

日本学術会議  
自動制御研究連絡委員会  
工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会報告

# キーテクノロジーとしての制御工学

これまでの貢献とこれからの展開

平成17年5月19日

日本学術会議  
自動制御研究連絡委員会  
工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会

この報告は、第18期及び第19期日本学術会議自動制御研究連絡委員会及び工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

## 委員会等構成員リスト

### 第18期自動制御研究連絡委員会

- 委員長 古田勝久 (東京電機大学理工学部教授、東京工業大学名誉教授)
- 幹事 池田雅夫 (大阪大学大学院工学研究科教授)
- 幹事 木下源一郎 (中央大学理工学部教授)

### 第18期工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会

- 委員長 橋本 康 (東京農業大学客員教授、愛媛大学名誉教授)
- 幹事 荒木光彦 (京都大学大学院工学研究科教授)
- 幹事 佐野 昭 (慶應義塾大学理工学部教授)
- 委員 片山 徹 (同志社大学文化情報学部教授、京都大学名誉教授)
- 委員 下河辺明 (東京工業大学副学長・精密工学研究所教授)
- 委員 山川 烈 (九州工業大学生命体工学研究科教授)
- 委員 吉田和夫 (慶應義塾大学理工学部教授)

### 第19期自動制御研究連絡委員会

- 委員長 木村英紀 (理化学研究所バイオミメティックコントロール研究センターチームリーダー、大阪大学名誉教授、東京大学名誉教授)
- 幹事 池田雅夫 (大阪大学大学院工学研究科教授)
- 幹事 木下源一郎 (中央大学大学院新領域創成科学研究科教授)

### 第19期工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会

- 委員長 小林尚登 (法政大学工学部教授)
- 幹事 柿倉正義 (東京電機大学工学部教授)
- 幹事 原 辰次 (東京大学大学院情報理工学研究科教授)
- 委員 下河辺明 (東京工業大学副学長・精密工学研究所教授)
- 委員 橋本 康 (東京農業大学客員教授、愛媛大学名誉教授)
- 委員 藤井隆雄 (大阪大学大学院基礎工学研究科教授)
- 委員 吉田和夫 (慶應義塾大学理工学部教授)

以下の方々は、資料提供、報告取りまとめなどで協力を得た。

- 浅野正春 (日産自動車) (2.4節)
- 石橋 豊 (名古屋工業大学) (4.2節)
- 伊藤利昭 (名古屋工業大学) (2.2節)
- 大森浩充 (慶應義塾大学) (5.2節)
- 川邊武俊 (九州大学、元日産自動車) (3.2節)
- 北森俊行 (法政大学) (6.2節)
- 新 誠一 (東京大学) (7.3節)
- 瀬古沢照治 (日立製作所) (2.3節)
- 高瀬國克 (電気通信大学) (6.3節)
- 高橋亮一 (大阪大学) (2.1節)
- 田坂修二 (名古屋工業大学) (4.2節)
- 藤井真理子 (東京大学) (7.5節)
- 船橋誠壽 (日立製作所) (2.3節)
- 細江繁幸 (名古屋大学、理化学研究所) (4.3節)
- 前川明寛 (三菱重工業) (2.5節)
- 村瀬治比古 (大阪府立大学) (5.3節)
- 羅 志偉 (理化学研究所) (4.3節)

## 会議開催記録

### 第18期 自動制御研究連絡委員会

- 第1回委員会： 平成12年12月21日
- 第2回委員会： 平成13年 3月21日
- 第3回委員会： 平成13年 5月16日
- 第4回委員会： 平成13年 9月26日
- 第5回委員会： 平成13年12月19日
- 第6回委員会： 平成14年 4月22日
- 第7回委員会： 平成14年 9月13日
- 第8回委員会： 平成14年12月16日
- 第9回委員会： 平成15年 5月26日

第 18 期 工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会

- 第 1 回委員会： 平成 12 年 12 月 21 日
- 第 2 回委員会： 平成 13 年 3 月 21 日
- 第 3 回委員会： 平成 13 年 5 月 16 日
- 第 4 回委員会： 平成 13 年 9 月 26 日
- 第 5 回委員会： 平成 13 年 12 月 19 日
- 第 6 回委員会： 平成 14 年 4 月 22 日
- 第 7 回委員会： 平成 14 年 9 月 13 日
- 第 8 回委員会： 平成 14 年 12 月 16 日
- 第 9 回委員会： 平成 15 年 5 月 26 日

第 19 期 自動制御研究連絡委員会

- 第 1 回委員会： 平成 15 年 12 月 12 日
- 第 2 回委員会： 平成 16 年 3 月 15 日
- 第 3 回委員会： 平成 16 年 6 月 25 日
- 第 4 回委員会： 平成 16 年 10 月 7 日
- 第 5 回委員会： 平成 17 年 1 月 18 日
- 第 6 回委員会： 平成 17 年 4 月 1 日

第 19 期 工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会

- 第 1 回委員会： 平成 15 年 12 月 12 日
- 第 2 回委員会： 平成 16 年 3 月 15 日
- 第 3 回委員会： 平成 16 年 6 月 25 日
- 第 4 回委員会： 平成 17 年 1 月 18 日
- 第 5 回委員会： 平成 17 年 4 月 1 日

## 要 旨

### 1 報告の名称

キーテクノロジーとしての制御工学      これまでの貢献とこれからの展開

### 2 報告の内容

#### (1) 作成の背景

制御工学は、鉄鋼、化学、電機、自動車、重機械などの個別分野を越えて、あらゆる産業分野に必要な技術であり、学問である。これまでに、製品の精度向上、省エネルギー、製造工程の歩留まり率や速度の向上などに大きな役割を果たしてきた。さらに、ビル、橋梁、列車の振動抑制と安全性向上、航空機、船舶、人工衛星の姿勢制御等に効果を上げてきた。今後は、環境・エネルギー問題の解決による持続的社会的の実現、福祉や医療、娯楽、防災への応用により、人々の生活を豊かにすることに陰に陽に貢献することが期待される。この時期に、制御工学のこれまでの貢献を整理し、これからの展開を展望する。世界のトップレベルにある日本の制御工学が、これからもキーテクノロジーであることを認識し、分野横断的に更に発展させるために、何をなすべきか考察することが必要である。

#### (2) 現状及び問題点

制御工学は、1950年代から急速に発展し、様々な産業分野に浸透していった。関連する計測工学とともにその重要性が認識され、1960年代には多くの大学に計測や制御を専門とする学科や研究施設が設置され、そして電気、機械、化学などの個別分野の学科に制御の講座が設けられた。その後、制御工学が成熟するとともに、制御を専門とする学科や研究施設はシステム工学や情報工学等に転進していった。また、各個別分野における制御は、分野横断的な元々の性格が減じて、その分野に特化する傾向がある。それらの結果、産業界においては、技術とともに高度に発達した制御理論を理解している技術者が少なくなっている。日本の製造技術が世界をリードしてきた一翼を担ってきた制御技術が弱体化する恐れがあり、継続的能力開発を含めた人材育成に力を入れる必要がある。

#### (3) 改善策、提言等の内容

21世紀の持続的社会的の実現や人々の生活に役立つためには、いま、制御工学を分野横断的な学問として再認識し、キーテクノロジーとしてより高度な学問体系に発展さ

せることが必要である。そのためには、産業界をはじめ、世の中に広く周知されることが必要である。制御工学の学問発展及び制御技術者の育成のために、以下のことを提言する。

- 1) 本報告で明らかになった制御工学の横断的性格を基礎に、関係する多数の学会が連合して制御工学を横断的学問及び技術として新たな視点から発展させる学術活動を推進するとともに、産業界が積極的に参画、支援する体制を確立する。
- 2) 技術士の部門として、制御工学とそれに関連する計測やシステム統合技術等からなる領域を設定するとともに、大学、産業界、学会が協力して、技術者の養成及び継続的能力開発による高度専門人材の育成を組織的に行う体制を確立する。

## 目 次

第1章 緒言	1
第2章 制御工学のこれまでの貢献	3
2.1 鉄鋼業	3
2.2 化学工業	6
2.3 電機工業	11
2.4 自動車工業	15
2.5 重機械工業	20
第3章 先端技術における制御工学	24
3.1 産業、医療、福祉、介護、災害防止・救助、家庭、娯楽におけるロボット	24
3.2 自動車における安全性向上、省エネルギー、有害物質排出削減	37
第4章 科学技術重点4分野と制御工学	47
4.1 環境分野における制御工学	47
4.2 情報・通信分野における制御工学	55
4.3 ライフサイエンス分野における制御工学	62
4.4 ナノテクノロジー・材料分野における制御工学	69
第5章 制御工学への期待	75
5.1 知的社会基盤構築	75
5.2 金融工学	79
5.3 食糧生産	83
5.4 地雷探査	90
第6章 制御工学による人類と社会の将来	96
6.1 制御工学の変遷と未来への展開	96
6.2 制御工学の活躍と生活と文化への影響	100
6.3 制御工学の人類への貢献	105
第7章 制御工学の自己変革と可能性	110
7.1 制御工学の拡がり	110
7.2 オートメーションの進化	112
7.3 大規模複雑系への挑戦 - 計算機技術との融合	113
7.4 生物学の世紀に向けて	115
7.5 経済学と制御	117
第8章 結言と提言	120

# 第1章

## 緒言

制御工学とは、システムのダイナミクスの本質を把握し、その解析・設計のためのモデリングと制御の理論と技術を体系的に扱う学問である。したがって、工学で扱うシステムのみならず、経済システム、社会システムなども対象である。電気工学、機械工学、化学工学などの個別分野の学問を縦系と考えると、横系の役割を果たす横断的学問の一つである。この意味で情報工学やシステム工学などと同様の位置付けにあり、それらと連携して発展してきた。

その制御工学について、Lund大学のAstrom教授が述べている「制御は Hidden Technology である」ということは、制御工学者のほとんどの認識であった。それに対して、2002年のスペインでの国際自動制御連盟（IFAC）の総会で「制御を Hidden Technology から Visible Technology へ」という考え方を主催者が多くの機会に主張した。いわゆる先端科学技術と言われるものが、制御工学なしには成り立たないことや、制御工学の研究者が、情報技術を含む他の多くの分野の発展に貢献していることは制御技術者の常識であるが、一般の人はいうに及ばず、他の工学研究者・技術者さえ認識していない。本報告は、制御工学者以外の人に、制御工学のこれまでの貢献と、その考え方の有用性を認識してもらい、持続的社会実現のために、学問分野及び産業として制御工学の更なる発展が必要なことを指摘するものである。

目的を満たすシステムを、要素を結合して構成する問題を設計問題と考える。このような設計問題としての工学の基礎の一つが制御工学であることを、日本学術会議第15期自動制御研究連絡委員会は平成6年に対外報告「基幹工学としての自動制御 その将来像と教育のあり方」として発表した。その中で、制御の本質が、人間の制御性能を代行させる方法やメカニズムを生み出す工学、動的な特性を人為的に改善することにより、あるがままよりは人間にとって都合が良いシステム、人間と調和したシステムになるようにする工学として制御工学が位置づけられ、設計を目的とする工学を知の体系として確立するための基幹として制御技術が考えられなければならないことが述べられた。

米国においても、米国応用数理学会(SIAM)が1988年に「Future Directions in Control Theory」と題した報告書を出した。その中で、制御はすべての工学の基礎であり、この進歩なくして、工学の発展がないことが述べられている。この報告書を補完するものが、カルフォルニア工科大学のMurray教授を委員長として出された。これは、日本



と同様、米国でも、情報、生命、ナノ技術、環境が重点的な研究の分野と考えられているが、これらの発展には、制御の進歩が不可欠であることを述べている。

本報告は、第15期自動制御研究連絡委員会のものの発展版として、第2期科学技術基本計画の重点4分野であるライフサイエンス、情報・通信、環境、ナノテクノロジー・材料分野に限らず、すべての工学の分野は制御工学の進歩と貢献なしに発展できないこと、そして21世紀の社会の持続的発展のために制御工学の貢献が必要であることを述べるものである。構成は以下のとおりである。

まず、第2章で、鉄鋼業、化学工業、電機工業、自動車工業、重機械工業などの製造業におけるこれまでの貢献を振り返り、第3章で、ロボットと自動車を例として、現在の先端技術における制御工学の大きな役割を述べる。次に、第4章で、第2期科学技術基本計画における重点4分野であるライフサイエンス、情報・通信、環境、ナノテクノロジー・材料分野における制御工学が必要な例を示し、第5章で、これからの問題として、知的社会基盤工学、金融工学、食糧生産、地雷探査等における制御工学への期待を述べる。さらに、第6章で、人類と社会のためには制御工学がどうあるべきかを議論し、第7章で、制御工学の更なる可能性を述べる。最後に、第8章で、持続的社会的実現や人々の生活に役立つために必要な制御工学の学問発展並びに人材育成のための提言を行う。

## 第2章

### 制御工学のこれまでの貢献

本章では、戦後の日本経済の成長において重要な貢献をした製造業における制御技術の果たしてきた役割を回顧的に展望することを目的とする。具体的には、我が国の代表的な製造業である鉄鋼業、化学工業、電機工業、自動車工業、重機械工業を取り上げ、それぞれの分野において制御技術、システム技術がコスト削減、製品の高品質化によって、長期にわたり日本の製造業の競争力を維持して行くうえで多くの貢献をしたことを紹介し、更に今後ともそのような技術が必要であることを強調する。

#### 2.1 鉄鋼業

日本の鉄鋼業は、戦後臨海一貫製鉄所の建設を契機に急速な発展を見せ、設備の大型化・高速化が進められた。この結果、1973年度には年間粗鋼生産量1億2000万トンに達した。しかしながら、1970年代のオイルショックを契機として量的拡大の時代は終わり、省エネルギー及び生産性向上・歩留向上によるコスト競争力強化並びに需要家ニーズの高度化・厳格化・短納期化の要求に応える製品品質競争力強化の時代へと移行した。この過程で制御技術は大きな貢献を果たした。ここでは、薄鋼板の製造プロセスとそれに関連した制御技術について概略を示す。

##### 2.1.1 製鉄プロセスにおける制御

鉄鋼プロセスでは、鉄鉱石から高温に溶けた銑鉄(溶銑)が製造される。鉄鉱石は石灰石などの副原料とともに、焼結機で焼成され、粒塊の強度・粒度・成分が均一化され高炉装入に適した焼結鉱になる。一方、原料炭はコークス炉で乾留され、高炉の操業が能率よく行われるのに適した潰裂強度・粒度の塊状のコークスにされる。高炉には、焼結鉱とコークスを交互に装入し、炉内に約1200℃の熱風を吹き込んで鉄鉱石を還元・熔融し、4～5%の炭素と珪素・マンガン・燐・硫黄などの不純物元素を含む熔融状態の銑鉄をつくる。

高炉の炉内は気・液・固3相の流動と固・液の相変化を伴う酸化・還元プロセスであり、極めて複雑な現象であるため数式モデル化が困難な代表的プロセスの一つである。しかも、その内部は温度が2千数百度、圧力が4 kg/cm<sup>2</sup>程度と高温高压であり、かつ周囲が耐火煉瓦と鉄皮で覆われているため計測も容易ではない。このような状況

にも関わらず、高炉には炉頂部より炉壁・炉底に至るまで、半径方向、円周方向並びに垂直方向に様々なセンサーが設置されており、高炉操業安定化のための中長期的監視と、溶銑温度や溶銑成分を適正にする炉熱制御がなされている。

炉頂部から炉内に装入された鉄鉱石とコークスは降下するに従い固体から液体に相変化する。融着帯は鉄鉱石が溶解して固体から液体へ変わる中間状態でガスの流れが悪く通気抵抗が大きくなる。この融着帯の形状・位置がガス流れ分布に影響し高炉の生産性・操業安定性に大きく関わってくるため、融着帯形状・ガス流れ分布を適正に保持する必要がある。炉況監視としては、計測されたデータから現在の状況が過去の代表パターンのどれに近いかを判断し、装入原料層厚分布の適正化などのアクションをとる方法や、熟練オペレータの思考過程を知識ベースとして、検出情報からアクションに至るまでの判断をルール化したエキスパートシステムなど知識工学的手法が数多く適用されている。

溶銑温度については、低すぎると溶銑・スラグの流動性が低下するため安定操業が難しくなり、高すぎるとガスの体積膨張などにより通気性が阻害されるとともに、燃料使用量の上昇につながる。また、溶銑温度が変動すればシリコンや硫黄などの溶銑成分のばらつきも大きくなり、次工程である製鋼プロセスに大きな外乱を与えることになるので、溶銑温度制御により溶銑温度の安定化を図る。

この他、製鉄プロセスではコークス炉の排熱回収制御や熱風炉の燃料投入量制御により消費エネルギーの低減が図られている。

### 2.1.2 製鋼プロセスにおける制御

高炉で出銑された溶銑は、硫黄、珪素、燐などの不純物を除去するため溶銑予備処理されてから転炉に注がれる。転炉では、酸素を吹き込むことにより炭素を取り除く脱炭処理をして溶融状態の鋼に変化させ、更に合金鉄などを添加して所望の組成・温度の溶融状態の溶鋼にする。この後、真空脱ガス装置における2次精錬により水素、窒素、酸素などの脱ガス、介在物除去及び脱硫、脱炭などの最終的な成分調整がなされ高純度鋼・高潔度鋼になる。

連続鋳造機では、溶鋼をタンディッシュ、浸漬ノズルを通じて鋳型に注入する。この鋳型を冷却(1次冷却)することにより、溶鋼は外周から凝固して凝固殻(シェル)を形成する。これをピンチロールにより引き抜きつつ、更に水冷ゾーンを通過させて冷却(2次冷却)し凝固殻を成長させ、中間素材として厚さ220~300mmのスラブと呼ばれる鋼片を製造する。この凝固過程で鋼の延性が小さくなる脆化温度域を通過し、表面割れや内部割れなどの欠陥発生の原因となり得るため、鋼の脆化領域を回避するためには2次冷却制御が重要である。

連続鋳造機では、溶鋼の酸化防止と鋳型と溶鋼の潤滑を目的としてCaO、SiO<sub>2</sub>を主成

分とするパウダーが散布されている。鋳型内の溶鋼レベルが変動すると溶鋼面上のパウダーや不純物が溶鋼中に巻き込まれ、それが最終製品における欠陥の要因となるため、鋳型内の溶鋼レベルを安定化することは非常に重要である。

溶鋼レベル制御系は、渦流レベル計で検出した溶鋼レベルに基づきスライディングゲートの開度を操作して鋳型内への溶鋼流入量を調整する液面制御系である。1500以上の高温流体である溶鋼が対象であるため様々な外乱が存在し、湯面レベル変動抑制のため各種の制御手法が適用されている。例えば、溶鋼の波立ちによるモデル化誤差あるいはバルジング(鋳型直下での凝固シェルの膨張収縮変動)による周期性変動へのロバスト安定化を目的としたH<sub>2</sub>制御、ノズル詰りや機械的ガタによる流量特性変動に対応するための適応制御、ノズル詰まりの剥離によるステップ状の流量変化を外乱オブザーバーにより推定しノズル開度をフィードフォワード修正する制御などがある。

### 2.1.3 圧延プロセスにおける制御

ホットストリップミルでは、鋼片を1200 程度に加熱、粗圧延機で30～50mmの粗厚に圧延した後、6～7スタンドの仕上圧延機にて最高約20m/sの速度で1.2～25.4mmの製品厚に圧延、冷却ゾーンで600～500 前後に冷却してコイル状に巻取る。熱延されたコイルはそのまま製品になるものもあるが、多くは鋼板表面に発生した酸化皮膜を除去するために酸洗した後、冷延・焼鈍・表面処理されて冷延鋼板あるいは表面処理鋼板として出荷される。コールドストリップミルでは、圧延機の入口でコイルを接合し、0.15～3.2mmの製品板厚まで、常温で連続的にタンデムミルで圧延する。圧延による残留応力を除去するために、加熱 - 均熱 - 冷却 - 過時効という一連の熱処理を連続焼鈍ラインで行い、表面処理ラインでは鋼板のさび発生を防止するため表面に亜鉛をめっきする。

以下では、圧延プロセスにおける制御について以下に述べる。

#### (1) 熱延スケジュールフリー圧延

ホットストリップミルは薄板製造における基幹ミルであり、高品質、多品種・小ロット・短納期化が進む状況にあっても、低コスト・高歩留り・高稼働率の要求が極めて強い。連続加熱炉で鋼片を圧延に適した温度に加熱するために消費する燃料が鋼材1トン当たり約40～50万キロカロリー必要であったものが、現在では20万キロカロリー程度と大幅に改善している。これは連続鋳造機で鋳込まれた直後の鋼片をそのまま加熱炉に装入するホットチャージ(Hot Charge)あるいはダイレクトチャージ(Direct Charge)といわれる操業が可能になったことによる。

この場合、加熱炉の操業は熱片と冷片を同時に加熱するなど複雑を極め、これに対応できる加熱炉の燃焼制御技術の開発が必要とされた。また、仕上げ圧延機での圧延を円滑かつ精度良く進めるために、従来は製品の厚みや幅、材質により圧延の順序や

組合せを制約するスケジュール制約がなされていた。熱片を効率よく加熱炉に装入するためには、スケジュール制約なく圧延できるスケジュールフリー圧延が要請される。このため、圧延荷重やロールの撓みを予測し、ロール開度やロール周速度、ロールベンドング装置などの初期設定を精度良く行う制御技術が開発された。この結果、加熱炉へのスラブ装入順の制約がなくなるため連続鋳造機で鋳込まれた直後の熱片を加熱炉入側で滞留させて材料温度を低下させることがなくなり、熱片装入温度上昇・熱片比率拡大ができるようになり燃料消費量の大幅削減が実現できた。

### (2) タンデムミルの板厚・張力制御

ホットストリップミルの仕上げ圧延機やコールドストリップミルのタンデム圧延機では、スタンド間張力を介して全てのスタンドが相互に干渉を持って結合されており、板厚を制御するためにロール開度を操作すれば必然的にスタンド間張力が変動し、これが板厚制御の外乱となるばかりでなく、板幅の変動、更には圧延トラブルをも誘発することにもなる。このようにタンデムミルは、板厚とスタンド間張力は同時に制御しなければならない多変数系であり、かつ、製品の寸法・形状を決定する重要なプロセスであるため、最適レギュレータ、外乱オブザーバー、H 制御他の先進的な制御技術が数多く適用されて効果を発揮している。

### (3) 冷延完全連続化

コールドストリップミルにおける完全連続圧延は、制御技術なくしては実現できないものである。従来のコールドタンデムミルは、母材コイル1本毎に板先端を通板した上で圧延を行い、1本分の圧延が終了すると板尾端をミルから抜いていた。ところが近年、生産性や製品品質の阻害要因となる板先端通板や板尾端尻抜をなくすため、圧延機の入側で先行コイルと後続コイルを接合し、圧延機の出側で接合点を切断することにより、連続的に圧延を行う「完全連続式圧延」が主流となっている。これを実現するためには、ロール開度やロール周速度といった操作量を、先行コイルの値から後続コイルの設定値へ、スタンド間張力等の変動が極力抑制できるようにする走間設定変更制御が不可欠となっている。

以上に概観したように、日本の鉄鋼業は1960年代以降いち早く制御技術を取り入れて製造プロセスの自動化を進め、製鉄から製鋼・圧延・表面処理に至る全ての鉄鋼製造プロセスで多大な効果を上げ、制御技術が活用されていない鉄鋼製造プロセスは考えられない状況となっている。この結果、日本の鉄鋼業は生産性、品質、歩留やエネルギー原単位などの生産諸元などで世界をリードしている。

## 2.2 化学工業

図1のような今日のコンピュータを装備した計装制御システムによるプラント運転は、図2のように製造プラントの傍らで温度、圧力、流量などの測定計器を監視しながら

ら弁やコックの開閉で運転条件を調節した時代と較べると隔世の感がある[1]。



図 1 最近の計器室

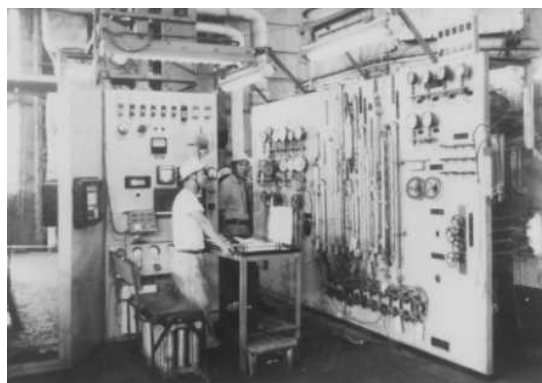


図 2 昭和 20 年代の計器室

この間の化学産業における制御技術の進歩は著しく、図 3 に示すように、単一変数の制御からマルチループ制御、多変数制御へと発展し、温度、圧力、流量などの工学変数の制御だけではなく、コストや利益などの経済的な変数も制御変数として取り扱えるようになった[2]。そして、温度、圧力、流量などの単一変数の制御から、反応器や蒸留塔などのユニットプロセス制御、アンモニアやエチレンプラントなどのプラントワイド制御、原料調達や販売・物流などの企業活動全体の制御、更に複数企業に跨るサプライチェーンの制御へと対象プロセスを広げつつある。

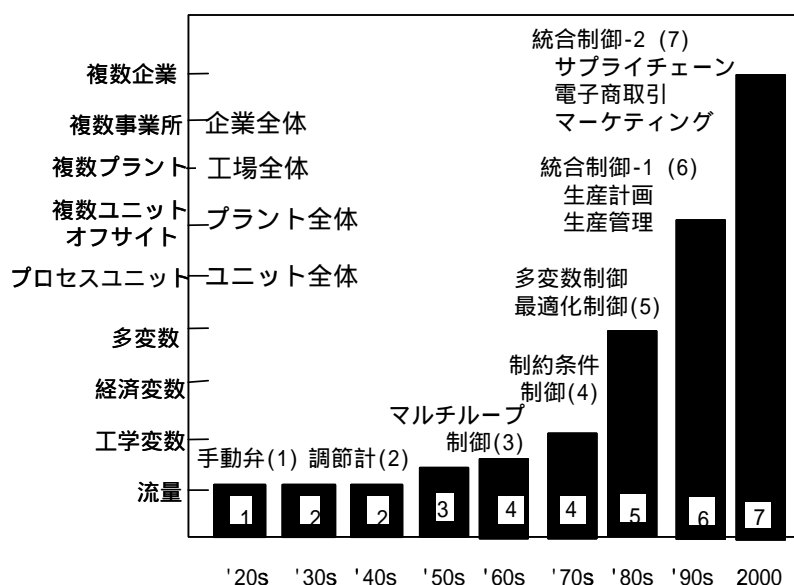


図 3 プロセス制御技術の歩み

このように、プロセス制御技術は日本の化学産業の発展に大きな貢献をし、今後ま

すます重要な役割を果たすことが期待されている。以下、今日までの歩みを追って具体的にこれらについて述べる。

### 2.2.1 労働集約型産業からの脱却と制御技術

図2の写真に見られるように、プロセス制御は、マノメータや圧力ゲージと手動弁を現地に設置された計器盤に集めて、運転員が計測値を見ながら記録をとり手動弁の開度を調整することから始まった。このような集中力を要する作業を長時間継続することは人間にとっては過酷な作業であり、これらの手動操作の自動化がまず実行された。差圧や圧力などの信号発信器、指示計、記録計、調節計にはフィードバック機能を有した信号増幅機構やサーボ機構、PID演算機構が使われた。このような自動化は、省力化というだけではなく、化学産業における労働の質を大きく変え、労働集約型産業から装置産業への脱皮を可能ならしめた。そして、安定した運転の実現により、安全性と品質の向上、生産コストの低減に大きな効果をもたらした。

### 2.2.2 プラントの統合化、大型化、複合化と制御技術

1958年に年産1万4千トンから始まった日本のエチレン生産量が1973年には年産400万トンを突破した。このように、日本の化学産業は石油化学を中心に短期間に国際競争力をもつ産業として発展したが、これらを可能ならしめたのは、統合化、大型化、複合化である。例えば、アンモニアプラントでは原料ガスの変成・精製・アンモニア合成の三つのプロセスが一つのプラントとして統合されて大型化された。また、ナフサ分解を中心とした石油化学のプラントでは、統合化・大型化にとどまらず、各プラントでの副生物や副生エネルギーを相互に有効に活用するため企業の枠を超えて複合化され、コンビナートとして一体運営された。

これらの統合化、大型化、複合化されたプラント群の運転を支えたのが制御技術である。伝送距離が300m程度に制約されていた空気圧信号伝送方式に代わる電流信号伝送方式によって、運転の広域化が可能となった。センサーも電子化されて計測精度が向上し、制御演算の電子化によってマルチループ制御のような複雑な制御方式が容易に実現できるようになり、プラント運転レベルも格段に向上した。また、統合化・複合化されたプラント群を管理するための制御用コンピュータも実用化され、運転管理技術も向上した。このような制御技術の進歩により、プラント群の安定した連続運転が実現し、統合化、大型化、複合化のメリットを享受することができた。

### 2.2.3 環境・安全、省資源・省エネルギーと制御技術

1960年代後半以降工場からの排出物による公害が顕在化した。また、1970年代に入って化学工場の保安事故が多発した。さらに、1973年には第一次石油ショックが、続

いて1978年には第二次石油ショックが起こって原料・エネルギー価格が一時期には10倍以上に高騰し、化学産業は、環境・安全面、省資源・省エネルギーと広範囲にわたって既存技術の見直しを迫られることになった。

まず、環境面では既存プロセスの見直しと併せ、多くの環境分析計やプロセス管理用のインライン分析計器が開発された。

安全面では、事故が設備やヒューマンエラーに起因することが多かったので、信号処理技術を活用した設備診断技術や、プロセスの動的モデルと制御システムを組み合わせた運転員トレーニング用のシミュレータが開発された。トレーニングシミュレータの開発は、プロセスモデリング技術とシミュレーション技術を大きく発展させた。

省資源・省エネルギー面では、熱回収の強化などによりプロセスが複雑になり制御ループ間での干渉が増大したことや、安価原料の使用にともない原料性状の変動などの制御系への外乱が増大したことなどから、モデル予測制御などの多変数制御や最適化制御が実用化された。また不等式制約条件を超えないようにするための制約制御も実用化された。半導体技術を利用した高精度センサーも開発されて精度の高い制御が可能となり、プロセス性能を限界まで発揮させる運転が可能となった。

図4に示すように、日本のエチレン生産量が500万tを突破して増勢に転じたのは1988年であり、日本の石油化学産業にとって1970年代から1980年代は長い苦しい時期であったが<sup>1</sup>、このような苦しい状況に対応することが制御技術を大きく発展させた。

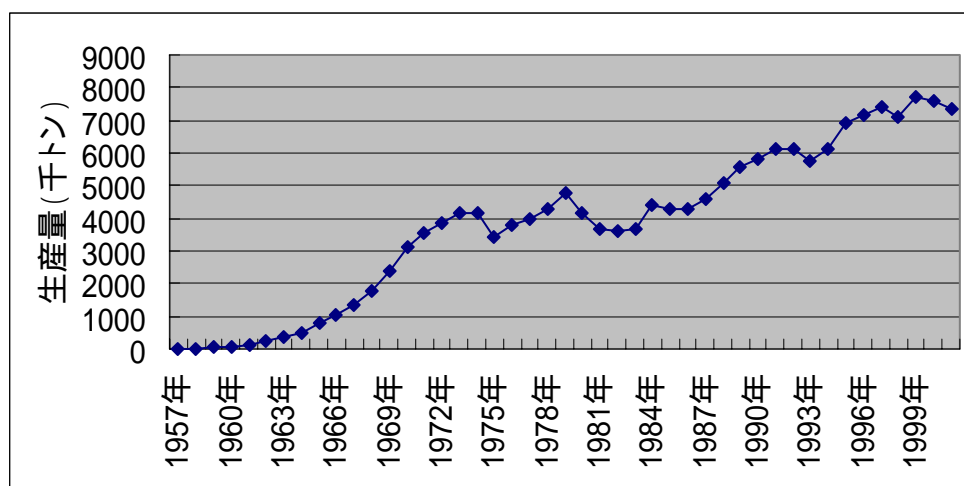


図4 日本のエチレン生産量の推移 [3]

#### 2.2.4 変種変量生産と制御技術

高度成長時代の終了により、供給主導の大量生産から需要の変動に合わせた生産

<sup>1</sup> 1983年に特定産業構造改善臨時措置法(産構法)が公布・施行された。エチレン、ポリオレフィンなどは指定業種となり、1988年まで同法のもとで設備処理等構造改善に取り組んだ。



変量生産 に移行せざるを得なくなった。また、生活レベルが向上し豊かになると多様性が求められようになり、需要を創成するために多くの品種を生産する方式  
変種生産 が重要になってきた。

このようなフレキシブルな生産に対応できる制御システムとして、マイクロプロセッサを内蔵したDCS (Distributed Control System) が大きな役割を果たしている。この制御システムでは、それまでのハードウェアによる計測データの処理、制御アルゴリズム、出力アルゴリズムやマンマシンインターフェースがソフトウェア化されており、同一プラントで多様な運転制御を行わねばならない変種変量生産プラントの自動化には好都合である。

近年、バッチプロセスを対象に、レシピをベースとし、手順制御とレギュレタリ制御をハイブリッド化した新しい制御システムに関する理論や構築技術に大きな発展がみられる。このような技術は、研究開発から生産に至る過程のシステム化と期間の短縮に大きく貢献すると期待される[4-5]。

#### 2.2.5 コンビナートの統合管理、サプライチェーンマネジメントと制御技術

反応器における最大転化率や蒸留塔におけるエネルギー使用量最小化などのユニットプロセスにはじまった最適化制御技術は、モデリング技術の向上と計算機の飛躍的な性能向上によりアンモニアやエチレンプラントなどのプラント全体の経済的な利益を最大にする最適化制御に発展した[6]。

コンビナート内での製品やエネルギーのバランスで常に何かが不足状態にあった高度成長時代が終了すると、個別プラントの最適化より工場全体の製品やエネルギーのバランスを考慮した最適化や原材料の調達と製品物流を考慮した企業レベルでのサプライチェーンの最適化が重要となった。

また、企業活動全体の計画・管理業務を効率的に実施するためのERP (Enterprise Resource Planning) システムが普及しはじめると、運転制御システムを中核としERPシステムと連携するMES (Manufacturing Execution System) も重要になった[7]。

さらに通信技術の発展により、企業間EDI (Electric Data Exchange) を活用し、バリューチェーンを構成する企業が協力して顧客満足の視点から企業の枠を超えて全体最適を追及することも先進企業を中心に進められている[8]。

#### 2.2.6 おわりに

このように、生産の場で人間の運転操作機能を支援し代替することから出発した制御技術が、物理的な世界だけに止まらず、今日では企業活動や社会活動における意思決定の支援や代替に使われ始めている。このような発展は、制御工学をバックグラウンドにもつ研究者や技術者が、最新の制御理論や半導体、コンピュータ、通信技術など

の周辺技術の進歩を積極的に取り込みつつ、化学産業に適した制御技術をつくりあげていったことによる。

しかし、今後の企業や産業の枠を超えたサプライチェーンマネジメントや工場経営、企業経営、社会活動における意思決定への制御工学の適用を考えると、制御理論と各工学分野に分かれた制御工学という形態による大学などの高等教育機関における従来の教育・研究体制から脱却し、横断技術としての制御理論と固有技術の接点としての各工学分野に分かれた制御工学とを統合して新しい制御工学を創生する必要があると考えられる。そして更に、このような新しい制御工学が将来の産業技術基盤と期待されているナノテクノロジーやバイオテクノロジーなどの新しい分野へ挑戦することにより、我が国産業の新たな発展に大きな貢献をすることを期待したい。

## 2.3 電機工業

### 2.3.1 電機工業における制御技術の概要

電機工業に関する産業は二つのルーツをもっている。一つは、モータや発電機など電気機械を出発点として事業展開がなされてきたものであり、他の一つは、通信機器など電子機械を母体として発展してきたものである。家電機器も同様な系譜を持っており白物家電機器と音響映像機器との二つの流れがある。ITS (Intelligent Transport Systems)の中核となる自動車搭載機器も、エンジン制御、電動力制御、自動走行などとナビゲーション支援機器という流れがある。このように電機工業はきわめて多様な製品分野を持つが、この中で、制御技術が活用されている代表的な分野を表1にまとめて示す。

エネルギーや物質を扱う領域では様々な制御応用が実現されてきている。電力分野では、火力、原子力などの発電設備やこれらが送電線で連携したグリッドにおいて、設備の起動停止の迅速化、グリッド全体の安定運用などのために制御技術は決定的な役割を果たしてきている。同じように、交通設備、上下水などの公共設備、ビル設備、さらには、鉄鋼圧延機や自動倉庫などの生産物流設備においても、それぞれの設備の運用や設備群の管制のために制御技術が中心的な役割を果たしてきた。これらの設備制御や管制のための計算制御及び計装機器も重要な製品分野を形成しており、ここでは制御水準の迅速な高品質化のために制御論理の構築を支援する機能が不可欠となっている[9-10]。これらの製品技術は制御性能に関して世界的に先導するものであり、今後、中国を中心とする東アジアの産業社会基盤の形成に貢献するものとして展開が期待されている。

表1 電機工業で制御技術が活用されている代表的な分野

領域	分野	制御技術の活用例
エネルギー・物質	電力設備(発電、送配電)と管制システム	発電設備自動運転、電力グリッド安定化
	交通設備(鉄道車両、電力)と管制システム	車両自動運転、高密度輸送
	上下水・河川・道路などの公共設備(ポンプ、ファン、ゲートなど)と管制システム	処理場・設備自動運転、設備群連携運転
	ビル設備(エレベータ、空調機器)と管制システム	エレベータ・機器自動運転、機器群連携運転
	生産物流設備(圧延機、化学・バイオプラント、半導体製造装置、自動倉庫)	設備自動運転、製造品種に対する制御論理調節機能
	計算制御および計装機器	生産計画・制御論理構築支援機能
情報通信	情報機器と情報システム(金融、製造、流通など)	ハードディスク装置制御、金融工学・サプライチェーン管理などのアプリケーション
	情報通信ネットワーク管理・制御システム	情報機器・ネットワーク自動運転
民生機器	家電機器	設定値制御、ホームネットワークによる連携省エネ運転
	自動車搭載機器(制御機器、ナビゲーション機器)	空燃比精密制御、電動力制御、位置推定、ルート探索

制御技術は情報通信機器や情報システムに対して寄与し始めている。情報通信機器群が社会の基盤に位置づけられるようになって、激しく変動する利用環境下でのその使命遵守が強く求められるようになり、制御技術への注目が高まっている。IBM社が提唱するAutonomic Computing [11] に見られるように、米国の先導的な企業は情報通信分野への制御技術の導入を指向し始めている。我が国でも、インターネット環境下でのトラフィックや情報アクセスを制御するための技術が既に実用化されている[12]。情報通信システムのアプリケーションとして、金融分野では資産運用やトレーディングのための金融指標の予測や最適化技術が利用されている[13]。また、製造流通分野ではサプライチェーン管理のための需要予測や最適製造流通計画にも制御技術が活用されている[14]。これらのアプリケーション分野は、現状、米国のベンチャー企業が優位な状況にあるが、我が国固有の実体経済を踏まえた木目細やかな論理展開は米国の先行的なアプローチとは異なった貢献をすると期待される。一方、情報通信の世界では、今後、ストレージ機能がシステム全体で大きな役割を果たすと考えられている。

その根幹であるハードディスク装置については、既に我が国は、ビジネス、技術の両面で世界の先導的な地位にある。

家電分野では、ファジィ・ニューロ制御に代表されるようにその制御の木目細やかさにおいて世界的な水準を堅持してきたが、これらは多くの場合、設定値制御の適用の範囲にとどまっていた。しかし、今後、これらがネットワークを形成するにしたがって、家庭内でリアルタイムに各機器が連携する省エネルギー制御へと進展しようとしている。

