

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

横断型基幹科学技術としての制御学の役割

「知の統合」を目指す研究・教育の促進に向けて

平成17年7月21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 19 期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横断型基幹科学技術に関する小委員会で検討した結果を第 19 期日本学術会議自動制御研究連絡委員会及び第 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において審議し、取りまとめた結果を発表するものである。

[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メテ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)

[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)

[横断型基幹科学技術に関する小委員会]

- 委員長 原辰次 (東京大学大学院情報理工学系研究科教授)
- 委員 池田雅夫 (大阪大学大学院工学研究科教授)
- 委員 内田健康 (早稲田大学理工学部教授)
- 委員 木村英紀 (東京大学大学院新領域創成科学研究科教授)
- 委員 佐野昭 (慶應義塾大学理工学部教授)
- 委員 杉江俊治 (京都大学大学院情報学研究科教授)
- 委員 椿広計 (筑波大学大学院ビジネス科学研究科教授)
- 委員 津村幸治 (東京大学大学院情報理工学系研究科助教授)
- 委員 出口光一郎 (東北大学大学院情報科学研究科教授)
- 委員 藤井隆雄 (大阪大学大学院基礎工学研究科教授)
- 委員 本多敏 (慶應義塾大学理工学部教授)
- 委員 山本裕 (京都大学大学院情報学研究科教授)
- 委員 吉田和夫 (慶應義塾大学理工学部教授)

会議開催記録

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

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

横断型基幹科学技術に関する小委員会

- 第1回委員会： 平成16年 8月 4日
- 第2回委員会： 平成16年 9月14日
- 第3回委員会： 平成16年11月16日
- 第4回委員会： 平成17年 2月25日
- 第5回委員会： 平成17年 5月18日
- 第6回委員会： 平成17年 6月15日

要 旨

1. 作成の背景

日本学術会議第 18 期にまとめられた「新しい学術の体系」では、科学を「あるものの探究」としての「認識科学」と「あるべきものの探求」としての「設計科学」の二つに範疇化する考えが示され、“利用知の体系化”を目指す「設計科学」の重要性が認識されている。一方、21 世紀が抱える様々な社会的問題を解決するためには「知の統合」が不可欠であるという観点から、「横断型基幹科学技術」促進の重要性が議論され、あるべきものの実現には「対象（もの）と機能・働き（コト）」の両者が整合することが重要であることが指摘されている。

そこで、横断型基幹科学技術の典型的な学問分野の一つである制御学の視点を出発点として、「知の統合」を目指す研究・教育の促進に向けた課題について具体的に検討し、それを解決する方策を提示する。

2. 現状及び問題点

21 世紀の科学技術を促進していくためには、「モノ」を中心として発展してきた従来の縦型研究分野（たて）に加え、「コト」に着目し対象分野に依存しない普遍的な方法論の確立を目指している横断型研究分野（よこ）の進展が必要である。実際、重点 4 分野を含む多くの先端科学技術分野の研究において、様々な横断型基幹科学技術が重要な役割を果たしてきている。しかし、その重要性や役割は必ずしも十分認識されていないのが現状である。

「知の統合」に向けた新しい学問分野の創成や 21 世紀が抱える様々な社会的課題の解決には、「たて（もの）とよこ（コト）」が車の両輪のごとく整合をもって発展していくことが大切である。また、横断的思考を持つ科学技術者の養成も不可欠であり、これらを実現するためのシステムを構築していかなければならない。

3. 改善策、提言等の内容

「知の統合」を目指す研究・教育の促進に向け、以下の点を明らかにしている。

- (1) 科学技術を「たてとよこ」の 2 次元構造として捉えることが、異分野間の融合を促進し新しい学問分野の創成に大きな働きをするとともに、社会のための学術の発展に大きな役割を果たす。
- (2) 横断型科学技術者の養成には、現象の本質を究める解析主体の次元（縦型分野に対応）と、法則や論理を基にした設計・合成の次元（横断型分野に対応）に加え、システムをとりまく人間・社会・環境に対する調和性をもう 1 次元とする 3 次元を軸とする教育体制の確立が望まれる。

また、上記を実現するための一つの方策として、『科学研究費補助金配分方式に関する「縦型・横断型の 2 次元構造案」』を一試案として提示している。

目 次

第1章 はじめに（背景と目的）	1
第2章 制御学を通して見た横断型基幹科学技術	2
2.1 設計科学としての横断型基幹科学技術分野	2
2.2 横断型基幹科学技術における制御学の位置づけ	3
2.3 横断型基幹科学技術研究のアプローチと役割	6
2.4 「たてとよこ」の2次元構造	8
2.5 科学研究費補助金配分方式の2次元構造	11
第3章 横断型科学技術の教育体制	14
3.1 背景	14
3.2 これまでの試みと課題	14
3.3 横断型科学技術教育の目標	17
3.4 横断型学部教育の内容と方法	18
3.5 大学院における横断型教育の推進	20
3.6 むすび	21
第4章 おわりに	22

1. はじめに（背景と目的）

日本学術会議第18期にまとめられた「新しい学術の体系」（第19期でまとめられた要約[1]を参照）では、科学を「あるものの探究」としての「認識科学」と「あるべきものの探求」としての「設計科学」の二つに範疇化する考えが示された。そこでは、従来の理学で代表される「認識科学」は“対象知の体系化”を図ってきたのに対し、「設計科学」は“利用知の体系化”を目指している、と述べられており、社会のための学術を実現するにはこの二つに範疇を明確に位置づけることの重要性が認識されている。

一方、21世紀が抱える様々な社会的問題を解決するためには「知の統合」が不可欠であるという観点から、振興調整費による政策提言『横断型科学技術の役割とその推進』[2]や関連する学会の連合組織『横断型基幹科学技術研究団体連合』[3]の発足を通して、「横断型基幹科学技術」（以下「横幹科学技術」と略す）促進の重要性が議論されてきている。これは科学技術を、個別学問分野の体系化を目指す「縦型（たて）」と個別分野の共通性に注目して普遍的な方法論の確立を目指す「横断型（よこ）」の二つの範疇に分ける考えである。そこでは、あるべきものの実現には「対象（もの）」と機能・働き（コト）」の両者がうまく統合することが重要であることが強調されている。

「対象と機能・働き」は、ソフトウェア科学における一つの普遍的な概念として確立されたオブジェクト指向の概念にもみることができる。オブジェクト指向プログラミングにおいては、まさに「オブジェクト（もの：対象）」と「メソッド（コト：手続きあるいは機能・働き）」の2つが役者である。指定した対象に対する働きかけを手続きの形で記述することによって望みの機能が実現されているが、対象と手続きを明確に分けることにより、プログラムの透明性・拡張性が確保されている。

したがって、「もの」を中心に「コト」を考えて発展してきた「縦型科学技術」と、「ものともものとの関係」に着目し「コト」に焦点を当ててきた「横幹科学技術」という「たてとよこ」の2次元構造として科学技術を捉えるのは一つの自然な姿である。しかし、科学技術を「もの」を中心としてしか見ないと、「コト」を対象とする横幹科学技術の存在、重要性、その役割を理解するのは必ずしも容易ではない。また、科学研究費補助金の申請に使われる研究分野の分類が、既存の縦型研究分野を中心に組まれていることも横断型学問分野を見えにくくしている一つの要因である。

そこで、本報告では、まず典型的な横幹科学技術の一つである「制御」に焦点を当て、そこを出発点として、横幹科学技術の位置づけと「たてとよこ」の2次元構造が社会のための学術の発展に果たす役割を具体的に明らかにする。そこでは、「知の統合」を目指す研究の促進を図るための方策の一つとして、2次元構造をもつ新しい科学研究費補助金配分方式の一試案を提示する。次に、横幹科学技術の考えに即して、また、これまでの具体的取組を通して、将来の科学技術者を育てる教育体制の在り方について述べる。最後に、本報告のまとめを行う。

2 . 制御学を通して見た横断型基幹科学技術

2.1 設計科学としての横断型基幹科学技術分野

「新しい学術の体系」における設計科学の対象は、人間、自然、社会、人工物等が互いに作用しあう複雑なシステムであり、これは「人工物システム」と呼ばれている。このような人工物システムを対象とした設計に対しては個別の対象分野に依らない横断型基幹科学技術を中心とした様々な視点からアプローチが重要な役割を果たす(図1 を参照)。

すなわち、実世界の複雑な現象をまず計測し、それに基づいて対象とするシステムを適切に表現するモデル化を行う。モデルは対象知に対する一つの集約された形である。次に行うのは、構築されたモデルに基づいた解析であり、本質を捉えるのには数理的なアプローチが有用である。また、複雑なシステムの詳細な解析には、シミュレーションによる検討が必要となるし、人間を含むシステムを扱う場合には認知科学的手法も不可欠となる。さらには、人間と機械の相互作用を総合的に捕らえようとするヒューマンインターフェイスの視点も重要となる。解析に続くステップは設計である。設計において、特に対象固有の利用知が重要な役割を果たし、多くの場合何らかの最適化問題として定式化される。したがって、様々な最適化技術を必要とする。設計されたものが実世界で望み通りに機能するかどうかを確認するためには予測が必要であり、実際に稼動するためには制御技術が不可欠である。さらに、その評価を行うことも重要である。この予測、評価とモデリングにおいては、統計的手法が強力なツールとなっている。また、これらのすべてのプロセスに亘って様々な情報の取り扱いが必要となっており、情報学を抜きにすることはできない。

