354	-0.2919	-0.3429	-0.3917	-0.4355	-0.4758	-0.5129	-0.5478	-0.6286	-0.7586
-0.90	-0.0193	-0.0229	-0.0436	-0.0936	-0.1489	-0.2036	-0.2560	-0.3053	-0.3506	-0.3928	-0.4319	-0.4683	-0.5021	-0.5914	-0.7102
-0.95	-0.0154	-0.0184	-0.0353	-0.0774	-0.1253	-0.1740	-0.2226	-0.2684	-0.3115	-0.3518	-0.3890	-0.4246	-0.4576	-0.5450	-0.6623
-1.00	-0.0123	-0.0147	-0.0285	-0.0636	-0.1048	-0.1483	-0.1919	-0.2342	-0.2745	-0.3127	-0.3486	-0.3825	-0.4143	-0.4996	-0.6150
-1.05	-0.0099	-0.0118	-0.0229	-0.0539	-0.0866	-0.1250	-0.1640	-0.2025	-0.2399	-0.2756	-0.3096	-0.3419	-0.3725	-0.4552	-0.5683
-1.10	-0.0078	-0.0094	-0.0184	-0.0422	-0.0717	-0.1045	-0.1389	-0.1736	-0.2077	-0.2408	-0.2727	-0.3032	-0.3324	-0.4119	-0.5223
-1.15	-0.0063	-0.0075	-0.0147	-0.0342	-0.0587	-0.0868	-0.1167	-0.1475	-0.1783	-0.2087	-0.2382	-0.2667	-0.2943	-0.3702	-0.4774
-1.20	-0.0050	-0.0060	-0.0118	-0.0271	-0.0479	-0.0715	-0.0973	-0.1243	-0.1517	-0.1792	-0.2062	-0.2326	-0.2583	-0.3302	-0.4335
-1.25	-0.0040	-0.0048	-0.0094	-0.0222	-0.0389	-0.0586	-0.0805	-0.1039	-0.1280	-0.1525	-0.1769	-0.2010	-0.2247	-0.2921	-0.3910
-1.30	-0.0032	-0.0038	-0.0075	-0.0178	-0.0314	-0.0478	-0.0662	-0.0862	-0.1072	-0.1287	-0.1505	-0.1723	-0.1938	-0.2563	-0.3501
-1.35	-0.0025	-0.0030	-0.0060	-0.0143	-0.0253	-0.0388	-0.0542	-0.0711	-0.0890	-0.1062	-0.1269	-0.1463	-0.1657	-0.2229	-0.3140
-1.40	-0.0020	-0.0024	-0.0048	-0.0114	-0.0204	-0.0313	-0.0441	-0.0582	-0.0735	-0.0890	-0.1062	-0.1236	-0.1405	-0.1922	-0.2740
-1.45	-0.0016	-0.0019	-0.0038	-0.0091	-0.0163	-0.0253	-0.0357	-0.0474	-0.0602	-0.0729	-0.0882	-0.1030	-0.1181	-0.1642	-0.2394
-1.50	-0.0013	-0.0015	-0.0030	-0.0073	-0.0131	-0.0203	-0.0288	-0.0384	-0.0491	-0.0606	-0.0727	-0.0854	-0.0985	-0.1391	-0.2073
-1.55	-0.0010	-0.0012	-0.0024	-0.0058	-0.0104	-0.0163	-0.0232	-0.0311	-0.0399	-0.0494	-0.0596	-0.0703	-0.0816	-0.1169	-0.1779
-1.60	-0.0008	-0.0010	-0.0019	-0.0046	-0.0083	-0.0130	-0.0186	-0.0246	-0.0323	-0.0402	-0.0486	-0.0577	-0.0671	-0.0975	-0.1514
-1.65	-0.0006	-0.0008	-0.0015	-0.0037	-0.0066	-0.0104	-0.0149	-0.0201	-0.0260	-0.0325	-0.0395	-0.0470	-0.0549	-0.0807	-0.1278
-1.70	-0.0005	-0.0006	-0.0012	-0.0029	-0.0053	-0.0083	-0.0119	-0.0161	-0.0209	-0.0262	-0.0319	-0.0381	-0.0447	-0.0663	-0.1069
-1.75	-0.0004	-0.0005	-0.0010	-0.0023	-0.0042	-0.0066	-0.0105	-0.0129	-0.0168	-0.0205	-0.0257	-0.0308	-0.0362	-0.0543	-0.0888
-1.80	-0.0003	-0.0004	-0.0008	-0.0018	-0.0035	-0.0053	-0.0071	-0.0093	-0.0134	-0.0169	-0.0207	-0.0248	-0.0292	-0.0442	-0.0733
-1.85	-0.0003	-0.0003	-0.0006	-0.0015	-0.0027	-0.0042	-0.0061	-0.0082	-0.0107	-0.0135	-0.0166	-0.0199	-0.0236	-0.0358	-0.0601
-1.90	-0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0012	-0.0021	-0.0033	-0.0048	-0.0066	-0.0085	-0.0108	-0.0133	-0.0160	-0.0190	-0.0289	-0.0490