### 2.3.2 直接制御の事例：ハードディスク装置 [15]

ハードディスク装置(HDD: Hard Disk Drive)の世界市場は、2000年で、台数で約2億台、出荷金額で約3兆円の規模であるが、2000年からは音響映像機器やカーナビゲーション機器への適用が始まっており、一層大きな市場へと成長すると期待されている。これは、ここ5年間でHDDの記録密度は年100%の成長率を示し、DVDなどの光ディスク装置やDRAMなどの半導体記憶装置をはるかに上回っていることによっている。この記録密度の向上は、ビット密度とトラフィック密度の向上によってなされるが、このうち、トラフィック密度の向上にはヘッドの位置決め精度の向上が大いに貢献してきた。

図5にHDDにおける位置決め制御系の構成を示す。2.5インチHDDでは、回転中心からヘッドまでの距離が約33.5mmである。先端のヘッドを幅360nmのトラックの中心に正確に位置決めしなくてはならない。この位置決め精度は $\pm 3$ で40nm程度である。これは、東京タワーの先端を0.4mmの精度で位置制御することに等しい。しかも、円板が回転しているのでヘッドは秒速17mの強風下にさらされていることになる。

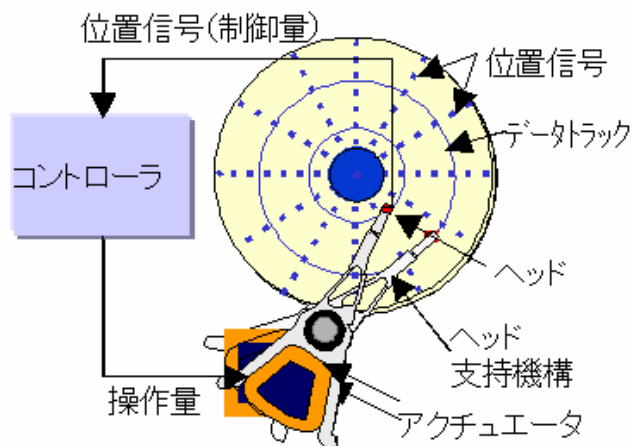


図5 HDDにおける位置決め制御系の構成

位置決め誤差をもたらす要因は、(1)目標トラックの振動(円板振動などを含む)、(2)ヘッドの振動、(3)ヘッドの目標トラックへの追従誤差、などとされており、これらの介入を抑止することが位置決め制御系の課題である。制御量であるヘッド位置はその先端に質量があるとみなし支持機構は数十Hzに固有振動数をもつ粘弾性体として、また、高次の機構共振があるとしてモデル化して制御系が設計されている。制御系はヘッドを目標とするデータトラックに高速移動するシーク制御と移動終了の後に位置を保つフォロイング制御とから構成される。前者のためには、スライディングモード制御、モデル追従型2自由度制御、デッドビート制御、マルチレート制御などの適用が検討され、後者にはH 制御、マルチレート制御、PQ制御などが検討され、制御理論の多くの成果がこれらの課題に用いられている。

1993年頃の位置決め精度は1000nm程度であったのが2003年には数十nmの水準に到達しており、この傾向は今後も継続すると期待されている。この要求に制御技術は応えてゆかなければならない。

### 2.3.3 統括制御の事例：上水道管制システム

人口密度のきわめて高い我が国では、個々人に木目細やかなサービスを提供する技術としてのシステム管制技法が優れた水準にあり、社会基盤の充実を目指す東アジアからは渴望されている。ここでは、上水道を具体的な事例としてその内容を紹介する。上水道事業の使命は、水源で取得した水を浄化処理して配水池まで送水し、更に、配水池から需要家が必要とする量の水を飲料水としての品質を維持しながら供給することである。

給水人口が百万人規模になると、取水場や浄水場は多数あり配水池は数十に及ぶ。電力グリッドでは貯蔵を考慮する必要はないが、取水場から配水池までの水生産グリッドでは貯蔵が重要な要素となっているために考慮すべき変数の数は数千の規模になる。このために、ブロック対角行列の特性を利用した動的問題の効率的求解方法が考案され[16]、また、水生産計画の立案者が抱える多様な制約条件や目標条件を求解に反映できるよう多目的な最適化手法が開発されて[17]、

日々変化する水生産グリッドの設備条件に適合した水生産が可能となった。

一方、配水池から需要家に圧力給水するグリッドは配水管網と呼ばれる。この規模

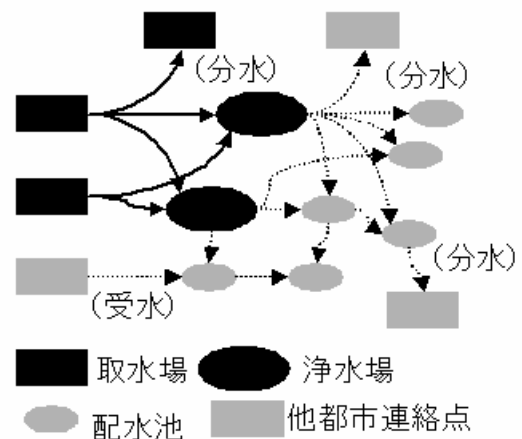


図6 水生産グリッドの構造

は人口が十万人程度の配水エリアにおいてもノード数は数千にのぼる。配水管網の末端圧力を定値化するだけであれば網内の流量と圧力のバランスをとる静的問題ととらえればよいが、末端における残存塩素量など有害物質を管理するには流下遅れを考慮する必要があり動的な問題としてとらえざるをえない。この問題に対する解法も網構造を考慮した計算方法が提案されている[18]。

## 2.4 自動車工業

### 2.4.1 はじめに

現在の自動車には、マイクロコンピュータを使ったシステムが20程度搭載され、多くのセンサーとモータなどのアクチュエータが使われていて、計測と制御の技術無しでは自動車は存在しないと言ってよいほどになっている。しかし、わずか20数年前には、今日の状態は想像もできないことだった。本節では、日本においてマイクロコンピュータを初めて自動車制御に使うプロジェクトに関わった技術者の経験を通して、自動車への制御技術適用に関する開発状況を紹介する。

### 2.4.2 排気規制対応技術の開発競争

1970年代は、73年、75年、78年と段階的に強化されることが決まっていた「排気規制」へ対応するための技術開発競争が盛んに行われた。排気規制に対応する技術はいくつか提案されていたが、排気管に触媒を取り付けて、排気中の有害成分（一酸化炭素：CO、未燃ガソリン成分：HC、窒素酸化物：NO<sub>x</sub>）を無害化する技術（三元触媒システム）が本命視されていた。しかしそのためには、エンジンの燃焼状態を制御する必要があった。当時の代表的な燃料供給装置であった「気化器」では触媒の機能を十分に発揮できるように燃焼状態を制御することができなかつたために、燃料を計量してエンジンに供給する「電子燃料噴射装置」と点火時期を最適時期に設定する「電子点火装置」の開発が行われた。

この排気規制対応技術の開発競争で得られた技術・ノウハウを基に、燃焼制御以外の分野への電子制御システムの適用が拡大し、今日の「計測と制御の技術なしでは自動車は存在しない」という状況に至っている。

### 2.4.3 三元触媒システムの構成

当時開発されたエンジン制御システムの構成図（図7）を説明する。排気を浄化するために「三元触媒」を使ったシステムである。三元触媒の浄化特性は図8に示されるように、空燃比（= 燃焼ガスの空気と燃料の割合）の極狭い範囲で 三つの成分（CO、HC、NO<sub>x</sub>）に対して同時に高い転換率を示している。この空燃比の範囲をすべての運転条件で、かつ10年以上の使用過程にわたって維持しなくてはならないのだが、「気化

器」では実現が難しいものであった。「三元触媒システム」では、排気管に排気中の酸素濃度を測定して空燃比を推定するための「 $O_2$ センサ」を取り付け、その信号を使って空燃比を制御するために燃料噴射弁の開弁時間を計算する(フィードバック制御)。同時に その混合気を最も効率良く燃焼させるために、最適な点火時期を計算する。「 $O_2$ センサ」の他に、「吸入空気量センサ」と「クランク角センサ」がキーになるセンサーとなる。「吸入空気量センサ」は、文字どおりシリンダーに吸入される空気量を測るセンサーだが、このセンサーはシリンダーの上流にあるので、測定された空気が燃焼に使われるまでに時間遅れがある。その遅れを計算によって補償して燃料供給量の計算に使う。「クランク角センサ」は、エンジンの回転速度の測定とピストンの位置を計測するためのセンサーである。

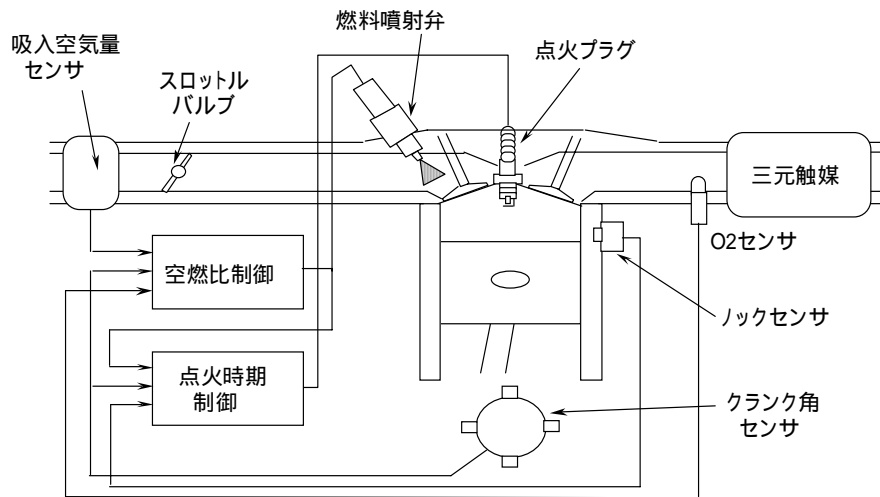


図7 三元触媒システム構成図

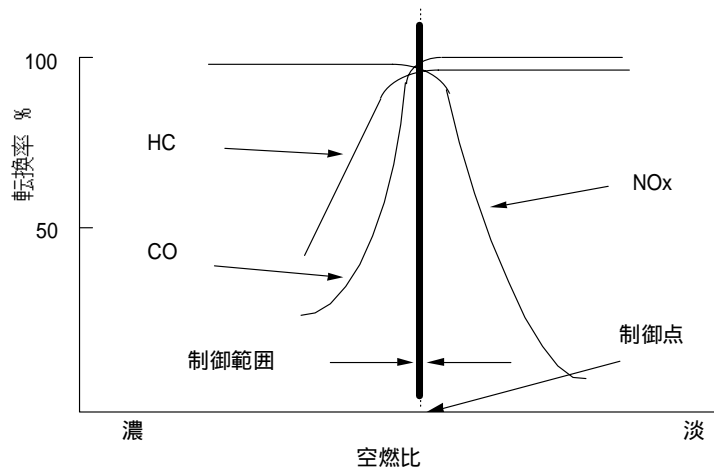


図8 三元触媒の転換特性

制御装置の回路ブロック図が図9である。マイクロコンピュータの周囲に、ノイズフィルタ/増幅レベル変換回路/電圧変換回路/波形成形回路などの入力信号処理回路と出力側にパワー増幅回路があり、プリント基板の使用面積から見たら、ほとんどは入力信号処理回路とパワー増幅回路で占められている。また、マイクロコンピュータの心臓部であるCPU/ROM/RAMの入力側と出力側に、CPUに信号を取り込むための入出力インターフェース回路(アナログ入力部、パルスカウント部、on/off入力部、パルス出力部、デューティ出力部、on/off出力部)が必要になっている。

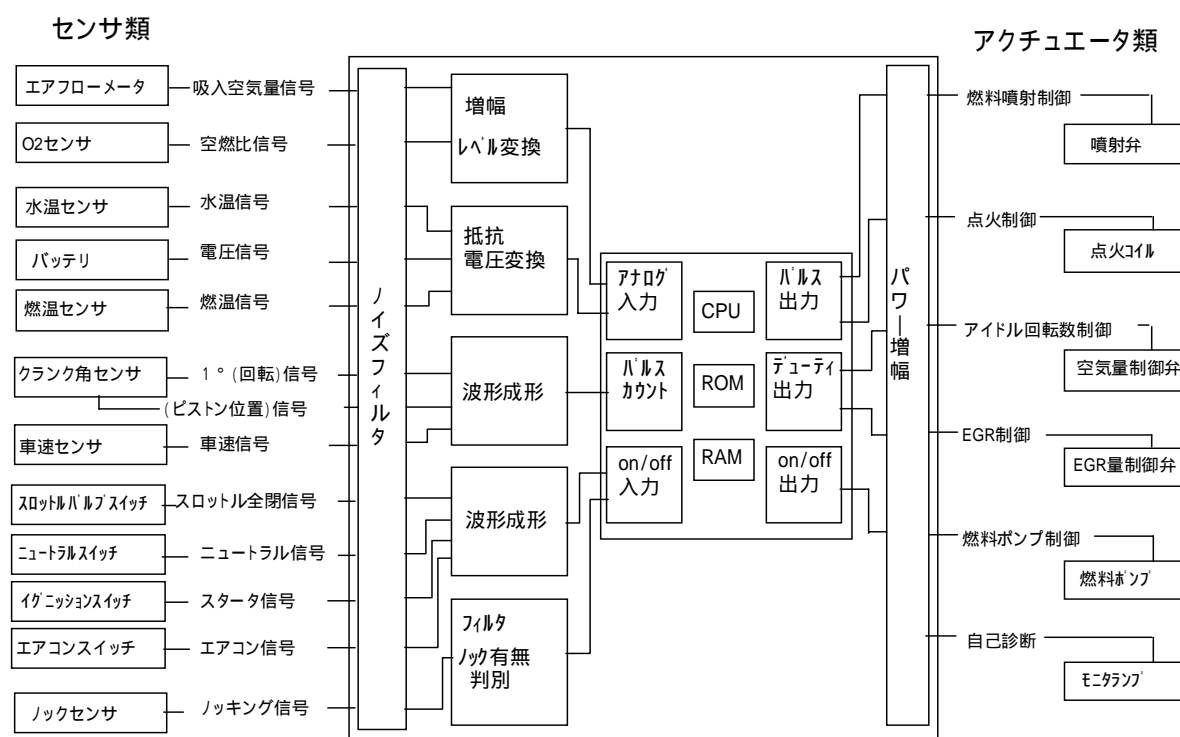


図9 制御回路のブロック図

#### 2.4.4 システム開発を支えた技術開発

マイクロコンピュータを初めて車載装置に使うに当たって、数々の開発を経験した。そもそも、デジタル制御技術でエンジンを制御することからして初めての経験だったので、PDP-11などのミニコンを使ったロジック検討や、デジタルIC(AND、ORなどのゲートIC)を使った実験装置の開発など、デジタル制御の勉強からのスタートだった。

当時のマイクロコンピュータ及びその周辺LSIは、機器組込み型の制御装置に使うことを想定していないので、エンジン制御用の回路設計をすると、マイクロコンピュー



夕の周辺、すなわち入出力信号のインターフェースのための回路が非常に大きくなってしまった。エンジン制御のためには、図3で示した回路ブロック図を参照すると、基本的な信号だけで 入力13本、出力6本であり、また外付けのメモリ（ROM、RAM）のアドレスデコーダも必要になるために、実験用の制御回路の1号機では、CPU 1個、Peripheral LSI 3個、汎用のゲート回路（AND、OR、Decoder など）数10個になった。ノイズフィルタや波形整形回路などの入力信号処理回路 そしてパワー増幅回路も大きな面積を占めているので、約20cm×30cm サイズのプリント基板を3枚使った。1977年の開発チーム発足と同時に、専用の周辺用ASIC（Application Specified IC）の開発を半導体メーカーに依頼し、その年の12月には最初のサンプルができた。

最初の商品化の後、自動車制御に適したマイクロコンピュータ及び周辺用ASICの開発に着手した。この時は、要求仕様書を国内外の半導体メーカー4社に提示し、それぞれと検討に入った。あるメーカーからは、カスタムMPU（Micro Processing Unit = CPU +メモリ + I/O Interface）のブレッドボード（約30cm×40cm×80cm：重さ約30Kg）を入手し、それでエンジンを動かしてみた。結局そのカスタムMPUは量産車には搭載されなかったが、この時の検討がその後の自動車用マイクロコンピュータ開発のために大変参考になったと後から聞いた。半導体メーカーでのその後の自動車用マイコンの開発のための技術がこの共同検討の中から育ったと考えられる。

#### 2.4.5 他のシステムへの発展

電子制御技術を車載制御装置に使うことは、エンジン制御装置から始まったが、その後ほとんどの制御装置に拡大し、今では20前後の制御装置に使われるようになった。

例えば、安全な走行に欠かせない機能として、最近の乗用車のほとんどすべてに採用されるようになったシステムに「ABS = Anti-lock Brake System」と「Air Bag System」があるが、これらも制御技術の活用なくしては、機能の信頼性と安いコストを両立させ、今日のように広く搭載されるようにはならなかったと考えられる。ABSは、4輪に取り付けられた車輪速センサーからの信号をマイクロコンピュータで処理し、推定した車体移動速度と車輪速度を比較して、タイヤがロック状態になっていることを推定する演算をする。タイヤのロック状態を推定すると、ブレーキ油圧を抜いて、タイヤを回転させる制御をする。高度な運転操作テクニックを持っているドライバーは、ブレーキ操作とその時の車両（=タイヤ）からの反力を体で感じ、ロック状態を感知するとブレーキペダルを緩め、すぐにまたブレーキペダルを踏むという動作（ポンピングブレーキと呼ぶ）を一秒間に数回できると言われるが、ABSは、ポンピングブレーキ操作をうまくできない一般のドライバーに対して、プロドライバー以上の操作を確実に代行するシステムである。

Air Bag Systemは、車体に取り付けた半導体Gセンサーからの加速度波形を信号処

理し、車の衝突を推定し、適切な時にAir Bagを膨らませて、乗員を衝撃から守る機能を持っている。乗員を衝突衝撃から守るための最適な動作タイミングを決めるために、制御技術が重要な役割を果たしている。

#### 2.4.6 おわりに

##### (1) 実センサーと仮想センサー

計測・制御技術の原則の一つに「計測できない物は制御できない」ということがある。新しいセンサーが新しいシステム・商品を生み出すという例も多い。前に説明した「三元触媒システム」も「O<sub>2</sub>センサ」が実用化されたことによって、初めて実用化できた。

自動車では、実センサーによる計測が基本だが、最近では対象のモデル化をベースにした状態量の推定値を仮想センサーとして使うことも始まっている。例えば、エンジン出力トルクを直接測るのではなく、トルクの推定値を計算し、その計算値を使ってトルク制御を行なうことも始まっている。実センサーを安く、信頼性高く開発することが難しい例が増えてきていることが理由だと考えられる。このことから、昔は「新しいセンサーが新しいシステムを生む」と言われたが、近年は、「安定した状態推定技術が新しいシステムを生む」と言い換えても良いかもしれない。

##### (2) 個別システムから協調システムへ

今まで紹介してきたように、現在の自動車には電子制御システムが数多く搭載されている。例えば、エンジンへの燃料供給には電子制御燃料噴射システムがほぼ全部の乗用車に使われているし、ABS や Air Bag System の標準装備が始まっている。これらの電子制御システムは、それぞれのシステム開発担当者が個別に開発し、開発が終わったシステムから順次搭載されてきた。したがって、それぞれのシステムは独立している。ところが、多くの電子制御システムが標準的に搭載されるようになると、車全体を一つの制御システムと見ることによって、新しい性能・魅力を創造することが可能になってきた。すなわち、複数の制御システムを協調的に動作させることによって、独立なシステム群では実現できない性能を引き出せる可能性が出てきたのである。

##### (3) 計測制御技術の時代

しかし、従来の個々の制御システムの開発担当者では、車全体を見ることができない。制御エンジニアだけが車全体を見渡し、必要なセンサー群を設計し、各制御システムの協調動作を設計できる。まさに、これからは制御エンジニアの時代である。

20数年前に始まった自動車の分野での制御技術の実用化の流れは、今その果たすべき役割が非常に大きくなり、今後の自動車の発展のためには不可欠な技術となっている。安全で快適そして地球に優しい自動車の発展のために、制御技術者のより一層の貢献が期待される。

## 2.5 重機械工業

### 2.5.1 加圧水型原子力プラントの制御

APWR向けの計測制御設備には、運転中の最新プラントでのデジタル技術導入実績及び最新の研究成果を取込み、常用系に加えて安全系にもデジタル技術を導入し、CRT及びFDP（フラットディスプレイパネル）とタッチスクリーンを搭載したソフトオペレーションを基本とする新型中央制御盤との間を多重伝送で結び、デジタル技術の持つ信頼性、保守性等のメリットを最大限生かして開発された総合デジタル式計測制御システムを通用する計画としている。これにより、より一層の信頼性、運転性、保守・試験性及び経済性の向上を図ることが可能となっている。

総合デジタル式計測制御システムの概要は次のとおりである。

- (1) システムを階層化し、階層ごとにプラントの安全性、稼働性の両面からの要求に応じて設備の多重化・分散化を適切に図っている。
- (2) 中央制御盤からの操作はすべてタッチオペレーションとし、個別の補機を制御する現場ロジック盤に至るまでの信号伝送を全面的に光多重伝送化している。
- (3) デジタル化の特長を生かした自己診断範囲の拡大や保守情報の一元管理及び保守手順提示等の保守支援により、保守性の向上を図っている。

なお、設備構成においては、原子炉系、タービン系、電気系を含めて類似設備間の統廃合化を考慮している。すなわち、デジタル化により制御設備機種の統一が図られ、また設備間インターフェースの柔軟性が向上し合理的な機能別分散が可能となったことにより、各階層レベルで同一設置場所の同種機能の盤を統廃合するなどバランスのとれた設備構成を実現している。

### 2.5.2 火力プラントの制御

図10に示す火力プラントにおいて、制御装置はボイラ、タービンなどの主機と同様に、プラント性能、機動性を左右する重要な構成機器と位置付けられている。制御システムDIASYS Netmationは、マイクロソフト社Windowsベース操作画面であり、多くの情報を集約して監視しインターネットを介して遠隔保守支援サービスを提供できる。世界各地に納入したプラントから、リモートメンテナンスセンターに、リアルタイムで状況推移の確認や調整ができるようになっている。何らかの異常が発生した場合でも瞬時に現地の運転員に助言することが可能で、信頼性向上に



図10 火力プラント

大きく貢献している。

高精度リアルタイムシミュレーション技術は、実機各部の過渡的挙動を忠実に模擬でき、プラントの最低負荷引き下げなど既設機運用性改善工事の事前検証やユニットのトラブル未然防止にも役立っている。また、石炭だきボイラでは、運転員による石炭性状データの手動入力及び制御パラメータの手動切換えを必要とせず、ファジィ手法によるボイラの伝熱状態から見た最適な制御パラメータを自動で設定する制御を開発し、実用化している。

### 2.5.3 地震振動台の制御

我が国では建築・土木構造物や機械プラントに対し厳しい耐震安全性基準が課せられており、原子力設備や大型土木構造物等では模型や実物による耐震強度実験が広く実施されている。耐震強度実験では通常、電気油圧式アクチュエータにより駆動される地震振動台上に試験体を搭載し、過去に観測された地震波等で加振実験を行う。図11は加振試験を行うべく、試験体を振動台上に搭載した状況を示す。地震振動台は最大搭載重量や最大加振加速度などの性能に加えて振動台上の加速度波形が実際の地震加速度波形を高精度に再現することが要求される。

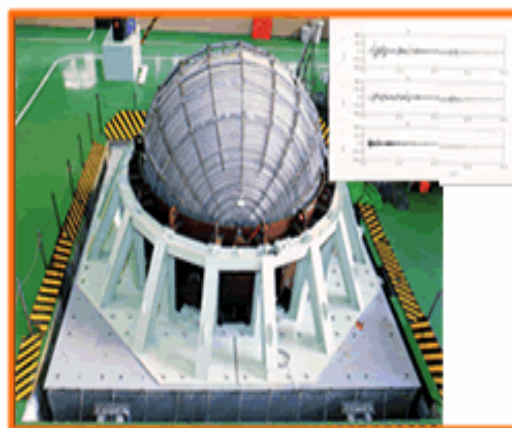


図11 三次元地震振動台

この要求に対してデジタル信号処理を応用したデジタル反復入力補償法等を開発し適用しているが、一つの補償法で全ての試験体や目標波に対応することは困難である。このため、試験体の特性変動を受けにくい制御系設計、及び試験体の特性変動に応じてコントローラの制御定数も変動させる制御系設計手法による数種の補償方法を開発し、試験体や目標波に応じて補償方法を木目細かく対応させている。

### 2.5.4 ロケット移動発射台運搬台車の制御

従来のH- ロケットでは、整備組立棟、射点各々1か所が整備され、その間を移動発射台は本体に整備されている軌道式走行装置にて移動していた。しかし、H- Aロケットでは、打上げ回数の増加及びコスト低減のため、整備組立棟、射点を各々2か所に整備することとなった。これらの設備を効率よく運用するためには、従来の軌道式走行装置では困難であり、機動性の高い搬送方式が要求された。また、搬送中の移動発射台水平度の維持( $\pm 0.2^\circ$ 以内)、整備組立棟及び射点での高い据付精度の要求(前後左右 $\pm 25\text{mm}$ 以内)などを満たすロケット移動発射台運搬台車を開発した。図12に開発

した運搬台車によるロケット運搬状況を示す。本台車は路面に敷設した誘導磁石を磁力センサーで検知し、操舵制御を行うことにより全自動による精密誘導制御を実現している。また、路面の起伏により移動発射台が傾斜するため、移動発射台運搬台車に車高及び傾斜センサーを装備し水平制御を行うことで、移動発射台の水平度や持上げ高さを維持している。

このように重機械工業においても制御工学は不可欠であり、今後の計算機やITの進展に伴いその重要性は益々増加していくものと予想される。



図12 ロケット移動  
発射台運搬台車

## 参考文献

- [1] (社)化学工学会：日本の化学産業技術、pp.1-46 工業調査会（1997）
- [2] 高津、他：プロセス制御、コロナ社、pp. 197-199（2003）
- [3] 石油化学工業協会：日本の石油化学の歩み、石油化学工業協会ホームページ（2003）
- [4] 日本学術振興会 PSE143 委員会 WS17 報告書「バッチプロセスの設計・運転・管理のためのシステム的アプローチ」（1997）
- [5] 日本学術振興会PSE143 委員会WS20 報告書「運転・管理のためのバッチプロセスモデリング」（1999）
- [6] 伊藤、他：化学産業における制御、コロナ社（2002）
- [7] 高津、他：プロセス制御、コロナ社（2003）
- [8] 化学技術戦略推進機構：「化学品取引情報化事業報告書 平成14年3月」（2002）
- [9] 鹿山、諸岡、熊山：ファジィ多重回帰モデルの自動構築アルゴリズム、電気学会論文誌D、118-6（1998）
- [10] 谷、他：モデル予測制御パッケージと空気分離プラントへの適用、計測と制御、39-5（2000）
- [11] A. G. Ganek and T. A. Corbi: The dawning the autonomic computing era, IBM Systems Journal, 42-1（2003）
- [12] 永見、中原、西門、野田：Web プロキシサーバにおけるWeb トラフィック制御方式の提案、情報処理学会研究報告、38号オーディオビジュアル複合情報処理、38（2002）

- [13] 川本、高元、小林：最適ポートフォリオ決定問題向け二次計画法の適用方式、  
電気学会論文誌 C、123-6 (2003)
- [14] 梶浦、新：生産システムのモデリングと制御、計測と制御、42-2 (2003)
- [15] 山口：磁気ディスク装置の位置決め技術の動向、計測と制御、41-6 (2002)
- [16] 栗栖、西谷、館、安達：数理計画法とヒューリスティック法を組み合わせた動的配  
分計画技法の上水道運用計画問題への適用、計測自動制御学会論文集、30-2 (1994)
- [17] 加藤、栗栖、瀬古沢、館：広域水運用計画への対話型多目的計画法の応用、計測  
自動制御学会論文集、35-2 (1999)
- [18] 福本、瀬古沢、島：配水管網内におけるトリハロメタンの拡散予測に関する研究、  
第51回水道研究発表会予稿集 (2000)



## 第3章

### 先端技術における制御工学

本章では、現在の人々の生活の中で、先端技術がもっとも身近に存在するものの代表例として、ロボットと自動車を取り上げ、そこで制御工学が果たしている役割を述べる。ロボットについては、産業用に始まり、医療、福祉、介護、災害防止・救助、家庭、娯楽等に大きく展開しようとしている現在、制御工学がなくてはならない技術であることが実感される。また、自動車において、安全性向上、省エネルギー、有害物質の排出削減などのために制御工学が果たす重要な役割が認識される。

#### 3.1 産業、医療、福祉、介護、災害防止・救助、家庭、娯楽におけるロボット

ロボットは産業用ロボットとして実用化され、自動車、電気産業など多くの産業分野で応用されてきた。また、ヒューマノイドロボットが出現すると世の中のロボットへの期待は膨らみ、その機能も徐々に向上しており、その一例としてエンターテイメント分野を確立させている。このロボットはさらに高機能化を進め、今後高まる高齢化社会において活躍の期待が高まっている。

本節では、このロボットについて、この基本構成、歴史、応用分野、そしてロボットの将来を概観し、解決すべき問題点等について言及する[1]。

##### 3.1.1 ロボットの基本構成

平成13年7月に経済産業省産業機械課が発表したロボット産業に係わる政策の基本的な考え方 - 21世紀ロボットチャレンジャー - によれば、ロボットは「外部（内部）環境を感知し、収集された情報に基づき適当な物理的動作を行う機械システム」と定義され、ロボットは様々な機能を提供し、新たな応用分野への期待（医療、福祉、介護、災害防止・救助、アミューズメントなど）が高まっていると述べている。

ロボットは、メカトロニクス技術の大きな成果として考えられ、機械工学と電気・電子工学との、情報工学・制御工学を触媒とした融合によってもたらされた成果の一つと考えられている。このロボットに関わる学問体系の全体像は図1に示すようなものとなる。

ロボットの機構・構造は機械工学で培われた技術によって構成され、その機能を発

揮するために情報工学、制御工学による技術が用いられている。当然、その背景を形成する電気・電子工学が存在する。これらの工学にロボットの応用を考えたときに、そこに纏わる各種の関連分野技術が組み入れられてロボットシステムが実現される。

このように、ロボットには、多くの工学が関与し、多くの応用分野に関連する最先端技術としての顔がある。しかし、一方で、ロボットハードウェアの内面を直視すると、その実態はまさにモータの塊とも言えるものであり、ロボットを構成する5～30数自由度の各関節のすべてにサーボモータが搭載された多自由度系となっている。これらのサーボモータへの目標値設定は、ロボットの作業計画あるいは移動・行動計画に基づいて内蔵するコンピュータが行い、これによりシステム全体が動作する。集積された多自由度系に起因する信頼性の問題や、駆動するパワー源の問題など、まだ問題は山積している。

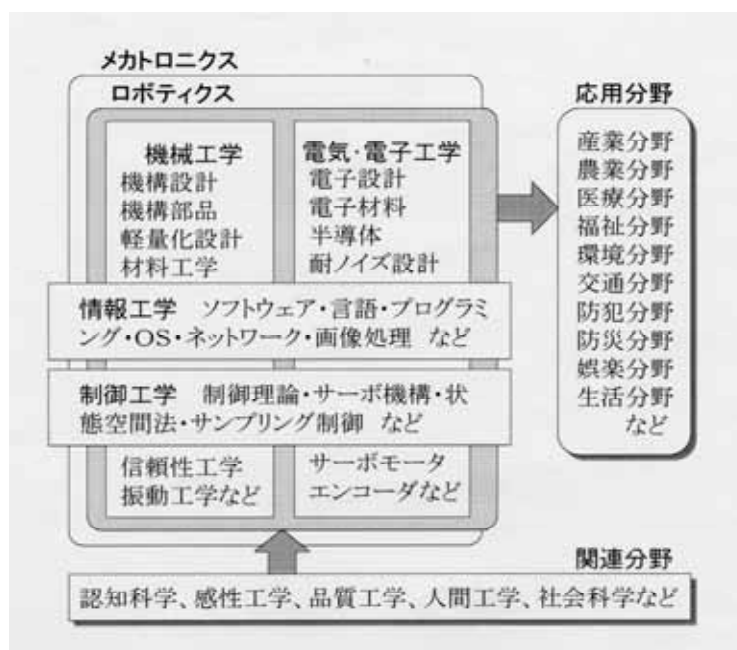


図1 ロボティクスの学問体系[1]

ロボット本体の基本的な構成は、図2のように表現される。まず、

人間からの何らかの命令を受け取ってそれを解析し理解する機能

自分自身の状況に加えて外界の対象や環境を理解する機能

これらの結果をもとに最適に振舞ったり外界に働きかけたりするための意思決定を行う機能

が必要となる。従来の産業用ロボットやヒューマノイドロボットでは、これらのうちの幾つかが省略されるか、あるいは簡略化された形で実装されている。



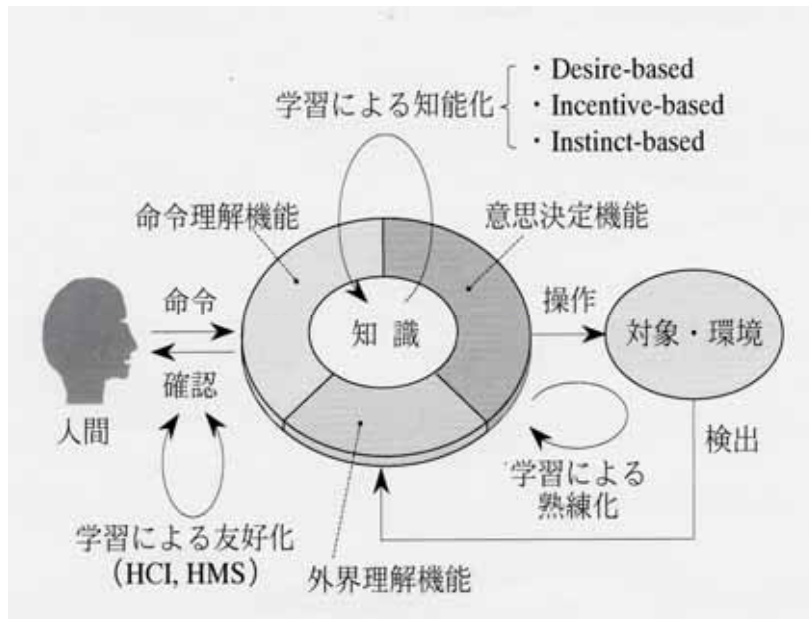


図2 ロボットの基本構成

まず、命令理解機能では、オペレータが手先を動かすことによるオンラインティーチングという単純かつ基本的な手法が産業用ロボットで実現された。しかし、その教示時間が長くなるなどの欠点もあり、ロボット言語を用いたオフラインティーチングもまた実用化された。もっと理想は、人間にとって易しいマクロな命令で指示することであろう。図面による教示、やって見せることによる教示、サンプルを見せることによる教示、言葉による教示など、HCI (Human Computer Interaction)、HMS(Human Machine Symbiosis) としての大きな課題がここにある。その解決によって、フレンドリーなインターフェースが実現することになる。

一方、外界理解機能では、各種のセンサーの高度化とそのセンシング結果の融合 (sensor fusion) による正確かつ効率的な知見の取得が課題である。マシンビジョン、コンピュータビジョンなどの視覚による認知・認識・理解技術の高度化もまた重要である。

意思決定機能では、過去の経験の集積によるルール化や抽象化、自己や対象についての知識やモデルを用いた最適な動作の決定、人間からの命令にそむかない範囲での自律的な行動決定など、興味深い課題がある。

また、ロボット自身の知能を高めるためには、本能による学習や、その上位の刺激誘発型による学習、更にはロボット自身の願望による学習などの課題がある。また、繰返し作業の結果評価を用いた習熟・熟練機能の実現なども興味深い課題となる。

### 3.1.2 ロボティクスの発展

ロボットの現況を考える上で、ロボットの約50年の足跡をたどり、それぞれの時代

での展開を3つのフェイズに要約する。

### (i) ロボット研究の始まり

ロボティクスの研究の源は、1947年に米国で始まったホットラボ用として構成されたマニピュレータの研究にまで遡ることができる。これは、放射線環境下のホットラボで、壁を介して外側のマスター側を操作し、内側のスレーブ側ハンドで各種作業を行うマスタースレーブ型マニピュレータの研究であった。当初、油圧サーボが用いられていたが、電気を用いたサーボシステムにとって変わり、いくつかの基本的な方式が提案されている。

1961年IBMサンノゼ研究所のH.A.Ernstが、MITで開発中のトランジスタ型コンピュータTX-0を用いて、ホットラボ用に使われていたマニピュレータを用いて、そのコンピュータ制御に成功した。これはマスタースレーブ型マニピュレータのマスター側を人間が操作する代わりに、コンピュータによって指令し、スレーブ側での指先作業を行うものであった。指先には触覚センサーなどが付けられており、ブロックをハンドリングするなどの基本的な研究が行われた。また、コンピュータビジョンの研究が開始されたのもこの時代であった。

1960年代後半になると、MIT、SRI (Stanford Research Institute)、Stanford大学などで種々のロボットハンドや車輪型移動ロボットの開発が行われた。当時、研究が開始された人工知能の理論を検証するために、ロボットが検証用の実験に用いられた。

一方、日本においては、ロボティクスの先導的な研究である山下[6][7]の指の工学的研究が行われた。これは1963年に論文が発表された。この研究は工場のオートメーション化に役立つことを目的として、当時の人海戦術的な生産ラインの解消を目指したものであり、また義手などの研究が参考にされた。この時代では日本ではまだ現在のように実験に利用することができない時代であった。そのためシーケンス制御によって、3本の指間に細い円柱棒を把持しつつそれを回転して他の指間へと回してゆく実験に成功した。

その後、井上[7]は1969年に、H.A.Ernstと同様、原子炉用に開発されたマニピュレータを用いて、コンピュータ制御による物体把持、把持力制御などの広範な操作作業実験に成功した。

1970年代に入ると日立中央研究所[7]が、産業における新しい生産形態の実現を目指して、視覚を持ったコンピュータ制御の人工知能ロボットを開発した。あらかじめ図面を作成しておき、これを見せるだけで多様な組立を実行するものである。特に、

- (1) マクロな命令である組立図を認識し、作業の目的を理解する機能（注：ゴールの理解に相当）
- (2) 机上の3次元物体（積み木部品群）から、個々の形状・位置・姿勢を認識し、理解する機能（注：スタートの理解に相当）

- (3) 組立に必要な部品を判断し、図面どおりに組立てていくための手の動作手順を、組立図から部品への分解の逆工程として自動生成（後向き推論）し、実行する機能（注：スタートからゴールへの道筋をゴールからスタートへの逆手順として決定）

などに特徴がある。

このロボットは、マクロな命令に応じて、外界に適応しつつ多様な作業を実行する初めての統合型知能ロボットとして1970年の日立技術展で一般公開され、我が国におけるコンピュータ制御によるロボット研究の先駆けとなった。

#### (ii) 産業用ロボットとしての展開

産業用ロボットの初めての特許が米国で成立したのは1954年のことであった。その後、コンソリデイテッド・コントローラ社は1958年ユニメーション社を設立して「ユニメート」を開発し、AMF社は「バーサトラン」を開発した。

これらの産業用ロボットは、手先の位置姿勢を点経路もしくは連続経路として記憶する方式であり、オペレータが手先を持ってその経路を教示する方式が取られた。また、教示された内容を記憶するために、磁気テープや磁気ドラムが用いられ、この記憶された内容（手先の位置姿勢データ）の繰返し読み出しにより、何回でもマニピュレータの動作を再生できた。

