

2018.10.17: CEATEC RRI工業会連携セミナー

「第4次産業革命の先～スマートに多彩なシステムがつながるSoS社会の実現～」

# 第4次産業革命に向けた システムイノベーションの展開に向けて SoS時代のシステムエンジニアリングと構造分析

特定非営利活動法人 横断型基幹科学技術研究団体連合(横幹連合)

東京大学 大学院工学系研究科  
システム創成学専攻

教授 青山 和浩

[aoyama@sys.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:aoyama@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

<http://www.m.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>

## システムの時代

- **われわれの身の回りにある工業製品や機器、我々が日々の生活で利用するサービス**
  - **すべてシステムであり、システムとして機能が発揮されている**
  - **付加価値が単体の「もの」から「もの同士の繋がり」や「人ともものとの繋がり」へシフト**
- **Connected Industry の実現：**
  - **システム化が基盤技術として認識されなければならない**

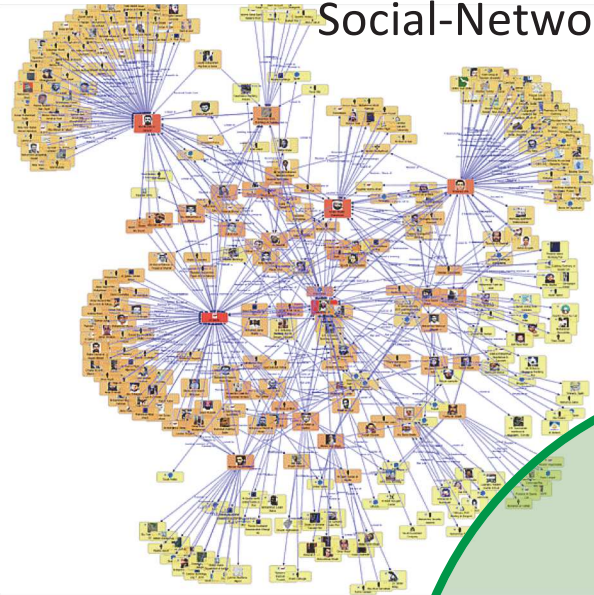
# System of Systems の時代へ

- **部品から製品へ**
  - 単一機能を有する部品（人工物）によって機能が得られた。例えば，鉛筆。
  - 複雑な機能を要求するために，機能の分化と総合化（組合せ）によって製品（人工物）が産まれた。例えば，万年筆
- **製品からSystemへ**
  - 要求する機能の複雑化，高度化に伴い，製品はより複雑なシステムへと変貌
  - 例えば，ワープロ専用機，PCとソフト。
- **System から System of Systems へ**
  - 社会システムにおける製品システムの位置づけ，複雑化，高度化する顧客要求
  - ライフサイクルまで考慮した製品システムの計画と設計
  - 製品（人工物）が溢れた世界でのシステムのネットワーク（人工物ネットワーク）を考慮した System of Systems を計画，設計する必要性
  - 例えば，ブログなど
- **System of Systems の計画・設計に取り組む時代**
  - 対象とするシステム境界の拡大
  - 複雑，多様な階層の認識
  - 多段階な意志決定の必要性

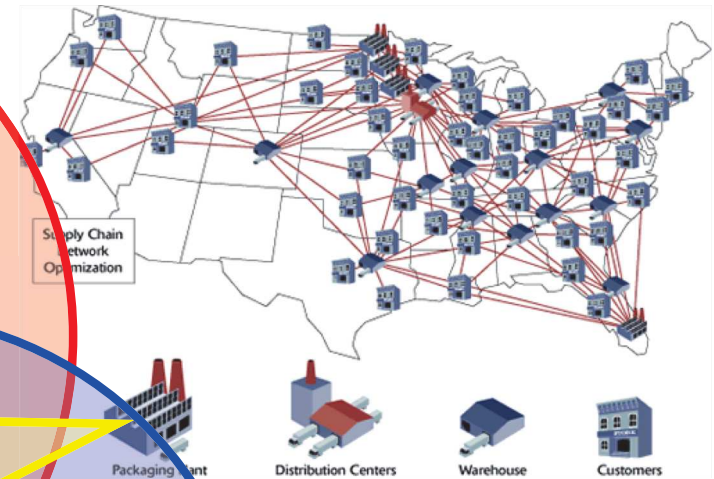
**システム・デザイン/システム思考の重要性の認識と  
その対応へ向けて**

# SoS: System of Systems

Social-Network



Supply Chain-Network



社会経済システム

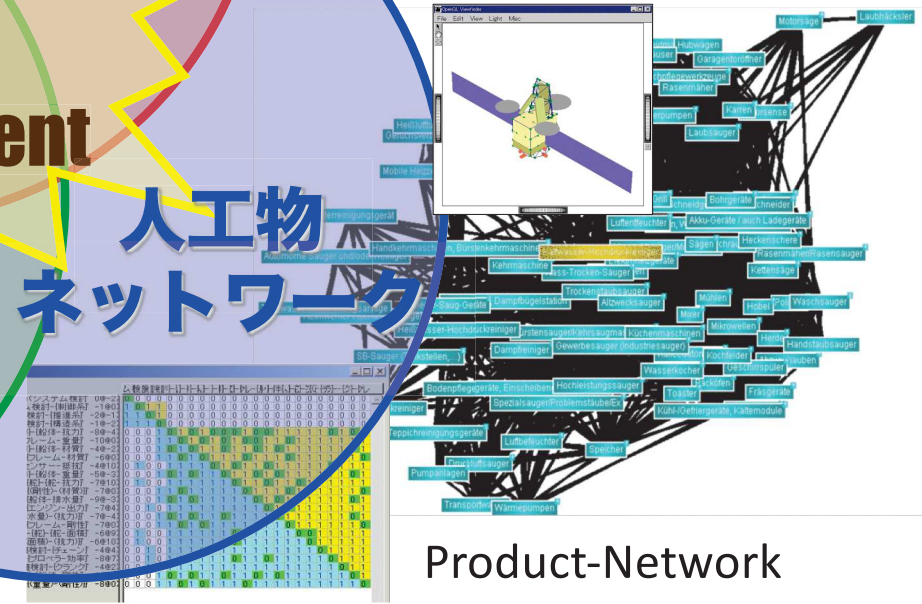
Design & Management

グローバル循環システム

人工物ネットワーク



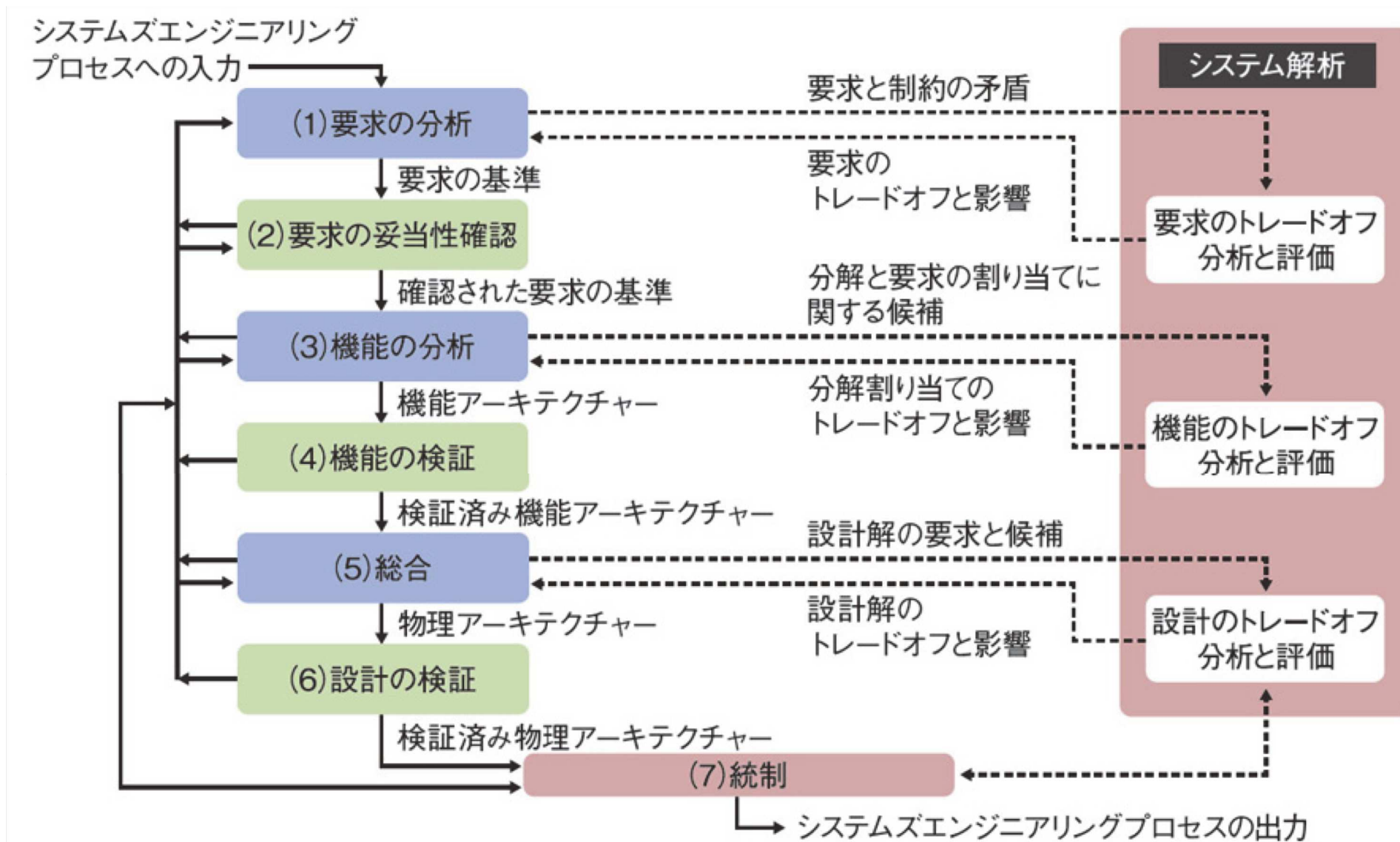
EU-Energy-Network



Product-Network



## システムズエンジニアリングプロセス(IEEE 1220-2005)



出典: <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/MAG/20150114/398782/?ST=SCR>

## アーキテクチャ

### ・ アーキテクチャの定義

- 目的を最大化するような**機能と特性の配置** (Ring,2001)
- 構成要素の設計や進化を左右するような、構成要素の**構造**、構成要素間の**関係**、そして**原理**や**指針** (IEEE STD 610.12,1990)
- システムと**外界との関係**及びシステムを構成する**要素とその構成要素間の関係** (Shirasaka)

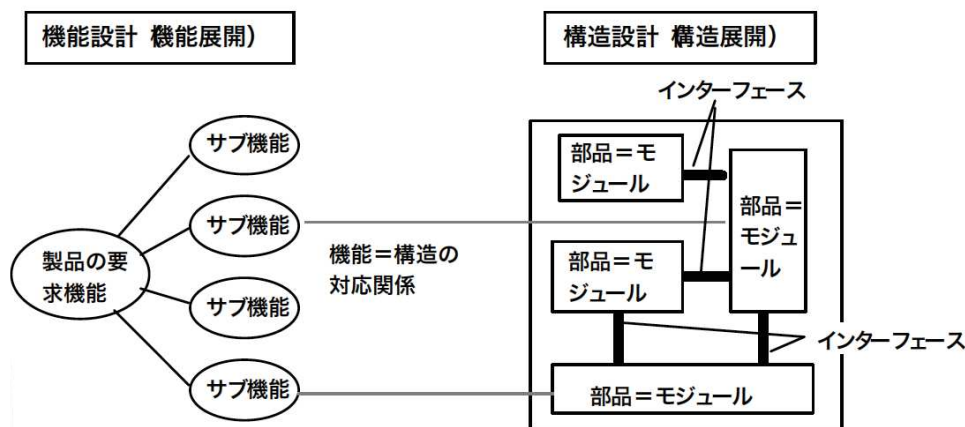
### ・ 製品アーキテクチャ

- システムの切り分け方のパターン
- 製品の全体システムをどのようなサブシステムに切り分け、サブシステム間の**機能的・構造的な相互作用**をいかに調整するかに関する基本構想

### ・ システム製品の特徴

- 複雑なシステム製品は、複数の機能要素とそれを物理的に体現している部品によって構成される。
- 複雑なシステムを設計する際、全体システムをより単純な下位システムへと分割する。
- システムの複雑性を軽減し、また設計・生産作業における分業が容易になる。