Table 2 (continued)

log u	h=1.4	h=2.5	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7	h=8	h=9	h=10	h=11	h=12	h=15	h=20
0.00	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	99°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'	90°00'
-0.05	85 17	85 36	86 42	87 48	88 21	88 41	88 54	89 03	89 10	89 16	89 20	89 24	87 27	89 34	89 40
-0.10	80 35	81 12	83 22	85 34	86 41	87 20	87 47	88 06	88 20	88 31	88 40	88 47	88 53	89 07	89 20
-0.15	75 53	76 47	80 01	83 18	84 58	85 58	86 38	87 07	87 29	87 45	87 59	88 10	88 19	88 34	88 59
-0.20	71 11	72 22	76 35	80 58	83 12	84 33	85 25	86 06	86 35	86 58	87 16	87 31	87 43	88 11	88 38
-0.25	66 31	67 56	73 05	78 32	81 21	83 04	84 13	85 02	85 39	86 08	86 31	86 50	87 06	87 41	88 15
-0.30	61 55	63 31	69 31	76 01	79 25	81 30	82 54	83 55	84 42	85 15	85 44	86 07	86 26	87 09	87 52
-0.35	57 23	59 09	65 52	73 22	77 23	79 50	81 30	82 42	83 37	84 19	84 53	85 21	85 44	86 35	87 26
-0.40	52 57	54 50	62 09	70 36	75 12	78 04	80 11	81 25	82 29	83 18	84 31	85 38	86 58	88 58	86 58
-0.45	48 39	50 36	58 22	67 40	72 53	76 09	78 24	80 01	81 15	82 12	83 59	85 37	84 08	85 18	86 29
-0.50	44 32	46 30	54 34	64 37	70 25	74 07	76 39	78 30	79 55	81 01	81 54	82 38	83 14	84 35	85 56
-0.55	40 36	42 34	50 46	61 26	67 47	71 55	74 46	76 52	78 28	79 43	80 13	81 33	82 15	83 47	85 20
-0.60	36 54	38 49	47 00	58 08	65 00	69 33	72 44	75 05	76 53	78 18	79 26	80 23	81 10	82 55	84 40
-0.65	33 25	35 16	43 19	54 44	62 04	67 01	70 32	73 08	75 09	76 44	78 01	79 05	79 59	81 57	83 57
-0.70	30 11	31 56	39 44	51 16	58 58	64 18	68 09	71 02	73 16	75 02	76 28	77 40	78 40	80 53	83 08
-0.75	27 12	28 51	36 18	47 46	55 45	61 25	65 35	68 44	71 12	73 10	74 46	76 06	77 13	79 43	82 15
-0.80	24 29	26 00	33 02	44 18	52 27	58 24	62 52	66 17	68 58	71 08	72 54	74 23	75 38	78 25	81 16
-0.85	21 59	23 23	29 58	40 52	49 05	55 15	59 59	63 39	66 34	68 56	70 52	72 30	73 53	76 59	80 10
-0.90	19 42	21 00	27 06	37 30	45 40	51 59	56 55	60 50	63 58	66 32	68 39	70 26	71 57	75 24	78 57
