

# システム工学の領域と実施例

大阪市立大学工学部 浅居喜代治

## 1. ま え が き

人類の欲望は果しなく、その周りに形成される種々のシステムは限りなく大規模化・複雑化の一途をたどりつつある。東海道を何日もかかって歩いたのは、もう遠い昔のことで、今では交通機関の発達で数時間以内に短縮され、電話だと即時通話も可能になった。一方、街路には自動車が増えるようになったし、また電力・生産・事務などのシステムには電子計算機の導入がさかんで、これにより大量の仕事が能率よく処理されるようになった。このようにして、人間一人の仕事能力は大幅に拡大され、これは、さらにシステムの大規模化・複雑化に拍車をかけることとなった。このようにシステムが広汎にかつ交錯した形になってくると、もはや従来の専門化された工学ではその解析や設計は行ない得ず、システム工学の適用を余儀なくされることとなる。さてそれでは現在どのようなシステムがシステム工学の適用対象となっていて、実際にはどのような具体例があるだろうか。ここでは適用対象を、交通・通信・電力・生産の各分野に分けて概説し、代表的な具体例を示すこととする。

## 2. 交 通

この分野では交通管制・計画運転・座席予約などのシステムがある。

交通管制システムは道路交通の高速化や混雑の緩和を目的のために、交通信号の点滅周期をそのときの交通量などに応じて自動的に調整するシステムであって、最近の都市における交通マヒの対策として緊急に設置することを要望せられているものである。

計画運転のシステムは、列車数の増加および高速化に対する安全かつ効率運転をはかるために、あらかじめ作成されたプログラムを基幹とし、これに列車の現在位置などを参考にして、全列車の運行を規制するシステムである。

座席予約のシステムは、航空機や列車の座席を多くの離れた地点から迅速に予約できるシステムで、予約数が準備席数に近かつ超過しないようにすることができる。

以上各システムのうち、交通管制の方は半自動のもの

が東京および大阪の交通情報センターとして有名であり、また全自動のものがカナダのトロント市、ロスアンゼルス（以上デジタル計算機使用）、デンバー、バルチモア（以上アナログ計算機使用）、西ロンドン（デジタル計算機使用で1965年完成予定）にある。計画運転の方は国鉄で研究が進められていて、東海道新幹線に実施される日も近いと思われる。座席予約の方は、かなり実施例が多い。日本では近鉄と国鉄の例がある。

さて次に交通管制へのシステム工学の適用例としてシミュレーション・スタディの場合<sup>(1)</sup>を示そう。

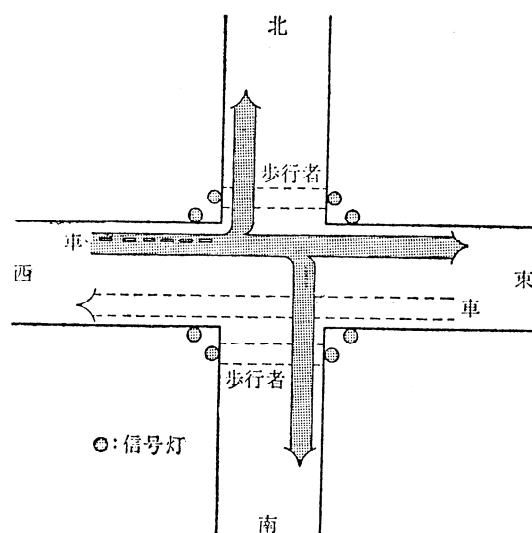


図1 交通システムの例

図1はある交差点において、西から東へ直進、北へ左回り、南へ右回りする車に対して、信号・歩行者・他の車が干渉をもつ場合の交通システムを示す。実際には、東・北・南からの車の流れなどもあるが、ここでは説明を簡単にするために省略する。