図1 基本設計思想としてのアーキテクチャ



by 藤本隆宏

# アーキテクチャとアーキテクチャ設計

## アーキテクチャ

- システムの目的を最大化するような機能と特性の配置
- 構成要素の設計や進化を左右するような、構成要素の構造、構成要素間の関係、そして原理や指針

## アーキテクチャ設計（アーキテクティング）

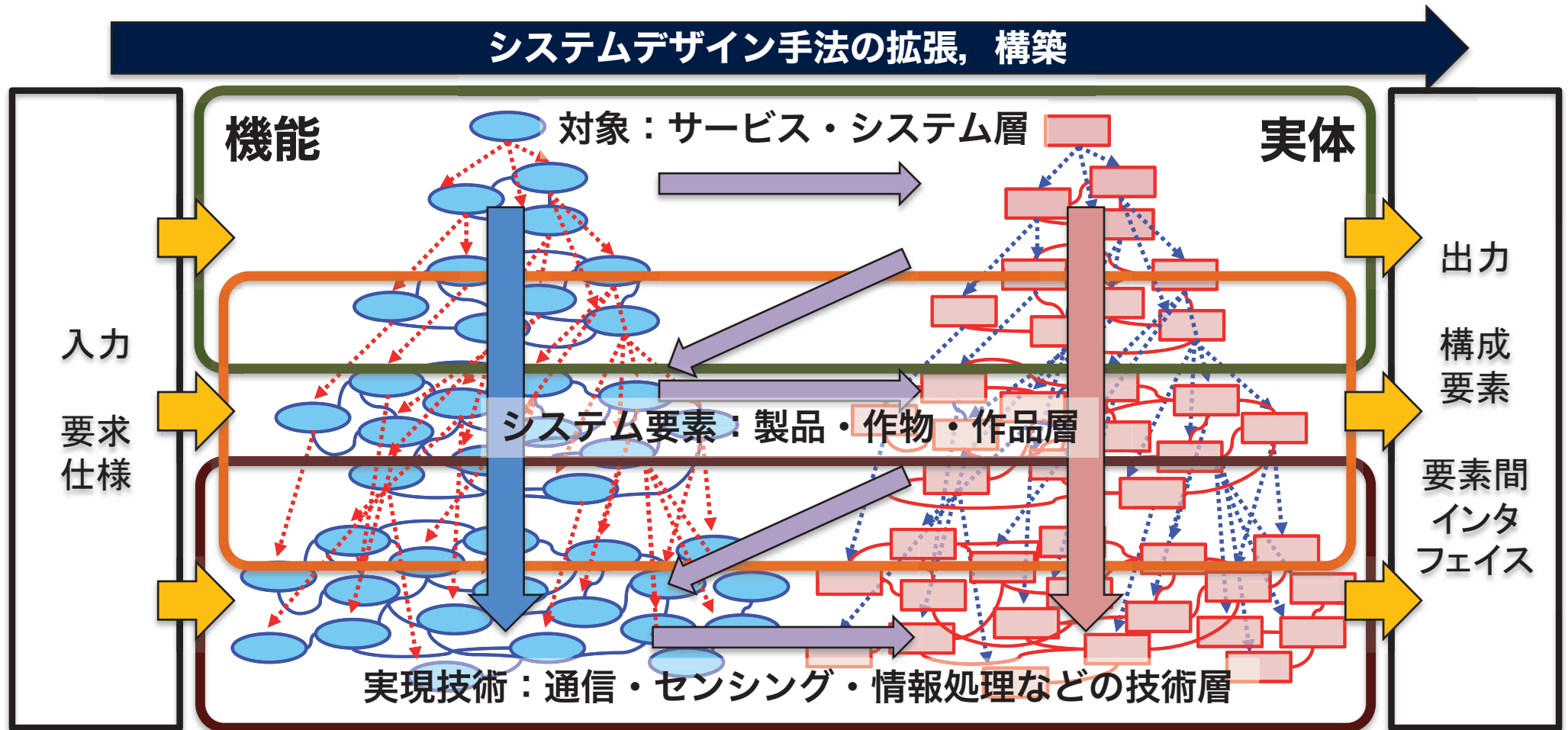
- システムに要求されている機能・性能を、システムを構成する要素に配分して構成要素の仕様を明確にするとともに、構成要素間のインタフェースを明確化すること
- 設計のアウトプット
  - 各サブシステムに対する機能の配分結果
  - サブシステム間のインタフェース

## アーキテクチャ設計プロセス

- 機能設計：システムの要求機能を分割し、その機能を構成する下位機能の集合に置きかえる設計
- 物理設計：分割された下位機能を、システムを構成する要素に割り付ける設計

# 新しいシステムデザイン・プラットフォームの構築

要求を満足するシステムを多階層的に設計する。  
機能のアーキテクチャ/実体のアーキテクチャの構成を設計する方法論の確立





## システムを創成する新たな手法の構築

### 多様かつ広い視点からシステムアーキテクチャを捉え、 システムを創成する新たな方法論の構築と提案

制度・体制層  
(社会の制度や政治・経済体制)

### システム企画フェーズにおける 設計方法論

#### システムアーキテクチャの設計

サービス・システム運用層  
(製品やコンテンツを組み合わせたサービスの運用)

製品・作物・作品層  
(一般利用者が直接購入し利用する対象)

製造技術・生産技術・設計技術層  
(自然法則を利用した新しい技術の確立)

自然法則・自然現象層  
(自然界に内在する原理や法則の発見)

#### What to Make を支援

- システム要求の創成
- ・ ビックデータを活用した要求の抽出支援, 市場の生成支援
  - ・ 要求モデル論の構築と一般化

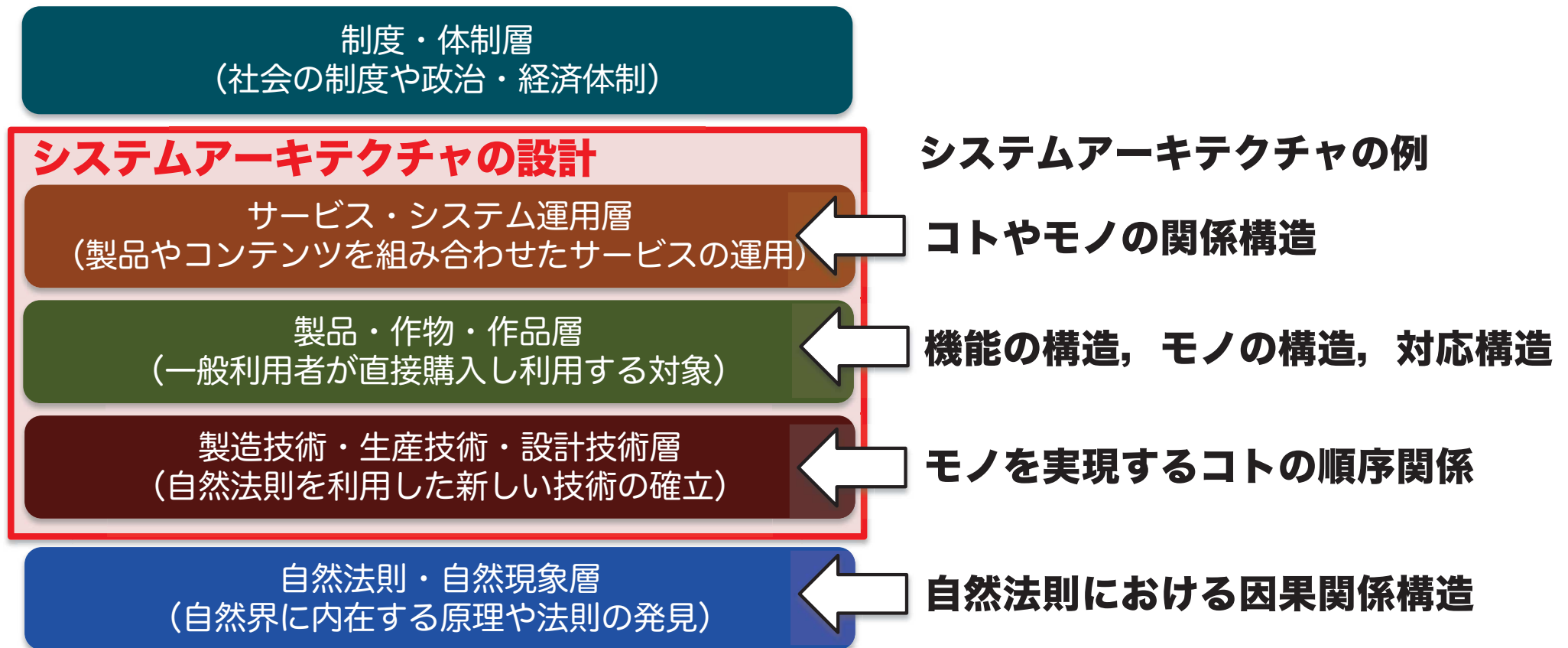
#### How to Make を支援

- システムアーキテクチャ・モデル論の構築と一般化
- ・ 理想的なシステムアーキテクチャの提案支援
  - ・ 設計・製造知識データを活用

社会や産業の5階層モデル 安浦寛人, “日本の情報通信技術(ICT)の研究開発の方向に関する提言”  
SLRC Discussion Paper Series, Vol.5, No.1, Sep. 2009

## システムを創成する新たな手法の構築

多様かつ広い視点からシステムアーキテクチャを捉え、  
**システムを創成する新たな方法論の構築と提案**

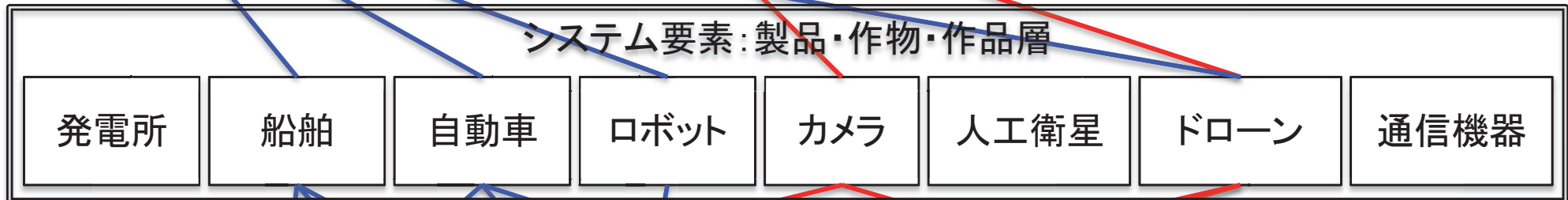


社会や産業の5階層モデル 安浦寛人, “日本の情報通信技術(ICT)の研究開発の方向に関する提言”  
SLRC Discussion Paper Series, Vol.5, No.1, Sep. 2009

