

第4次産業革命の学術的基盤

木村 英紀
早稲田大学

2017年11月7日
システムイノベーションシンポジウム

目次

- システム構築の基本スキーム
- モジュール化
- 第三次科学革命
- 産業革命と勤勉革命
- 日本の強みを生かすシステム化

システム：複数の要素が合目的的に結びついた統合体

システムの価値 (SV) > 要素の価値の総和 (EV)

$SV - EV = \text{統合の価値 (IV=Integration Value)}$

IVは要素の数が増す（複雑性増大）につれて大きくなる。

(例) N個の要素をそれぞれrの候補から選ぶ方法は
rのN乗通りある。r = 3、N=15で約1500万

$SV = EV + IV$ EVを増すことによってSVを増すことは
限界がある。付加価値のIVへの移動

システム化の二つの側面＝要素＋統合

- 全体機能をなるべく独立性・普遍性の高い機能要素に分割する。
これを担うのが**モジュール化**である。
細分化、要素還元主義
- 機能要素をその特性や構造に依存せずにつなぐことのできる**インターフェイス（プラットフォーム）**を作る。
- インターフェイスを用いて機能要素を適切に選んだ**アーキテクチャ**に従って結びつけてシステムを構築する。

現代のシステム化の基本構造

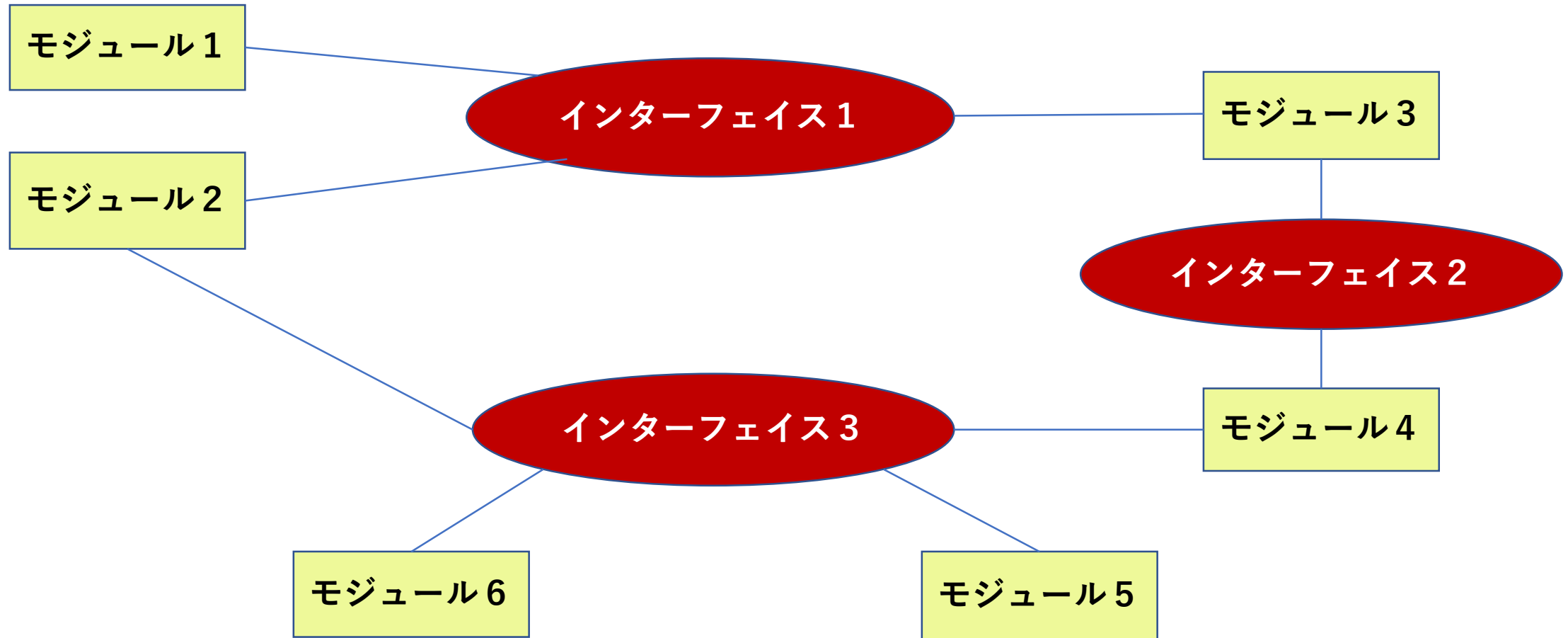
要素 ＝ モジュール

要素をつなぐ ＝ インターフェイス（プラットフォーム）

統合 ＝ アーキテクチャ

