

アナログ計算機とその応用

日立製作所大阪営業所*

奥
水村
野

昌

竜
美

1. まえがき

アナログ形電子計算機は、第2次世界大戦中、主として、米国で研究が始められ、開発されて、航空機工業や各方面で利用されていた。

わが国においては戦後、京都大学工学研究所に、ACCのアナログ計算機が輸入されたのが、始めてである。

その後、当社を始めとして、各大学、メーカーの研究所等で研究され、今日にいたっている。

当社においては、昭和26年より研究を始め、昭和28年4月に、国産製品第1号を完成した。

アナログ計算機が開発された当初は、自動制御系を解析することが目的であったが、アナログ計算機の発達に伴い、特殊目的用に作られた種々のシミュレータや、アナログ計算機と計装や、実際の装置を組合せた運転者の訓練用シミュレータ等がある。この外、デジタル形計算機と組合せた、ハイブリッド計算機もある。

最近では、各種装置の一部に直接制御系として、アナログ計算機が使用されるようになった。

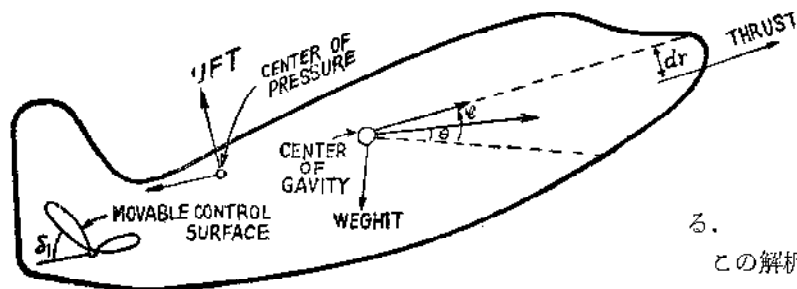
近い将来には、アナログ計算機や、デジタル形計算機が、各種装置を、人に代って動かすようになり、無人工場が出現するのも、間もないことであろう。

これが、真のコンピュータ、コントロールの目標である。

2. 各方面におけるアナログ計算機の具体的応用例

(1) 航空機工業における応用

航空機工業においては、次のような応用例がある。



第1図

(a) 航空機の自動操縦、および安定性の問題

(b) フラッタ現象の解析

(c) オート、パイロットの設計

(d) 飛行模擬（フライト、シュミレータ）として

(e) ジェット、エンジンの設計、等

一例を示すと、飛行機の飛行中の運動方程式は、第1図からもわかるように、次式となる。

$$\frac{dx}{dt} = v \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\gamma(t) = \psi(t) - \theta(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L = L(v, \gamma, \frac{d\psi}{dt}, \delta_1, \delta_2, \dots, \rho) \quad \dots\dots\dots (4)$$

(1)~(4)式で表わされる、エンジンの振動、其他飛行とは、直接関係のない作用を無視すると、

進行軸上においては、

$$m \frac{bv}{dt} = T \cos \gamma - mg \sin \theta - D(v, \gamma) \quad \dots\dots\dots (5)$$

揚力軸上においては

$$mv \frac{d\theta}{dt} = -mg \cos \theta + L(v, \gamma, \frac{d\psi}{dt}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ピッチ角においては

$$I \frac{d^2\psi}{dt^2} = dT + M \quad \dots\dots\dots (7)$$

dT = 推力軸と重心の距離

(5)~(7)までの式に、適当な初期条件を与えて、アナログ計算機で、解析する。

(2) 造船工業における応用

造船工業においては、次のような応用例がある。

(a) エンジンのクランクシャフトの振れ振動の問題

(b) タービンのブレードの振動解析

(c) 燃料の噴射ポンプの弁の振動解析

(d) マストの気流による振動の解析

(e) 原子力船の研究設計、等

代表例として、梁の振動問題を取上げる。

る。

この解析は、非常に困難で、一様断面の場合、解析された例もあるが、梁断面の梁の解析は、ほとんどない。アナログ計算機においては、この変断面の梁の固有振動も解析できる。

