

構成型工学カリキュラム

吉川弘之 (CRDS・JST)

第4回科学技術人材育成シンポジウム 工学教育の新しい展開に向けて
ーグローバル化への現状と課題

土木工学・建築学委員会、機械工学委員会、日本工学会
(科学技術人材育成コンソーシアム)

平成25年2月9日(土)日本学会会議講堂

構成型カリキュラムの歴史

1. 工学部学科の分類軸：手法要素 対象製品

土木工学、建築学科、都市工学、機械工学、精密工学、電気・電子工学、物理工学、計数工学、マテリアル工学、応用化学、化学工学 原子力工学、など

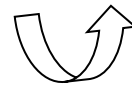
精密工学は？

- 1933 精機学会発足(大河内正敏:生産工学の提唱)
- 1946 精密工学科(大越諄:加工学の体系)
- 1949 新制・東京大学・精密工学科(加工学、計測学、精密機械学)
- 1963 精密機械工学科(設計学、加工学、計測学、生産工学)
- 1999 システム創成学科(4学科合同)
- 2006 精密工学科(知的機械、バイオメディカル、生産科学)

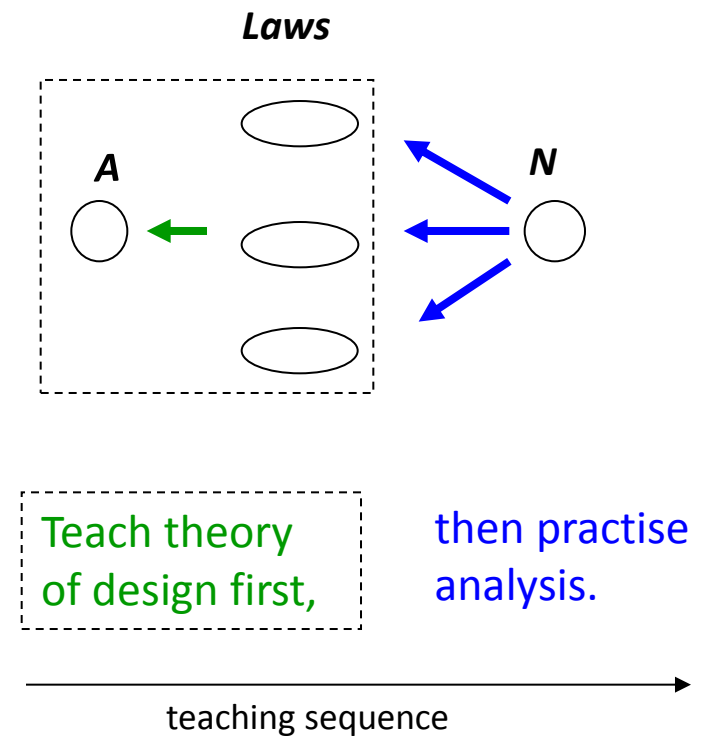
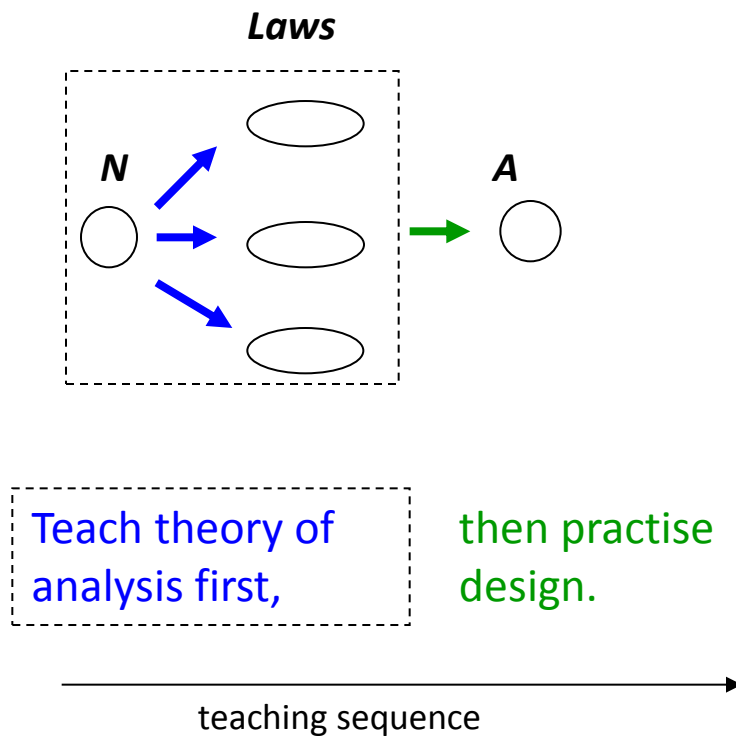
“Inversion”

N : existing things **A** : artefacts to be made

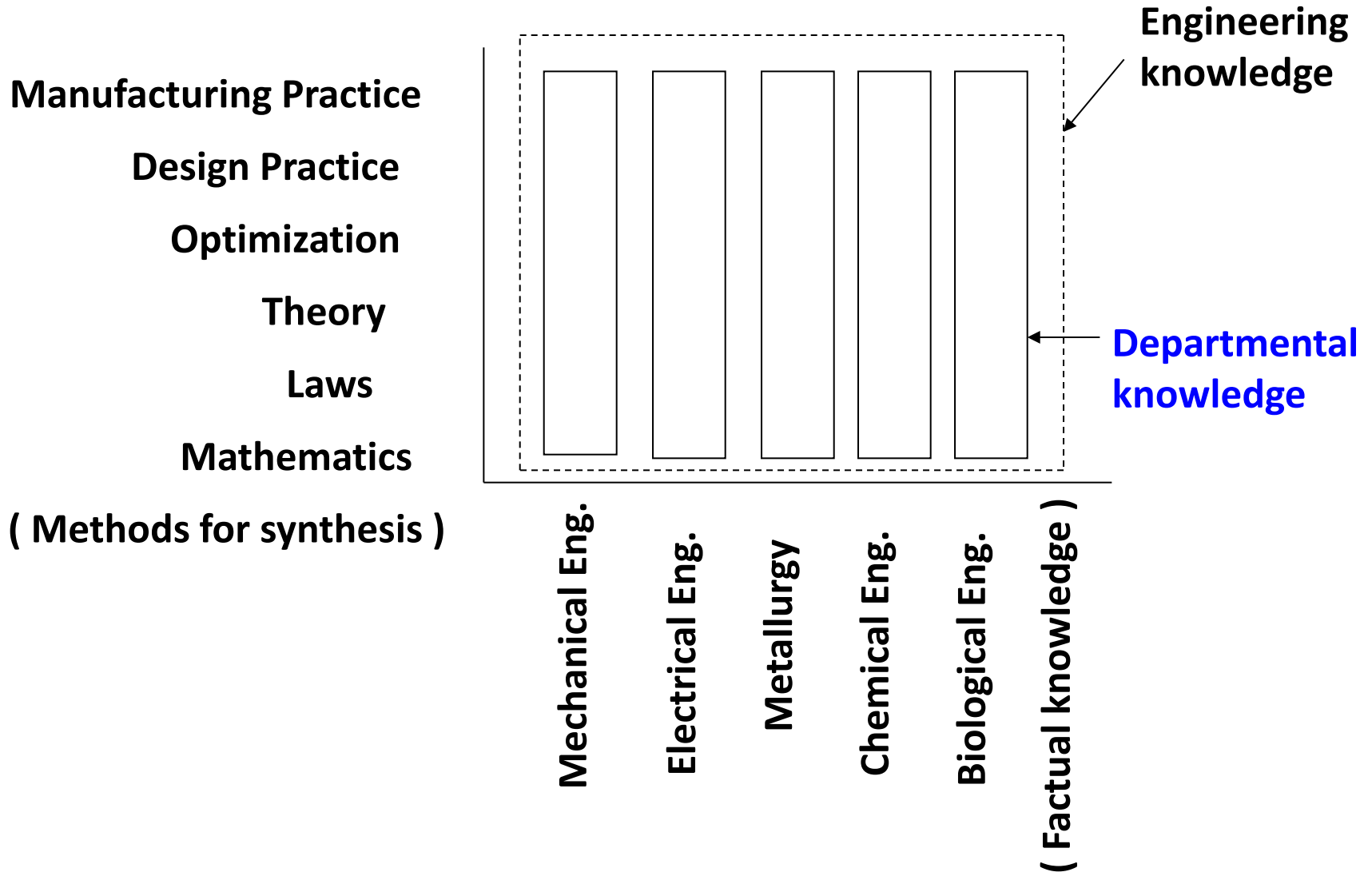
Traditional engineering education



Inverted engineering education

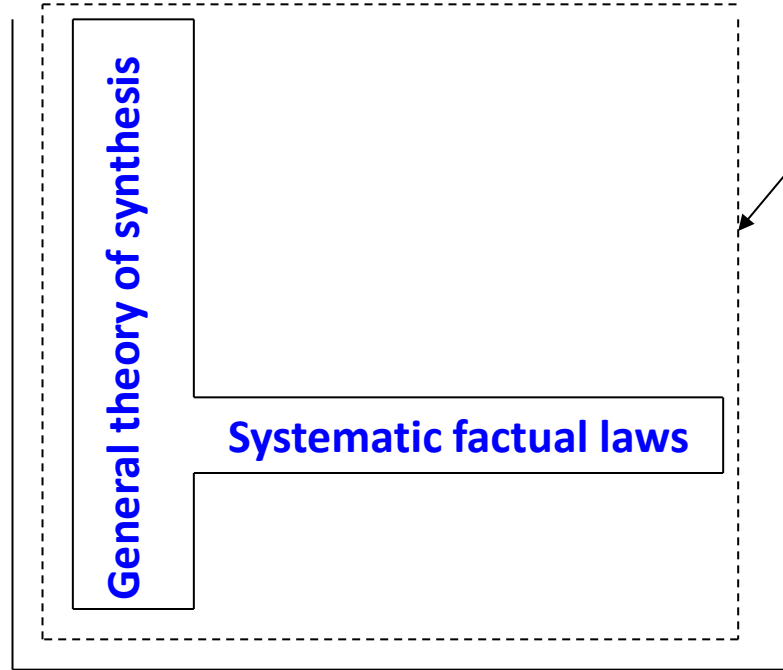


Traditional Departmental Curriculum



An Inverted Curriculum

Manufacturing Practice
Design Practice
Optimization
Theory
Laws
Mathematics



Engineering knowledge

Mechanical Eng.

