設備のプロセス化に応じた教育対策

射場本　勘市郎 *
松　浦　　　茂 **

A Teaching Method to the Development of Equipments in the Environmental Engineering Field

Kanichiro IBAMOTO
Shigeru MATSUURA

Synopsis

Recently the development of automatic control is remarkable in the field of environmental engineering.
So when we want to design and analize equipments or systems the dynamic analisis of them is indispensable.

While the environmental engineering was newly born in the boundary field which involved mechanical engineering architectural engineering, electric engineering, physics, chemistry and medicine.
But historically each department has his own method, so students are now obliged to learn ench problem with each method.

The authors keenly feel necessity of the unified analitical method for the education of the environmental engineering.
We report in this paper our study of the education for under-graduate student using the method that were developed in the systems engineering field.

I まえがき

環境工学は境界領境の開発を目標にした学問であり，そこで取り扱われるものとしては機械工学の分野，建築工学の分野，電気工学の分野，音響工学の分野，その他多くの関連分野がある。そしてその各分野の工学が各々専門的思考法を持ち，それに応じた専門的手法を持つのである。これはあたかも別世界の現象を取り扱うかの如くに見える。

そのために学生は各分野の手法を常に初歩より学ぶため限られた時間のうちで深く進むことは困難

*　産業環境工学講座教授
**　同　　　　助手

である。そこでこれ等の手法を統一的観点によつて学ぶことが出来るなら，より成果が上るものと思われる。

さて，近年における自動制御の普及は設備の面においても例外ではなく，このため設備の静特性のみならず動特性も重要なものとなつてきた，ために設備もプロセスであり，システムである，という見方をせねばならない時代に入りつつある。

しかしてプロセス工学・システム工学自体もその関連分野の多様さにおいては，環境工学と同様であり，そこで発達してきた手法は各分野を統一的立場で記述する様に育てあげられてきた訳である。

上記の見地より環境工学を見るならば，プロセス工学やシステム工学で発達してきた手法を導入することは，プロセス化した設備のシステム面に対する解析手法として有意義であると思う。

しかしながら，それ等の手法も幾つかありそれぞれ特徴を有し，またラプラス変換などの概念を必要とするものもあるので，その導入にあたつては充分な検討を必要とする。

そして検討あたつて，環境工学の学部学生がプロセス化した設備の多様さを統一見地より把握でき，その関連分野の専門家と間違いのないやりとりが出来るよう，物事の根本概念を充分に理解し，本質を見きわめるセンスを養い，またその応用にあたつては簡明さ，有効さ，適用の正確さをむねとする導入方法に考慮をはらい，また数学的厳密度（細部の数学的厳密な証明は学部学生には時間をとるのみならず，その本質を見失なわせる恐れすらある）の程度についても考えるならば，その教育対策はどのような形になるべきかについて一考察を述て見よう。

Ⅱ 系の一般化

要素と動作量 系の現象は要素と動作量および時間によつて記述でき，しかも動作量としては2つの基本動作量をとれば他の動作量は要素と基本動作量とによつて表わされることが，知られている。

要素とは，系に付随して各々の系を特徴ずける構成素子であつて，時間的に変化しない量である。例えば電気抵抗・質量・熱容量などがある。

動作量とは，現象そのものともいうべき量であつて，時間的に変化する量である。例えば電圧・力・熱流などがある。

流動量と位差量 さて，諸分野の現象を統一的見方で記述するために，基本動作量として何を取り上げるべきであろうか。と考えて見るに基本動作量としてはどの様な組合せであつても自由であるが，しかしながら現象の一側面はエネルギーの移動であるから，エネルギーを表わすことのできる組合せをとると便利であり，これは各分野の系に共通な概念として，流動量と位差量が基本動作量の一般化である。これはエネルギー保存則からも納得できるところである。しかして

流動量には任意の接続点に流入する流動量の総和は常に0である。

位差量には任意の閉回路に沿う位差量の総和は常に0である。

これ等は電気系の場合はキルヒホツフの第1，第2法則にあたる。

比例要素・微分要素・積分要素 線形の系について考えて見ると，線形とは重ね合せの出来る系，すなわち系の入力をn倍すると出力がn倍になる系である。系が非線形の場合にも，その動作点の近傍において直線化をおこない，その解の適用範囲に注意するなら線形で表わすことが可能である。