この場合の論理上の規約を次のように定める。

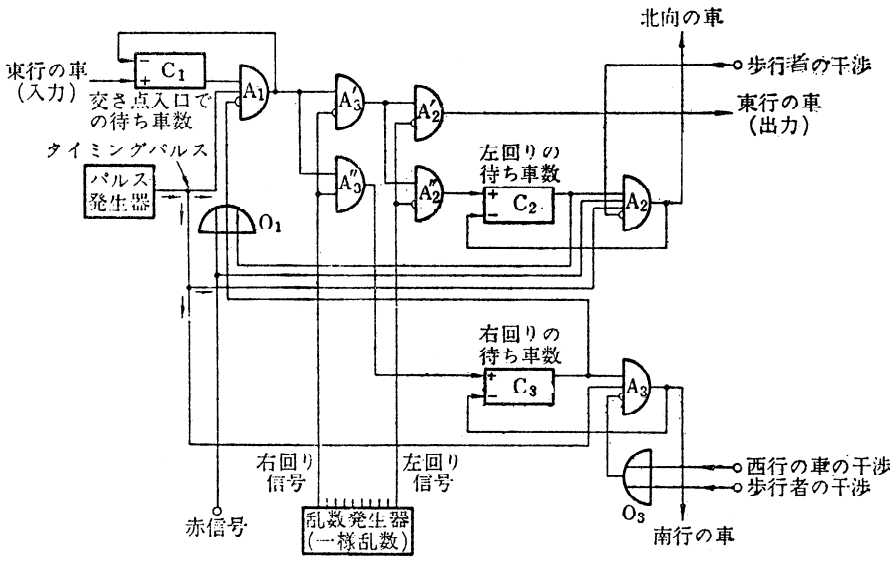
- (a) 車はパルス発生器からのタイミングパルスで同期をとって前進させる。赤信号が変わっても、左回りの北向きの車ならびに右回りの南向きの車のある間は東行きの車は前進させない。
- (b) 左または右回りの車は乱数によってシミュレーションを行なうこととし、直進・左回りおよび右回りの発生確率を基にして定められる（ここでは、直

進は80%, 左回りおよび右回りはいずれも10%の確率で起こるものとし, 乱数が '0' のときは右回り, '9' のときは左回り, その他のときは直進とする)。

(c) 左回りの車は, 東向きの信号が赤で歩行者の干渉のないときに北進することができる。

(d) 右回りの車は, 東から西へ直進する車および歩行者の干渉のないときに南進することができる。

以上の規約に基づいて図1のシステムをデジタル計算機および乱数発生器などを用いてシミュレーションを行なう場合の回路の一例を図2に示す。ここで可逆計数器C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>は '+' 端子に加えられたパルス(車に対応)を加算し, '-' 端子に加えられたパルスを減算し, その計数の結果が '+' の場合に限り, その出力端子に一定電圧が現われるようになっている。したがって各計数器C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>の計数値は, それぞれ交叉点入口での待ち車数, 左回りの待ち車数および右回りの待ち車数を示すことになり, それらが記録装置で記録される。この場合, パラメータとして赤信号の継続時間および間隔を変えてみて, 交通混雑の最も少なくなるいわゆる最適値が試行実験的に求められる。



C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>: 可逆計数器 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>2</sub>', A<sub>2</sub>'', A<sub>3</sub>, A<sub>3</sub>', A<sub>3</sub>'': アンド回路 O<sub>1</sub>, O<sub>3</sub>: オア回路

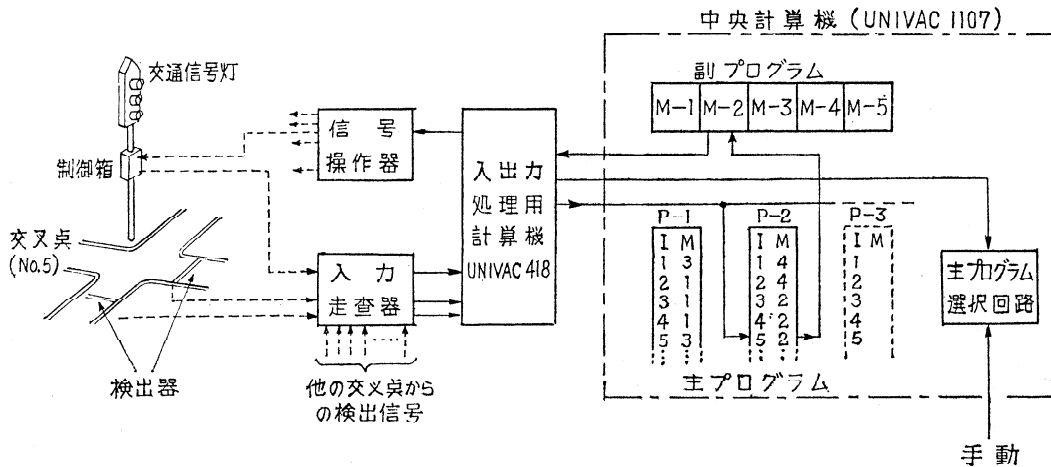
図2 図1のシステムのシミュレーションの一例

表1 トロント市における自動車の増加

年	人口	自動車
1953	1,174,000	330,000
1962	1,625,000	585,000
増加率	38.4(%)	75.0(%)