Electrical Eng.

Metallurgy

Chemical Eng.

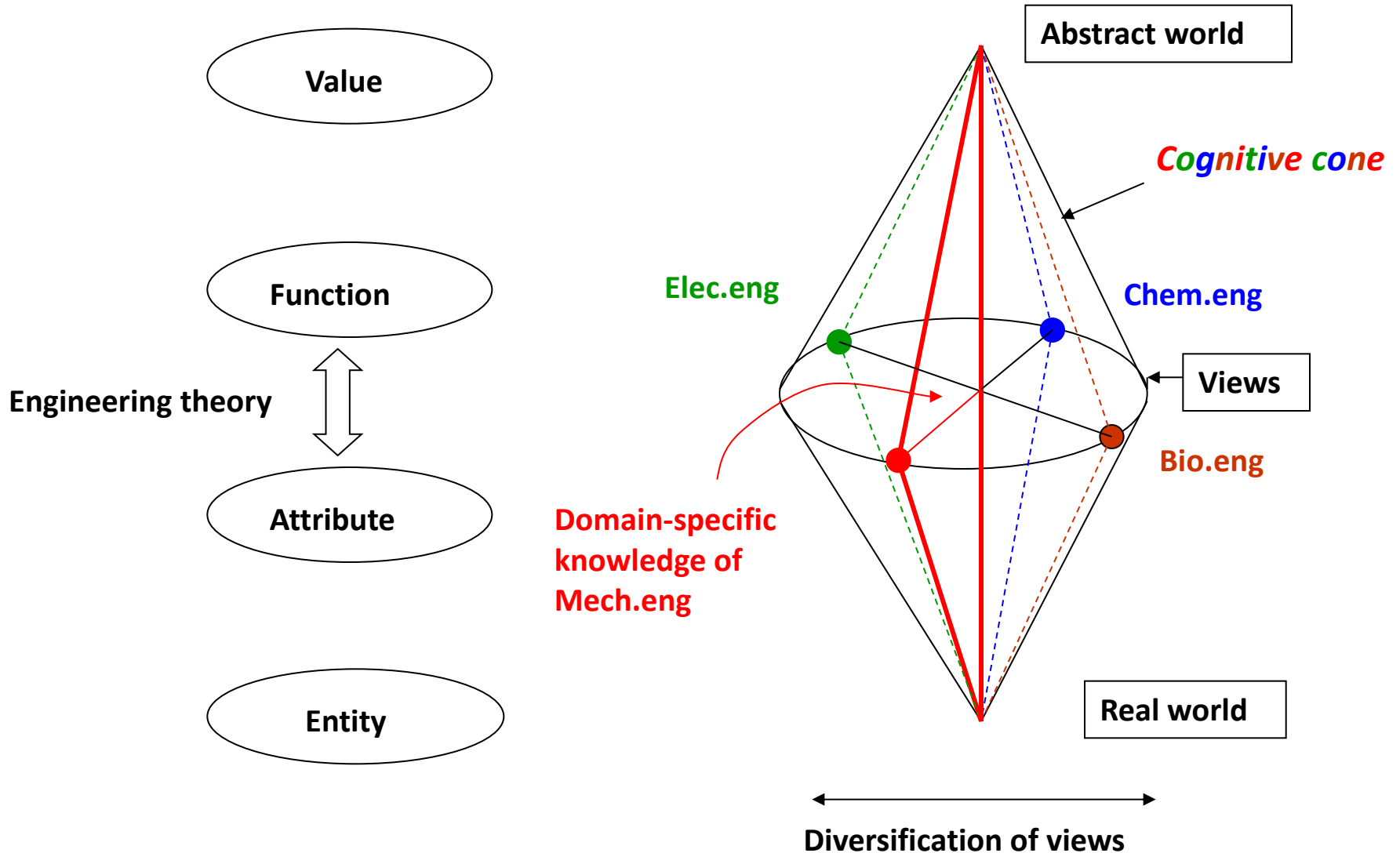
Biological Eng.

Comparison between Curricula Traditional and Inverse

	Education in University	Learning on Jobs
Domain-specified curriculum (traditional)	Deep and specialized knowledge of a domain plus limited experience of synthesis	Method of synthesis
General-methodical curriculum (inverse)	General method of synthesis plus basic knowledge of multiple domains	Deep and specialized knowledge of a domain

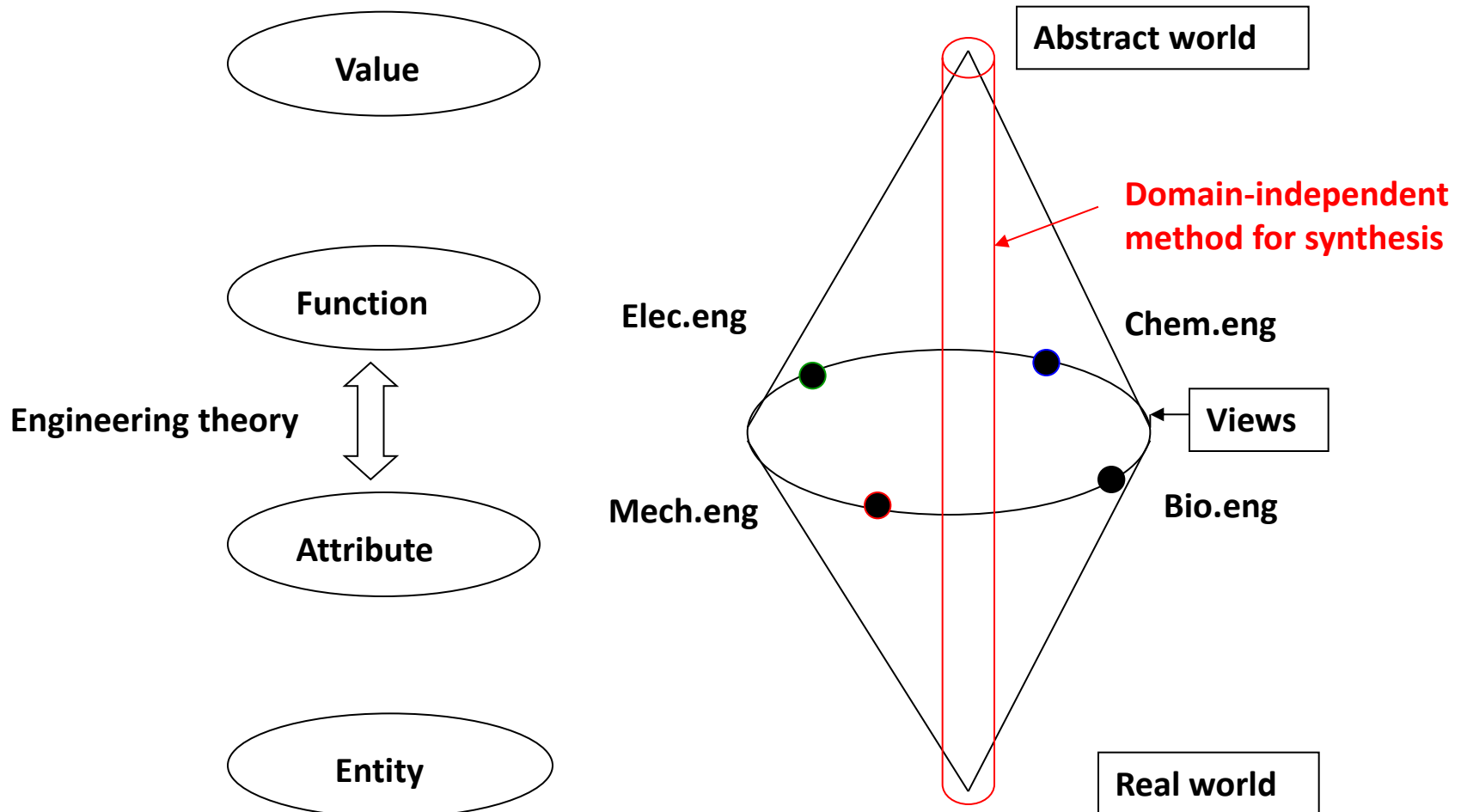
Domain-specific knowledge in engineering

(Factual laws)



Domain-independent knowledge in engineering

(method of synthesis)