* 大阪市北区梅田2・第一生命ビル8階

船舶の固有振動の方程式は、回転慣性、および剪断たわみを考慮した場合、次の式で表わされる。

$$\frac{d}{dx} \left(EI \frac{d^2 u_b}{dx^2} \right) + K' AG \left(\frac{du}{dx} - \frac{du_b}{dx} \right) = -\frac{\rho I'}{g} \omega^2 \frac{du_b}{dx} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx} \left[K' AG \left(\frac{du}{dx} - \frac{du_b}{dx} \right) \right] = -\frac{\rho A'}{g} \omega^2 u \quad (9)$$

境界条件は、 $x=0$, $x=l$ のとき

$$\frac{d^2 u_b}{dx^2} = 0 \quad \frac{du}{dx} - \frac{du_b}{dx} = 0$$

ここに、

EI ; 曲げ剛性

KAG ; 有効剪断剛性

$\rho I'$; 断面重量二次モーメント

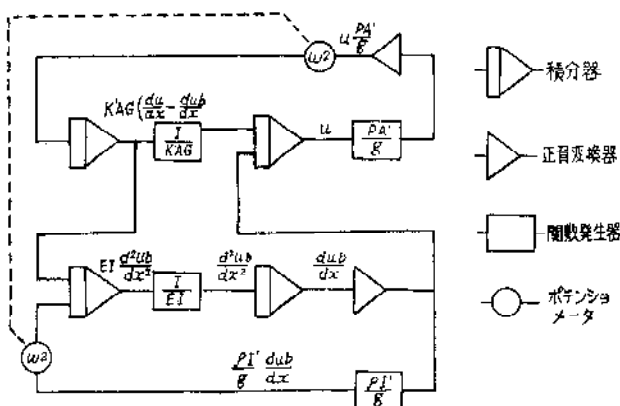
$\rho A'$; 断面重量

ω ; 固有円振動数

u ; 振動振巾

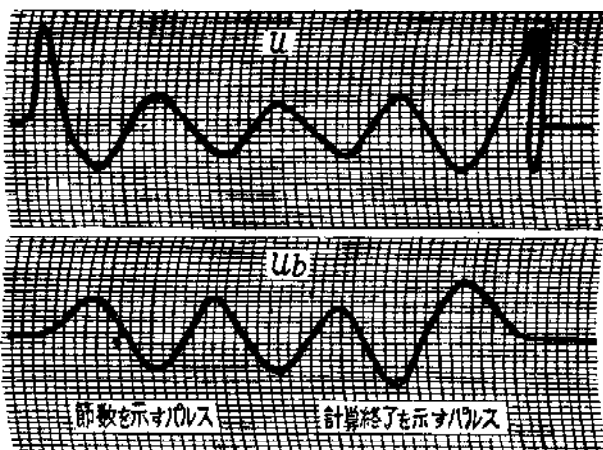
u_b ; 曲げ振動振巾

アナログ計算機に掛けるブロック、ダイアグラムを示すと第2図の通りである。



第2図 船舶の固有振動を解くためのブロックダイアグラム

解析例を示すと、次の第1表の通りとなる。



第1表 実船についての8節の振動解析結果

この問題の応用は、すぐ次のものに利用できる。

(a) 橋梁等、構造建築物の振動解析

(b) 音響における、弦の振動、膜の振動解析

(c) 音響機器の振動伝達機構の解析

(3) 鉄道、運輸業務における応用

運転線図作成のための専用機があり Train Simulator と呼ばれる。

この目的は、列車の運転速度、運転時分等の、運転状態が、列車の進行につれて、どのように変化するかを調べるもので、従来は、莫大な計算と熟練によって、多大な時間を費して作成していたものを、短時間で解析するものである。