入力を$x(t)$，出力を$y(t)$とすると

$$y(t) = K_1 \ x(t) \qquad \because \ K_1 = 定数 \qquad (1)$$

が成立するならば，入力のn倍は出力のn倍になるから線形である。この様な要素を比例要素という。

$$y(t) = K_2 \frac{dx(t)}{dt} \qquad \because \ K_2 = 定数 \qquad (2)$$

が成立するならば，同様に線形である。この様な要素を微分要素という。

$$y(t) = K_3 \int x(t)\,dt \qquad \because \ K_3 = 定数 \qquad (3)$$

が成立するならば，同様に線形である。この様な要素を積分要素という。

これ以外の要素を含む系は非線形であり，当面の対象となる線形の系はこれ等3種の要素の集合に分解することが出来る。

一般化された系　上記の如く統一的見地によれば，現象は流動量，位差量，比例要素，微分要素，積分要素とで記述出来ることがわかつた。この様な立場で記述された系を一般化された系ということにする。そして一般化された系を表わす記号としては電気回路で使用されている記号を用いることにする。その場合には，いままでの習慣によつてK_1を抵抗要素あるいはその逆数を使い伝導要素ともいう。またK_3の逆数を使い容量要素ともいうことがあるので注意する必要がある。表－1は一般化された系が各分野で何にあたるかを示している。

一般化した系	位差量	流動量	抵抗要素	微分要素	容量要素
電気系	電圧	電流	電気抵抗	インダクタンス	静電容量
直線運動系	速度	力	レスポンシブネス	コンプライアンス	質量
回転運動系	角速度	トルク	回転レスポンシブネス	回転コンプライアンス	慣性能率
油圧系	圧力	流量	流動抵抗	イナータンス	――
空気圧力系	圧力	流量	流動抵抗	――	容量
音響系	音圧	体積速度	音響抵抗	イナータンス	音響容量
液面系	液位	流量	流動抵抗	――	容器の面積
温度系	温度	熱量	熱抵抗	――	熱容量
濃度系	濃度	溶質流量	1/(溶液流量)	――	容器の容積

表－1

この様に一般化した系を考えるならば広く異なつた物理系が，構造的にまつたく同じ形に表現出来，いろいろな分野から生ずる広範な問題に対して，基本的原則が適用出来る訳で学生は各分野におけるそれ等の量の名称のみ知れば，一般化した系における解析法で対処出来るので，学習時間の節約になる。

Ⅲ 演算子法の導入

微分方程式の記号解法　系の現象を記述する微分方程式は系に適当な近似をおこない，また結果の

適用範囲に気をつけるならば，系の一般化により各分野の系は共通な常数係数の微分方程式として表わしうる。

その微分方程式の解は系の応答を表わしており，定常項と過渡項よりなる。定常項は入力によつて支配され，過渡項は系固有のものとして特性方程式の解で与えられる。

微分方程式を解くことによつて系の解析が出来る訳であるが，系が複雑になつてくると微分方程式を解くこと自体が困難になる。そこで微分方程式を記号的・代数的に解くところのラプラス変換や演算子法の導入が必要である。また最近の方法として系の微分方程式を解くことを避けつつ，系の解析や設計をおこなう方向に進んでいる。

そこで演算子法とラプラス変換を比較して見た場合．演算子法はその簡明さ，有効さ，適用範囲の広さにおいてラプラス変換に勝るも，演算子法の証明は発明者のO. Heaviside 以外の人にその正当性を納得させるためには，はなはだあいまいなものであつた。

一方ラプラス変換の成立は数学的に疑義のないものではあるが，複素関数論などの前提を必要とし，簡便さにかけ，その証明過程より適用範囲に制限がつく。

またHeavisideの演算子法も数学者の努力によりラプラス変換をもつて証明するのが常道となつたが，そのために演算子法の適用範囲にいろいろ制限がつくなどラプラス変換のもつめんどうさが付随してしまうことになる。

そしてそのどち等も工学的取り扱いのみで導入するならば，根本概念を握みえず機械的操作におちいり，違まれる適用を犯し勝ちである。

新しい演算子法　ところで1951年にポーランドのT. Mikusin'ski 教授が創めた新しい演算子法は「コンボリウション を演算子と考える。」という独創的なものでラプラス変換の援用なしで，数学的に疑義のない基礎の上に立ちながら簡明な代数的計算で演算子法を展開したものであるから，コンボリウションすなわち合成績の概念の必然性さえ理解させるならば，Mikusin'skiのいうところの関数の積や演算子は今までの数の概念の拡張であり，今までの算法の発展であるという理論も直感的に把握出来るものと思われる。

Ⅳ　新しい演算子法の紹介

合成積の概念　線形の系が定数系数の微分方程式によつて表わされることがわかつたが，ここで通常右辺に書かれる原因となる動作量は入力と称しその結果の動作量は従属変数として解れる，これを出力あるいは応答という。