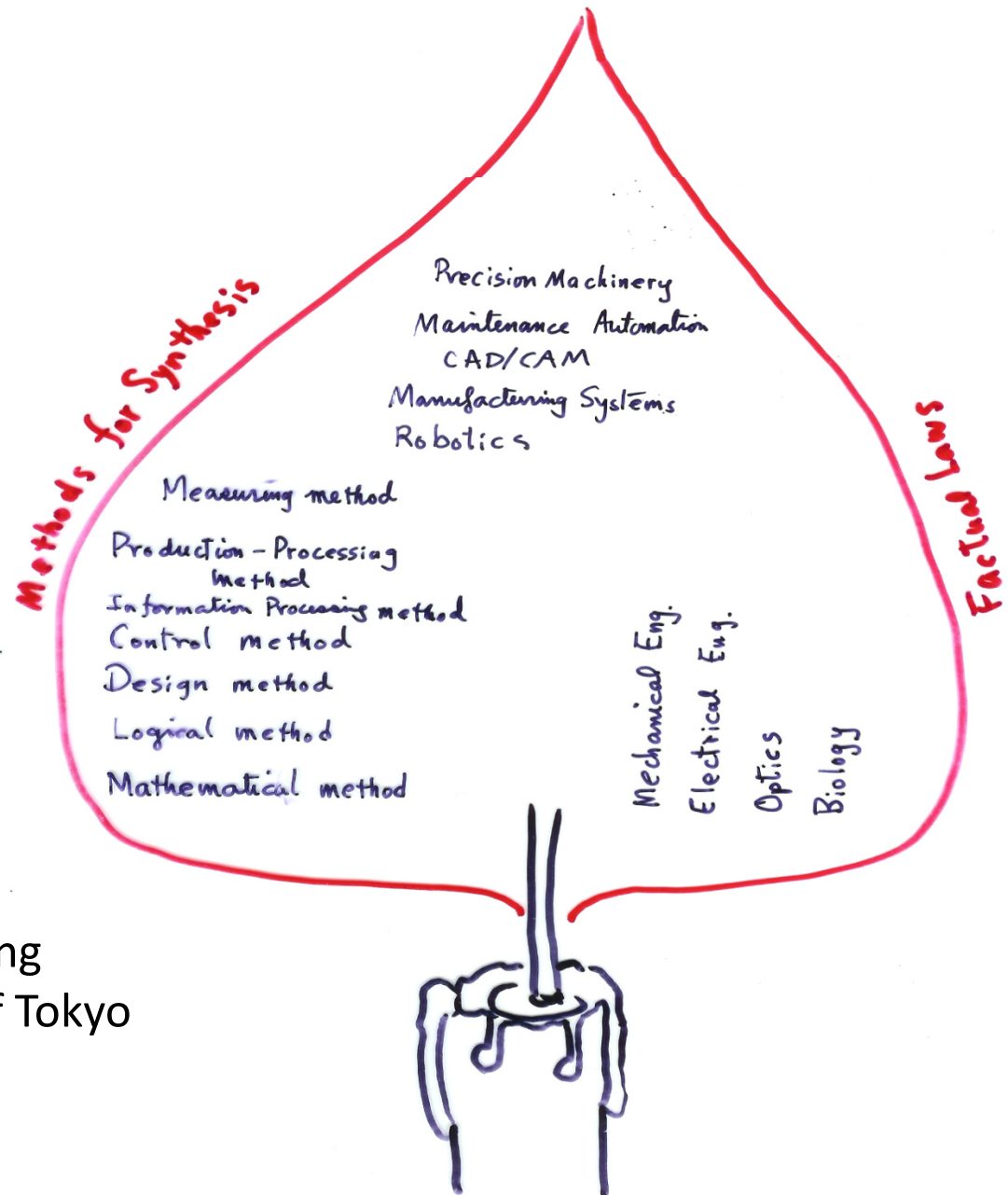
Engineers in sustainable society

Specialists of sustainable science

1. Understanding sustainability
2. Birds-eye view - multidisciplinary
3. High creativity
4. Capability of synthesis
5. Capacity to communicate people of social sciences
6. Understanding effects of technology to society
7. High ethics with professional endurance

A curriculum
named
"Flames"

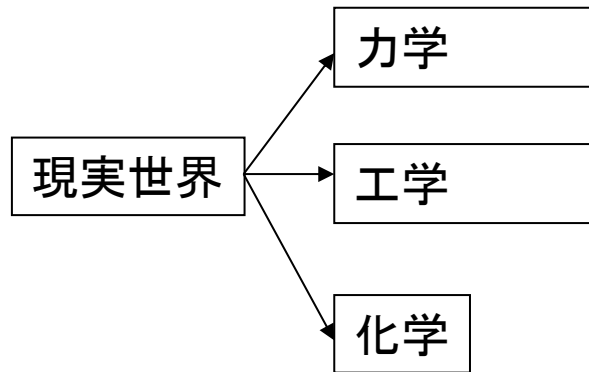
(Factual Laws
and Methods of
Synthesis)



at the Precision Engineering
Department, University of Tokyo
in 1975 -1994

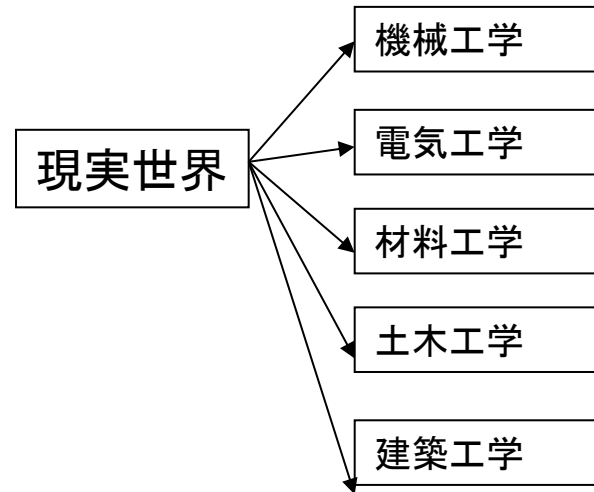
抽象化のための視点の特殊化(領域知識)

世界を理解するためのニュートンのプログラム(自然を見る視点を限定し、公理を定めてその視点に含まれるすべてのものを説明する“学”を樹立する。そして視点を増やしてゆく。)



全体説明性

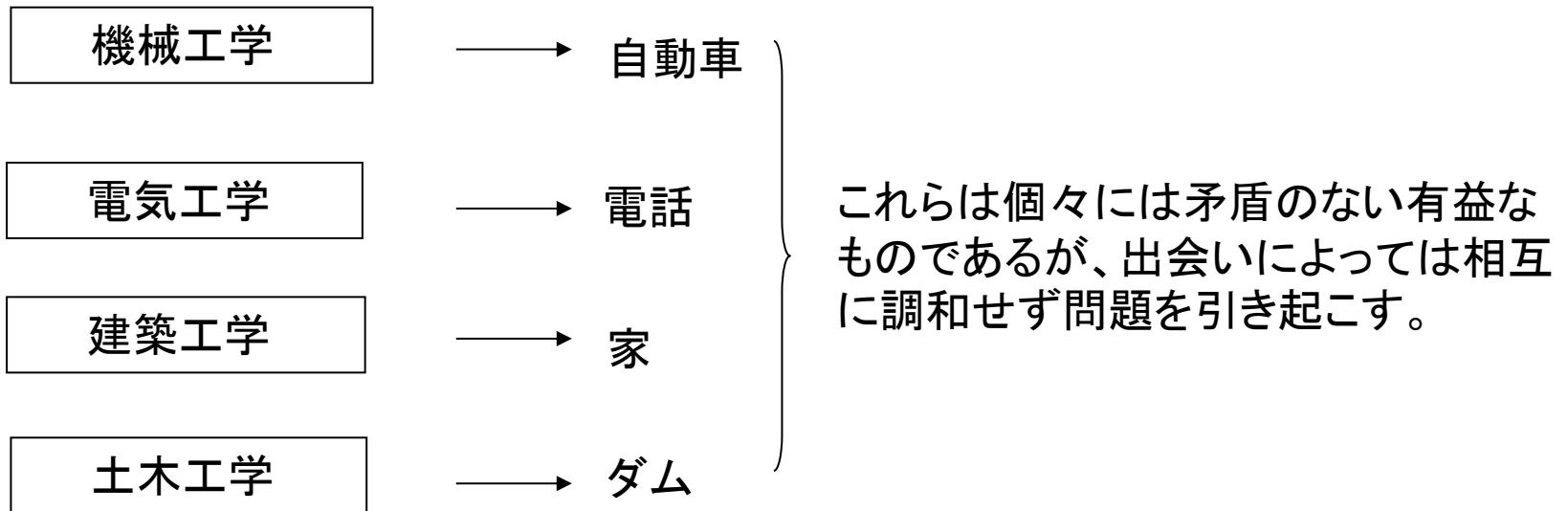
実現を目的とする工学は、ニュートン力学の形式的模倣によって成立した(人工物実現に必要な視点を限定し、ニュートン力学と同等な整合性を持つ工学領域を必要なだけ作る。)



全人工環境

ニュートンは個別の視点で法則を発見しながら、その積み重ねで世界を説明することを目的としたが、工学は個別人工物を作ることを目的とするだけで、自ら生み出した全人工環境に関心を持つことをしなかった。

人工物による環境の劣化

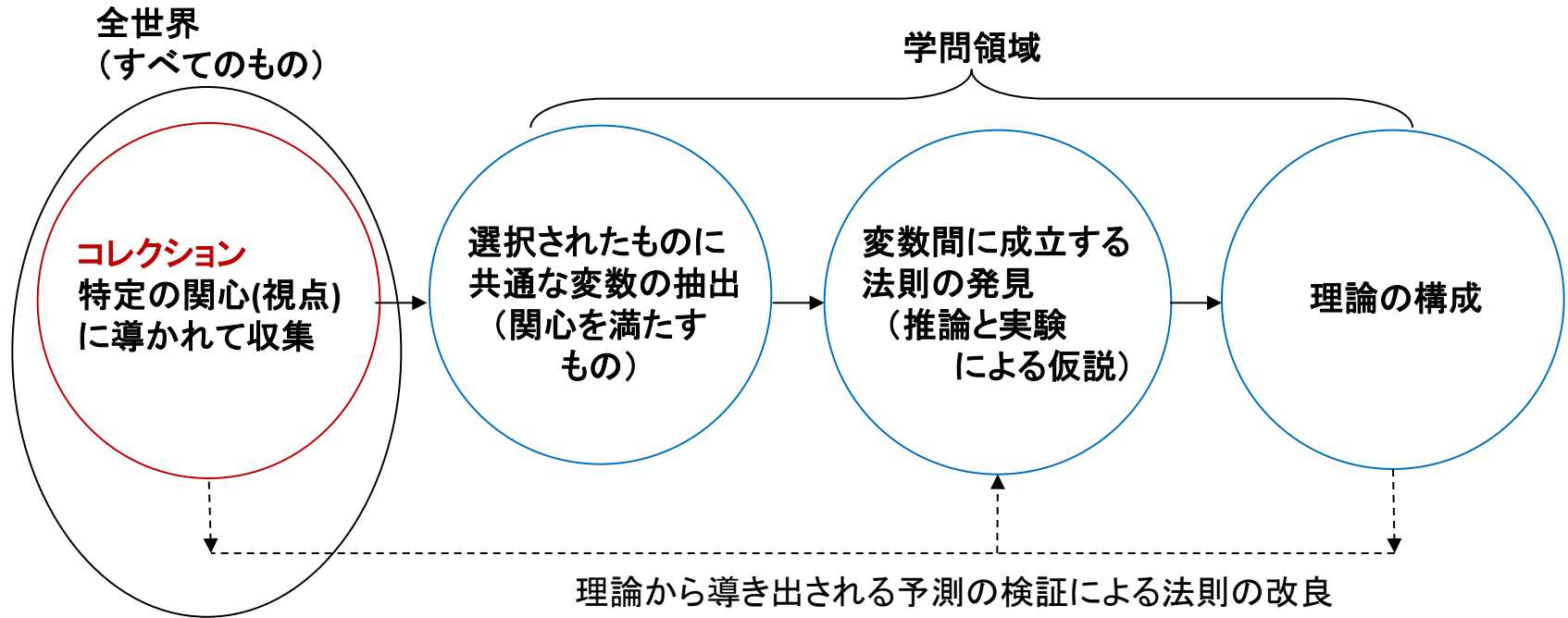


独立な領域知識に依拠して、相互に関係のない人工物を多数産出して環境を劣化させた。

領域の細分化による不調和・矛盾の解決

問題	解決のために必要な研究・方策
領域細分化	領域型知識生成過程の解明
領域知識の複雑・特殊化	領域知識の共通性発見研究
領域間関係知識の欠落	領域知識間関係研究
要素領域とシステム領域が無関係	要素とシステムの関係性研究
構成の非合理性	構成研究
専門家の役割不明	専門家の役割明確化・協力のための仕組み
持続性科学の否定	科学の発展が途上であることの認識