以上は実際のシステムを運用したり, または建設したりする場合に最適なパラメータをオフライン的に求める場合の例であるが, 実システムでオンライン的に行なわれている例として, 前述のトロント市のシステム<sup>(2-3)</sup>を示そう。

トロント市では, 最近自動車の台数が急増し(表1参



I: 交叉点のNo.  
 M: 副プログラムのNo.  
 { M-1: 進行式, M-2: 直交車状況  
 M-3: 対向車状況, M-4: 他の交叉点状況  
 M-5: 一方方向状況

図3 交通管制システム(トロント市の例)

照, これは人口増加と対比してある), 電子計算機による交通管制の必要性が認識せられ, このたび300万ドル

の建設費でそのシステムを設置したもので、世界最大の規模のものといわれている。

図3はシステムの概要である。

このシステムはトロント市の主要幹線道路の各交差点に設けられた2,000個の交通量検出器から刻々送られてくる複雑な交通情報を迅速に処理して、総合的な判断の上、1,000基に及ぶ交通信号機に適確な指令を送ることのできるもので、このシステムの導入によって車両の混雑が20%以上緩和でき、車の流れも20%以上スピードアップされたと報告されている。

システムの構成要素は次のとおりである。

#### (i) 検出器

道路の下にループコイルを埋め、その上を通過する車によって磁界が変化するのを検出する。

#### (ii) 入力走査器

各交差点につき2台ずつの検出器の出力信号と信号灯の点滅状態(制御箱内にて検知)とを走査方式でサンプルして、順次入出力処理用計算機に送る。

#### (iii) 信号操作機

計算機によって決定された信号点滅指令に基づき、制御箱に信号点滅信号を送る。

#### (iv) 入出力処理用計算機

UNIVAC 418が用いられ、入力走査器からの信号を受けて車の数を計数するなど得られた情報を中央計算機で処理し易い形に変換し、また中央計算機での演算処理の結果を信号操作器に伝達する。

#### (v) 中央計算機

UNIVAC 1107 が用いられている。各交差点からの交通情報を得て、市全体の交通管制の立場から判断を行ない、交通混雑を最小限にとどめられるように各交差点の信号灯の制御指令を出す。あらかじめ十分な検討の上作成された主プログラムおよび副プログラムが記憶装置に書き込まれていて、これに基づいて信号灯の制御指令を決定する。これらのプログラムには、いくつかのパターンがあって、主プログラムの方は交通量に応じてあるいは手動によって適当なパターンが選ばれ、副プログラムの方は、主プログラムの中で交差点の番号が決まれば定まるようになっている。

さてこのシステムでシステム工学上重要なことは、主および副プログラムの作成および検討と、情報処理の速さである。車両の混雑が少なくて信号灯を一定時間間隔で点滅するような場合には、計算機は過去のデータの整理および解析に用いられ、このようにしてプログラムの作成や検討の資料が作られる。また、1,000基の信号機からの情報をすべて1秒間で処理するために、中央計算

機では1交差点あたりの処理を1ミリ秒以内にすませることができるよう、将来計画が進められている。

### 3. 通 信

この分野における最大の話は、人工衛星によるテレビジョンの国際中継システムであろう。間近かに迫った東京オリンピックの状況を広く世界に即刻伝えようとして、先般来日米間において試験放送が行なわれている。これなどは明らかに大規模システムで、システム工学が大幅に取り入れられている。

さて、日本の電信電話事業に眼を向けてみよう。まだ、米国ほどでないにしても、その回線は全国に網の目のように張られ、特に大都市間およびその周辺についてはかなりの発展を示している。府県庁所在地間の自動即時化を目標に市外電話網の拡充が進められ、これに併行して料金システムの研究もさかんである。この事業は初めから日本全体を対象にしており、また電信・電話回線の敷設や電信電話局の設置など大局的に計画しなければならない面が強いので、システム工学が形成される以前からその思想がかなり活かされていた。最近では、クロスバー方式の採用、電話番号の整理、伝送回線の種類の選定、通信システムの効果の評価、シミュレーション・スタディなどの各方面にシステム工学の活用がみられる。具体例については、かなり広範囲にわたるので紙面の都合上省略することとするが、最近の報告<sup>(4)</sup>などを参照せられたい。