-0.95	17 39	18 49	24 27	34 17	42 16	48 39	53 45	57 51	61 11	63 57	66 15	68 12	69 52	73 39	77 36
-1.00	15 48	16 52	22 00	31 13	38 56	45 17	50 29	54 44	58 15	61 11	63 40	65 46	67 25	71 44	76 06
-1.05	14 07	15 05	19 46	28 20	35 42	41 56	47 09	51 31	55 11	58 16	60 54	63 10	65 07	69 39	74 27
-1.10	12 37	13 29	17 44	25 37	32 36	38 38	43 48	48 13	51 59	55 12	57 58	60 23	62 28	67 22	72 38
-1.15	11 16	12 03	15 53	23 07	29 39	35 26	40 30	44 53	48 42	52 01	54 54	57 26	59 39	64 54	70 38
-1.20	10 04	10 46	14 13	20 49	26 53	32 21	37 15	41 34	45 23	48 45	51 43	54 20	56 40	62 15	68 28
-1.25	08 59	09 36	12 43	18 42	24 17	29 26	34 06	38 18	42 04	45 26	48 27	51 09	53 33	59 25	66 06
-1.30	08 01	08 34	11 22	16 47	21 54	26 41	31 05	35 07	38 48	42 08	45 08	47 52	50 20	56 26	63 33
-1.35	07 09	07 39	10 09	15 02	19 42	24 07	28 15	32 04	35 37	38 51	41 50	44 34	47 04	53 19	60 49
-1.40	06 22	06 49	09 04	13 27	17 42	21 44	25 34	29 10	32 32	35 40	38 34	41 16	43 44	50 07	57 55
-1.45	05 41	06 05	08 09	12 38	15 55	19 33	23 08	26 29	29 39	32 38	35 26	38 03	40 29	46 51	55 03
-1.50	05 04	05 25	07 13	10 45	14 13	17 34	20 48	23 54	26 52	29 40	32 20	34 51	37 13	43 31	51 42
-1.55	04 31	04 50	06 26	09 36	12 43	15 45	18 42	21 33	24 17	26 55	29 25	31 49	34 05	40 14	48 27
-1.60	04 03	04 19	05 45	08 35	11 22	14 07	16 47	19 23	21 55	24 21	26 41	28 57	31 06	37 01	45 09
-1.65	03 35	03 51	05 07	07 39	10 10	12 37	15 03	17 25	19 43	21 58	24 08	26 14	28 16	33 54	41 52
-1.70	03 12	03 26	04 34	06 50	09 04	11 17	13 28	15 37	17 43	19 46	21 46	23 42	25 36	30 55	38 36
-1.75	02 51	03 03	04 04	06 06	08 13	10 05	12 03	13 59	15 53	17 45	19 35	21 22	23 07	28 05	35 26
-1.80	02 32	02 43	03 38	05 26	07 14	09 01	10 46	12 31	14 14	15 56	17 36	19 14	20 50	25 26	32 23
-1.85	02 16	02 26	03 14	04 51	06 27	08 03	09 38	11 12	12 44	14 14	15 47	17 16	18 44	22 59	29 29
-1.90	01 44	02 10	02 53	04 19	05 45	07 11	08 35	10 00	11 23	12 46	14 08	15 29	16 49	20 42	26 44