科学領域の生成過程



学問領域の成立は、**コレクション**(分離された知識からの)を契機とする。収集によって得られた“元”の集まりとしてのコレクションを観察することにより、すべての元に共通な基本的変数*が選出され、それらの間に成立する法則が仮説として提出される。仮説は理論体系を生みだすが、理論の示す諸結果(起こりうる事象についての予測)とコレクションの事実との整合性の検査により、仮説の正当性が検証される。

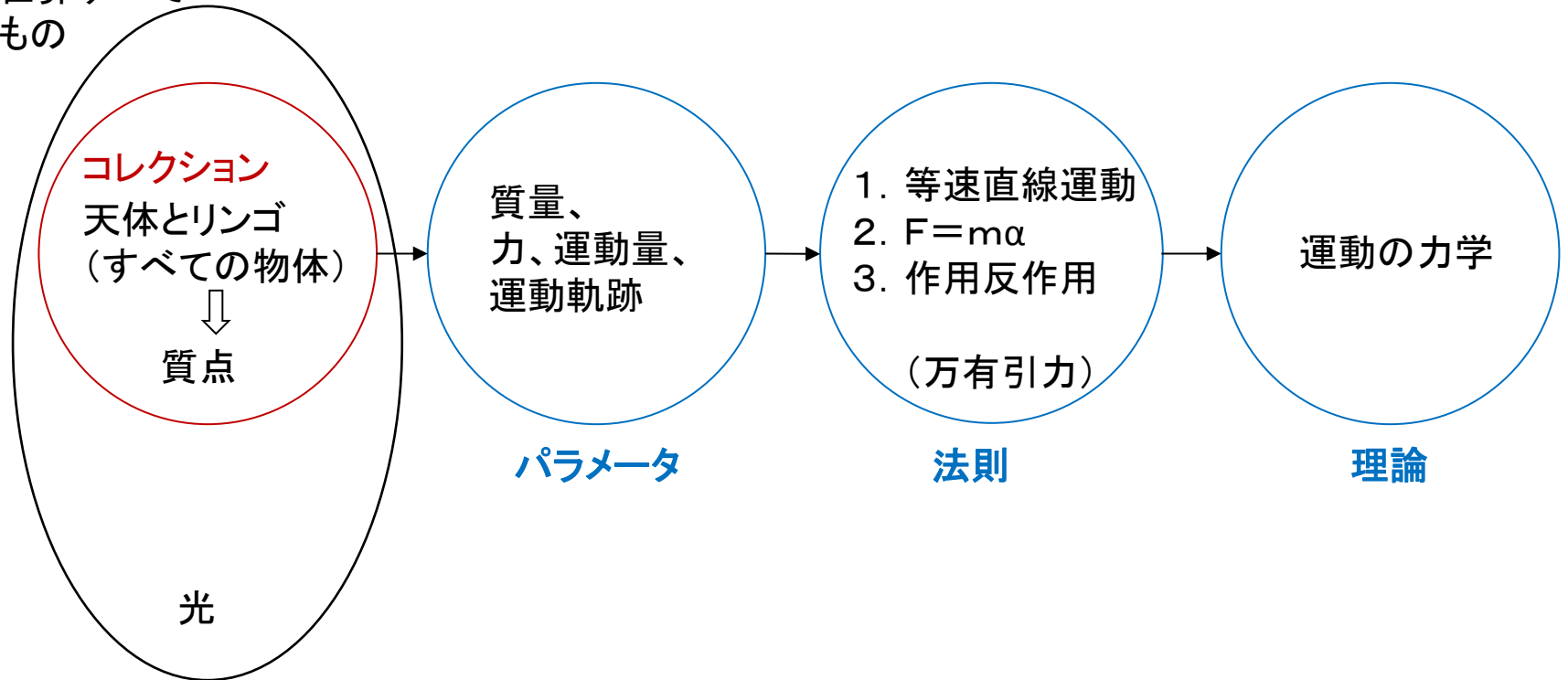
新しい領域を生みだすコレクションを駆動する「特定の関心(視点)」とは、既存の科学領域で説明できるものではない。説明できたとすれば、そのコレクションは何ら新しい領域を生みださず、単に(その)領域に属するものの集合にすぎない。説明できない時、その関心がパラメータに分解され、それが新しい領域を作る可能性を持つのである。この段階では、私たちはこの特定の関心を「直観」と呼ぶしかない。したがって**収集は直観的**に行われるとする。(*元の属性とそれがおかれる場を表す変数) 14

科学領域の構成“基本領域”