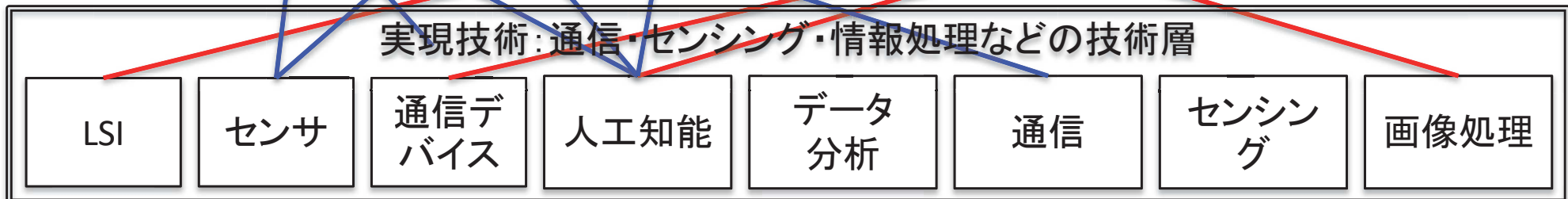
## 階層構造を意識したシステムデザイン



サービス・システムに対するシステム要素のアーキテクチャ設計：システム要素の組合せ設計



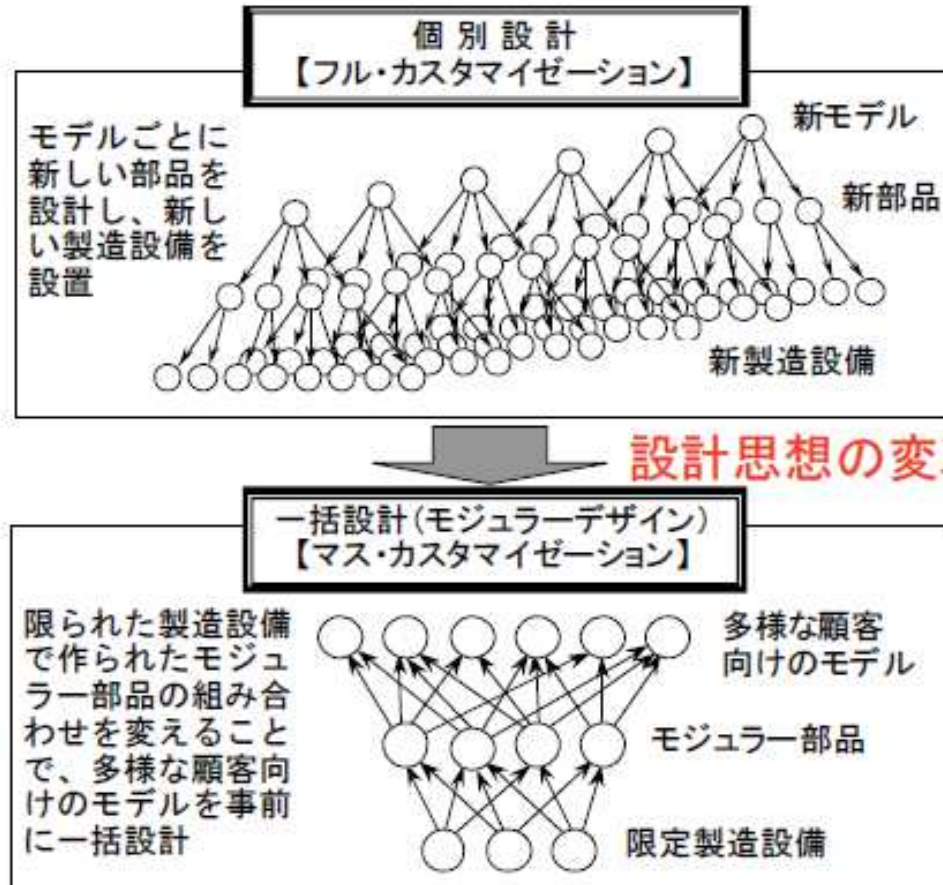
システム要素に対する実現技術のアーキテクチャ設計：技術の組合せ設計



 SDSIのアーキテクチャ設計：下位要素の組合せ設計による上位要素（システム）の実現

# モジュール設計の効用

モジュラーデザインに必要な設計思想の変革



個別受注型製品だから、と個別に設計していると投資過大や負の資産の増加により限られた製品しか設計できない  
⇒限られた顧客しか獲得できない

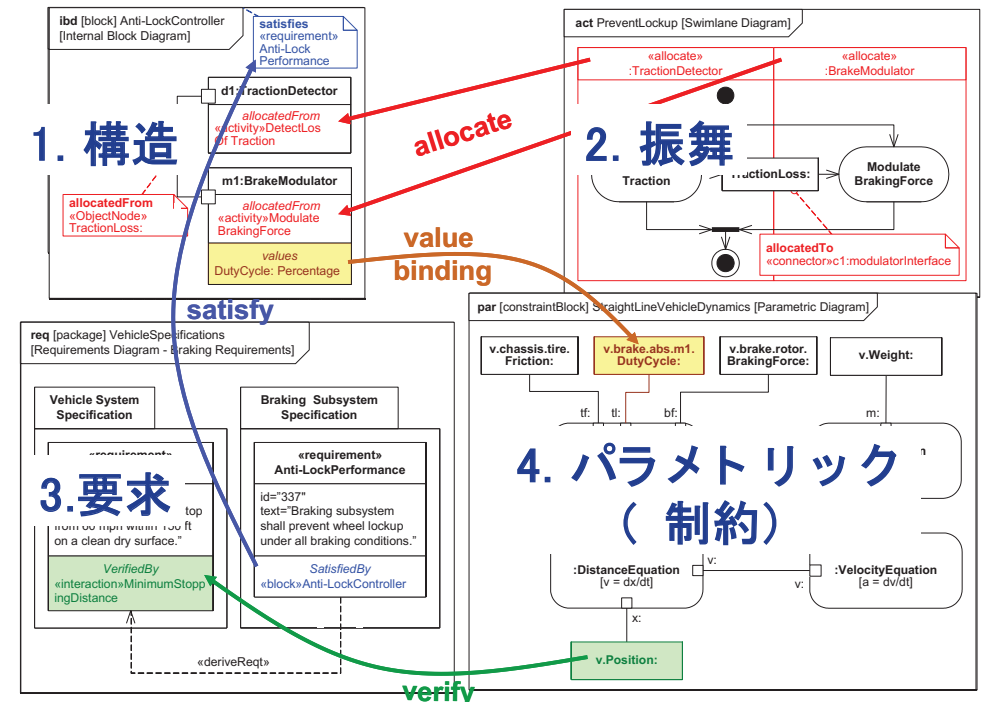
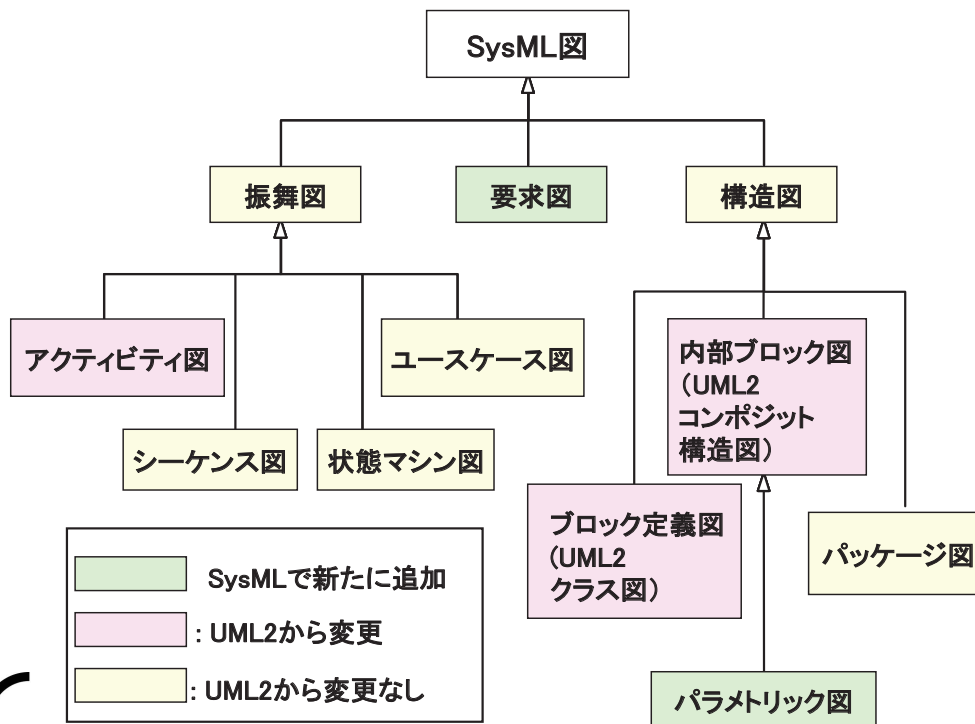
個別受注型製品でも顧客要求に応じて設計せず、事前に多様な顧客要求に対応できるモジュラー部品を設計しておいてその中から引き抜く  
⇒最少の製品・部品種類で最大の顧客を獲得できる

(出所) 日野三十四



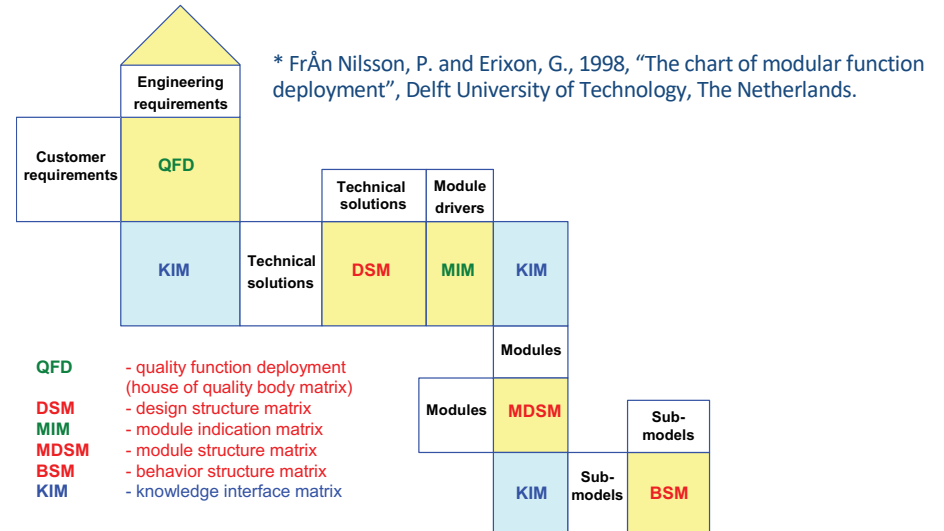
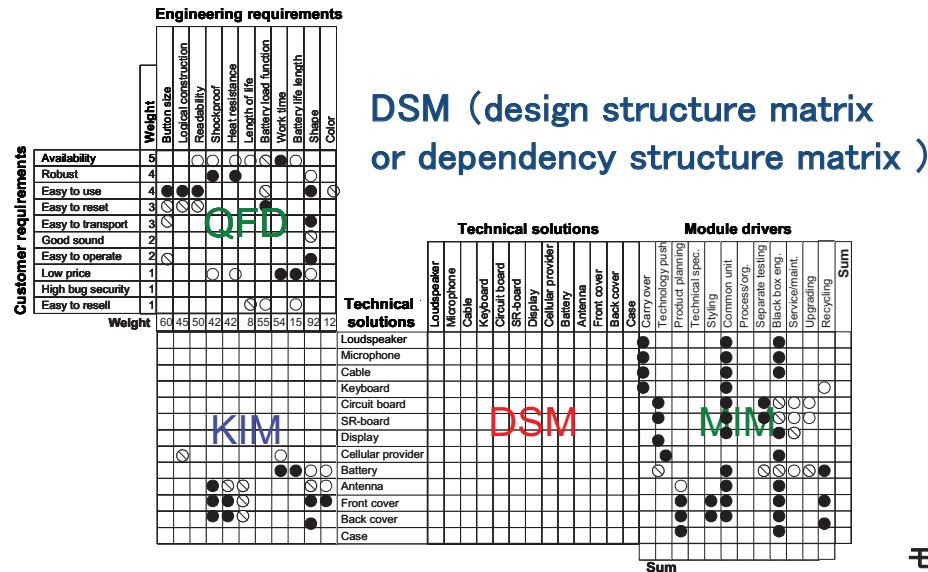
# SysMLによるシステムモデリング

- 標準化団体OMGが策定したシステムモデリング言語、**SysMLはUMLに要求図、パラメトリック図（制約図）を追加**
- システムモデルは、**構造、振舞、要求、制約の4要素で構成**できると言われる。



## モジュラー・製品アーキテクチャの決定

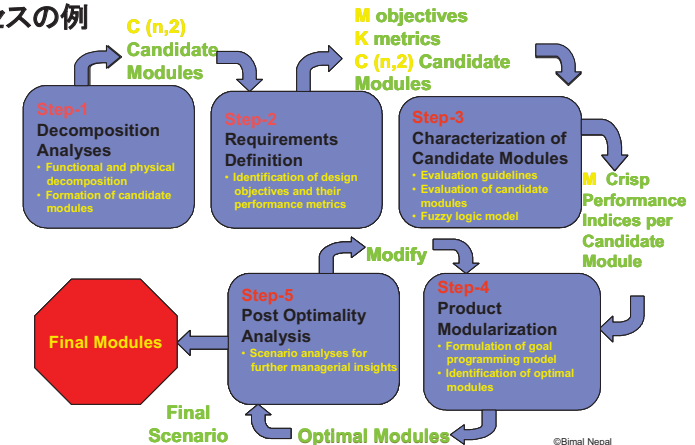
- QFDとモジュラー手法、DSMを組み合わせて、マトリクス分析による製品アーキテクチャを決定する方法も多数提案されている



### Three Major Modularization Methodologies

Methodology	Proposed by	Approach & Merits
Function Structure Heuristic Method	Stone et al.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Function &amp; heuristics based partition</li> <li>Designers to make partition decisions</li> </ul>
Design Structure Matrix (DSM)	Ulrich and Eppinger	<ul style="list-style-type: none"> <li>Subsystems and interface relationship in a matrix form</li> <li>Good visualization of modules</li> <li>Applicable to any domain</li> <li>DSM output suggests partition</li> </ul>
Modular Function Deployment (MFD)	Erixon	<ul style="list-style-type: none"> <li>Guided module driver identification</li> <li>Use of QFD mechanism</li> <li>Designer provided strategic insights to make partition decisions</li> </ul>