この結果、新形車によるダイヤ改正、ディーゼル化の計画を容易にするものである。

列車の運動方程式の一例は、次の通りである。

$$w = \frac{dv}{dt} = T(v) - R(v) + G(s) - B(s) \quad (10)$$

$$\frac{ds}{dt} = v \quad (11)$$

$$\frac{dQ}{dt} = I(v) \quad (12)$$

w : 列車の重量

$T(v)$: 引張力

$R(v)$: 走行抵抗

$G(s)$: 勾配量

$B(s)$: ブレーキ力

Q : 消費電力量

$I(v)$: 列車電流

v : 列車速度

s : 進行距離

t : 時間

(10)~(12)式を計算機に掛けて次の解を求める。

(a) 時間に対する消費電力量

(b) 列車速度

(c) 進行距離

(d) 進行距離に対する列車速度

(4) 電機製造業、および電力会社における応用

電機製造業には、次のような応用例がある。

(a) 自動制御系における設計

(b) 一般電気機器の設計

(c) 制御系用部品の設計、検査

(d) 電力負荷分担の計算

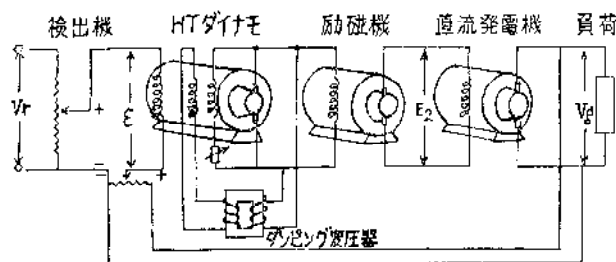
(e) 電力回路故障の計算

(f) 絶縁協調の問題

(g) サージタンクに関する研究

一例として、簡単な自動制御の問題として、HTD による直流発電機の自動電圧調整装置を掲げる。(第3図)

