

有明海の水利模型実験について (1)

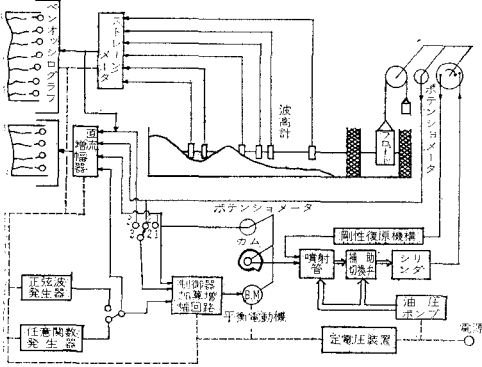
模型潮せき発生機構と水面制御の問題点

高田 雄之*・戸原 義男**

1. まえがき

著者らの製作した干拓水利研究のための潮せき発生機構は小型かつ比較的簡単な油圧式制御機構を用いる長崎海洋気象台の方式を採用している。模式図は図-1に示す

図-1 有明海模型実験装置模式図



ように正弦波発信器あるいは、任意関数発信器で信号(目標値)を発生し、制御器で60 c/sに変調増幅し、平衡電動機に伝達してトルクに変換する。さらにカムを通じて回転を変位にかえ、油圧噴射管を変位させる。この変位は噴射管、補助切換弁、シリンダにより力の増幅が行なわれて、フロートを駆動し、水面に昇降運動を与える。フロートからポテンシオメータを通じて、あるいは水面から水位計を通して制御器に負帰還(Negative feedback)を行なう。以上が大体の動作であるが各要素の機構、回路の特性、水面制御の問題点などについて簡単に報告する。

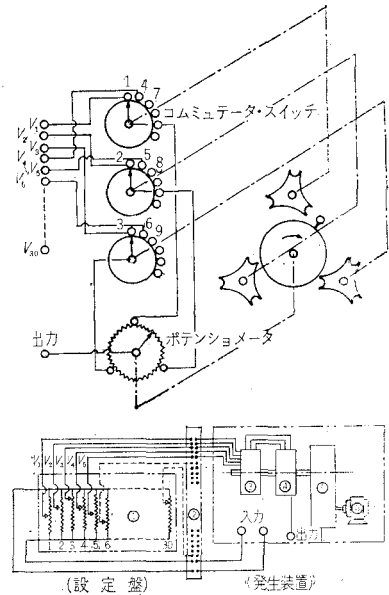
2. 正弦波発信器、任意関数発生装置

一般に正弦波を発生させる装置として二つの方法が多く用いられている。一つは電子管回路を使って、いわゆるLC一発振回路、RC一発振回路を構成する方法、他の方法は機械的な正弦運動を作りポテンシオメータを摺動させる方法である。前者は普通 $10 \sim 10^6$ c/sの範囲の短周期の波に都合がよく 10 c/s以下 10^{-3} c/s程度のき

わめて周期の長い波は技術的に製作がむずかしく経済的にも不利である。後者は $0 \sim 10$ c/s程度の周期に都合がよいためこの装置ではこれを使っている。ポテンシオメータの駆動方法は平衡電動機に減速歯車(1:480)をとりつけ、二次電圧を変変させることにより回転数すなわち周期を変化させている。

潮せき波の発生は M_2 , S_2 , K_1 , O_1 などの各分潮をそれぞれ正弦波発信器で発生し、合成する方法と任意関数発信器を使用する方法が考えられる。この装置では折線関数による任意関数発信器を使用している。この装置は図-2に示すように関数設定盤と発生装置で構成す

図-2 任意関数発生装置



る。関数設定盤はX軸30エレメントでY軸はおのおの200等分目盛、0.5%まで設定可能な直線摺動型ポテンシオメータで構成する。発生装置は設定盤の各出力間にポテンシオメータを内そうし、順次に切りかえて折線関数とする掃引機構と、これを駆動するモータおよびチェンジギアボックスを内蔵している。内そうポテンシオメータは図-2に示すように3等分タップ付エンドレスポテンシオメータで刷子軸はチェンジギアボック