今入力として単位インパルス$\delta(t)$（1点に集中した動作量で積分したとき1になる）が作用したとき$w(t)$の出力があつたとすれば，$x(t)$の入力が作用した場合は$x(t)$をインパルスの和に近似させることにより，系は線形で重ね合せが成立するから，各々のインパルスの出力の総和を求めることによつて，$x(t)$に対する出力$y(t)$が出来る。

図－1でもわかるように，時刻t_0に出てくる出力は過去の入力が一様に影響するのではなく，$w(t)$の形で重みずけられて影響することがわかる。このことより$w(t)$を系の重み関数という。

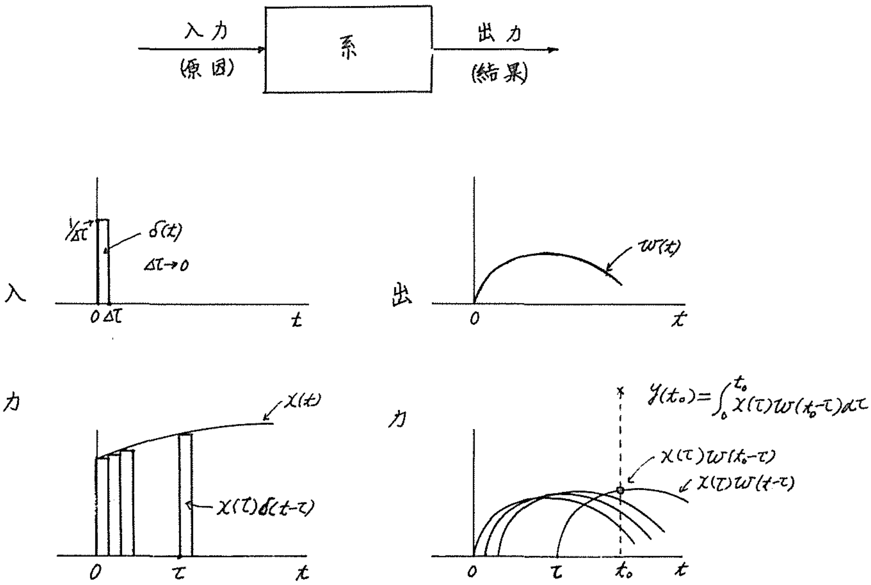


図 — 1

to をtと一般化すれば，x(t) に対するy(t) は

$$y(t) = \int_0^t w(t-\tau)\,x(\tau)\,d\tau \qquad (4)$$

として求まる。

今二つの関数a(t) とb(t) があつて，次の積分で定義される関数c(t) があると，このc(t) をa(t) とb(t) の合成積という。

$$c(t) = \int_0^t a(t-\tau)\,b(\tau)\,d\tau \qquad (5)$$

すなわち関数の合成積の必然性は上記のw(t)とx(t) の関係より，直感的に学生に理解されるものと思う。

演算子 合成積を簡単に表わすため関数a(t) であることを{a(t)} と書き，a(t)は関数a(t)の時点tにおける関数の値であるとし，合成積を{a(t)}{b(t)} で表わす。すなわち

$$\{a(t)\}\{b(t)\} \equiv \left\{\int_0^t a(t-\tau)\,b(\tau)\,d\tau\right\} \qquad (6)$$

また{ }をはずして，ab をかき数の概念の発展拡張と考え，a，bの内容によつて，普通の代数の積になつたり，合成積になつたりすると考えれば，これは代数の算法が演算子にも適用出来ることを暗示し，2・3の例題を通じて，充分に把握させることが可能である。