1968年にこれらの産業用ロボットが日本に輸入されたのを契機として、日本の油空圧各社も独自にロボットの開発を開始し、その結果産業用ロボットの市場が次第に立ち上がっていった。産業用ロボットは、その後コンピュータの発達とともに改良が加えられ、大量生産時代の生産機械の要として、塗装用、スポット溶接用、アーク溶接用、搬送用に利用された。

1980年代に入ると、生産方式もフレキシブルオートメーションの時代に入り、組立用のSCARAロボットが実現された。また、多品種少量生産方式が取り入れられるようになり、産業用ロボットの活躍の場が広がった。例えば、自動車の組立工程に投入され、その活躍は今日もなお続いている。

一方、後述するように、配管探傷用ロボット、電子部品高速装着ロボット、ビル建設ロボット、シールド工法ロボット、水中土木ロボット、壁面歩行ロボット、ロボットトラクタ、野菜接ぎ木ロボット、航空機洗浄ロボット、警備ロボット、鮪ロボットなど、各種のロボットが出現した。これらの例に見られるように、ロボットは、その位置姿勢決め機能、空間作業機能という特徴を活かし、これらの機能が応用可能なあらゆる分野へと進出していった。

その後、バブル崩壊後の民間設備投資の低迷を受け、ロボット産業の伸びは大きく後退している。ロボット関連従業員数は約12,000名、専門メーカーは数社を数える程度となっている。また日本ロボット工業会の統計によると2001年度の出荷額は4,025億

円と、工作機械業界の半分程度の規模に留まっている[8][9]。

### (iii) ヒューマノイドロボットの開発

21世紀に入ると社会の情勢も代わり、時代の要請としても少子高齢化に伴う福祉高度化への対応、高度情報化に伴う工場の変革への対応、環境保護への対応等が強調されるようになった。

少子高齢化に伴い、若い働き手が少なくなり、また同時に技術者不足も深刻となった。3Kと呼ばれる作業への回避などもあって、労働力不足の問題は大きくなりつつある。特に、高齢化に伴う福祉高度化への要請は、高齢者への介護・介助支援作業として今後増大する傾向にある。同時に、この高齢化による熟練労働者不足を補うための体制も必要となっている。

高度情報化に伴う工場の変革では、今日の高度化した情報ネットワークに適合するための変革と、アジア諸国の安い賃金で生産される製品への対応が急務である。特に、ロボットを含む製造機械のネットワーク化や人件費削減が緊急の課題となっている。

このように、変革期に伴う種々の問題は、新たなロボット技術への要請となり、ロボットの作業機能の一つである位置姿勢決め機能から、より柔軟な空間対応機能や知能化、更には新規な移動・行動機能への展開が求められてくる。

この新規な移動機能の一つとして二足歩行がある。これに関しては、1974年に発表された世界最初の二足歩行ロボットWABOT-1(早稲田大学)が先鞭をつけた。その約10年後の1985年には、国際科学技術博覧会(科学万博つくば'85)の政府館で二足歩行ロボットWHL-11(早稲田大学、日立製作所)が初めて一般大衆に長期間公開実演された。さらに、その約10年後の1996年には、本田技術研究所がヒューマノイドロボットを発表し、世界の注目を浴びた。その後、各研究機関でヒューマノイドロボットが広範に研究され、今日では多様な開発例がある。その幾つかを以下に示す。

#### (1) WABIAN [10](早稲田大学)

二足歩行ロボットWABOTシリーズの研究で先駆的な技術の開発を行ってきた。最近のロボットWABIAN は人間とのダンスや、感情を表現する歩行などが行える。

#### (2) P2、P3、ASIMO [11](本田技術研究所)

人間型自律ロボットP2を1996年12月に発表した。これは全高1,820mm、重量210kgで、胴体部にコンピュータやモータードライブ、バッテリー、無線機器などを内蔵している。このP2では、自在な動きや階段昇降、台車を押すなどの動作を、ワイヤレスでかつ自律動作により実現している。さらに、このP2の小型軽量化を図り、1997年9月に完成させたロボットがP3で、全高1,600mm、重量130kgを実現している。2000年になって、より小型化されたASIMOが完成している。

#### (3) H7 [12](東京大学)

全身が動力的に安定で、かつ可動部分が相互干渉しないモーションプランニング

グ、歩容計画などの計画機能がある。実時間3次元視覚機能などが搭載され、ジョイスティックによるインタラクティブなオンライン歩行軌道生成システムなども完成している。

(4) HRP-2 [13] (産業技術総合研究所、川田工業)

1998年から5か年計画で実施中の「人間協調・共存型ロボットシステムの研究開発」プロジェクト(リーダー:井上博允東京大学教授)(HRP: Humanoid Robotics Project)の中で、後期応用研究開発5分野の一つとして、屋外共同作業応用の実現を目標としたロボットHRP-2を開発している。身長154cm、体重58kg(バッテリー含む)、腰2軸を含む30自由度で、股関節を片持ち構造として隘路の歩行を可能にし、電装系の高密度実装によりバックパックを不要としている。

(5) SDR-3X (ソニー)

エンターテイメント用を志向した小型のロボットであり、視覚による経路探索を含んだ移動機能についても発表している[12]。

(6) HOAP-1 (富士通研究所)

研究開発用に製品化された小型ロボットであり、HRPプロジェクトの前期に実施されたヒューマノイドにロボットのシミュレータソフトの検証用に開発[12]された。ヒューマノイドロボットの例として、HOAP-1を図3に示す。



図3 ヒューマノイドロボットの例

ヒューマノイドロボットの研究では、エンターテイメントの用途のほかに、二足歩行による移動機能を最大限に利用して、各種の有用な作業を実現することを目指している。特に今後は、社会支援型ロボットとしての活躍もまた大きく期待されている。

### 3.1.3 ロボットの各分野への応用[2]

#### (i) 産業用ロボット

ロボットの最も基本的な将来方向の一つに、産業用ロボットにおける機能・性能の

一層の拡充と高度化がある。ロボットの機能の高度化としては、新たな空間的作業機能技術の展開が必要であり、たとえば作業の繰返しによる習熟・熟練の課題がある。これが実現されると作業に対する効率化、自律化が可能となる。また、ロボットの性能の高度化としては、高速化・高精度化のほかに、製品としての高品質化、小型化、低価格化が関連する。

産業用ロボットの導入先としては自動車の製造ラインである。ここではロボットも数値制御機器と同格に扱われ、一種の産業機器としての性格を持っている。この場合、機器の機能向上は図られても専用機器化し、発展に限度がある。

もっと人間の手作業に迫るためには、ロボットとして手先の空間的な位置姿勢決めを精度良く可能にする柔軟な機能が必要であり、従来の専用的な、かつ効率化を指向する産業機器としてのアプローチから一たん脱却する必要があるかもしれない。すなわち、従来の経験主義から、新たな機能実現に向けた思考の展開が重要となり、人間の手作業を基本として、ロボット本来の機能向上を含んだ汎用的なシステム開発を行う必要がある。当然、空間作業に対応するセンシングとそのフィードバック、知的処理の問題を包含しなければなるまい。

自動車の製造ラインに産業用ロボットが用いられているが、自動車に関して言えば、自動車の評価などにも応用が可能である。現在では自動車の衝突実験などはダミーの人形が用いられ、フルフラップ全面衝突試験、側面衝突試験、オフセット衝突試験などが衝突安全性能として評価が行われ発表されている。これらのダミー人形ではなく、ロボットを用いて衝突事故に近い状況の再現を行って、動的なダミーロボットの提案がなされている。

#### (ii) ホームサービス・高齢者支援ロボット

65歳以上の人口割合が2010年に20%を超えるようになり、また少子化も進んで、高齢者の支援を行う人が少なくなり、高齢者が高齢者を看る時代に入りつつある。この高齢者が支援を受ける割合も大きくなり、これらの介護を行うロボットの実現が待たれている。同時に、人間がロボットと広い範囲で接触を余儀なくされ、ロボットの安全性、人の安心性の問題が生じる。

ホームサービスロボットとして、掃除ロボットも出現しており、価格、日本家屋の種々の問題をクリアすれば、今後の大きな市場となりうるであろう。

高齢者への自律的な支援ロボットとして、

- (1) 軽量のものを所定の位置から持ってくる機能
- (2) 落下物の拾い上げ機能
- (3) 汎用の掃除機能
- (4) 食事の給仕・後片づけ機能
- (5) 戸締まり管理能力

- ( 6 ) 洗濯
- ( 7 ) ベッドメイク
- ( 8 ) 介助機能
- ( 9 ) その他

などが考えられる。

例えば、( 4 ) の応用例として、病院内で用いられる食事搬送用ロボットについて要約してみる。入院した患者の立場から考えると、病院内の楽しみの一つは食事である。しかし、この準備には大変時間がかかり、それぞれの患者一人一人に配膳してゆくことは大変な仕事である。そこで、人間(患者)との共存を前提とした食事搬送ロボットが考えられている。特に、このロボットは、システムの「自律性」、人との接触を考えた「安全性」と同時に、人との「親和性」を基本原則として構成されている。そのうち、「親和性」では、ロボットの操作、ロボットと人の間のコミュニケーション、外観デザイン等が患者の立場を配慮して考えられている。

#### (iii) リハビリ介護ロボット

リハビリ介護ロボットは、病院、高齢者施設、ケアハウスなどの公共施設に置かれて、失われつつある機能の回復訓練に用いられ、いくつかの実用化例がある。介護を受ける患者の運動機能レベルによって、その対応方法も異なり、汎用的なリハビリ介護ロボットの開発は難しい。例えば、寝たきりの高齢者とある程度歩行できる患者とではその対処法は異なり、その判断をロボットに求めることは困難であり、介護者が重要な役割を演ずることになる。

一方、ネットワークを用いたホームヘルパーの可能性が考えられている。遠隔地より介護を受ける患者の状況の取得を行い、また、音声等の手段を用いて患者の様子、言葉を用いて話し相手となる手法が考えられている。例えば、寂しさや不安を感じたとき、遠隔地より親身に話し相手なり、患者の不安を取り除くことなどが考えられる。これらは、介護者が一人で何人かの患者と対応でき、また訪問等の時間も浪費せずに行える。

#### (iv) 手術用ロボット

ロボットの手先を高精度に位置姿勢決めし、保持・移動する機能は、外科医に新たな腕を提供することと等価であり、現在、手術支援ロボットとして実用化も進んでいる。これは、低侵襲手術における顕微鏡下のマイクロサージェリーのような、高度な技量や熟練・集中力を要求される分野での活用が期待されており、脳外科、眼科、耳鼻咽喉科、整形外科などでの利用が有望である。

ダ・ビンチ(Intuitive Surgical Inc.)は双腕のマスタースレーブロボットを用いており、心臓外科手術用に開発されている。このロボットを用いて遠隔地から内視鏡下手術を行う例などもあり、専門医、熟練医がいないような地域から利用される。

医療分野の作業では、柔らかく、かつ変形する人間を対象としており、また、ロボット暴走への心理的な不安の払拭など、安全性の問題のみならず安心して利用できるシステムの構築が望まれている。特に、医療用ロボットの研究・開発では、その利用者である医師との連携が重要となり、多くの医学的・生理学的・人間科学的な知見を導入して設計を行う必要が生じる。

#### (v) 農業用ロボット

農業を対象としたロボットにも各種のものが開発され、利用されている。耕うんロボットは市販のトラクタを改良し、ハンドルやブレーキをコンピュータ制御し、畑での耕うん作業を自律化させている。畑での自己位置同定、方位の検出が基本的な動作となる。畑での作業を開始する場合、畑の大きさ、耕うん深さなどの設定が必要であるが、これは畑の場所、天候などにも左右され、これらの自動設定方式などの開発が望まれている。また、GPSを用いた自己同定なども開発されており、使用者の使い勝手、コストの問題も大きく、その改良が行われている。

いちごの収穫作業は労働時間、収穫期が長く、作業姿勢が中腰といった特徴を有し、作業者に相当の負担がかかる。これを解決するためのロボットとして、いちご収穫ロボットが開発され、果実を傷つけないで収穫する手法及び全天候下での作業に耐える手法の問題が課題となっている。

野菜の接ぎ木は、ウリ科作物など連作障害の回避、つる割れ病の発生を防ぐ有効な手段として行われており、この作業がロボット化されている。接ぎ木ロボットによる作業は、台木苗と穂木苗との接合であり、台木苗の1枚の子葉と生長点を含む茎頂部が斜めに切断され、また、穂木苗の根側が切断されて、両者の切断面合わせが行われる。この接ぎ木ロボットの接ぎ木成功率は97%と言われ、人の作業速度に比較して6～7倍の速度となっている。

#### (vi) 建設用ロボット

土木、建設分野は屋外という環境で、不定形かつ重量物の搬送が多く、肉体的な労働環境であり、ロボット化が期待されている分野である。

土木用ロボットは、シールドトンネル、道路舗装・保守管理など、各種のロボットが開発されている。また、建設用ロボットとしては、床仕上げロボット、全天候型ビル自動建設システム、内装材自動搬送ロボット、天井ボード貼りロボットなど数十機種開発されている。

床仕上げロボットは、コンクリートの床均し作業を二つのゴムライニングされた車輪により走行し、本体後部に設置された回転ゴテによって、コンクリート表面を仕上げする。ロボットは作業区域内を自律走行して、床仕上げ作業を行う。

全天候型ビル自動建設システムは、地上レベルで建物の最上階を構成し、1階から順次作り上げてゆく施工方式を取っており、快適な建築環境で、高品質でローコスト



の建設ができる。

これらの建設用ロボットは、このロボットを作業員が作業場所まで運んでセットする必要があり、立体化構造の環境ではその手間の問題等が発生する。

#### (vii) 災害救助用ロボット

災害には、阪神・淡路大震災、雲仙普賢岳大噴火に見られるような自然災害や、原子力施設災害に見られる人為的な災害があり、これらに関わる救助・支援作業は多岐にわたる。特に、消防・防災分野へのロボット化は、作業者の安全確保や、高層建築物への整備が行われている。

しかし、この分野へのロボット化は市場が狭く、長期間にわたって、いつでも利用が可能ないように普段からのメンテナンスが必要で、このために高価格化が回避できない。また、長期間保管されるので、最新技術を適宜これらのロボットに導入することが困難となる。

一般に、災害では、一度に多数の尊い人命が失われる場合もあるので、その救助には素早い対応が必須となる。災害予測技術などの実現とともに、広範な支援機器の整備が求められている。

このように、それぞれの支援分野にロボットを適応させるには、ロボット自身の問題だけでなく、その分野に依存する。

特に、熱に強く軽量の素材の問題、耐放射線素材の問題など、災害環境に見合った材料の問題が大きい。また、電池が30分しか持たないロボットでは、人を救助する以前にロボットが救助されなければならなくなり、却って足手纏いとなる。パワー源をどうするかという問題と、視覚をどうするかという問題は、昼夜屋外全天候下での作業に適用しようとするとき、まだ解決されていない最大の課題である。横断型のシステム思考が問題解決の鍵となろう。

### 3.1.4 ロボティクスの将来

ロボティクスの進展につれ、人間とロボットとの付き合い方は多様になってきている。これらの間には、次に示すようにいくつかのレベルがある。

- (1) 人間が簡単に関与して、ロボットに作業指示を与える場合であり、産業用ロボットの例がこれに当たる。
- (2) 各種の分野で、人間とロボットが協調して作業を進める場合である。
- (3) 人間とロボットが互いに接触しあって作業する場合で、ロボットが人間の介護・介助支援を実行するには両者が互いに接触状態を起こさざるを得ない。これは今後の新しい利用形態であり、安全性・安心性からも深い洞察が必要となる。

これらの各レベルについて、ロボティクスが進むべき将来方向について、以下に簡単にまとめる。

### (i) ロボットの機能・性能の拡充と高度化

現状では、ロボットのレベル(1)から(2)が混在しており、レベル(3)は現在研究開発中である。図2に示すロボットの基本機能は、手先、システムの移動を含めて、所定の位置から設定された位置まで、空間的に移動する機能である。この移動機能は人間からの指示で行われる場合と自律的に行う場合とがある。図の中央部に書かれている知識は大半が今後開発される部分であり、学習の部分も同様である。

一方、産業用ロボットの導入先は、自動車の製造ラインがかなりの部分を占める。ここでは、ロボットも数値制御機器と同格に扱われ、一種の産業機器としての性格を持っている。この場合、機器の機能向上は図られても専用機器化し、発展に限度がある。

もっと人間の手作業に迫るためには、あるいは人手作業のスキルを実用化するためには、ロボットとして手先の空間的な位置姿勢決めを精度良く実現する柔軟な機能が必要であり、従来の専用的な、かつ効率化を指向する産業機器としてのアプローチから一たん脱却する必要があるかもしれない。すなわち、従来の経験主義から、新たな機能実現に向けた思考の展開が重要となり、人間の手作業を基本として、ロボット本来の機能向上を含んだ汎用的なシステム開発を行う必要がある。当然、空間作業に対応するセンシングとそのフィードバック、知的処理の問題を包含しなければならぬ。

### (ii) ロボットのための新技术・新機能の創生

ロボットのための新技术・新機能は、ロボットの応用の拡大に応じて益々重要となる。例えば、手術支援では、見ている視野と手先移動との感覚的な対応が難しいという問題や、ミクロな動きでの力を操作者がどう感じ取れるかという問題などが新たに派生する。また、大型の建設用ロボットでは、数台のロボットに共同して作業をさせる際の課題も発生する。ミクロからマクロまで、顕微鏡下から宇宙まで、数多い用途のそれぞれで、新規な技術開発と新機能の創生が必要となり、やがてそれらが一般化されて、他の分野にも波及し応用されていくことになる。

このほかにも、各種ロボットの出現により、それらの相互協調問題が生起する。ロボットは将来、単独というより複数台使用となる局面が増えるので、互いの作業を矛盾なく実施するための情報ネットワークが重要である。

また、ロボットの社会進出により、利用者(例えば、介護・介助者及び被介護・介助者)との相互協調が生まれ、その効率的な運用を目指して技術の進展が起こる。さらに、これらの協調は情報ネットワークを介して実行されることもある。すなわち、ネットワーク・ロボティクスが台頭する。したがって、従来のネットワークから脱皮し、利用者とロボットを含む総合的なネットワーク作りが表面化するものと思われる。

### (iii) 人間・社会との整合のための科学技術の展開

ロボットと人間・社会との整合をとる科学技術の出現が必須である。ロボットの社会環境での活躍が期待されるが、その導入は恐らく現況の社会環境に大きな変革をもたらす。そこでは、ロボットと人間との間に相互に積極的な接触が行われるため、安全性の確保が急務となる。

産業用ロボットの作業では、労働安全衛生法第150条の規定により、人間から隔離した環境を作ることによって安全性を保っている。介護・介助作業支援ロボットは、現状では同法に矛盾ないしは抵触する可能性がある。

また、ロボットの人間・社会との協調では、環境との整合を図るために、環境状況を認知するセンシング動作が必要となる。またその対象は空間的なので、従来のセンシングとは大きく異なり、現状では状況把握は一般にまだ困難である。

人が安心してロボットと協調動作を行える基準として、安心基準作りの問題が生起され、安心化技術の開発と策定の必要性が考えられる。同時に、製造物責任法（PL法）との相互関係についても明らかにする必要がある。このような多様な検討が進んで、いずれは「ロボット工学は安心工学」と言われるまでに進化することが期待される。

#### (iv) 横断型基幹科学技術としてのロボティクス

従来の産業分野では、製造から設計へ、単能から多能へ、組立から分解へ、というのが新しい流れとして考えられる。ロボットの定義を広く捉えれば、設計の自動化もロボットであろうし、クイックプロトタイピングのためのロボットもありうるかもしれない。廃棄物処理では従来とは全く違ったマニピュレーション技術が必要となるかもしれない。農業用、牧畜用でも、IT技術を併用したロボット技術の新しい用途がありそうである。事務用ロボットでは大規模データの効率的な取扱いが重要であり、紙ベース情報の認識やハンドリングが更に重要になってくる。

以上のように、ロボティクスはオープンな学問である。その発展には、本質的な限界や境界がなく、無限な広がりを持っている。人間への支援や代替という役割から、人間のいるところに必ずロボットの用途があるが、今までは技術的に軟弱であったり、またコスト的に高価であったりして利用できなかった。したがって、これからの研究者・技術者は、益々見聞を広め、技術を磨き、その叡智で新概念を提案し、応用を拡大するとともに、その背景にある真理を見極め、学問としての一般化を進め、世代を継承しつつ横断型基幹科学技術として大成させていく努力が必要であろう。そして、その時々で、他の縦型学問分野との協調により新たな学際分野を開拓し、結果として従来の縦型科学技術分野の深耕にも貢献することが期待される。

#### 3.1.5 おわりに

ロボットの進展を歴史的に眺め、その幾つかの側面について述べてきた。ヒューマノイドロボットの出現により、ロボットの応用分野に大きな変化が見られ、今後への

期待が益々膨らんでいる。これらのロボットの活躍を分野別にして紹介し、問題点について指摘した。

また、今日活躍が大きいヒューマノイドロボットなどは、技術的にはともあれ、概念的には極めて先進的なロボットとして、産業用ロボットとは異なった利用の方法となってきた。ヒューマノイドロボットの出現は新たなロボットとして再出発しているのかもしれない。

今後、このような各種のロボットが開発され、展開されると、過去にコンピュータがそうであったように、気が付いてみたらロボットが傍にいたという時代が来るのかもしれない。

さらに、ロボティクスは、新たに応用される分野に対して開発が進められ、それぞれに対応する学問分野が融合し、ますます横断型学問分野としての側面が重要視されると考えられる。

### 3.2 自動車における安全性向上、省エネルギー、有害物質排出削減

自動車は、今や現代文明を支える重要な道具の一つである。1980年代より自動車にはさまざまな制御技術が取り入れられ、自動車の性能は目覚ましい向上を見せた。世紀が変わって、制御技術は自動車を変革させる原動力の一つとなっている。1980年代に自動車に採用されたアンチロックブレーキ(ABS)、四輪操舵(4WS)、アクティブサスペンションなどは、それまでの純機械式システムに置き換わる形で性能向上に寄与してきたが、最近の自動車の制御系には、これまでなかった機能を自動車に付与するものもある。

近年では、交通事故や渋滞の低減、燃費・排気性能の向上などが自動車開発の重要な課題である。これらの課題に応えるため方策として、動力系の革新と自動車の交通システムとしての情報化が大きな研究課題となっている。排気・燃費性能に関しては、従来の動力系の改良が進められる傍ら、ハイブリッド機関や燃料電池、無段変速機などが新開発されている。これらの新機構は、いずれも複雑であり、正確に、効率よく動かすには、これまでになく制御技術が求められる。一方、Intelligent Transportation System (ITS)により、交通のマクロ的に見た効率化や、自動化によるヒューマンエラーの排除が期待されている。人間の運転は制御系に支援されるようになり、自動車間制御系や、レーンキープ支援制御系の実用化が進んでいる。ITS化により、車載カメラやレーダ、道路側設備、車載ナビゲーションシステムから得られる情報が自動車の制御に利用可能になる。これまで自動車は制御技術の適用により運動能力を向上させてきたが、情報技術と制御技術の融合の結果、自動車は“知性的”に見えるようになるかもしれない。

本節では、従来型の自動車制御系と新世代の自動車制御系を対比し、将来の自動車制

御を展望する。まず、純機械式システムに置き換わった制御系の例として4WSを3.2.1で紹介する。次に、3.2.2で動力系の高効率化の取組の例として、無段階変速機とハイブリッド機関及び燃料電池車を紹介する。また、3.2.3で将来的なITS車両制御を概観する。3.2.4をまとめとする。

### 3.2.1 人間自動車系と4WS

人間が何かを手動制御するとき、図4のような閉ループ系が構成されると考えることができる[14][15]。ここで $H$ は操縦者としての人間の特性を表す準線形モデル、 $P$ は制御対象である。この閉ループ系の特性を線形制御理論を用いて解析するために、そもそも非線形である人間の特性は記述関数法を用いて準線形モデルとして線形近似されている。 $r_e$ はレムナントと呼ばれ、準線形モデルでは表現しきれない人間の動きを表している。

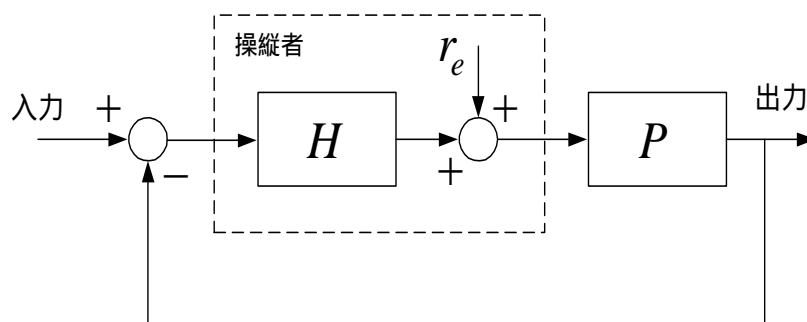


図4 操縦者の準線形モデルを用いた手動制御系のブロック図

自動車の場合には、この閉ループ系の入力としては道路の曲率や障害物の有無などで決まる目標進路、望ましい車間距離の値などが考えられる。 $P$ は自動車そのものであり、出力は自動車の速度や旋回などの運動である。文献[14]によると、 $P$ の特性がある程度異なっても、人間は $P$ の特性の違いを吸収する働きがあり、閉ループ系の特性はある見方をすると不変に保たれる。ただし、 $P$ の特性の違いによって、人間が感じる操縦の困難さは異なり、当然、閉ループ系としての性能にも違いが現れる。運転しやすい自動車、性能の良い自動車とは、人間が困難さを感じることなく、この閉ループ系の性能が上がるような特性を持つ自動車であると考えられる。自動車のハンドル操作(操舵)の場合にも、上記の考え方は当てはまり、操舵に対する旋回運動の応答(操舵応答性)の遅れが小さいことが望ましい。さて、路面の凹凸を直接車体に伝えないように、自動車の車輪はサスペンションを介して車体に取り付けられている。サスペンションにより、車輪は路面の凹凸ばかりでなく、車体のローリング運動(横方向への車体の傾斜)やピッチング運動(前後方向への車体の傾斜)によっても揺動

する。車輪の揺動により車輪と車体の角度は変化するので、車輪に舵角がつき、操舵したと同様の効果が得られる。ローリング運動により舵角がつくので、この現象はロールステアと呼ばれる。ローリング運動は旋回運動に起因する横加速度によって生じるので、ロールステアを積極的に用いて後輪の舵角を微調整し、応答性を改善する方法がある。ところが、サスペンションは乗り心地性能に対しても影響が大きく、操舵応答性と乗り心地性能が高いレベルで両立しない可能性もある。そこで、4WSシステムでは後輪に操舵機構を設け、積極的に後輪を操舵し、旋回性能を改善する。図5の四輪操舵系では、後輪は操舵角と車体の旋回の角速度(ヨーレート)に応じて操舵される。操舵角に対し、望ましい旋回運動が数学モデルにより計算され、後輪は実際の旋回運動が望ましい旋回運動に一致するように操舵される。このような制御により、前輪だけの操舵や、機械式の四輪操舵では実現不可能な旋回運動が可能になる。この制御系の設計には、線形制御理論が用いられている[16]。

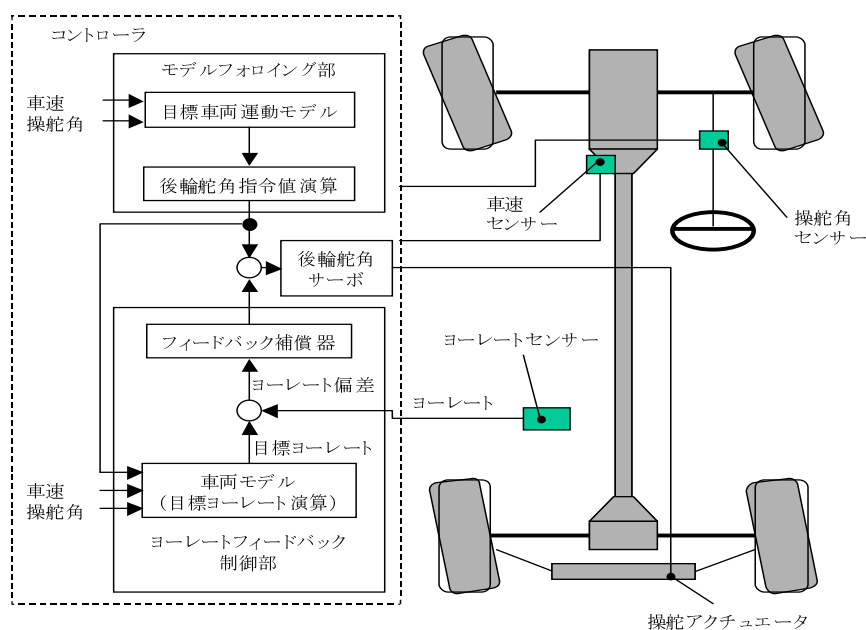


図5 四輪操舵系の構成

### 3.2.2 動力系の革新

馬力はトルクと回転数の積であり、エンジンである馬力を出すとき、トルクと回転数の組み合わせの動作点は無数にある。ガソリンエンジンの効率は動作点により大きく変化し、図6に模式的に示すように、ある馬力に対して、最も効率のよいトルクと回転数の組み合わせの動作点が存在する。また、エンジンは、ある馬力で、ある回転数のとき最大効率を発揮する。図の左下の低回転、低トルクでの動作点と、最大効率の動作点では効率が数倍異なる。無段階変速機や、ハイブリッド機関を採用すると、エ

エンジンをできるだけ効率の良い動作点で運転して、燃費を向上させることができる。

(i) 無段階変速機

従来の有段変速機では、変速比が段階的にしか選べないため、ある馬力がある車速で発生させようとする、効率のよい動作点からはずれた動作点でエンジンが運転されることがある。無段階変速機(Continuously Variable Transmission: CVT)を用いて、変速比が任意に選べるとすると、任意の馬力に対して、効率最良の動作点でエンジンを運転することができる。

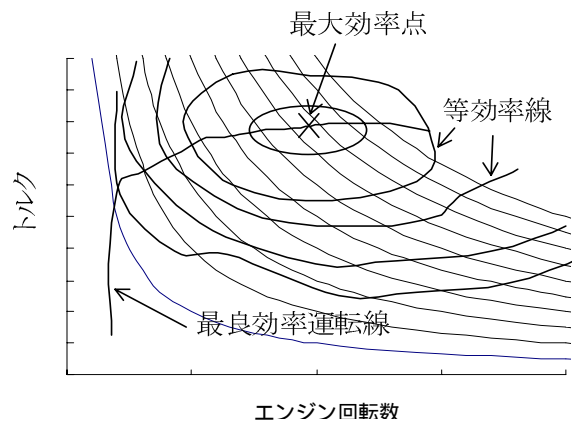


図6 エンジン効率(模式図)

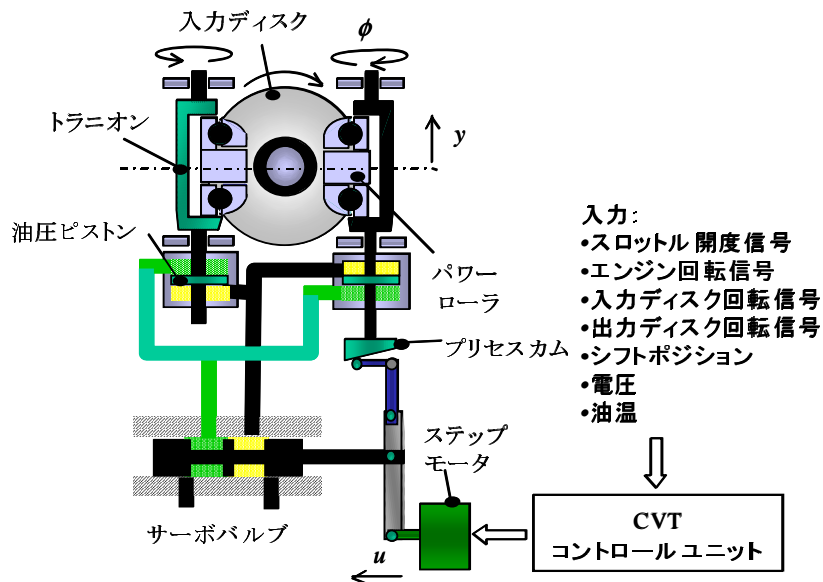


図7 トロイダル型CVT

図7にトロイダル型CVTの構造を示す。パワーローラを油圧で上下させると、パワーローラが回転(傾転)運動し、変速比が変化する。パワーローラの動きは不安定なの

で、油圧による機械的なフィードバック系によって安定化されている。パワーローラの傾転運動の動特性はディスクの回転速度に依存するほか、ディスクの形状に起因する非線形性を持つ。

変速比が目標値に対して行き過ぎると、車体に不要な加速度が発生し、乗員は違和感を持つことがある。正確に変速比を制御するために、文献[17]にはディスクの回転数変化に応じて制御ゲインを変化させ、かつ非線形性を打ち消す制御方法が提案されている。この制御系の設計には、最近の非線形制御理論の結果が応用されている。

## (ii) ハイブリッド機関と燃料電池

エンジンで発生したエネルギーを一時蓄え、必要なときに駆動エネルギーとして損失なく取り出せれば、効率が悪い動作点ではエンジンを停止し、最大効率に近い点でだけ運転することが可能になる。このような運転のためには、例えば、図8上のようなシリーズ型のハイブリッド機関を構成すればよい。シリーズ型では内燃機関は発電に用いられ、モータが自動車を駆動する。シリーズ型では、要求される可能性がある電力を、常に電池に蓄えておかななくてはならない。これは電池に十分な容量があれば可能であるが、現状で十分な容量を確保すると大型の電池が必要になる。しかも、扱う電力が大きいため、モータやインバータも大型化しがちになる。結果として、純粹なシリーズ型では自動車が重くなり過ぎ、燃費向上が達成できないことがある。一方、パラレル型のハイブリッド機関(図8下)は、駆動軸にエンジンとモータが繋がっており、モータでもエンジンでも自動車を駆動することができる。モータの役割はエンジンの補助であり、エンジンの動作点が最適点から大幅に外れることを防ぐことであると割切れば、モータや電池は比較的小型にすることができる。効率の良いハイブリッド機関を設計するには、モータをどのような条件で作動させるかという制御上の問題と[22]、パラレルよりの構成をとるかシリーズよりの構成をとるかというハードウェア設計上の問題を考慮することが必要であるが、この二つの問題は複雑に絡み合っている。

現在実用化されているハイブリッド機関の一例[20]を図9に示す。このハイブリッド機関は、クラッチ断続によりシリーズ的にもパラレル的にも動作し、両者の特徴を取り入れることにより高効率化を実現している。

燃料電池車は、シリーズ型ハイブリッド機関の内燃機関と発電機を燃料電池で置き換えた自動車と考えることができる。燃料電池で発電すれば、HCやNOxなど望ましくないガスの排出は少量である。また、燃料電池は内燃機関に比べエネルギー効率の点でも優れている。燃料電池の燃料は水素であるが、水素を携行するタイプの燃料電池車と、携行するガソリンやメタノールを車載の改質器で改質して水素を発生させる燃料電池車(以後改質器型と呼ぶ)がある。改質器型ではガソリンやメタノールを改質する時点でCO<sub>2</sub>が発生するが、その量は内燃機関の場合に比べ小さい。図10に改質器型の燃料電



池車の駆動系を示す。この機関は燃料電池(図中'FC system')の他に2次電池(図中'Battery')を有している。2次電池を持つことにより、下り坂などで自動車の位置エネルギーを回収することができる。また、要求された電力が大きい時、2次電池により改質器の電力供給を補助することができる。

燃料電池は、一種の化学プラントであり、複雑なダイナミクスを持つ。自動車用の燃料電池ではアクセル操作に対し素早い発電量の応答性が要求される点が、据え置き型の燃料電池と異なっている。効率が良く、応答性の高い電力供給を実現するために、燃料電池、改質器、2次電池、モータなどはそれぞれ個別に制御された上に、上位のコントローラ(図中'Vehicle Controller')で統合的に制御される。燃料電池は将来有望な自動車の動力源であり、燃料電池そのものの研究もさることながら、その制御法の研究が精力的に続けられている。

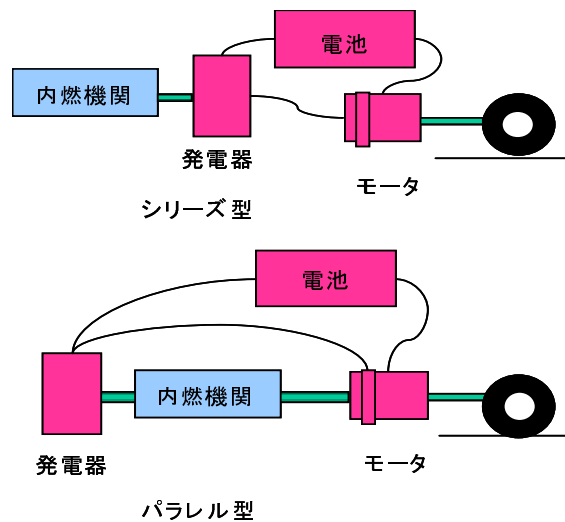


図8 シリーズ型・パラレル型ハイブリッド機関

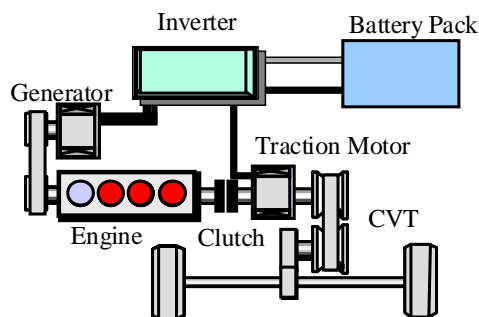


図9 実用されたハイブリッド機関の一例[7]

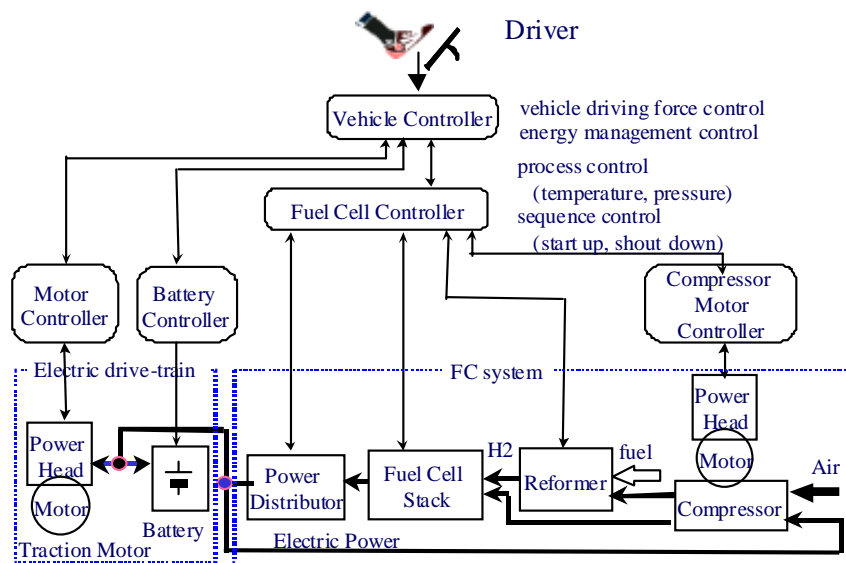


図10 燃料電池車の駆動制御系 [24]

### 3.2.3 ITSと制駆動系制御

動力系その他の自動車の制御系は、ネットワーク化され、統合制御される(図11参照)傾向にある。ITSにより、このネットワークには、従来の自動車にはなかったカメラやレーダ、ナビゲーションシステム、通信機などが接続される。カメラやレーダにより、自動車の制御に周囲の交通状況の情報が得られる。また、ナビゲーションシステムから、目的地の情報や、現在の位置(市街地なのか、郊外なのか、高速道路か、高地か低地かなど)の情報が得られる。通信機は車車間通信や路車間通信に用いられ、道路状態(例えば路面摩擦係数)や、目的地までの区間の混雑状況に関する情報が得られる。自動車制御に利用できる外界の状態や情報の種類や精度は、今後増えていくことが予想される。外界の情報を積極的に使う制御系の実用化は、これからの自動車制御の大きな流れの一つとなろう。ITSによりもたらされる情報の利用により、自動車交通の自動化や計画化が推進され、効率性(渋滞の緩和)、安全性(ヒューマンエラーの排除による事故の防止)の向上が期待されている。