* 正員 農博 九州大学教授 農学部

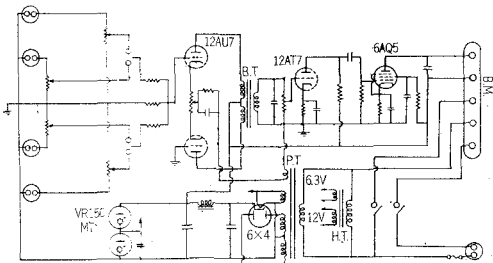
** 正員 農博 九州大学助手 農学部

スの出力軸に連動している。切換機構③はコミュテータスイッチでポテンシオメータのシャフトに連動して、設定盤からの出力電圧 $V_1, V_2, V_3 \dots$ を順次ポテンシオメータの3タップに分配する機構になっている。いまポテンシオメータ④のAタップに V_1, B に V_2 が接続された状態で刷子がA, B間を摺動するとCタップに V_3 が分配され、刷子がB, C間を摺動している間にAタップは V_1 から V_4 に切りかえられる。順次にこのようにして設定盤の各出力間を折線で結ぶとともに、あらかじめ、つぎの出力電圧を次点に分配しておく機構となることにより設定された任意の関数を完全な折線関数として発生する。

3. 制御回路 (加算回路, 増幅回路)

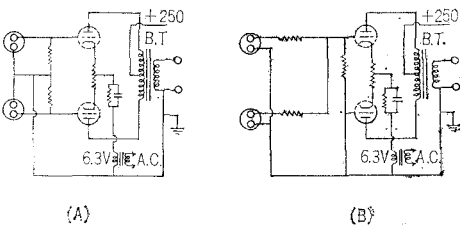
制御回路は、**図-3** に示すとおりで加算は電流加算を

図-3 制御回路配線図



行なっている。いま入力 e_i と負帰還 e_o との和は V_1 (12 AU 7) で60 c/sに変調増幅され、 $e_i - e_o$ に比例した電圧が平衡トランス T_1 の出力側にえられる。この場合 V_1 の入力 $e_i - e_o$ が正か負かによって T_1 の出力側の位相が 180° 変化する。 V_2 (12 AT 7) で電圧増幅、 V_3 (6 AQ 5) で電力増幅して平衡電動機を動作させる。加算回路は **図-4** の(A), (B)に示す2通りの方法を試みたが、(A)では V_1 の双極が近似的特性をもつことが必要であり、双極についての特性図を描いて厳選せねばならない。また入力電圧も制限をうける。(B)では直流の電流加算を抵抗器で行ない $e_i - e_o$ を入力としているので V_1 の双極の特性近似もそう厳密でなくてよい。 $e_i - e_o$ は最終的には0となるので入力0のとき出力が0であるよう調節しておけばよい。また信号電圧も高くとるこ

図-4 加算回路



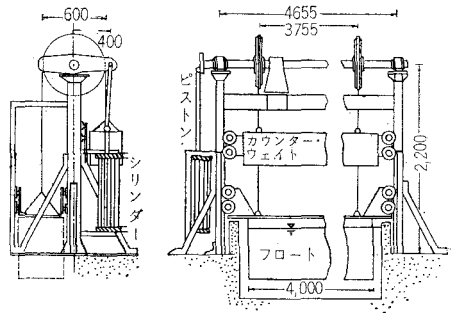
とができるので(B)の回路を用いている。平衡電動機はコントロール インピーダンス無負荷/制動時: $3.8 K\Omega / 3.3 K\Omega$, 減速比 1:60 のものを使用した。平衡電動機に直結するカムは回転角 $0 \sim 300^\circ$ の範囲で $0 \sim 5 \text{ mm}$ を直線にけずってあり回転角を変位に変換し噴射管に直接その変位を伝えるようにしている。カムには負帰還用のポテンシオメータを直結し、制御器からカムまでを閉回路にしている。

4. 油圧制御装置

装置は精立工業 KK 製で案内弁PV-20 000型付き R—B—E—PV 型である。この装置は大型シリンダーを駆動させるので直線性のよい噴射管から直接油圧を送ると送油量が少ないため制御の操作速度がおそくなるので噴射管で補助切換弁を動作させることにより、油圧ポンプからの圧油を切換弁(案内弁)からシリンダーに送り急速にシリンダーを動かすようになっている。したがって直線性は悪くなっている。シリンダーは直動型で直径140 mm, ストローク650 mm であり、油圧 5 kg/cm^2 を与えたとき、操作力は770kg である。