現実的意味(効用)を超え、事実知識を領域として体系化する自然科学の誕生

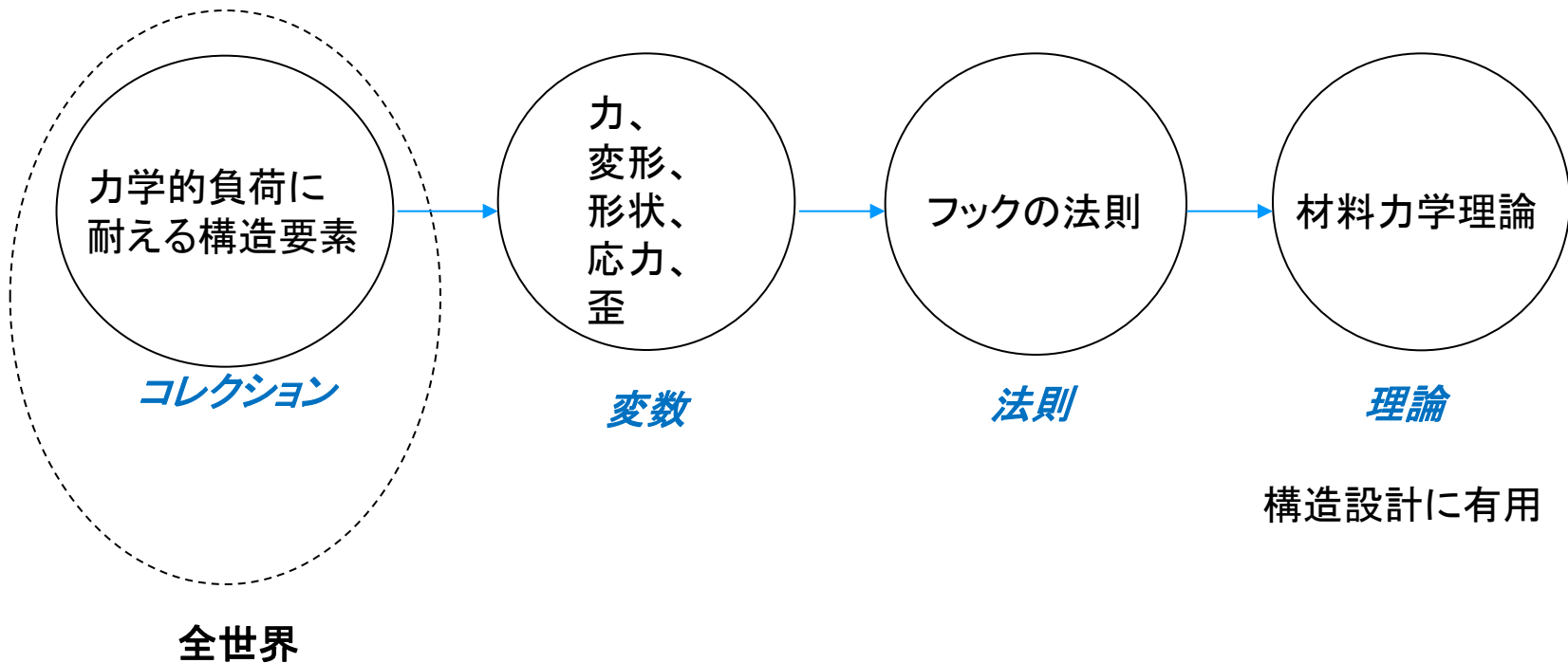
ニュートン力学の場合：事実知識の体系

全世界すべてのもの



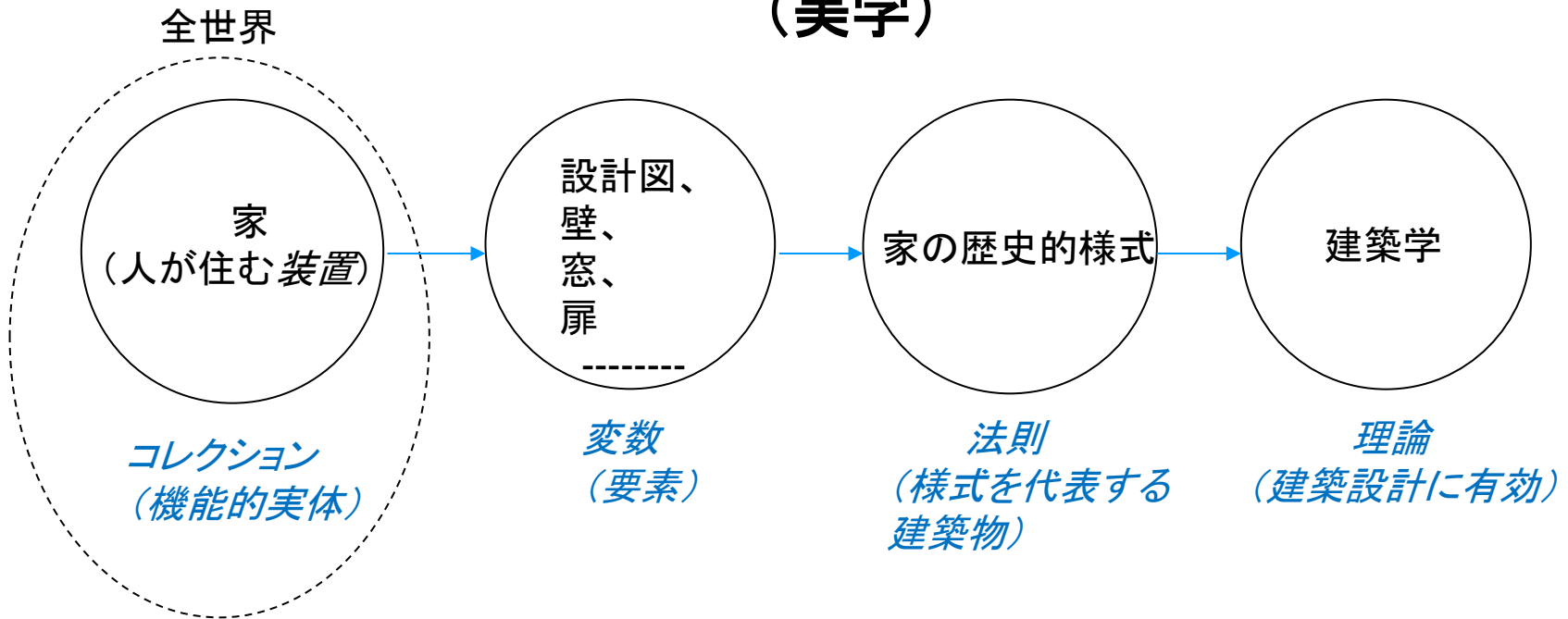
天体とリンゴは
日常的には関係がない

材料力学 (工学)



工学も、科学の領域と同じようにコレクションによって領域の基本的な形を持つものがある。これは工学が対象とする人工物について、その機能の基礎(機能発現のもととなる要素)を、科学の場合とおなじ考え方で、整合的領域を作れるようにコレクションとして選んだ結果得られるものである。(要素工学)

建築学 (美学)



建築という現実の人工物でも、視点をこのように限定(美学)することで領域の基本型を持つ。しかし、建築物を実際に作ろうとすれば、構造強度、耐震性、寿命などの複数の視点*を持つことが必要で、変数間関係の整合性が失われてゆく。これは工業製品に対応する多くの工学分野(自動車工学、船舶工学、原子力工学、工作機械工学など)に共通の性質である。その結果建築の場合は、すべての変数を含むことが要請される法則に相当する基本関係を“様式”という分解不可能な総合的記述のよって言うしかない。法則は、このカテゴリーでは様々な形式がある。

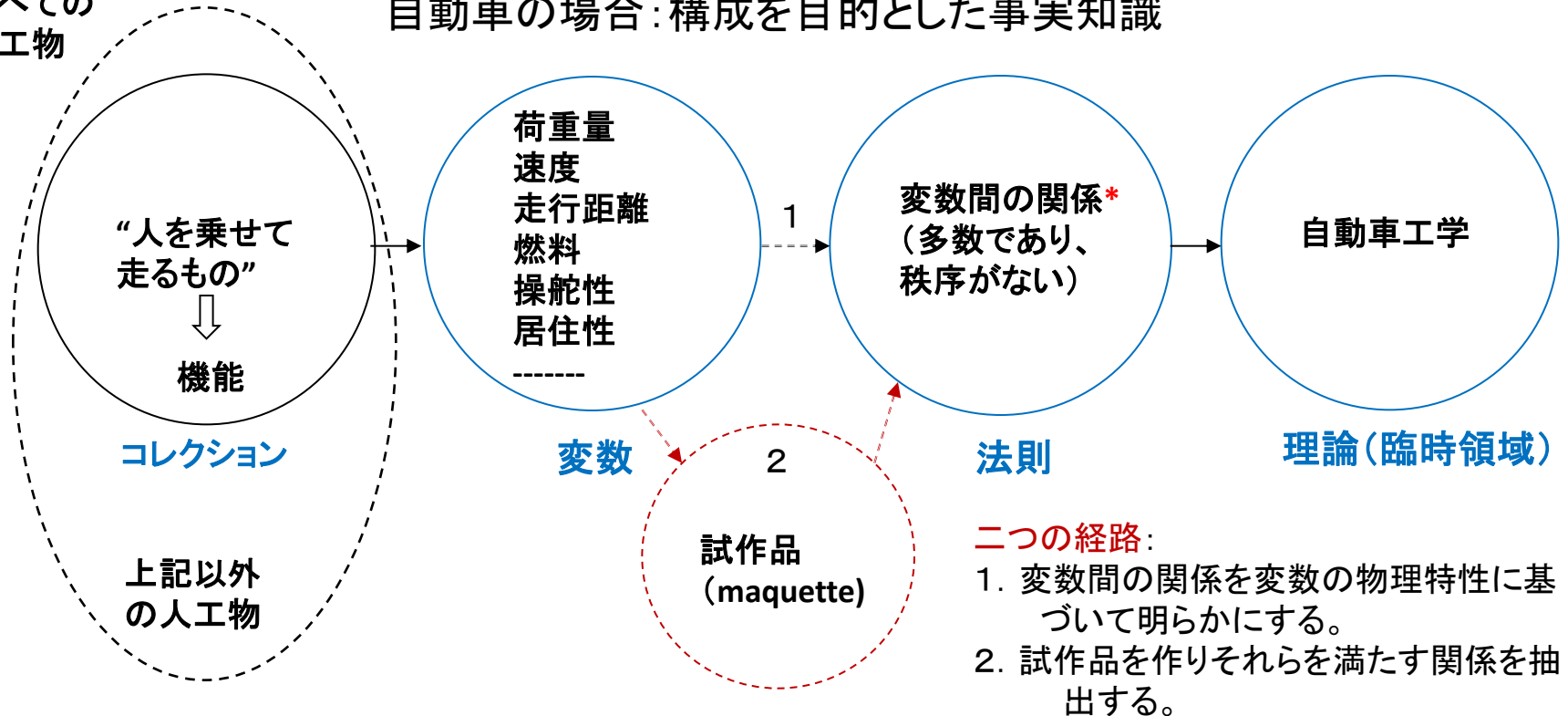
*要素工学が対応する。

人工物の科学領域“臨時領域”

臨時領域＝存在しない人工物を創り出すための領域

すべての人工物

自動車の場合：構成を目的とした事実知識



*自然(存在するもの)対象を理解するコレクションでは、基本変数が少数で、変数間の関係に秩序のあるもの(基本法則)として表現することができるのが“良い”コレクションである(科学の背後には、「世界は少数の基本法則によって成り立つ」という思想がある)。実際そのようにして、体系的な領域ができたのであった(言い換えれば、世界を科学的に理解するために、よい体系を生むことを目標としてコレクションを収集したと言えるであろう)。しかし人工物の領域を作る原理は人にとって有益な“機能”であって、秩序のある体系という原則は守れない。

学問領域の多様性

【絶えず増殖し、体系的でない】

対象(例)		領域(例)	
自然	(物質)原子、分子、結晶、岩石、熱、流体 (生体)植物、動物、細胞、器官、人体、生理 (情報)物理情報、生体情報、データ (精神)知能、論理、言語、原始サービス (社会)社会、民族、集落、家族、婚姻、法、	領域 (基本領域)	物理学、化学、力学、熱力学、天文学、地球科学 植・動物学、医学、解剖学、生理学、分子生物学 数学、情報学、情報科学、言語学、記号学 哲学、心理学、論理学、文学、美学、歴史学 社会学、文化人類学、法哲学、民俗学
人工物	成熟した人工物 (物質)機械、材料、素子、構造 (生体)健康・病気、農作物、料理、家畜、毒 (情報)情報、文字、書籍、 (精神)教育、文学・芸術、サービス (社会)国家、経済、金融、通商、法律	臨時領域	成熟*領域 機械工学、材料学、電気工学、構造力学、建築学 内科学、外科学、解剖学、薬学、病理学、農学 情報工学、図書館学 教育学、演劇学、批評学、サービス工学 経済学、商学、法律学、国際関係論
	定着した人工物 (物質)工業製品(自動車、空調機、通信機) (生体)遺伝子改変生物、 (情報)通信網、メディア、 (精神)今様演劇・文学・芸術、 (社会)企業、電子政府、環境、		定着*領域 自動車工学、熱機関学、生産学、輸送学 再生医学、核医学、生体リスク 通信工学、メディア学、 前衛美学、 経営学、金融工学、環境学、防災学、安全学
	既存の領域に属さない人工物 (物質) (生体) (精神) (社会)		不完全*領域 (例)環境を考慮した製品、システム、制度などを設計するときに必要な知識集合