例えば

$$2 \cdot 3 = 6 \qquad (7)$$

$$2\{3\} = \{6\} \qquad (8)$$

$$\{2\}\{3\} = \{6t\} \qquad (9)$$

$$\{1\}\{f(t)\} = \left\{\int_0^t f(\tau)\,d\tau\right\} \qquad (10)$$

ここで3と{ 3 }は異なり，{ 3 }はtの関数でtにかかわらずつねに3であることを示す。

（10）式の例より，{ 1 }との合成積は関数のoからtまでの積分を意味することがわかる。このことより{ 1 }を積分演算子と呼び，簡単に記号ℓでもつて表わす。

$$\ell \equiv \{1\} \qquad (11)$$

また

$$s \equiv \frac{1}{\ell} \qquad (12)$$

で定義されるsを微分演算子という。

$$\ell s = s\ell = 1 \qquad (13)$$

が定義によつて成立する。

演算子s　重要な定理として

関数$a = \{a(t)\}$が$o \leqq t < \infty$で連続な導関数$a' = \{a'(t)\}$を持つとすれば，次の公式が成立する。

$$sa = a' + a(o) \qquad (14)$$

何故ならば

$$\{a(t)\} = \left\{\int_0^t a'(\tau)\,d\tau\right\} + \{a(o)\} \qquad (15)$$

すなわち

$$\{a(t)\} = \ell\,\{a'(t)\} + \ell a(o) \qquad (16)$$

この両辺にsをかければ

$$sa = a' + a(o) \qquad (17)$$

若し関数aが$t = o$でoに等しければ

$$sa = a' \qquad (18)$$

すなわちsをaに掛けることによつて，a'となるので，sが微分演算子と呼ばれる理由である。

演算子sのべきとしては

$$s^2 a = sa' + sa(o)$$
$$= a'' + a'(o) + sa(o) \qquad (19)$$

一般定理としては

$$s^n a = a^{(n)} + a^{(n-1)}(o) + sa^{(n-2)}(o) + \cdots\cdots\cdots\cdots + s^{n-1}a(o) \qquad (20)$$

指数関数との関係は

$$s\{e^{\alpha t}\} = 1 + \alpha\{e^{\alpha t}\} \qquad (21)$$

ゆえに

$$\{e^{\alpha t}\} = \frac{1}{s-\alpha} \tag{22}$$

三角関数との関係は

$$\{\frac{1}{\beta}\sin\beta t\} = \frac{1}{2i\beta}\{e^{i\beta t} - e^{-i\beta t}\}$$

$$= \frac{1}{2i\beta}\left(\frac{1}{s-i\beta} - \frac{1}{s+i\beta}\right)$$

$$= \frac{1}{s^2+\beta^2} \tag{23}$$

$$\{\cos\beta t\} = \frac{1}{2}\{e^{i\beta t} + e^{-i\beta t}\}$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{1}{s-i\beta} + \frac{1}{s+i\beta}\right)$$

$$= \frac{1}{s^2+\beta^2} \tag{24}$$

微分方程式への応用　上記の関係を応用すれば，定数係数の微分方程式は記号的に簡明に解ける。

例，微分方程式

$$x'' - x' - 6x = 2 \tag{25}$$

$$x(0) = 1 \qquad x'(0) = 0$$

を解け

解，右辺の関数2は誤解の生ずる恐れがあるので，方程式を書き直すと

$$\{x''(t)\} - \{x'(t)\} - 6\{x(t)\} = \{2\} \tag{26}$$

$\{2\} = 2\ell = 2.\frac{1}{s}$ だから，初期条件も合せると

$$s^2x - sx - 6x = s - 1 + 2.\frac{1}{s} \tag{27}$$

ゆえに

$$x = \frac{s^2 - s + 2}{s(s-3)(s+2)}$$

$$= -\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{s} + \frac{8}{15}\cdot\frac{1}{s-3} + \frac{4}{5}\cdot\frac{1}{s+2}$$

$$= \{-\frac{1}{3} + \frac{8}{15}e^{3t} + \frac{4}{5}e^{-2t}\} \tag{28}$$

V 系の図式記号法の導入

図式記号法 関数関係をグラフに表現することによつて，一層明確に全体の推移を一目で知ることが出来る。図式化ということは，系に対しても同様であつて，工学者が応用数学の分野で行なつた最も重要な業績の中には，本来数学的関係であるものを表現するための非常に有用な図式記号法がある。といわれている。それ等は次の如きものがある。

電気回路モデル

ブロック線図

シグナルフロー線図

アナログ計算機によるシミユレーション

さてこれ等の図式記号法は並列的で等価なものであり，一つの系について，どの図式記号法で表わすことも可能である。また図式は相互に一対一の対応をもつて簡単に書き換えが出来る。

しかしながら各図式はおのおの特徴を有し，それ等が開発されてきた分野を背景にもつている訳である。これ等の分野に対して白紙である環境工学としては，どの手法を導入することが望ましいであろうか。

電気回路モデル これは系の位差量を電圧，流動量を電流，比例要素を抵抗，微分要素をインダクタンス，積分要素を静電容量（$K_3 = \frac{1}{C}$ の形でCを静電容量とする）とする類似電気回路で示すものである。特徴としては要素の幾何学的相互関係をそのまま保存し，また電気回路モデルに線形回路網のすつきりした理論が適用出来る。

これは電気回路モデルを一見するだけでは，電気回路の性格を熟知するものにのみ，系の動作量の因果関係を暗示することを意味するものである。

しかしながら電気回路モデル化（これは一般化した系と考えてもよい）することは，複雑な系の要素関係を図示し，電気回路の専門家でなくて電気回路理論に通じていない場合にも，微分方程式を間違なく組立てるための前提として重要な手法である。