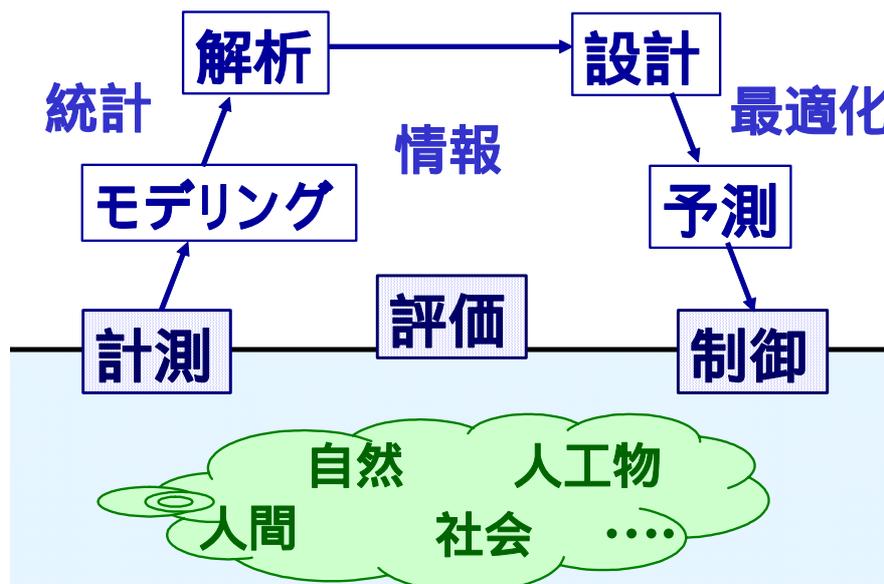


図1：横断型基幹科学研究分野

以上をまとめると、主に設計科学を対象とした「横幹科学技術」には、計測・モデル学・数理工学・シミュレーション・認知科学・ヒューマンインターフェイス・最適化・制御・統計学・情報学などが含まれることがわかる。明らかにこれらの学問分野は、

(1) 個別の対象分野に依存せず、多くの縦型研究分野と接点をもつ、
(2) 「コト(機能・働き)」を対象とし、それ自体で充足した学問体系をもつ、
といった特性をもっており、最終的に達成する「もの(対象)」をベースとしてどちらかという排他的に発展してきた「縦型科学技術」とは性質を異にする。特に、「もの」を中心としてしか見ないと、「コト」を対象として普遍的な方法論の確立を目指す「横幹科学技術」は見えにくい。例えば、「横幹科学技術」を計測・制御・統計などというその学問分野名で表そうとすると、その位置づけや役割を理解するのが難しい。これらを機能・働きという観点で抽象的に捉え、それぞれ例えば「認識をデザインする科学」、「動きをデザインする科学」、「評価をデザインする科学」と広く捉えると理解しやすいし、このように考えると「コト」を対象とする学問分野における普遍性の重要性も見えてくる。

2.2 横断型基幹科学技術における制御学の位置づけ

前節で述べた「横幹科学技術」の典型的な学問分野の一つに、物を望みどおりに動かすことを目指している“制御”がある。“制御”は、機能・働きという観点で抽象的かつ広く捉えると「動きをデザインする科学技術」と言える学問分野である。したがって、制御が扱う対象は、自動車を含む移動体(航空機・船舶など)、ロボット、化学・鉄鋼プロセス、情報機器、半導体製造装置、ビル・橋梁など幅広く、またこれらに限定されるものでないことは明らかである。

実際、第18期・第19期の日本学術会議の対外報告の一つである「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」においては、制御の横断的特性ならびに産業界で果たしてきた役割、先端科学技術での重要性が具体的な事例に基づいて紹介されている[4]。第2章「制御工学のこれまでの貢献」では、鉄鋼業・化学工業・電機工業・自動車工業・重機械工業という主要産業分野のいずれとも制御が深く関わってきて、その発展に大きく寄与したことが述べられている。また、第4章「科学技術重点4分野と制御工学」では、環境、情報・通信、ライフサイエンス、ナノテクノロジー・材料という重点4分野の研究推進に制御は欠くことのできない基幹科学技術の一つであることが示されている。

さらに振り返ってみるに、20世紀後半からの制御工学の発展に大きく寄与したのは、ノーバート・ウィーナーによる「サイバネティクス」の提唱である。彼は1948年に「サイバネティクス：動物と機械における制御と通信」を出版(1962年に第2版出版[5])した。その著において彼は、「制御と通信」はあらゆるシステムにおいて本質的に重要であり、制御と通信を従来とは違った視点で扱うことの必要性を指摘し、既成の学問の枠組を超えた新しい学問領域としてサイバネティクスを提唱した。この提唱は時代を先取りしたもので、制御工学が科学技術に共通の基盤技術として確立させる道をつけた。

しかしながら、ウィーナーの提唱は早すぎたともいえる。彼のアイデアを実システ

ムで実現するには、計算機技術等のインフラが必ずしも十分に整っていなかったからである。近年、その状況が変わってきた。計算機技術の著しい発展やインターネット・無線通信の急速な普及・高速化が、サイバネティックスのアイデアの適用を様々な分野で可能にしている。実際、通信制御や生物制御は現在のホットな研究領域となってきた。

このように制御は多くの他分野と接点を持っており、あらゆる工学の中に組み込まれそれらを繋ぐ役割を果たしてきたし、現在の先端科学技術分野と大きく関連している。このことを文部科学省や科学技術振興機構等での公募型研究で採択された研究課題のデータに基づき客観的に示すことにする。

表1は、平成15年度に科学技術振興機構のホームページに掲載されていた科学技術振興調整費に採択された研究課題の研究分野別のキーワード検索のヒット数を示したものである。上半分が制御を始めとする横断型のキーワードを下半分が重点領域のキーワードをまとめたものである（情報は両方に関連するものであるので、真ん中に配置されている）。制御、計測、システム、モデルといった横断型のキーワードが重点領域のキーワードと同等の数で使われていることが分かる。

表2は、それらの成果報告書に現れるキーワードと科学技術振興機構が定めた学問領域との関係を示したものである。横断型のキーワードの研究分野（特に、制御、システム、情報）は多くの学問領域と接点を持っていることが読み取れる。これは、それ自身の領域との関連が薄い重点領域のキーワードとの大きな違いである。また、横断型のキーワードの研究分野は「先端的基礎」との関わりが一般に強く、まさに横断型基幹科学技術の役割を果たしていることが理解できる。

表1：振興調整費採択研究課題のキーワード

	研究分野	JST	振興調整費	振興調整費	振興調整費	振興調整費
			研究課題 (研究項目)	研究課題 (全文)	成果報告書 (全文)	成果報告書 (キーワード)
横断型	制御	2701	36	142	329	199
	計測	1249	14	70	272	142
	システム	2610	94	207	404	255
	モデル	1401	60	149	379	207
-----	情報	2769	41	199	444	253
重点領域	ナノ	1086	29	75	89	51
	環境	1963	29	162	385	233
	バイオ・生命	1916	24	123	120	46
	材料	2242	16	109	315	239
	遺伝子	1407	44	105	143	86

表 2： 成果報告書におけるキーワード

研究分野	振興調整費成果報告書(キーワード)								
	合計	物質 材料系	ライフ サイエ ンス	情報 電子系	先端的 基礎	海洋科 学	地球科 学	防災安 全 対策	その他
制御	199	44	31	4	24	1	2	5	88
計測	142	2	2	2	11	0	7	14	104
システム	255	20	4	8	14	5	30	10	164
モデル	207	25	5	2	3	13	28	34	97
情報	253	16	8	23	6	5	37	8	150
ナノ	51	14	0	1	10	0	0	0	26
環境	233	60	12	4	0	5	11	7	134
バイオ・生命	46	8	7	0	2	0	0	1	28
材料	239	115	0	7	21	0	0	6	90
遺伝子	86	3	23	0	0	0	0	0	60

表 3 は、平成16年度科学研究費補助金公募「計画研究」に係る研究領域一覧の36研究領域の中で、研究領域の説明文の中に“制御”という単語が含まれている研究領域を抜き出したものである。36領域中13領域で、4割弱の最先端研究領域が何らかの形で制御と関連していることが読み取れる。その領域も、遺伝子、生物、生体、脳、と多岐にわたっており、制御の横断的側面をみることができる。

表 3： 科研費公募「計画研究」研究領域と制御との繋がり

	研究領域名	「制御」
1	RNA 情報発現系の時空間ネットワーク	4
2	植物発生における軸と情報の分子基盤	1
3	タンパク質の一生:細胞における成熟、移動、品質管理	2
4	光機能界面の学理と技術 - 光エネルギーを有効利用するサステナブルケミストリー -	2
10	糖鎖によるタンパク質と分子複合体の機能調節	1
11	免疫監視の基盤とその維持・制御	6
12	生命秩序の膜インターフェイスを制御するソフトな分子間相互作用	4
13	遺伝子情報発現における OECODE システムの解明	3
23	がん克服に向けたがん科学の統合的研究	2
24	遺伝情報システム異常と発がん	1
25	がんにおける細胞・組織システムの破綻	6
33	脳の高次機能システム	3
35	分子レベルからの脳機能構築機構の解明	2

このように、“制御”は最先端研究分野を含む非常に多くの分野との接点を持ち、かつ、それらの分野の進展に重要な役割を果たしてきている。これは、単に理工系の研究領域に限定されるものではなく、実際、経済・金融など社会科学の領域にも制御理論は適用され成果を上げてきている。このことは、サイバネティックスの構想が工学の分野に留まらず生物学、医学はもとより、人文・社会科学などをも含む壮大なものであったことを考えると不思議なことではない。