ITSに関連して、高速道路での自動運転システム(Automated Highway System: AHS) [23]の公開実験が日本、米国、欧州、韓国で成功している。自動運転の実現にはまだ間があるが、ドライバーの運転行為を支援するシステムは、Adaptive Cruise Control (ACC : 自動車間制御)系 [18] [19] やレーンキープ制御系があり、すでに実用化されている。

ACC系はある条件が揃うと、レーダから得られる車間距離の情報をもとに、車間距離を制御する。制御系としては、エンジン、トランスミッション、ブレーキ系など、すべての制駆動系にまたがる統合制御系である(図12参照)。ACC系によりアクセルやブレーキ操作が少なくなり、ドライバーの負担が軽減される。

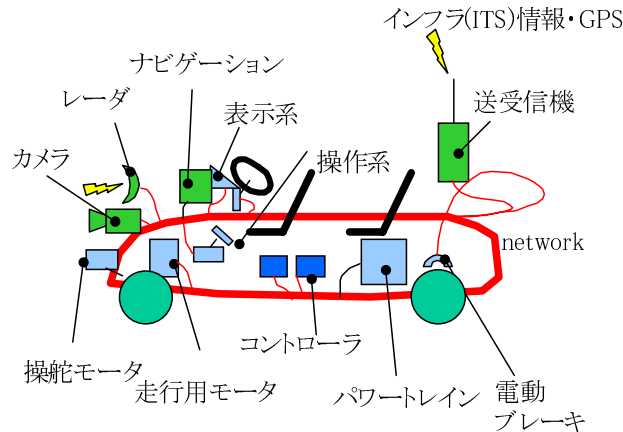


図11 自動車の統合制御系

他のITS情報の使い方として、ナビゲーションシステムやGPS情報を用い、制駆動系の動作を最適化することが考えられる[21]。ITSによる情報をどのように自動車の制御に生かしていくかは、未開拓の分野である。

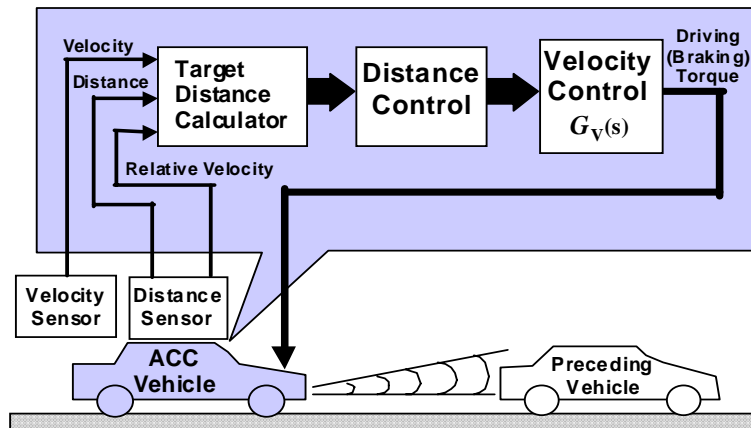


図12 車間自動制御システム[18]

### 3.2.4 おわりに

最近の自動車の技術開発状況の流れ：四輪操舵による運動性能の向上、動力系の革新による省エネルギー化、制御系による運転支援、ITSの可能性などについて述べた。自動車の性能や機能が革新されようとする過程で、新しい種類の制御問題の解決が必要とされている。この中には、制御対象の不安定性や非線形性、不確かさへの対応など、従来制御理論が追求してきた課題のほか、ネットワーク化された個々の制御系の統合や、ハイブリッド機関の例に見るようなハードウェアの構成を含めた最適化、予測情報の有効利用など、かつてなかった新しいタイプの制御問題が含まれている。これら

の問題解決は環境問題や交通事故の防止、渋滞の解消に直接的に関わっており、社会に強いインパクトを与えると考えられる。

## 参考文献

- [1] 木下源一郎、江尻正員、横断型基幹科学技術としてのロボティクス、計測と制御、42、3、pp.209-214、2003
- [2] 社会支援形ロボット応用技術調査専門委員会、社会支援形ロボットの技術と応用、電気学会技術報告、第809号、2000
- [3] 新エネルギー・産業技術総合開発機構、フレンドリネットワークロボティクス、平成8年度 先導研究報告書、NEDO-PR-9606、1997
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構、フレンドリネットワークロボティクス、平成9年度 先導研究報告書、NEDO-PR-9706、1998
- [5] 製造科学技術センター、次世代人間協調・共存型ロボットの応用に関する調査研究成果報告書、平成13年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託、2002
- [6] T. Yamashita、 M. Mori: Engineering Approaches to Function of Fingers、 東京大学生産技術研究所報告、第3巻、第3号、pp.60-110、1963
- [7] 日本ロボット学会編：日本のロボット研究の歩み(DVD-ROM)、2002
- [8] <http://www.jara.jp/>
- [9] (社)日本ロボット工業会、21世紀におけるロボット産業高度化のための課題と役割に関する調査研究、2000
- [10] H. .O.Lim and A.Takanishi: A biped humanoid robot for human-robot coexistence、 Proc. of IEEE Inter. Conf. Humanoid Robots (Humanoid 2000)、2000
- [11] <http://www.honda.co.jp/robot/>
- [12] 井上、加賀美：ロボットの知能とシステム統合：ヒューマノイドを例にとって、日本ロボット学会誌、20、5、pp.464-469、2002
- [13] <http://www.kawada.co.jp/ams/hrp-2/index.html>
- [14] McRuer, D. T. et al.: Review of Quasi-Linear Pilot Model, IEEE Trans. on Human Factor in Electronics, HFE-8, 231/249 (1967)
- [15] McRuer, D. T. and R. Klein: Effects of Automobile Steering Characteristics on Driver/Vehicle Performance for Regulation Task, SAE Paper 760778 (1976)
- [16] 伊藤、藤代、川邊、金井、越智：四輪操舵車の新しい制御法、計測自動制御学会論文集、23-8、828/834 (1987)
- [17] 川邊武俊、城 新一郎：トロイダル型無段変速機の非線形サーボ制御装置の設計、電気学会システム・制御研究会資料、SC-02-3 (2002)
- [18] 東又、安達、橋詰、田家：ブレーキ制御付きACCの車間距離制御系の設計、自動

- 車技術会学術講演会前刷集、1999秋期大会144-99、5/8 (1999)
- [19] 岸本、前出、渡辺、橋口、小坂：プレビューディスタンスコントロールシステムの開発、三菱自動車テクニカルレビュー、8、41/47 (1996)
- [20] 中村、中田、後藤、青山：新型車ティーノハイブリッドについて、NISSAN TECHNICAL REVIEW、47、97/101 (2000)
- [21] Wältermann, P.: Adaptive Energy Management for a Series Hybrid Vehicle, Preprints of IFAC Workshop Advances in Automotive Control, February 26-March 1, 1998 Mochican State Park Loudonville, Ohio, USA 109/114 (1998)
- [22] Kleimaier, A. and D. Schröder: Optimization Strategy for Design and Control of a Hybrid Vehicle, Proceedings of 6th International Workshop on Advanced Motion Control March 30-April 1, 2000 Nagoya Institute of Technology Nagoya, Japan 459/464 (2000)
- [23] Shladover, S. E.: Review of the State of Development of Advanced Vehicle Control Systems (AVCS), Vehicle System Dynamics, 24, 551/595 (1995)
- [24] Tamura, T., M. Ura, M. Sasaki, T. Imaseki, K. Oshiage and T. Hirota: Development of the Nissan Fuel Cell Vehicle, 2000 Future Car Congress Proceedings, April 2-6 2000 Hyatt Regency Crystal Citäy, Arlington, Virginia, USA, SAE papers 2000-01-1584 (2000)

## 第4章

### 科学技術重点4分野と制御工学

本章では、第2期科学技術基本計画において重点分野とされたライフサイエンス、情報・通信、環境、ナノテクノロジー・材料の4分野における制御工学の重要性を述べる。この4分野の中で、制御工学は環境問題を1970年代から対象としてきた。環境を一つの動的システムととらえ、多くの研究がなされ、実際に成果が得られてきた。それに対して、情報・通信分野における制御は、情報通信の個別分野の技術として発展してきた。それを制御工学という横断的技術のもとに発展させる動きが最近現れてきた。ライフサイエンス分野においては、対象である生物はダイナミクスをもつ動的システムであり、制御工学の知見がその発展に大きく寄与することが期待されている。ナノテクノロジー・材料分野においては、精密な操作が必要であり、高度な制御が不可欠である。

#### 4.1 環境分野における制御工学

1972年に発表されたローマクラブのレポート「成長の限界」は、世界がこのまま持続するならば、資源、食料、環境汚染のいずれかの限界により人類の成長は崩壊するということを、世界の経済、資源、環境などを取り入れたシステムダイナミクスを表す数式モデルで提示し警告したことは、極めて大きなインパクトを与え、その後の関連する多くの研究にモデリングの重要性を認識させ、またモデルによる予測の可能性を示した点で強力な影響力を与えた。環境問題は、人類が21世紀において持続的発展を維持するためには地球規模で解決すべき重要課題であり、環境に関する研究はそれぞれの関連する学問分野との連携をとりつつ総合的、横断的な対策や技術として展開されてきた。このような状況で、モデリング、制御、システム、情報、リスク管理という横断的でシステム統合の視点からのアプローチが望まれる。

##### 4.1.1 環境問題におけるシステム制御技術の基本的な役割

###### (i) システム制御からみた環境問題

環境問題の大きな課題の一つは地球温暖化である。これを解明するには三つの課題がある。第1は、地球温暖化のメカニズムであり、大気中の温室効果ガス濃度の変化とそれによる地球の気候変化の仕組みについて、多くの不確実な点が残されている。第

2は、地球温暖化の影響であり、温暖化やそれに伴う海面上昇が自然環境や社会経済にどのような影響を与えているかについては、解明されていないことの方が多い。第3は、地球温暖化の対策についてであり、各種の対策技術や政策の有効性を評価するためには、関係する技術システムや社会経済システムの体系的解明とそのモデル化が必要である。また対策技術の評価は、CO<sub>2</sub>を削減するための効率的な技術のデータベースに基づき、CO<sub>2</sub>の削減可能性の指標により行うことができる。

このように、環境問題はシステム制御工学の研究対象として、問題の捉え方、アプローチや手順、取り組むべき新しい方法論や課題などにおいて共通点が多いことが認識できる。従来のシステム制御工学的アプローチの標準的手順に沿って考えると、まず、制御対象と制御目的を明確に定式化すること、次に目的に応じた制御対象のモデルを様々なツールと観測可能なデータを用いて求めること、そして制御目標を達成するための評価指標や拘束条件をモデル化すること、最後に、目標を達成する対応策や制御手段を求める、という手順を繰り返すというフローにまとめられる。

システム制御工学の視点からの環境問題へのアプローチについてもう少し詳しく検討してみよう。

## (ii) モデリングにおける役割と課題

環境問題を考察する場合に必要なモデリングを行うには、まずその目的を明確にしなければならない。環境問題では種々の目的が考えられるが、おおよそ、以下のようにまとめられる。

- (1) 対象とする環境システムで起こっている物理的、化学的、生態学的、経済学的、人間社会学的現象のメカニズムを解明または説明するため。
- (2) ある変数や入力の変化が環境指数や、気候、生態系、社会経済活動の諸変数にどのような影響を与えるかを明らかにし、その因果関係や影響度を評価するためのモデルを作成し、環境計画や施策を決定するため。
- (3) 作成したモデルにより環境システムに含まれる重要な変数の将来傾向を予測し、環境施策に有効に利用するため。

例えば、環境システムのメカニズムを数式モデルとして表現したものとして、大気汚染モデル、河川、湖沼、海洋などの水環境汚染モデル、大気循環モデル、気象変動モデルなどが挙げられる。大気循環モデルでは、例えば、流体力学方程式、質量保存則、熱力学、などの物理化学法則と境界条件及び外部から与える入力条件などにより記述される。最近のコンピュータの計算能力から、忠実なモデル計算が可能となり精緻なモデルが数多く提案されるようになった。これらのモデルは統合モデルを得るためのサブシステムとして利用されているものも多い。

環境政策を策定するために作成する統合的なモデルの一例に、図1に示すAIM(国立環境研究所などにより開発されたモデル)がある。気候モデル、社会経済活動モデル、

生態系モデル、エネルギーシステムモデルなどをそれぞれ統合したものである。統合モデルの目的である総合評価の一つの特徴は、例えば、温暖化によりもたらされる損失コストと温暖化を防止するための対策コストの両者を考慮した評価規範を最小化するように対応策を策定することができ、これによりCO<sub>2</sub>の制御目標値がモデルにより与えられる点にある。この場合、損失コストを評価するには、CO<sub>2</sub>の制御濃度と気温上昇の関係、気温上昇による人間社会と生態系への影響、海面上昇による損害、など様々な影響をモデルにより推測する必要がある。対策側のコストにも技術開発や省エネルギーなど経済産業活動モデルによるコストの推定が必要となる。このように、評価規範にもモデルの不確かさが大きく影響する点に特有な難しさがある。また、各システムを構成するサブシステムが不確かさをもつ状況下で、システムまたは統合システムを構築していく一般的な手法は確立していない。自然現象を数式で記述したモデルと人間を含む社会経済モデルとの統合は、画一的には行えない。個々のシステムの不確かさがそれぞれのモデルでは許容できても、統合モデルの不確かさに大きな影響を与えたり、対策の選定に大きな影響を与えることがあるからである。

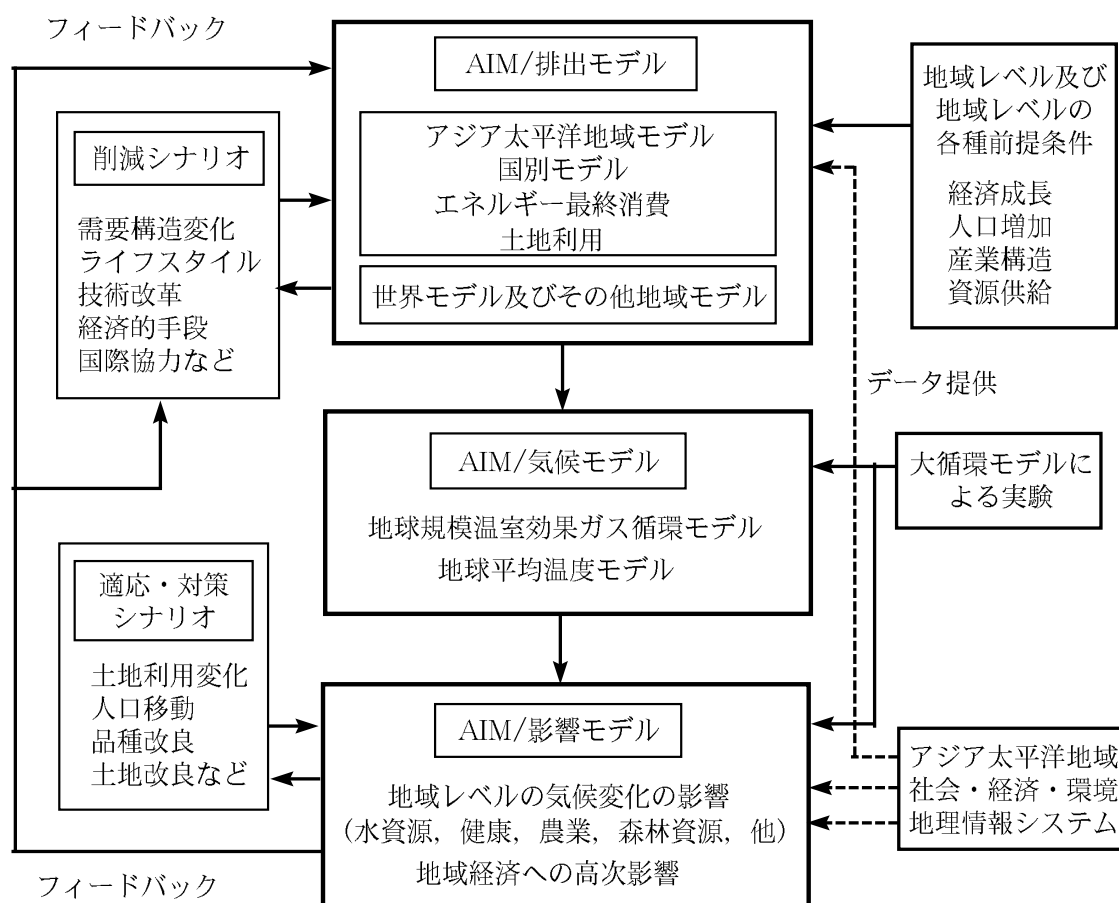


図1 統合評価モデル(AIM) [1]



環境問題で現れるモデルは、個々のレベルで、ユニット、セル、サブシステムからなる複合したシステムであり、それぞれが構造的あるいは非構造的な不確かさやパラメータの不確かさ、ランダムネスを含むだけでなく、各サブシステムをリンクする部分にも不確かさを含む。このリンクは、時間的なスケールと空間的なスケールに応じて、ダイナミクスを含む場合と含まない場合、集中定数系か分布定数系で表すか、境界条件をどのように与えるかなど、厳密な記述は難しい。このため、パラメータの設定によってはモデルによる予測結果や評価結果が大きく影響される問題も多い。モデルの信頼性を高めるには、空間的・時間的なスケールに適合した十分な観測データ、モニタリングが可能であれば、個々のサブモデルの精度は向上できるが、これらを複合したモデルの精度を上げるには、新しいモデリングの方法論が課題となってくる。各サブシステムのモデリングの手法も、同一のアプローチではなくそれぞれに適した方法論が必要となろう。例えば、物理化学的な現象モデリングと観測データに基づくモデリングとを有効に融合したモデリングの手法の開発や、モデルの複雑度とモデルの精度の適切な選択が目的に応じて存在すると考えられる。

### (iii) 評価指数の設定と適切な方策の決定

システム制御工学では、特に制御理論では、評価規範は二乗規範、最悪規範、などのもとで理論構築がなされてきた。しかし、対応策が有効であるためには、個々の対象に最も適合した評価指標でなければならない。評価指数はどのように設定すればよいのだろうか。評価指標が目指す目標として、以下の視点が重要である。

- (1) 持続可能な社会システムの発展の達成
- (2) ゼロエミッションを実現する循環型システムの達成
- (3) 自然生態系への影響を抑制する環境調和型システムの達成

大量な生産、消費及び廃棄を極力抑制し、環境への負荷を軽減化することを目指した評価を行うために、経済社会システムにおける物質のフローとエネルギーのフローを解析し、評価することが考えられる。個々の機器の設計においては、エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>の排出量などの削減と効率の向上などによる影響が具体的な評価指標に組み込まれる。例えば、CO<sub>2</sub>の削減を目指す目的のもとでは、経済活動により排出されるCO<sub>2</sub>が気候モデルにどのような影響を与え（例えば温度上昇）、その結果、健康、農業、森林資源などにどのような影響を与え、それが更に社会経済活動にどのようにフィードバックされるかというモデルが必要となる。このフィードバックパスに様々な削減シナリオが設定可能であり、これが制御系設計問題に対応する。

削減シナリオとして、循環型社会を目指した消費スタイル、ライフスタイルへの移行、循環型さらにはゼロエミッションを目指したライフサイクルアセスメント(LCA)を取り入れた生産スタイルへの移行、省エネルギーや未利用エネルギーの新技术の進展など、多くの対策を組み込むことが可能である。しかし、最終的には、評価指標は、環

境悪化による影響に伴う損失コストとこれを軽減する対策の経費コストを考慮したものになる。それぞれのコストの推定にも、上記のモデルを利用する必要があるため、モデルの不確かさに依存する。通常は、妥当と思われるシナリオを設定したモデルによる影響評価であり、いわゆる順問題的アプローチとすることができる。一方、制御系設計は、いわば逆問題であり、将来に達成したい望ましい状況に至るにはどのような施策や制御を行うべきかを与える問題である。現時点では、環境影響モデルは、このような施策や排出を行うと将来どのような状況になるかを予測するというシナリオ作成に利用されているが、制御工学的アプローチの場合には、いわば逆問題として捉え、適切な施策や制御を見出す問題に取り組むことになる。しかし、前述したように、モデルには多くの不確かさを含むこと、更には、評価指標にもモデルが必要であり不確かさが含まれることを考えると容易ではない。システム制御工学からみたモデリングに関する解決すべき課題の一つであろう。

不確かさをもつモデルを用いた方策をどのように決定するかという問題も、システム制御の課題である。環境負荷を低減化する最良のものかどうか不確定であっても、それ以外の効用が得られるならば採用するという方針や、一つの政策選択の場合は不確かさの影響が大きい、幾つかの方策を組み合わせることによりその影響を低減化し、また相乗効果が期待できる方策を採用するなど、現実的な方策が考えられている。いずれにしても、不確かなパラメータや構造をもつ各モデルをリンクしたものであり、モデルパラメータの設定によっては予測結果が大きく変わることもあり得る。しかし、モデルによる予測はかなり大胆な結果を的中させることも多く、例えば、環境問題と経済活動は相反するものと言われていた時代においても、環境調和技術の開発は新たな経済活力を産み出し国際競争力を増強させることを予測した例として、低公害車の開発で日本の車が世界の市場をリードしたという実証例がある。したがって、単なる将来予測だけではなく、将来どのような新しい状況が生まれるかを評価できる評価方法を見出すことも重要となる。

#### 4.1.2 エネルギー・環境問題を指向した産業制御技術

エネルギー・環境問題を指向した機器やサブシステムの開発では、様々な側面でシステム制御技術に与えられている課題が多い。地球温暖化を防止するには、LCAに基づいたCO<sub>2</sub>排出削減策と消費エネルギーの削減策が重要である。エネルギー源の供給側の立場からは、できるだけCO<sub>2</sub>排出量の少ない新しいクリーンなエネルギー源の開発と供給が重要課題であり、過渡的には、従来のエネルギー発生や伝送伝達の高効率化、損失の低減化などが不可欠となる。次に、エネルギー消費側では、省エネルギーが最大課題であり、省エネルギー機器の開発と普及、廃熱や廃エネルギーの有効利用、蓄熱式ヒートポンプなどのエネルギー貯蔵技術の促進等様々な技術開発が課題となり、現在

も進められている。さらに、個別の機器やシステムだけでなく、貯蔵システムと統合した広域性を考慮した地域エネルギー供給システムでは、より高効率でトータルな制御システム設計が課題となっている。また、省エネルギーの促進には、産業側だけでなく人間社会の大量消費型から循環型への消費スタイル、ライフスタイルへの移行が社会的に受け入れられる状況を促進することも大きな課題である。

以下、一般産業におけるCO<sub>2</sub>排出削減を目指した省エネルギーに関して、システム制御工学の視点から課題をまとめると以下のようになる。

#### (1) 鉄鋼業

製鉄、製鋼、熱延、冷延、その他関連設備からなるプロセスのエネルギー使用量と廃熱量は極めて大きく、以前から省エネと廃熱エネルギーの有効利用に対する取組が各プロセス毎に積極的に行われてきた。しかし、各プラントでは、依然未利用の廃エネルギーが多く、エネルギーフロー解析を行い、利用効率を高めるシステム開発が重要な課題となっている。また、トータルの廃熱利用ネットワークシステムとして考え、製鉄所外部との有効利用の方策を進めることも課題となる。

システム制御工学から見た課題として、個々のシステム、例えば、廃熱回収利用システム、動力への変換システム、燃料の燃焼方法の制御による省エネ、加熱・冷却プロセスの合理化、放射・伝熱などによる損失防止など多くの省エネ対策、全エネルギー効率の最適化を目指したシステムデザインなどが挙げられ、これらの分野においてシステム制御工学の役割が期待される。

#### (2) 石油・化学プラント産業

エネルギーの視点からは、省エネルギー対策が重要課題となる。例えば、ナフサエチレンプラントなどが挙げられる。一般に、化学プラントは多入力多出力システムであり、生産性、省資源、省エネなどを考慮した同時システム最適化、更には運転の安定化やボトルネックの解消を目指したトータルシステムデザインが行われている。また、ボイラや蒸気タービンなどの個別の機器に関しては、かなり精緻なシミュレーションモデルが開発されてきており、高効率化を含めて上記のトータルシステムの最適化が可能になりつつある。これらは今後もプラント制御工学の重要な課題である。

#### (3) 紙パルプ産業

廃熱利用とエネルギー損失の防止に重点を置いたプラント設備の開発は古くから行われてきた。各設備の省エネ化と省電力化についても積極的に取り組んできている。また、原料の多様化、リサイクルなどについても積極的な試みが早期から行われている。これらのプラント設計においてシステム制御工学の果たす役割は大きい。

#### (4) 自動車産業

排気ガスによる大気汚染問題については、古くから取組み、規制をクリアしてきた。また、燃費改善によりCO<sub>2</sub>削減への努力もなされてきた。現在、エネルギー消費とCO<sub>2</sub>排

出の低減化という二つの目標に向かって様々な研究開発が進められている。例えば、内燃機関とモータを組み合わせたハイブリッド車は既に市販され、一方では、代替燃料によるエンジン開発、例えば、電気、メタノール、天然ガス、水素などについて積極的な開発研究が進められている。ゼロエミッションを目指した燃料電池による電気自動車の市販も開始された。燃料電池とモータ駆動系とを組み合わせた複合システムは、化学プロセス系と電気・機械系からなる対象であり複雑な制御技術やシステム化技術が要求されている。このように、新しいクリーンエネルギーによる自動車の駆動制御やエネルギーの高効率化には制御工学の大きな貢献が期待される。

#### (5) 都市・建築分野

地域冷暖房システムは、大規模なプラント制御システムであり、制御技術の役割は大きい。また、新エネルギーの活用システムとして、例えば、ごみ焼却の廃熱利用とコジェネレーションシステム、海水や河川水を利用した地域冷暖房システムのトータルシステムデザインが行われている。また、効率的なエネルギー供給システムの開発が大きな課題となろう。都市全体で見ると、個々の住宅における太陽光パネル、住宅用燃料電池の普及、パーソナル空調もCO<sub>2</sub>削減への寄与は大きく将来可能になると思われる。

#### (6) 電力・エネルギー分野

コンバインドサイクル発電の熱効率を、これまでの蒸気タービンの40%から50%以上にまで向上させることができるが、プラント制御技術により安定運転が維持されている。コンバインドサイクル発電などの発電効率の改善や送配電の損失低減などが重要な課題となっている。また、従来の火力発電、原子力発電を含めた統合的な電力供給システムの構築が課題となろう。今後のエネルギー生成の高効率化を目指したコジェネレーションシステムの改善と普及が進められる。

エネルギー供給という側面からは、エネルギーの貯蔵、自然エネルギーの有効利用、新しいエネルギー源の開発が重要な課題となる。

##### (a) 燃料電池

燃料電池は、水素と酸素の反応によりエネルギーを生成する新しい方式であるが、現時点では軽量化、小型化、持続性、コストなどの点で研究が進められており、大型に関しては既に供されている。燃料電池自体は、小型の化学プラントであり、モデリングから様々な制御工学の手法を統合化した技術のバックアップが必要であり、今後の役割が期待される。

##### (b) 自然エネルギー

化石燃料に替わる自然エネルギーの利用は、CO<sub>2</sub>の排出を抑制する目的から今後ますます促進される。例えば、太陽光発電、海洋エネルギー利用（波力発電、潮流発電、海洋温度差発電、塩分濃度差発電）、地熱発電、風力発電などの研究が進められてい

る。これらの技術は、現時点では、大量の需要に安定に応えるエネルギー供給ができない、自然エネルギーの入力は、変動しやすく安定な電力を得るには制御技術が要求される、火力発電に対して地球温暖化対策への貢献度が定量的に大きなものではない、立ち上げ時のコストが高いなどの課題が指摘されている。自然エネルギーから電力への高効率な変換技術及び変動しやすい自然エネルギーからの安定な電力供給などには、制御理論、制御技術が果たす役割が大きい。さらに、過渡期においては一般家庭においても自然エネルギーである太陽光発電パネルによるものを併用する形態がとられるが、この場合エネルギー消費を与えられたトータルの評価指標を最適にするように管理するシステム開発にも大きな貢献をするであろう。

#### (c) バイオマス

環境調和型エネルギーとしてバイオマスが注目され、利活用のための技術開発が進められている。エネルギー生成の効率化のためには、センサー・アクチュエータ配置問題を含め、温度や成分等の分布定数系としてのモデリングと制御が課題である。

#### (d) 廃棄物燃焼炉と廃棄物発電

一般廃棄物に関しては、既に塵焼却炉の燃焼制御や廃熱利用システム及び地域冷暖房への有効利用など様々な高効率化が行われてきた。急速に増大している産業廃棄物に関しては、ダイオキシンの発生を抑制するガス化溶融発電システムなどが開発されつつある。これらのプラントでは、燃焼温度を高温に制御する課題などプラントシステム制御技術が期待されている。そのほか、クリーンコール技術なども進展しつつある。

#### (7) 上下水処理プロセス、その他

上記の環境問題以外にも、水環境、土環境、大気環境、騒音環境、その他システム制御工学が既にその対象としているシステムも多い。例えば、下水処理システムにおいて、環境負荷低減化を目指して、下水処理場から河川へ放出される放流水に含まれる窒素やリンの総量による水質規制をクリアしなければならない。このためには、水量や水質に関する詳細でかつ精度の高い数学モデルが必要となる。降雨から下水処理場に至る過程の水量や水質の変化を記述するモデル開発、下水処理場の処理過程における微生物による有機物分解やリンの除去過程の挙動をモデル化した活性汚泥モデルなどが必要となる。以上のように、数学モデル構築の目的は、水量や水質の時間変化の解析や予測、新しい下水処理場の建設に際しての建設規模や制御方式の計画、モデルを用いたオンライン制御などが挙げられる。これらのモデル構築とこれに基づいた水質制御は、まさにシステム制御の対象であり、今後、微生物を含む不確かな広域なダイナミクスをモデリングする新しい方法論の展開が課題と考えられる。

### 4.1.3 おわりに

21世紀を迎えて、環境問題は更に広範囲な科学、経済学、社会学などの分野と深い関

連をもつ問題となることは明らかであり、人間社会と地球環境との共生をいかに図るかを探求していくことが求められる。このような課題を解決するには、あらゆる角度から、またミクロな視点とマクロな視点の両面からも対処しなければならず、人類の総合的な努力があって初めて人間社会と地球環境との共生が達成できるものである。システム制御工学は、本来工学の多くの分野に関連する基盤的で横断的な性格をもっており、環境問題におけるシステム制御工学の役割と課題を総合的に解決し貢献していく必要がある。

(1) 地球温暖化問題やエネルギー問題などの環境問題に取り組むには、気候モデル、経済活動、生態系、エネルギー系など、個々の現象を解析したモデルだけではなく、これらが複合した現象モデル及び統合化した環境マクロモデルを作成する必要があり、このような大規模で複雑なモデリングにおいて、方法論、不確かさの評価と影響解析、データ解析、モデルによる将来予測、モデルによる意思決定や制御など、これまでのシステム制御工学の成果の展開とともに、新しいアプローチの開発についてもシステム制御工学は真剣に取り組むことにより多大な貢献が期待される。

(2) 地球環境問題に対処するためには、平常時のインフラの整備と災害時などの異常時の動的なインフラの整備が必要である。例えば、前者の場合、代替エネルギー源の開発、エネルギー利用の高効率化を目指したシステムのトータルデザイン、燃料電池自動車の普及、生産スタイルの変更など、様々なインフラの整備が欠かせないことは言うまでもない。また、後者は、タンカー事故や原子力機器の事故など地球環境への影響を与えるような災害に対する備え、すなわち動的インフラが必要である。このようなインフラの整備には、様々な制御手法や制御技術、システム最適化理論、システム統合化技術などが必要となり、システム制御工学の役割に期待するところが大きい。

(3) 21世紀は、ハードウェアのインフラだけでなく、情報のインフラが大きな役割を演じることになる。前項で述べたハードウェアのインフラの整備にも、情報インフラが重要なことは言うまでもないが、例えば、ライフサイクルアセスメントを適用し環境負荷を最小化するシステム設計を行うためには、様々な学問分野の膨大なデータベースが必要となり、横断的な情報インフラの整備は重要な課題となる。この情報インフラとこれまでのインフラとの融合は、まさにシステム制御工学の課題であり、システムインテグレーションの目指すところである。

なお、本節は、日本学術会議自動制御研究連絡委員会が2000年度にまとめた内部報告[2]を参考にした。

## 4.2 情報・通信分野における制御工学

本節では、情報・通信分野における制御工学の役割と必要性を、情報ネットワーク

におけるマルチメディアQoS制御という観点から考察する。考察においては、インターネットの枠組みを代表例として想定する。まず、インターネットにおけるマルチメディアQoS制御研究の必要性を述べる。次に、インターネットの階層構造に沿ったQoSの分類を行い、QoSマッピングを、各階層のQoS制御を束ねる基盤技術と位置づける。この視点により、これからのQoS制御研究の課題を考えている。

階層によって分類した従来のQoS研究は、大きく四つのカテゴリーにまとめられることを示し、それらのカテゴリー間にはギャップがあることを指摘する。さらに、この観点から、QoSマッピング研究の現状を調査し、問題点を明らかにする。その結果を踏まえて、QoS制御の今後の検討課題を、大きく次のようにまとめている。

- ( ) 物理レベルからユーザレベルまでを通したマッピング法の確立
- ( ) 複数メディアにわたるQoSマッピング法の確立
- ( ) 適切なユーザレベルQoSパラメータの選定とそれによる評価法の確立

#### 4.2.1 はじめに

近年では、情報処理と通信とが個別に語られることは少なく、それらが融合した形態で議論されるのが普通である。この融合した形態を、我が国では、**情報通信**と呼んでいる。情報通信という概念は、具体的には、**情報ネットワーク**という形で実現される。その代表例は、インターネットである。

情報ネットワークの目的は、そのユーザに情報伝達・処理サービスを提供することである。ユーザは人間であることが多いが、センサーやアクチュエータであるシステムも増えている。これらのユーザの要求を満足するような品質のサービスを提供することは、システムとしての必須要件である。このため、要求される**サービス品質 (Quality of Service: QoS)**を保証するような制御方式は、情報ネットワークの中核技術となっている。誤り制御、フロー制御、コネクション制御、輻輳制御、経路制御などの伝統的なネットワーク制御技術は、最終的にはユーザの要求を満足することを目標としている。

最近の情報ネットワークは普及発展が著しいため、ユーザが大幅に増加するとともに、要求も多様化している。そのため、ネットワークが扱う情報メディアも、伝統的なコンピュータデータに加えて、音声とビデオのような連続メディアや、センサーからの周辺環境情報やアクチュエータへの情報などの広がりを見せている。そして、これらのメディアを、単独ではなく、複数で有機的に構造化したマルチメディアとして扱わなければならないシステムが急増している。

本節では、情報・通信における制御工学の役割を、情報ネットワークにおけるマルチメディアQoS制御という観点から考察する。インターネットをはじめとするIPネットワークが支配的になっている現状に鑑み、便宜上、インターネットの枠組みを代表例

として想定して、以下の議論を行う。しかし、この枠組み自身も検討課題であることに注意しておきたい。

本節では、まず、インターネットにおけるマルチメディアQoS制御研究の必要性を述べる。次に、インターネットの階層構造に沿ったQoSの分類を行い、QoSマッピングの重要性に触れるとともに、QoSパラメータの決め方を説明する。続いて、こうして分類した従来のQoS研究は、大きく四つのカテゴリーにまとめられることを示し、それらのカテゴリー間にはギャップがあることを指摘する。さらに、この観点から、QoSマッピング研究の現状を紹介するとともにこれからの検討課題を明らかにする。

#### 4.2.2 マルチメディアQoS

##### (i) マルチメディアQoS制御研究の必要性

インターネットにおいてマルチメディアアプリケーションが増加している理由は、情報技術(IT)分野全般においてマルチメディアが重要となっているのと同じ理由による。すなわち、ITの主たる利用者である人間は、五感(聴覚、視覚、触覚、嗅覚、味覚)によって外界の状況を認識し、種々の活動を行っているからである。電話に見られるがごとく、音声のような単一メディアだけでも人の情報活動には大きな助けとなる。しかし、人は個々のメディアを単に線形加算的に利用しているのではなく、それらの相互作用によるシナジー効果を利用している。これは、心理学の分野における感覚統合(sensory integration)に相当するものである。

また、インターネットは、地理的に離れた人間同士や人と計算機に対して情報伝達サービスを提供し、その情報活動を支援する。したがって、そのQoS制御の最終目標は、主として人間を主観的に満足させることにある。

このように、人間の感覚統合の特質とインターネットの情報伝達サービスというミッションから、インターネットではマルチメディアQoS制御が重要となる。

##### (ii) インターネットにおけるQoSとQoSマッピング

インターネットにおけるQoSは、その階層に従って、物理レベル、ノードレベル、ネットワークレベル、エンドツーエンドレベル、アプリケーションレベル、ユーザレベルの6レベルに分類できる。

インターネットにおけるQoS制御の最終目標は、ユーザレベルQoSを満足することにある。したがって、所望のユーザレベルQoSを達成できるように下位層のQoSを制御する必要がある。このように、異なる階層間のQoSを対応付けることをQoSマッピングと呼ぶ[3]。QoSマッピングは、各レベルのQoS制御を束ねる要となるものであり、情報ネットワークにおける制御技術の基盤となる。

QoSは、QoSパラメータによって定量的に表現される。その適切な決め方は簡単ではない。ビデオ、音声、コンピュータデータの3種類のメディアに対して、現在よく使



用されているQoSパラメータの例と各レベルでのQoS制御技術とを表1に示す。この表から分かるように、エンドツーエンド以下のQoSパラメータとQoS制御技術は、基本的にはメディア種別には依存していない。これは、インターネットが階層化アーキテクチャを採用していることから生じる当然の性質である。

表1 現在よく使用されているQoSパラメータとQoS制御の例

QoSのレベル	QoSパラメータの例			QoS制御の例
	ビデオ	音声	コンピュータデータ	
ユーザ	MOS (Mean Opinion Score)			
アプリケーション	PSNR、 フレーム レート	PSQM、 PESQ	遅延、 因果逆転率	メディア同期制御、ビデオ動的解像度制御、 誤り制御、因果順序制御、CPU処理負荷制御
エンドツーエンド、 ネットワーク、 ノード	スループット、PDU遅延、 遅延ジッタ、PDU欠落率			経路制御(ネットワークレベル)、 誤り制御、フロー制御、 コネクション制御、輻輳制御
物理	伝送速度、SNR、ビット誤り率			通信路等化、送信電力制御、 ダイバーシティ

一方、アプリケーションレベルQoSパラメータとQoS制御技術は、メディア毎に考える必要がある。表1では、例えば、ビデオの場合には、1枚のビデオフレームの画質を表すPSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)や、1秒間に送出されるビデオフレーム数を表すフレームレートが用いられている。音声の場合には、人間の耳内音圧スペクトルレベルのひずみを評価尺度とするITU-T勧告P.861 PSQM(Perceptual Speech Quality Measure)や、PSQMを改善しパケット欠落や遅延揺らぎなども反映できるようにしたITU-T勧告P.862 PESQ(Perceptual Evaluation of Speech Quality)がある。

音声やビデオのような連続メディアの場合には、そのアプリケーションレベルQoSには時間構造品質を反映させる必要がある。また、マルチメディアの場合には、複数メディア間の関係を表現するQoSパラメータも必要である。表1に示すQoSパラメータは、これらの条件を十分には満足していない。

