

システム工学の進歩

大阪大学工学部 熊谷三郎

1. システム (System)

産業界においては、個々の機器が単独に使用されることは全くまれで、実際上無いといってさしつかえない。いくつかの異種の機器を組合せてシステムを構成するのが普通である。また最近のすう勢はシステムがますます複雑になるとともに、それがオートメーション化されようとするのである。局部的には機器が単独で働いているように見えても、より広い視野から眺めると大きなシステムの一要素として働いているのが実情である。さらに、また、一つの機器それ自体がすでにシステムとして取り扱わなければならないものもある。自動計算機、自動交換機などはその例である。

ここに一つの例として電話事業を考えてみよう。約80年の間に一本一本の接続から手動交換、自動交換と進み、今日では高度の電子技術による電子自動交換へと発展を続けている。交換機自体がすでに複雑な一つのシステムを形成しているが、さらに電話回線網について考えると、その中に多くの交換機を含み、多数（わが国では300万以上）の加入者のいずれも迅速に接続できるように設計、建設されていなければならない。最近では料金計算まで自動的に行なうようになりつつある。まさに大規模、複雑なシステムである。

このほか、多くの発電所や負荷をもつ送配電系統、計算機を含む自動制御系なども複雑なシステムの例である。

システムの特徴は、その総合性と統一性にある。すなわち、システムを構成する各要素はいずれも相互に関連のある要素の集合体で、その要素は互に協力して定められた機能を発揮すべく設計されたものである。それらの要素は中心部で監視制御されている場合もあるし、そうでない場合もある。システムの設計にあたっては各要素の特性をむだなく充分に活用し、さらにシステム全体として技術的にも経済的にも満足なものになるように心がけねばならない。

身近かにあるもっともすぐれたシステムは人体である。人体を構成する各要素は互に依存関係があり、常に共通の目的のために互に協力的に働いており、上に述べ

た意味でのシステムの代表的モデルである。システムの立場から人体を研究することによってシステムの設計、開発に必要な多くの原理、原則を導き出すことができる。

システム工学の対象となるシステムは、(1)大規模で、(2)複雑で、(3)高価なものである。このようなシステムは一般に多くの変数を含んでいるが、一つの変数の変動が他の多くの変数に影響をおよぼすことを複雑というのである。この影響のしかたは非常にこみいっている場合が多く、これを明確にするまではシステムの理解はできない。この関係を究明することがシステム設計者の基本的な仕事の一つである。

大規模システムは質的にも量的にも単純なシステムと異なる。そしてシステムの規模とその構成要素は見方によって違う。たとえばさきに述べた電話システムについて考えてみると、コイルの設計者にとっては一本の電線が構成要素、断電器の設計者にとってはコイルは構成要素、ラインファインダの設計者にとってはスイッチが、交換機の設計者にとってはラインファインダが、そして電話システムの設計者にとっては交換機がそれぞれ構成要素である。

一般に、いくつかのシステムが集って大きなシステムを構成し、これがいくつか集ってさらに大きなシステムを構成することになる。大きなシステムに対してこれを構成する小さなシステムをサブシステム (Sub system) という。たとえば電話システムにおいて交換機が、計算機制御システムにおいては計算機が、電力システムにおいては発電所がそれぞれサブシステムである。

ここで特に強調しなければならないことは、システムの構成要素として人間が常にはいることである。いかにオートメーションが進んでも、全く人間の介在しないシステムは常に人間—機械系である。

2. 大規模システムの例

2.1 電力システム

発電機と需要負荷は送電線、配電線を通して一つのシステムを構成している。しかも、発電所には特性の異なる火力および水力があり、これらが数多く同一システム

の中に存在し需用負荷も特性の異なるものが数多く接続されている。

電力供給事業者にとって重要な使命が二つある。その一つは変動する需用負荷に対して常に発電力を平衡させることであり、他の一つは電力を最小の費用で発生させることである。これをシステム運用面からみると、前者は周波数を監視制御することによって実行でき、後者は各発電機間の負荷配分を監視制御することすなわち経済的負荷配分によって実行できる。前者を自動的に行うために周波数自動制御が行われている。後者は多くの複雑な計算を迅速に行った上で制御を行なう必要があるため、計算機と制御技術を用いた自動的な方法が採用される。

2.2 通信システム

前記の電話システムのほか、マイクロ波通信システムを考えると、多重電話、テレビジョンなどの広帯域の信号を伝送する目的で端局装置、端末送受信機、無人中継装置、空中線系、STリンク、電源装置、遠隔管制および打合装置、さらにこれらを収容する局舎、保守人員などを組合せてシステムが構成される。