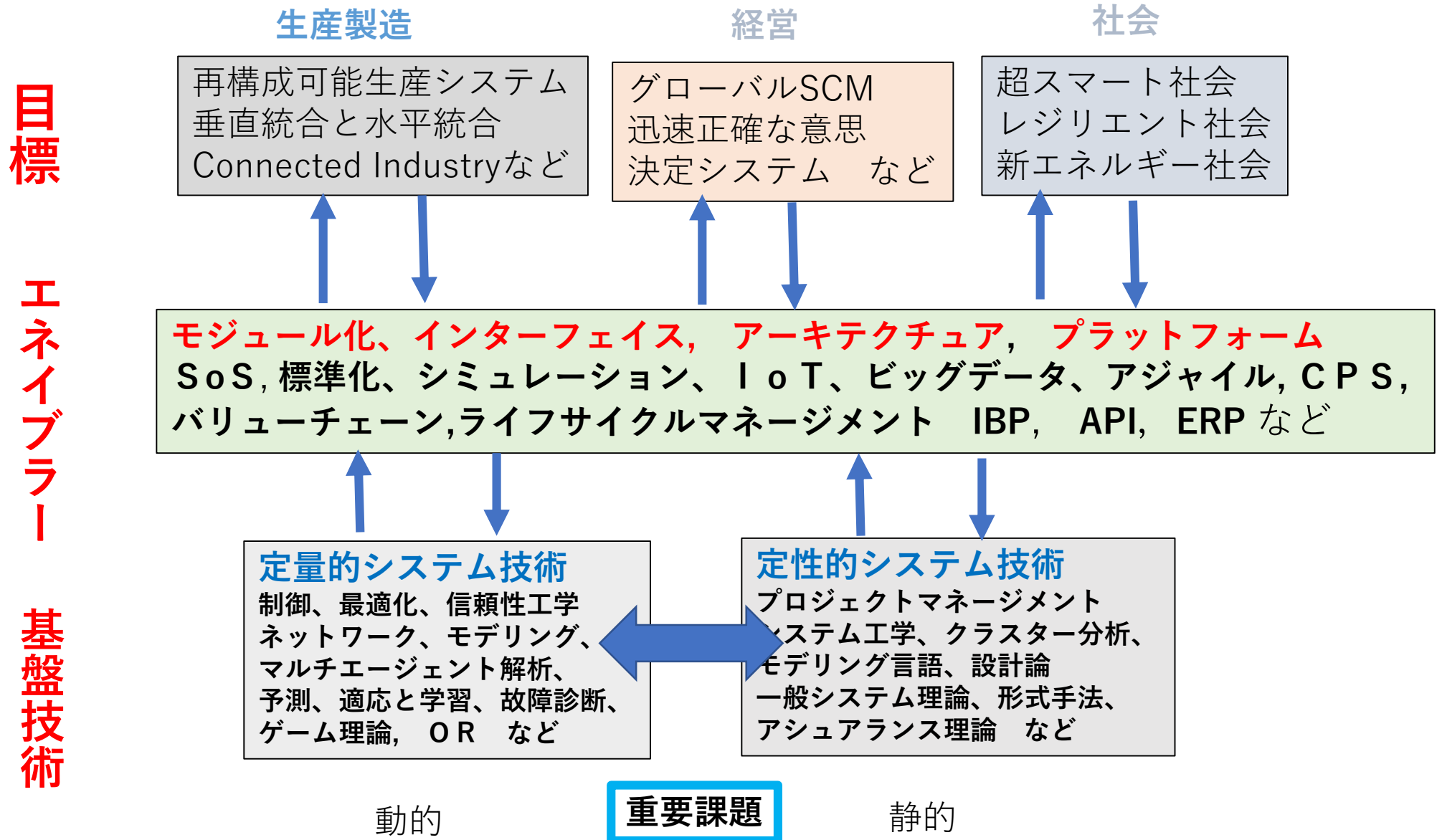
<アーキテクチャ>

インターフェイスを使ってどのモジュールを
どのようにつなげるか？



未来のシステム構築のイメージ

システム科学技術の概念図



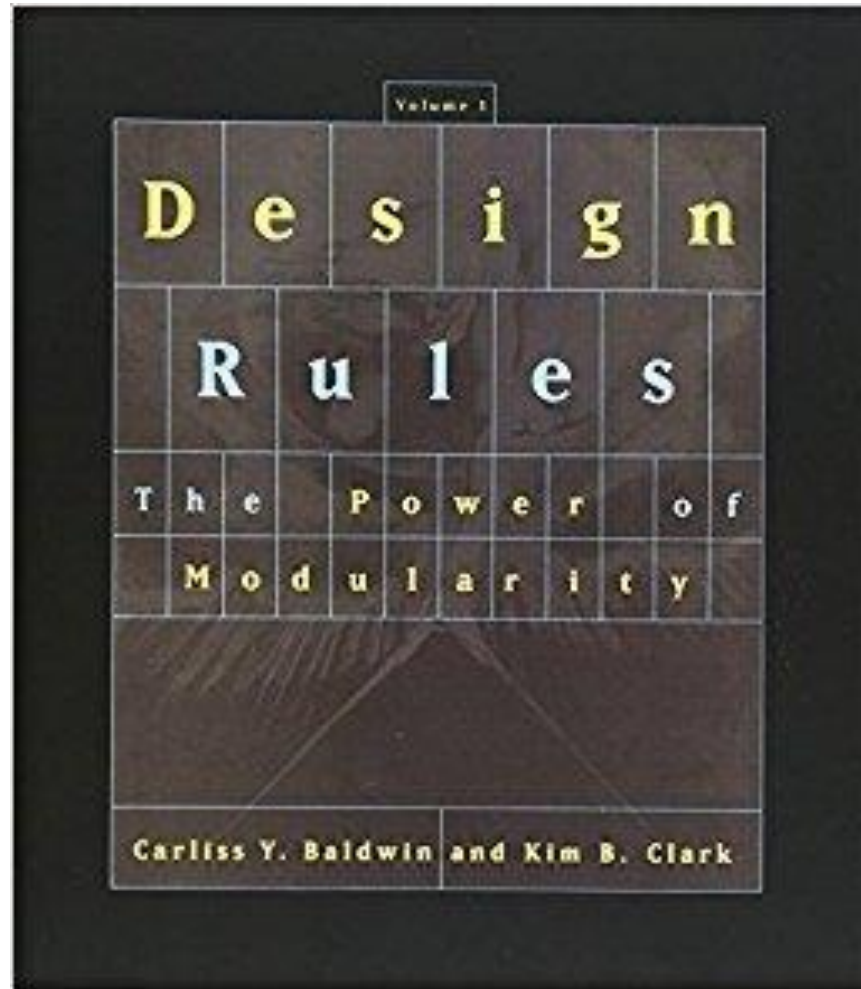
目次

- システム構築の基本スキーム
- モジュール化
- 第三次科学革命
- 産業革命と勤勉革命
- 日本の強みを生かすシステム化

モジュール化の利点

- 全体としての効率が劇的に向上
- 複雑性の増大に対応することができる
- 製品の自由度が増大
- 変化に対応することが容易
- 小企業が参加可能
- 欠けている技術課題が顕在化
- 新規技術の迅速な市場投入が可能