さらに、制御を広く「動きをデザインする科学技術」と捉えると、21世紀の科学技術が解決しなければならない大きな社会的問題の解決にとって制御が重要な役割を担っていることがわかる。例えば、情報の流れに着目した災害時のリスク管理や大局的なエネルギーの流れ・物流に注目した持続可能社会の実現など社会的課題の解決に対しては、広い意味での「ものの流れの制度設計」が必須であり、まさに「制御：動きのデザイン」が基幹的役割を果たすことになる。このような視点は、「モノ」に注目していると見落としがちである。「流れ」という動きに着目して初めて生まれる発想である。ただし、それを成し得るには「制御」をこれまでのように狭い範疇で考えるのではなく広い意味で捉え、学問としても深化させていく必要がある。次節では、横幹科学技術の学問のアプローチと役割に焦点を当て、その可能性を明らかにする。

2.3 横断型基幹科学技術研究のアプローチと役割

横幹基幹科学技術の各研究分野は、多くの縦型研究分野と接点を持ち、個別分野に依存しない普遍的な方法論の確立を目指している。それが一つの学問領域として認知されるためには、それ自体で充足した学問体系を形成していなければならないし、社会的課題の解決への貢献も必要である。そのための研究アプローチはそれぞれの横幹学問分野によって一致はしていないが、ある程度共通的である。それは、以下のステップからなる（図2を参照）。

- (1) 普遍性の抽出：様々な対象分野に共通の課題を抽象化して取り上げ、普遍性を見出す。
- (2) 問題の定式化：解決すべき課題を数学の問題として定式化する。
- (3) 理論体系化：定式化された問題を解くことにより、原理としての体系化を図る。ここでは、新しい概念の提案と数学的ツールの開発がキーとなる。
- (4) アルゴリズム化：それを具体的に設計に生かせる形でアルゴリズムとしてまとめ上げる。
- (5) プラットフォーム化：さらに、個々の縦型分野の対象やテーマに応じて、ここに来れば実際に使うことができる形でプラットフォームを提供する。

ここで、3番目の理論体系化は「横幹科学技術」として確固たる学問領域を形成するのに非常に重要である。これを通して「知の統合」が実現されるが、そのためには最初の2つのステップを軽視してはならない。普遍化と問題の定式化が物事の本質を捉えていればいるほど体系化による知の統合は強力となるからである。一方、実世界の問題を解決するためには、第4、第5のステップが不可欠であり、「たてとよこ」を繋ぐ重要な役割を果たす。これは、「新しい学術の体系」で重視されていた「知の利用」に繋がるものである。

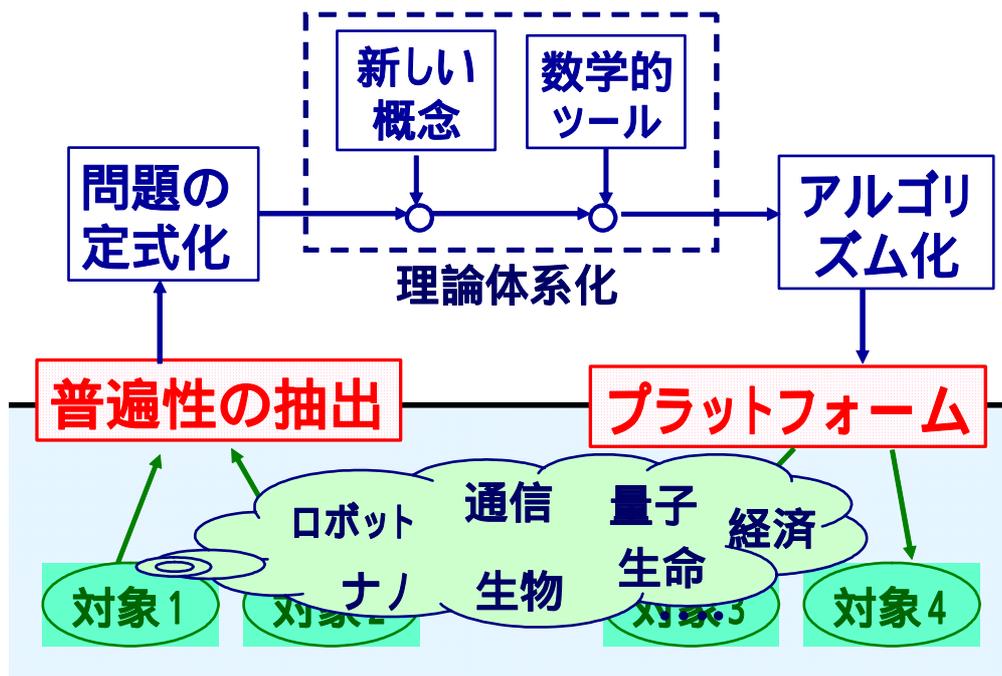


図 2：横断型基幹科学の手法

以下では、「知の統合と知の利用」という観点で、考察を行う。「新しい学術の体系」では、「認識科学」は対象知の体系化を図ってきたのに対し、「設計科学」は利用知の体系化を目指している、と述べられている。知の利用を効率よく行うためには、本質を捉えた知の統合が不可欠である。この「統合」と「利用」の2つのプロセスは、設計科学は「純粋設計科学」と「応用設計科学」からなると主張している「新しい学術の体系」と対応している。ここで、「純粋設計科学」は、個別分野に依存しない普遍的な概念・原理に基づいて普遍的かつ系統的な方法論を与える科学である。これは、まさに知の統合を目指すものであり、「コト」に重点を置いた「横幹科学(よこ)」がこれに対応する。一方、「応用設計科学」は統合された知をベースとして、従来の縦型学問領域(たて)が担当してきた個別対象分野の「利用知」と併せて知の具体化・特殊化を図り、技術として確立していく。すなわち、知の利用を目指す応用設計科学においては、「ものごと」を一体化して捉えることが肝要であり、横幹科学はその論理基盤、方法論と具体的ツールを与える役割を果たす。

それでは、個別分野に依存しない普遍性をもった概念・原理を提案し、方法論として確立することが、科学技術の発展にどのように貢献してきたかを、制御理論のこれまでの成果を通して具体的に検証していくことにする。

制御理論の起源は産業革命時代のガバナー(調速器)の安定化にあると言われている[6]。産業革命にとって必要不可欠であった蒸気機関を望み通りに活用するためには、ガバナーを安定化することが必須であったが、その安定条件を明確にすることにより、試行錯誤の手順が大きく緩和された。そこで得られた安定条件は、分野の異なる動的システムの安定性解析にも適用可能なもので、フィードバック制御技術が様々な産業分野

で導入されることとなった。その後、目標値追従のための積分補償の必要性が PID 制御器の重要性を導き、1960 年代は化学プラントの安定した運用にプロセス制御が大きく貢献した。1980 年代以降は、ロボットに代表される機械システムの高速度・高精度化の実現にロバスト制御理論の進展が大きく寄与した。その結果、非線形システム論としても展開され、様々な分野への適用がなされてきた。さらにこれは、ナノ技術に繋がるもので、現在も深化し続けている。

その中で、多くの異なる分野で非常に有効に働いたのが「内部モデル原理」である。内部モデル原理とは、追従したい信号や除去したい信号(制御の分野では外生信号と呼ばれる)の発生機構をフィードバックループ内に持っていることが、完全な追従制御や外乱除去制御を行うのに必要である、という原理である。これは、ステップ状の信号に対しては、PID 制御のように制御器に積分器を持たせることが必要であるという古典制御理論の結果を一般化した原理であり、移動体の制御における高速度な追従の実現に有効であった。また、精密機器の制御にしばしば現れる周期外乱の除去には、周期信号の発生モデルを有する繰り返し制御系の有用性が確認されている。さらに、この繰り返し制御のアイデアは、繰り返し動作の獲得のメカニズムの説明にも適用され、人間の運動機能を司る小脳の学習機能の解明に貢献した。近年では、生物や生体系における制御において、一定値を保持するメカニズムの解明にも内部モデル原理が適用されている。

このように、本質的な原理を見出すことができれば、特定の分野での展開だけではなく、最先端技術を含む多くの分野への貢献が期待できる。これが、横幹科学が目指すところの一つである。

もう一点、近年の計算機ネットワークの急速な進展が制御にもたらしたインパクトを紹介する。これは、50 年以上も前にウィナーが提唱した「サイバネティックス」のアイデアがまさに現実のものとして実現されつつあることを意味している。具体的には、工場内 LAN による大規模システムの統合化制御、遠隔医療、災害時のレスキューロボットの制御など通信路を介した制御系に対する要求からくるものである。そのときの最も基本的な問いかけは、“与えられた制御性能(安定性や H_2 、 H_∞ ノルム性能など)を達成するのに必要な通信容量(通信レート)や信号の精細さは?”である。これに対して理論的な答えを与えることは、脳・神経系や生命体の解析の糸口を与えることに繋がる。これは、通信におけるシャノン限界(誤りなしに送信できるデータ伝送速度の限界)と制御におけるボーデの定理(安定なフィードバック制御系で達成できる感度関数の制約式)に対応するもので、まさに「制御と通信」の真の意味の融合のキーとなるであろう。

このように、横断型の各分野での原理や概念を明確にすることは、異なる分野の融合を大きく促進する役割を果たす。これは、縦型同士の融合では見られない現象である。この点が、横幹科学技術が「知の統合」に向けて大きく貢献できる点である。