フロートは底面積 $2.4 \times 10^4 \text{ cm}^2$, 高さ70 cm, 最大ストローク60 cm, 有効ストローク44 cm である。駆動装置の構造を **図-5** に示す。

図-5 フロート駆動装置



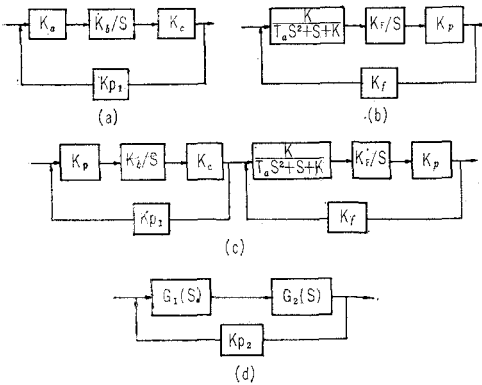
5. 電気制御回路の特性

各要素の伝達関数をそれぞれつぎのごとく表わす。制御器(増幅部): K_a , 平衡電動機: K_b/S , カム: K_c , ポテンシオメータ: K_{p1} , いま制御器からカムまでの信号伝達を伝達関数で表示すると **図-6** (a)のように表わされる。この回路ではカムの出力変位は、ポテンシオメータ K_{p1} を通じて負帰還されているので回路一巡の伝達関係は、

$$G(S) = \frac{K_a K_b K_c / S}{1 + K_a K_b K_c K_{p1} / S} = \frac{K'}{T'S + 1} \dots \dots (1)$$

ただし、 $K' = 1/K_{p1}$, $T' = 1/K_a K_b K_c K_{p1}$, あるいは式(1)を書きかえて、

図-6 伝達関数によるブロックダイアグラム



$$G(j\omega) = \frac{K'}{j\omega T' + 1} \dots\dots\dots (2)$$

となるから、この系は一次おくれ要素とみなすことができる。ここで T' は時定数であり、 K' は比例ゲインである。したがって

$$|G(j\omega)| = \frac{K'}{\sqrt{(\omega T')^2 + 1}} \dots\dots\dots \text{ゲイン}$$

$$\angle G(j\omega) = -\tan^{-1}(\omega T') \dots\dots\dots \text{位相}$$

$$h(t) = k(1 - e^{-t/T'}) \dots\dots\dots \text{過渡特性}$$

で特性が表示される。時定数 T' を求めるため、入力信号として長方形波（ユニット ステップ）を入れ過渡応答（Initial Response）を求めると、一次おくれ要素では、

$$T' \frac{dy}{dt} + y = 1 \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。この方程式の解は出力の初期値を 0 とすれば

$$y(t) = 1 - e^{-t/T'} \dots\dots\dots (4)$$

いま $t = T'$ とすると

$$y = 1 - e^{-1} = 0.632 \dots\dots\dots (5)$$

また

$$y(t) = K(1 - e^{-t/T'}) \dots\dots\dots (6)$$

式(6)を $K = y_{10}$ とおき変形すると、

$$-t/T' = \log_e(y_{\infty} - y) = 2.3 \log_{10}(y_{\infty} - y)$$

いま、 $t = t_1$ で $y = y_1$ 、 $t = t_2$ で $y = y_2$ とし、

$$y_{\infty} - y_2 = (y_{\infty} - y_1)/10$$

となるように t_1 、 t_2 をとれば

$$\frac{t_2 - t_1}{T'} = 2.30 \log_{10} \frac{y_{\infty} - y_1}{y_{\infty} - y_2} = 2.3$$

$$\therefore T' = (t_2 - t_1) / 2.30 \dots\dots\dots (7)$$

となり式(7)から時定数が求められる。いま制御器の増幅部のゲインを最大にしたときの測定結果から時定数 T' を求めると $T' = 0.55 \text{ sec}$ がえられた。つぎにこの回路に正弦波入力を入れると定常状態において出力は正弦波状に変化する。このような定常状態における入力と出力