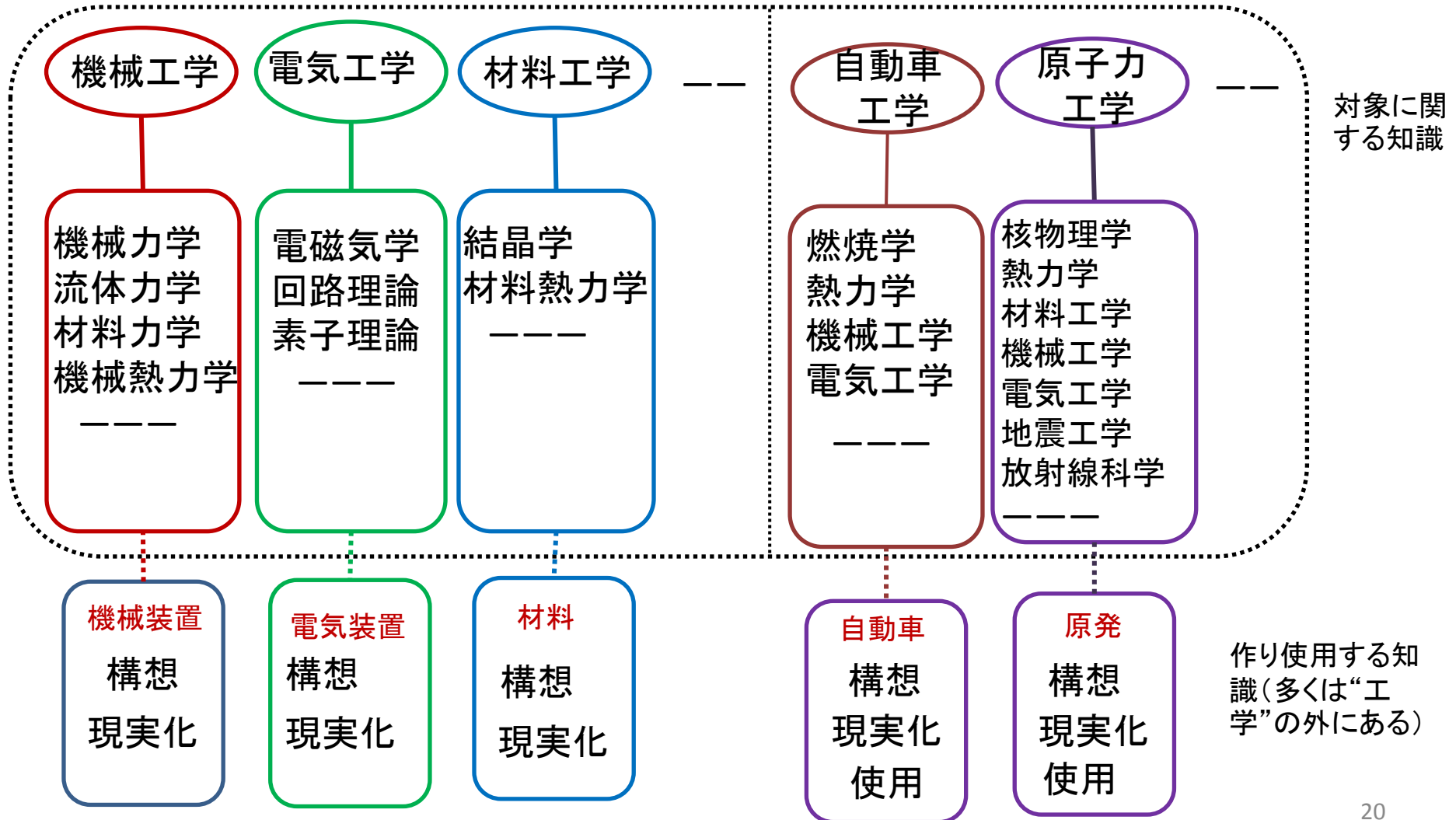
*丁寧に言えばそれぞれ、“成熟した臨時領域”、“定着した臨時領域”、“不完全な臨時領域”である 19

歴史的な工学の構造

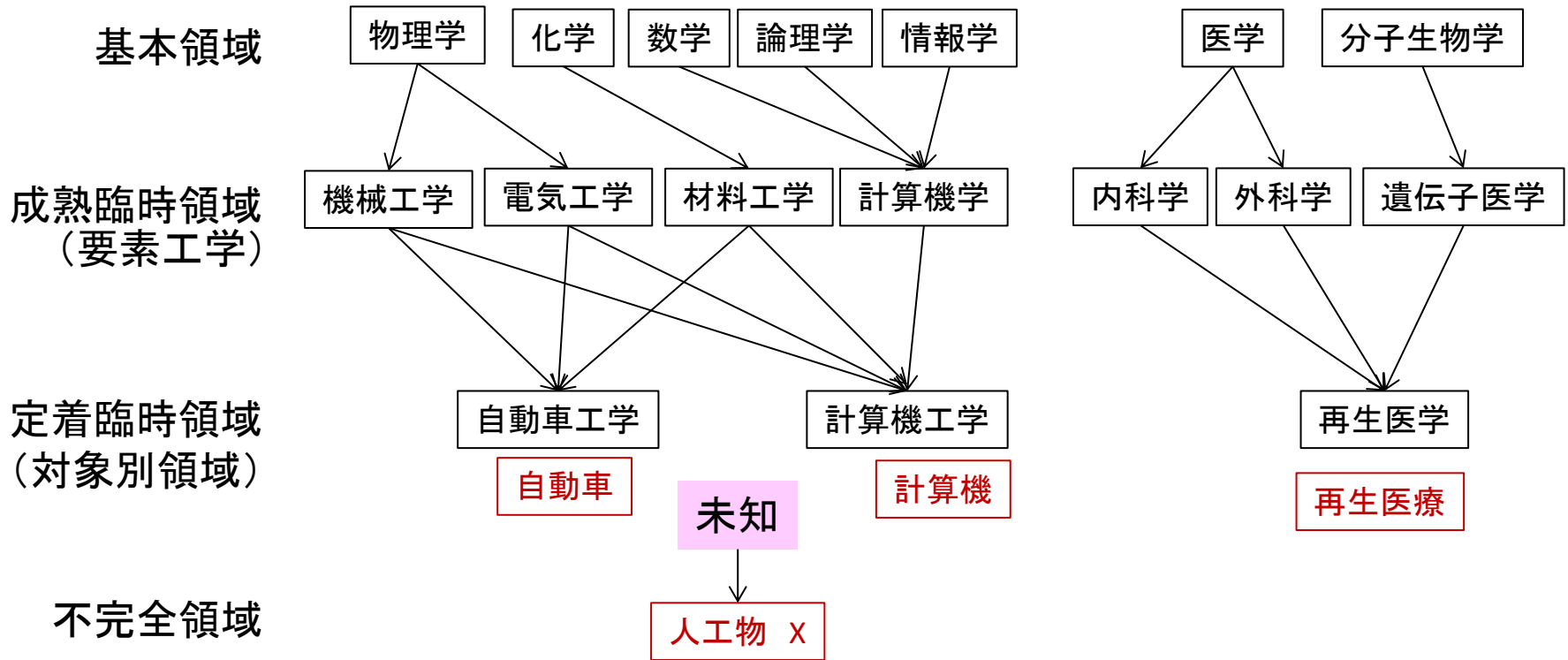
二つのカテゴリーに分かれた

要素工学

(製品)対象別工学



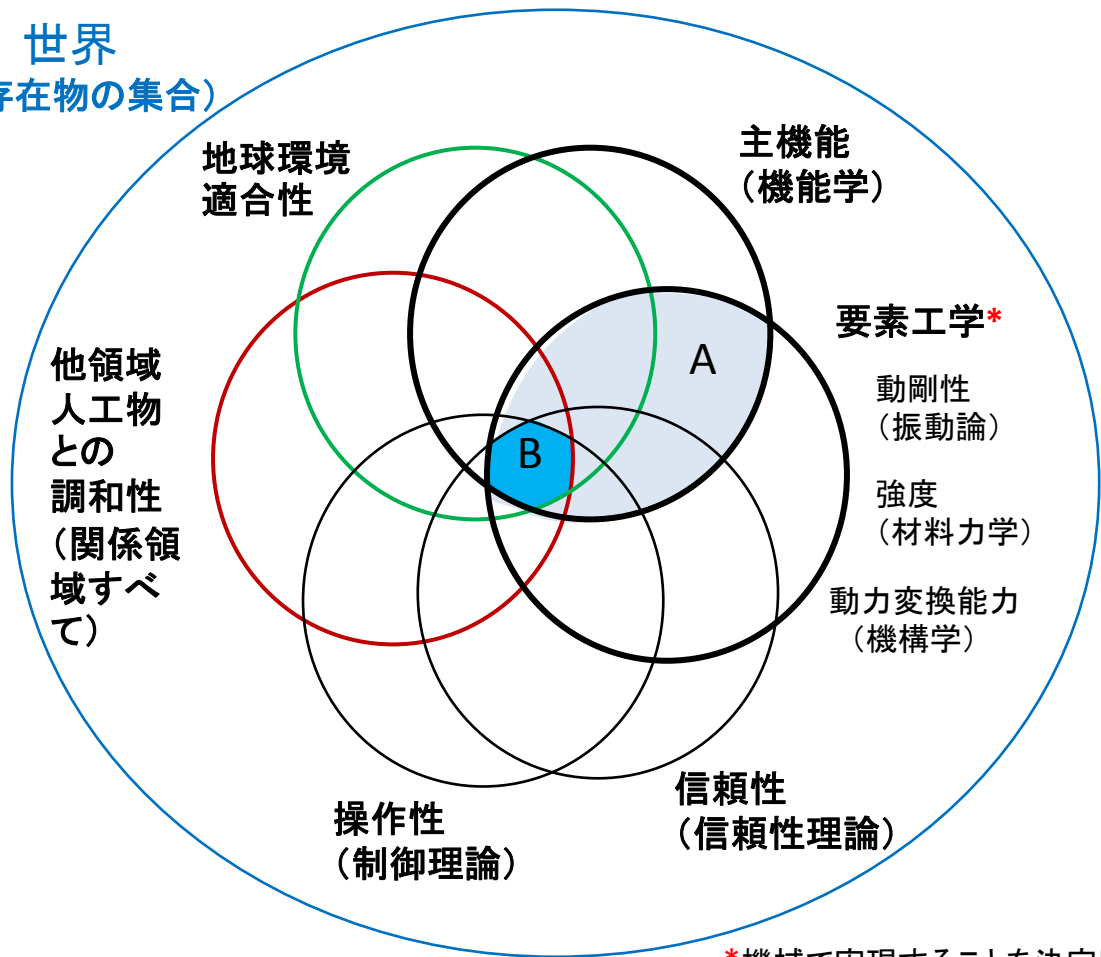
領域間の複雑な関係



新しい人工物が考案され社会に受け入れられると、それは人工物の一つのカテゴリーを形成して、それに属するものの制作に必要な知識体系が定まり臨時領域を成立させ、制作を容易にする。しかしその領域は、その人工物の他との調和、あるいは地球持続性に対する評価のための知識などを歴史的に含んでいなかった。調和や持続性は、その人工物の機能(設計)、製造、使用、保守、廃棄など、ライフサイクルのあらゆるフェーズにおける検討を必要とし、それは従来の臨時領域には含むことができない。含めることは、制作容易性を持つべき本来の臨時領域の特性を捨てること、言い換えれば領域を解体することにほかならず、ここには困難な本質的矛盾が存在する。