### 4. 電 力

電力需要は最近急激に増大し、その設備の増加とシステムの複雑化とに伴ない、電力システムへの電子計算機の導入は内外ともにきわめてさかんである。一般に電力システムは、発電所と需要負荷とが送配電系統を通じて結ばれ、発電所には水力・火力・原子力の種類があり、また需要負荷には種々の容量および特性のものがある。かなり複雑なシステムである。このようなシステムにあって、電力会社は安定な品質の電力を、最小の経費で生産することに努力しているのであるが、その具体的方法としてたとえば周波数自動制御方式や経済的負荷配分制御方式が採用され、いずれも電子計算機が用いられている。このようにして、システムはますます複雑化してシステム工学の適用が不可欠のものとなってきている。最近、日本でも各電力会社がシステム工学の積極的採用に乗り出してきている。

ここでは、最近システム工学の適用が特にさかんに行なわれている火力発電所のシステムの具体例として、



(i) システムの概要

システムの概要を図5に示す。

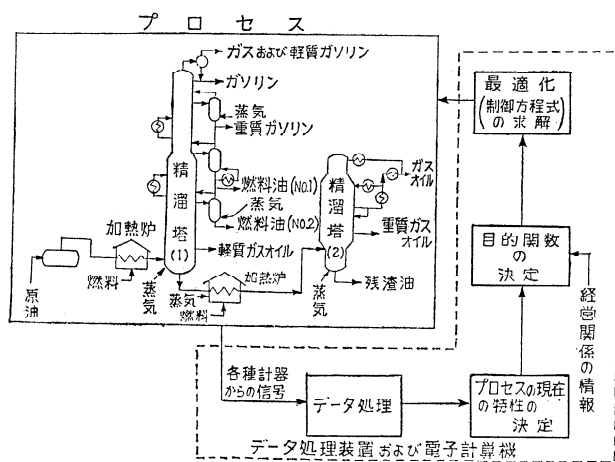


図5 精溜塔とその制御システムの概要  
(American Oil Co. の例)

図において、プロセスは精溜塔(1)(2)および加熱炉を主体として構成され、原油が加熱および減圧されてのち精溜塔(1)に供給されると、分溜されて塔頂から下の段に向かって順次、ガスおよび軽質ガソリン・ガソリン・重質ガソリン・燃料油 (No. 1) ・燃料油 (No. 2) ・軽質ガスオイルがそれぞれ取り出される。頂底にたまった油はさらに加熱されてのち精溜塔(2)に供給せられ、ここで塔頂からガスオイル、中間段から重質ガスオイル、塔底から残渣油がそれぞれ溜出される。このプロセスに対しては、196個の工業計器による計装が施されていて、このうち約100個の調節計によって次のような定値制御が行なわれている。

- (a) 精溜塔(1)(2)への供給油の流量および温度を一定に保つ。
- (b) 精溜塔(1)(2)内の圧力および温度を一定に保つ。
- (c) 溜出油の液位を一定に保つ。
- (d) 渣溜出油の抜き出し流量を一定に保つ。

計器で測定せられた各制御量およびその他の変量は適当な情報変換ののちデータ処理装置に送られ、ここで種々のデータ処理が行なわれて、他の情報とともに電子計算機に加えられる。電子計算機では、あらかじめ作られているプロセスの数学モデルの係数の決定やその他の諸量の計算を行なうことによりプロセスの現在の特性を決定し、その上で別に作られている制御方程式を解いて、たとえばプロセスの利益率(単位時間あたりの利益)を最大にするような目的関数に従って、そのときの制御量の設定値を決定する。この設定値は印刷されてプロセス・オペレータに指令されるが、オペレータはこれにより