メディアの時間構造を考慮したアプリケーションレベルQoSは、メディア同期品質であり、それを保証するのが**メディア同期制御**である。メディア同期は、メディア内同期、メディア間同期、端末間同期に分類される[4]。

以上述べたように、アプリケーションレベルQoSパラメータには、多くの種類があるが、ユーザレベルQoSパラメータへ適切にマッピングできるものであることが望ましい。

ユーザレベルQoSパラメータは、人の主観を表現するので、アプリケーションレベル以下のものとは異なった尺度となる。よく用いられるのは、平均オピニオン評点(Mean Opinion Score: MOS)である。

#### 4.2.3 マルチメディアQoS研究の現状[5]

インターネットにおける6種類のQoSのうち、エンドツーエンドレベル以下のレベルのQoSについては、従来多くの研究が行われている。しかし、アプリケーションレベルとユーザレベルの研究は少ない。中でも、ユーザレベルQoSについては、これが人間の主観に依存するため、科学的定量的な研究の対象としては十分に認知されておらず、限られた条件の下でのわずかな研究が行われているにすぎない。しかも、従来のほとんどの研究は、音声 (Voice over IP: VoIP) のみか、または音声なしのビデオのみ、あるいはコンピュータデータのみいずれか一つのメディアを対象としているにすぎない。また、ユーザレベルQoSパラメータとしてはMOSだけが用いられている。MOSは、基本的には順序尺度(大小関係のみが意味を持つ)であり、その値自身に意味がある尺度(比率尺度)でも、値の差に意味のある尺度(距離尺度)でもない。したがって、MOSは、単一メディアの主観評価には頻繁に使用され実際的には有用な尺度であるが、マルチメディアに対して適切な尺度である保証はない。

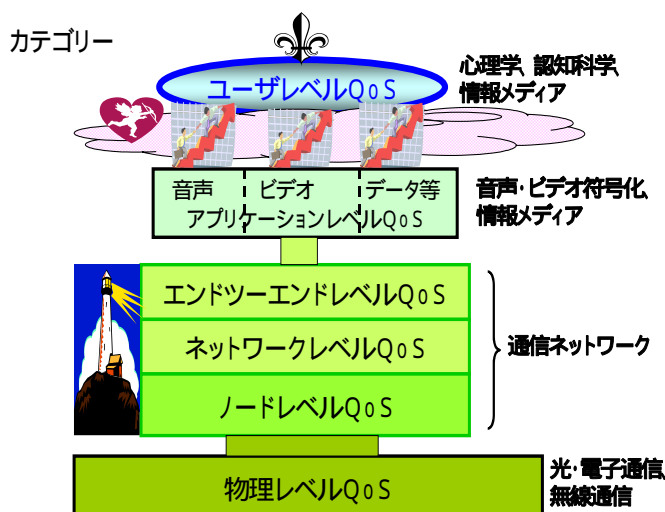


図2 マルチメディアQoS研究の現状

従来のマルチメディアQoS研究を分類すると、図2のように、大きく四つのカテゴリー、すなわち、物理レベル、ノード、ネットワーク、エンドツーエンドレベル、

アプリケーションレベル、 ユーザレベルに分けられ、それぞれが異なった分野の研究テーマとなっている。例えば、 は光・電子通信及び無線通信研究者、 は通信ネットワーク研究者、 は音声・ビデオ符号化研究者や情報メディア研究者、 は心理学者・認知科学者や情報メディア研究者によって研究されている。このため、各カテゴリー間には種々のギャップがある。これらのギャップは、QoS制御の最終目標(ユーザの満足)を効率的に達成するネットワーク構築技術確立の大きな障害となっている。

そのなかで、カテゴリー とカテゴリー の間は、比較的ギャップが小さく、互いの研究成果の交流がある。また、カテゴリー とカテゴリー の間も細いながらも研究交流のパイプは確立されている。しかし、ユーザレベルQoSについては、通信ネットワーク研究者からは、工学の主要な対象とは見なされず、言わば天上の別世界のように見られている。通信ネットワーク研究者は、この別世界に、個別のメディアからの雲中の細い階段を通して到達し、MOSというわずかの雲の隙間からユーザレベルQoSの世界を垣間見ようとしているのが現状である。一方、ユーザレベルQoSの研究者は、地上の俗事(カテゴリー ~ )には関心が薄い。特に、カテゴリー と については、無損失・無誤り・無遅延のネットワークを想定したブラックボックスと見なしている。また、これまで多くの成果が得られているカテゴリー の研究は、最終目標であるカテゴリー の方向を指し示す灯台とはなっても、それ自身が目的地にはなり得ない。

#### 4.2.4 QoS制御研究の課題

QoS制御は、QoSマッピングによって束ねられる。したがって、本節ではこの視点により、これからのQoS制御研究の課題を考える。前節で述べたことから明らかなように、QoSマッピングに関する従来の研究には、次の三つの問題点がある。

- (1)全レベルを通してのマッピングの研究がない。特に、ユーザレベルへのマッピングの研究が少ない。
- (2)音声またはビデオのみの単一メディアを扱っている研究がほとんどである。
- (3)ほとんどの研究は、ユーザレベルQoSパラメータとしてMOSを用いている。

これらから、QoSマッピングを軸としたQoS制御の今後の検討課題を次のように整理することができる。

- ( ) 物理レベルからユーザレベルまでを通したマッピング法の確立
- ( ) 複数メディアにわたるQoSマッピング法の確立
- ( ) 適切なユーザレベルQoSパラメータの選定とそれによる評価法の確立

以下、各課題について、更に詳しく考察する。

( )を解決するためには、前項で述べたカテゴリー間のギャップを埋めなければならない。従来のQoS制御では、一つのレベル内で制御目標が設定され、他のレベルの制御目標との関連性には、大きな関心は払われていなかった。しかし、多層の制御目標

は相互に密接に関連し、各レベルの制御目標は最上位目標に適合するように調整されなければならない。さらに、情報ネットワークにおいては、制御対象と制御実行主体との間に遅延がある場合が多く、しかもその遅延がランダムに変動するという特徴がある。この特徴も考慮に入れた多層制御目標を持つシステムの制御方式と制御理論の開発が望まれる

( )については、従来の情報ネットワークで扱うメディアは、コンピュータデータ、音声、ビデオが主であり、人間の五感の内、聴覚と視覚に訴えていた。最近では、触覚や嗅覚を扱う研究も行われるようになってきている。しかし、これまでの情報ネットワークのアプリケーションの多くは、外部世界との力学的相互作用がないものであった。生産現場などでの制御用ネットワークでは、工作機械やロボットを有機的に結合するサービスが提供されていた。監視や制御情報の供与のために、この種のネットワークに人間が関与することもあるが、その場合でも関与は視覚・聴覚を介してであり、力覚的なものはなかった。力覚的な制御を行うシステムは、スタンドアローンでは多いが、ネットワーク環境では少ない。この種のネットワークシステムにおける制御の研究が期待される。

( )の課題をより深く検討するためには、人間の感覚統合という性質を考慮に入れなければならない。この問題をメディアの相互補完性[6]という観点から捉え、QoS制御に応用することが考えられる。これは、例えば、ビデオ品質が悪くても、高い音質や触覚品質で全体の主観品質を補償できるというものである。この研究に際しては、人の認知方法とメディアとの関係を明らかにする必要がある、その結果を踏まえたQoS制御方式を開発しなければならない。電話網開発の初期において聴覚と通信との関係を検討したり、テレビ放送の実用化の前にビデオ情報量と視覚との関係を模索したように、情報ネットワークという環境内での人の五感の性質を解明しなければならない。また、非人間の通信主体(機械)でも、ある種の“感覚統合”を考える必要があるかもしれない。ただし、この場合には、人の五感ではなく、電気、力学、熱のような異なるエネルギー形態間の補完ということになるであろう。このように、将来のQoS制御は、従来のネットワーク制御や伝統的な制御工学の単なる加算的延長ではなく、パラダイムの転換が必要となる可能性がある。

( )の問題の解決には、距離尺度や比率尺度となるユーザレベルQoSパラメータが必要である。そのための一つの方法が、計量心理学的手法による心理的尺度である。この尺度は、MOSと比べれば正確ではあるが、従来の測定方法では、時間と手間がかかるという問題がある。より簡便で且つネットワーク環境に適した測定方法を考案することが望まれる。その際、所望のユーザレベルQoSを満足ように下位レベルのQoS制御を行うのであるが、その制御方法はユーザレベルQoSへのマッピングが容易であることが重要な要件となる。( )で述べた階層的な制御目標がある場合に、最終目標がユーザ

レベルQoSとなるのである。このような場合の制御目標の決定法は自明ではなく、これからの研究が待たれる。

以上述べた課題を解決するためには、多様な分野の手法と相互の連携が必要である。マルチメディアQoS制御が、定量的な議論が可能となる技術体系へと発展することを期待したい。

### 4.3 ライフサイエンス分野における制御工学

太古における生命の起源から、激動の環境変化に適応しながら今日に至る生命の悠々たる進化過程において、また発生・分化・成長・老化・死といった生命の短い一生においても、**制御は生命活動のあらゆる時間スケールで働いている**。多彩な生化学反応を示すミクロな分子レベルから、細胞、組織、器官、個体、さらには生態圏に至るマクロなレベルまで、**制御は生命システムのあらゆる階層に遍在している**。自己組織化、秩序形成、新陳代謝、恒常性維持、そして知能の創生など、**あらゆる生命現象に制御はなくてはならない役割を果たしている**。生命と人工システムとの対比から生まれた制御工学は、こうした神秘的な生命現象を解明するのに必要不可欠となってきた。また、医療福祉や食品産業、生態環境の保全など、ライフサイエンス関連分野のあらゆる研究開発と産業応用に制御工学は大きな威力を発揮してきている。

「よりよく生きる」、「よりよく食べる」、「よりよく暮らす」という三つのキャッチフレーズで、総理主宰のBT戦略会議がまとめた「**バイオテクノロジー（BT）戦略大綱**」[7]は、21世紀におけるバイオ分野の大きな飛躍を目指して、バイオ関連の医療・健康、食料、環境・エネルギーの各分野の

研究開発の圧倒的充実

産業化プロセスの抜本的強化

国民理解の徹底的浸透

という三つの戦略及び各戦略に関する分野別の具体的な行動計画を示している。また、IT・機器・NT（ナノテクノロジー）とBTとの融合が強調され、バイオツール、バイオインフォマティクスへの重点投資を指摘している。しかしながら、BTのあらゆる分野に普遍的・横断的な役割を果たしている制御工学についてほとんど触れておらず、制御工学の重要性についての認識はかなり欠けていると言わざるを得ない。

本節では、生命原理の解明、生命活動の保全、生物資源の活用の三つの側面から、ライフサイエンス関連分野における制御工学の役割を明確にする。また、近年におけるヒトゲノムプロジェクトの完成を代表とする分子生物学の進展や、脳科学研究、バイオ・ミメティック研究の展開などを背景に、制御工学はこれからのバイオ分野の発展にとって決定的な影響力を発揮することを強調する。それと同時に、生命の基本原理解に対する探求との連携を強めることによって、これからの制御工学の新たなブレイ

クスルーや、知能ロボットなどの高度な人工システム制御の発展への期待を展望する。

#### 4.3.1 生命原理の解明と制御工学

##### (i) 分子レベルの制御

生命の本質を決定付けると言われている分子生物学のレベルでは、近年におけるヒトゲノムプロジェクトの完成で、ゲノムに高々4万前後の遺伝子が何十万もの蛋白質を合成し、また、蛋白質の多彩な制御で遺伝子発現を調節していることが定性的に解明されつつある。次のステップの展開として、アミノ酸の配列で形成される蛋白質の合成過程、立体構造とその機能を探求するプロテオーム研究が始められるようになっている。

DNAからRNAを経て蛋白質に至る遺伝子発現の全過程において、以下に示す分子レベルでの基本的な制御が働いている[8]：

- 1) DNA→pre-RNAにおける遺伝子転写の頻度とタイミングの制御 (*transcriptional control*)
- 2) pre-RNA転写→mRNAにおけるpre-RNAのスプライシングとその他の制御 (*RNA processing control*)
- 3) 細胞核内で生成したmRNAを選択的に細胞質の特定部位に輸送する制御 (*RNA transport and localization control*)
- 4) 細胞質内のmRNAを選択的にリボソームで翻訳される制御 (*translational control*)
- 5) 細胞質にある特定のmRNAの分子構造を選択的に分解する制御 (*mRNA degradation control*)
- 6) 合成された蛋白質を選択的に活性化・不活性化、分解させる制御 (*protein activity control*)。

現段階では、これらの制御についての理解はまだ部分的で定性的であるとしか言えず、そのメカニズム全貌の解明はまだ先のことであろう。こうした大規模で複雑に絡まっている遺伝子ネットワークや蛋白質ネットワークの働きを明らかにするためには、個々の分子やそれに関わる生化学反応に着目するだけでは困難で、システム全体としての制御原理を追求する必要がある。

また、制御工学の理論を用いて、得られた生理学の実験データから、モデル同定や数理解析、最適化などの手法を有効に利用することによって、新たな生化学反応やそれに関わる重要な分子構造をより効率的に発見することも可能であろう。

##### (ii) 恒常性維持の定値制御

分子レベルの制御だけでなく、ミクロな生命現象としての細胞レベルにおける物質の濃度勾配の制御や、サーカディアンリズムに関する生物周期の制御、またマクロな

生命現象としての個体における体温、血圧、呼吸、内分泌、血糖などの状態維持に見られるように、生物は、環境からの外乱に対して常に一定の内部状態を保持するよう、多くの組織や器官間の複雑に組み合わされたネットワークで制御されている。生理学で恒常性（ホメオスターシス）と呼ばれているこれらの生命現象は、しばしばフィードバック制御（定値制御）との対比によって説明されてきた[9]。こうした生命現象の解明に制御は大変重要である。

しかし、生物では、通常、複数の特性の異なる冗長なフィードバックループ間の協調によって、系全体として環境変化に頑健となるよう、システムが作り上げられている。このことから、従来の制御工学における単純なフィードバック原理だけでは完全に解釈できない要因があると考えられる[10]。高度な柔軟性や信頼性を確保するためのシステムの冗長性とシステムの効率性とのトレードオフで構築された生物システムについて、制御工学的な理解にはまだ数多くの謎が隠され、制御工学者と生物学者との共同作戦が重要であろう。

#### (iii) 代謝系と新陳代謝の動的な制御

上の恒常性維持と並べて、生物は生と死を含む一生で時々刻々に新陳代謝を繰り返している。例えば、代表的な糖質代謝、脂質代謝、エネルギー代謝、更には、アミノ酸代謝、ヌクレオチド代謝、補酵素とビタミン代謝等などである[11]。

今日では、細胞にあるほとんどの代謝経路とそれらに関わる代謝物及び酵素反応が決定され、また基礎となる静的な制御メカニズムも研究されている。しかし、代謝過程の動的な解析や酵素反応ネットワークの構造と制御機能についてはまだ生化学実験も困難な段階であり、代謝系における物質・エネルギー・情報の流れの動的な解析には制御工学研究が大いに期待される。特に、制御理論にある内部モデル原理との関係が興味深い。また、生命体における代謝系と恒常性維持の両者間の関連をシステムレベルで研究することも重要であろう。

#### (iv) 脳神経系と高次運動制御

分子生物学や生理学の進展に加えて、fMRIなどの計測技術の開発に支えられて、脳科学が華々しく展開されてきている。脳は、個体の内部状態を管理して維持しつつも、感覚系を通して環境認識や環境に積極的に働きかけて高度な身体運動制御機能を備えることができる。また、環境との力学的な相互作用を通して、運動の学習、熟練が達成される。微小電極や脳のイメージングなどの計測技術は、個別の神経細胞の電気的活動や脳の機能局在をより明確に実証してくれた。しかし、

- (1) 脳神経系による時空間情報のコーディング
- (2) 脳内における情報の構造化、モデル化
- (3) 情報の分析・統合
- (4) 環境との相互作用で生じた制御機能の発達

など、脳の高次認知制御機能については未だに仮設・検証のレベルにあり、その本質となる基本原理はまだほとんど明らかにされていない。

生体の運動制御系に焦点を当てて考察すると、歩行、飛翔、遊泳、上肢・全身による巧みな操り・力作業など、生体は冗長な運動自由度の体を駆使して実に柔軟で高度な運動を実現している。特に、動的な環境との力学的な相互作用におけるタスク遂行に現れる生体運動の多様性と環境適応性が今日の最先端のロボット技術でも当面比べられない境地にある。

ロボット制御工学から見れば、生体の骨格系はかなり冗長な非固定回転軸の関節を有し、力学的なインピーダンスが可変な複数の筋群で駆動されている。また、運動神経の中枢と末梢との間における信号伝達に100ミリ秒単位の遅れが存在している。したがって、脳という制御装置にとってみれば、身体運動は決して制御しやすい制御対象とは言えない。それにも拘らず、生体は未知な環境拘束に柔軟に適応しかつ目的タスクを素早く遂行することができる。

現在の脳科学研究では、脳神経系によるこうした高度な運動制御機能は大脳皮質・大脳基底核・小脳、そして脊髄反射系などによる機能局在のモジュール化・階層化で成し解けていると解釈されている[12-14]。

また、反射運動と随意運動を分別して、双方向のフィードバック学習による随意運動のフィードフォワード制御の可能性が主張されている[15]。これは、制御工学にある二自由度制御原理に相通するところが多く、またいかに学習によって未知環境における最適制御や、予測、実時間運動評価がなされるかなど、制御工学に多くの制御問題を新たに提起している。

冗長な運動自由度のおかげで、動物は多様な運動パターンを順序良く切り替えて首尾一貫して実現することができる。最近では、制御工学で離散事象と連続ダイナミクスが混在するハイブリッドシステム制御の研究が行われて、多指ハンドによる巧みな物体操りや多脚歩行などへの応用が検討されている。ただし、そのためには数的に複雑な混合整数最適化問題を解かなければならず、そのためには、実際の生体運動を観測して特徴的な運動と運動間の順序について解析するというバイオ・ミメティックな研究手法は有効であろう。また、ハイブリッド制御という視点から、こうした動的な順序運動における大脳基底核の役割[16]を調べることも重要であろう。

手先でしかものを操作できない現在の産業用ロボットとは違って、人間は視覚や全身の触覚を頼りに患者や子供を体全身で抱き上げたりしている。脳は、決して環境から孤立した情報処理システムではなく、むしろ実時間の時空間情報認知と実世界での運動との統合を通して、作業の実現や運動の上達が可能となっている。したがって、脳をただ一つの単独の器官として研究するのではなく、こうした実環境との相互作用において行う認知行動など、身体性を考慮に入れた上で脳の機能と基本原理を探索す



べきである。

以上の各小節の説明で分かるように、近年の生物学研究の蓄積で、システム制御の研究者から見れば、まさに生命をシステムとしてその制御原理を研究するための部品や部品間の関係が分かるまたは分かろうとする段階にきている。生命機構や機能をシステム全体として本格的に解析するための今後の長い工程の重要な始点に立っている。したがって、21世紀における生命科学の基礎研究の飛躍にとって、制御工学の重要度は計りしれないと確信できる。

ただし、システム数理の立場から捉えると、生命現象には、不定常性、情報の不完全性・非確定性、非線形性、不連続性、実時間性、時間遅れ、冗長多自由度等など、複雑な数理特性を数多く有している。また、数千年にわたる生命の哲学論争は今でも続いている。生命原理の探求は、制御工学研究と相補的・相乗的な関係にあり、生命現象を理解することは、同時に制御工学自身の発展を模索する挑戦でもある。

当面における生体実験の技術面・倫理面の制約を考えると、ロボティクスやVRを取り入れた3次元動力学シミュレーションなどの構成論的な研究は、これからの生物研究にとってますます重要な研究手段の一つになると思われる。

#### 4.3.2 生命活動の保全と制御工学

生命原理に関する研究のほかに、医療や食品産業など生命活動の保全と質的な向上にとっても、制御工学の応用が展開されている。医療の分野において、電子工学や制御工学、そしてその後の計算機工学を基盤として、医用工学が発展されてきた[11]。そのおかげで、医療現場における診断や治療の迅速化、快適化が一層図られ、効率性、客観性が大いに高められるようになった。これからは、よりミクロな分子や細胞レベルでの診断と治療に関する技術や、患者個人個人の遺伝情報に応じて処置するテーラーメイド医療が期待され、新しい医用工学機器の開発や情報ネットワークの整備及びシステム化に制御工学の応用が大いに活用できる。また、生体運動制御機能の研究をロボット工学研究と結合することで、リハビリテーションなど、より安全で柔軟な福祉・介護機器が開発されることにつながる。

さらに、よりよく安心な生活を図るために、食品の品種改良や農業、生殖工学、発酵工学などの分野においても、制御工学は、実験の最適設計から、データ統計、モデル解析、また生殖工場の自動化まで幅広く応用される。

したがって、健康や生活レベルの向上にとっても、遺伝子工学や、細胞工学、組織工学など最新のバイオ研究の知見を、計算機技術、ネットワークなどの情報科学と融合して、バイオインフォマティクスを推進すると同時に、制御工学をも引き続き必要不可欠な基盤技術として重視し、強化すべきであろう。

#### 4.3.3 生物資源の活用と制御工学

生物資源の活用に関して、環境汚染の処理（水の浄化、環境ホルモンなどの有害物質の分解）やエネルギー開発などに微生物の果たす役割が前から注目されてきている。制御工学との関連について言えば、この分野では最適制御やプロセス制御がよく応用されていた[17]。

これからは生態圏全体のバランスや循環型生産システムの構築というより広い視点に立った生物資源の活用が期待され、有限時間未来までの応答を最適化することでフィードバック制御を行う非線形モデル予測制御（receding horizon制御）など、制御工学の最新成果を応用した更なる支援が必要であろう。

#### 4.3.4 バイオ・ミメティック制御

工学システムの大規模化、複雑化、高性能化の進展に伴って、システムに対する多様性、柔軟性、信頼性、人間に対する親和性などの要求が一段と高くなり、生物に学ぶバイオ・ミメティック研究がより一層重要となってきている。生物の運動制御系の工学模倣に当たって、

- (1) 皮膚や筋肉、骨などの材料についての模倣
- (2) 骨の関節構造や筋肉配置などの機構の模倣
- (3) 体全体の構成という形体の側面の模倣
- (4) 脳神経系による高次認知・制御機能の模倣

など生物に学ぶものは数え切れない。

労働力の解放、生産効率の向上を目的として、産業用ロボットが活用されてからほぼ半世紀が経ち、産業界に莫大な利益をもたらした。その後、アクチュエータや、電気・電子・計算機などを利用した制御技術の目覚ましい進歩によって、ロボット運動の高速化・高精度化が驚くほど高いレベルに達してきた。また、近年におけるヒューマンノイドロボットやエンターテイメントロボットなどの研究開発が活発に行われ、多くの人々の童心を喚起している。ロボットの運動学、動力学、運動・力制御、感覚・認知、人工知能を柱としたロボット工学が体系化されつつある。しかし、今までのロボットは生体に対する科学的解析に基づく模倣よりは、むしろ単なる電子・電気・機械工学の応用から生まれた産物に過ぎず、その結果、ロボットが実際行える作業は、塗装、溶接、軽い部品の運搬などごく単純なものがほとんどで、しかも、工場などの規格化された環境下しか活動できない。

これに対して、生物は複雑な環境において実に巧みな制御を行うことができる。以下では、具体的に、運動制御に関わる(1)感覚・認知系、(2)筋・骨格系、(3)脳神経制御系とタスク実現の各レベルに着目して、より高度な人工システムを実現するために重要と思われるバイオ・ミメティック研究課題について論説する。

まず、感覚・認知系においては、生物は従来のロボットより量的にも種類的にも比較にならないくらい数多くのセンサーを駆使して実時間における環境変化を適切に把握している。こうした視覚や皮膚触覚などの大量な同種類のセンサーの並列分散処理による時空間情報の実時間フュージョンや、五感に見られるような異種類のセンサーによる情報の統合及び運動と感覚の連携によるアクティブセンシング機能が、より高次のロボットの環境認知と適応にとって必要不可欠であろう。

筋・骨格系のレベルでは、生物の筋肉は、その高い力出力や粘弾性などの機械的なインピーダンス調節機能に加えて、熱、騒音を出さないなどの特徴で現在のすべての人工アクチュエータより優れている。また、骨の関節構造を解析しても、現在のロボットが基本として採用している固定回転軸構造ではなく、身体運動におけるパワー伝達にとって大変有利と思われる可変回転軸構造をとって、冗長な運動自由度を作り出している。近年、導電高分子材料を用いた人工筋肉の研究開発が着々と進んでいるが、生物の筋肉特性との対比やロボットへの実応用が期待されている。

一方、制御の中枢となる脳神経系では、ノイマン型計算アーキテクチャとは根本的に違って、感覚系による環境認知だけでなく、高次の記憶や思考、場合によっては情動をベースにした意思決定で高度な身体運動が実現される。

生物の身体運動は、その用途から基本的に足や翼による歩行や飛翔などの身体移動を目的とした周期運動と、両手もしくは全身による物体操作に分類することができる。

周期的な運動については、脊髄レベルにおけるセントラルパターンジェネレータ（CPG）が中心的な役割を果たしていると指摘され、非線形振動の引き込みがその数理基礎を成している。しかし、足の着地による状態遷移や身体非線形ダイナミクスとCPGとの相互作用については、自律分散制御や受動歩行などの立場からいくつかの数理モデルが提案されているが、未だに明らかにされていない状態にある。歩行研究について、現在は、依然として生物の運動キャプチャデータをZMP制御のもとでロボットにプレーバックさせる方法を常道手段としている。歩行のエネルギー効率やロバスト性が大きな問題として残されている。一方、近年受動歩行の数理解析に基づいて、平地におけるダイナミックな歩行制御の研究も進んでいるが、歩行の自然さや省エネルギーの観点から人間の二足歩行との対比がこれからの研究の焦点となる。

両手による対象物体の巧みな操作については、人間はどの動物に比べても上手に行うことができ、手の機能を身体移動から解放されることで、人間の脳神経系知性が進化したとまで指摘されている。手によるマニピュレーション機能の高度化は、社会や産業界の期待も熱くてロボット工学の最重要テーマの一つであろう。中でも特に、外部の不確かな環境に対する柔軟で多様な力学的な相互作用や、複数マニピュレータ間の分散協調作業及び体全身を用いた高度な認知をベースにしたフルボディマニピュレーションが中心課題であり、人間のこうした作業能力の形成、学習、熟練の数理解析

と定量評価が急務であろう。さらに、患者の看護や障害者の介護に見られるように、私たち人間は相手人間と安全かつ安心に体を接して相手を助けることができる。こうした人間と接するロボットの研究開発は、これからの少子・高齢化社会の福祉にとってきわめて重要である。ただし、従来の産業用ロボットの研究開発とは違って、人間と接するソフトなロボットにとっては、人間との親和性、動作の安全性がより厳しく要求され、その設計・検証・評価方式から抜本的に変える必要がある。単に従来のロボット研究モードで実物のロボットを製作してから動作検証を行うことは、コストやリスクが高いだけでなく、場合によっては人身傷害すらもたらしてしまう危険性を回避できない。したがって、ソフトロボットの研究開発にとって、計算機による動力学シミュレーション、特に人間の主観評価や力学的な相互作用を考慮に入れた没入型実時間シミュレーションプラットフォームの構築が、ソフトロボットの要素技術の開発と同時に重要視すべきである。

バイオ・ミメティック研究の究極の目標は、生物システムと人工システムとの対比の視点から、科学技術を創生し、反省し、健全化させることであろう。バイオ・ミメティック研究アプローチは、より一層生命への認識を深めるだけでなく、それと同時にこれからの人工システムの高度化にとって必要不可欠であろう。

#### 4.3.5 おわりに

以上で、生命原理の解明、生命活動の展開、生物資源の活用など、21世紀におけるライフサイエンス関連分野の飛躍に制御工学はきわめて重要な役割を果たし、なくてはならない存在となるに違いないことを述べた。それと同時に、生命の基本原理を追求することによって、制御工学自身の質的な変貌をもたらし、ロボットなどの人間にやさしい巧みな機械システムの実現が期待される。したがって、政策決定から研究開発、産業化のいずれのフェイズにおいても、制御工学を重点的に取り上げる必要がある。

### 4.4 ナノテクノロジー・材料分野における制御工学

ナノ・マイクロテクノロジーと環境技術の分野は、その対象のスケールが著しく違い、一概に制御工学との関わりを論じることはできないが、制御工学の応用が期待される新分野として共通の側面を有している。これらに共通して言えることは、その関わり方が多様で、単なる応用分野として議論できない面がある。すなわち、これまでの制御工学の技術者は、制御理論に裏打ちされた方法論を開拓し、その方法論を応用する立場を基本的には取ってきたが、そのような狭い意味での制御工学の応用の時代は終わりつつあり、今後は新しい技術革新に如何に制御工学的なアプローチを発展させていくかという視点が必要になってきていると考えられる。このような分野の技術革新

においては、先にものが生まれ、そのものの高度化及び高度利用の技術として高度なシステム化技術が後で必要となる。単なる制御という機能付加ではなく、制御工学の分野が育ててきたシステム化の技術としての役割が重要であると考えられる。ナノ・マイクロテクノロジー及び環境技術のブレイクスルーのための制御工学の役割について展望する。

#### 4.4.1 ナノ・マイクロテクノロジー

10年前はマクロマシンの開発の時代だと叫ばれたが、いまやマイクロを越してナノの世界に突入し、ナノ・マイクロマシンの時代へのシフトしつつある。ナノ・マイクロテクノロジーは21世紀の技術革新の要と目されており、米国、ヨーロッパ、アジアの諸国は国を挙げての開発競争に突入しており、巨額の開発・研究資金が投入されている。2000年1月に当時の米国大統領クリントンによって、国家ナノテクノロジー戦略（NNI：National Nanotechnology Initiative）が発表され、米国はナノテクノロジーを最重要研究技術分野であるとした。我が国においても総合科学技術会議において、ナノテクノロジー・材料は、ライフサイエンス、情報・通信、環境と並び、重点4分野の一つであることが第2期科学技術基本計画に明記され、その重要性が認識されている。その背景には、ナノテクノロジーが情報技術の発展と密接に関連しており、更に生命科学の分野とも大きな関わりを有する技術であることが考えられる。ナノ・マイクロテクノロジーと制御工学の関わりを考える場合、ナノ・マイクロテクノロジーそのものへの制御工学の役割と、ナノ・マイクロテクノロジーが生み出す産物を制御工学が取り込む役割の二つの大きな役割が考えられる。

##### (i) ナノ・マイクロテクノロジーの分野での制御工学

材料・計測技術：ナノテクノロジーの中で我が国が最も得意とする分野は材料の分野と言われている。ナノの世界は、構造的な特徴だけでなく、量子力学の世界となってもそのスケールや大きさに依存した特徴が出現する世界となる。原子構造が同じでも、その幾何学的な特性によって電子状態が異なり、例えば電気を通す性質が異なってくる。そのような材料技術の最先端がカーボンナノチューブである。このような材料技術の世界では、現在のところ制御工学との関わりを見出すことは困難であるが、将来ナノセンサーやナノアクチュエータなどの応用分野が期待され、制御工学の要素技術に発展する可能性がある。

微細加工技術：エレクトロニクスの世界ではすでに半導体分野で培われた技術を他分野へ応用することで、新しい複合デバイスの創製も可能となる。ナノテクノロジーは、原子層成長技術などの薄膜成長技術の深化を可能とし、様々な新しいエレクトロニクス・フォトニクスのデバイスの創製を可能とする。そのような技術のブレイクスルーにおいては原子レベルの計測技術と位置制御が不可欠となる。ナノ・マイクロのそれ

それぞれのレベルでの微細加工技術によって新しいセンサー、アクチュエータのマイクロ化、ナノ化が可能となり、情報技術の進歩のみならず、計測制御工学に欠かせない新しいセンサーとアクチュエータが産出される可能性があり、制御系設計の自由度の拡大とその対象のスケールがマイクロ化、ナノ化することによって制御の応用分野が飛躍的に拡大する可能性がある。

### (ii) ナノ・マイクロテクノロジーの応用分野での制御工学

ナノ・マイクロテクノロジーの応用分野は、流体及び化学システム、医用工学、バイオ技術、ロボット、操作プローブ顕微鏡、通信情報機器、光学、運輸と航空宇宙などの多岐にわたる分野である。ナノ・マイクロテクノロジーがもたらす本質的な技術のブレイクスルーの一つに超分散化の技術が挙げられる。これは、機械の構成要素の一種の細胞化とも言うことができる。また、単なる分散化だけでなく、分散化した構成要素間のインタラクションが可能となる技術ということができる。例えば、図3に示すように内皮細胞のセンシング機構の仮説がなされている。これは、細胞ごとに物理的な刺激を感知するメカノレセプターを有し、アクチンフィラメントが何らかの駆動を行うという仮説である。ナノ・マイクロテクノロジーの成果は、システムのナノ・マイクロ構成要素がそれぞれセンサーとアクチュエータを有し、構成要素の微細化だけでなく、構成要素ごとに様々な情報を検知し、何らかの反応を行って、外界とのあるいは構成要素とのインタラクションを可能とするような分散構造化が可能となるのではないだろうか。これまで制御工学はマクロシステムの制御理論として発展してきたが、このような技術によってはマイクロシステムの制御理論及びナノ・マイクロ構成要素から成る超分散システムの制御理論としての発展が期待される。そのような制御理論においては、線形と非線形、分散と統合、干渉と相互作用、階層性と融合性、安定と分岐・不安定などこれまで制御理論として積み上げてきた理論の応用が可能となるばかりでなく、実際の側面からの理論の更なる発展への推進がなされ、新しい制御理論の時代に正真正銘突入すると考えても良いだろう。

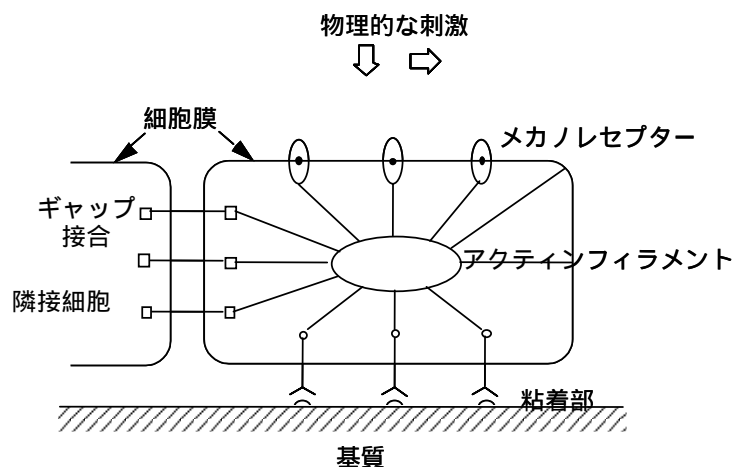


図3 内皮細胞のセンシング機構の仮説

#### 4.4.2 原子操作

ここでは、ナノ力学における原子操作[29]を例にとり、精密な制御がキーテクノロジーであることを述べる。その例は、室温環境下で混晶（合金状態）の複数種類の原子を元素交換型水平操作することによって、絶縁体表面上でのナノデバイスの作成を可能とするものである。これまでの極低温環境のもとでの結果や導電体基盤上での結果に比べて、電子デバイスの創成に大きく近づく技術である。

その原子操作は、原子間力顕微鏡（AFM）内で行われる。図4のように、目標とする原子にカンチレバーを近付け、非接触状態で原子間力により引き抜いて水平移動させて、原子の位置を交換するものである。適切な原子間力を生じるために、カンチレバーの位置制御がもっとも重要な技術であることが分かる。図5は、絶縁体上のゲルマニウム（Ge）の中のスズ（Sn）を並べ替えて Sn という文字を書かせたものである。

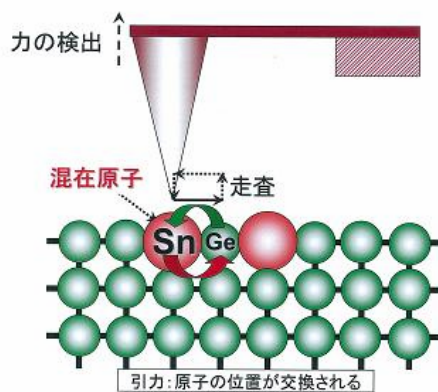


図4 原子操作の概念図

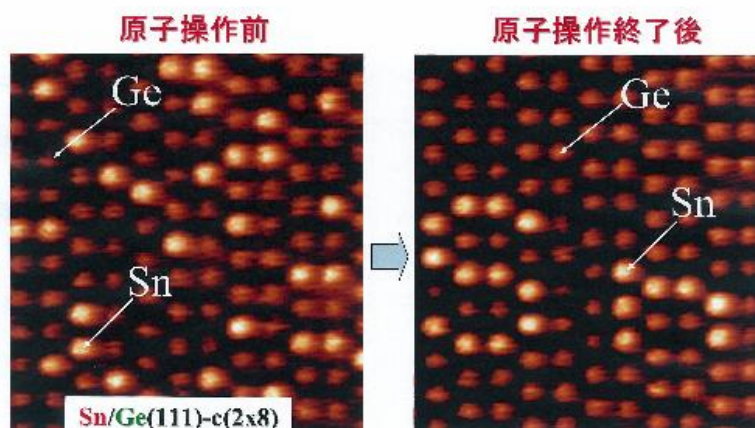


図5 元素交換型水平操作により描いた世界初の「原子埋め込み文字」

## 参考文献

- [1] M. Kainuma, Y. Matsuoka and T. Morita: Analysis of post-Kyoto scenarios: AIM model、Special Issue of The Energy Journal, pp.207-220, 1999
- [2] 日本学術会議自動制御研究連絡委員会: 「システム制御工学と環境問題 - システム制御工学からの接近と貢献 - 」2000
- [3] 田坂修二、 “ マルチメディアQoSマッピングとQoS制御 ”、電子情報通信学会技術研究報告 CQ2003-9、2003年4月
- [4] 田坂修二、 “ ネットワーク環境におけるメディア同期 ”、電子情報通信学会誌、Vol.84、No.3、pp.177-183、2001年3月
- [5] 田坂修二、 “ マルチメディアQoS研究の現状と課題 ”、平成15年度電気関係学会東海支部連合大会シンポジウム「インターネットにおけるマルチメディアQoS」、2003年10月
- [6] S. Tasaka and Y. Ishibashi, “ Mutually compensatory property of multimedia QoS, ” Conf. Rec. IEEE ICC2002, pp.1105-1111, Apr./May 2002
- [7] バイオテクノロジー戦略大綱、BT 戦略会議、平成 14 年 12 月
- [8] B. Alberts, et.al.: Molecular Biology of the Cell, fourth edition, Garland Science , 2002
- [9] N.Wiener: Cybernetics --- Control and Communication in the Animal and the Machine, The MIT Press (1948)
- [10] 斉藤寿一: 恒常性維持のネットワークシステム、UPU INTER 技術論文集 特集「バイオシステムへの挑戦」、1991
- [11] 電子情報通信学会誌、特集: 21 世紀の医療・福祉を支える科学技術、Vol.84, No.5 (2001)
- [12] E.R.Kandel, et.al.: Principles of Neural Science, fourth edition, McGraw-Hill (2000)
- [13] 甘利俊一、酒田英夫編: 脳とニューラルネット、朝倉書店(1994)
- [14] M.Ito: The Cerebellum and Neural Control, New York Raven.(1984)
- [15] 川人光男: 脳の計算理論、産業図書(1996)
- [16] J.C.Houk et.al. ed.: Models of Information Processing in the Basal Ganglia, The MIT press, 1995
- [17] 山根恒夫、塩谷捨明編: バイオプロセスの知的制
- [18] 知的社会基盤工学技術の調査研究報告書、新エネルギー・産業技術総合開発機構平成 9 年度調査報告書、pp.59-75
- [19] 吉田和夫、構造物の振動制御の動向、電気学会論文集、C、第118巻3号、平成10年3月、pp.293-296