モジュール化が最初に科学のテーマとなったのは
ソフトウェア工学におけるオブジェクト指向言語



Design Rules : The Power of Modularity

C.Y. Baldwin, K.B. Clark

MIT Press, 2000 470ページ

モジュール化の三つのレベル

① 製品またはサービスを独立性の高いユニットに分ける
通常部品化、分業化、系列化

② ユニットとインターフェ이스の分離
部品・要素が自由に交換可能
垂直統合の深化
(例) IBMのシステム 3 6 0

③ インターフェ이스のオープン化
誰でもモジュール市場に参入可能
競争の激化、産業構造の激変
(例) インターネット 携帯電話 PC

モジュール化のレベル 3 まで達成したのは現状ではIT分野のみとってよい。

このパラダイムを製造業全体、さらには経営、流通、サービスなどあらゆる産業分野に拡大することが第4次産業革命の主要な柱の一つである。（例 Industrie 4.0 における管理シェルの考え方）

それがハードウェアの世界にどこまで進むか、は未知数であるが、業種によっては産業構造が一変する可能性もはらんでいる。

モジュール化とクラスタリング

モジュール化 = 相互依存性の圧縮
**クラスタリング = 相互依存性の強さ
の検出**

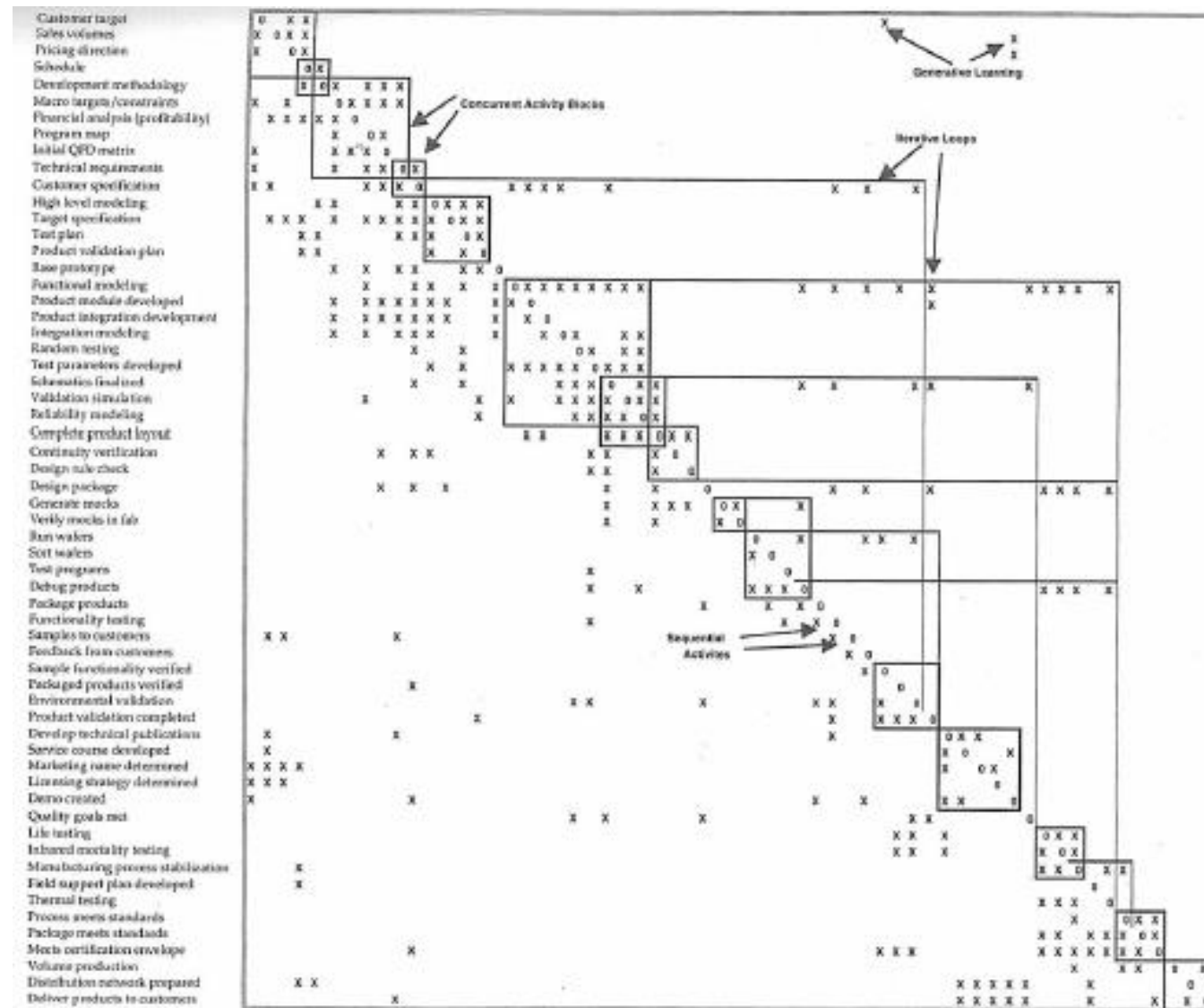
Design Structure Matrix

モジュール化 = 設計・構成に重点

クラスタリング = 分析・解析に重点

両者は相補的

課題： すでに数多くあるクラスタリングの手法や
アルゴリズムは大規模な製品や生産のモジュール
化にどこまで適用出来るか？
新しいクラスタリングの手法を創出するにはどうした
らよいか？



VLSI チップのDesign Structure Matrix (Baldwin & Clark 2000)

Stages:	Formulate Design Rules	Work on Hidden Modules				Test & Integ- rate
	Stage 1	Stage 2				Stage 3
Design Rules	. x x x x x . x x x . x x x x . x x x x .					
Drive System	x x x x x x	. x x x x x . x x x x x . x x x x . x x x x x .				
Main Board	x x x x x x x x x x x x		x . x x x x x . x x x x x x x . x x x x x x . x x x x x . x x x x x .			
LCD Screen	x x x x x x x x x x x			. x x x x x . x x x x . x x x x . x x x x x .		
Pack- aging	x x x x x x x x x x x x x			. x x x x x . x x x x x x . x x x x x x . x x x x x . x x x x x x .		
System Testing & Integ- ration	x x x x x x x x x x x	x x x x	x x x x	x x x x	x . x x x x x x . x x x x x x x x x x x . x	

ノート P C のDesign Structure Matrix (Boldwin &Clark 2000)

モジュール化の研究課題

- モジュール性の抽出、創出、処理。「機能結合」の内容をいっそう豊富化することが必要である。特に静的から動的への拡大
- モジュールの規格化、普遍化
- モジュールのscalabilityの保障
- モジュールの進化可能性を確保
- インターフェイスにおける「すり合わせ」の明示的な定式化