### モジュール化プロセスの例

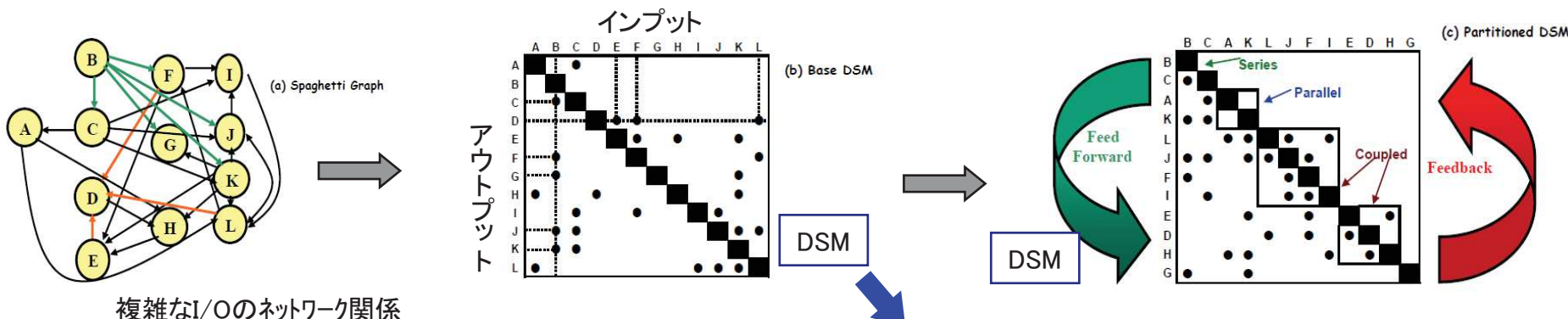


A FRAMEWORK FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF MODULAR PRODUCT ARCHITECTURE Bimal P. Nepal

## 代表的なマトリクス分析手法：DSM,DMM,MDM

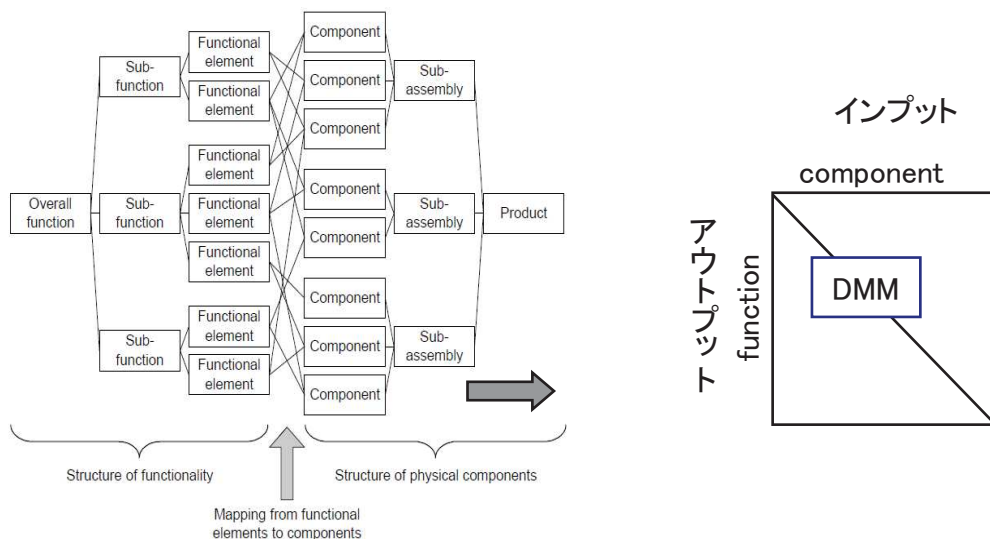
### ① Design Structure Matrix (DSM)

インプット（横軸）、アウトプット（縦軸）が同じ要素のマトリクス⇒ 同じ要素同士の依存関係を分析



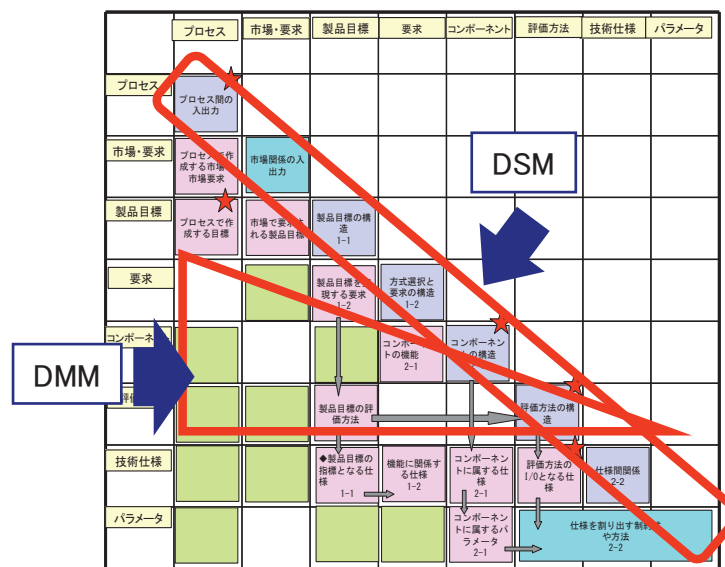
### ② Domain Mapping Matrix (DMM)

インプット、アウトプットが異なる要素のマトリクス  
⇒ 異なる要素間の依存関係を分析



### ③ MDM (Multiple Domain Matrix)

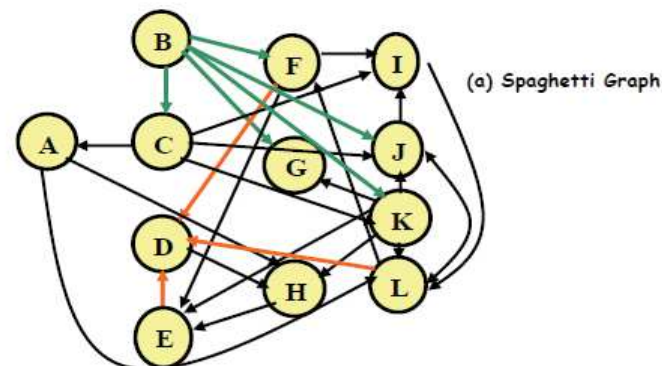
複数のDSM,DMMを組み合わせて構成  
⇒ 多数の要素間のトレーサビリティ分析



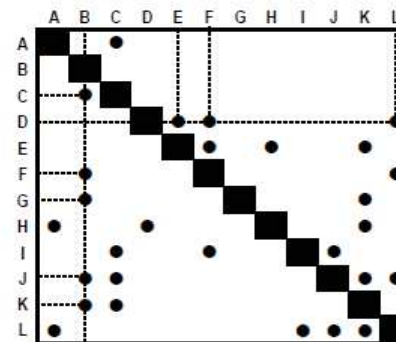
## マトリクス分析：DSM(Design Structure Matrix)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
要求仕様の決定□	A	A												
コンセプト生成/選択□	B	X	B											
試験計画の作成□	C	X	X	C		X								
製造装置の手配・購入□	D			X	D				X					X
試作モジュールの設計□	E	X	X			E								
試作モジュールの製作□	F					X	F							
試作モジュールの試験□	G			X		X	X	G						
製品モジュールの設計□	H	X	X			X		X	H		X			X
製品モジュールの検証□	I			X						I		X		
型設計□	J	X	X					X	X	J				X

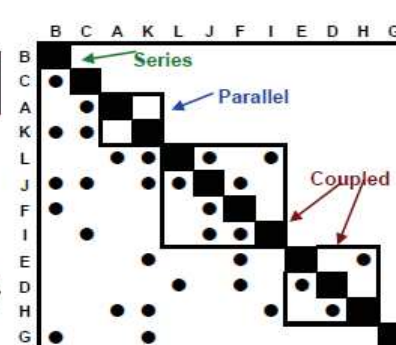
DSMの例



(a) Spaghetti Graph



(b) Base DSM



(c) Partitioned DSM



	A	B	E	F	C	G	H	J	M	D	K	L	I	N
要求仕様の決定□	A	A												
コンセプト生成/選択□	B	X	B											
試作モジュールの設計□	E	X	X	E										
試作モジュールの製作□	F			X	F									
試験計画の作成□	C	X	X	X		C								
試作モジュールの試験□	G			X	X	X	G							
製品モジュールの設計□	H	X	X	X			X	H	X	X				
型設計□	J	X	X				X	X	J	X				
組立用工具の設計□	M								X	X	M			
製造装置の手配・購入□	D				X		X		X	D				
型の製作□	K							X			K			
型の手直し・修正□	L						X	X			X	L		
製品モジュールの検証□	I				X						X		I	
量産開始□	N									X		X	X	N

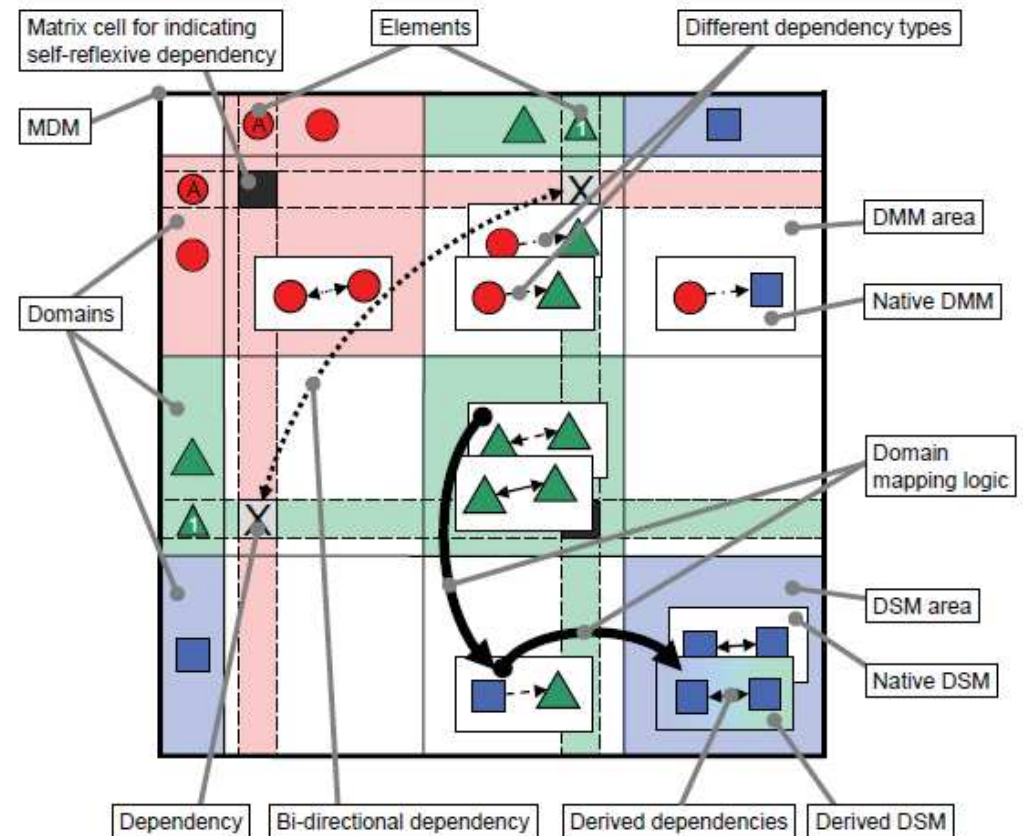
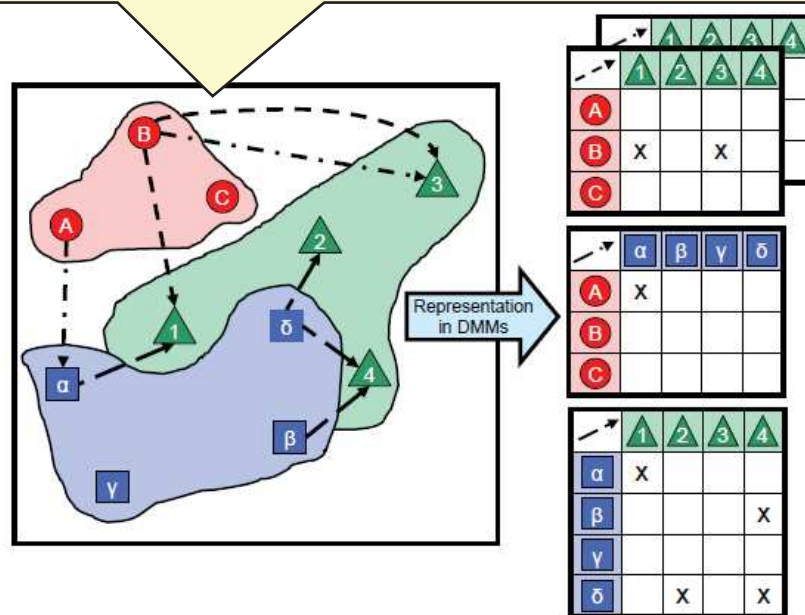
パーティショニング