の振幅比および位相差とそのときの周波数との関係を求める。一次おくれ要素に、正弦波状入力を入れたとし入力を $a \sin \omega t$ 、出力を $y(t)$ とすると、

$$T' \frac{dy}{dt} + y = a \sin \omega t \dots\dots\dots (8)$$

が成立する。初期条件として $T' = 0$ にて $y = 0$ とすると

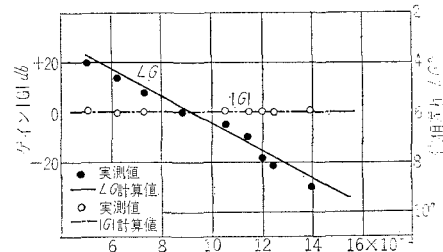
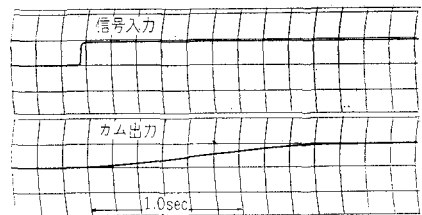
$$y = \frac{a}{\sqrt{1 + (\omega T')^2}} \sin(\omega t + \phi) - \frac{a \sin \phi}{\sqrt{1 + (\omega T')^2}} e^{-t/T'} \dots\dots\dots (9)$$

ただし $\phi = -\tan^{-1} \omega T'$ 、第2項の $e^{-t/T'}$ は時間 t の経過とともに次第に 0 に近づくので十分時間のたった定常状態では、入力 $a \sin \omega t$ に対して出力は、

$$y = \frac{a}{\sqrt{1 + (\omega T')^2}} \sin(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (10)$$

で示される。いま周期 40~130 sec の正弦波入力を入れて、周波数と振幅比、位相おくれの関係を求めると、図-7 のようになる。この実験では周期が非常に大きく角

図-7 電気系の過渡特性、周波数特性



速度 ω がきわめて小さいこと、時定数が短く 0.55 sec 程度であるため、 $(\omega T')^2$ が 1 に比較して無視できるため入出力の振幅比は 1 であり位相おくれも非常に小さい。したがってカムまでは忠実に伝達され問題がないといえる(図-9(A)参照)。

6. 油圧制御回路の特性

各要素の伝達関数を示すと、まず噴射管の変位と補助切換弁との入出力関係は直結フィードバックであるからその伝達関数は、 $K/(T\alpha S^2 + S + K)$ 、またシリンダー： K_p/S 、剛性復原： K_f 、フオート： K_f 、伝達関数で回路を表示すると図-6(b)で表わされる。この系の回路一巡の伝達関数は

図-8 油圧系の過渡特性, 周波数特性

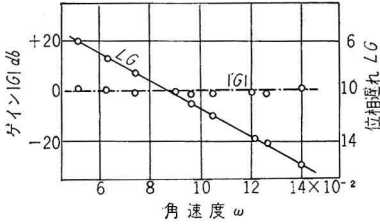
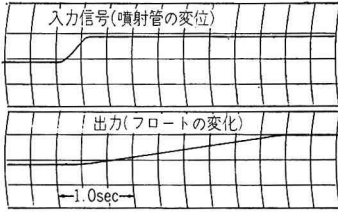
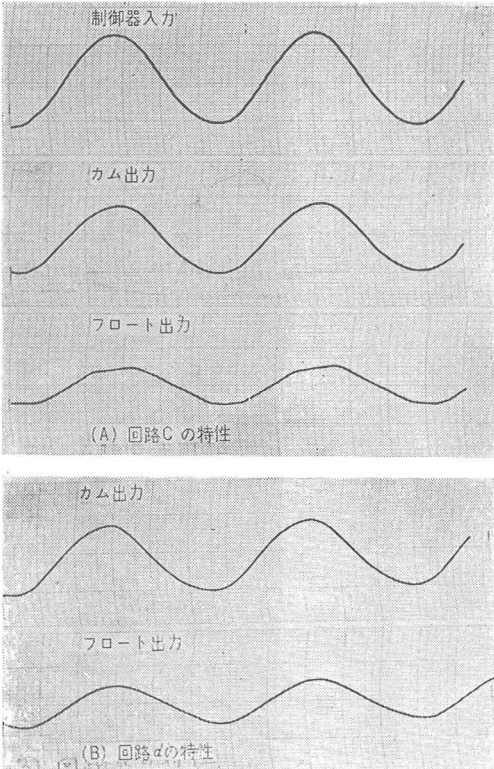