ブロツク線図とシグナルフロー線図 上記の回路的見方にも価値のあることは明らかであるが，自動制御などにおいて非常にたいせつな系の動作量間の因果関係を見やすい形で表現してはいない。

自動制御関係の技術者の考えたブロツク線図と電子回路技術者の考えたシグナルフロー線図は動作量の因果関係に着目し図－2の如き表わし方をする。

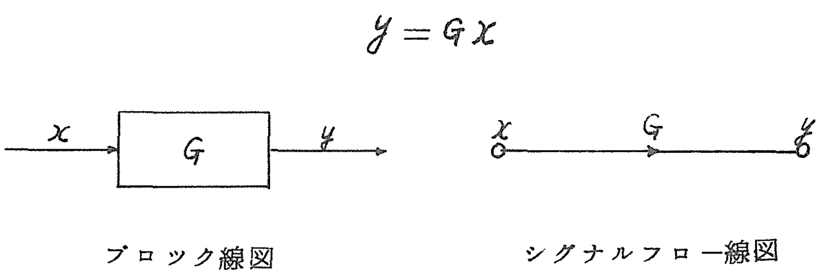


図 － 2

アナログ計算機によるシミユレーション 系の微分方程式をアナログ計算機によつて模擬するために，書かれる演算器の接合図も図式記号法である。この図式も系の動作量間の因果関係を明確にするために，ブロツク線図やシグナルフロー線図と同様に使うことが出来る。

シグナルフロー線図の採用 動作量間の因果関係に着目するという点では，ブロツク線図，シグナルフロー線，アナログ計算機シミユレーションは同等であるが，使い勝手からこの三者をくらべると，シグナルフロー線図は形がきわめて簡単であり，図の縮少のための等価変換にあたつても，つねに信号（動作量を大きさや形でなく信号としてみる）がきれいに整理される。また複雑な線図の場合の変形や変換についての理論がすでに開発されていて，これを簡単に縮少出来るなど，新たにどれかの線図を採用するとすればシグナルフロー線図が良いと思う。もちろん自動制御系もアナログ計算機もシグナルフロー線図で解析が出来るのである。

Ⅵ シグナルフロー線図の紹介

シグナルフロー線図の表示 １９５３年にS. T. Masonによつて取り上げられたシグナルフロー線図は位相幾何学的見地より，対象とする物理系の信号の「流れ」に対応した図，すなわちシグナルフロー線図をつくり解析の一手法とするものである。そしてシグナルフロー線図は一般に連立１次方程式と一対一の対応をもつており，シグナルフロー線図の等価変換による縮少は方程式での消去過程と対応するものである。

連立方程式とシグナルフロー線図の対応を示すと図－３の如くなる。

$$
\begin{aligned}
x_0 &= x_0 \\
x_1 &= a x_0 + g x_2 + f x_3 \\
x_2 &= b x_1 + c x_2 \\
x_3 &= e x_1 + d x_2 \\
x_3' &= x_3
\end{aligned}
$$

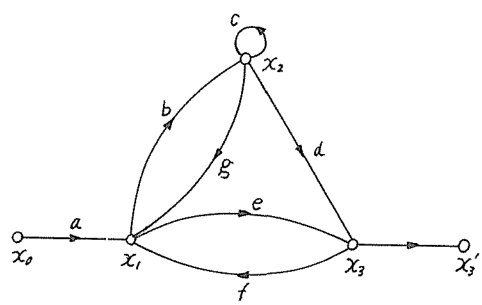


図 － 3

シグナルフロー線図の定義としては次の如きものがある。

節点　6.1図において，x_0，x_1，x_2，x_3，x_3' の信号は節点として表わされる。

分枝　２つの節点を結ぶもので，影響する方向を示すための矢印をもつ。

伝達率　影響の大きさを示すために，各分板の上にかかれる。

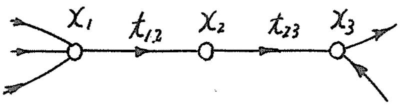
分岐　１コの節点から他の２つ以上の節点に影響する場合に用いる。これは分岐の出る節点の信号が２つの量に分配されるのでなく，他の節点に影響を与えることを意味する。