# マトリクス分析：MDM (Multiple Domain Matrix)

- 複数の要素にまたがる関係分析
- 要求、製品構造、組織、プロセスなど複数の要素間の関係はネットワーク構造にあり、直接・間接の関係、関係の強弱より、複数の要素にまたがる関係を分析します

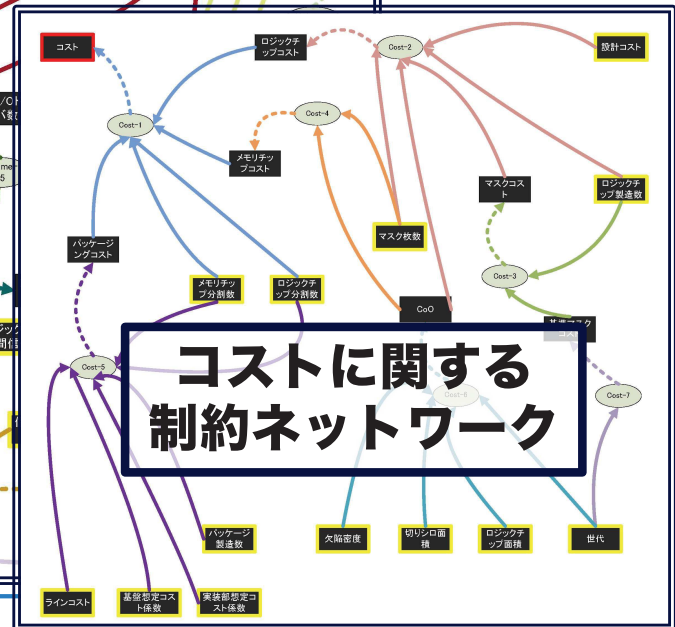
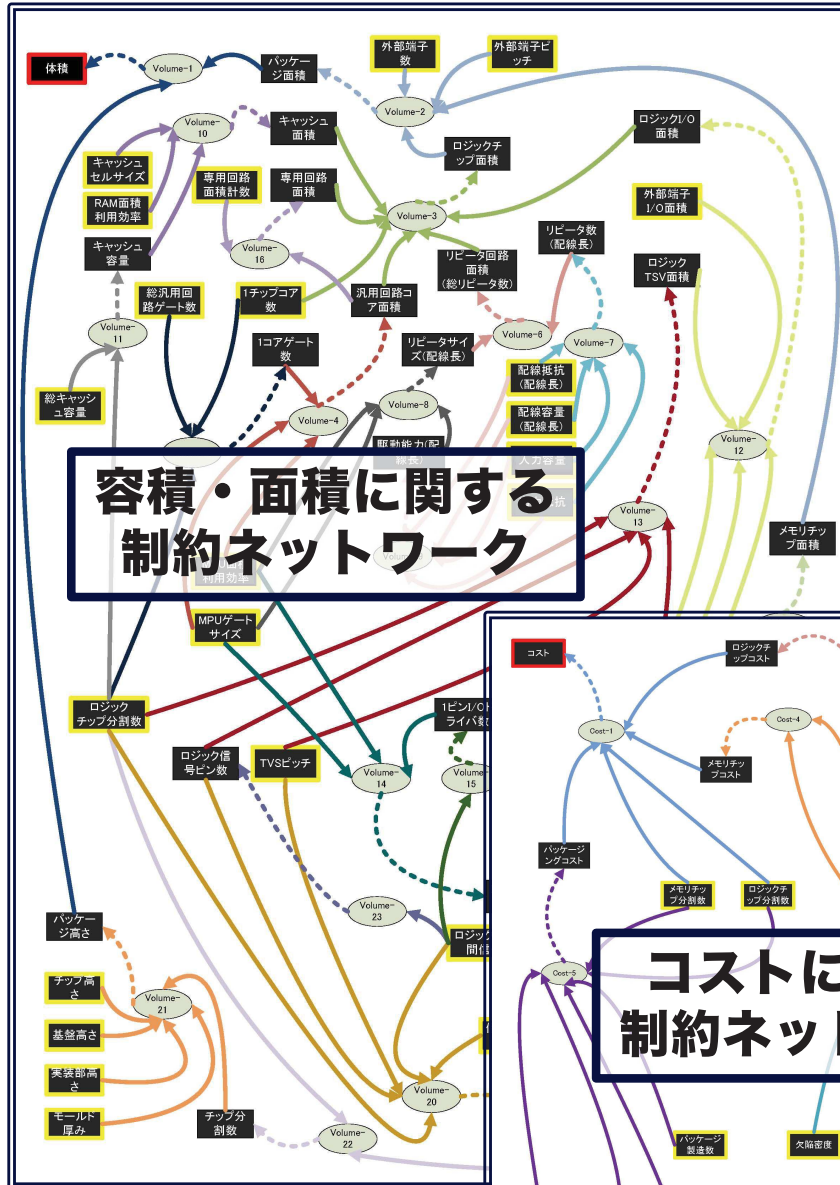
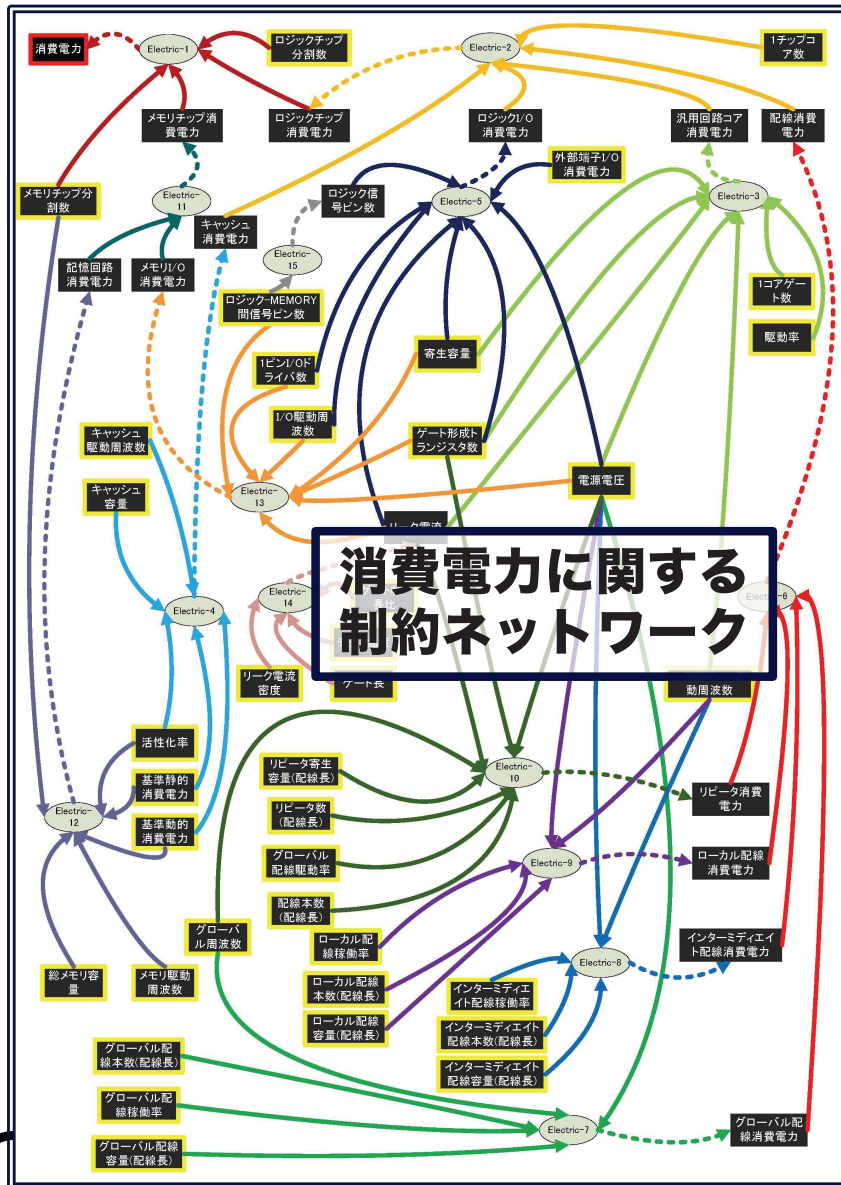
赤：組織(人)、緑：プロセス、青：作成物といった異なる要素が、互いに関係しており、依存関係、循環関係、トレードオフ関係など、関係性を可視化



# Engineering Systems: Multiple Domain Matrix

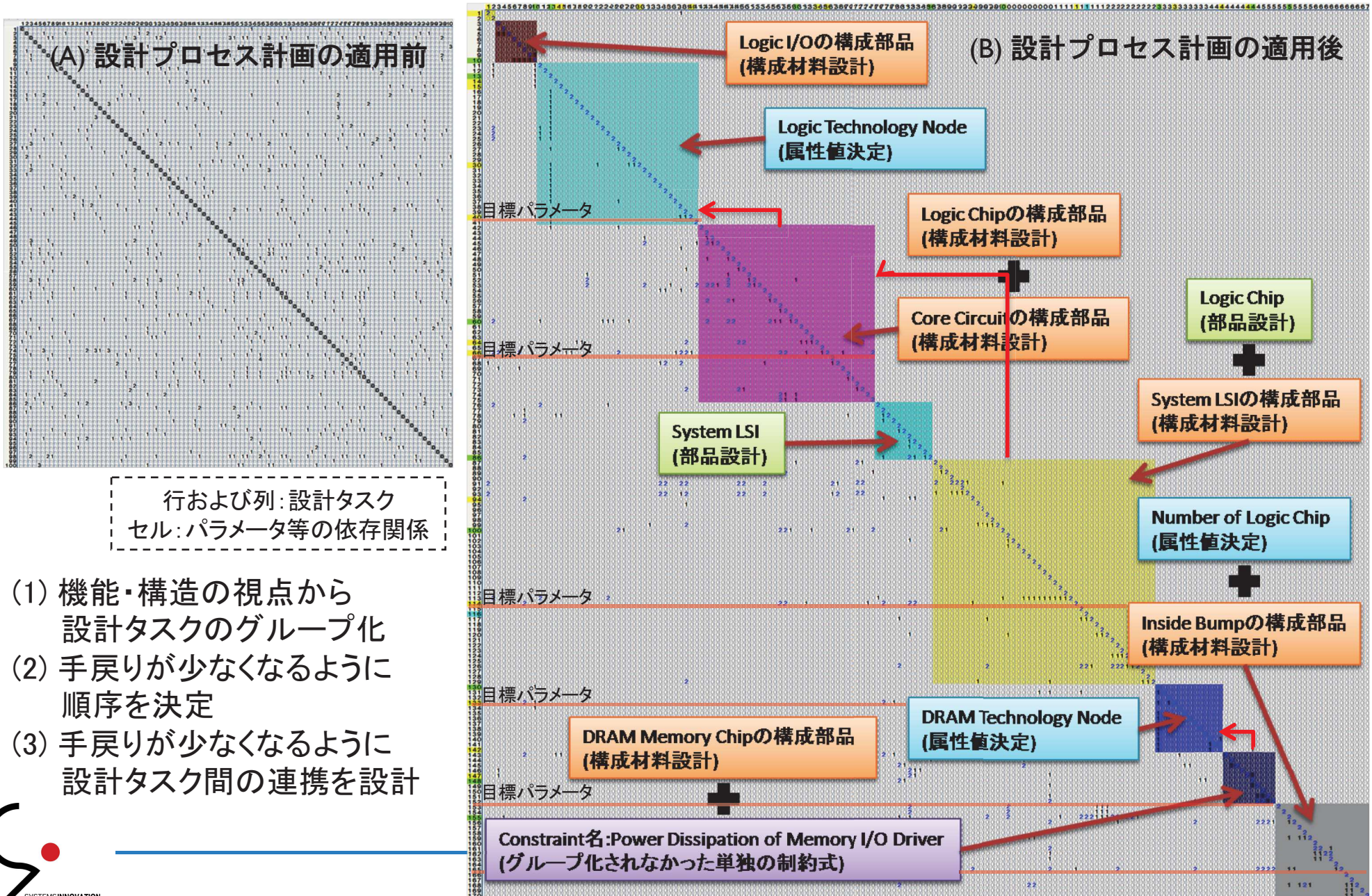
	Environmental Domain	Social Domain	Functional Domain	Technical Domain	Process Domain	
	System Drivers	Stakeholders	Objectives	Functions	Objects	Activities
System Drivers	System Drivers X System Drivers	Stakeholders X System Drivers	Objectives X System Drivers	Functions X System Drivers	Objects X System Drivers	Activities X System Drivers
Stakeholders	System Drivers X Stakeholders	Stakeholders X Stakeholders	Objectives X Stakeholders	Functions X Stakeholders	Objects X Stakeholders	Activities X Stakeholders
Objectives	System Drivers X Objectives	Stakeholders X Objectives	Objectives X Objectives	Functions X Objectives	Objects X Objectives	Activities X Objectives
Functions	System Drivers X Functions	Stakeholders X Functions	Objectives X Functions	Functions X Functions	Objects X Functions	Activities X Functions
Objects	System Drivers X Objects	Stakeholders X Objects	Objectives X Objects	Functions X Objects	Objects X Objects	Activities X Objects
Activities	System Drivers X Activities	Stakeholders X Activities	Objectives X Activities	Functions X Activities	Objects X Activities	Activities X Activities