- [20] 日本機械学会小特集「ナノテクノロジー」、2002年 7月号 (第105巻、第1004号)
- [21] 日本機械学会【テーマ】ナノ・マイクロマシンの世界、2000年11月号 (第103巻、第984号)
- [22] 計測自動制御学会誌特集「マイクロマシン - 実用化とナノ領域への展開 - 」、2003年1月号
- [23] 計測自動制御学会誌ミニ特集 表面/ナノ構造の計測 1999年12月号
- [24] 電気学会誌特集 21世紀の情報社会とナノテクノロジー、2002年2月号
- [25] 電気学会誌特集マイクロマシン実用化の現状と将来、2000年11月号
- [26] 精密工学会誌 < 特集====近接場科学の工学応用をめざして >、2003年2月号
- [27] 精密工学会誌 < 特集====マイクロ加工の最前線 >、2002年2月号
- [28] 日本ロボット学会誌特集「マイクロマシン技術 産業技術研究開発制度におけるマイクロマシンプロジェクト 」、2002年3月号
- [29] Yoshiaki Sugimoto, Masayuki Abe, Shinji Hirayama, Noriaki Oyabu, Oscar Custance and Seizo Morita; "Atom inlays performed at room temperature using atomic force microscopy", Nature Materials, vol. 4, issue 2, pp.156-159 (2005)

## 第5章

### 制御工学への期待

制御工学は、人々の生活をいろいろな側面で豊かにすることに貢献していく。制御工学の発想に基づくシステム化技術は、知的社会基盤作りの鍵になる。金融における制御工学は、利益を得るために用いられるだけでなく、安定化にも役立つ。21世紀の人口の急激な増加に対処するため、食料の増産は急務であるが、そのための効率的農業への制御工学の期待は大きい。21世紀になっても世界の各地で紛争が起きているが、その終結後に安心できる社会を築くための大きな要素として、地雷除去が必要な地域が多い。制御工学は、ここでも貢献する。本章では、これからの制御工学への期待を紹介する。

#### 5.1 知的社会基盤構築

##### 5.1.1 都市環境のための知的社会基盤

インフラストラクチャーは、生産と生活の基盤を形成する構造物と定義され、ダム・道路・港湾・発電所・通信施設などの産業基盤及び学校・病院・公園などの社会福祉・環境施設がこれに該当する。基本的には、インフラストラクチャーは生産と生活の基盤を形成する物理的な基盤としてこれまでは捉えられてきたが、20世紀の第3の波に代表される情報革命は生産と生活を支える技術を一変させ、我々の生産と生活を支える重要な基盤として、情報が21世紀を迎える今大きな要素となったことは周知の通りである。したがって、図1に示すように、今や人間の生産活動や生活の基盤は、単なる物理的なインフラストラクチャーではなく、物理基盤と情報基盤の新しい融合、すなわち知的社会基盤として捉える必要があるのではないか。このような知的社会基盤の概念を創出した上で、21世紀の人間社会を創造することが求められているのではないか。そのためにはこのような知的社会基盤を構築するための工学技術を確立する必要がある。

21世紀においては、知的社会基盤工学技術が与える環境、すなわち社会的な備え（社備）が大変重要になるだろう。言い換えると、グローバル世界における競争での勝敗は、人間社会の生産活動と生活を支える知的社会基盤を構築する技術をいかに創造するかにかかっていると断言しても過言ではないだろう。また、物理的な基盤の世界に注目したとしても、我々の生産や生活を支えるものはこれまでのような静的なインフラ

ストラクチャーだけでなく、動的なハードウェアも重要な役割を果たすことになる。

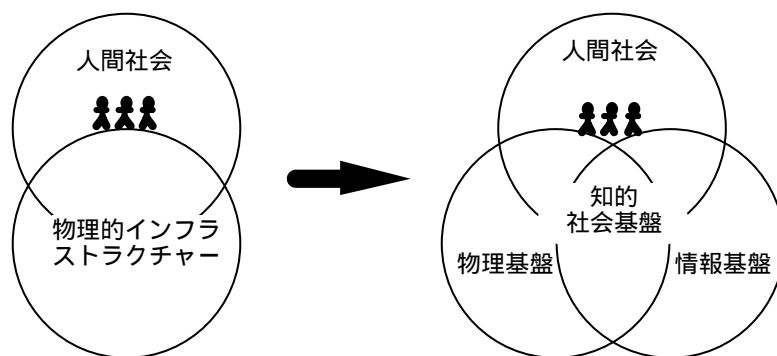


図1 単なるインフラストラクチャーから知的社会基盤へ

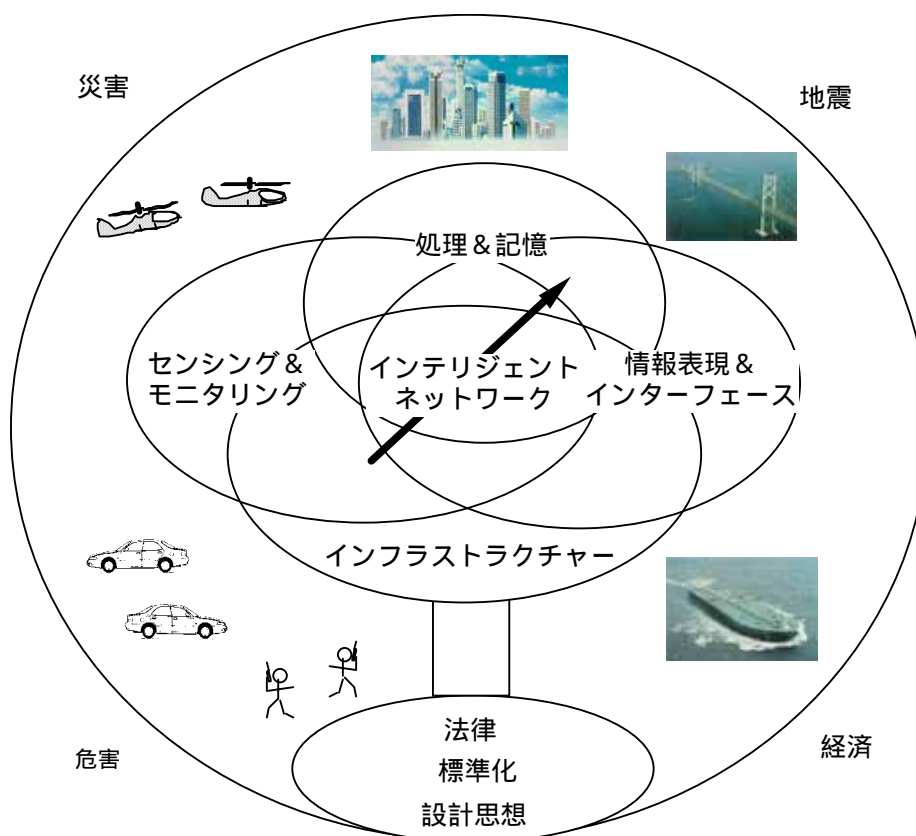


図2 知的社会基盤工学技術の概念

すなわち、ヘリコプター、航空機、自動車、鉄道車両、船舶、作業船、宇宙船などの物理要素も知的社会基盤技術として位置づける必要があるだろう。このような概念

を図で表すと図2のようになる。我々の危機は、戦争以外に災害や経済的な危機などいろいろある。知的社会基盤は、平常時の生産や生活を支えるだけでなく、危機的な状況においていかに我々人間社会を支えることができなければならない。したがって、知的社会基盤工学技術は、平常時的な状況だけでなく非常時的な危機にも対応できるものでなくてはならず、超安心、適応性、超安全、快適性、免疫性、ロバスト性、アミューズメント性、自律性、信頼・耐久性などの諸条件を満たす必要があるだろう。

### 5.1.2 知的社会基盤工学技術のシステム化技術

#### (i) システム化技術の重要性

知的社会基盤のシステム化技術としては、図4に示すような人工地盤を有する都市におけるロジスティクス、ライフライン、情報通信、モニタリング、コントロール機器の総合的、横断的な情報の共有とその知的情報処理ならびに知的制御技術が不可欠となる。しかしながら、現在は、これらの技術が個々に開発されており、総合的、横断的な技術を模索している段階と位置づけることができるが、近年の知的情報インフラの発展は目を見張るものがあり、マルチメディアの発展そのものが横断的な知的社会基盤のビジョン構築を必要とし、一日も早く知的社会基盤の技術を確立することが望まれている。

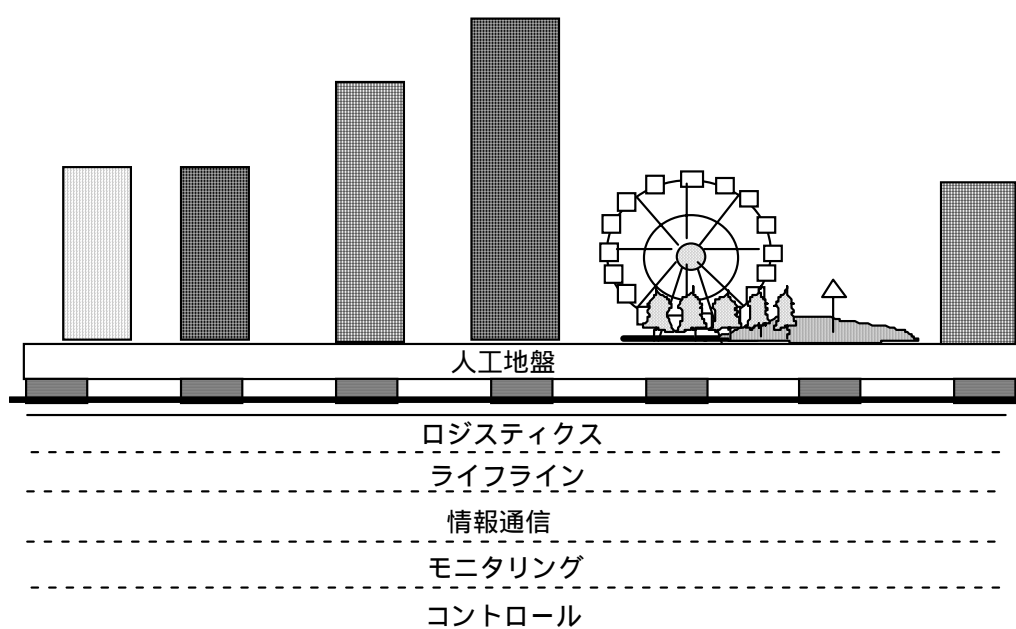


図4 人工地盤を有する都市

一方、近年高層ビルのインテリジェント化が進み、単に情報機器やネットワークが

張り巡らされているばかりでなく、建物の快適性の確保のために地震や風に対してアクティブに制振するシステムが開発され、既に40程のアクティブ制振システムが稼働している。このようなビルにおいては、制振システムが検出した情報とモニタリングシステムが検出した情報は別々のラインになっており、それらが相互に情報を交換することになっていない。しかしながら、制振システムが観測している風速、地震加速度、ビルの応答加速度などの情報は、単に制振だけでなく、建物の健全性や安全性の診断に役立つ情報を採取しており、モニタリングシステムにおいても重要な情報である。一方、何らかの異常事態が起きたときなどは、モニタリングシステムから得られる情報は制振システムにも重要な情報となることがあり、これらの相互の情報交換や、総合的な制振、モニタリングシステムの構築が求められている。

## (ii) 知的社会基盤工学技術の展開

知的社会基盤工学技術によって開発される融合システムのイメージの一つは、比喩的に言えば「生命都市」という言い方ができるであろう。システム化技術の面から生命都市のイメージを描いてみると、生命体に見立てることのできる各部分がさらに有機的・動的に結合したシステムであり、その結合は現実の世界では社会的合意の形成によって実現されるものと考えられる。また、各生命体は、例えば環境センシング（感覚・知覚機構）、高度なリスクマネジメント・セキュリティ・プライバシー保護（免疫機構）、状況に応じた情報表現と情報流通（神経機構）、高度なエネルギー変換（代謝機構）、部品の自動交換（再生機構）、高性能監視・制御機構（運動・行動機構）、情報の蓄積と有効利用（記憶機構）等の生命的機能をもつものとする。

生命都市を構築するための先端技術としての知的社会基盤工学技術には、知的機械システム設計・制御技術、知的材料技術、情報通信技術、知的センサー技術、知的構造工学技術、環境センシング技術、表現やインターフェース技術等の先端技術が関わっている。知的社会基盤工学技術の開発では特に、人間社会の社会基盤の生命線である情報通信システム、エネルギーシステム、ライフラインシステム、輸送システム、機械システム、生活用機器システム、そして都市システム等を、リアルタイム化・分散化に基づく安全制御技術・診断、リスクマネジメント等を考慮して総合的に設計・運用し、発展させるための先端技術を確立しなければならない。知的社会基盤工学技術という分野は未だ確立されていないが、これからの社会基盤の構築には、リアルタイムで社会の安全・診断・情報伝達・リスクマネジメント、セキュリティ、プライバシー保護をサポートする先端技術の開発と総合が極めて重要であり、我が国が今後力を入れるべき重要な課題であると考えられる。

知的社会基盤技術の課題としては、以下のような項目が考えられる。

- (1) 超分散センサーネットワークシステム
- (2) 高性能知的センサー

- (3) センサーフュージョン技術
- (4) 超高速動画像パーソナル伝送技術
- (5) 高性能光無線伝送技術
- (6) ミリ波通信による画像伝送システム技術
- (7) 超高速ネットワーク・データバス技術
- (8) 超分散リアルタイムソフトウェア技術
- (9) 情報セキュリティ技術と抗ウィルスソフトウェア
- (10) 高度リアルタイムデータベースシステム
- (11) アクティブインターフェース
- (12) 仮想空間と実空間の統合化技術
- (13) 在宅健康管理用超分散センサーネットワークシステムとリアルタイムデータベースシステム
- (14) センサー情報の可視化技術
- (15) 内部状態可視化技術
- (16) 材料の表現化・材料からの情報発信技術
- (17) システム生命化技術
- (18) 知的構造設計・知的制御技術
- (19) 超高層ビル、超長大橋の超安全設計技術
- (20) 超分散高度防災システム
- (21) 高度リスクマネジメントシステム
- (22) 超安心な交通・物流技術
- (23) 知的社会基盤工学のための諸要素技術・システム技術を使って組み立てられる部品、機器、輸送システム、建築物、都市等の新デザイン技術

## 5.2 金融工学

### 5.2.1 金融理論

金融工学(Financial Engineering)は、「将来の不確実性(リスク)にいかに対応すべきか」というテーマに対する一つの理論的な対処法を提示することができる研究領域である。金融工学の理論体系(金融理論という)は、理工学系(統計学、確率論、解析学、OR、情報技術)と文系(経済学、経営工学、会計学、法学)などの隣接分野と融合して成り立っている。この点は、抽象化されたモデルに基づく制御工学の理論体系と類似している。

米国の学会と金融界が中心となって発展してきた金融理論は、下記のような歴史を経て現在に至っている。

- ・ 1952年：マーコビッツがリスク分散を理論化したポートフォリオ理論を発表し

た。

- ・ 1970年代：ブラックとショールズによるオプションの価格算出モデル「ブラック・ショールズ・モデル」が発表された。
- ・ 1980年代（レーガン政権下）：金融の自由化が進められ、米国の金融関連学会と金融界の知的交流が広く行われ、金融の専門化の流れが大きく加速した。
- ・ 1990年代：数多くの大学で金融工学のコースが設立され、マーコビッツやショールズのノーベル賞受賞により、金融工学が世界的に認知された。
- ・ 1999年：東京大学と東京工業大学で金融工学コースが設立された。
- ・ 2000年：京都大学と一橋大学で金融工学コースが設立された。

上記の歴史の中でやはり、金融工学の発展において重要な出来事は、最初に挙げた1952年のマーコビッツの「リスク分散」理論であろう。ここでは、期待リターンの不確実性に対するリスク（標準偏差）という概念を導入し、更に、個別銘柄の集合体であるポートフォリオ（リスクを軽減させるために分散投資をする際の理論）を提案した上で、相関関係を考慮した一定のリスクのもとで最高のリターンを期待できるポートフォリオが存在し、逆に、一定のリターンのもとで最小のリスクをもつポートフォリオが存在することを示した。

この革新的な理論により、上述のように投資世界が理論的に整備され、ITの革新を背景として、金融理論が現実の金融技術に組み込まれることが可能となり、投資の枠組み、リスク・リターン計測、デリバティブなどの開発が行われ、金融理論と金融技術の相互作用による拡大が行われていくようになる。

金融理論は、金融の考え方を整理する理論、金融の対象の価値を計算する理論、金融の対象のリスク・リターン予測理論の三つに大別でき、金融理論の中でも互いに関係しあって発展を遂げている。

このように、金融工学は、経済システムにおける金融資産に対するリスクとリターンの計測と制御を主な目的とする工学であり、情報技術・数学（確率統計、数理計画など）を基礎としたダイナミックシステムの解析・設計の対象分野の一つであると言えるが、歴史的には、近年になり成立した学問分野であり、既に成功している他分野の理論・技術を取り込むことにより、一層の飛躍が可能である。

### 5.2.2 金融技術

金融理論に基づいて取られる技術あるいは金融のための技術は、金融技術(Financial Technology)と言われている。将来の不確実性（リスク）に直面する分野に対しては、そのリスクを低減し、新商品、新サービスの開発、新規市場開拓を行う上で、有効な技術となりうる。リスクが存在する多くの分野では、いつでもそのリスクを勘案して意志決定を行わなければならない。例えば、次のようなリスクが金融システムには存

在する。市場リスク（金利変動、為替レート変動、有価証券価格変動）、天候・自然災害リスク（気温、降水量、台風、地震など）、財務リスク（債権・不動産などの資産の流動化、資産・負債の変動）、信用リスク（債務不履行による不良債権化）、環境リスク（環境規制が収益に影響を与える）、企業価値と投資の評価などである。

したがって、金融技術は、商品開発、資産運用、統合リスク管理、信用リスク管理、事業金融、証券、市場保全、保険・年金などを活用領域とすることができる。例えば、商品開発ではオプション理論を基礎としたプライシング、資産運用ではポートフォリオ理論やMM理論に基づく技術、リスク管理ではValue at Risk(VaR)等によるリスク量の測定、仕組み金融ではリスクの変換・転移のモデル、事業リスクの評価ではリアルオプション、これらは金融工学を基礎とした技術である。また、金融工学は、制御工学と同様に理工学系（統計学、確率論、解析学、OR、情報技術）の学問を基礎としている。例えば、市場リスクの計測と管理に用いられるValue at Risk(VaR)を計算する場合には、モンテカルロシミュレーションが用いられ、最近では、強化学習、GAなどのソフトコンピューティング手法が多用されている。

### 5.2.3 制御工学の金融工学への貢献

従来の工学の対象分野と大きく異なり、金融工学の対象分野である経済システムは、純粋に物理・化学法則に従って動いているとは言えないが、そこには仮説と検証の繰り返しにより、ある法則を見つけだすことができる。金融工学では、それを用いて数理的な手法によりモデリングを試み、状態・パラメータを推定し、あるいは予測・評価し、制御を行っている。この点は、工学の中で純粋に数理的な抽象対象を扱うことのできる制御工学と大きく類似している。金融工学で取られているモデリング手法では、将来の不確実性（リスク）を確率論的アプローチで表現している。一方、制御理論においても、確率過程は重要なモデル表現の一つである。その戦略においても、ゲーム理論など共通する部分が少なくない。

#### (i) モデリングへの貢献

金融対象をモデリングする場合には、「計量経済学」「経済時系列分析」「確率論」「同定理論」など、様々な分野の知識を必要とする。金融システムを理解するには、その構成要素を特定し、各々の要素の性質を調べ、次に、要素間の関連・相互作用を調べ、定量的に測定し、モデルを構築し、動作原理あるいは設計原理を見いだすことが目的となる。金融システムのモデリングの場合でも、なんのためのモデリングであるかに依存して、モデリングの到達点が変わってくる。さて、一般に時系列解析で最も頻繁に利用されるモデルは、次のARMA(p,q)モデルである。

$$\text{ARMA}(p,q)\text{モデル：} \quad A(z^{-1})y_t = B(z^{-1})\varepsilon_t, \quad t=1,2,\dots$$

ここで、 $y_t$  は分析対象となる変数（株式投資収益率）、 $\varepsilon_t$  は平均値零、分散  $\sigma^2$  の独立・



定常の確率分布に従う確率変数である。このモデルは金融データの記述には適切でなく、次のARCHモデル (Auto-Regressive Conditional Heteroskedastic model; 自己回帰条件付き分散変動型モデル) が考えられている。

$$\text{ARCHモデル: } y_t = m_t + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t = \sqrt{h_t} \cdot z_t, \quad t=1,2,\dots$$

ただし、 $\Psi_{t-1}$  を時刻  $t-1$  までの情報集合として、 $m_t, y_t$  は次のようである。

$$m_t = E[y_t | \Psi_{t-1}], \quad y_t \text{ の条件付き期待値}$$

$$h_t = E[(y_t - m_t)^2 | \Psi_{t-1}], \quad y_t \text{ の条件付き分散}$$

また、 $z_t$  は、平均値零、分散を1に基準化した独立・定常の確率分布に従う確率変数である。この表現は、 $m_t = (1 - A(z^{-1}))y_t + B(z^{-1})\varepsilon_t$ 、 $h_t = \sigma^2$  にすれば、ARMA(p,q)モデルに帰着する。ARCHモデルは、分散が時間と共に変動することが大きく違う。実際には、この拡張として、GARCH(p,q)モデルやEGARCH(p,q)モデルなどが用いられている。また、パラメータの推定は最尤推定法が用いられ、次数決定にはschwarzによるベイズ情報量基準(SBIC)が採用されている。

一方、 $y_t$  の条件付き分散  $h_t$  は時刻  $t-1$  まで過去の情報の関数であり、現時刻ではすでに分散  $h_t$  が決定されている。しかし、実際には現時刻はじめに分散は完全に決まらず、 $h_t$  は現在の期に市場に流入するニュースに依存すると考えなければならない。このような考え方に立ったモデルが確率ボラティリティー(SV)モデル:

$$\text{SVモデル: } \begin{cases} \log h_t = \alpha + \beta \log h_{t-1} + \eta_t \\ \log y_t^2 = \log h_t + \log z_t^2 \end{cases}$$

ここで、 $\eta_t$  は、 $\eta_t \sim N(0, \sigma_\eta^2)$  の独立な確率変数である。これは、非線形状態空間表現と見なすことができ、拡張カルマンフィルターを利用することができる。

このように、金融システムの分析対象時間関数のモデリングにおいても、これまで制御工学の一分野である同定理論で取り扱ってきた部分とかなりの重複や補間関係があり、この分野において、制御工学はかなりの大きな貢献がなされ得ると期待できる。

### (ii) 推定・予測・制御への貢献

上記のようにモデリングがなされれば、それに基づく推定・予測あるいは制御の問題は、制御工学の理論展開を用いると有益である。あるいは、同定と推定・予測を同時に行う適応観測器、同定と制御を同時に行う適応制御の応用も可能であろう。また、最近の制御理論では、モデル化誤差に対する陽の取り扱いを可能とすることができ、この点でも大きな貢献が果たせ得ると期待できる。

資産価格が経済指数によって影響を受ける際のモデル(Bielecki-Pliska(1999))において、ポートフォリオ最適化をリスク感度を最大化することにより導出する例を考える。リスク感度を考えることにより期待値と分散の同時最適化が達成できる。

1種類の安全資産  $S_0$ 、 $m$ 種類の資産  $S_i$ 、 $n$ 種類の経済指数  $X_i$  に対してBielecki-Pliskaモデルを考える。

$$\begin{aligned} dS_0(t) &= r(t)S_0(t)dt \\ \frac{dS_i(t)}{S_i(t)} &= [a + AX(t)]_i dt + \sum_{k=1}^{m+n} \sigma_{ik} dW_k(t) \\ dX(t) &= [b + BX(t)]dt + \Lambda dW(t) \end{aligned}$$

さらに、 $V(t)$  を資産家が持つ資産価値とし、次式でモデリングする。

$$\frac{dV(t)}{V(t)} = r(t)dt + \sum_{i=1}^m h_i(t) \left[ (a + AX(t) - r(t))dt + \sum_{k=1}^{m+n} \sigma_{ik} dW_k(t) \right]$$

ここで、 $\{h_i(t)\}$  がポートフォリオで  $\sum_{i=1}^m h_i(t) = 1$  を満足する資産の分散投資を意味しており、制御入力である。一方、リスク感度は、

$$J = -2/\theta \ln E e^{-\frac{\theta}{2} \ln V(t)}$$

であり、これを  $\theta = 0$  の周りでテーラー展開すると、

$$-2/\theta \ln E e^{-\frac{\theta}{2} \ln V(t)} = E[\ln V(t)] - \frac{\theta}{4} \text{Var}[\ln V(t)] + O(\theta^2)$$

となり、これを最大にすることで、平均値を高め分散を小さくすることが可能となる。この最適化問題は、最大原理からのBellman方程式を得て、行列リッカチ方程式の解を求めることで、最適ポートフォリオが計算可能である。上式の展開にはロバスト性などは含まれていないが、ロバスト制御理論の応用により、これらを考慮した解析設計も可能となろう。

### 5.3 食糧生産

農業について、その文化、歴史あるいは哲学との関わりに触れることなく食糧生産というクリस्पな考え方で捉えたとしても、そこには工業生産とは比較にならないほど大規模で複雑な生産システムが横たわっている。まず、そこで扱われる生物自体が大規模複雑系の極みであり、更にそれを自然環境が取り巻いている。そのような系に対して人類は長い年月を経て自然採取から生産という業に転ずることで何十億もの人口をこの地球上で養うに至った。作物の生産を例にすると、品種改良、播種から収穫まで肥培管理や防除なども含めた栽培技術、その機械化、ポストハーベスト更に灌漑排水まで生産性の向上を図るためのさまざまな技術の発展があった。しかし、今日に

においては環境親和、持続的、循環型、安全性といったキーワードで彩られた技術が求められ、もはや単に生産性向上という一面的な技術開発の方向性はまったく社会に受け入れられないこととなった。今こそ、食糧生産システムという大規模複雑系に対して制御工学のアプローチをもって対応する時である。既にその努力は始まっており、近未来に向けて更なる加速が予想される。

### 5.3.1 食糧生産システムの最適化

制御という観点からは生物に対してその成長は非可逆的であり言わば非可逆生化学反応のプロセス制御を行うと考えることもできる。また、生体に直接操作を施すことは困難で、温度、湿度あるいは肥料などの生育環境を介した制御を行うことになる。しかし、その環境が自然環境であればその操作は極めて困難である。病虫害発生、雑草繁茂、旱魃あるいは台風などは外乱というには余りに影響が大きい。このような中でこれまで培われてきた農業技術というのは、限られた条件下での最適化の技術である。すなわち、限られた狭隘なそれぞれのサブシステムについて最適化が試みられたわけで、生産システム全体としての最適化には及んでいない。その結果として、生産性の向上に伴って、農薬問題、塩害あるいは土壌劣化などの弊害・環境問題が現れた。今後は、食糧生産システム全体に対する最適化を行うことが重要で制御工学の手法を導入することになる。課題は食糧生産システムの同定・計測・モデル化などがどこまで可能であるかということである。次節以降に、近未来に向けてのこの課題への取組について述べる。

### 5.3.2 精密農業によるシステムの最適化[8]

#### (i) 精密農業

1980年代後半に米国を中心に局所管理作業 (Site Specific Crop Management) あるいは精密圃場管理 (Precision Farming) といった新しい農業技術思想が現れ、実際に関連の研究開発が進められた。その中心的技術は、GPS (Global Positioning System) を利用した圃場における作業者の位置をデータ化する測位技術、農業機械 (収穫機) に取り付けるセンシング技術 (収量モニタリングシステム)、位置情報と作物データ (収量など) からデータをマップ化するソフトウェア技術及びマップデータに沿って作業をする農業機械 (作業機) に組み込む施用量可変技術などである。米国でこれまで行われてきた大規模で粗放的な圃場管理と比べると正に精密な圃場管理技術といえる。この精密な圃場管理法に加え、市場情報や流通情報など作物生育に直接関係しない情報なども利用する高度に情報化した農業といえる。精密農業は、新しいセンシング技術、機械技術及び高度情報技術を利用して食糧生産における無駄を低減する生産システムの構築と市場・流通関連の情報を生産システムへフィードバックするなどの

最適化の方向性を打ち出した農業である。

### (ii) 米国の精密農業

精密農業を理解するために、まずその新しい農業が最も進んでいる米国の現状から紹介する。米国の農業技術基盤は、大型機械の利用、化学肥料と農薬の大量使用それに大型灌漑である。この破壊的な生産活動が、米国はもとより世界の食糧需要を支えてきた。しかし、前述のように1980年代後半にエネルギーの浪費と環境破壊が深刻化したことから、『持続的農業 (Sustainable Agriculture)』をキーワードにして食料生産技術の変革を目指す動きが始まった。現在『局所管理作業 (Site-Specific Crop Management、SSCM)』、『精密圃場管理 (Precision Farming、PF)』、『精密農業 (Precision Agriculture、PA)』といった技術思想が脚光を浴びており、21世紀の安定した食料供給を実現するためには、高度に洗練された生産技術が必須とされている。この技術の一部はすでに米国中西部の穀倉地帯において新しい農法として定着しつつある。米国におけるPAが環境保全に寄与することに間違いなく、従来の粗放的な農法の救世主になることも期待できる。

### (iii) 日本型精密農業

我が国においては、欧米に比較すれば、元来かなり精密な農法が行われている。それは、農家一戸当たりの経営面積が小さくいわゆる目の届く栽培管理が可能だからである。しかし、澁澤らが進める日本型精密農法[9]では、更にその最適化レベルが向上する。日本の田園風景でまず目に付くのが、土地利用の多様性に基づく「圃場間のばらつき」である。栽培作物の違い、作物品種の違い、そして圃場のサイズや形、更には土壌条件など、小規模圃場ならではの「ばらつき」が存在する。それらの農地を多数の農家が所有あるいは耕作しており、農家集団の経営規模や動機などの「ばらつき」も当然ながら存在する。また、小規模な圃場であっても、作物生育や土壌肥沃度など「圃場内のばらつき」も存在し、個々の農家レベルでは多年にわたって地力向上や収量・品質の高位均質化の努力がなされてきた。これらの「ばらつき」は、スケールや特徴が異なるので、まとめて「階層的ばらつき」という。精密農法の日本モデルでは、この「階層的ばらつき」を記録し理解すること、そして「多品種高品質」生産の管理方法を探求することが目標になる。階層的なばらつきの管理すべてを個々の農家に期待するには荷が重すぎる。そこで、農法の5大要素(圃場、作物、技術、農家の動機・意思、地域システム)を主体的に再編構成する知的な営農集団(いわば知的な生産者ネットワーク)、そして精密農法の新技术を開発導入する技術プラットフォーム(企業や農家などにより構成、生産・流通・消費にわたる技術開発・マーケティングのネットワーク)、更に両者を融合した精密農法を推進するコミュニティが必要になる。導入コストの低減や環境保全及び付加価値生産などの効果は、そのコミュニティが判断することになる。

#### (iv) 精密農業と計測制御

##### a: マップベースPFにおける計測

実際に精密農業を展開するためには収量の計測をはじめ多くの要素の計測を行うことが課題である。前節の例は、マップベースの精密農業といわれるもので、計測結果がデータベース化され一種の地理情報システム(GIS:Geographic Information System)が構築され長期的な農作業計画に有効な技術である。例えば、小麦、コーン、大豆などの穀類についての実時間収量計測は実用化され、精密農業用コンバインとよばれる収穫機には、DGPSレシーバー、レーダ速度計、穀流センサー、含水比センサー、収量モニタなどが搭載され、収量測定精度を向上させる様々な工夫が施されている。

もちろん、精密に施肥管理などを行うためには、収量マップだけではなく土壌マップも重要である。例えば、土壌中の窒素、リン及びカリなどの主要成分の他に、pH、カルシウム、有機質含量などの土壌診断が必要である。その上で必要な場所に必要なだけの肥料を施す精密管理が実践可能となる。現在では土壌分析は専門業者が行い位置情報付き土壌サンプルを収集するための工夫が行われている。例えば、DGPSレシーバー、自己位置認識モニタ及びサンプリング用アクチュエータなどを備えた精密農業用の土壌サンプリング車両などが製品化されている。

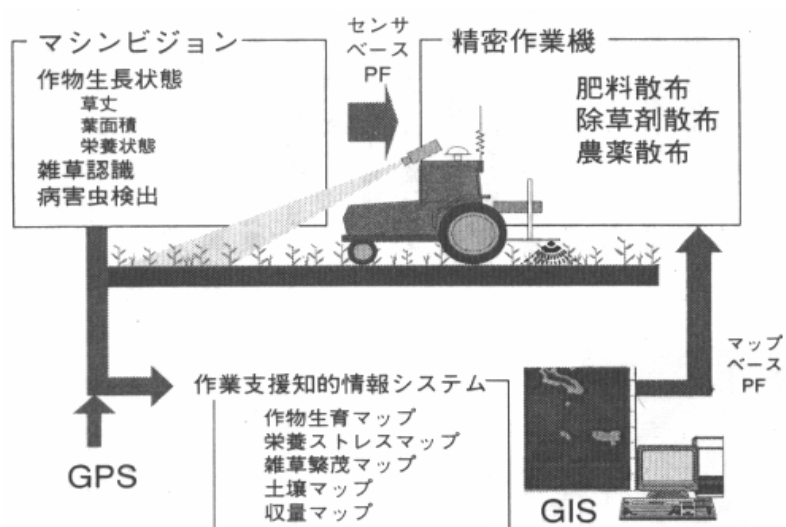


図5 センサーベース精密農業

##### b: センサーベースPFにおける計測

『マップベースPF』が長期的な農作業計画に有効な技術に対して、短期的(リアルタイム)に適切な作業を行うことを目的とした『センサーベースPF』も注目されている。いわゆる、On~the~go方式と呼ばれるPF技術である。例えば、コンピュータが雑草

の繁茂状態をリアルタイムで認識して、雑草の存在しているところだけに除草剤を散布する防除機、コーン、麦などの窒素ストレスを観察して高ストレスの作物群だけに窒素を追肥する施肥機などの精密管理作業機（図5）がこれに当たる。これらの技術は、大手農機メーカーで研究開発は進めているが、まだ商品化されていない。この原因はセンサー開発にある。一般に、この種の技術にはマシンビジョンによるリモートセンシングが有効であるが、高度な画像技術を必要とする。米国の農機メーカーはこの『センサーベース』の精密作業機の開発に鋭意努力しており、近未来のPF技術として期待されている。このように、今後のPF技術の期待はセンシングにあるといえるが、マシンビジョンによるリモートセンシング、リアルタイム土壌センサーなど研究開発が進んでいる。

### 5.3.3 細密農業によるシステムの最適化[10]

近未来の巨大アグリビジネスの創造を予感させる新産業技術がアグリ・バイオである。それは、マイクロバイオテクノロジーと情報技術（IT）を融合させたマイクロシステム技術を農業に応用することで生まれる新産業である。中でも、植物バイオテクノロジー（植物バイオ）は、健康増進効果や漢方薬的效果などを有する機能性野菜の開発といった一般大衆に受け入れられるバイオテクノロジーとして期待される。ここで言う植物バイオは、従来の遺伝子組換え技術に代表される「バイテク」とは大きく異なる。なぜなら、植物バイオの主役は情報技術とマイクロ（ナノ）技術である。例えば、植物はその根の周りに吸収できるアンモニア態窒素源が少ないと、根のアンモニウムイオン輸送体（トランスポーター）の活性を高めると同時に、輸送体自体の数も増加するように環境条件に対応する。これらは全て遺伝子のなせる技であり、アナログ的環境情報をセンシングしてデジタル的遺伝子情報に変換し、膜蛋白である輸送体の活性と産生を行うのである。植物バイオは、この複雑でミクロな世界の情報システムを扱う技術であり、また、バイオインフォマティクスは、遺伝子の情報世界を理解するためには不可欠な学問領域である。遺伝子組換え技術は、植物バイオのほんの一部にすぎない。

精密農業は、現在の段階では自然の影響を強く受けるフィールドの農業であり、その精密技術にも自ずと限界がある。これに対して、細密農業とも言うべき植物工場などのシステムは、将来の植物バイオにつながる技術である。路地栽培の場合、植物は光合成により蓄えたエネルギーを環境負荷に対抗するために大量に消費する。それに対して、植物工場の場合は、蓄えたエネルギーを全て次世代をつくるための遺伝子を全面的に展開するために利用できる。また、ハードウェアとしての植物工場については、そのシステムの同定が可能であり、気象変化などの極端な外乱を想定する必要がないことから、そのシステム制御は自ずとより高度な最適化が可能となる。植物分子工場

は、植物に有用物質を生産させる技術として将来有望視される技術であるが、そのような植物を栽培するシステムに露地栽培のような未知なシステムを適用することはできない。特に、閉鎖型植物工場では完全無農薬で、ゼロエミッションを実現するに最も相応しい食糧生産システムである。

ここで、植物バイオという観点で生産システムを考察する。これまでの植物工場におけるシステム制御は、主に植物生育環境についての制御であり、光、温度あるいは湿度といった環境要素が制御対象で信号の流れ（情報の流れ）の中に植物が入っていない。本来、植物生育の最適化が目的であるにもかかわらず、植物システムが組み込まれていないのである。この問題を解決することが植物バイオという範疇における技術開発である。すなわち、大規模複雑系である植物システムの同定が必要である。さらに、そのシステムの挙動を観測するセンシング技術が必要である。このような考え方は、既にSPA（Speaking Plant Approach）として知られているが、技術開発としてはその緒についたところである[11]。SPAの説明に、篤農技術がよく引き合いに出される。篤農家は、自分が栽培する植物をよく観察した上で適切な栽培管理をするので、商品価値の高い作物を育てる事ができる。そのことを利用して、篤農家が持つノウハウをデータベース化（情報化）して一般に利用するという試みもなされている。このアプローチが成功した場合は、植物システムがブラックボックスとして何らかの形でデータベースに取り込まれたことになるが、それは現実には容易ではない。さらに、篤農家が持つセンシングのスキルをデータベース化することは至難の業である。細胞全体をコンピュータ上に実現する巨大シミュレータのE-CELLプロジェクトがあるが、植物生産のための植物システム同定とは、実用レベルでのE-PLANTの開発に他ならない。一方の植物生体情報のセンシングについては、様々な技術開発が必要である。植物それ自体は情報を発信しているが、それは多種であり、時には非常に微弱であり、しかも空間的な広がりが極めて大きい。これらの性質は、人の感性情報と似ている。そのような情報のセンシングには、感性工学的なアプローチが有効であろう。植物は、軽度な接触刺激に対しても反応する場合もあり、画像などによるイメージング技術を利用した非侵襲なセンシング方法が考えられる。それは、感性情報の収集にも用いられる。ここでいう植物バイオの観点からは、やはりマイクロ技術と情報技術の融合であり、ウェアラブル情報端末のようなセンサー開発を目指す必要がある。植物生体情報や環境情報は、全てアナログ情報であり、それらをデジタル化して無線発信する超小型センサーの開発である。そのセンサーを、個々の植物、更に器官などに配してネットワーク上に植物生体情報を吸い上げることができれば、E-PLANTに入力することができる。