Table 1 (continued)

log u	h=1.4	h=1.5	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7	h=8	h=9	h=10	h=11	h=12	h=15	h=20
-1.95	-0.0002	-0.0002	-0.0004	-0.0009	-0.0017	-0.0027	-0.0038	-0.0052	-0.0068	-0.0086	-0.0106	-0.0128	-0.0151	-0.0233	-0.0398
-2.00	-0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0007	-0.0013	-0.0021	-0.0031	-0.0042	-0.0054	-0.0069	-0.0085	-0.0102	-0.0121	-0.0187	-0.0322
-2.05	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0006	-0.0011	-0.0017	-0.0024	-0.0033	-0.0043	-0.0055	-0.0078	-0.0082	-0.0097	-0.0150	-0.0259
-2.10	-0.0000	-0.0000	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0013	-0.0019	-0.0026	-0.0034	-0.0044	-0.0054	-0.0065	-0.0077	-0.0120	-0.0209
-2.15	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0004	-0.0007	-0.0011	-0.0015	-0.0021	-0.0027	-0.0035	-0.0043	-0.0052	-0.0062	-0.0096	-0.0167
-2.20	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0003	-0.0005	-0.0008	-0.0012	-0.0017	-0.0022	-0.0028	-0.0034	-0.0041	-0.0049	-0.0076	-0.0134
-2.25	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0007	-0.0010	-0.0013	-0.0017	-0.0022	-0.0027	-0.0033	-0.0039	-0.0061	-0.0107
-2.30	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0002	-0.0003	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0014	-0.0017	-0.0022	-0.0026	-0.0031	-0.0048	-0.0085
-2.35	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0003	-0.0004	-0.0006	-0.0008	-0.0011	-0.0014	-0.0017	-0.0021	-0.0025	-0.0039	-0.0068
-2.40	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0005	-0.0007	-0.0009	-0.0011	-0.0014	-0.0017	-0.0019	-0.0031	-0.0054
-2.45	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0007	-0.0009	-0.0011	-0.0013	-0.0016	-0.0024	-0.0043
-2.50	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0006	-0.0007	-0.0009	-0.0010	-0.0012	-0.0019	-0.0034
-2.55	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0006	-0.0007	-0.0008	-0.0010	-0.0015	-0.0027
-2.60	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0007	-0.0008	-0.0012	-0.0024
-2.65	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0010	-0.0017
-2.70	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0008	-0.0014
-2.75	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0003	-0.0004	-0.0006	-0.0011
-2.80	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0003	-0.0005	-0.0009

Table 2 (continued)

log u	h=1.4	h=1.5	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7	h=8	h=9	h=10	h=11	h=12	h=15	h=20
-1.95	01°48'	01°56'	02°34'	03°51'	05°08'	06°24'	07°40'	08°56'	10°11'	11°25'	12°39'	13°52'	15°04'	18°36'	24°10'
-2.00	01°39	01°43	02°17	03°26	04°35'	05°43	06°50	07°58	09°06	10°12	11°19	12°24	13°30	16°42	21°48
-2.05	01°26	01°32	02°03	03°04	04°05	05°06	06°06	07°07	08°07	09°07	10°06	11°06	12°04	14°58	19°37
-2.10	01°16	01°22	01°49	02°44	03°38	04°33	05°27	06°21	07°14	08°08	09°01	09°55	10°48	13°24	17°38
-2.15	01°08	01°13	01°37	02°26	03°15	04°03	04°51	05°40	06°28	07°16	08°04	08°51	09°39	12°00	15°49
-2.20	01°01	01°05	01°27	02°10	02°53	03°37	04°20	05°03	05°46	06°29	07°12	07°54	08°37	10°43	14°10
-2.25	00°54	00°58	01°17	01°56	02°35	03°13	03°52	04°30	05°08	05°47	06°25	07°03	07°41	09°35	12°41
-2.30	00°48	00°52	01°09	01°43	02°18	02°52	03°27	04°01	04°35	05°09	05°43	06°17	06°52	08°33	11°20
-2.35	00°43	00°46	01°01	01°32	02°03	02°34	03°04	03°35	04°05	04°36	05°06	05°37	06°07	07°38	10°08
-2.40	00°38	00°41	00°55	01°22	01°49	02°17	02°44	03°11'	03°39	04°06	04°33	05°00	05°27	06°49	09°03
-2.45	00°34	00°37	00°49	01°13	01°38	02°02	02°26	02°51	03°15	03°39	04°04	04°28	04°52	06°05	08°05
-2.50	00°30	00°33	00°43	01°05	01°27	01°49	02°10	02°32	02°54	03°16	03°37	03°59	04°20	05°25	07°12
-2.55	00°27	00°29	00°39	00°58	01°17	01°37	01°56	02°16	02°35	02°54	03°14	03°33	03°52	04°50	06°26
-2.60	00°24	00°26	00°34	00°52	01°09	01°26	01°44	02°01	02°18	02°35	02°53	03°10	03°27	04°19	05°44
-2.65	00°22	00°23	00°31	00°46	01°02	01°17	01°32	01°48	02°03	02°18	02°34	02°49	03°05	03°51	05°07
-2.70	00°19	00°20	00°27	00°41	00°55	01°09	01°22	01°36	01°50	02°04	02°17	02°31	02°44	03°26	04°34
-2.75	00°17	00°18	00°24	00°37	00°50	01°01	01°13	01°26	01°38	01°50	02°02	02°14	02°27	03°03	04°04
-2.80	00°15	00°16	00°22	00°33	00°44	00°54	01°05	01°16	01°27	01°38	01°49	02°00	02°10	02°43	03°38