目的は、種々の外乱に対して発電機の出力電圧を一定に保つためには、どのような制御系を設計すべきかと云うことである。



第3図 HTDによる直流発電機自動電圧調整装置の概略図

解析に当っては、それぞれの伝達関数を作り、これを計算機に掛ければよい。

検出器の伝達関数 G_1 は、検出器には時間遅れがないから

$$G_1 = A_1 \quad (13)$$

直流発電機の伝達関数 G_2 は

$$G_2 = \frac{A_2}{1 + PT_2} \quad (14)$$

励磁機の伝達関数 G_3 は

$$G_3 = \frac{A_3}{1 + PT_3} \quad (15)$$

HTDの伝達関数 G_4 は

$$G_4 = \frac{A_4}{1 + PT_4} \quad (16)$$

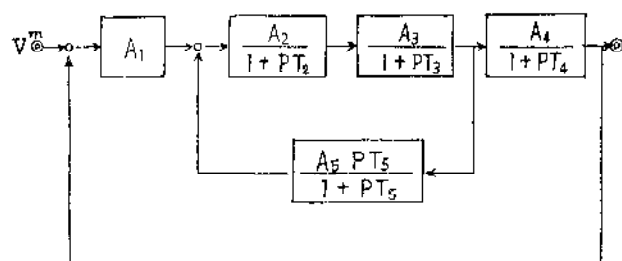
ダンピング、トランスの伝達関数 G_5 は

$$G_5 = -\frac{A_5 PT_5}{1 + PT_5} \quad (17)$$

但し A : 増巾率

$$P: \frac{d}{dt}$$

(13)~(17)までの式を、第3図に従って、第4図のブロック図で解けばよい。



第4図 HTDによる直流発電機自動電圧調整装置のブロック図

(5) 土木事業における応用

河川の特性をいろいろ調べるため洪水のシミュレータと呼ばれるものが、実用されている。

この目的は、降雨流出の推定計算や、河道の洪水追跡

を自動的に、調べるもので、水分資料から河川の定数を調べ、設定して、流入量（降雨）から、流出量を計算し記録させる。

この場合の演算方程式は、次の通りである。

$$\sum_{j=1}^n F_j \cdot I_j = O_1 + \varphi(O_1) \frac{dO_1}{dt} \quad (18)$$

$$O_1(t) = O(t + T_1) \quad (19)$$

I_j : 流入量（数箇所の雨量計、または支川に対応）

O : 流出量

f_i : 流入係数（損失、または横流入を考慮したもので、各流入量に対応）

$\varphi(O_1)$: 貯留関数（流域、または河道の貯留水量と、流出量の関係を示す関数）

T_1 : 遅滞時間

この外、次のようなものが、アナログ計算機を利用して、解析できる。

- (a) 河川計画
複雑な水系網の解析
- (b) 洪水予報
降雨から、流出量の推算
- (c) ダムの管理
ゲート操作を、降雨から流出量を算出する。
- (d) ダムの建設計画
ダムの人工操作の条件を設定する。

(6) 自動車工業における応用

自動車工業においては、次のような応用例がある。

- (a) 自動車の乗心地の問題
- (b) クランク、シャフトの振動の問題
- (c) 弁のカムの曲線の設計
- (d) 台車のバネの設計

以上のようなものが、主な例としてある。

例として、二輪車の乗心地の解析について説明する。

二輪車が、直進して、障害物を乗越える場合、二輪車を、2質点と考えても、タイヤ、およびダンパ、バネの特性、減衰力の特性が関係して、走行実験から解析することは、不可能である。

これを、アナログ計算機で解析すると、次のようになる。

$$m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} - C \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + K_1 (x_1 - x) - K_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (20)$$

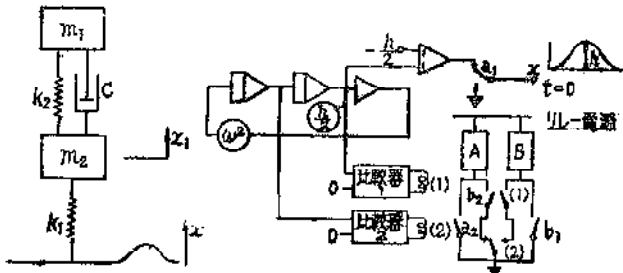
$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + C \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + K_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (21)$$

ここで障害物 x を、次の様に考える。

$$x = \frac{h}{2} (1 - \cos \omega t) \quad 0 \leq \omega t \leq 2\pi \quad 2\pi < \omega t$$

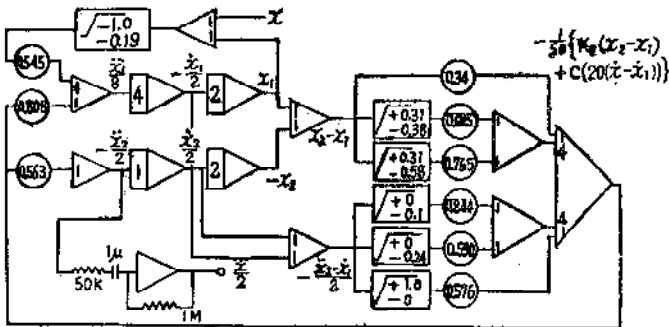
$$\omega = \frac{2\pi V}{\lambda} \quad V: \text{車の速度}$$