## 様々な領域の制約ネットワーク (LSI)





## システムLSIの設計問題の構造化

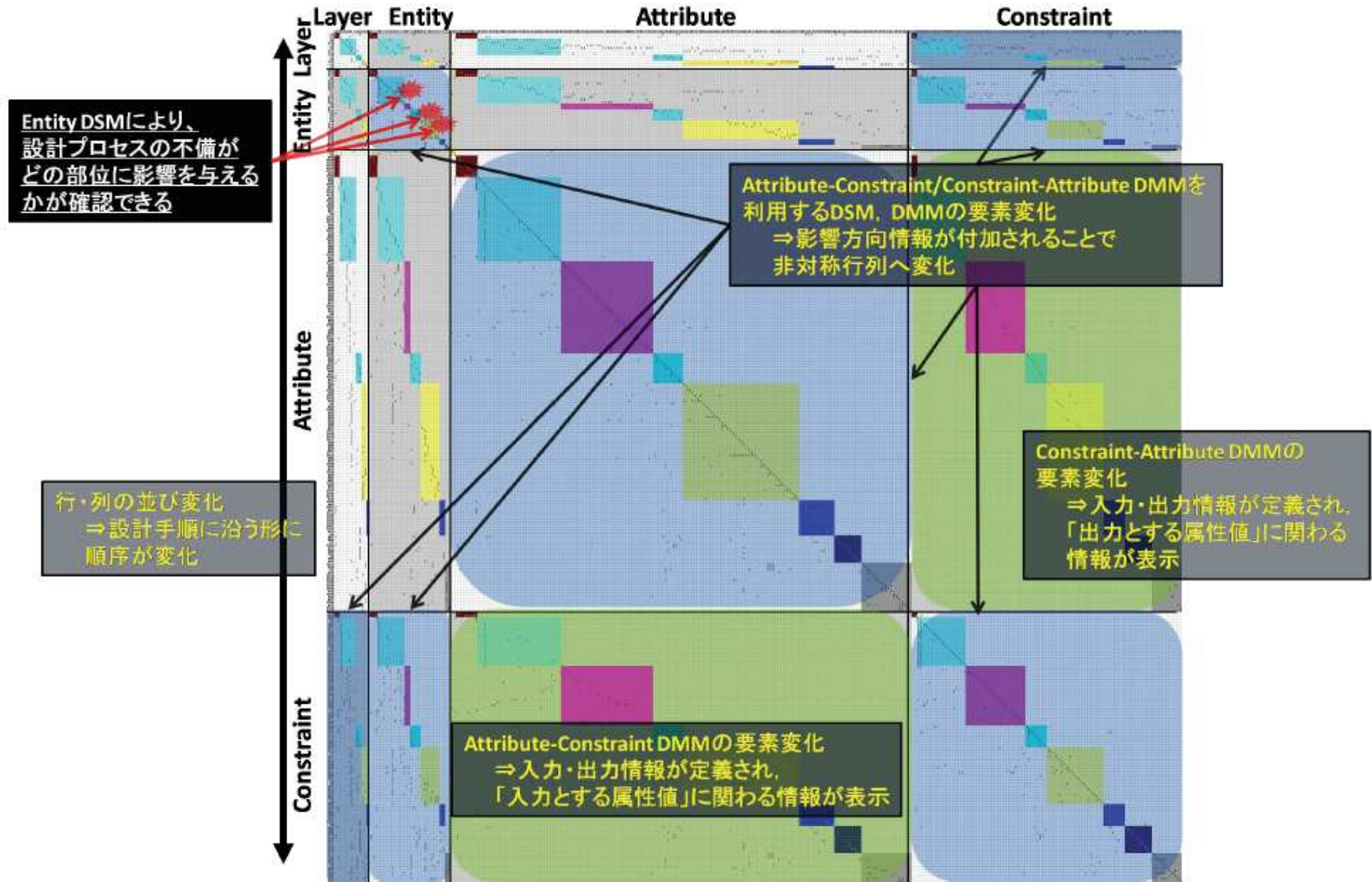


- (1) 機能・構造の視点から設計タスクのグループ化
- (2) 手戻りが少なくなるように順序を決定
- (3) 手戻りが少なくなるように設計タスク間の連携を設計



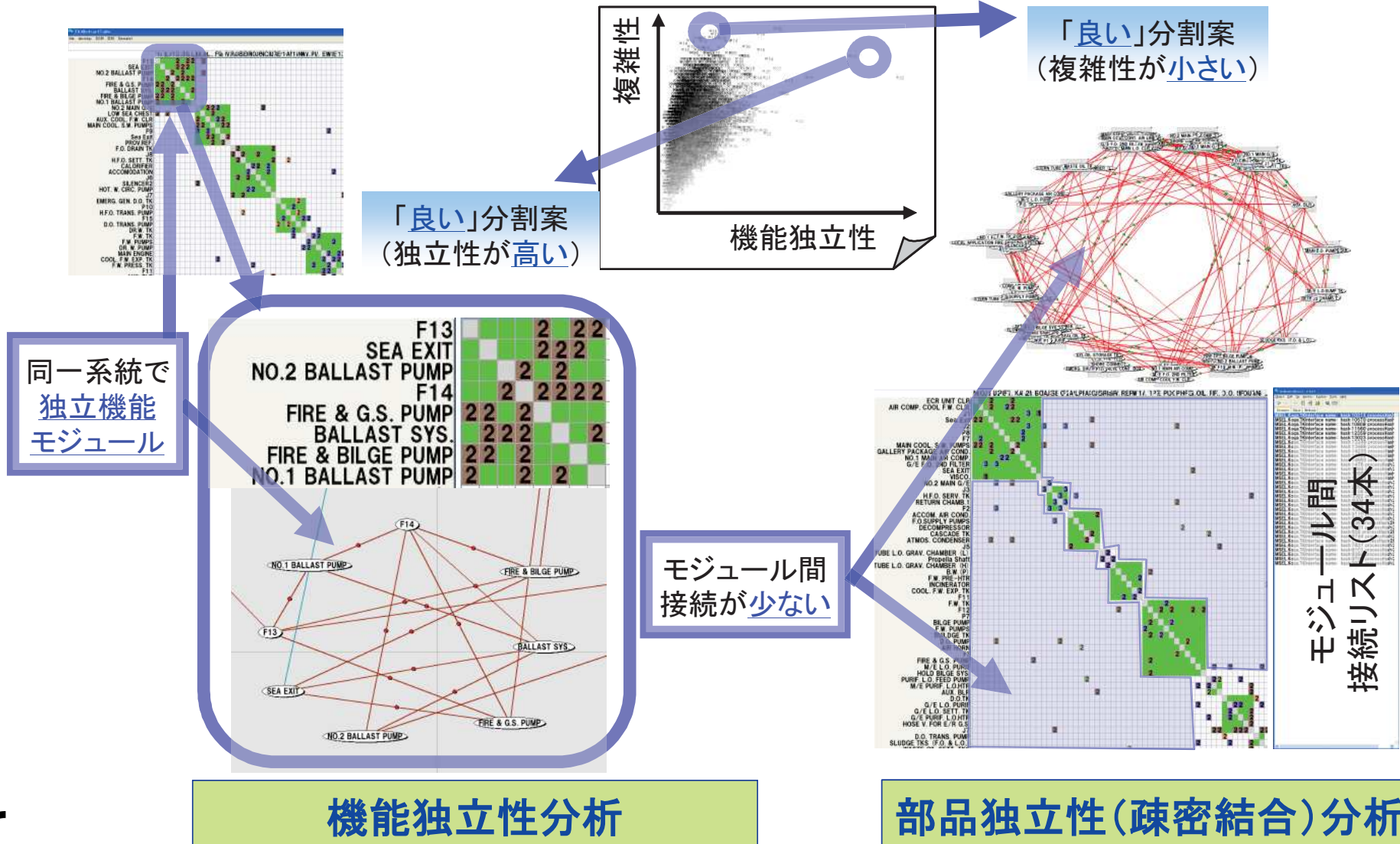


# システムLSIのMDM全体図

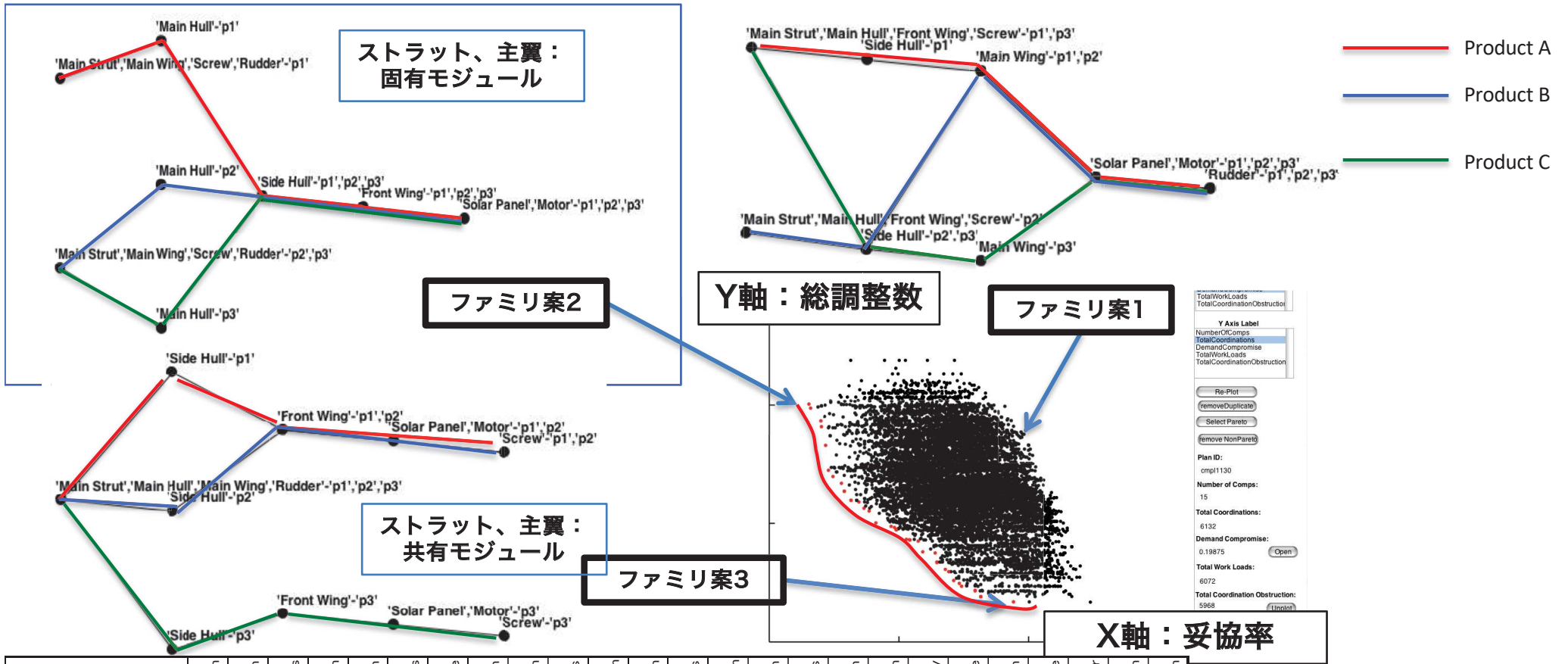


# モジュラー・製品プラットフォームの概要

製品モデルで作成した製品構造と部品間の結合関係データから目的に応じたモジュール分析を実施



## 結果：総調整数と妥協率の関係性



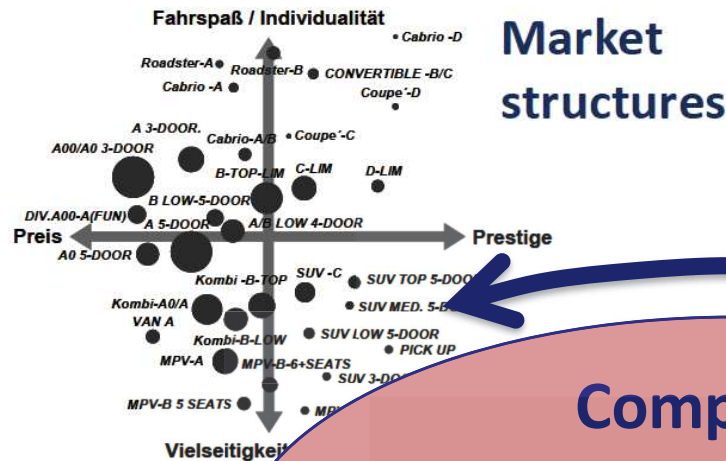
	Main Strut/Length	Main Strut/Width	Main Strut/Stiffness	Main Hull/Length	Main Hull/Width	Main Hull/Stiffness	Main Hull/Wings Coordinate	Side Hull/Length	Side Hull/Width	Side Hull/Stiffness	Main Wing/Length	Main Wing/Width	Main Wing/Stiffness	Front Wing/Length	Front Wing/Width	Front Wing/Stiffness	Solar Panel/Length	Solar Panel/Width	Solar Panel/Output Capacity	Motor/Torque	Motor/Revolution	Screw/Size	Screw/Number	Rudder/Length	Rudder/Depth
Maximum Speed	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1	3	3	3	1	1
Acceleration	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	1	3	3	1	1
Role Stability	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Yaw Stability	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
Minimum Radius low speed	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3
Minimum Radius high speed	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3