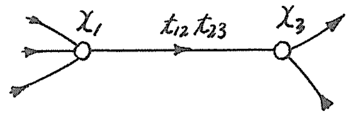
加算　節点に入り込む分枝はこの節点で加算される。

10

シグナルフロー線図の変換　連立方程式と一対一の対応がある訳であるから表ー２の変換が可能である。

直列

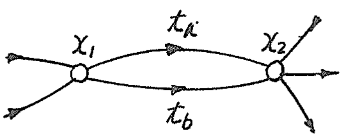


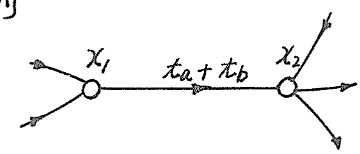


$$x_2 = t_{12}x_1$$
$$x_3 = t_{23}x_2$$

$$x_3 = t_{12}t_{23}$$

並列

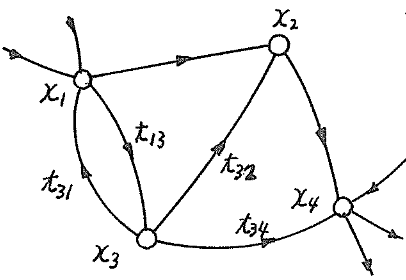


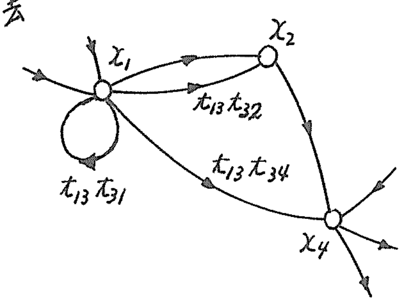


$$x_2 = t_a x_1 + t_b x_1$$

$$x_2 = (t_a + t_b)x_1$$

消去

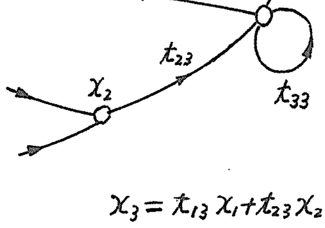


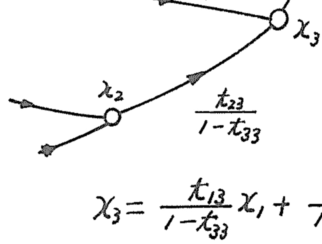


$$x_3 = t_{13}x_1 \quad x_1 = t_{31}x_3$$
$$x_2 = t_{32}x_3 \quad x_4 = t_{34}x_3$$

$$x_1 = t_{13}t_{31}x_1 \quad x_4 = t_{13}t_{34}x_1$$
$$x_2 = t_{13}t_{32}x_1$$

自己ループ





$$x_3 = t_{13}x_1 + t_{23}x_2 + t_{33}x_3$$

$$x_3 = \frac{t_{13}}{1-t_{33}}x_1 + \frac{t_{23}}{1-t_{33}}x_2$$

表　ー　２

この変換にあたつて系の線形性を考えれば変換は機械的におこなえる。しかし線図が大きく，複雑になつた場合は次の縮少法を用いると便利である。

Masonの縮少法　メーソンの縮少法を述べるに先だつて次の定義をする。

パス　与えられた方向に進む分枝のつながり。開いたパスに沿うては一回以上同じ節点現われない。

ループ　それに沿つた各節点が1回しか現れないような単純な閉じたパス。

パス伝達率　そのパスにある分枝伝達率の積をいう。

ループ伝達率　そのループにある分枝伝達率の積。

グラフ行列式　次式で定義される値。

$$\triangle=[(1-L_1)(1-L_2)(1-L_3)\cdots\cdots(1-Ln)]^{*} \qquad (29)$$

ここにL_1，L_2，……Lnはループの伝達率，＊印は〔 〕内の掛け算に際して，触れているループがあつたら除くことを意味している。

パス因子　これはグラフ行列式からそのパスに触れているループの伝達率を含むすべての項を除いたもの。

グラフ伝達率　これはある指定された湧点（出る分枝のみをもつ節点）に加えられた単位信号に対する従属節点における信号である。グラフ伝達率を求めることによりその間の節点は消去され，1つのグラフ伝達率をもつ分枝におきかえられることになる。これをメーソンの縮少法といい，グラフ伝達率は次式で与えられる。

$$G=\frac{\Sigma\triangle k\ Gk}{\triangle} \qquad (30)$$

ここでGはグラフ伝達率，$\triangle k$はパス因子，Gkはパスの伝達率，$\triangle$はグラフ行列式である。この証明は複雑になるので略すが，これは行列式を解くのに相当するから学生は納得出来るものと思う。