計算例  $T_i = 1, T_j = 10, h_i = 5, h_j = 0.5, V_s = 10,000$  の場合を考える. 変換器, 検流計とも制振は電磁的 (自己) 制振だけであるとすると  $h_{e1}/h_1 = h_{e2}/h_2 = 1$ , また, 減衰器を入れて  $P_1P_2 = 2.5$  とすると, (46), (45) 式から  $\sigma^2 = C = 0.4$  となる. 計算の結果は Tab. 3 のとおりで, これを図に書くと Fig. 4 のようになる. この図は横軸に地動の周期  $T$ , 縦軸にその周期に対する振動倍率  $V$ , 位相のずれ  $\delta$  をとり,  $T, V$  は対数目盛をとってある. さらに細線は  $V_0, \delta_0$ , つまり, coupling の影響を考えないときの振動倍率, 位相のずれである. 減衰器を入れて coupling の影響を小さくしていけば, 限りなくこの点線に近づけることができる.

なお, 図上で  $V, \delta$  を求めるには,  $V_0$  の曲線を, Fig. 4 (上) のような斜交座標 ( $T = T_i, V = V_s$  の点を通る斜線を  $|S| = C$  の線にとる) をとって読めば, そのまま  $|S|$  の値が, また,  $\delta_0$  の曲線を Fig. 4 (下) の右側目盛のように,  $90^\circ$  ずらして読めば, そのまま  $\gamma$  が求められるから, Fig. 5 のように, 複素平面上に  $S$  の軌跡をとり, 点  $S$  と点 1 を結ぶベクトルの長さと, 水平軸との傾きの間を測れば, これが  $|1-S|, \arg(1-S)$  となり, この値によって  $V_0, \delta_0$  を補正すればよい.

Table 3 Magnification and phase angle for

$T_i = 1, T_j = 10,$   
 $h_i = 5, h_j = 0.5,$   
 $V_s = 10,000, \sigma^2 = 0.4$