### 5.3.4 おわりに

図6に、食糧生産システムについて、その最適化レベルと環境負荷の関係を概念的に示した。食糧生産システムは、大規模複雑系ではあるが、そのシステムを同定する努力なしでは、持続的で環境にやさしく、しかも安全・安心を保証する食糧を消費者に供給することができない。自然を直接利用する農業では、その最適化レベルを十分上げるには限界があり、この分野で制御工学をもって社会に貢献することは困難である。しかし、閉鎖型植物工場のようなシステムについては、その最適化も比較的容易で、新しい技術を積極的に投入することも可能である。なぜならば、閉鎖型植物工場のようなシステムでは、その同定や挙動の解析が比較的容易であること、システムの人為的改変も比較的容易であることなどが挙げられる。過去に、ロンドンで、廃墟となった古いビルディングを植物工場にするプロジェクトがあったが、我が国でも農建融合などのアイデアも浮上しており、生産施設というより都市の一機能として、高層ビルのいくつかは太陽電池を窓代わりにインストールした植物工場にして毎日新鮮な作物を直接地域住民に供給するなど、是非近未来に実現したい。近視眼的には、建設コストやランニングコストなどにマイナスのイメージがあるが、実際には、環境コストや安全・安心コストを考慮し、大きな自然の負の影響に備えるコストも省けるなど、最適化が可能なシステムのメリットは計りしれないものがある[12]。

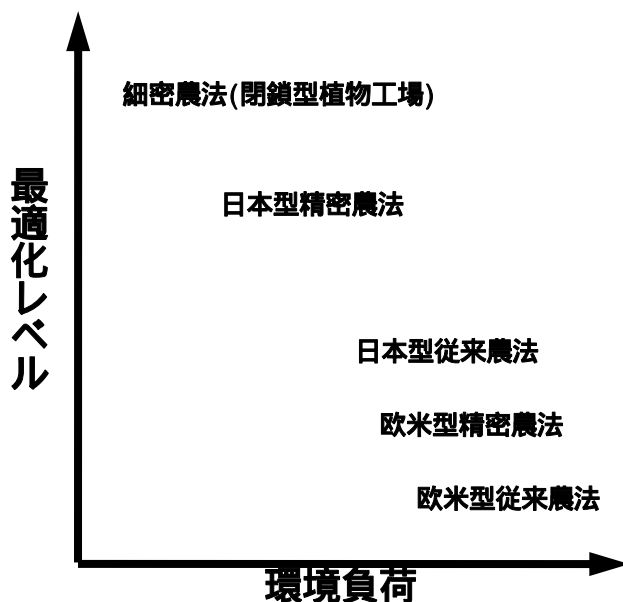


図6 農業の最適化レベルと環境負荷の関係



## 5.4 地雷探査

### 5.4.1 これまでの日本の取組

1997年3月6日、7日の両日、「対人地雷に関する東京会議」が開催され、(1)国連等による地雷除去活動、(2)地雷の探知及び除去技術の開発、(3)地雷の犠牲者に対する支援の3分野における国際協力の強化についての議論が行われた。12月には、当時の小淵外相がオタワにおいて「対人地雷の使用、貯蔵、生産及び移譲の禁止並びに破棄に関する条約」(対人地雷禁止条約)の署名を行うと共に我が国の対人地雷問題への積極的な取組「犠牲者ゼロ・プログラム」を提唱した。また、同年12月2日には、人道的な対人地雷除去活動に必要な対人地雷除去装置等については、一定の条件の下で武器輸出3原則等によらないこととする旨閣議で了承されたことが、村岡官房長官談話として発表された。さらに、2003年8月から、人道的な対人地雷の探知・除去活動に関連する機器は武器と見なさないこととされ、我が国において人道的な対人地雷の探知・除去技術の開発とその利用を行い得る環境が整った。

日本政府は、これまで、対人地雷に関連する活動を支援するために二国間や国際機関を通じた資金援助を積極的に行ってきた(総計6,914万ドル(2001年12月末))。対人地雷の探知・除去技術の研究開発に関しては、従来国内の企業とNGOにおいて、地雷探知センサーの開発、地雷原の植生除去あるいは対人地雷を処理する重機の開発が行われてきており、カンボジアでは植生の除去に、アフガニスタンでは対人地雷の機械処理に、日本製の重機が最近利用されるようになってきたが、機械処理による10～30%の取り残しは、人手で探知・除去をしなければならない。

1999年8月には、日本学術会議に人道的地雷探知・除去技術の研究推進検討小委員会が設置され、「人道的地雷探知・除去技術の研究推進について」と題する報告[13]を2000年2月にまとめている。同報告では、「人道的対人地雷探知・除去」のための研究開発を産官学共同プロジェクトとして発足すること、被埋設国で早期に使用可能な機器の開発に取り組むこと、特に短期に使用可能な機器の開発に取り組むとともに、長期的には、最先端技術を駆使して高度なロボット化・システム化技術の開発に取り組むことを提言した。

### 5.4.2 対人地雷の探知・除去技術の研究開発

アフガニスタン復興支援会議が2002年1月21日から22日まで東京において開催され、アフガニスタンの復興において大きな問題となっている地雷の探知・除去についても活発な議論が行われた。この問題には、日本の貢献が国際的にも強く期待されているところから、文部科学省においては、対人地雷の探知・除去技術について、人道的な観点から、安全かつ効率的に実施できるよう、先端技術を駆使した技術開発に取り組むことが重要と考え「対人地雷の探知・除去技術に関する研究会」を同年1月に設置した。同研究会は、研究プロジェクトの課題設定、実証試験を含む研究プロジェクト実施体制の構築等の国として取り組む研究プロジェクトの計画立案とその実用化に向

けた取組について検討を行い、「対人地雷の探知・除去技術に関する研究開発の進め方について」を報告書[14]として取りまとめ、文部科学省に提出した。この報告書に基づき、科学技術振興機構（JST）では、アフガニスタンをはじめとする世界各地における人道的観点からの地雷の探知・除去を、先端的な科学技術を利用して安全かつ効率的に実施できる技術を開発し、地雷が埋設されている国の地雷処理機関やNGO等に提供することを目指して、「人道的観点からの対人地雷の探知・除去活動を支援するセンシング技術、アクセス・制御技術の研究開発」の研究提案を2002年6月から公募し（7月26日締切り）、研究開発を開始した[15]。この研究開発は、短期的な研究課題については3年以内に現地で開発される試験機を利用した実証試験を実施される予定である。3年をめぐり、対人地雷を安全かつ効率的に探知するセンシング技術や、マニピュレータ、センサーを地雷に持ち込み地雷の探知除去を遠隔操作で行うことを可能にするアクセス機材と制御技術の開発をし、5年をめぐり、地雷に含まれる火薬自体の性質に注目し、より一層安全、確実かつ効率的に対人地雷を探知可能にするセンシング技術、多様な地形の地雷原に安全かつ効率的にセンサー、マニピュレータ等を持ち込むための高度なアクセス・制御技術、更には、地雷除去にも応用可能なバイラテラル制御技術の開発を目指している。2002年7月13日から18日まで、外務省、文部科学省、経済産業省、防衛庁関連の専門家からなる調査団がアフガニスタンのカブールとジャララバード近郊の地雷探知・除去現場を視察し、除去活動をしているNGOの専門家との情報交換を行い、実際の探知・除去活動で期待される技術の具体像を把握した。

#### 5.4.3 対人地雷の探知・除去

対人地雷は紛争地域において戦闘員を傷つけることにより、戦闘員の士気を失わせると共に、負傷者の救護に戦闘員を割くことによる戦闘能力の低下を目的に埋設される。対人地雷は通常7-16cmの直径のものが多く、約10cmの深さに埋設されるものが多い。対人地雷の構造としては、20-100gの爆薬と、加重に反応する圧力感知あるいはトリップワイヤにかかる加重変化により起爆するための信管を持つ。このような対人地雷は、戦車のような重機により破壊されることを防止するために対戦車地雷と共に使用することが多い。対戦車地雷は、通常135kg以上の圧力がかったときに起爆するように作られており、人が乗っても作動しないが、対戦車地雷が除去されるのを防止するためにその周りには対人地雷が埋設されていることが普通である。

対人地雷の探知・除去には、人道的な見地から行われるものと軍事的な見地から行われるものがある。紛争終了後にその場所を生活活動地域として利用するためには、100%の地雷除去を行わなくてはならない。これが人道的な対人地雷の探知・除去を難しいものになっている。具体的には人道的な対人地雷の探知・処理は次のような段階で行われる。

#### 5.4.4 対人地雷の探知・除去作業

作業は、地雷原特定（サーベイ）（レベル1）、植生排除・整地、探知（レベル2）、除去・処理、除去確認（レベル3）の各段階からなる。地雷原の特定は、被害者の発生、地域住民あるいは責任者からの通報から始まり、通常聞き込み調査が行われる。これらの作業は、国や地域により、方法や使用する機器が少し異なると考えられるが、アフガニスタン等では探知（レベル2）と除去・処理に先立って、地雷が爆発しても影響のないローラのような機械を利用した汚染地域の確定（Area Reduction）が行われる。カンボジアのような地域では地雷の埋設から数年経つとその地に灌木や草が生え、地雷を探知する前に植生の排除をしなければならない。カンボジアの例では、植生の排除の段階が地雷除去作業全体の70%の作業に相当すると言われるが、植生の少ないアフガニスタンでは、15%くらいでないかと見られている。

地雷が埋設されている地域は、周りに安全な幅2 m程度の道を設けることにより他の地域と区別され確定される。機械により掘り起こし、地面に加重をかける方法で地雷の処理を行う機械処理と、金属探知器を使用して地雷の信管を探知し、金属探知信号があると、その周りの土壌を周囲から取り去り(prodding)、地雷であれば、処理をする人手処理(manual clearance)がある。金属探知機では、金属片と地雷の区別が出来ないため、通常1000回の作業で、取り去る対人地雷は1個である。また、アフガニスタン西部では、土壌や石に鉄分を含むために、金属探知器に反応する問題がある。現在の地雷探知は、このような金属探知器だけを利用しているので、効率、安全性に問題がある。最近の地雷は、ほとんどの部分がプラスチックでできているものが増えており、金属探知機での検出が困難である。また、地雷探知・除去作業中の事故はproddingにおけるものが95%を占めるといわれ、この部分の機械化が期待されている。

#### 5.4.5 開発が期待される技術

地中の水道管や、遺跡の発掘にこれまで地中レーダが利用されてきたが、対人地雷は、小型で比較的地表近くにあることと、プラスチック容器に爆薬を入れた対人地雷は、土の比誘電率との違いが少ない場合が多く、現在のところ現場で使用するのにいくつかの問題が残されている。しかし、地中での地雷の姿勢、形状が測定されれば、安全かつ効率よく地雷の除去を機械で行う可能性を与える。そのため、金属探知機、地中レーダその他のセンサーの情報から地雷の探知を効率的にする複合センサーの開発が期待されている。現在、いくつかの企業において、複合センサーが開発されているが、今後解決すべき課題も残されているのが現状である。また、これまでカンボジアで灌木植生除去のブラシュカッターとして使われてきた我が国の重機メーカーの機械が、アフガニスタンの地表近くにある対人地雷の処理に有効であることが報告されている。しかしながら、問題は対戦車地雷の存在である。また、これらの機械による対人地雷の処理では、10%強の取り残しがあるために、人による探知・除去をその後行わなく

てはならない。

#### 5.4.6 おわりに

我が国は、これまでにアフガニスタンの地雷除去関連活動に対して、機材の供与だけではなく、さまざまな支援を行っている。これらに加え、我が国が得意とする先端的な技術を利用した、言わば日本の顔が見える支援をしなければならない。アフガニスタンにおける対人地雷は、1979年から1989年までの旧ソ連軍の軍事介入や、その後の内戦のために埋設された対人地雷の量と種類が多い。地雷の汚染地域も住宅地から、農地、石の多い牧畜飼育地と用途が多様であり、また地形も、平坦地から斜面まで多様である。これらの汚染地域での除去活動は、危険を伴う活動であり、また汚染地域の活用のためにも一刻も早い機械化が期待されている。

科学技術振興機構の研究プロジェクトで開発された機械により、一日も早く、アフガニスタンの地雷が除去され、復興の助けになることを期待している。



図7 Jalalabad近郊での犬を使った地雷原の調査



図8 Afganistanの元Battle fieldにて



図9 Afghanistan (Kabul近郊)での地雷除去作業

## 参考文献

- [1] 知的社会基盤工学技術の調査研究報告書、新エネルギー・産業技術総合開発機構  
平成9年度調査報告書、pp.59-75
- [2] 吉田和夫、構造物の振動制御の動向、電気学会論文集©、118巻、3号、pp.293-296  
(1998)
- [3] 計測と制御、特集号 金融リスクと計量化と制御、39巻、7号、2000
- [4] 数理科学、リレー連載 複雑系経済学とその周辺
- [5] ロバート C. マートン、東洋経済新報社、金融技術革命
- [6] 広松毅、浪花貞夫、経済時系列分析、朝倉書店
- [7] 木島正明、ファイナンス工学入門、日科技連
- [8] 野口 伸： 米国穀倉地帯におけるプレシジョンアグリカルチャ、農業機械学会誌、  
61巻、1号、pp.12-16 (1999)
- [9] S. Shibusawa: Precision Farming Japan Model , Agriculture Information Research ,  
vol.12, no.2, pp.125-133 (2003)
- [10] 村瀬治比古:植物工場による細密農業の展開、植物工場学会誌、第12巻、2号、  
pp.99-104 (2000)
- [11] Y. Hashimoto, H. Murase, T. Morimoto, T. Torii: Intelligent Systems for  
Agriculture in Japan, IEEE Control Engineering Magazine, vol.21, no.5,  
pp.71-85 (2001)
- [12] 古在豊樹：閉鎖型苗生産システムの開発と利用、養賢堂、p.191 (1999)
- [13] 日本学術会議工学共通基盤研究連絡委員会自動制御学専門委員会報告「人道的対

- 人地雷探知・除去技術の研究推進について」、平成12年2月
- [14] 文部科学省「対人地雷の探知・除去技術に関する研究開発の進め方について」、対人地雷の探知・除去技術に関する研究会報告、平成14年5月
  - [15] 科学技術振興事業団「人道的観点からの対人地雷の探知・除去活動を支援するセンシング技術、アクセス・制御技術の研究開発のご案内」平成14年6月
  - [16] 経済産業省製造産業局航空機武器宇宙産業課、平成11年度汎用技術実態調査報告書(対人地雷の探知・除去技術に関する調査)、平成12年3月
  - [17] UNMAS, et al., "Landmine and UXO Safety Handbook", CARE 1997
  - [18] 外務省ホームページ <http://www.mofa.go.jp>
  - [19] 下井信浩、「地雷撲滅をめざす技術」森北出版、平成14年6月

## 第6章

### 制御工学による人類と社会の将来

本題である「制御工学により人々の生活を変えること」を述べることは非常に難しい。そこで、6.1で制御工学の変遷と未来への展開として、人類の技術の歴史観を述べ、その底流に制御工学が見られることを述べる。次に、6.2では「制御工学により人々の生活を変えること」と題して、6.1で述べた制御工学の意味をもっと深く考察し、基本原理と今後の制御について述べている。最後に、6.3では「制御工学の人類への貢献」として、巨大システムにおける制御の問題、制御の他分野に応用した視点からその底辺を探っている。また、もし制御工学が生まれなかったらという逆説的な設定で、本題の神髄について詳述している。

#### 6.1 制御工学の変遷と未来への展開

##### 6.1.1 人力の時代から知力の時代へ

人間が鋤、鍬を用いて田畑を耕す時代から、今日に至る長い技術と制御工学の変遷を俯瞰し、今後の展望について考える。

科学技術の歴史は、技術の考え方によっても異なるが、ここではその長い歴史の変遷を大きく捉えて、人間自身が手足を動かして作業を行った農耕の時代を「人力」、蒸気機関を初めて発明し、それを用いて新たな産業を開始した産業革命を「動力」、コンピュータを高速化、小型化、そしてネットワーク化して、新たな知的処理を基盤とする情報化革命時代を「知力」、さらに、ロボット革命時代を「ロボット力」とする。これはそれぞれの時代がパワーによって支えられてきたと考えて「力」として端的に表される。

はじめに、縄文、弥生時代に見られるように、各種農産物が人々の糧となり、その生産物を少しでも楽に収穫ができるように、簡単な鋤、鍬といった農機具を作りだした。この簡単な道具を用いて自給自足を行った時代は紀元前500年頃と考えられる。この時代は人々が簡単な農機具や、人手による作業で農耕作業を続け、その原動力を人間が受け持った。そこで、この時代のパワーを「人力」と呼ぶことにする。農耕民族や狩猟民族と呼ばれるように人間が人間たる原点と考えることができる。それは鋤、鍬の道具を用いて田畑を耕し、あるいは森に狩りに出かけ、その日の糧を得て生活を送り、一種の村社会を構成して自給自足生活を送っていた時代といえる。



その後、18世紀になるとイギリスでは産業革命が起こり、これは世界各地に伝搬した。その大きな要因は蒸気機関を手に入れたことで、初めて人手以外の動力を手にして新たな産業が各種立ち上がった。

例えば、ワットの遠心ガバナーを有するスチームエンジン（1789-1800）は、負荷や蒸気圧の変化に関わらずエンジンの速度を一定に維持する機構が作られていた。遠心ガバナーで速度を検出し、それを一定にする機構が設けられている。ロンドンにある科学博物館の入口のフロアーにはジャンボジェットの実物の前輪が置いてあるが、そこから入る1階の最初の部屋に、このワットの蒸気機関が飾られており、目を見張るものがある。

この新しい蒸気機関を取り入れて動力を利用するとき、この安定な供給が必要で、このために蒸気機関の安定運転のための技術が考え出され、今日の安定理論や自動制御の研究が立ち上がった。

人間が道具を作り出して作業を行う時代から、蒸気機関を始めとする新たなエネルギーを用いて作業を行う時代に移り、生産の形態も人々の手元から工場に移っている。この新たな生産形態は、新たな機械を作りだし、その機械によって製品も均一化され、低価格化、大量生産を可能にして、物質的社會の生活の扉を開けた。また、新たな科学を芽生えさせ、今日の紡績、機械、鉄鋼、化学、電気などの分野が形成された。その後、石炭や石油など石化燃料が用いられ、新たな公害問題なども引き起こしている。

各種エネルギーの中で、電気エネルギーは、クリーンで、加工しやすく、使いやすく、また、制御しやすく、人々がいつでもどこでも利用可能で、次第に電気エネルギーが主に用いられるようになった。そして、電気エネルギーを利用した機械、機器、そしてこれらを用いたシステムの構築が行われ、この効率的な利用、更に人間の社会生活を豊かにするような各種の応用機器の開発が進められた。

このように、エネルギーを利用して生産システムを実現し、各種の製品を生産する時代を「動力」の時代と呼ぶことにしよう。この「動力」の時代は、紡績、機械、鉄鋼、化学、電気といった各種の分野が切り開かれたが、これらの分野で応用される機械の機能を向上させるために、自動制御あるいは制御工学が大きな役割を果たし、それぞれの分野のバックボーンとなって展開している。

20世紀後半に入ると今日のコンピュータが生まれ、その低価格化、高速化、小型化が加速され、これらを用いた装置、機器による社会へのインパクトは大きく、次第にこれらが主体的な利用に移り変わって、産業革命と同様に情報革命と言われ、「知力」の時代に変遷している。

コンピュータは、当初は大型で、高価なために、この装置を中心に置いて多くの利用者によって活用されたが、次第にネットワーク化が進み、装置も小型化されてネットワークの中に組み込まれ、次第に大規模なネットワーク網を構築しつつある。この



例は、POSシステム、ATM（現金自動預け払い機）、生産・調達・運用支援システムなどに見られる。

また、産業革命以降に発達した「大量生産システム」からコンピュータのネットワークを取り込んだ各種の生産システムが構築されつつある。

「知力」の時代は、コンピュータを基本としたネットワーク化の進展によって、知識を分類し、それを蓄えると同時に、それを他に転送する技術が大規模に可能になり、情報を基盤とした経済的な価値を創出し、取引されるという社会が構築されつつある。特に、人間自身の情報処理形態に見られるように、情緒、感情などを扱う感性処理、人間を中心とした人間・機械・環境間の相互作用などにみられるように、人間を中心とした他とのインターフェースの配慮がなされた処理能力などの構築が今後展開する。その処理においては、他との情報交換は、点的な情報交換から面的な情報交換へと細密になっていくと考えられる。

このネットワーク時代の進展は、単にコンピュータを用いて情報を発信あるいは受信するだけでなく、ネットワーク内に人が介在し、情報はセキュリティを介して基本的なフィードバック型となっている。

### 6.1.2 知力よりロボット力へ

平成13年7月に経済産業省産業機械課が提出したロボット産業に係わる政策の基本的な考え方 21世紀ロボットチャレンジャーによれば、ロボットは「外部（内部）環境を感知し、収集された情報に基づき適当な物理的動作を行う機械システム」と定義され、在来型の産業用ロボットから人間のいる環境への対応として医療、福祉、介護、災害防止・救助、アミューズメントなどに関心が高まりつつある。

1974年に、世界で最初の二足歩行機械WABOT - 1（早稲田大学）が開発され、その後、多くの機種が開発され、二足歩行機械の基礎が築き上げられた。1996年になると、本田技術研究所がヒューマノイドロボットを発表し、人型のロボットとしてヒューマノイドロボットが出現した。このロボットは、二足で歩くことが当初の作業であり、次第に、階段を上ったり降りたりして簡単な作業もできるようになっている。その動作はまだ不十分であるが、エンターテイメント分野において大きな役割を果たしている。日本においては、上記の他、いくつかの大学、産業技術総合研究所、企業等で先端的な研究の一つとして開発が続けられている。

このヒューマノイドロボットは、13自由度（上肢6自由度、下肢6自由度、体幹1自由度）以上の関節を有しており、それぞれがサーボ系を構成しており、かつ、これらが全体的に統合化されて、安定を図りながら歩行を可能にするものである。したがって、各サーボ系を統合化するためにコンピュータが配置され、このコンピュータが各サーボ系への目標値設定とロボットの動作制御にリアルタイムで行っている。

ロボットの作業は、まだ限られた作業しか行うことができないが、次第に、その機能が付加されて、我々が考えるロボット革命に移行しつつある。

また、自動車を制御の観点より眺めれば、大型車の場合30個以上のCPUが搭載され、エンジン制御など各種の制御が行われており、従来機械的な分類に入っていた自動車の制御も電子制御に移りつつある。この自動車も、エンジン制御などに見られるように、16気筒のエンジンをリアルタイムで複雑なコンピュータ制御を行っている。

このように、機械システムも複雑化し、その制御もリアルタイムで処理され、人と機械が互いに密接な関係を保ちながら作業が実行されていくような時代に入っており、これを「ロボット力」として捉えることにする。

この「ロボット力」は、ヒューマノイドロボットの二足歩行に見られるように、ロボット自身が動き回るといふ意味でいわゆる身体性を持っており、同時に介護作業などの対象にも身体性がある。これらの両者間の作業は互いに行動を伴うので、ロボットから見るとフレキシブルな対応が必要不可欠となり、作業対象への認識や作業の状態を識別するなどの新たな機能が求められる。このように、行動を伴う作業など従来人手が行ってきた作業の自動化は、先に挙げた介護・介助支援やエンターテイメントなどの分野において必然的に人間に違和感のない形態を構成している。

ロボットは、これらの応用に見られるように、人間への作業において人間に接触することが起こり、相互の協調、共生が図られなければならない。すなわち、ロボット側から考えると、環境への空間的な対応能力が必要で、その対応には知力の全面的なバックアップが必要となり、従来サーボシステムとして閉じていたシステムが知的な情報に基づいてシステム全体が対象に対して自在に対応するという開いたシステムであり、それは空間的な対応能力がますます必要となってくる。同時に、人に対して安全性を保ち、安心感も同時に保たれなければならない。

さらに、ロボットとバーチャルリアリティを融合化し、時間的な、かつ空間的な制約を解放した技術であるレイグジスタンスは、人間が時間と空間、あるいはそれらの両者を隔てた実効環境と等価的に存在することを可能にしている。

このように、「人力」の時代に見られるように、作業行動が人間自身の肢と知覚を介して作業が行われてきたが、その底流にもフィードバックが存在し、また「ロボット力」に見られるロボットシステムにおいても複雑なフィードバック制御が行われ、必要不可欠な機能となっている。

さらに、「動力」の時代に開始された紡績、機械、鉄鋼、化学、電気等の研究分野は「縦型の研究分野」と言われ、「知力」、「ロボット力」の時代は、人間を主体として、その生活そのものを豊かにする視座を持つ技術体系として構成されつつあり、従来の学問体系から新たに人間を中心に置いて融合化を図り、これらの研究分野を「横型の研究分野」と言っている。従来型の産業に成熟感が見え隠れする時代となってい

るので、これを突破するためにも次第に「横型の研究分野」化に進化している。

また、社会の構造自体にもその傾向が大きく、これらの制御工学を中心に体系化を行って、その底に潜む新たな基本原理を見だし発展させることが今後の課題となる。

## 6.2 制御工学の活躍と生活と文化への影響

### 6.2.1 制御のメカニズムの遍在性、自動化への好奇心、精密さの向上

制御はどこか限られた局面に使われているというものではない。人が行動するとき、仕事をするとき、そこに制御が働いている、とでも言うような、遍在的存在である。人がテーブルの上のコップをつかみ、口へ運んで水を飲むという行動の中にも制御がある。コップのところまで手を運ぶ過程にも制御がある。コップの位置に手がまだ届いていないことを検出し、手がコップに近づくまで手を操作する。このとき、手をどの方向へどのくらいの速さで動かしたらよいかも判断して操作している。これはピラミッドを組み上げるために大きな石を引っ張り上げた場合にも同じであったはずである。目標点に石が向かっているかどうかを検出し、必要に応じて修正し、人力を集結して引っ張り上げていった。このような検出、判断、操作を繰り返し行うことが制御である。

この制御の構造は、人間がやろうと、自動化されようと同じである。しかし、人間の感覚器官、頭脳、筋肉・運動器官、神経系から人工の検出器、制御装置、操作器、通信線路に置き換えられる過程で、機能・性能を向上させつつ、人間を部分的にあるいは全面的に解放してきている。

ヘロン（紀元前3世紀～3世紀の間、紀元前1世紀前半という説が有力）が創った神殿の扉の自動開閉装置は神の威光を示すもので、一般大衆の生活の改善に貢献したわけではないが、その機構には油が注がれて火がつけられたことを検出する機能と、扉を開閉する操作器が明瞭に組み込まれている。ワインの定量供給装置（アレクサンドリアのHero、西暦50年頃）、一定の水量を常に蓄えておく馬の水飲み桶（バグダッドのBanu Musaという3兄弟による著書“On Ingenious Mechanisms”の中の記述、9世紀）、孵卵器のサーモスタット（Cornelis Drebbelの発明、17世紀）にも検出器と操作器が備わっている。ワインの定量供給装置や馬の水飲み桶では、浮子で検出された液面位に応じて作動する弁でヘッドのある貯水槽から水の流れを調整している。孵卵器では恒温槽内におかれた壺の中のアルコールが膨張すると封材になっている水銀を介してこの一端を押し、てこの他端で燃料の絞り弁を閉めるようになっている。液面位の制御では何らかの原因で液面位が高すぎた場合にそれを減らす機能は備わっていない。サーモスタットでも温度が上がりすぎたときは燃料供給量を減らしはするが積極的に冷却する機能はない。このような意味で、過多、過少の両方向に修正機能が備わっていない点は完全なフィードバック系とは言いがたいが、このような非対称でない構造

は現在でも広く使われているもので、特に、冷却は自然冷却に頼っている系が多いのであるから、決して幼稚ではない。ただし、後述するように、今日の制御システムの構造との対比で考えるならば、検出器からてこなどの力の伝達機構で操作器を操作していること、したがって、検出した物理量から操作する物理量への関係は単純な比例関係であること、言い換えると検出器から操作器への伝達が情報に“昇華”されていないこと、途中でより複雑な判断や演算をしていないこと、また操作するためのエネルギーは増幅されていないことなどが挙げられる。この意味で、より複雑な、そしてエネルギーレベルの高い仕事をしてくれたというわけではないかもしれないが、いつも人間が監視し、調整しなければならぬという労働から人間を解放し、ゆとりをもたらしたと考えることができる。

このような制御によって、人間しかできないと思われていたことを機械や装置にやらせて楽しむという側面もあると思われる。それは、歩く孔雀や、歩き、翼や頭を動かす、鳴いたり、餌を食べ、水を飲んだりする鴨、自動演奏人形、自動筆記人形、また、日本の茶運び人形その他のからくりなどにも現れている。ただし、これらの自動機械は組み込まれたプログラムを実行するだけで、状況に応じて判断し、調整していくような機能はない。この延長上に考えるのがよいかどうかは別として、最近の癒し系ロボット、例えばAIBOなどは、持ち主の気持ちと相互作用するようになってきている。このレベルになると環境や持ち主の対応状況を検出する機能と自分の態度や行動を決める機能、それを表現する操作機能も備わった高級な制御システムになっていると考えるのも良いであろう。

時の流れをより正確に知りたいという観念がどのように発生し、発達してきたのかわからないが、時を刻む装置の精密化にも当然制御が活躍してきた。時計の始まりは日時計であるらしいが、これには季節による変動を補正する程度の機能しか必要がない。しかし、紀元前数世紀から使われだしたという水時計では、水の流れを一定に保つための制御が必要であり、水槽の液面制御などが利用されている。

振り子時計においても、振り子の等時性の精度を上げるためのホイヘンスの考案がある。振り子の等時性は振幅が小さいときの話であって、振幅が大きときは周期が伸びる。それを補正するために振り子の根元を板ばねにし、振幅が大きくなると振り子が短くなるような抑えのカムをつけている。このカムは振幅を検出する機能と振り子を調節する操作機能を兼ねている。

正確に時を刻むという機能は人間にはないから、時計は人間をその仕事から解放したというわけではないが、時刻を知るといことは生活し、行動する人間に大きな心理的安定感を与えてくれるし、社会活動を安定化させるのに不可欠であろう。もちろん科学や技術の発展にとっても最も重要な基盤である。

## 6.2.2 大きいエネルギー源からの流れの制御

以上はあまりエネルギーレベルの高い事例ではなかったので、検出器から操作器への連結は簡単なカムやリンク、歯車などの機械的機構で間に合っていたものが多い。特に検出情報から操作方法を決定するのに複雑な計算を必要とするものでもなかった。操作するエネルギーも検出器に加わる外力、浮子を浮かす液体の浮力、水槽に溜めた水のヘッド、熱膨張の力などで間に合っていた。そのような観点から人間を肉体労働から解放するというようなものではなかったかもしれないが、高いエネルギーレベルを扱えるようになると制御の効果は非常に大きいものになる。

まずは自然力の利用が考えられる。水車や風車の利用が考えられるが、風車をいつも風上に向けるために、風車に直角の方向に風見の風車をつけて、風見車が風を受けて回り、その力で本体の風車とその支持部全体（風車の塔の上部）を風上に向くように回転させる制御が1745年にEdmund Leeによって発明された。本体の風車が風上に向くと風は風見車の面に並行に流れるので、風見車は停止し、本体の風車が最も効率よく風を受けるわけである。風車ではこの他に、風の強さに応じて風車が受ける力を加減できるシャッター式の風車を1772年にAndrew Meikleが発明している。シャッターがばねで引き付けられて風を受けるようになっているが、風が強いときはばねが伸び、シャッターが押されて風を受け流すようになっていて、一種の自己平衡性の調整機構になっている。また、遠心振子を利用して石臼の石の間隔を制御する特許が、1783年にThomas Meadによってとられている。風車の回転速度が増すと石臼の間隔が開く傾向にあり、粉が粗くなるので、回転の速さに合わせて人手で間隔を調整していたが、遠心振子の支点の上下運動によってその間隔を操作するようにしたものである。遠心振子はワットの蒸気機関に使われて有名であるが、蒸気機関に用いることはThomas Meadの特許の請求範囲外だったので、1788年にワットが特許を申請している。

自然力に頼らず人工の大きいエネルギー源を使いだした最初が、ワットの蒸気機関であろう。その大きいエネルギー源からのエネルギーの流れを制御しつつ使うという技術が、産業革命のきっかけとなった。ワットの蒸気機関は、蒸気力でピストンの往復運動を起し、往復運動を回転運動に変換して、いろいろな機械や装置を動かすというもので、その回転速度を一定に保つために遠心振子を使って供給蒸気流量を加減するという制御が使われたわけである。

このようにして質のよい動力を供給できるようになると、様々な機械の考案によって、人間の手間にかかる、単調な、反復作業や力のいる労働からの解放が可能になっていった。時と場合によっては、機械に人間が振り回されることも生じたが、また新しい自動機械によって人間が解放されることになる。この本質は、制御が大きいエネルギーの流れを操作できる点にある。ただし、大きいエネルギーを扱う段になると、それだけ検出器や操作器も精度の高いものが必要となる。そうでないと、わずかな狂

いが大きい事故の元になりうるからである。逆に、精度の高い検出器や操作器によって、人間の及ばない品質の高いものが短時間で大量に生産されるようになった。

エネルギー源は、風力、水力、油の圧力、電力など、更には原子力へと広がっている。油圧は大きい力を出すのに使いやすく、大型の加工機械や建設機械などの操作器の駆動力として使われている。しかし、油圧は遠方への伝達に難があり、伝送、増幅などに便利な電力がむしろ広くゆきわたっている。風力、水力、火力、そして原子力が電力に変換され、利用されている。当然、この電力へのエネルギー変換の過程でも制御が活躍する。特に、原子炉はそれ自体で自己平衡性を持たないから、制御で安定化している。

大きい力を出すのには油圧が向いているが、検出器から操作器へは電気信号で連絡するのが便利である。力学的機構での連絡から電気信号への移行が一般的になる。油圧による物理的仕事と電気信号による情報伝達という情動的仕事ははっきり分かれるようになる。化学工場などで、電気火花を嫌う場所では電気信号に安全性のバックアップがされるまでは空気圧も使われた。空気圧も油圧より弱いですが電気より力を出せる場面もあるため、現在でも使われている。

フィードバック機構が有効であることは直感的に分かる。したがって、それを用いた制御システムの構築も、始めは直感的に機構が考えられたであろう。しかし、大規模、複雑になるに従って必ずしも望みどおりの動作をしてくれないシステムも現れ始め、いかにうまく働かせるかの問題が浮かび上がってきた。その一つが、大規模になった蒸気機関の一定になるはずの回転速度の不安定性であった。1868年、J. Clerk Maxwellはその問題を数学的に論じ、安定化のための仕組みの必要性を明らかにした。以後制御理論が発展し、検出器から操作器に連絡する途中に制御装置を設け、高度の補償や制御ができるようになる。

### 6.2.3 制御の現代の姿 - 物理と情報の分離、制御装置の高度化

制御は遍在的であるから、今や制御が活躍している局面は枚挙に暇がない。生産現場はもとより、生活空間、交通システム、建設現場など、そして我々の体自身が制御の塊でもある。前項までに制御の形態が徐々に変化してきた経緯を見てきたが、今や制御の本質的構造をはっきり把握することができる。それを図1のように表してみた。

制御システムの最も重要な構造は、物理的仕事をする部分と情動的仕事をする部分からなっていることである。物やエネルギーを生産し、また仕事をするのは、現実の物理的世界においてである。しかし、それを計画し、実行に移すのは物理的世界でなくてもよい。むしろ情報の世界の方が自由である。現実の物理的仕事においては、原料や副原料などの物質とエネルギーをその供給源からもらって、加工、組立や化学的処理などを行い、製品を送り出す。また、動力機械などではエネルギーを供給源から

もらって外部へ仕事をする。この組立、処理、外部への働きかけをするなどの過程は、原料やエネルギーなどを供給されて始めて動き出すという物理的因果律に従った動作をする。結果が出るまでには必ず遅れがある。そのようなプラントや装置を制御するには、生産目標、あるいは仕事の完成目標に応じてプラントや装置をどう動かすか考えなければならない。どのくらい前もって、どのくらいの量の原料やエネルギーを供給したら、生産目標や仕事の目標を達成できるかを考えて、実行しなければならない。このような計画は、目標としている結果を達成するための原因となる操作の仕方を考えること、望ましい結果からそれをもたらす原因を考えることであって、因果の逆を求めることである。これは因果律に反するから物理現象を利用してはできない。一種の予測であって、物理法則から解放された人間の頭の中の仕事である。それは情報の世界での仕事である。簡単な制御の段階では、てこなどの機械的機構で結合するだけでもよかったが、物理的仕事が大規模、複雑になってくると綿密な計画が必要になる。そうしなければ安定的に、効果的に働かなくなってしまうのである。

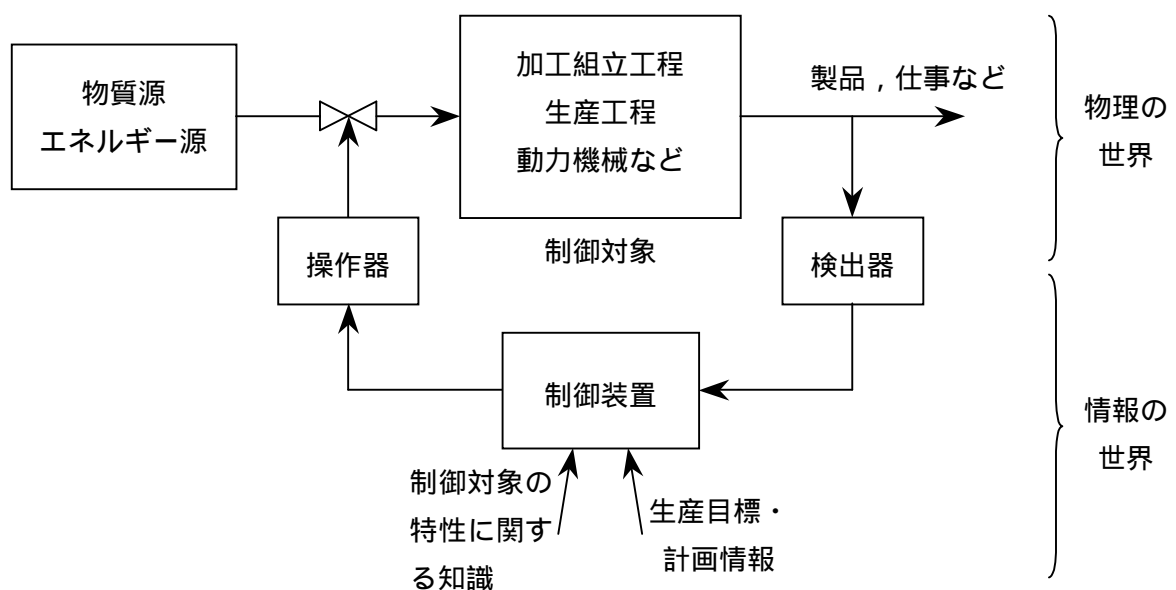


図1 制御における物理世界と情報世界

このように、はっきりと物理的仕事の世界と情報処理の世界と分けて考えたとき、それに最も適した道具を使うのがよいことになる。現在ではデジタル計算機構が用いられる。以前はアナログ計算機構が用いられていたが、アナログ計算機構は物理現象を利用した計算機構であるので、因果律の支配から完全には解放されず、限られた範囲の計算しかできなかった。デジタル計算機構は、論理演算と記憶要素を基礎に組立てられているので、必要な情報さえあらかじめ供給しておけばなんでも計算して

くれるわけである。

デジタル計算機を用いた制御装置では、検出器から制御対象の現在の状況に関する情報を受け取って、操作器に今何をなすべきかの命令を出す。操作器では、その命令を物理的操作に変えて制御対象に働きかける。この検出器と操作器が物理的世界と情報的世界のインターフェースの役目を担う。しかし、検出器からの情報は必ずしも制御対象の状況そのものではなくて、生のデータでも、それを受取った制御装置において補正計算などをしてより正確な状況の情報にすることもできる。同様に、操作器が何らかの“くせ”を持っている場合に、それを考慮した命令を作って送ることもできる。こうすることによって、より一層精度の高い制御を行うことができることになる。

現在の制御はこのように、特に情報処理の側面で長足の進歩を遂げつつあり、ますます大規模、複雑化する制御対象、大量の物質やエネルギーを駆使する大きな仕事をもこなせる段階にきている。こうして、力仕事や単純な繰り返しの仕事などから解放された人間に残された問題は、大規模、複雑な仕事を制御する制御装置の“プログラム”の設計という知的な労働である。おそらく、この知的労働もデジタル計算機に任せようようになっていくであろうけれども、その任せる計算機の仕事の設計という更に上位の仕事が必要になるであろう。