2.4 「たてとよこ」の 2 次元構造

前節では、横幹科学技術の研究のアプローチとそれがもたらす役割について述べた。本節では、従来の縦型学問分野との関係に注目して、その役割を明確にしていく。

横断型基幹科学技術分野は分野横断型であるが、学際的分野(異なる分野の融合)と

は異なる。また、総合的科学技术とも異なる。これを図式的に書くと、図3のように表すことができる。すなわち、電気、機械、生命など既存の縦型研究分野だけで構成される1次元の研究分野分類を用いるのではなく、縦型研究分野の個別分野に依存しない普遍的な方法論を扱う横断型研究分野を直交させ、それらを2次元的に配置することにより得られる空間をベースとした研究分野分類(2次元構造)を考えることにより、潜在的に存在する新しい研究分野を表すことができる。

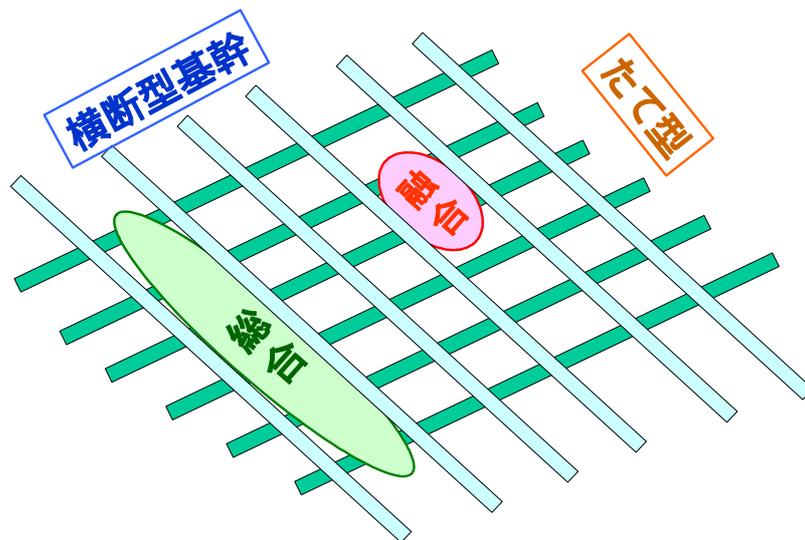


図3：「たてとよこ」の2次元構造

この2次元構造は、「新しい学術の体系」の一つの柱である「設計科学」の目指す「社会のための学術」を実現するために必要不可欠であるが、それだけに留まらず科学技術の発展にもたらす効果は多大である。そのメリットをまとめると、

- (1) 学際的研究の促進
 - (2) 「たてとよこ」の相乗効果
- の2点に集約される。

(1) 学際的研究の促進：2次元構造は、潜在的に融合可能な研究分野を表現しており、以下に示すように異なるレベルの融合を定義することができる。

- ・タイプ1：「縦型」+「縦型」の融合(ex. Mechatronics=Mech. + Elec.)
- ・タイプ2：「縦型」+「横断型」の融合(ex. Bio-informatics=Bio. + Information)
- ・タイプ3：「融合」+「横断型」の融合(ex. (Mech. + Elec.)+Control, (Mech. + Elec.)+Control+(Bio. + Information))

さらに、学際的研究の促進に関して、以下のような効果をもたらす。

- ・たてとよこの2次元構造は、既存の学問分野だけでなく未だ活性化されていない潜在的に存在する多くの新しい学問領域を表すことができるので、今後重要となるであろう新領域の先取りが可能となる。
- ・高いレベルの融合の実現には、複数の縦型学問分野と複数の横断型学問分野との交

わりが不可欠で、その実現に大きな役割を果たす。

前者はキャッチアップ型ではない日本発の新しい学問の創生の大きな推進力となることを、後者は声高に叫ばれながら実が伴っていない「融合」を促進する力となりうることを示している。

(2) 「たてとよこ」の相乗効果：

- ・「縦系」と「横系」が存在することにより、可能性の絞込みによる深化と可能性の拡大による発展のサイクルが機能し、技術移転が容易にかつ効率よく行われる。
- ・それは個別的ではなく全体に広がるので、新しい研究分野の活性化が進みやすくなり、さらにその相乗効果は多大である。
- ・さらに、横断型基幹研究分野同士の融合（ex. (Control + Optimization) + Information）は新たな原理を創出し、科学技術が大きく発展する推進力となる。

すなわち、「たてとよこの2次元構造」は、非常に多様な融合・展開・進展の可能性をシステムそれ自身が内包している。これがもたらす最大の利点は、個別分野での特化による深化（たて）と抽象化・普遍化による展開（よこ）がスパイラルの如く交互に発展していくことにある。この視点は、日本発の新しい学問の創成の大きな推進力となることを示している。

たとえば、科学技術振興機構のさきがけ研究21(ポスドク参加型)において、「生体と制御」、「光と制御」、「合成と制御」、「協調と制御」、「タイムシグナルと制御」、「変換と制御」という「制御」と他のキーワードを併記した研究領域が6つ走っている。これは、「制御」という横系を通すことにより各研究分野の研究の促進、本質の獲得や「制御」分野の新しい展開を生む可能性を広げているという点で非常に興味ある試みである。

しかし残念なことに、制御を専門とする研究者でこれらのプロジェクトに参画している者は非常にわずかである。その原因は、縦型研究者と横断型研究者の双方にある。横断型研究者がその方法論に固執しすぎて、新しい可能性に眼を向ける積極性に欠ける（新しい領域に参入しようとする、その分野の基礎知識の習得から始める必要があることが、積極性を阻害している大きな要因の一つである）。一方、縦型の研究者もその固有の分野でこれまで集積してきた技術に固執しがちで、新しい方法論を取り入れる傾向はあまり強くない。さらに、当該研究領域の代表者は多くの場合、関連のある縦型研究分野から選ばれることが多く、本来ならば可能である新しい融合の芽を摘んでいるのが現状である。

この点が欧米特に米国との大きな違いである。新しい研究分野を推進していくとき、米国においては異分野の交流や融合はあたりまえのごとく行われている。日本において上述のような状況が続くとするならば、先端科学技術の分野で日本は後塵を拝することになる。例えば、生物・生命や脳の機能の解明とその工学への応用に関して、制御は重要な役割を果たすと言われており、それを進めていくためには真の意味での両者の融合が不可欠であるが、現状はそうならない。

生物・生命・脳と制御の関わりは、脳レベルでの制御、臓器レベルでの制御、細胞レベルでの制御の3つのレベルに大きく分けられる。脳レベルでの制御は、特に小脳が受け持つ運動機能の解明に制御理論が大きな役割を果たした。また、高次機能の解明と

様々なロボットの高機能化に対しての研究が盛んに行われおり、比較的融合が進んできた研究領域である。しかし、臓器レベルでの制御に関しては、個別臓器の調節メカニズムの解明はなされているものの、異なる生理機能の相互の関係を解明するには至っていない。すべての生理機能を総合的に解明し、それを医療に応用するためには、生理機能を一つのシステムとして捉え、制御の視点から総合的に検討する必要がある。そのためには、制御と医学の真の融合が求められており、数多くの解決すべき課題が残されている。一方、細胞レベルでの制御に関しては、日本を中心にシステムバイオロジーという新しい研究分野が創出されたが、制御とバイオの融合は必ずしも進んでいないのが現状である。実験ベースのバイオの研究者（縦型研究者）と数式モデルに基づく理論ベースの制御の研究者（横断型研究者）の発想や展開は大きく異なるので、融合が難しいのは事実である。しかし、この違いをマイナスとして捉えるのではなくプラスとして捉える必要がある。制御の研究者はこれまでのシステム制御理論に固執することなく、バイオに適した新しい概念・原理に基づく新しいシステム制御理論を構築し、さらにそれを普遍化する努力が必要である。これは大きなチャレンジであり、バイオの研究者との共同作業にしかその道は開けない。

生物・生命・脳に限らず先端科学技術分野において、新たな融合からの飛躍的な展開を実現するには、個々の研究者の意識変革を促すことも大切ではあるが、「たてとよこ」の融合が自然な形で実現できるようなシステムを構築することが不可欠である。このようなシステムが構築されるならば、先に紹介した「内部モデル原理」など制御の原理や概念に基づいた学問の深化が進み、さらにはそこから制御における新しい原理や概念が創出される可能性が大きく膨らむ。このようなシステムの具体案を次節において、一試案の形で提示する。

2.5 科学研究費補助金配分方式の2次元構造

前節までで、21世紀の科学技術の発展のためには、既存の縦型学問領域に加え、横断型学問領域の研究を促進していくことの重要性を述べた。これらの考察を踏まえ、新しい研究分野の創生を促進するための科学研究費補助金（科研費）配分方式の改善試案として、研究領域区分に新しく「横断型」の研究領域を設定し従来の研究領域（縦型と呼ぶ）と複合させた2次元構造を提示する。ここで申請は、縦型（本来的に縦型の研究）、縦・横型（縦型と横断型との協同を要する研究）、横断型（本来的に横断型の研究）の3つのカテゴリーに分け、審査もそれに対応した体制とする。この2次元構造案は、平成15年度申請から導入された「総合・新領域」の考え方とは本質的に異なるもので、それが目指した「新しい学問分野への柔軟かつ機動的対応」のメカニズムを内包していることを具体的に示す。

科学研究費補助金配分方式に関する改善試案

- 縦型・横断型の2次元構造案 -

研究領域区分に新しく「横断型」の研究領域を設定し、従来の研究領域（以下「垂直型」と呼ぶ）と複合させた2次元構造とする。ただし、横断型研究領域は以下の条件を満たす分野とする。