図−3の例では

$$\frac{x_3'}{x_0}=\frac{\triangle_1 G_1+\triangle_2 G_2}{\triangle}=G \qquad (31)$$

$$=\frac{(1-L_1)G_1+G_2}{1-(L_1+L_2+L_3+L_4)+(L_2L_3)}$$

$$=\frac{(1-c)al+abd}{1-bg-ef-c-bdf-cef} \qquad (32)$$

Ⅶ　一般化された回路網の解析

回路の演算子化　図−4の如き回路においては次の微分方程式が成立する。

$$LI'+RI+\frac{Q}{C}=E \qquad Q'=I \qquad (33)$$

（33）式を演算子法でかくと

$$LSI+RI+\frac{Q}{C}=E+LI(o) \qquad SQ=I+Q(o) \qquad (34)$$

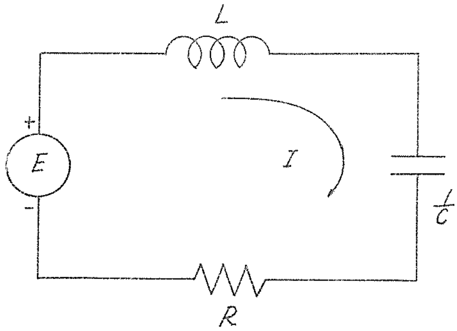


図 ― 4

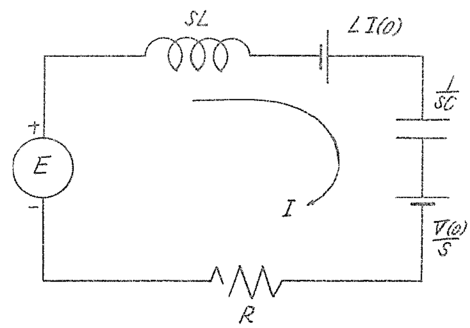


図 ― 5

あるいは

$$\left(LS + \frac{1}{R} + \frac{1}{CS} \right) I = E + LI(0) - \frac{V(0)}{s} \qquad V(0) = \frac{Q(0)}{C} \qquad (35)$$

この関係を回路表示すると図－5になる。

ここで$LS + R + \dfrac{1}{CS}$を回路のインピーダースといいZで表わす。これは一般化された回路でも同様である。

シグナルフロー線図による回路網の解析　系が複雑になつた場合は演算子化された回路網に対して，シグナルフロー線図を適用することによつて系の因果関係が簡単に求められる。図－6の如き回路網がある場合

単位網目②と単位網目①はZ_{12}で結合していると，網目流動量I_1によつてZ_{12}に誘起される位差量は$Z_{12}I_1$であり，この$Z_{12}I_1$の位差量によつて単位網目②に生ずる流動量は網目②の網目インピーダンスZ_{22}で除したものである。同様に単位網目③とZ_{23}で結合している場合もそれによる流動量$Z_{23}I_3/Z_{22}$で求められる。Z_{12}，Z_{23}を相互インピーダンスという。