	Product A	Product B	Product C
Maximum Speed	5	3	1
Acceleration	5	3	3
Role Stability	3	5	3
Yaw Stability	3	3	5
Minimum Radius low speed	3	1	1
Minimum Radius high speed	3	3	5



# Increasing of Complexity in product development

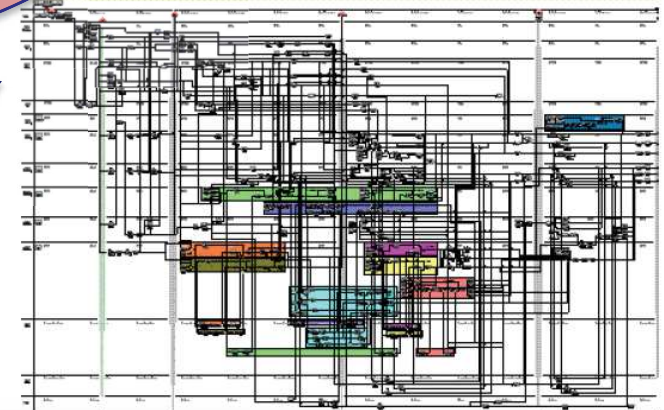
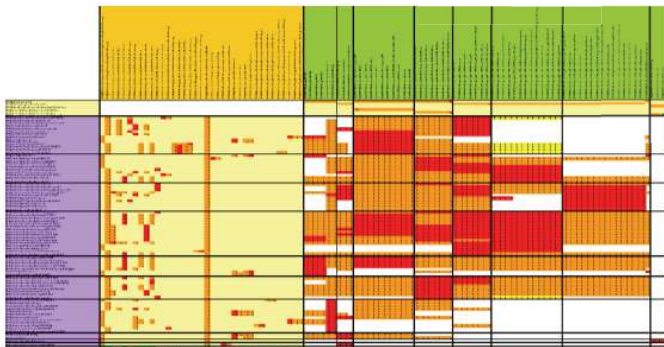
1985:	9 Segmente
1992:	16 Segmente
1997:	24 Segmente
2002:	33 Segmente
2005:	> 40 Segmente



Product structures

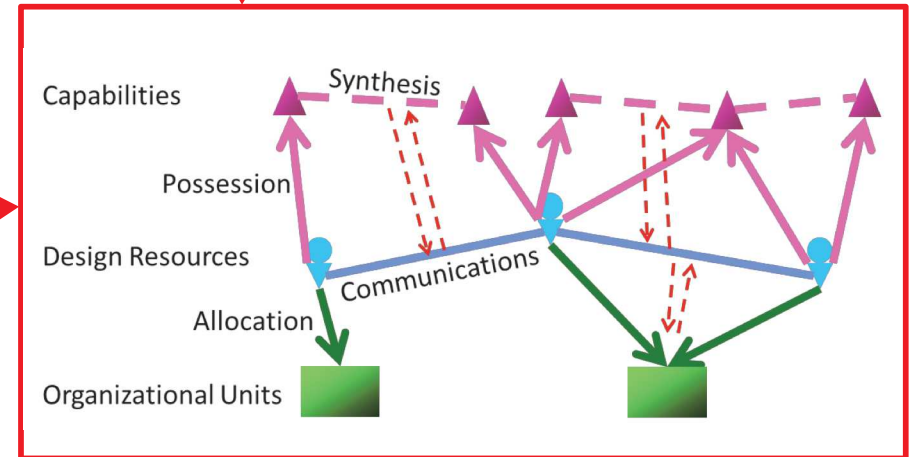
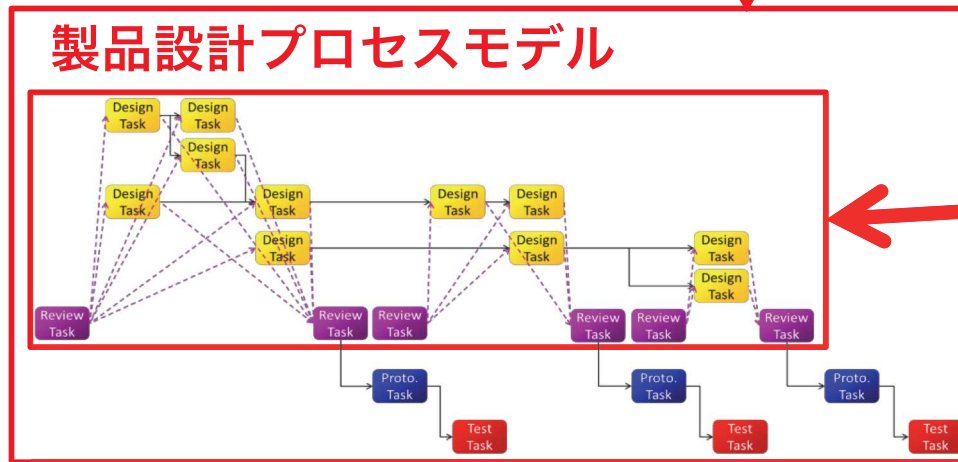
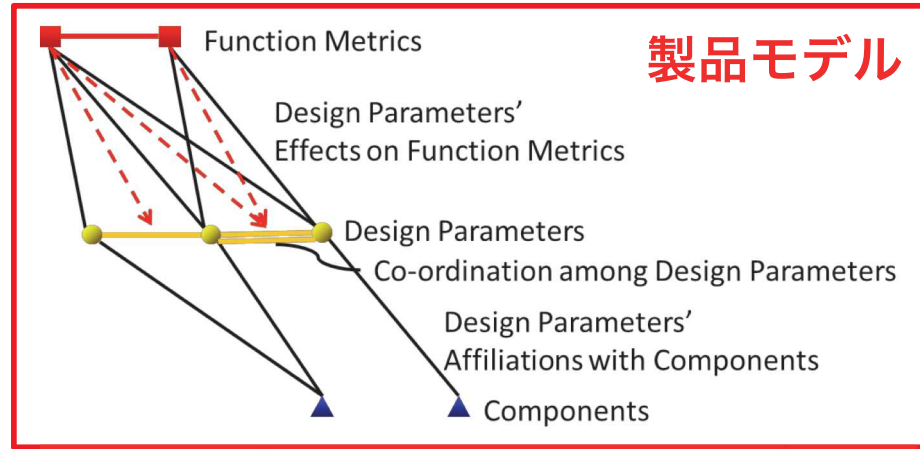
Process structures

Organizational structures





# 製品・プロセス・組織の統合モデル



# 製品・プロセス・組織の統合モデル—マトリクス表示

- 製品・プロセス・組織をそれぞれの構成要素間の関係性を記述することによってモデル化
- 関係性を辿ることによって他のドメインにおける関係を説明・導出

記号	●	▲	■	■	■	■	■	▲	●	■
	設計変数	構成部位	機能尺度	設計タスク	検討タスク	試作タスク	評価タスク	ケーパビリティ	設計リソース	組織ユニット
設計変数	●→● ●→●			■→●				▲→●	●→● ●→●	●→● ●→●
構成部位	●→▲ ▲→▲	▲→▲ ▲→▲		製品—開発プロセス モデル統合				製品—組織 モデル統合		
機能尺度	●→■ ▲→■	▲→■ ■→■	■→■ ■→■				■→■			
設計タスク	製品モデル			■→■ ■→■	■→■				●→● ●→●	●→● ●→●
検討タスク				■→■						開発プロセス
設計リソース									開発プロセス—組織 モデル統合	
組織ユニット									設計組織モデル	

# 実行例 プロセス実行体制の決定

主翼設計

	dt1	dt2	dt3	dt4	dt5	dt6	dt7	dt8	dt9	dt10	dt11	dt12	dt13	dt14
dt1	0	88	0	244	68	312	267	163	17	180	27	64	24	128
dt2	22	0	0	29	0	22	88	44	0	6	0	44	0	44
dt3	0	0	0	17	9	17	39	26	15	64	40	34	15	68
dt4	63	44	16	0	47	128	298	188	72	400	192	200	48	380
dt5	31	0	12	37	0	98	220	138	69	296	184	152	39	410
dt6	34	44	33	160	66	0	533	341	42	436	134	208	39	484
dt7	109	44	32	256	170	325	0	354	152	375	228	158	100	317
dt8	69	29	26	184	114	230	382	0	96	259	144	106	72	230
dt9	10	0	8	32	14	27	116	56	0	148	67	24	12	48
dt10	61	6	49	248	95	228	610	354	108	0	275	180	63	348
dt11	38	0	20	120	62	125	222	108	86	248	0	38	38	77
dt12	48	11	34	99	83	142	97	59	54	62	43	0	108	94
dt13	13	0	45	114	42	138	122	76	17	119	38	57	0	114
dt14	140	22	66	242	176	334	167	109	108	134	86	84	216	0

主翼設計  
モータ設計

Nominal1: 305 Nominal2: 0

製品構造上のマネジメント難度:305

タスク間理解度:0

ジョン

	rsc1	rsc2	rsc3	rsc4	rsc5
dt10		1			

モータ設計  
ジョンのみがモータ設計の実行裁量あり

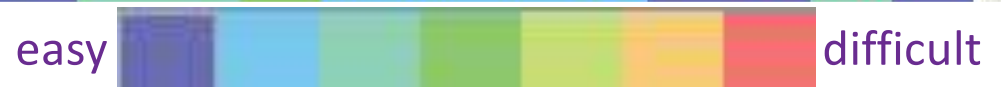
主翼設計

OrderedCollection (Physics/Fluid/Science/Material science/)

要求ケーパビリティ  
流体力学・材料科学

流体力学 材料科学  
ジョンは当該ケーパビリティを有していない

	rsc1	rsc2	rsc3	rsc4
cpb1	3	0	1	1
cpb2	0	3	0	1
cpb3	3	0	1	3
cpb4	0	1	3	0
cpb5	1			3



組織における設計リソースのケーパビリティ保有の様態によっては、実行体制の如何によっては対応のしきれないタスク間調整が存在する

- 検討タスクによる調整のマネジメント(プロジェクトレベルの対応)
- コミュニケーション増進・ケーパビリティ醸成(組織レベルの対応)



システムイノベーションを推進するセンターへの期待

# 解決策：教育，研究機関の設置

## システム化の遅れに起因する日本の弱点

### 企業経営の視点から

- 高度なシステム製品開発の立ち遅れ
- 要素技術偏重
- ITをうまく活用できていない
- 技術の移転がうまく出来ない
- 迅速かつ適切な経営判断の欠如
- 自前主義と縦割り制度が依然として強く、オープンイノベーションに関心が薄い

### 産業政策からの視点

- 国際標準化への対策の遅れ
- ソフトウェアの競争力の欠如
- システム産業の欠如
- 研究開発費配分における要素技術偏重
- サービス産業の生産性の低さへの対策の遅れ（中小企業対策）

# 待望されるシステム力

## システム化

- 同種・異種の機器、装置、業務、組織、規範などを繋げて全体としての新しい価値を創造し、機能を高めるシステムを作り出すための計画・設計・開発・解析・実装・評価などの作業の総称