調節計(約100個の調節計のうちの19個の調節計)の設定値を調整してプロセスの最適化を行なう。

(ii) システムの開発

このシステムの開発にあたっては American Oil Co. と IBM両社の技術者で合同調査団が組織され種々の予備調査が行なわれた。

まず、計算機制御に適しているプロセスは、品質の高級な製品を大量に生産するものでなければならないという原則から精溜装置の選定が行なわれた。

次いで、既設の精溜塔(日産60,000バレル)について予備実験が行なわれ、ここでおよそ100点の温度・圧力および流量が実運転状態で測定せられ、データ処理装置で完全に整理された。これらが IBM 650 で処理せられて物質収支・熱収支および各段における気液負荷に関するデータが得られ、これにより製品・加熱炉および各段に関する種々の設計資料が求められた。また、供給油の流量・塔の圧力・各部の温度などを種々の値に変化してみると、これにより製品の濃度・収量や精溜効率が変わることがわかった。このことは、いままでの制御では見逃されていたことである。その理由は、制御量のうちのどれかを試験的に変えてみるということが、実際に操業中の塔では許されなかったことと、制御量の変化による応答の結果が出るのにきわめて長時間を要したからである。さらに、従来のように人手によって整理されたデータには誤りのあることが多かったからである。

それから、システムの完全自動化について種々の吟味がなされた。システムを完全に自動化するには、各要素間のタイミングの問題が重要であって、このために各種検出器・変換器・データ処理装置・タイプライター・カード穿孔機・電子計算機などの速度や同期について検討が行なわれた。システムとしては、その自動化の程度に応じて3種類のものが考えられる。すなわち、

- (a) データ処理装置・電子計算機・調節計の各間に人手が用いられるオンライン方式(非実時間方式)
- (b) 電子計算機と調節計との間にだけ人手が用いられるオフライン方式(実時間方式)
- (c) 監視以外には人手を用いない完全な閉ループ方式(実時間・自動制御方式)

である。最終的な目標は閉ループ方式であるが、一度にこの方式のものを設計することは困難なので、まずオフライン方式のものを建設し、これについて検討を重ねた上でオンライン方式のものが建設された。このシステムが前掲の図5のものである。さらに、その後閉ループ方式に発展させるために、要素間のタイミングはもちろん信頼性や経済性の問題についても研究が進められた。

(iii) 開発せられたシステム

開発せられたシステムを図6に示す。

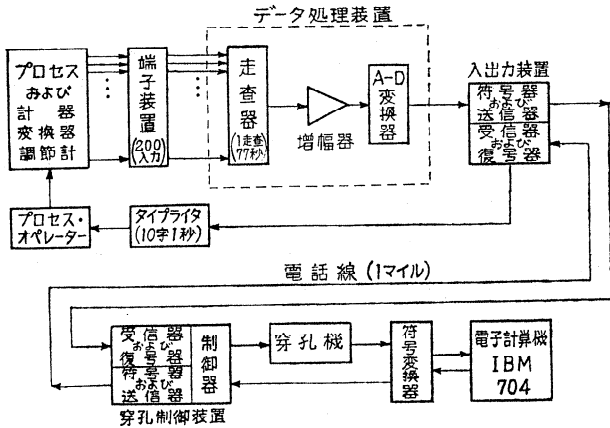


図6 精溜塔の制御システム (American Oil Co. の例)

システムは精溜塔とその周辺に設けられている計器・変換器(トランスジューサ), 調節計などの計装機器・端子装置・論理装置・入出力装置・タイプライターなどからなる現場施設と, それより約1マイル離れたところに設けられている管理室(穿孔制御装置・穿孔機・符号変換器・電子計算機 IBM 704などを収容)とから構成機器以外のものは場施設のうち精溜塔と検出器・操作用せられている。現縦横それぞれ25フィートおよび17フィートの別室に収容せられ, ここで現場における監視ができるようになっている。端子装置はプロセスとデータ処理装置とを結合するもので, プロセスから送られてくる196個の情報をデータ処理装置の走査器に供給する。プロセスの各部の温度を検出するための熱電対の冷接点補償装置も含んでいる。データ処理装置は走査器・増幅器・A-D変換器などを主体にして構成せられ, 端子装置から与えられたアナログ量の各種プロセス変量(196個)を走査器で一巡77秒間の速さで走査し, これらを順次増幅してデジタル量に変換して取り出す。入出力装置は符号器および送信器, 受信器および復号器から構成せられ, データ処理装置から得られたデジタル量のプロセス変量を適当に符号化して送信器から有線電信にて管理室に送る。また管理室から送られてきた最適設定値に関する指令信号を受信して, これを復号化し, タイプライターで印字させる。タイプライターは毎秒10字の速さで最適設定値を印字する能力があり, これをプロセス・オペレーターが読んで該当の調節計の設定点を調節する。管理室では, 前記プロセス変量の情報を受信器で受けて復号化し, これを制御器の助けによって穿孔機でパンチ・カードに記録させる。それと同時に, この情報は符号変