また網目②の位差量による流動量はE_{12}/Z_{22}である。ゆえに重ね合せの理論より網目②の流動量I_2はこれ等のものを加え合せたものになる。

この関係より図－6の回路網の動作量関係はただちに図－7のシグナルフロー線図として表わすことが出来る。

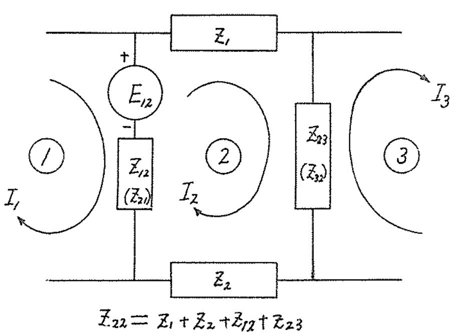


図 ― 6

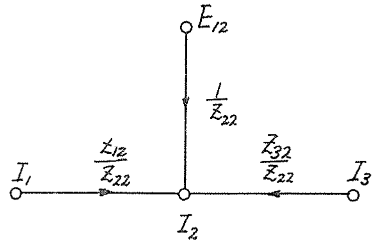


図 ― 7

例　図－８で捩りばねに力が働かない状態から角度θ_0　だけ捩つた後，自由にした場合点Ａでの回転速度はどうなるか。

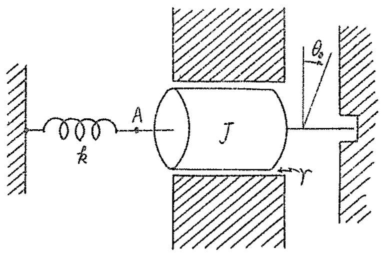


図　－　8

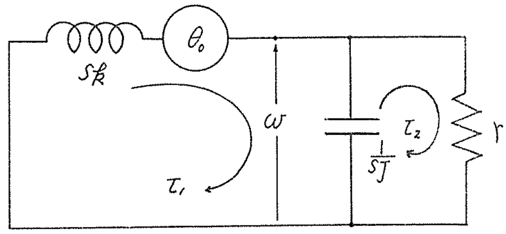


図　－　9

回路図を求めると図－９のやうになる。

この回路にシグナルフロー線図を適用すると図－１０になる。

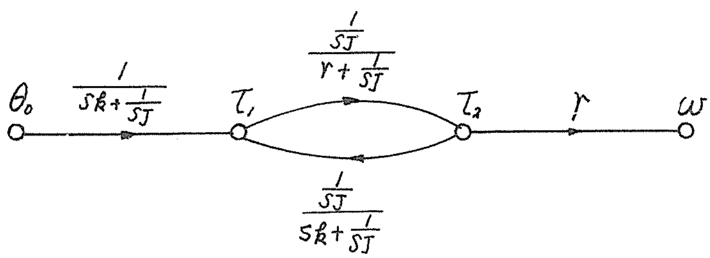


図　－　１０

これにメーソンの公式を適用すれば

$$W=\frac{\dfrac{1}{Sk+\dfrac{1}{SJ}}\cdot\dfrac{\dfrac{1}{SJ}}{r+\dfrac{1}{SJ}}}{1-\dfrac{\dfrac{1}{SJ}}{Sk+\dfrac{1}{SJ}}\cdot\dfrac{\dfrac{1}{SJ}}{r+\dfrac{1}{SJ}}}\cdot r\cdot\theta_0 \qquad (36)$$

$$=\frac{\theta_0\dfrac{1}{kJ}}{S^2+\dfrac{S}{Jr}\cdot+\dfrac{1}{kJ}} \qquad (37)$$

$$= \frac{\theta_O \frac{1}{kJ}}{\left[\left(S+\frac{1}{2Jr}\right)^2+\frac{1}{kJ}-\left(\frac{1}{2Jr}\right)^2\right]} \tag{38}$$

Wは$\frac{1}{kT}-\left(\frac{1}{2Jr}\right)^2$ の正，負，0によつて．振動状態が変つてくる。(38)式のSの関数形より一般の関数形を求める不便さがあるが，これはすでに表となつて発表されているから，その表によると便利である。

Ⅷ あ と が き

上記のごとき考え方を骨子として，プロセス化した設備について解析を行うならば，異つた物理系やさらにそれ等の合成系について，統一的立場より因界関係が簡単に解析出来，学生にあつては各専門分野の学習に常に初歩より出発する必要がなく，より多くの成果をあげ得るものと信ずる次第である。

ただこれ等の概念の学習にあたつて，学部学生に高級すぎないかとの疑問が浮ぶのであるが，次のE.A.Guilleminの言葉「基礎的概念あるいは方法の教育に関して私が常に考えてきたことは，“初歩的”方法と“高級な”方法との間に何らの差別をつけるべきでない，ということである。われわれが高級というのは，簡明な言葉で明快に説明出来るほどよく自分で理解してないことに過ぎない。問題を充分明確に理解すれば，初歩の人に了解させることは決して困難なことではない。更にまた，初学者にはじめから何もいわなければ，いわゆる“初等的”方法を教えていても“高級な”方法を教えていても，彼らには区別がつかないはずである。そのような分類は教師の頭の中にあるだけのことであつて，学生にはいづれも目新しいと同時に，明瞭なことであろう。」に同感するものとして，学生が根本的考え方を充分理解して，これを基にした柔軟性ある考え方を身につけることを望むものである。

参考・引用文献

1）市川邦彦；自動制御の理論と演習，産業図書

2）ミクシンスキー；演算子法，裳華房

3）高井宏幸，長谷川健介；ラプラス変換法入門，丸善

4）ORとシステムズ・エンジニアリング，日本能率協会

5）E. ミツシユキン，L. ブラウン；適応制御系，コロナ社

6）高橋利衛；自動制御の数学，オーム社

7）西巻正郎；電気音響振動学，コロナ社

8）宮入庄太；エネルギー変換工学入門，丸善

9）E.A. ギルミン；回路網基礎学，無線従事者教育協会

10）David K.Cheng ; Analysis of Linear Systems, Addison Wesleg

11) H. E. Koenig, W. A. Blackwell ; Electromechanical System Theory, McGraw-Hill

12) Louis P. A. Robichaud, M. Boisvert, J. Robert ; Signal Flow Graphs and Applications, Prentice Hall

13) S. Seshu, M. B Reed ; Linear Graphs and Electrical Networks, Addison Wesley