宇宙通信システムはおそらくもっとも大きな規模のシステムになるであろう。アメリカのSpace Technology Laboratoryは5部門からなっているが、その一つがシステム工学になっている。

2.3 輸送システム

鉄道、自動車、航空機などの輸送手段の高速度化と輸送容量の増大とに、矛盾する各種の隘路が現われている。これを調整して輸送能率を向上させなければならぬ。輸送システムにはいろいろあるが、その二三をあげてみよう。

(1) 航空機の盲目着陸システム

基本的にはGCA (Ground control approach) とILS (Instrument Landing system) の二つがある。前者は制御の責任が地上にあり、後者は制御の責任が機上にある。航空機の増加に伴ない、このシステムが何干という飛行場、何十万という航空機に採用されるとなると、その費用は莫大なものになり、システムの決定は重大な問題になる。

(2) 交通管理システム

その時々交通の必要量に対応して、交通信号の点滅周期を自動的に調整することがその基礎になっている。このシステムは検出器、計算機、通信機から構成される。

2.4 生産システム

生産工場におけるシステムとしては、資材運搬管理と

製造工程に関するものがもっとも重要である。すでに多くの種類の自動工場ができてはいるが、その数と多様性と急激に増大するであろう。

一例として電子回路の自動製造について述べると、これには次の二つの基本的なシステムがある。

(1) 自動部品組立のシステム (Automatic components assembly system) これは部品を自動的に組立てるために非常に正確に位置づける運搬システムがその主体になっている。

(2) モジュールのシステム (Modular design system) 基本になる単位がモジュールで、これはさらに、二つあるいは三つの部品からなる Wafer と呼ばれるもっと小さい単位に分けられる。このシステムでは部品の製造と検査も組立作業中に行われる。

2.5 企業システム

会社全体も一つのシステムであるが、このシステムは上記のものにくらべて著しく複雑である。

2.6 自然界や社会のシステム

構成要素が相互に依存関係にあるという点で、自然界も社会もシステムと考えることができる。

3. システム工学の進歩

たとえば能率という点だけ考えてみても、過去50年間、工学者、技術者の関心は主として個々の要素あるいは機器に向けられてきた。しかし、それよりも実際に大事なことは、それらの要素で構成されているシステム全体の能率である。信頼性、経済性その他の特性についてもまた同様である。

個々の機器の設計に対してはそれぞれ電気工学、機械工学などの専門工学がその役目を果たしているが、大規模システムの設計には既存の専門工学だけでは充分でないことがわかってきた。それで新しく、この目的のためにシステム工学が現われたのである。特にオートメーションの総展はシステム工学の重要性をますます高めることになった。

さきに述べたように、システムはいくつかの要素を組合せて構成する総合的労作である。小規模システムは個人の経験と比較的単純な総合力とで最適設計を行うことができるが、大規模システムではそうはいかない。交換機や計算機の設計から、さらに進んで、これらを含んだ電話システムや制御システムの設計を考えてみれば、このことはよくわかるはずである。