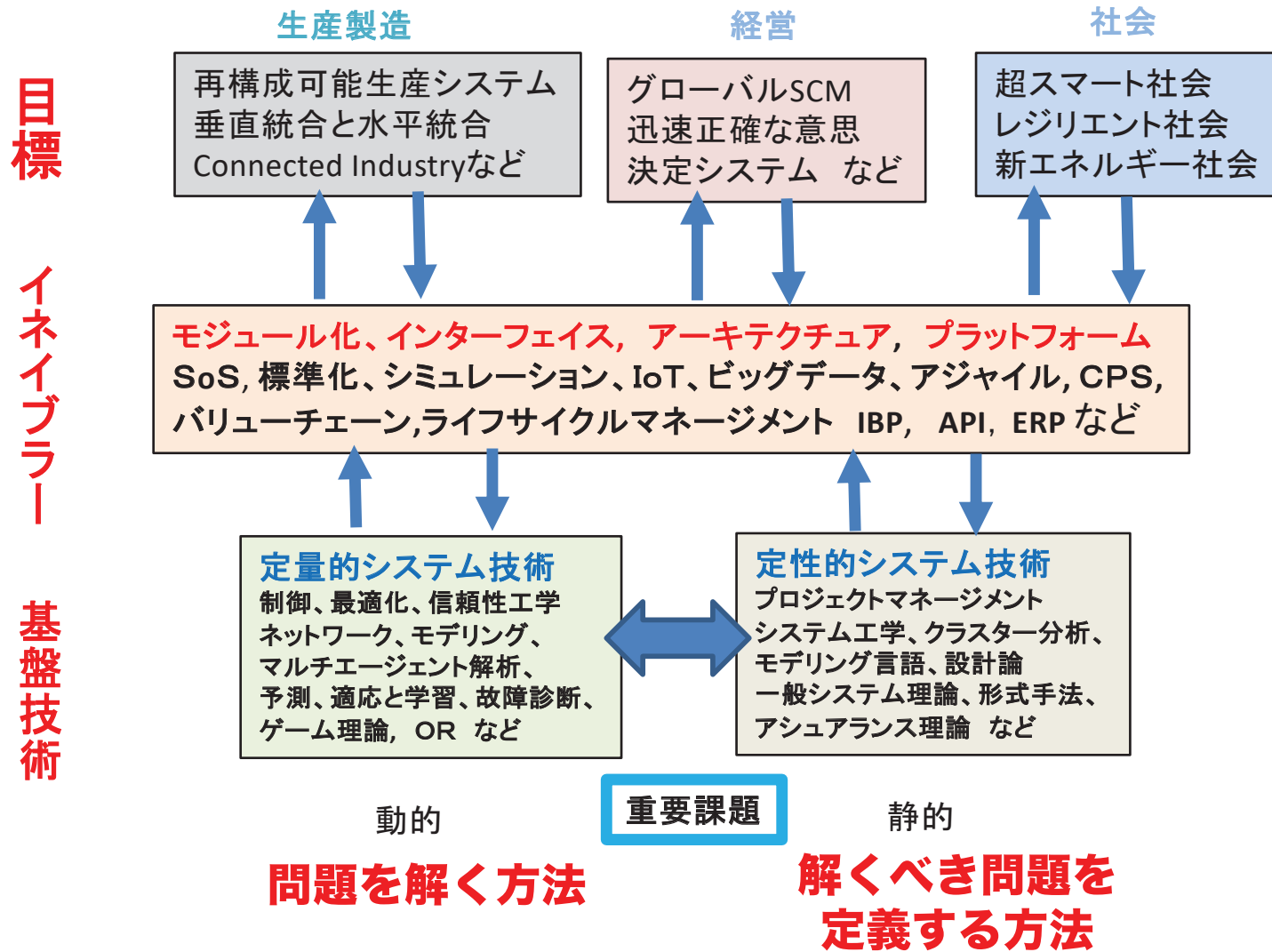
## システム化にはシステム力が不可欠

### システム力とは

- 複雑な対象，問題の本質を捉え，解決する力
  - 俯瞰的思考，分析的思考
  - デザイン力，マネジメント力
- 
- アーキテクチャ・デザイン，マネジメント
  - プラットフォーム，モジュールのデザイン，マネジメント
  - 標準化，インタフェイスのデザイン，マネジメント



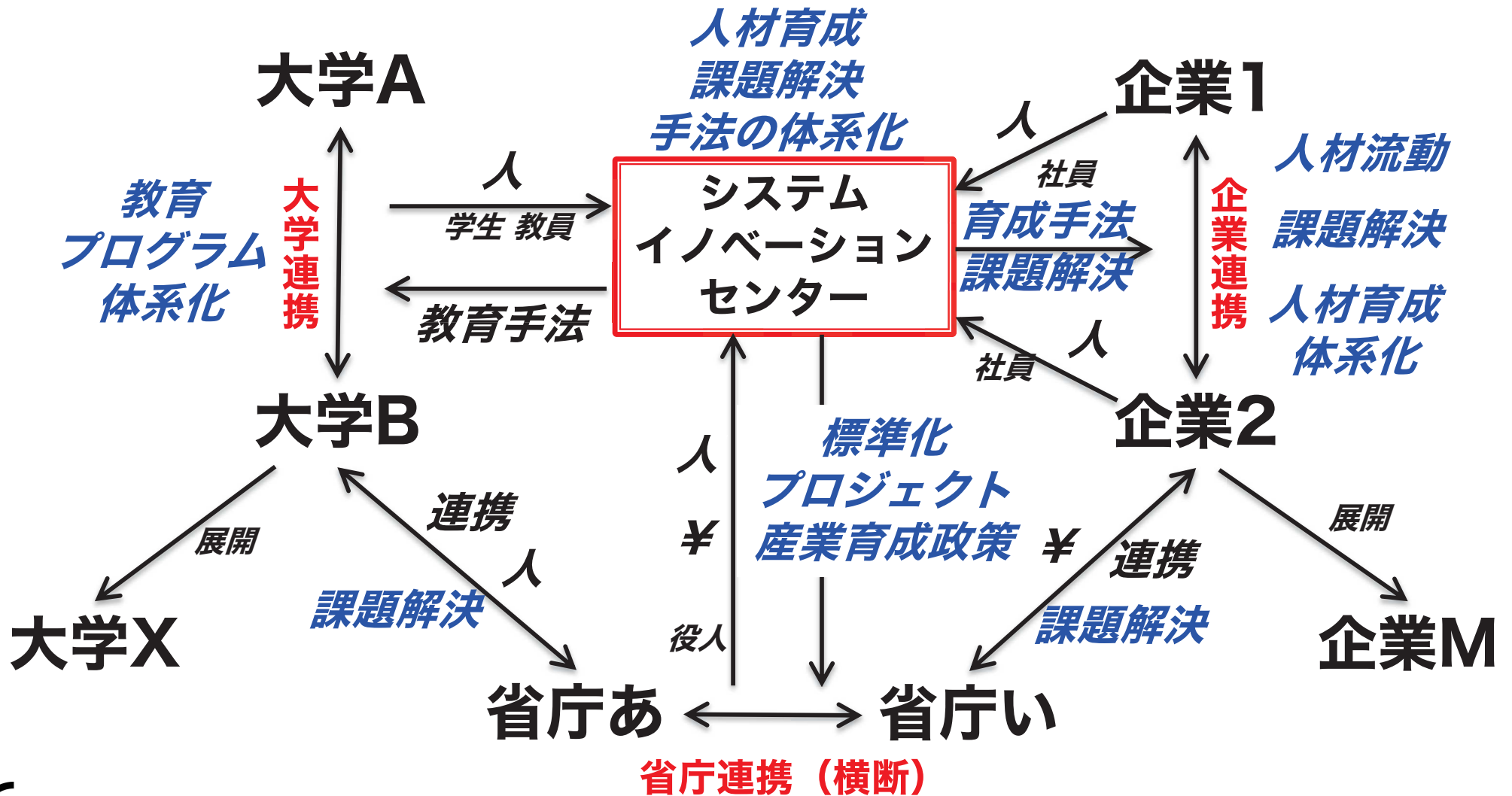
### システム科学技術の概念図



# システムイノベーションセンターの設置

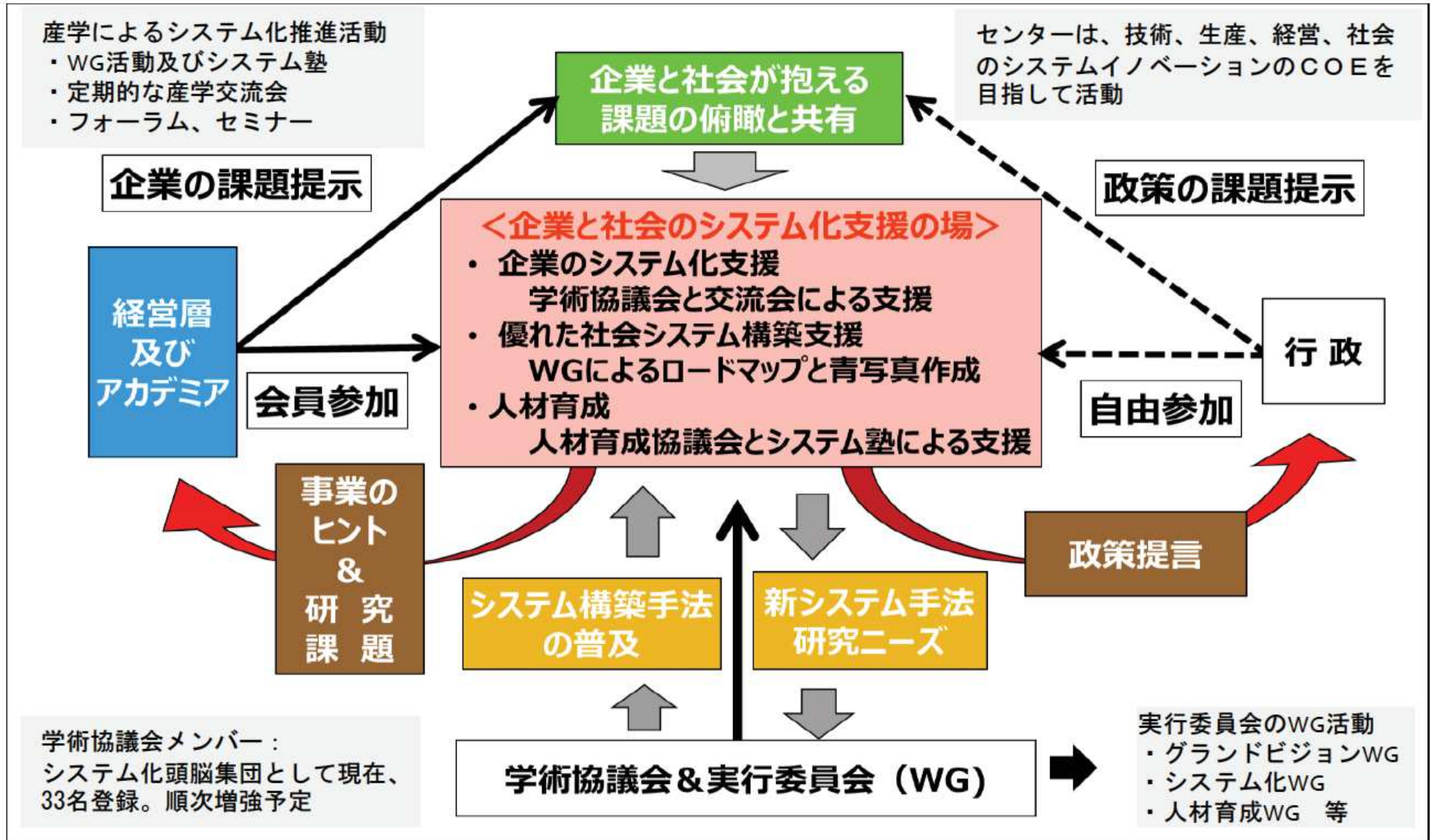
- 様々な政策提言はばらばらに実施されるのではなく，互いに連携して「システムとして」統合的に遂行されることが望ましい。
- 日本のシステム化を推進する司令塔として「システムイノベーションセンター」の設置を提案する。主要な機能を下記に示す。
- システムイノベーションセンターの主要機能
  - システム化力強化のための長期的なビジョンの確立
  - システムに関わる国際標準化活動の統合的推進
  - システム化を推進する人材の育成に関わる政策立案と実行
  - 「現場力の強さ」の調査と分析
  - システムの視点からの第4次産業革命の詳細分析と情報提供
  - システム化を推進するプロジェクトの企画
  - システム産業育成策の策定と実施

# 一般社団法人 システムイノベーションセンター





# 一般社団法人 システムイノベーションセンター



注：システム塾はイノベーションの宝庫、システム・コンピテンシー獲得の場