- (1) 個別の対象分野に依存せず、多くの縦型研究分野と接点をもつ。
- (2) 「コト（機能・働き）」を対象とし、それ自体で充足した学問体系をもつ。

また、申請は

- (1) 縦型：本来的に縦型分野の研究
- (2) 縦・横断型：縦型と横断型との協同を要する研究
- (3) 横断型：本来的に横断型の研究

の3つのカテゴリーに分ける。審査の方法に関しては、検討の余地があるので一案に過ぎないが、以下の案が考えられる。

第一次審査の方法：

- ・「縦型」の申請は縦型の審査員3名で審査する。
- ・「縦・横断型」は横断型2名と縦型1名の審査員で審査する。
- ・「横断型」は横断型審査員3名で審査する。

第二次審査の方法：

- ・「縦型」は縦型審査員が審査する。
- ・「縦・横断型」と「横断型」は横断型審査員が審査する。

以下では、平成15年度申請から導入された「総合・新領域」の考え方との違いを明確にすることにより、この提案の趣旨及び導入のメリットを明らかにする。

基本的な趣旨：

「縦型・横断型の2次元構造」案は、従来の縦型分類に加え、横断型研究領域分野の分類を2次元的に配置するものである、したがって、平成15年度申請から導入された「総合・新領域」の考え方とは、以下の2点で本質的に異なるものである。

- ・導入された「総合・新領域」は、複数の研究分野（分科）にまたがる融合的研究領域を設定したものである。これに対し、ここで提案する「横断型研究領域」は、理学、工学、農学、医学、経済学など幅広い複数の縦型研究分野（系、分野）にまたがって非常に多くの研究分野（分科）に共通に関連し、かつそれ自体で学問体系をもつ研究領域を設定するものである。
- ・導入された「総合・新領域系」に申請される研究課題は、設定された分科・細目内で単独に審査される。これに対しここで提案する「縦型・横断型の2次元構造」では、「横断型研究領域」に申請されるものの中で縦型と横断型との協同を要する研究課題については、「縦型（従来型）研究領域」の審査と融合した形で審査される。すなわち、「縦型」と「横断型」とがクロスする任意の研究分野に対応した申請及び審査が可能な枠組みとなっている。

縦型・横断型の2次元構造のメリット：

上記の2番目の特徴は、「縦型・横断型の2次元構造」とそれに伴う「縦・横断型申請及び審査」の導入が、平成15年度申請からの改正に当たって整理された以下に示す現状システムの4つの問題点の本質的解決策となっていることを示している。

学問の進展に的確に対応するため細目を抜本的に見直すべきではないか。

申請に当たって適切な細目がない学際的領域の研究が多くなっていることにどう対応するか。

伝統的な学問の分類に収まり切れない、新しい分野の研究を申請し難い状況が生じているのではないか。

学問の進展に伴い、審査員の専門分野を超えた申請が多くなり、適切な審査が困難になってきている状況にどう対応するか。

特に「2次元構造」の導入は、分類のしにくい学際領域や新しい研究分野の柔軟な設定に非常に有効であり、上記のと の本質的な解決策を与えている(今回の改正で導入予定の「総合・新領域」では、毎年のように分科・細目の新設及び見直しをおこなわないと、上記のと の解決とはならない)。実際、「2次元構造」は、今回の改正案の6つのポイントの5番目：

総合・新領域系の分科細目の設定・分割への柔軟かつ機動的対応

分科細目表の見直しについては、平成5年度から5年毎の見直しを行ってきたが、今後、総合・新領域系の分科細目については、名称の変更、時限付き分科細目の本表への採用等について適宜対応することにより、分科細目の設定・分割等を柔軟かつ機動的に行う。

の機能をシステムそれ自身が持っており、それが自動的に実現されるという大きなメリットがある。

さらに、「縦・横断型申請及び審査」の導入は、上記の の有効な解決法の一つとなっている。実際、今回の改正案では、これを実現するために

総合・新領域系の細目におけるキーワード方式審査の採用

総合・新領域系の分科細目については、複合領域から大幅な見直しを行い、学際的・横断的な研究分野となっていることから、その細目をキーワードにより複数のグループに分け、第1段審査をそのキーワードのグループ単位で実施する方式(キーワード方式審査)を導入する。

を新たに導入しているが、「縦・横断型申請及び審査」ではそのような必要はなく、縦型と横断型の審査員の両者によって行うことによって柔軟に対応できるというメリットがある。

3 . 横断型科学技術の教育体制

横断型科学技術を推進するためには、それを担う研究者・技術者の養成は必須である。本章では、望ましい横断型教育体制の在り方に関する提案を行う。さらに、個別ディシプリンの教育を受けた学生が横断型の視野を身に付けられる大学院教育体制の実現についても言及する。

3.1 背景

大学における工学教育は、学科名称は変わっても基本的には、機械工学、電気工学、化学工学、土木工学といった従来の学問教育の伝統的な枠組みの中で長い間行われ、各ディシプリン独自の知識とそれを活用する能力の教育が目標とされてきた。このような分野別専門技術者の育成は日本の産業発展に大きな貢献をしたことは事実である。そして、日本では、学科、学会、官庁、産業界の縦の連携が明確となり、卒業した学科が卒業生の進路や技術者・研究者としての方向性に大きな影響を与えている場合が多いのが現状である。

一方、情報化社会が進展し、価値の多様化とともに産業形態が流動化し、産業構造自体も従来の縦割区分で分類することが難しくなっている。工学が取り扱う製品、システム、人工物などの規模および関連性がますます巨大化、複雑化しており、それらとインタラクションをもつ人間、社会、環境との関わりを認識し、様々な工学的な閉塞状況や社会的なコンフリクトを解決する必要に迫られている。これまでの多くの工学教育でなされてきた個別学問領域の壁を越えて、また単にもものづくりに留まることなく、環境、社会、人間を含む複合したトータルシステムのデザインができる技術者へのニーズが産業界においても高まってきており、横断型の視点をもった人材育成のための教育体制の構築が急務となっている[2][7]。

3.2 これまでの試みと課題

約30年以上前に工学教育では、工学の基礎となる内容については専門教育の前に、共通専門基礎科目として学科を越えて教育する方法が採用された。その後各分野別の専門教育を充実する傾向のもとに次第に工学基礎教育の理念が薄れてきた。また、共通の基礎教育を専門教育の前に行なっても、専門科目と比べて学生の共通基礎科目の学習に対するモチベーションが低い傾向にあり、学習教育効果を上げることが非常に困難であったことも一因と思われる。この経験を活かし横断型科学技術教育においては専門教育を含めたカリキュラム全体を横断型のコンセプトのもとに作り上げている必要があり、学生にも横断型科目の履修に対するモチベーションを早期に与えていくことが課題となる。

その後、分野横断型として独自の教育を行ってきた制御工学科や計測工学科などの学科が消え、一方では機械工学科と情報工学科など機械系と電気系が融合した学科が生まれ、学問分野の融合が図られてきたが、計測や制御という横断型教育分野が従来の個別縦型分野に取り込まれた面もあり、必ずしも横断型科学技術者の育成という視点から学部教育組織が再構築されたわけではない(図4を参照)。