図-9 入出力関係記録図



表わしている。整定時間は 2.5 sec 程度である。また周波数特性を調べると 図-8 のようになる。

電気系の回路と油圧系の回路を結合して 図-6(c) に示す回路で、正弦波入力の場合の信号、カム変位、フロートの変位を記録すると、図-9(A) のようになる。図からカムまでの伝達は非常に正確であるからカムからフロートまでの伝達がやや不正確である。すなわち正弦波の上弦および下弦がきれている。いま特性を改善するため、電気系(カムまで)の伝達関数を $G_1(S)$ とし油圧系の伝達関数を $G_2(S)$ とし 図-6(d) のような回路を構成すれば、回路一巡の伝達関数は

$$G(S) = \frac{G_1(S)G_2(S)}{1+G_1(S)G_2(S)} \dots\dots\dots(13)$$

$G_1(S)$ を大きくして $G_1(S) > 1$ とすれば、式(13)は

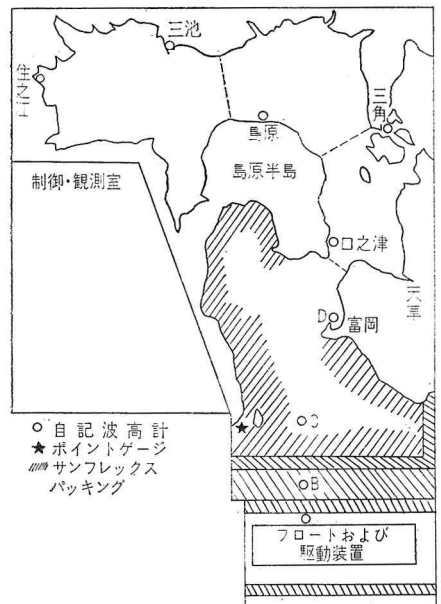
$$G(S) = \frac{G_2(S)}{1/G_1(S) + G_2(S)K_{F2}} \approx \frac{1}{K_{F2}}$$

となり線型特性が改良されるものと考えられる。図-6(d) に示す回路の入出力関係を 図-9(B) に示す。

7. フロートから有明海模型水面への伝達

フロートから水面への伝達は、フロートの運動がきわめてゆるやかな場合はフロートの変位と水面の変位は、ほぼ比例する。すなわち伝達関係は K_w である。このような条件では波高計の出力 K_{w1} と K_{F2} を入れかえて接続すれば同じ特性が期待できる。有明海水理模型実験において 図-10 に示す位置に波高計 A, B, C, D を設置し、図-6(d) の回路でフロートを動作させて各波高計の記録を観測してみる。まざろ之津を完全に締切った状

図-10 波高計配置図



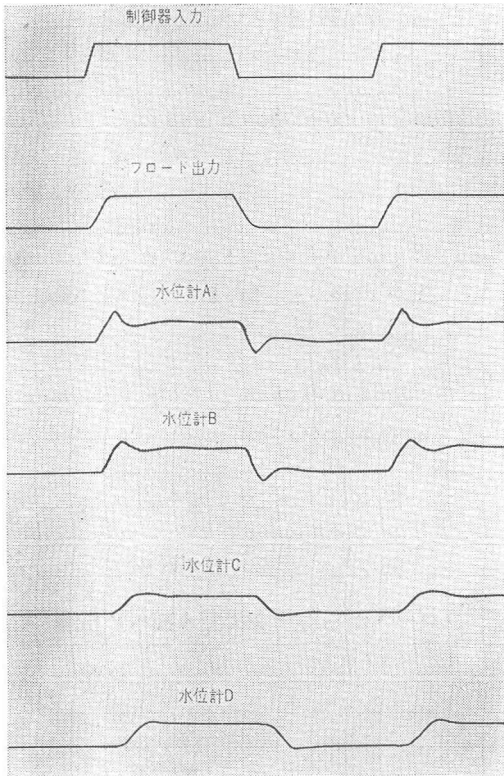
$$G(S) = \frac{K K_p K_F}{T_a S^3 + S^2 + K S + K K_p K_F K_f} \dots\dots\dots(11)$$