### 6.3 制御工学の人類への貢献

制御工学がなくてはならない世界は何か、またどのようなシステムが人類に貢献できるか等、大局的な論点より、制御工学の問題点を展開し、人類の幸福のための道筋を描く。

#### 6.3.1 もし制御工学が生まれなかったら

制御工学が人類に与えた影響は想像もつかないほどであるが、仮に制御の概念が生まれず、制御技術がなかったとしたときの世界を考えれば、その貢献度の大きさを実感することができる。身の回りの調度を数え上げれば、膨大な数の家電機器、空調温熱設備、自動車などがあり、それらの多くの装置の内部には制御系が組み込まれている。産業システムについても、機械装置、化学プラント、電力システムなどどれをとっても制御なしに成り立つものは存在しない。

制御の概念は、ワットの蒸気機関に使われた遠心调速機の発明を契機に生まれたといわれているから、制御工学がもし生まれなかったら、18世紀後半以降の技術はずいぶん違ったものになっていたと想像できる。调速機のない蒸気機関は、人間による釜炊きで速度調節を行わざるをえず、その手間や不安定な特性を考えると一般に普及することはなかったであろう。石炭・石油などへのエネルギー移行と新動力装置によって支えられた産業革命も起こらなかつたに違いない。



電気技術と制御の関係も上の場合と似ている。発電システムにおける電圧、周波数、位相などの制御は必須であり、制御なしではガス灯の代替としての電灯程度の普及しか期待できなかったであろう。電気の後に続く電子の時代も精密計測の支えがあって初めて開かれた。これらも制御なしには考えられない技術であり、制御工学の偉大さを実感することができる。

制御工学がこれほどの影響力を持っているのは、その独自の性格にもよっている。電気、機械、化学、原子力などに関する工学はそれぞれ固有の対象に関する縦型の工学であるのに対し、制御工学はそれらすべての対象に共通的に適用できる横型の工学と見ることができる。制御工学は縦型の工学と不即不離の関係で連合することにより役立っているのである。それゆえ、制御が倒れれば皆倒れるといった状況も生まれるのである。

### 6.3.2 原子力と航空宇宙

現代最新の技術の中で制御工学抜きには語ることはできないものは、原子力と航空宇宙であろう。周知のように原子爆弾は原子力発電に先んじて実現された。これは不幸な時代の要請による結果でもあるが、何よりも原子爆弾は核反応を暴走的に起こせばよく、技術的には比較的容易であったことにもよる。一方、原子炉は核分裂反応を徐々に進める必要があり、その制御が容易ではない。中性子の速度を調整する制御棒の出し入れによる核反応の制御方法が発明されて初めて、原子炉が実現されたのである。現在稼動している原子力発電所の原子炉もこの制御により正常運転が保たれているのであり、制御不全に陥れば、即大事故につながる可能性もあるのである。20世紀最大最悪の事故とされるチェルノブイリ原子力発電所事故は、原子炉の再起動の際、無理に出力を上昇させようとして、制御棒を引き上げすぎたために原子炉の暴走に至り、引き起こされたとされる。制御の正常稼動を前提に構築されている現代社会システムの危うさを痛感するとともに、制御工学よ頑張れと叫びたくなるのである。

航空宇宙における技術も制御なしには語れない。ライト兄弟の最初の飛行機の最大の特徴は、撓み翼（今日の補助翼に代わるもの）、昇降舵、方向舵の3舵によって自由に操縦できるようにしたこととあり、機体を自由に制御できるようにしたことが成功につながった。ジェット機が主流となった現在でもそれら3舵を操作することが機体操縦の基本であるが、多岐にわたる精密な制御は自動装置にまかされ、パイロットには操作性の良いインターフェースが準備される。いまや、飛行機は進路さえ決めればあとは自動操縦も可能なシステムとなっている。それにより、パイロットは運航全般に関する意思決定に意識を集中することができる体制になっている。制御への依存度を究極までに高めたのがCCV(Control Configured Vehicle)：運動性優先形態（機）、または運動能力向上機である。これは機体の安定性を意図的に度外視し、運動性（機

動性)を最優先して設計された飛行機のこと、安定性はコンピュータが自動制御することによって確保される。制御不全に陥れば機体は石ころと同じように操縦不能になる。

ロケットやスペースシャトルなどの打上げにも制御工学は不可欠である。サターンロケットの打上げは、エンジン制御、軌道運動制御、姿勢制御、柔軟な胴体の振動抑制など多岐にわたった完璧な制御があってはじめて実現可能であったといわれる。アポロ計画やスペースシャトル運航における人命事故などを考えると、今後の宇宙計画は無人工化の方向に向かうものと考えられ、それによりますます高度な制御技術が要求されるようになるであろう。

### 6.3.3 物理レベルと意味レベルの制御

制御を加える対象は制御対象と呼ばれる。例えば、自動車や飛行機やモータなどである。その制御対象の制御すべき量のことを、制御量と呼ぶ。制御量の例としては、部屋の温度、モータ軸の回転角、その角速度、プラントの液面位置、液体のpH値、タンク圧力、回路電流などがある。これらの制御量はすべて物理量であるので、それらの制御を物理レベル制御と呼ぶ。一方、鳶などの鳥の遊弋を考えよう。遊弋は獲物をねらい一定の高さで徘徊するという意味をもった行動である。鳶によって自律制御されるその行動は、単に翼の上下運動や尾羽のひねり角度を制御することとは明らかにレベルが異なる。このようなレベルの制御を意味レベル制御と呼ぶことにする。飛行機の自動操縦システムや原子炉の制御システムなどは意味レベルの領域に達しているとみることができる。動物には普通に見られる意味レベルの制御も、人工システムでは希少である。

意味レベルの制御は、あるミッションが与えられたとき、あらゆる状況に対処できるものでなくてはならない。それには、状況の認識と状況に応じた対応が要求され、それを実現することは困難である。しかし、意味レベル制御を行うことにより、環境状況を一本に絞らなくても済むようになり、その有用性は飛躍的に高まる。今後の制御技術の進むべき方向の一つとしてその重要度は高い。

ロボットの制御を例題とし、上のことをより深く考えてみよう。現在広く使われている産業用ロボットの制御の基本は、人間の腕関節に相当する自由度の回転角度や伸縮量を制御するサーボ系である。このサーボ系に時間的に変化する目標値を与えることにより、ロボットに任意の動作をさせることができる。ロボットに塗装作業を行わせるためには、手先にスプレーガンを装着し、塗装面にそってそれを動かす軌道をサーボ系に与える。その軌道は通常、人間があらかじめティーチングと呼ばれる厄介な操作を行い準備する。このように、ロボットが作業を行うとしても、ロボットは人間が準備した動作軌道を追従する制御を行っているだけであるから、制御は物理レベル

である。ロボットが実行する作業は多様であるが、その制御法はほとんどが上に述べたようなものである。このレベルの制御には、ティーチングを必要とし大量生産のための作業以外には適用が困難、環境の変化に自律的に対応できず環境維持にコストがかかる等多くの限界が存在する。ロボットには作業指令さえ与えれば、あとは自律的に働いてほしい。そのためには、ロボットが作業の目標や作業の意味を理解し、環境状況に適合しながら作業を進めることを可能にする、意味レベルの制御が必要となる。

ロボットにおいて意味レベルの制御（ロボティクスでは作業レベルの制御と呼ぶ）を実現するための課題は何であろうか。一つは環境認識である。環境がどのようになっているかを常に観察し、環境に適合しなければならない。二つ目は動作計画である。自己の状態を含めて作業の進行状況を正しく捉え、常に作業目標に向かって舵取りしなければならない。そのためには、現在の状態から目標状態に至る動作の手順や軌道を計画する能力が必要となる。これら環境認識や動作計画の重要性はロボットの揺籃期から指摘されてきたところであるが、それが余りにも困難であるために、敬遠されたり、専ら基礎研究に限定された歴史がある。いまや、情報通信技術の飛躍的な進歩を背景に、これらの課題に本格的にチャレンジするときではないだろうか。実用的に差し支えない程度に環境を整備したり、修飾したりすることも考慮のうちに入れば、これは現実的な話であろう。

今後、ロボットに限らず、制御の対象がより大規模化し、より複雑化していくなかで、それらを安全に効率的に運用していくことを考えると、意味レベルの制御に対する強力な取組が望まれる。

#### 6.3.4 制御工学的世界観

制御と人類との関わり合いというテーマで自由に発想を展開してみたい。我々の住む地球は宇宙の中で極めて安定な状態を保っている。このような安定状態は、何かの制御の働きによって維持されていると解釈することもできよう。事実、素粒子、原子分子、気体、液体、固体、気象、プレート・テクトニクス、惑星運動などに関するミクロからマクロまでの運動を支配する力学が存在し、その結果安定的な快適な世界が存在していると考えられる。世界を持続するための自然の制御メカニズムがビルトインされているわけである。この自然の制御メカニズムが変調をきたしていることが大問題になっている。地球温暖化、異常気象、エルニーニョ、オゾンホール、大気海洋汚染、内分泌かく乱物質（いわゆる環境ホルモン）などである。これらの問題を扱うのはそれぞれの専門分野の専門家であろうが、マクロ的な観点からの議論には制御工学的な知見が必要とされるのではないだろうか。制御工学の新たな展開の一つの方向であろう。

人々の構成する社会についても同じような見方が可能である。17世紀後半以降の市

民社会の安定的発展的維持のために種々の社会的装置が導入されている。商品の生産量と価格を調整するためのマーケットと自由競争、最大多数の最大幸福を目指した民主主義や投票による議員選挙などである。これらの社会的装置は、人工的な制御メカニズムと見ることができる。国富論を著し自由経済活動の重要性を説いたアダム・スミスと、蒸気機関の遠心调速機を発明し自動制御の幕開けを招来したジェームス・ワットが同時期グラスゴー大学に在籍したが、これは偶然以上のものがあるかもしれない。

好況と不況が循環し、時にそれが不安定に発振する自由経済に、財政投融资、公定歩合や貨幣量の操作などの政策を持ち込み、経済の安定化を図ったケインズの手法はまさに制御工学であろう。現在、経済はグローバル化、複雑化しており、未曾有のデフレの前になすすべのない有り様である。制御工学の斬新な観点から経済復興の手がかりが得られないであろうか。

最後に触れておきたいのは、情報化、ネットワーク化の進んだ社会における制御工学の役割である。従来、人間が動き、ものが動いてはじめてなした活動の多くがサイバー世界（情報システムとネットワークの世界）における情報の流れによって置き換えられつつある。ネット通販、ネットオークション、電子図書館、電子投票、電子政府などである。ここでは、情報伝達が高速になり、従来静的システムとして扱ってきたものが、動的システムとなり固有の問題も生じつつある。これらの問題の分析と対応には、制御工学の考え方が大いに役立つであろう。また、サイバー世界には仮想社会と呼ばれる人間の集団が多く構築されるようになる。これらの集団内または集団間の共同作業、紛争調停なども今後の問題として浮かび上がってくるが、制御工学的アプローチによる解決も必要となろう。

実世界とサイバー世界が結合した状況も生まれる。医療福祉や介護ネットワークでは、ロボットや医療診断機器がシステムに組み込まれる。また、災害救助復旧ネットワークでは、探査ロボット、救助ロボットや土木作業ロボットが活躍することになる。これらのロボットや機器群を遠隔からネットワーク経由で操作できるようにするためには、旧来の制御工学の高度化と精密化も要求される。

## 第7章

### 制御工学の自己変革と可能性

制御工学を必要とする技術の分野がきわめて広範なひろがりをもつことがこれまで述べてきたことから明らかになったと思う。制御工学はまさに「横断型」であり、そのことが制御工学の著しい特徴である。制御工学は様々の分野を横に結びつける普遍的な枠組の一つであり、最近提案されている**横断型基幹科学技術**の中核である。横断型基幹科学技術こそが人間・社会と地続きになった21世紀技術の担い手であり、制御工学の飛躍もそこにかかっている。この章では、横断型基幹科学技術への要求が高まるに応じて制御工学がどのように自己変革を遂げることが必要かについて議論し、その大きな可能性を展望する。

ネットワークを介したオートメーションの急速な広域化は、21世紀技術の顕著な方向のひとつである。制御のもつ普遍性と論理は、このシステムの巨大さ複雑さに立ち向かう有力な武器であり、ソフトウェア科学と並んで「ネットメーション」の基礎科学となるであろう。

生命科学の発展に伴って、生命現象で制御が占める役割がきわめて大きいことが明らかになりつつある。「生命の制御」を解き明かすことは、次世代の制御の重要な任務である。50年前のウィナーの原点に立ち戻って、新しいサイバネティクスを制御工学者が中核となって作り上げることが期待される。

経済システムを機械のように制御することは、一部の制御工学者の夢であった。このことは、金融工学の発展やリスクマネジメントの浸透などで一部実現しつつある。ロバスト制御を武器として、考えられ得る最大の不確かさをもつシステムであるマクロ経済システムの制御にあらためて挑戦してみるのも、価値あることと思われる。

#### 7.1 制御工学の拡がり

制御工学は、産業革命と共に生れた古い工学であるが、常に産業技術の中核にあり、工学、技術の進歩、革新を常に推進する原動力であると共に、不断の自己変革を遂げてきた常に新しい工学でもある。21世紀の制御工学は、その対象がますます広がると共に制御の方法や目的も多様化することが予想される。これまでの伝統的なモノ作りの世界で、省力、省エネルギー、生産性向上に貢献することが引き続き要求されると共に、経営、管理、サービスなど、よりソフトなシステムへの制御工学的なアプロー

チがさらに進むであろう。

ソフトなシステムを対象とする技術のひろがり、今後の技術の顕著なトレンドであるが、この動向は「オートメーションの進化」として特徴づけられる。オートメーションのキーテクノロジーは言うまでもなく制御であり、オートメーションの進化は従って制御の進化でもある。

オートメーションの進化のもう一つの基盤は、言うまでもなく計算機の発達である。制御工学がオートメーションをそのキーテクノロジーとして担うには、計算機技術との連携、特にソフトウェア技術との連携が不可欠である。ソフトウェア技術と制御技術のシームレスな結合は、オートメーション技術の新しい姿でもあり、制御工学に対するひとつの自己変革の要請でもある。これについては次節で詳しく述べる。

グローバル化の進行は、色々な意味で現代社会の基本的な特徴の一つである。交通、通信手段の著しい発展によって物流や情報のネットワークが全世界を網の目のように覆いつくし、「地球はひとつ」という言葉が本当の意味で実感を伴いつつある。これによってさまざまなシステムがグローバル（地球規模）となり、従って極めて複雑かつ大規模なものとなり、その管理や運用が色々な意味でこれまで以上に困難なものとなりつつある。制御工学は、そのような巨大複雑なシステムを合理的かつ体系的に管理、運用する能力をもつほとんど唯一の規範である。ここでもオートメーションの場合と同様、計算機技術との積極的な融合が望まれる。

21世紀は生物学の世紀であるとも言われるように、生命科学（ライフサイエンス）が大きな発展を遂げ、人類に多くの恩恵をもたらすことが期待されている。脳科学と分子生物学はライフサイエンスの急速な進展を担う双壁と言えよう。この二つのライフサイエンスの分野で、制御が重要な役割を演じつつある。脳科学では、運動やその熟練、学習などの研究において制御工学がロボット工学を介して新しい視点と理論的な基盤を与えつつあり、分子生物学では、遺伝子の発現、細胞周期、ホメオスターシス、概日周期など生命現象の本質的な機構で制御が重要な役割を演じていることが明らかになりつつある。制御理論家は、生物科学者に協力し、生命システムの解明に積極的に参画することが期待される。

経済システムは、一国のそれがグローバル化によって極めて複雑なものとなったために、その運用がますます困難になりつつある。現代の経済システムは、真の意味での巨大なダイナミカルシステムであり、制御という視点で捉えない限りそのスムーズな運用は望み得ない状況に来ているのではないかと思われる。経済システムは、巨大でしかも不確かさの大きなシステムである。ロバスト経済で確立した不確かさを克服する制御理論の手法を応用する可能性を真剣に考える時が来ていると思われる。これについては7.3節で述べる。

## 7.2 オートメーションの進化

オートメーションの目的は、「生産性の向上」「省力」「省エネルギー」という生産プロセスの根源的な要求を「自動化」を通して満たすことにある。同時に、オートメーションは、人間のルーチン作業を機械に代行させることによって人間の負担を軽減するので、「楽をしたい」人間にとってもその根源的な要求を満たすものでもある。言うまでもないことであるが、オートメーションを実施するにはコストがかかる。オートメーションのためのコストがそれによって省かれた人間労働のコストより低くなければオートメーションは実現されない。したがって、オートメーションの普及の度合いはその国の労働賃金のレベルを表している。

オートメーションの歴史は古いが、それが一般の人々の目に見える形で華々しく登場したのは第二次大戦直後である。その当時、オートメーションは三つの範疇に分かれて議論されていた。一つは、石油化学や鉄鋼業などの装置産業におけるプロセスの連続化にともなう計装の進展がもたらした**プロセスオートメーション**である。次は、加工や組立てなどの機器の製造ラインの省力化、自動化の進展がもたらした**機械オートメーション**である。最後は、パンチカードや会計機などによってもたらされた**オフィスオートメーション**である。50年を経てこれら三つのオートメーションの進化には目を見張るものがある。

プロセスオートメーションの分野における進化の原動力は計算機である。DDC、PLC、DCSなど装置産業における計装の新機軸をもたらした原動力は計算機に負う所が多い。最近では、計算機の役割は、物理プロセスのレベルから生産計画や物流レベルにおける最適化や管理などのより上位の計画問題に軸足を移しつつあり、「システム統合」がプロセスオートメーションの中心テーマとなりつつある。

機械オートメーションの主役は、言うまでもなく産業用ロボットであるが、最近では、CAD、CAEなどの活用により生産だけでなく商品開発やラインの設計、更には販売までオートメーションが急ピッチで広がりつつある。多品種少量生産で利益を上げるには、オートメーションを徹底的に追求し、プロセスの本質的な革新を実現することがオートメーションに課せられた任務である。

ITはオフィスオートメーションの先兵である。すべてのルーチン化された事務作業は自動化される趨勢にあり、インターネットを介して、事務やサービスの自動化は、企業の内部から企業同士(B to B)、企業対顧客(B to C)に及んでいる。ITについては様々な角度から議論されているが、少なくともビジネスに関連する限り、ITをオフィスオートメーションの発展の一形態であると捉えても誤りとは思われない。

現代のオートメーションは、上記三つの範疇だけではない。ビジネスオートメーション、ラボラトリーオートメーション、サービスオートメーション、ビルディングオートメーション、軍事オートメーション、セールスフォースオートメーション、ホス

ピタルオートメーション、ホームオートメーション、デザインオートメーションなどオートメーションという言葉は至る所に氾濫し、それに伴って「オートメーション」の名を冠した企業は激増している。これらはそれぞれオートメーションが切り開いた技術と産業の分野を表している。オートメーションは現代技術の駆動力の一つであり、そのため技術が「ハイテク」として急速に進んでいる。オートメーションへの要求は人間、社会にとって時代を超えた根源的なものである以上、技術が人間社会の基盤である限りオートメーションの進歩は続くであろう。

オートメーションの基盤技術は、言うまでもなく制御である。フィードバック制御、フィードフォワード制御、プログラム制御、カスケード制御、適応制御、遠隔制御などあらゆる制御はオートメーションの要素技術であり、オートメーションの根幹を支えるキーテクノロジーである。オートメーションを支え、それを推進し、オートメーションに関わるあらゆる問題に解決を与えることが制御にも求められる。オートメーションと共に進む制御が制御のあるべき姿である。そしてそれには、オートメーションのもう一つのキーテクノロジーである計算機技術、特にソフトウェア技術との連携が不可欠である。これについて次節で述べる。

### 7.3 大規模複雑系への挑戦 - 計算機技術との融合

我々は今、さまざまなネットワークに囲まれて暮らしている。インターネット、電話、放送、交通、電力、ガス、医療サービスなど数え上げればきりが無い。そして、ネットワークは最近の制御の新しいキーワードでもある。

ネットワークと制御の結びつきには二つの意味がある。一つは「ネットワークの制御」であり、もう一つは「ネットワークによる制御」である。「ネットワークの制御」は、ネットワークのトラフィックの制御、例えば輻輳の防止や解除などの方式に制御理論を用いることである。同種の問題については、制御理論はすでに「交通流の制御」でそれなりに実績をもっているが、ネットワークの制御は、問題となる領域の広さ、対象となる機器の複雑さ、制御しようとする情報の多様さという点で比較にならないほど難しく、またその分インパクトも大きい。また、移動通信や無線のパワー配分、等化なども制御理論の対象とされている。さらに、最近ではインターネットのプロトコルの各層に制御理論を用いたルーティングや輻輳回避のアルゴリズムが実装されようとしている。

「ネットワークによる制御」は、ネットワークを用いた広範に分散した対象の制御である。この場合のネットワークは企業内のLANやフィールドバス、あるいは自動車のCANのような一つの機器の内部のワイヤーハーネスの代替物をも含むが、最近の話題はやはりインターネットを用いた制御であろう。これまでも、制御の対象となるプラントと制御器のある操作室の間には長い通信線が存在する場合は少なくなかったが、そ



の場合制御と通信とは別の問題と考えられてきた。インターネットを用いる場合はインターネットの動作が制御にきわめて大きな影響を与えるためにそれを制御器の基本的な要素として考えなければ制御が成立しない。すなわち、制御と通信は最早別々に切り離して考えられなくなった。この場合、制御の側からみれば「変動するむだ時間」と「通信容量の制約」が通信の特性を代表することになる。これら二つの要素を考慮に入れた多数の制御対象の同時制御は未解決の問題である。

ネットワークと制御の結びつきは、これまでの範疇をはるかに超える巨大なシステムを制御が対象としなければならないことを意味している。例えば、インターネットのユーザ数は2002年末で世界で6億6千万人と推測されている。これとほぼ同数の端末をノードとして含むネットワークの巨大さ複雑をリアルに実感できる人がどれだけいるであろうか。そのような巨大なシステムの挙動を「最適化」することの可能性をイメージすることのできる人がどれだけいるであろうか。

「最適化」の対象となるシステムの規模はますます大きくなり、その複雑さは際限なく増しつつある。ラインの最適化はやがて生産計画や在庫管理を含めた企業におけるモノ、ヒト、カネの流れの一貫した「ビジネスの制御」に拡がり、更にサプライチェーン全体の統合制御が行われようとしていることは、システムの巨大化の一つの典型的な姿である。それぞれの構成要素も高度化しており、そのことがシステムの巨大化に拍車をかけている。

このようなシステムの巨大化がもたらす問題に最初に直面したのは計算機技術である。巨大化に関わる様々の問題点は、とりあえずソフトウェアの問題に集約される。ソフトウェアの巨大化、複雑化は、最近のソフトウェア工学の中心を占める問題であり、オブジェクト志向言語の開発はまさにこの問題の解決を目標としたソフトウェア科学の革命とも言えよう。最近では、システムの巨大化複雑化の問題は、ソフトウェアの問題から次第に制御の問題になりつつある。少なくとも、組み込みソフトの場合、ソフトウェアの巨大化、複雑化は広い意味での制御の巨大化複雑化でもある。普通の携帯電話でも数メガバイトのソフトウェアが内蔵されているが、このソフトウェアは使用者と環境の関連で考えられ得るすべての場合の組み合わせを想定した仕様を満足するように作られている。このようなソフトウェアを作ることは、大変な人手を要する。そして、その開発には単なるソフトウェア技術だけではなく、実世界を知る制御技術者の経験が必要である。

ソフトウェアの巨大化複雑化は、オブジェクト志向の新しい潮流を生み出している。例えば、現在脚光を浴びているUML(Unified Modeling Language)は、「オブジェクト」を「モデル」に高め、モデルを記述する言語としてソフトウェアのモジュール化を極限まで進めようとしている。この方向は、「モデルベースト」の制御理論の目指す方向と一致している。制御理論がモデリングの重要性を力説し「モデル学」を構想して

いる間に、ソフトウェア科学ではモデル学は着実に進んでいる。ソフトウェア工学と制御工学は対象とするシステムの巨大化と複雑化に対処するために期せずして「モデル」という共通項に到達したと言ってよい。

ソフトウェア工学と制御工学は、ある意味で対照的な学問である。前者は記述的であり、後者は概念的である。前者は発見的であり、後者は体系的である。その意味で、両者は互いに補い合う面が多く、手を結んで巨大化複雑化の問題に対処すれば大きな成果が期待されよう。その発展上に、ソフトウェア科学と融合を遂げ一段と実用性の増した制御理論の姿を展望できないであろうか。

我が国では、ソフトウェア技術者と呼ばれる人々の層はそれ程厚くない。したがって、企業の現場では制御技術者がソフトウェア技術に習熟し、その開発に携わってきた場合が多い。その意味で、制御とソフトウェアのギャップは米国に比べればはるかに小さい。制御とソフトウェアの融合は、我が国で今後もっと体系的に進められる必要があり、そこに我が国のものづくりが再び躍動する可能性が秘められている。

#### 7.4 生物学の世紀に向けて

脳科学と分子生物学を双壁として、最近の生物学の急速な進展は人類に巨大な可能性をもたらしつつある。21世紀はまさに生物学の世紀である。生物学はもはや記述的、定性的な学問ではなく、体系的な論理を備えた定量的な科学に変貌を遂げた。そして、オートメーションを含む大規模な組織的協業抜きには解明できない巨大な未知の対象を鉱脈として掘り当てた。その意味で、「生物学革命」はこれからも進行し続けるであろうし、それが人間の生活や社会に及ぼす影響も広がって行くことであろう。

生物学と制御の関わりは、今世紀の初頭に反射における神経の筋肉支配をフィードバック制御との類推で考察したシェリントンの研究にさかのぼることができる。その後、1930年代に、環境変動に対する恒常性の維持すなわちホメオスターシスを生物の根源的な機能の発現ととらえ、それを生物における制御システムの作動ととらえたキャノンの業績がある。キャノンの唱えたホメオスターシスは、生物の臓器や組織レベルにおける様々な物理量が恒常的に保たれるメカニズムを総称した言葉であり、そのメカニズムの物質的基礎と機能を研究の対象とする「調節生理学」という分野を生み出した。この場合の「調節」は、制御そのものであり、その意味で「制御生物学」と呼んでも間違いではない。その後、ジャコブ、モノーらにより、ホメオスターシスは臓器や組織レベルだけでなく細胞における代謝でも広範に存在することが明らかにされ、更に最近では、細胞の分裂、分化を含む遺伝、発生にもホメオスターシスが、ある場合は臓器レベルよりももっと洗練された形で存在していることが次第に明らかになりつつある。

制御と生物学の関わりを直接的に表明した最初の人ウィナーである。周知のよ

うにウィーナーは、「意図震顫」の患者が目標物に腕を伸ばす時に示す病状がうまく設計されなかった機械の制御系が示す挙動と類似していることから、制御という視点に立った時の人間と機械の共通性を直感した。ウィーナーは、生物における制御の役割の重要性を機械における制御の役割の重要性を通して強調したが、このことはウィーナーが「サイバネティックス」という新しい学問を提案する動機となった。ウィーナーの「サイバネティックス」は、制御及び通信を通して工学と生物学を結びつけようとする壮大な知の冒険であったが、当時は制御工学も通信工学もまだ未成熟であり、一方、脳科学を始めとする生物学もウィーナーの壮大な夢を実現するにはまだ未発達であった。それにも拘らず、ウィーナーの提案は生物学、制御工学の両方に深いインパクトをもたらし、そのインパクトは、やがて医用電子工学、人工知能学、神経回路学などの生物・医学と工学の境界に位置する様々な研究分野を生み出した。

それから50年、制御は生命の様々な存在の仕方に深く関わっていることが明らかになりつつある現在、再びウィーナーの問題意識に立ち戻って制御工学者が生物学者が生命現象を理解するための協同作業をより深いレベルで行う時期が来ていると思われる。制御の視点を導入し、生物における制御の機構を発見することにより、生物学における様々の「構成問題」を解くことができる。表1に、現代の広義の生物学で制御が重要な役割を占めているテーマをリストアップした。

表1 生物と制御

レベル	制御の対象	研究分野
種	種の個体数	生態学
個体	四肢の運動 学習	脳科学、心理学 筋肉生理学
臓器 組織	血糖値、体温、血液酸素量 血圧、pH	生理学、人工臓器学 医学
細胞	Ca濃度、遺伝子発現量 概日周期、細胞周期、代謝	分子生物学 遺伝子

細胞分子生物学の分野では、「システム生物学」と呼ばれる分野が現在急速に発展しつつある。この分野は、膨大な数の細胞の集合としての生物をシステムとして捉えようとするもので生命現象を担う物質を見つけ出し、その機能を解明することを目的とする分子生物学に対して個々の機能のある意味で抽象化し、抽象化された機能の結合（回路）として生命を理解することを目指している。制御の対象はダイナミカルシステムであり、従って制御の視点から生物を捉える新しいサイバネティックスはシス

テム生物学の一つの分野といえよう。

生物学者との共同研究では、制御は「工学」ではない。制御系を設計することが制御工学者に課せられた任務ではない。長い生物の進化を通じて生物の中に獲得された制御の機構を発見することが課題である。その意味で、この場合、制御は工学ではなく科学である。

## 7.5 経済学と制御

60年代の終わりから70年代前半にかけて、制御を経済学に応用しようとする気運が盛り上がった時期がある。その動機は、経済システムを一つのダイナミカルシステムと見なして経済行動をそれに対する制御と捉え、制御理論を適用することによって経済運用の合理的な基礎を確立しようとすることにあった。例えば、経済システムを国家のマクロ経済ととらえると、制御工学の立場からみた国の経済政策は、図1のようなフィードバック制御系となる。

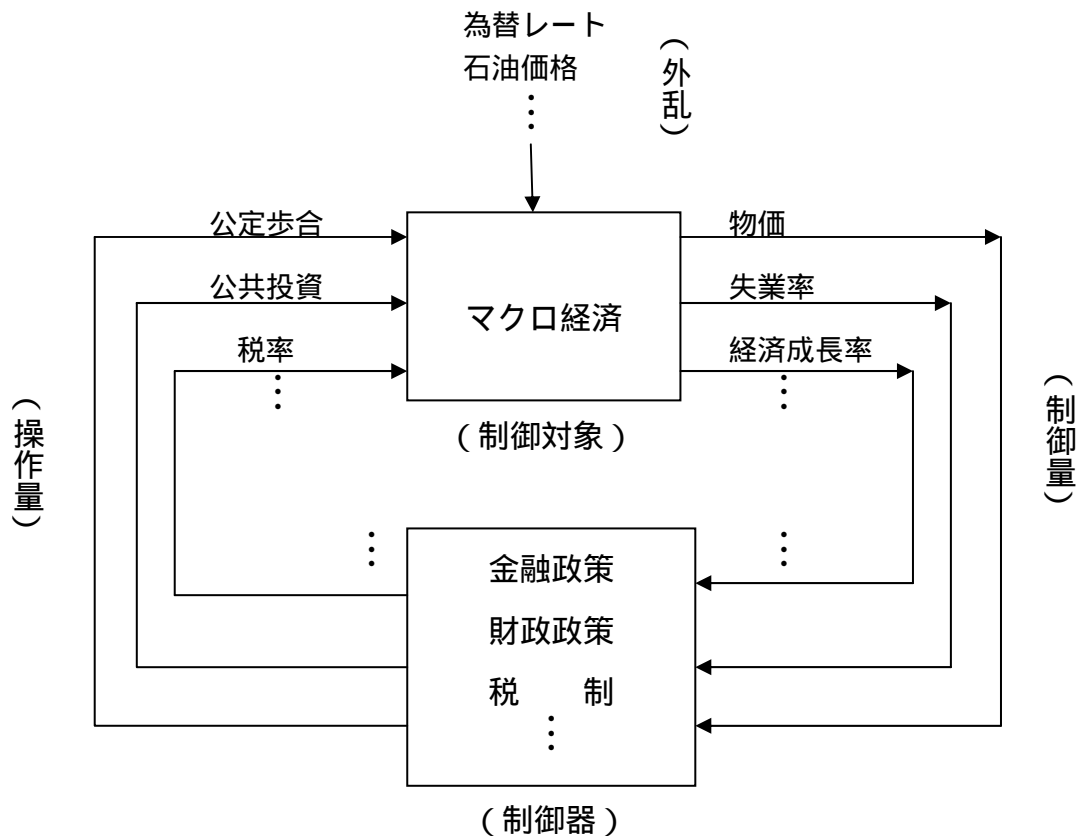


図1 制御系としての経済政策

最近の我が国の経済政策の迷走ぶりとそれが引き起しつつある混乱を目の当たりにし、それに対する極端に単純化された「エコノミスト」達の論評を聞くにつけ、図1

のような合理的な経済運営への可能性を問う声が制御工学のコミュニティの内部でも強く起りつつある。図1のようなスキームを前提とすれば、予測にもとづいた様々の長期的なシナリオを描くことによって経済運営の合理的な基礎が得られるはず、と考えるのは素人の浅知恵であろうか。

図1に従って「制御器」として経済政策を導出するには、国のマクロ経済のモデルが必要である。モデルが制御器設計で鍵を握っていることを我々は百も承知である。したがって、問題は経済システムのモデルがどこまで正確に構築できるかにかかっている。カリフォルニア大学の青木正直教授は制御理論から経済学への転身を果たしたパイオニアの一人であるが、氏の主著「時系列解析と日本経済」（東洋経済新報社、1985）では、戦後日本の経済データを駆使して日本経済のモデリングを試みている。青木教授の目標も図1のような制御系の構築にあったことは想像に難くない。

経済システムのモデリングの難しさは次の2点に要約される。

- (1) 特性が時と共に変る時変システムであること
- (2) 「人間の行動」が重要な役割を演じていること

バイオテクノロジーやITなど新しい技術が生まれ新しい産業が起こると、経済システムの特性は変わるし、人口構成や市場規模の変動もモデルに大きな影響を与える。これが(1)である。しかし、最も深刻な問題は(2)であろう。第一に、人間の行動は様々な要因に支配されるし、同じ状況に置かれた人間がすべて同じ経済行動をとるかどうかわからない。第二に、将来の見通しが人間の行動に影響する。例えば、政府が減税を実行したとしよう。可処分所得が増えたので消費を増やすとも考えられるが、いずれ政府の財源が不足しより大きな増税が将来来ることを見越して、むしろこれまで以上に消費を引き締める場合も考えられる。これが「合理的期待にもとづく行動」である。個人の消費行動や企業の投資行動は、定説を欠いたむしろアカデミックな研究の対象であり、その意味では、経済モデルは根幹の部分で基本的な困難さを背負っている。経済学者の間では、従来のような機械的なマクロ経済モデルでは現実の経済が適切にモデル化されたとはいえないと認識されるようになったが、その最大の理由がここにある。この問題は経済モデルを作ることに意味があるかどうかということにとどまらず、人間の「合理的な期待にもとづく行動」を前提とした経済政策が合理的な基礎を持つかどうかという深刻な問題を提起することとなった。

一方、現在の制御理論は、60年代、70年代にはなかったモデルの不確かさを許容する制御方式、すなわちロバスト制御を作り出した。また、環境の変動に適応して制御動作を合理的に変える適応制御も生み出した。人間の行動の不確かさを折り込んだ経済モデルを構築し、そのもとでのロバスト制御や適応制御として経済政策を設計することを試みる価値は十分あると思われる。

重要なことは、経済現象の中で時代の変化や人間行動の不確かさには依存しない確

実な部分（例えばフローを積分するとストックになるというような）を抽出し、モデルの骨格となる「経済力学」のようなものを作り上げるのではないかと思われる。このような骨格が確立されれば、不確かさを考慮に入れたロバスト制御や適応制御の理論が適用可能となるはずである。

マクロ経済からミクロ経済に目を転じれば、制御工学者の活躍の場は飛躍的に増大する。一企業については、すでに様々の数理モデルが存在し、在庫管理、販売予測、財務処理、リスク管理などに用いられている。金融や生保、不動産などの分野で用いられている金融工学はある意味では制御そのものと言っても良い。金融工学の基礎となる伊藤の確率微分方程式はすでに50年近く前に確率制御の理論的な基盤であったことは記憶されるべきである。

国のレベルと異なり、一企業では単一の価値観が共有されており政策的なバリエーションも幅が小さいから、数理モデルに対する担当者の間の異論も少ない。数理モデルとそれにもとづく制御という発想がより高いレベルで受け入れられる可能性が大きい。現在のように変化の速度が大きく過去の経験や実績が役に立たなくなっている現在、普遍性をもつ数理モデルへの需要は大きい。制御がこれまで以上に企業のリスク管理や予測など経営の根幹に進出する機会は急速に増しつつある。

## 第8章

### 結言と提言

制御は、あらゆる分野で、なくてはならないものである。これまで、例えば、鉄鋼、化学、機械、電機など製造業の分野において製品の精密化や歩留まり率の向上、製造工程における省エネルギーなどに大きな貢献をしてきた。また、自動車、航空機、船舶など交通の分野における高速化、省エネルギー、安全性の向上に大きな役割を果たしている。さらに、建築や土木の分野において、建造物の快適性向上や建設中の安全性確保のための制振などに使われている。

これらの産業において制御工学が果たしてきた経済効果は計りしれない。そして、これらの産業は今後も社会の重要な位置を占めるのであるから、制御工学の役割は軽くはない。確かに、将来は、ナノテクノロジー、バイオサイエンス等が産業の大きな一角を占めることになるであろうが、上記の産業がなくなるわけではなく、内容の変化があるにせよ、産業全体に占める割合がナノテクノロジーやバイオサイエンスに取って代わられることは近い将来ではない。したがって、成熟産業において制御工学の更なる貢献が期待される。また、ナノテクノロジーやバイオサイエンスが成熟産業に取って代わるとしても、その結果は制御工学が活躍する場を増やし、制御工学がこれまで以上に必要になってくる状況が生まれるのである。制御工学には、そのような状況に対応する方向性が意図されなければならない。

また、経済成長ということを考えてとき、年率3%程度でなければ不況であるかのように考えている傾向があるが、3%成長が50年間続けば、経済は約4.4倍の規模になる。それまで、現在のままのエネルギー消費、CO<sub>2</sub>や有害物質の排出を続けていけば、地球は人類が住み続けることができない環境になってしまう。それを防ぐには、生活様式や生産物の変更とともに、生産様式や生産物の効率化が必要である。現在、それはすぐに取り掛からなければならない課題である。制御工学によって今から消費エネルギーやCO<sub>2</sub>排出の削減が年率数%でも実現できれば、それは人類に対する大きな貢献である。10年後から貢献をするのでは遅い。

制御工学は、成熟期に至っているという見方をする人たちがいる。しかし、理論面でいえば、解きやすい問題が解けているだけであって、非線形で複雑な問題には充分には対応できていない。制御とはダイナミクスをもつシステムに望ましい振る舞いをさせることという原点に戻って、これまで以上に真剣に研究を発展させる必要がある。そうすることにより、21世紀の持続的社會を実現することに大きく貢献することがで

きる。

以上より、いま、制御工学を分野横断的な学問として再認識し、キーテクノロジーとしてより高度な学問体系に発展させることが必要である。そのためには、産業界をはじめ、世の中に広く周知されることが必要である。制御工学の学問発展及び制御技術者の育成のために、以下のことを提言する。

1. 本報告で明らかになった制御工学の横断的性格を基礎に、関係する多数の学会が連合して制御工学を横断的学問及び技術として新たな視点から発展させる学術活動を推進するとともに、産業界が積極的に参画、支援する体制を確立する。
2. 技術士の部門として、制御工学とそれに関連する計測やシステム統合技術等からなる領域を設定するとともに、大学、産業界、学会が協力して、技術者の養成及び継続的能力開発による高度専門人材の育成を組織的に行う体制を確立する。