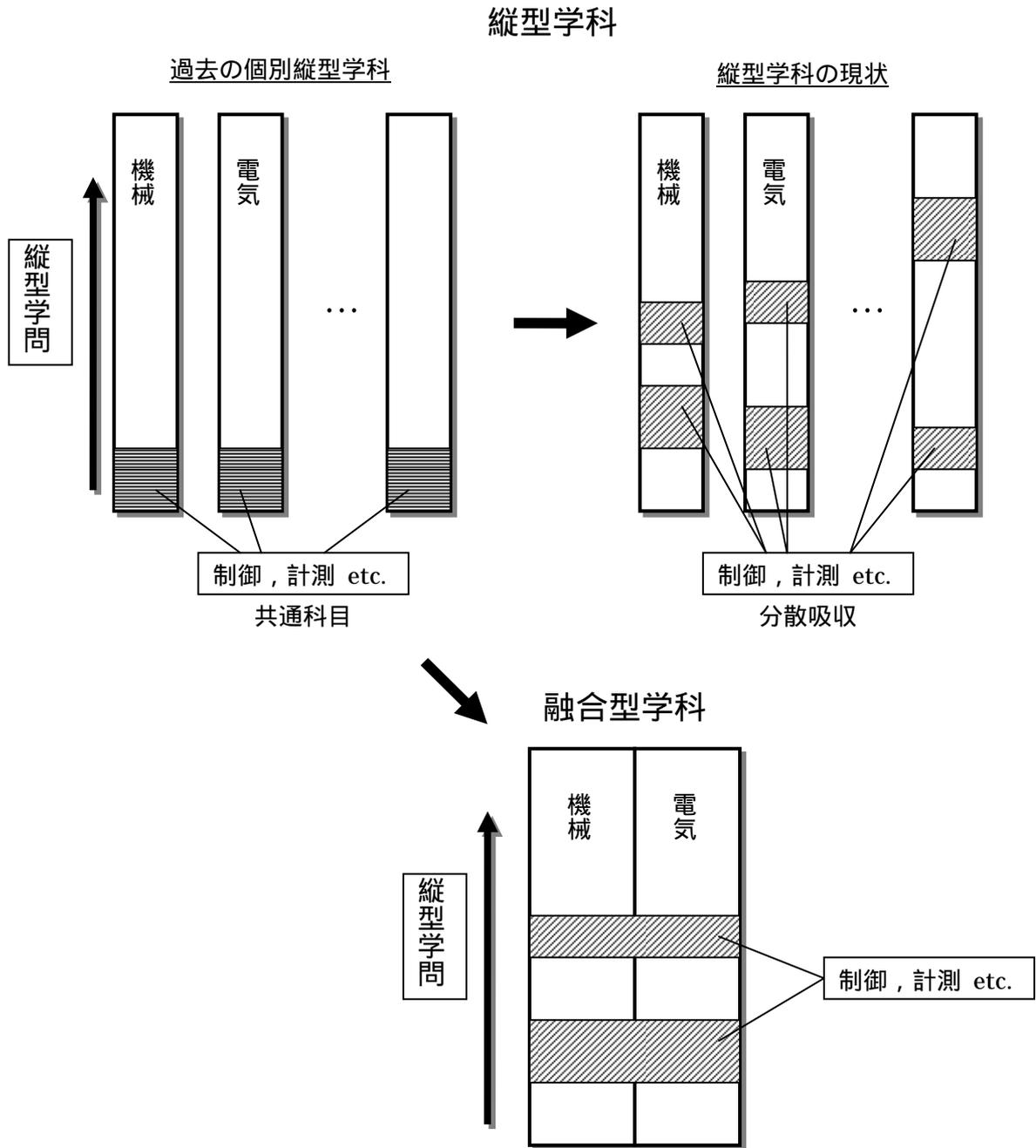


図4：従来の縦型個別分野教育と融合学科における制御、計測などの教育の位置づけ

制御工学は、前章でも述べたように、ナノサイズの問題から、人間、社会、地球・宇宙に至るダイナミクスをもつ広範囲なシステムを対象としており、特定な対象や産業への応用に限定されたものではない。また、制御工学は、広範囲のシステムにおいて様々な拘束条件のもとで、適切な評価規範を見だし、制御システムをデザインするための設計理論と実現技術を究明する学問であり、デザイン科学技術のコアを形成している。普遍的な設計理論を究明しアルゴリズムや共通原理の構築を目指す点で、まさに横幹科学技術を構成する主要な学問分野である。

横断型学科

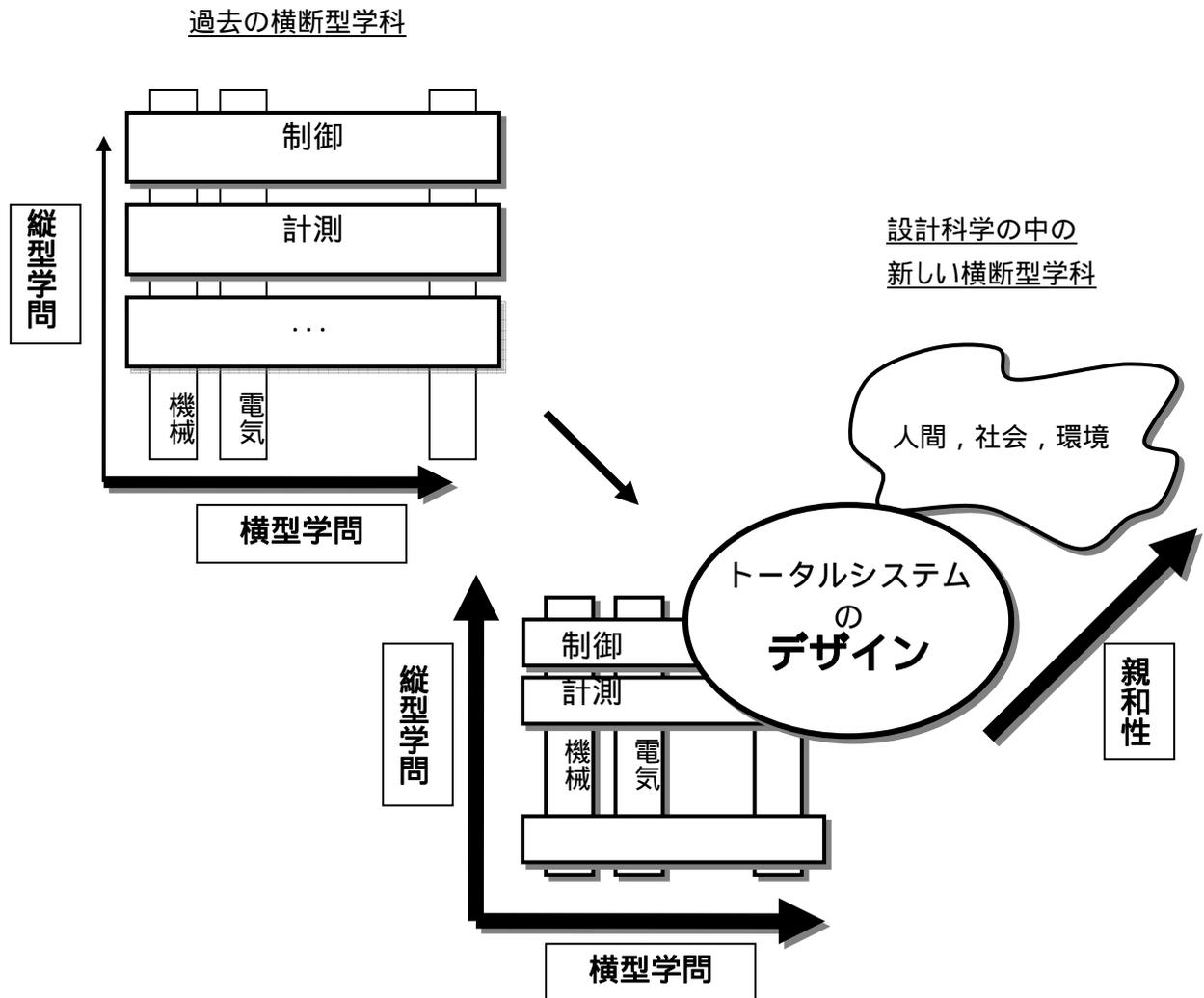


図5：システムデザイン科学技術教育を目指す横断型教育を支える制御・計測の役割
 (左上：過去に横断型教育を目指した制御工学科などでは、横型を主張するあまり、縦型との関わりが弱く、必ずしも縦型と横型が密に織り合わさった2次元構造の教育体制ではなかった。右下：2次元の上に親和性など評価の次元を加えた3次元の広がり度でトータルシステムのデザインを目標とした新しい横断型教育を示す)

システムをデザインする科学技術の教育においては、従来の個別専門分野(縦型)の教育と制御工学などの横幹科学技術(横型)の教育の2次元構造の上にデザインを明確に指向した横断型教育が望まれる(図5を参照)。既に述べたように、単にものづくりに留まることなく、環境、社会、人間を含む複合したトータルなシステムを様々なコンフリクトが満ちた状況のもとでデザインする教育が必要であり、以下ではその教育目標と内容について具体的に言及する。

3.3 横断型科学技術教育の目標

対象とするシステムのデザインは、単に既存の要素技術の集積や組み合わせからボトムアップで作りに上げていくのではなく、システム全体の目標を定め、その実現には、どのような構造、機能、要素技術が必要かを検討し、個々のサブシステムの構造や構成要素の決定も含め、概念設計の初期段階からデザインの視点をもつという意味でトップダウンのコンセプトが重視される。もちろん、システムは個々のサブシステムの構造から成り立ち、各要素技術を突き詰めていく要素還元論的アプローチを否定するわけではないが、横断型教育においてはデザイン科学技術教育プログラムをトップダウンで構築することにより、従来の学問分野や産業分野の枠組みにとらわれることなく、また既存のプロセスの改善ではなく革新的なプロダクトを創出する人材の輩出を実現することを目標としている。計測、制御などの学科名称が消えていく中で、このような横断型の視点からの教育カリキュラムを実施している慶應義塾大学システムデザイン工学科、東京大学計数工学科、東京工業大学制御システム工学科などの教育プログラムを参考にして、これらを発展させた望ましい横断型人材教育の目標や方法の在り方について述べる。

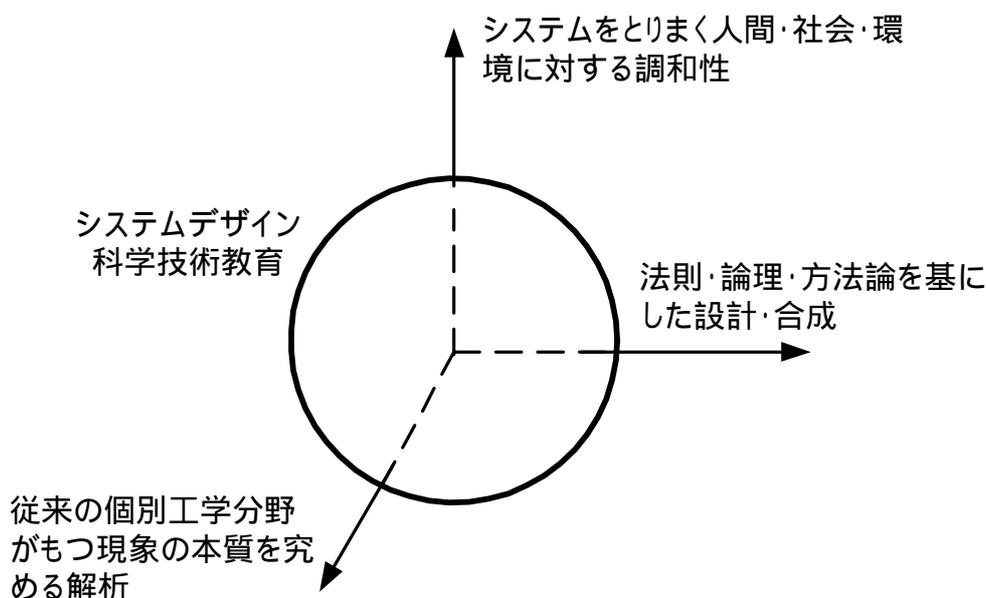


図6：システムデザイン科学技術の横断型教育のコンセプト

図6に示すように、広範囲なシステムのデザインを修得するための横断型教育のコンセプトとは、「従来の個々の工学がもつ現象の本質を究める解析主体の次元」と、「法則・論理・方法論を基にした設計・合成の次元」に加え、「システムをとりまく人間・社会・環境に対する調和性をもう1次元」とする3次元の広がりの中で、複合的な現象を解析し、制約条件や評価規範をモデル化し、革新的な価値（プロダクト）を創出し、広範囲なシステムを設計する人材の育成」と要約することができる。このためには、従来の個別分野の基礎知識を選択的に教育するのではなく、個別分野の基盤要素知識を再構築し、その複合的現象や共通原理としての理解、さらには統合化やデザインの方法論をベースとした教育内容の新しい構築が必要となる[8][9]。