この式の演算回路は、諸条件を入れて、第5図、第6図、第7図のようになる。



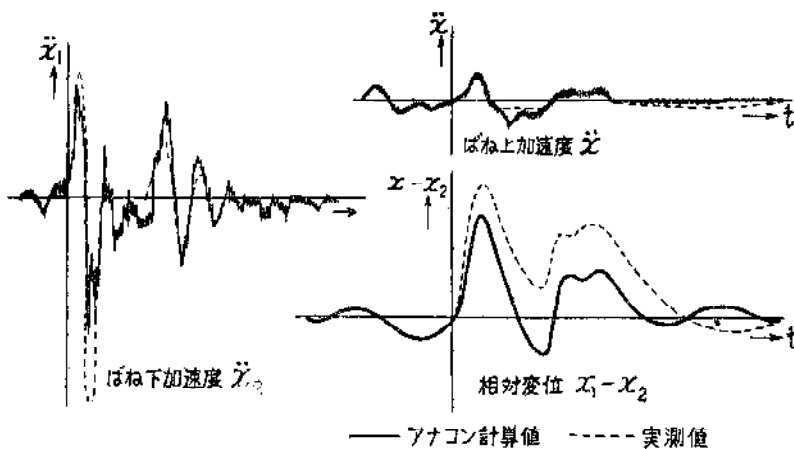
第5図 車体の振動系

第6図 x発生回路



第7図 二輪車乗心地の解析ブロック図

解析結果は、第2表の通りである。



第2表 二輪車乗心地の計算値と実験値の対応

(1) 経済、経営における応用

経済、経営関係においては、次のような応用例がある。

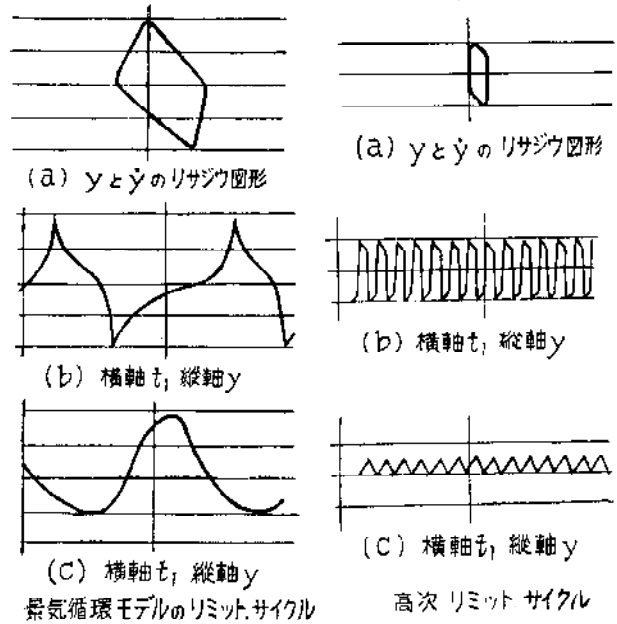
- (a) 景気変動の自動制御的解析
- (b) リニア、プログラミングの問題
- (c) 其他、オペレーション、リサーチの問題

具体例として、景気循環 Good winn の方程式を解析する。

モデル式は、次の通りである。

$$\varepsilon \dot{y}(t) + (1-\alpha)y(t) = \phi[\dot{y}(t-\theta)] \quad (22)$$

$\phi[\dot{y}(t-\theta)]$: 誘発投資



第3表 景気循環の解析結果の図

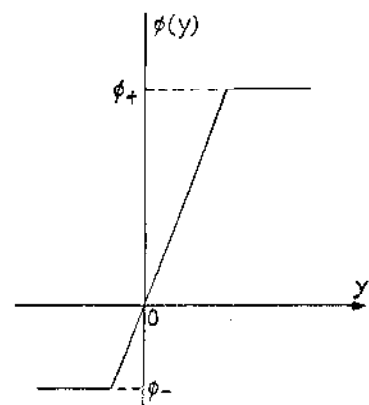
θ : 年で表わした、むだ時間

$\varepsilon, \alpha, \theta$: パラメータ

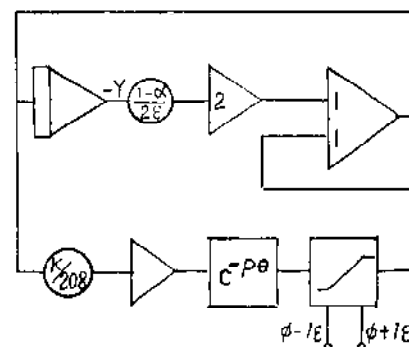
目的は、景気循環モデルの、パラメータの変化に対するリミット、サイクルの周期を求めることである。