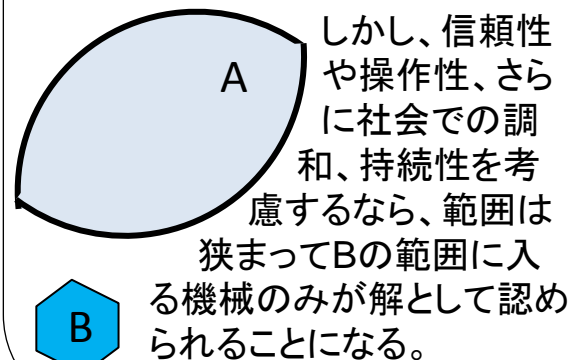
要求機能の増加による知識整合性の低下

世界
(存在物の集合)



人工物を設計するとき、要求された多くの性質を同時に満たさなければならない。それぞれの要求を満たす人工物を集合で示せば、要求された全性質を同時に満たす解は、積集合となる。

目的とする機能(主機能)を、例えば“機械的”に実現しようとするときは、主機能と機械に関する要素工学を満たすものとの積集合Aに含まれることが要求される。



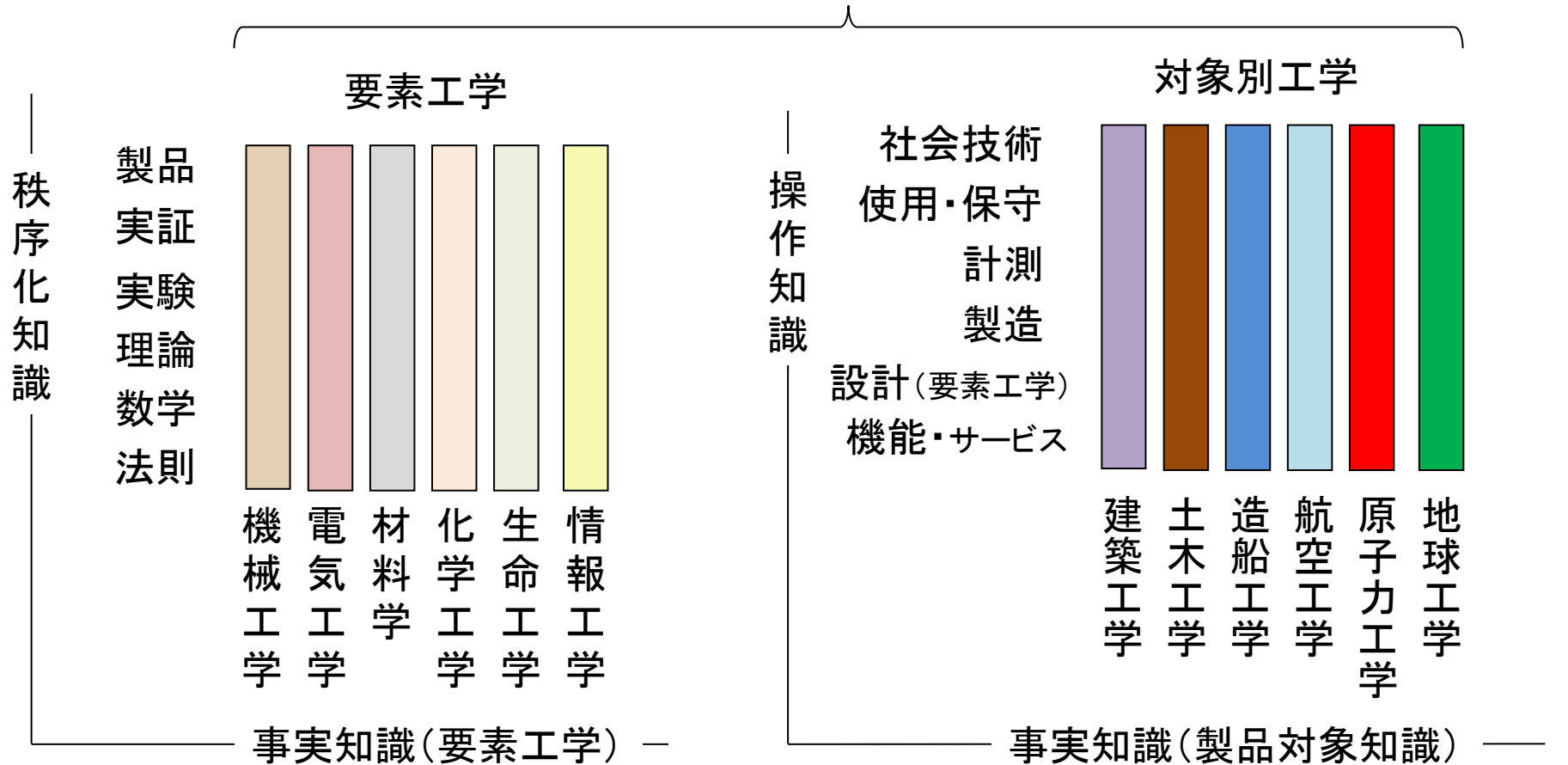
*機械で実現することを決定した場合の要素工学

範囲Aにおける人工物のうち、要素工学で選出される集合の要素(人工物)は法則科学に従っている。それらの間には設計手順が定められており、また定量的で最適設計ができる。しかし、範囲Bでは、多くの抽象的性質が付加された結果、集合要素の分離が詳細になって含まれる人工物は記述科学としてしか扱えず、設計手順は明確でなくなり、また定量的最適化もできなくなる。