特性方程式は

$$1 + G(S) = T_a S^3 + S^2 + K S + K K_p K_F (1 - K_f) \dots\dots(12)$$

で示される。この回路の過渡応答を調べてみると、図-8 のようになる。この特性をみると、over shoot がほとんどなく減衰係数が 1 に近い場合の過渡応答特性を

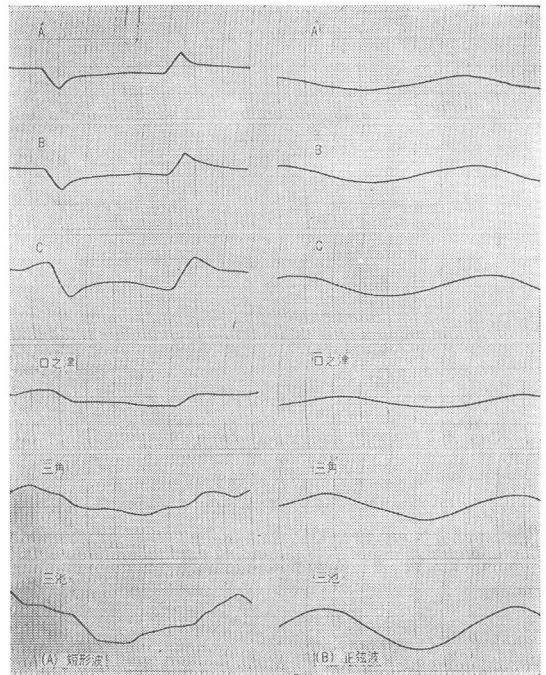
図-11 口之津締切後の水面特性



態で、湾内からの外乱がない場合について、水面の過渡特性を記録すると、図-11に示すようになる。フロートにもっとも近い波高計Aの記録をみると2次振動の過渡応答に近い：B→Cと伝播するにしたがって短周期の振動部分が減衰し、Dでは短周期の振動はほとんど減衰し、フロートの変位とほぼ相似している。つぎに口之津を開放して有明海への伝播を許すと、図-12(A)に示すようになる。同じ条件で正弦波入力を与えてみると、図-12(B)のようになる。以上のことから外乱が少ない場合は任意回数でもフロートから水面への伝達は、ほぼ直線的に行なわれることを示している。したがって波高計D(富岡に相当する)からの負帰還が可能であり水面制御が任意に行なわれることを示している。また口之津を開放し、外乱がかなり大きくても正弦波または、正弦波に近い波形であれば、かなり忠実に伝達が行なわれることを示している。

波高計Dから負帰還する場合は、波高計からの帰還量はカムからの帰還量と合成した量を制御器に帰還している。したがって外乱がきわめて短周期であるか、量が小さい場合は安定がくずれることがはないが、長周期(数sec程度)で量大きい外乱が波高計に検出されると不安定となり、この回路は振動をおこす。また、フロートから帰還した場合に比較して波形が必ずしもきれいな

図-12 有明海の水面特性



ならない。しかし、つぎのような場合は波高形からの帰還が有効である。

実験室の大きさから制限をうけるため実験の対象である有明海の外の水域が十分広くとれない場合(この施設では外海の水域と有明海の水面積比は2:1である)は外海のある1測点、例えば富岡を基準潮とし、口之津線、三角線等の締切線を順次締切ってゆき締切内の振幅変化を観測する場合、一定の命令信号を与え、フロートから帰還した場合は締切前と締切後では富岡の振幅が50%程度増大する。しかし波高計から帰還した場合は10%以下におさえることができる。

8. むすび

この装置は比較的小型な室内実験用に適し、簡単な発生装置で発生した正弦波あるいは潮せき波の信号を水面に発生させることができる。水面からフロートへ直接帰還ができなかったが、この帰還方法が工夫できれば、さらに精度の向上が期待できる。さらに外乱除去の点から実験の対象外の水域はできるだけ広くとることが望ましい。この装置の製作にあたって指導、助言をいただいた長崎海洋気象台藤木明光技官に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 高田雄之: 九大における干拓研究とその施設について, 九州大学農学部, 干拓研究, 第64号, 1961年2月,
- 2) 精立工業KK: 精立技報 No. 144.
- 3) 高橋安人: 自動制御理論, p. 122, 岩波全書.
- 4) 農林省熊本農地事務局, 長崎海洋気象台: 有明海域総合開発計画模型実験報告書, 昭和34年4月.