この式の解析ブロック線図は第8図、第9図の通りである。

第3表は、解析した結果である。



第8図 $\phi(\varepsilon)$ の波形



第9図 景気循環モデルのブロック図

(8) 原子力工業における応用

原子力工業においては、次のような応用例がある。

- (a) 原子炉自動制御の問題
- (b) 原子炉の動特性の解析
- (c) 中性子束の研究

原子力で、よく使われている原子炉中性子束密度の時間的变化についての解析について簡単に説明する。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta_k}{l^*} n - \sum_{i=1}^6 \frac{dc_i}{dt} + S \quad (23)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} n - \lambda_i c_i \quad (24)$$

l^* : 中性子実効平均寿命

n : 中性子密度

δ_k : 超過反応度

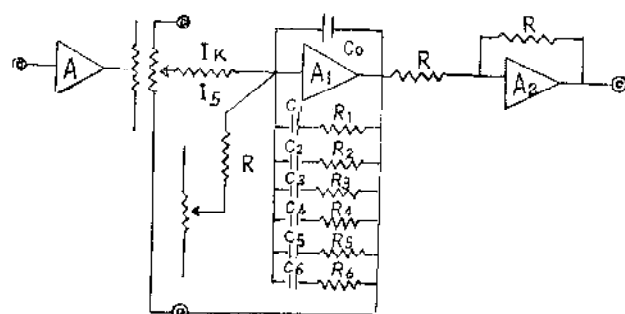
c_i : i 形遅れ中性子の先行核密度

λ_i : i 形遅れ中性子の時間当り崩壊量

β_i : i 形遅れ中性子/全中性子

S : 炉内中性子源の中性子

この問題の解析ブロック図は、第10図の通りである。上図によって、原子炉の6群模擬を行う。



第10図 リアクタシミュレーターブロック図の一部

このように、原子炉を解析するアナログ計算機をリアクタ、シミュレータと呼んでいる。

このリアクタ、シミュレータからさらに次のような目的の装置も製作されている。

原子炉を運転する運転要員は、高度の技術を要し、要員を教育するのは、大変なことである。

実物の炉によって、運転訓練中は、操作をあやまると他の装置と異なり、大事故となる。

これを防ぐため、運転要員訓練用の原子炉は、炉体上記リアクタ、シミュレータを使い、其他の計装、機器は、実物を使用する。

この場合は、アナログ計算機が、計算機という分野を離れて、プラント、または装置の一部として使われた場合で、今後、大いに期待される所である。

この例に似たものとして、ジェットパイロットを養成するフライト、シミュレータがある。

この場合も、新人が、大空で練習する場合と比較して危険は無く、経費は少なく、実際と同様の効果が得られ

る。

(9) 化学工業における応用

化学工業における応用例

- (a) 化学装置(プラント)に対する問題(プロセス、コントロール)
- (b) 化学反応方程式の解析

最近、アナログ計算機等の応用方面として、脚光をあびて来た部門で、興味もあり、アナログ計算機の発展する一つの重要分野でもあるので、外国の例も掲げて、くわしく説明する。

外国といっても、主として米国であるが、主な化学工業会社、石油会社(石油化学会社も含む)は、現在少なくとも5万~15万ドル程度(2,000万円~6,000万円)程度のアナログ計算機を各社持っており、最近では、1台数十万ドルから百万ドルもする超大形アナログ計算機を計画しているほどである。

また、石油、化学工業のアナログ計算機に対する需要は、デジタル形計算機とは比較にならず、全米国のアナログ計算機の生産量が追いつけないほどの需要量である。では、どのような会社が、どの程度の規模のアナログ計算機を利用しているか、列記してみる。

- | | |
|----------------|-----|
| (a) ダウ・ケミカル | 大形 |
| (b) デュポン | 超大形 |
| (c) モンサント・ケミカル | 超大形 |
| (d) オハイオ・オイル | 大形 |
| (e) シェル石油 | 大形 |
| (f) スタンダード・オイル | 超大形 |
| (g) ユニオン・カーバイド | 大形 |

(注 大形とは、1,000万円以上、超大形とは、1億円以上を指す)

これらの会社は、どのような面に、利用しているか主な目的として、次のものがある。

- (イ) 制御機器、およびプロセス制御系の設計
- (ロ) 実際の制御機器として(オン・ライン使用)