従来、大規模システムの設計は小規模システムの設計の拡張というかたちで進められてきた。そして大規模システムの構成要素の仕様書を使用者が作っていた。しか

し、このようなやりかたでは、仕様書どおりのものを作り上げるのにどのような困難があるかを仕様書の作成者がよく知らない場合が多く、そのため再設計の必要が起

きたり、調整装置がいつそう複雑になったりして損失を大きくすることになる。システムが大規模になると、このことはきわめて重大な問題である。

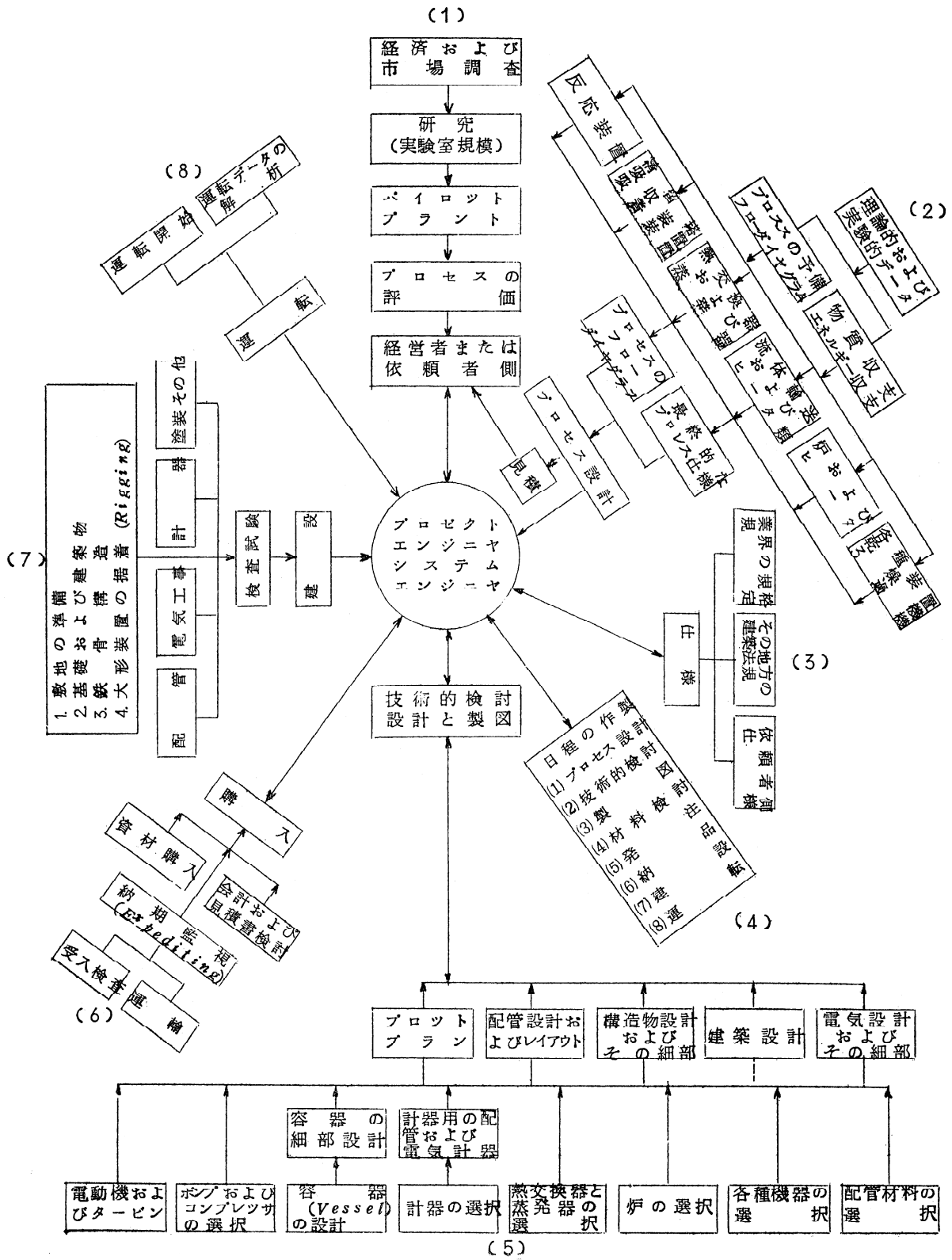


図1 建設計画（プロジェクト）組織図

システム工学には次の二つの面がある。

- (1) 新しいシステムの設計および完成を目的とするもの。
- (2) 既存のシステムの最適化を目的とするもの。

第一の面ではシステム工学は **Project Engineering** や **Plant Engineering** と同一目的をもっている。

図1は建設計画および実施の組織図の一例である。(1)の経済および市場調査から始まって、時計まわりに進み、(8)の運転開始にいたる建設計画の樹立と、その実施の中心人物が **Project Engineer** であり、**Systems Engineer** である。

システムの設計には多くの専門知識の総合が必要である。たとえば、電力システムや電話システムのような複雑なシステムを作るには何十人もの異なる種類の専門家すなわち電気、機械、土木、建築などの工学技術者をはじめ数学、物理、化学、地質、気象などの理学者の協力と、それらの知識の総合が必要である。

それで、広い見地に立って関係のある多くの専門家と協力し、かつ、これらの人々の中心になってシステムの設計を行うエンジニアの出現が要望されるようになった。これがシステム・エンジニア (**Systems Engineer**) である。

要するに、大規模システムの設計は多くの専門家からなるチームの共同作業で、その中心になるのがシステム・エンジニアである。システム・エンジニアは多くの異なる種類の専門家と共通の言葉、共通の思想で話し合えるものでなければならない。システム・エンジニアは従来の意味での **Specialist** ではない。 **Nonspecialist** である。システム・エンジニアはまた **Scientific Generalist** とか **Engineering Scientist** などとも呼ばれ、さらに仕事の内容から **System Analyst**, **Large—scale—system Designer** などとも呼ばれている。

システム・エンジニアはそれぞれの専門領域では学ぶことのできないことを学び、異なる専門家の用語や問題がわからなければならない。このような **Generalist** は工学の世界では新しい存在である。