これらのコンセプトのもとで、横断型指向の教育目標は、「社会の複雑化・流動化を認識し周囲の環境をも含めたシステムをいかに表現しデザインを行うか」という課題に対して、力学・エネルギー・制御・情報などの基盤的知識を総合的に活用し、さまざまな制約条件や不確かな評価規範をモデル化し、解決すべき問題を定め正面から取り組むことのできる人材を育成することであり、こうした基盤的知識により、人間・社会・経済などにかかわる新しいものの見方を身につけるとともに、エネルギー、宇宙、都市、生命、生産など、複雑なダイナミクスやシステムを内包する総合的環境に適應する人工物やシステムを設計、実現、変革することができる人材を育成する」ことである。

3.4 横断型学部教育の内容と方法

横断型教育のコンセプトで述べたように、従来の個々の工学がもつ現象の本質を究める解析主体の次元と、法則や論理を基にした設計・合成の次元に加え、システムをとりまく人間・社会・環境に対する調和性をもう1次元とする3次元の広がりの中で、システムの解析と設計を教育するプログラムを構築する。構築の方法はそれぞれの横断型教育プログラムの目標に応じて異なるが、制御工学が対象とする広範囲なシステムのデザインという目標を達成する教育プログラムとその実施方法を3つの次元に沿ってそれぞれ具体的に述べる（図7を参照）。

- (1) 解析主体の次元として、機械工学、電気工学、情報工学といった従来の個別学問分野の基礎知識の教育を中心とした基盤教育が必須となる。この教育の目標は、従来の個別分野に相互関連する様々な現象を複合現象として解析しモデル化できる能力を修得させることである。従来の個別分野の基本科目を断片的に取捨選択するのではなく、現象解析能力とシステムデザイン能力を修得させるために基本となるべき事項を取り出し、有機的に融合・統合させた従来にない教育カリキュラムの構築が必要であり、この方針に沿った新しいテキストの作成が不可欠となろう。さらに、カリキュラムの実施においては、力学、熱・流体、回路、電磁気、数学などを相互に融合させて複合的な問題を解く統合化演習が、横断型教育には極めて重要な役割をもつ。また実験についても、さまざまな複合的な現象を取扱い、複数の工学分野のツールを使いこなせることを目的とした実験内容、実験方法、使用ツールなどを考えることが重要となる。
- (2) 二つ目の法則・論理や方法論を基にした設計・合成の次元に関しては、横断型教育の横軸のコアとなる科目教育であり、個別の対象にとらわれることなく共通原理、論理性、普遍性を見だし、これらを問題に応じて活用できる能力を修得させることが目的となる。例えば、デザイン方法論、システム工学、制御工学、シミュレーション、最適化、計測、CADなど、さまざまな対象に対して、これらのツールを統合化して活用できる能力を修得させる科目、さらには実現すべきターゲットが与えられた課題に対してこれまでに学習した知識、ツールを活用してデザインを行い問題を解決する創造演習などが必須となろう。新しいテーマを毎年準備することは教員側の負担も大きい、多数の教員とTAの教育体制の支援の必要とされる。
- (3) 三つ目の人間・社会・環境との親和性の評価と実現の次元に関しては、システムのデザインを行うための基盤科目からなり、技術者倫理、製品企画、ヒューマン

インターフェイス、地球環境工学、都市インフラ、ライフサイクル工学、工学と社会経済、など人間・社会・環境などとの調和性を評価実現し、拘束条件を認識し、コンフリクト下での意思決定やデザインができる能力を修得させることが目的となる。システムをデザインしたりシステム統合を行うということはどういうことかを工学部の初期教育の段階で体験させることは、学生が横断型科学技術の産業界における役割を理解し、その後の学習へのモチベーションを高める上でも極めて重要である。具体的な実施法として、企業の技術者により具体的なシステムデザインやシステム統合の事例(成功事例を中心に)についての講義を受けた後、その工場や現場を見学させてもらうなどの形で半年程度実施することが効果的である。このためには、受入企業側にも横断型科学技術教育への認識が必要であり、このような産学連携に基づいた事例理解によるイニシエーション教育を行うことが有効に思われる。

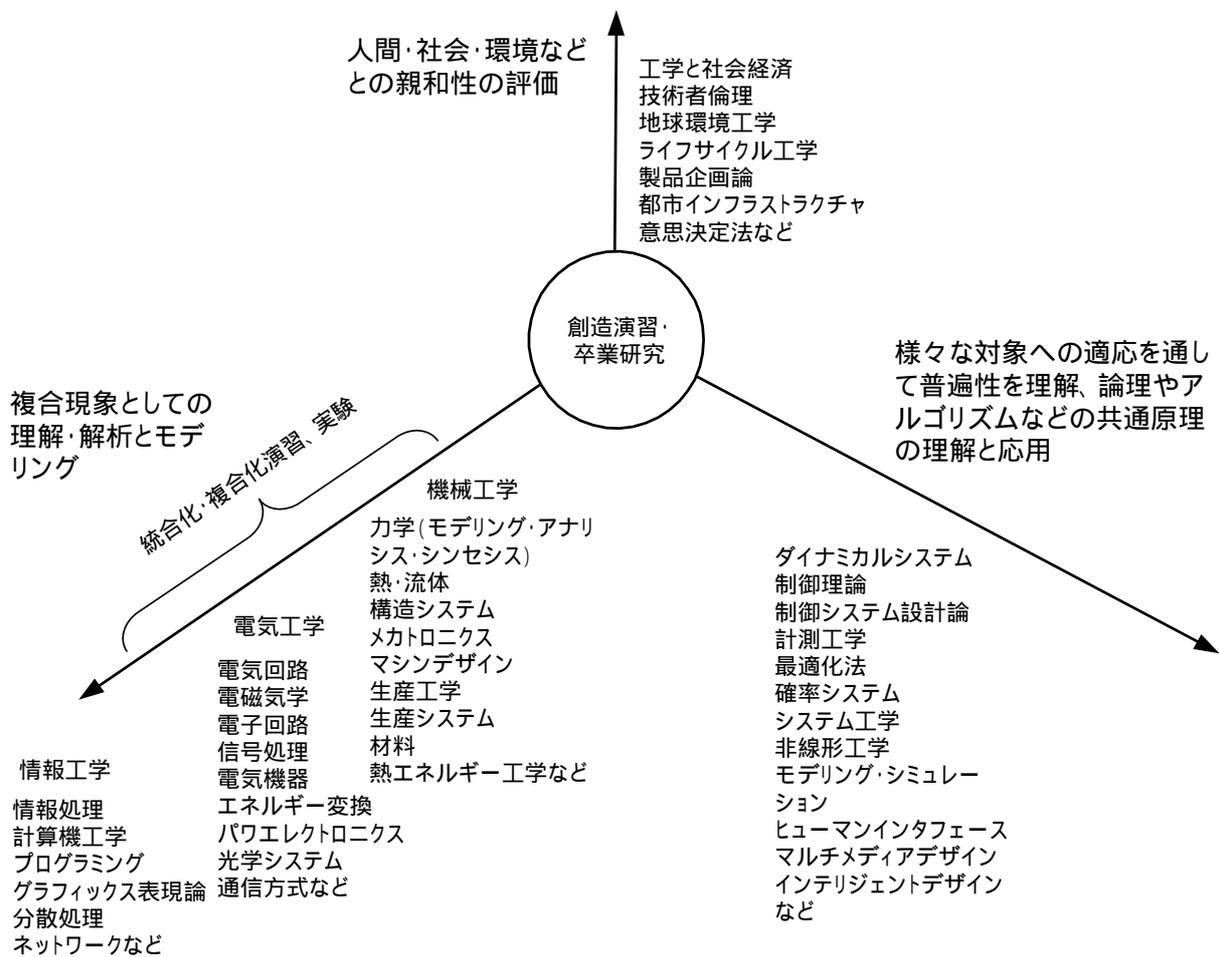


図7：システムデザイン科学技術のコンセプトを実現する横断型カリキュラムの一例（慶應義塾大学システムデザイン工学科のカリキュラムを参考にした）

以上の3つの次元の視点を通して、制御の対象となる広範囲なシステムのデザインに関する教育の目的は、問題発見と定式化能力及びその解決能力であり、様々な制約条件

や評価規範を認識しつつ革新的な価値を創造する能力の修得であるといえる。そのためには横断型教育に次のステップとして、これまでの講義、演習、実験での学習結果を最大限に利用し統合化することにより、人間・社会・環境などの制約条件のもとで与えられたターゲットに到達するトレーニングが望まれる。数名のチームで行い、半年あるいは4分の1年程度の時間をあてる。教員には多大な負荷がかかるが、多数のTAや技術職員などによるサポートのもとで、創造演習やデザイン演習を効果的に実施する教育体制を整えることにより可能となろう。これらは、この後に続く卒業論文における学生の問題発見・解決能力の修得に役立つであろう。また卒業論文においても、指導する教員が一つの個別分野の問題解決ではなく横断型のアプローチが不可欠と思われるテーマを選択し、学生が横断的な視点で考えていくような研究指導が重要であり、教員の教育方法の改善を定常的に進めていくことが必要となろう。上述した3つの次元はそれぞれ互いに密接に関連し合っており、横断型教育カリキュラムの教育目標を達成するためには、教員が互いに担当教育内容を十分に熟知していることが重要であり、教育方法や内容の改善を定常的に行う仕組みが横断型教育においては特に必要である。