具体的に解析しているものとして、次のようなものがある。

- (i) 熱伝導の計算
- (ii) 液体の流れの自動制御の研究
- (iii) 吸収塔の研究
- (iv) 化学反応炉の動特性の解析
- (v) 蒸溜塔の過渡解析と制御の問題
- (vi) 熱伝導と制御の問題
- (vii) 流体の過渡現象の解析
- (viii) 反応のメカニズム、プロセスの動特性の解析
- (ix) 現在のプロセス装置の最適制御系の解析
- (x) 将来のプロセス装置の最適制御系の解析

(xi) 反応塔の最大生産量を確保するための、スケジュールと、操作の決定

等である。

すなわち、アナログ計算機は、プロセス制御系の解析や研究、模擬装置等のように、動的な計算に最適といえる。ちょうど、デジタル計算機の統計処理のように、静的状態を取扱うのと、対照的である。

ここで、具体例の一つを説明する。

苛性ソーダ濃度調節系への応用

生成苛性を稀釈するために、純水を用いるが、その純水量 $f\omega$ は、濃度との間に、次の関係がある。

$$f\omega = K_1 \times 10^{-2} \left(\frac{100}{C} - K_2 \right) \cdot AN \text{ (l/min)} \dots\dots (25)$$

C : NaOH 濃度 (%)

A : 電流 (KA)

N : 稼働槽数

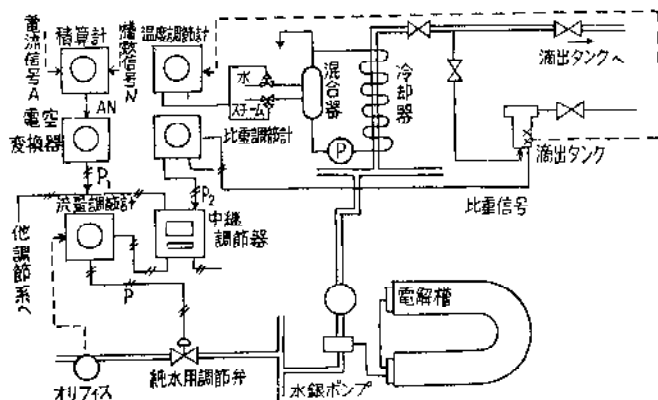
ここで、濃度が与えられると、 C は定数になり

$$f\omega = K \cdot AN \dots\dots\dots (26)$$

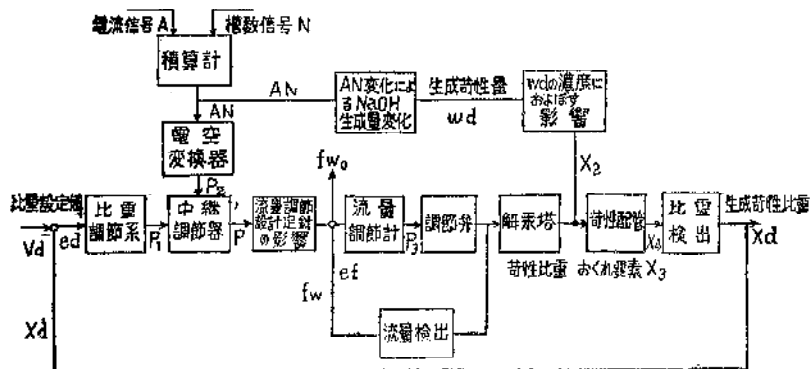
となり、 $f\omega$ は A と N の積 AN に比例する。

故に、何らかの方法により、電流と槽数を検出して、その積を作り、純水量を比例して変化させれば、操作条件 A 、 N の如何なる変化に対しても、自動的に制御され、労力が、不要となることがわかる。