$\log T$	$\log V_0$	$V_0$	$\delta_0$	$\log V$	$V$	$\delta$
-0.9	2.8964	788	-37°18'	2.8954	786	-37°29'
-0.8	2.9304	852	-30 41	2.9292	849	-30 57
-0.7	2.9549	901	-24 33	2.9536	899	-24 55
-0.6	2.9718	937	-19 01	2.9705	934	-19 32
-0.5	2.9833	962	-14 04	2.9820	959	-14 45
-0.4	2.9908	979	-09 39	2.9894	976	-10 32
-0.3	2.9957	990	-05 37	2.9948	988	-06 45
-0.2	2.9981	996	-01 49	2.9976	994	-03 15
-0.1	3.0009	1002	01 54	3.0011	1003	00 05
0.0	3.0022	1005	05 46	3.0036	1008	03 28
0.1	3.0029	1007	09 57	3.0062	1014	07 04
0.2	3.0034	1008	14 41	3.0096	1022	11 11
0.3	3.0037	1009	20 14	3.0147	1034	15 47
0.4	3.0037	1009	26 57	3.0222	1052	21 32
0.5	3.0036	1008	35 15	3.0340	1081	29 51
0.6	3.0028	1006	45 46	3.0523	1128	38 34
0.7	3.0000	1000	59 30	3.0753	1189	51 53
0.8	2.9898	977	78 57	3.1093	1286	75 23
0.9	2.9340	859	103 06	3.0740	1186	108 14
1.0	2.8517	711	134 43	2.9374	866	148 49
1.1	2.6531	450	166 17	2.6656	463	179 23
1.2	2.3880	244	191 18	2.3703	235	199 41
1.3	2.0974	125	209 31	2.0751	119	214 15
1.4	1.7998	63.1	222 57	1.7810	60.4	225 31
1.5	1.5002	31.6	233 04	1.4864	30.6	234 24
1.6	1.2002	15.9	240 42	1.1907	15.5	241 24
1.7	0.9002	7.95	246 59	0.8939	7.83	247 20
1.8	0.6001	3.98	251 45	0.5960	3.94	251 56
1.9	0.3001	2.00	255 32	0.2974	1.98	255 37
2.0	0.0001	1.00	258 31	-0.0016	0.996	258 34

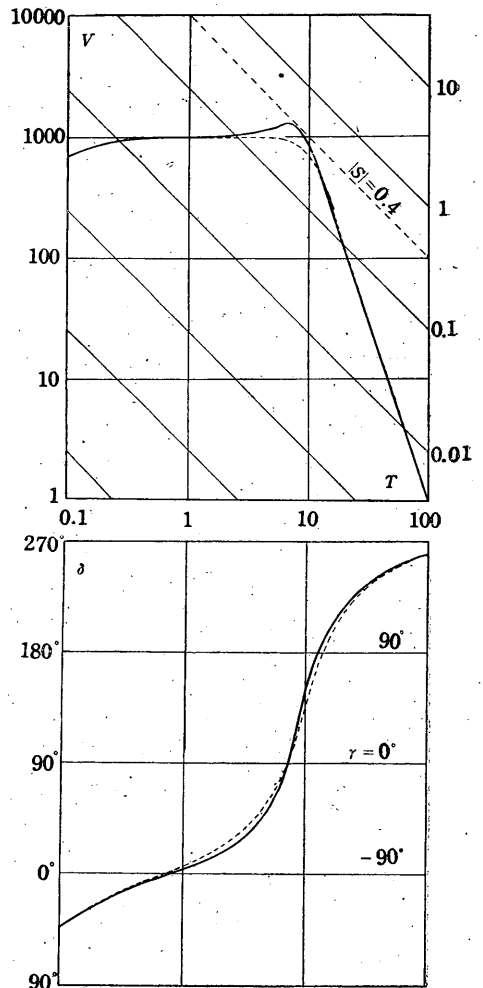


Fig. 4

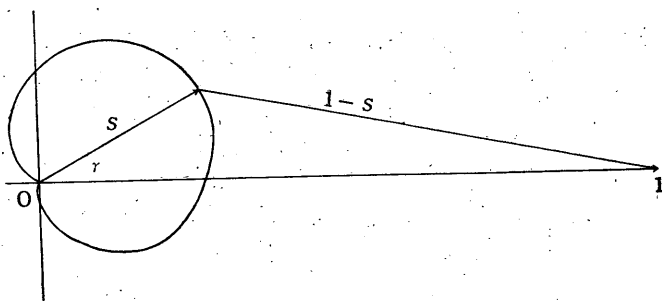


Fig. 5