前章では研究の視点から2次元構造を導入したが、横断型教育では3次元構造によりカリキュラムのコンセプトを説明した。この関連性について触れておきたい。横断型教育も基本は2次元であり、システムのデザインを行う上で考慮すべき指標を人間・社会・環境に対する親和性、拘束条件、評価などを新たな1次元として明示することにより、学生の横断型教育へのモチベーションや教育コンセプトの理解を深め、学習効果を高めることが可能となる。前述したように、親和性の評価に関連する研究分野は、環境工学、技術倫理、社会工学、ヒューマンインターフェイスなどがあり、これらはいずれも制御学と同様に2次元のヨコの研究分野に対応しており、研究の視点から考察した研究分野の2次元構造と矛盾するものではない。

3.5 大学院における横断型教育の推進

大学院においては、横断型学部教育を受けた後の大学院教育、個別の専門学科教育を受けた後の横断型大学院教育、社会人の高度技術者教育や継続教育などの面から、以下のように横断型人材教育を推進する必要がある（図8を参照）。

(1) 高度デザイン科学技術教育のための大学院カリキュラムと教育制度の確立

学部において横断型教育を受けた学生、個別専門学科教育を受けた学生、企業の技術者などを対象とした横断型大学院教育プログラムを確立することが望まれる。システムのデザイン方法論・技法や先進的なシステム統合などに関して横断型学部教育をレベルアップしたカリキュラムが提供される。

(2) 大学院における横断型プロジェクト指向型教育の確立

研究プロジェクトの推進に大学院学生を参加させ、本人の専門分野とは異なるテーマのもとで広い視野からのアプローチを修得させ、複雑な問題に挑戦させることにより必要となるデザイン手法、様々な横断型方法論の修得を通して横断型人材育成を行う。さらに専門または専攻の異なる複数の教員からなる融合型研究プロジェクトチームにRAとして研究に実質的に参加させる体制も望まれる。

(3) 産学共同や産学連携による横断型教育研究の推進

大学と産業界との相互交流や共同プロジェクトを推進し、産業界からの教員採用、ま

た教員までを含めたインターンシップの実施などが有効である。既に横断型技術協議会が産業界を中心に活動がスタートしており、この協議会との協力により学部及び大学院における横断型教育カリキュラムの中にケーススタディの実施など横断型教育の充実を図ることが十分に可能な状況にある。

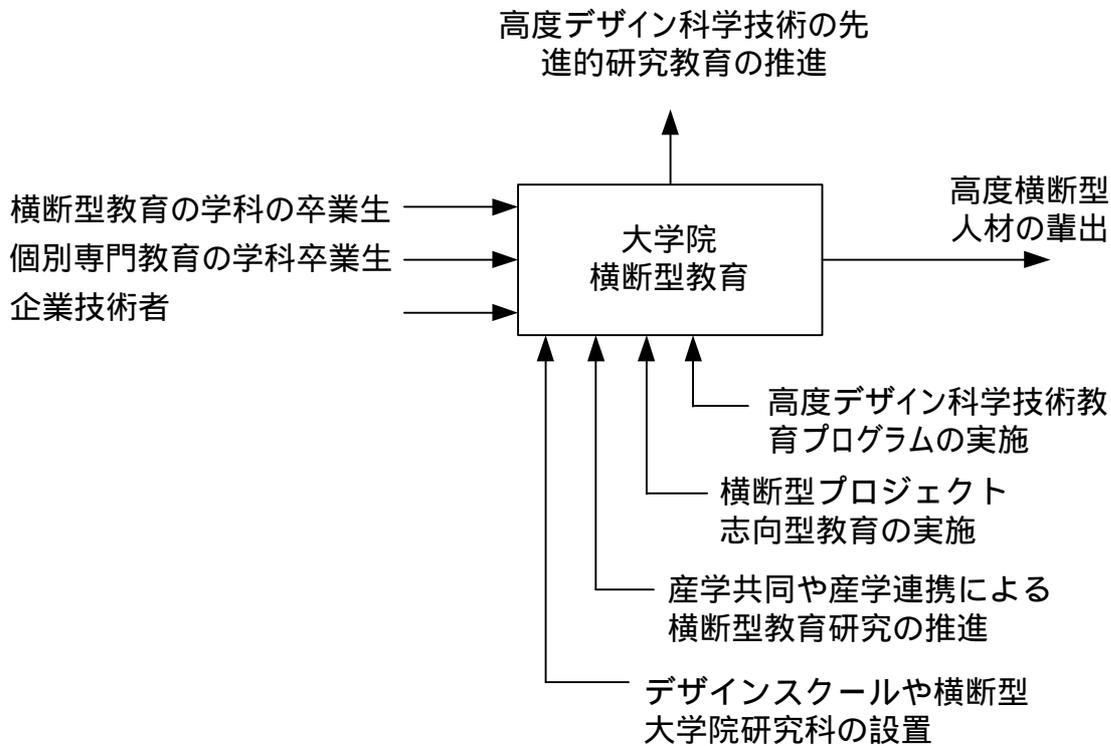


図 8 : 高度デザイン科学技術の大学院教育の実施

(4) 横断型技術者の認定への働きかけ

社会人教育も視野に入れたデザインスクールを設置し、高度横断型技術者としての知識と応用能力を修得したことを認定する教育制度の確立が望まれる。システムのデザイン教育は、決して工学のみ閉じたものではなく、社会システム、経営システムなど関連する分野も含む横断的な大学院研究科の組織の中で実施することにより、その教育成果が期待できる。一方、産業界における横断型技術者を認定する制度（例えば、技術士の新分野としての設置など）の確立も重要な課題であり、学部大学院における横断型教育はそれに応えるものでなければならない。

3.6 むすび

横断型科学技術の推進とその人材教育は産業界のニーズでもあり、大学学科教育や大学院教育において横断型科学技術を推進する研究者・技術者を育成するための教育組織の構築は急務である。横断型科学技術教育を通して、大学や大学院においては横断型科学技術を推進する人材育成及び研究者の育成、産業界においては将来の日本の産業界を支える横断型科学技術者の養成と継続教育などを実現していかなければならない。縦型個別専門分野の技術者だけでなく、このような横断型科学技術教育を受け企業で活躍する技術者が社会で正当に評価される仕組みも早急に設立することが望まれる。

4 . おわりに

本報告では、横断型基幹科学技術の典型的な学問分野の一つである制御の視点から、21世紀の科学技術を促進していくためには、「モノ」を中心として発展してきた従来の縦型研究分野に加え、「コト」に着目し対象分野に依存しない普遍的な方法論の確立を目指している横断型研究分野の進展が必要であることを述べ、以下の点を明らかにした。

- ・科学技術を「たてとよこ」の2次元構造として捉えることが、異分野間の融合を促進し新しい学問分野の創成に大きな働きをするとともに、社会のための学術の発展に大きな役割を果たす。
- ・横断型科学技術者の養成には、現象の本質を究める解析主体の次元(縦型分野に対応)と、法則や論理を基にした設計・合成の次元(横断型分野に対応)に加え、システムをとりまく人間・社会・環境に対する調和性をもう1次元とする3次元を軸とする教育体制の確立が望まれる。

また、上記を実現するための一つの方策として、科学研究費補助金配分方式に関する「縦型・横断型の2次元構造案」を一試案として提示した。

本報告書でも述べているように、学問体系を従来の縦型研究分野と横断型研究分野からなる2次元構造ととらえ、これによる体系全体の研究推進だけでなく、潜在的な新分野の創成のための方策を提案したものである。このような横幹科学技術の範疇にある学問分野は制御以外にも多く存在し、現在でも科学技術の発展に大きく寄与しているものも少なからずある。そのような分野においても、本報告書と同様の分析がなされ、ここでの分析ならびに結論が単に制御の視点からのものではないことが実証されることを期待したい。また、第2.5節で一試案として提示した「科学研究費補助金配分方式の2次元構造案」が、学術体制常置委員会(科学研究費分科会)においてより広い見地から検討され、それを出発点として新しい科学技術の発展を促進する機能的なシステム(配分方式)が実現されることを期待したい。

参考文献

- [1] 日本学術会議「新しい学術の体系」：<http://www.scj.go.jp/ja/scj/taikei/index.pdf>
- [2] 平成14・15年度文部科学省 科学技術振興調整費「科学技術政策提言」プログラム『横断型科学技術の役割とその推進』
- [3] 横断型基幹科学技術研究団体連合：<http://www.trafst.jp/>
- [4] 「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 -」：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、平成17年5月19日、<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-t1029-1.pdf>
- [5] N. Winner 著(池原他訳)：サイバネティックス(第2版)：動物と機械における制御と通信、岩波書店、1962

- [6] 示村悦二郎：自動制御とは何か、コロナ社、1990
- [7] 横断型基幹科学教育の提言：文部科学省科学技術振興調整費科学技術政策提言プログラム「横断型科学技術の役割とその推進」教育WG報告書、2003年6月
- [8] 佐野昭：制御工学教育の現状と展望、制御教官協議会、2001年11月
- [9] 谷下一夫：大学における横断型人材の育成、日本学術会議・横断型基幹科学技術研究団体連合共催シンポジウム「21世紀の学術における横断型基幹科学技術に役割」、2005年1月