ここで、苛性ソーダ濃度の制御系を第11図に示す。



第11図 苛性ソーダ濃度制御系の図



第12図 比重調節系ブロック図

$$p_1 \rightarrow K e d \quad p_2 \rightarrow K_2 A N$$

$$p \rightarrow p_1 \div p_2 \quad f\omega_o = K_3 p$$

また、苛性ソーダ濃度制御系の内比重調節系のブロック図を第12図に示す。

これを、アナログ計算機で解析すればよい。

この苛性ソーダ濃度調節系についての単能機（シミュレータ）を作れば、価格も安く、能率の良いものとなる。

(10) その他

この他、アナログ計算機の用途として、次のようなものがある。

- (a) 製鉄工業
- (b) パルプ、製紙工業
- (c) 繊維工業
- (d) 水産業
- (e) 機械工業
- (f) 車輛工業

等がある。

3. アナログ計算機の近時の傾向

以上のようにアナログ計算機の用途は広くなり、あらゆる業種、研究所において利用されているが、計算機自体の発達と新しい分野への進出により、更に飛躍的な発展が期待されている。

即ち計算機自体としてはまず第一にオートプログラミングが開発されつつある。これは現在パッチボード等に組込んでいる演算回路をパンチテープ等で代行させ簡単に演算を行う方法と、今一つ数百という変数を自動的にプリセットして行く方法である。

このようにオートプリセットを設けると、数千点のデータ処理が出来るから、デジタル計算機でも追い付けない程の能力が得られるようになる。

次には機器の連続運転を可能にする方策がとられつつある。微分方程式の解析用としては現在の形のもので十分であるが、次に述べる制御用としては不満の点があり、この面で磁気増巾器を応用した演算器や、時間遅れ要素等が実用化されつつある。

一方進出分野としてはプロセス制御用としてオン

ラインに乗ることがあげられる。これは工業計器や制御器と連関してプラント内で温度、圧力、流量等の変化過程に応じた制御信号を増巾、積分、時間おくれ、乗除算、リミッタ、デッドゾーン、バックラッシュ等に掛けて各種の自動制御を行うものである。アナログ式に制御するという事は、連続的にあらゆるものを制御出来るから、プロセス制御においてはデジタル的制御よりも、アナログ式の方がはるかに実

(以下22頁に続く)

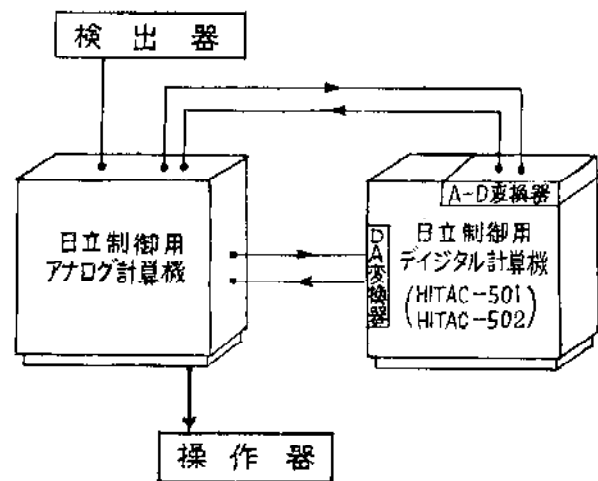
(28頁より続く)

用的であり、また経済的でもあり、動的にはアナログ式は高速度サンプリング周期のデジタル系ということが出来るものである。

この外アナログ計算機の新しい発展分野は、第13図に示すようアナログ—デジタル変換器によるデジタル形計算機との連動である。この目的は、アナログ計算機に有利な問題は、デジタル形計算機で解析する。相互の情報交換は、電子式高速度アナログ—デジタル変換器によって行う。

このように、アナログ計算機と、デジタル計算機の秀れた点を組合せた計算機を、ハイブリッド計算機といいアナログ計算機の応用分野として、今後大いに活躍するものである。

また、シミュレータは、アナログ計算機用要素の発達に伴って、第2章でも一部述べた如くに、未詳分野の究明のため、あらゆる分野に応用され、その数は益々増大していくものと思われる。



第 13 図

参考文献

- 1) CIE 1958—11.
- 2) エレクトロニクス，アナコン応用シリーズ。