4. システム・エンジニアの特徴

システム・エンジニアのなすべき仕事はおよそ次のようなことである。すなわち遂行すべき機能が与えられた場合

- (1) まず、この機能を自動的に遂行するシステムはどのようなものであればよいかという構想を作り上げる。ここに自動的というのは人間の介入を最小にするとい

う意味である。

- (2) 次に、この構想を信頼性のある実際的な形におきかえる。
- (3) 最後に、時間と経済を考慮して実際のものを作りあげる。

最近のシステム工学では、システムを構成する要素は理学、工学の広範囲のいろいろ異った分野から選ばれ、理学、工学の知識や技術を結集して実施される。システムはますます有機体の特性をもつようになる。

システム・エンジニアの責務は構想、選択、解析および構成に大別される。

4.1 構想 これはシステム全体のあるべき姿の構想で、その一般的操作法を考え、システムを構成する各種要素のインプットとアウトプットを定性的に定めることを含む。このことを行うには独創力、想像力および広範な学術的ならびに技術的な基盤が必要である。

4.2 選択 これはシステムをよりよきものにする進化の道程の多くの点で行われるものである。すなわち、まず二つの構想を比較してその一つを選ぶことから始って、装置、機器の選択、装置の細部の選択などである。すべての機器は一つのシステムの中で互に作用し合うものであるから、その選択にはシステム全体の知識が必要であると同時に機器自体の細部にわたっての知識が必要である。広範な知識の上に立つ批判的思考力が正しい選択の基礎になる。

4.3 解析 これは頭の中での抽象的な考えを定量的な形に作りあげること、複雑な全システムのつながりを原因、結果の科学的論理にしたがうようにすることである。この解析により、システムの理想的動作(動作の理想像)を予測することができる。また実際に使用される機器にはいろいろの制限があって理想的のものではないから、実際のシステムの動作は理想像からずれたものになるわけであるが、このずれを予測することができる。これは設計基準、仕様および検査に関する科学的基礎を与えるものである。

4.4 構成 これは装置、機器を組み合わせる理論どおりのシステムを作ってみることである。次に、これを基にして要求どおりの動作をし、製作可能で保守可能な人間の介入によって運用される実際的なものを作りあげるのである。

大規模システムの設計では、その中心になるエンジニアがただ1人では困る場合が多い。何人かのシステム・エンジニアがチームを構成して働くのが普通である。システム・チームの構成人員は少なくとも5人、多くとも12人ぐらいまでが適当であるといわれている。

5. むすび

いろいろなシステムが大規模化していく根本原因の一つは社会の指数関数的な発展である。

図2から明らかなように、通信手段や輸送速度の急速な増大によって、産業や社会が必要とするシステムはますます大規模化するのである。

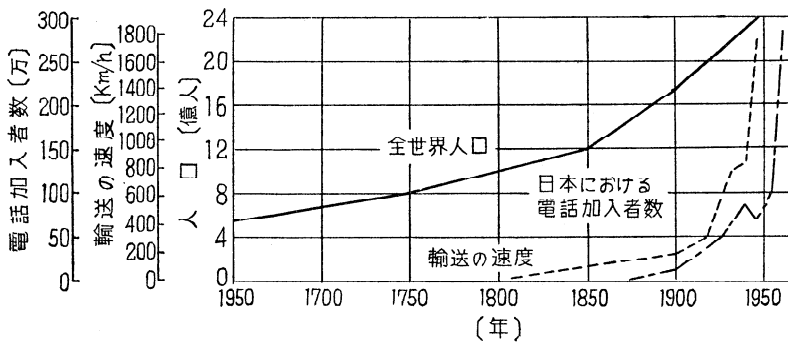


図 2

システムが大規模化するにつれて個々の技術では解決できないシステム特有の問題が発生する。このシステム

の問題の解決のために生れたのがシステム工学である。過去における航空工学、電子工学などの成立発展の過程と全く同じように、産業と社会の発展に基づく要求の高度化がシステムの大規模化、複雑化を招来し、それに対処するために新しい工学分野としてシステム工学が誕生したのである。

さきに述べたようにすべてのシステムには人間が介在しているの、システムはすべて人間-機械系である。

人間-機械系の設計および運用には人間工学の知識が必要である。このように一つの新しい学問分野の誕生進歩は更に新しい分野の発展を誘発するものである。

システム工学は、ひとりシステム・エンジニアだけに必要なのではない。すべての技術者は直接または間接にシステム・エンジニアに関係をもつものであるから、

システム工学の概念は工学基礎の一つとして、すべての技術者が理解しておくべきものである。