技術知識の構造

伝統的工学カリキュラム

工学研究科・学部/専攻・学科

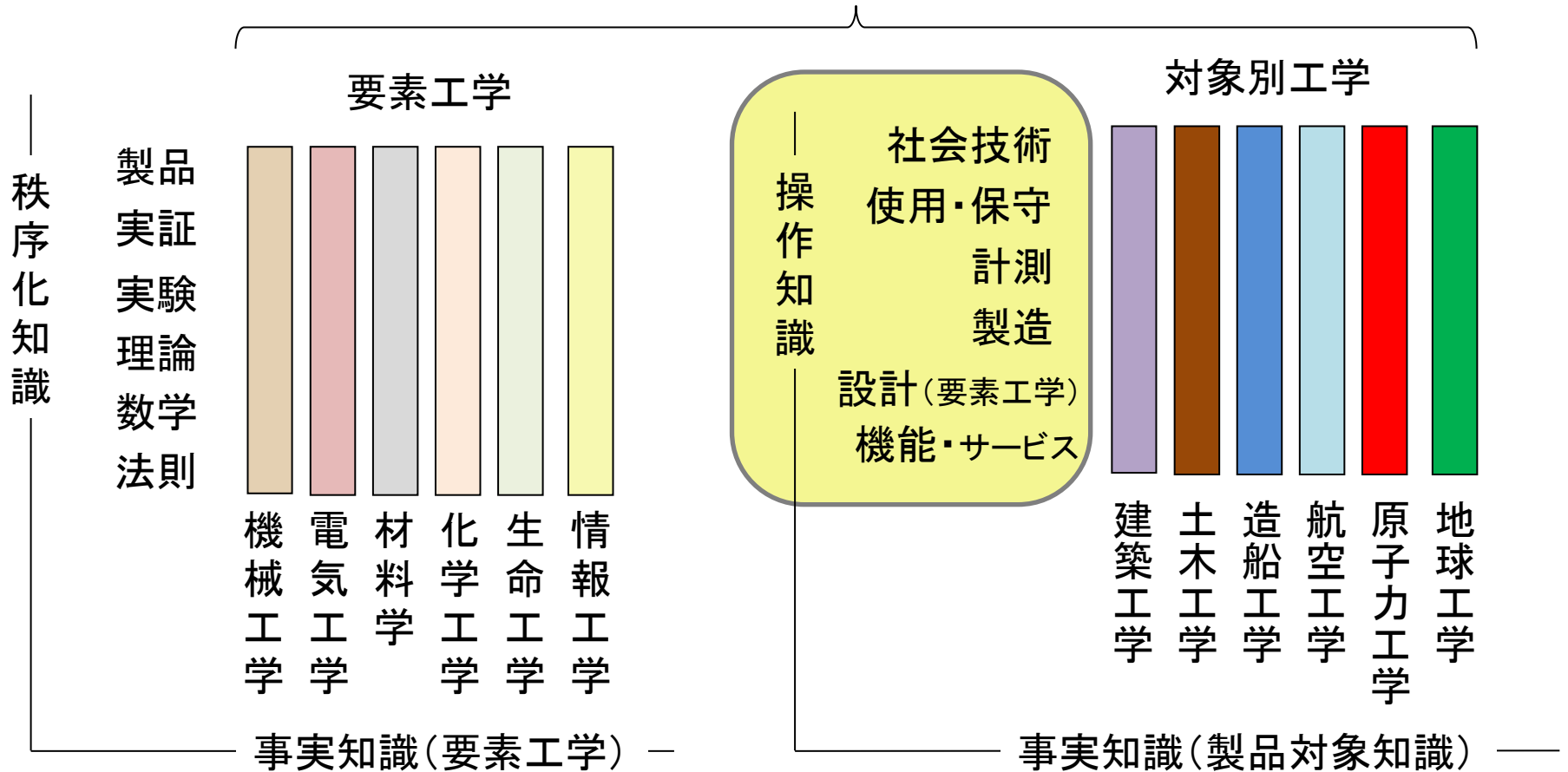


秩序化知識は領域の構文化 (syntax) であり、操作知識は領域の意味化 (semantics) である。

技術知識の構造変化

構文(伝統的工学カリキュラム)から意味(構成型工学カリキュラム)へ

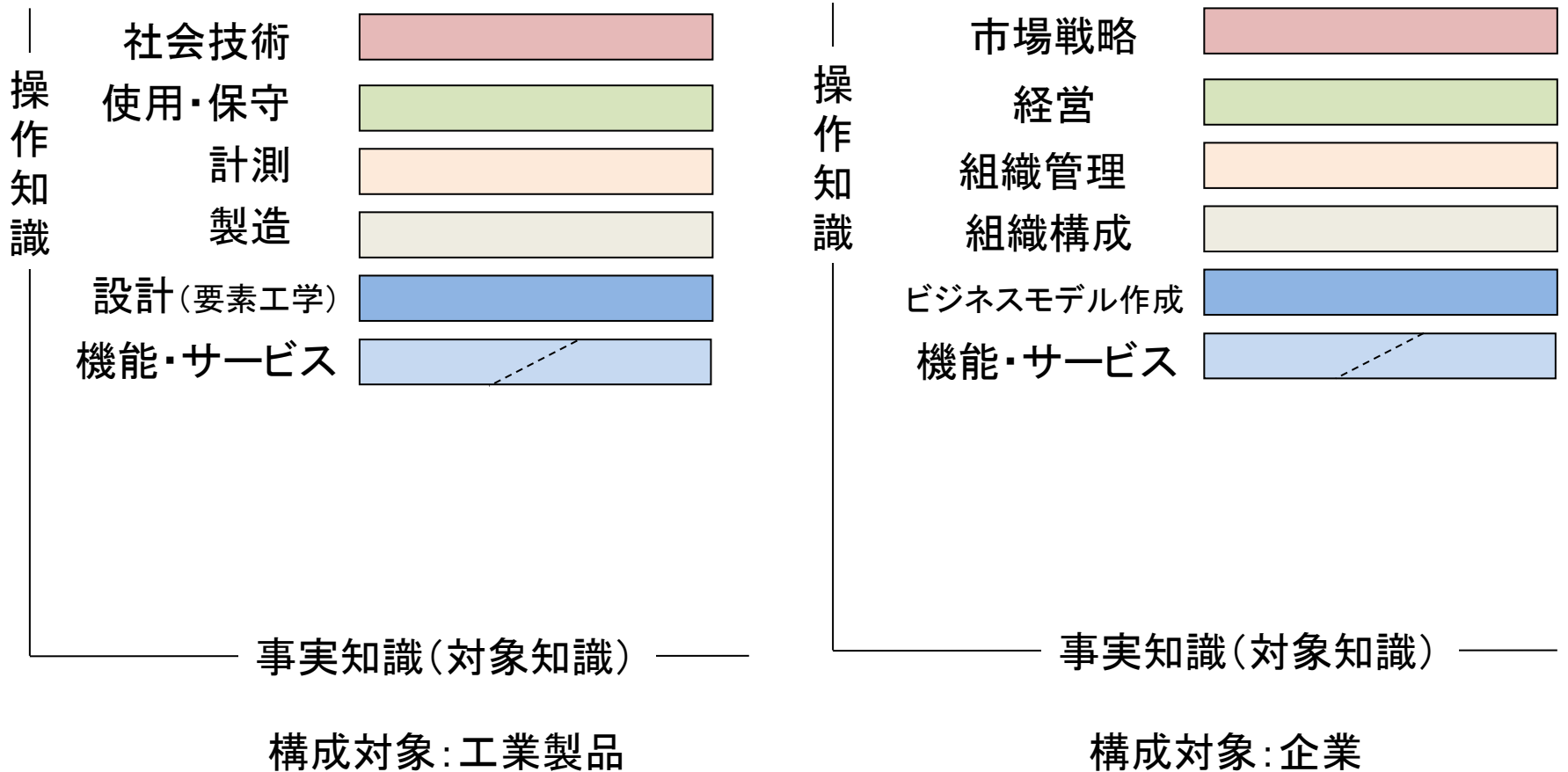
工学研究科・学部/専攻・学科



秩序化知識は領域の構文化(syntax)であり、操作知識は領域の意味化(semantics)である。

操作知識を分類軸とするカリキュラム

構成型工学カリキュラム



操作知識を、対象独立な抽象的なものとして記述することが必要である

<p>1. 機能</p> <p>1. 1 機能学(物理機能、生命機能、精神機能)</p> <p>1. 2 機能の要素表現</p> <p>1. 3 機能と属性</p> <p>1. 4 要素とシステム</p> <p>1. 5 価値の機能学</p> <p>1. 6 持続性科学への工学の役割(機能的方法)</p> <p>1. 6 社会的期待</p>	<p>4. 製造</p> <p>4. 1 製造学(一般)</p> <p>4. 2 領域製造技術(情報、物理(加工)など)</p> <p>4. 3 領域製造システム(装置、機械、量産など)</p> <p>4. 4 複合領域製造技術</p> <p>4. 5 統合製造システム(ハード、ソフト)</p> <p>4. 6 標準化戦略</p>	<p>7. 社会技術・起業</p> <p>7. 1 使用学(一般)</p> <p>7. 2 STIイノベーションエコシステム</p> <p>7. 3 起業・社会実装・普及・受容</p> <p>7. 4 法・規則・組織、ファンディング</p> <p>7. 5 副作用(予期せぬ機能:物理・社会・精神)</p> <p>7. 6 イノベーションの社会的効果(ベネフィット・リスク)</p> <p>7. 7 ライフサイクル産業</p>
<p>2. サービス</p> <p>2. 1 サービス学(一般)</p> <p>2. 2 原始サービス学</p> <p>2. 3 サービス増幅論(計量、装置)</p> <p>2. 4 領域サービス論(国家・公共・企業・私的)</p> <p>2. 5 情報サービス論</p> <p>2. 6 サービス経済学</p> <p>2. 7 知財・データベース</p>	<p>5. 性能(キャラクターリゼーション・評価)</p> <p>5. 1 計測学(一般)</p> <p>5. 2 全体観察</p> <p>5. 3 領域計測学(物質、形状、波動、時間など)</p> <p>5. 4 機能評価・リスク評価</p> <p>5. 5 安全性、信頼性・寿命・耐環境</p> <p>5. 6 環境負荷性・循環性・廃棄法</p> <p>5. 7 計測機器、計測経済、計測コスト</p>	<p>8. 領域工学概論(分析型工学カリキュラム)</p> <p>8. 1 機械工学(機構、流体、熱など)</p> <p>8. 2 電気工学(回路、空間など)</p> <p>8. 3 材料工学(金属、非金属、ナノ構造など)</p> <p>8. 4 情報工学</p> <p>8. 5 生物工学</p> <p>8. 6 ソフトウェア工学</p>
<p>3. 設計・構成</p> <p>3. 1 設計学(一般)</p> <p>3. 2 構成戦略論</p> <p>3. 3 システム科学(構成・最適化・探索など)</p> <p>3. 4 計算科学</p> <p>3. 5 領域設計論(機械、電気、建築、など)</p> <p>3. 6 分野融合論</p>	<p>6. 保全</p> <p>6. 1 保全/製品ライフサイクル学(一般)</p> <p>6. 2 保全技術</p> <p>6. 3 保全システム(装置、機械、保全環境など)</p> <p>6. 4 領域保全学(要素、機械、インフラなど)</p> <p>6. 5 地球環境保全</p>	<p>構成型工学カリキュラム version 7 Jan 2013</p>

構成学(一般)の試み

<p>(1) 一般設計学 【F:機能、P:属性、S:実体】 $F_0 \supseteq F(P_0)$, $P_0 \rightarrow S_0$, $S_0 = \text{Structure}(e, r, i)$: Structure(element design + relations + information)</p>	<p>機能発現実体を作り出す (機能を記述し、それを発現する物理・情報システムを決定する)</p>
<p>(2) 一般製造学 $S_0 \rightarrow S$, $S \rightarrow \text{Manufacture}(e, r, i)$: Manufacture(element production + assembly + test run)</p>	<p>設計によって得られた部品形状・性質を物質上 に実現し、それらを組み立て、機能発現を確認 する</p>
<p>(3) 一般サービス学 【F:顕在機能、L:潜在機能】 $L_0 = L(t) + F(t)$ $F(t) = -k \cdot d(L_t)/dt$</p>	<p>潜在機能が決められていて、その発現の時 間的速度がサービス。 この時、潜在機能を機能の基準値とする。</p>
<p>(4) 一般保全学 【F(T):機能の時間的変化、 A:システム、m(u):保全効果】 $F(t) \geq F_0$ $F(t) = \int_A \int_{-\infty}^t e^{-\lambda(t-u)} m(u) du dA$ $\min[\int_A \int_{-\infty}^t m(u) du dA], \max[\int_A \int_{-\infty}^t f(u) du dA]$</p>	<p>保全では、基準値は使用前に保有している機 能が基準値である</p>

サービス、保全では、機能は比率(無次元)で表せるが、設計ではできない。設計では機能の基本量が与えられていない。したがって設計だけは定量化することができない(設計とは機能の基本量(軸)を立てることである。この軸の独立のものを探るのが機能学である。

- 引用文献 (1) 一般設計学序説、精密機械、45巻8号、p.906-912(1979)
 (2) 一般製造学: 多くの提案がある
 (3) サービス工学序説、Synthesiology, Vol1No.2, p.111-122(2008)
 (4) 保全の基礎概念、保全ハンドブック、第一章(1980)

製造学の構成

対象	例	要素	結合子	——学*
物理プロセス	加工・測定 (切削、塑性加工、リソグラフィ、 ナノ科学技術、測定など)	人工現象	(物理的合成)	
プロセスのシステム	機械 (工作機械、精密測定器、 数値制御など)	物理現象	物理的結合	
機械のシステム	群管理、工場	機械・人	物理的結合、 情報的結合	
工場のシステム	製造企業	工場	情報的結合	
企業のシステム	産業構造、 (産業社会、 サプライチェーンなど)	企業	情報的結合	

*——学とは、要素の結合に関する理論である。