換器を経て電子計算機 IBM 704に加えられる。計算機では, 時々刻々与えられるプロセス変量の値を記憶しておいて, 196個のプロセス変量の一連の値が与えられると, これらによりプロセスの数学モデルの係数の決定やその他の諸量の計算を行ない, その上で確定された制御方程式を線形計画法によって解いて最適設定値を決定する。これは, ふたたび符号変換器を経て穿孔制御装置に加えられ, パンチ・カードに記録をとった上で符号化して送信器から入出力装置へ有線電信で指令される。

(iv) 閉ループ方式のシステムへの発展

現在のオンライン方式のシステムを閉ループ方式のものに発展させるための研究が進められ, 図7に示す方式が考えられた。

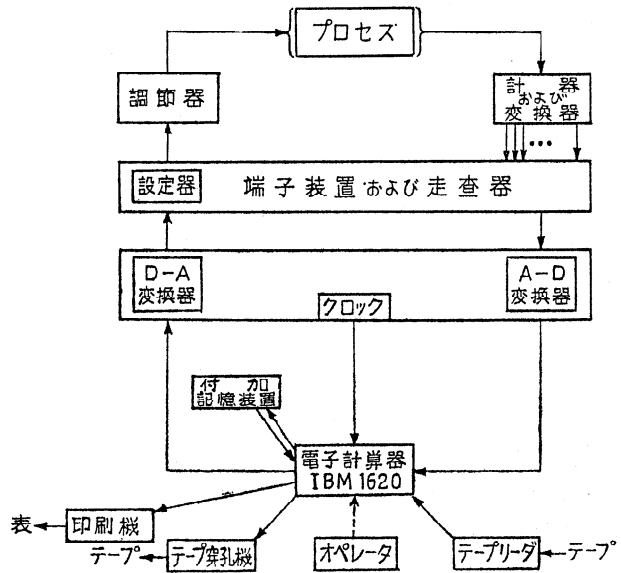


図7 閉ループ方式のシステムの構想 (American Oil Co. の例)

このシステムでは調節計の設定を自動的に行なうために Foxboro set point station を用いている。また電子計算機としては, トランジスタ式の IBM 1620 を用いることとし, 信頼性および計算速度の向上を計っている。また大量のデータの記憶を可能にするために付加記憶装置として特別設計のランダム・アクセス方式のディスク・ファイルを用いることが考えられている。計算機の同期やその他の動作(テープ穿孔・印刷など)の制御に用いるために6種類の周期のクロック・パルスが作られる。システムには, プロセスの計器の監視と電子計算機の操作のために少数の人員が配置される。このレベルのシステムになると, システム工学上の多くの配慮が必要であって, 以上示した以外の事項にわたっても細かく検討が加えられている。

## 6. む す び

システム工学の対象となるシステムは上記のもの以外にかなりのものがあり、また急速に付け加えられつつある。また、今まで単純なシステムと思い込んでいたものも、よく考えてみると案外に複雑でシステム工学の適用を要望されるものも多い。ここに示したものは代表例と考えられるものであって、かつその記述もシステム工学が具体的にどこに活かされているかを明確に示しているとはいえないが、読者各位の洞察力に期待することとして、本稿の不備を許されたい。

## 文 献

- (1) 中原：モンテカルロ法，経営数学VI，みすず書房（昭33）。
- (2) Control, June, 1963, pp.118~119.
- (3) D.Fishlock : New Scientist, Dec., 1963.
- (4) 熊谷：システムズ・エンジニアリング入門，オーム社（昭37），222~255頁。
- (5) W.T.Hess, L.V.Maurin, F.A.Litchings & W.A.Summers : Electrical World, April 23, 1962 (pp.54~57) ; April 30, 1962 (pp.46~50) ; May 7, 1962 (pp.51~56) .
- (6) R.H. Crowther, J.E. Pitrak & E.N. Ply : Chemical Eng. Progress, June, 1961, pp.39~43.
- (7) D.R. Kuehn & H.Davidson : Chemical Eng. Progress, June, 1961, pp.44~47.
- (8) A.D. Pendleton : Chemical Eng. Progress, June, 1961, pp.48~50.