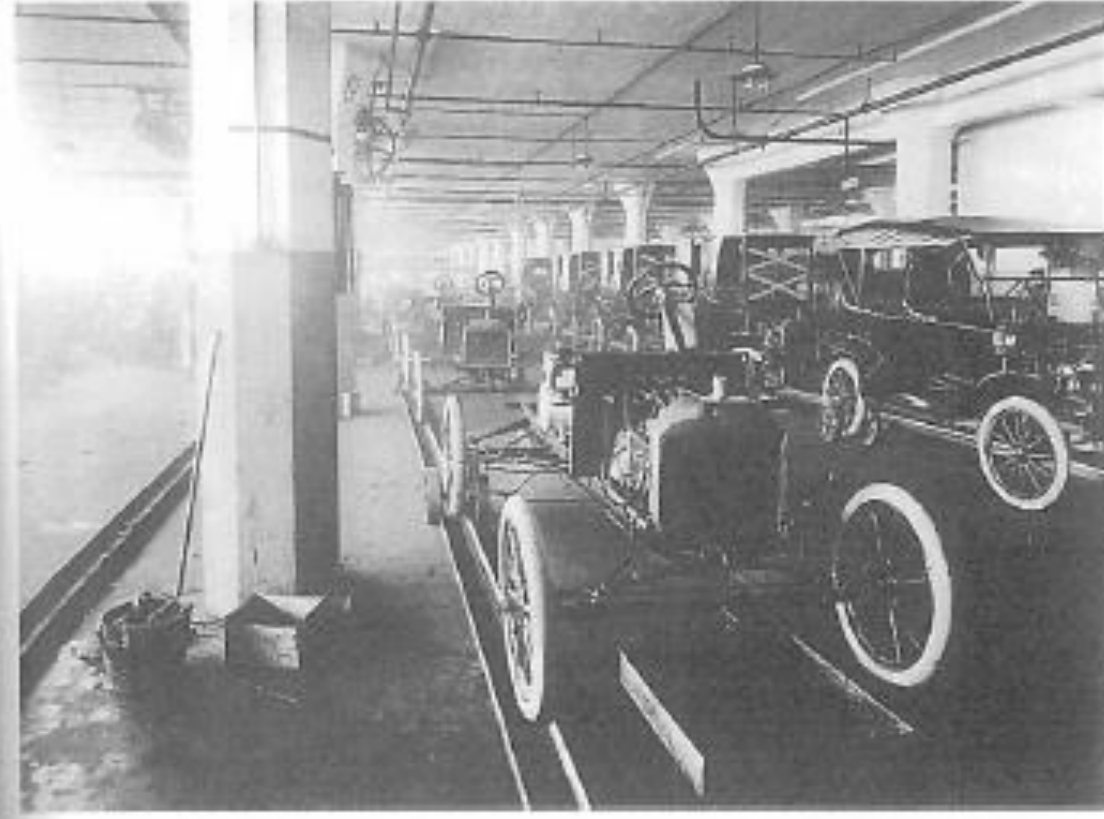
目次

- システム構築の基本スキーム
- モジュール化
- 第三次科学革命
- 産業革命と勤勉革命
- 日本の強みを生かすシステム化

20C初頭のシステム化の波

- インフラの急速な拡大
電話、交通、送配電網 etc.
すべて「システム構築と運用」がキーテクノロジー
”エジソンは最初のシステム工学者“ (Hugh)
- 大量生産・大量消費の時代の到来
フォードの流れ作業ラインの登場
市場調査、品質管理の課題が発生

フォード ハイランドパーク工場（1913）



新式のベルトコンベヤー生産



旧来の組み立て台生産

フォードの組み立てラインのもたらした もの

- T型フォードの価格は1/3に下落、生産台数は45倍に増大
- デトロイトジャーナルの記事の見出し（1913年4月）
“システム・システム・システム”
- ただし、ラインが実現するまでには多くの要素技術の開発と車両アーキテクチャの改善改良が必要であった。
- 品質のバラつき  S Q C の必要性
- T型フォードは突然売れ行き不振になる  市場調査の必要性

科学・技術革命の歴史

- ・ 第一次科学革命（17C中葉） 近代科学の誕生

- ・ 第一次産業革命（18C中葉） 道具から機械へ

科学とはほぼ無関係

- ・ 第二次科学革命（19C初頭） 科学と技術の結婚（エコールポリテクニク）

技術は科学に基礎をもつこと

- ・ 第二次産業革命（19C末） 技術による物質文明の開花

- ・ 第三次科学革命（20C前半）

技術が生み出した自然科学でない科学の誕生（OR、品質管理、制御、予測など）

- ・ 第三次産業革命（20C末） 情報技術

オートメーション、計算機、メカトロニクス、通信、計測制御、など

- ・ 第四次産業革命（21C） ？

第三次科学革命

自然科学ではない人工物の科学が誕生 システム科学技術の基礎となる

- 1931 ブッシュの微分解析機
- 1932 ブリュンによる回路理論の数学化
- 1932 ハイゼンのサーボ機構の理論
- 1936 チューリングの機械計算のモデル
- 1939 オペレーションズ・リサーチの実施
- 1944 ノイマンのゲーム理論
- 1945 ボードのフィードバックの理論
- 1946 最初の汎用デジタル計算機ENIAC
- 1948 シャノンの通信理論
- 1948 ウィーナーのサイバネティックス
- 1949 最初のプログラム内蔵式計算機EDSAC

目次

- システム構築の基本スキーム
- モジュール化
- 第三次科学革命
- 産業革命と勤勉革命
- 日本の強みを生かすシステム化

「勤勉革命」

速水融、川勝平太

江戸時代の日本で起こった。

家畜から人力へのエネルギー源の転換

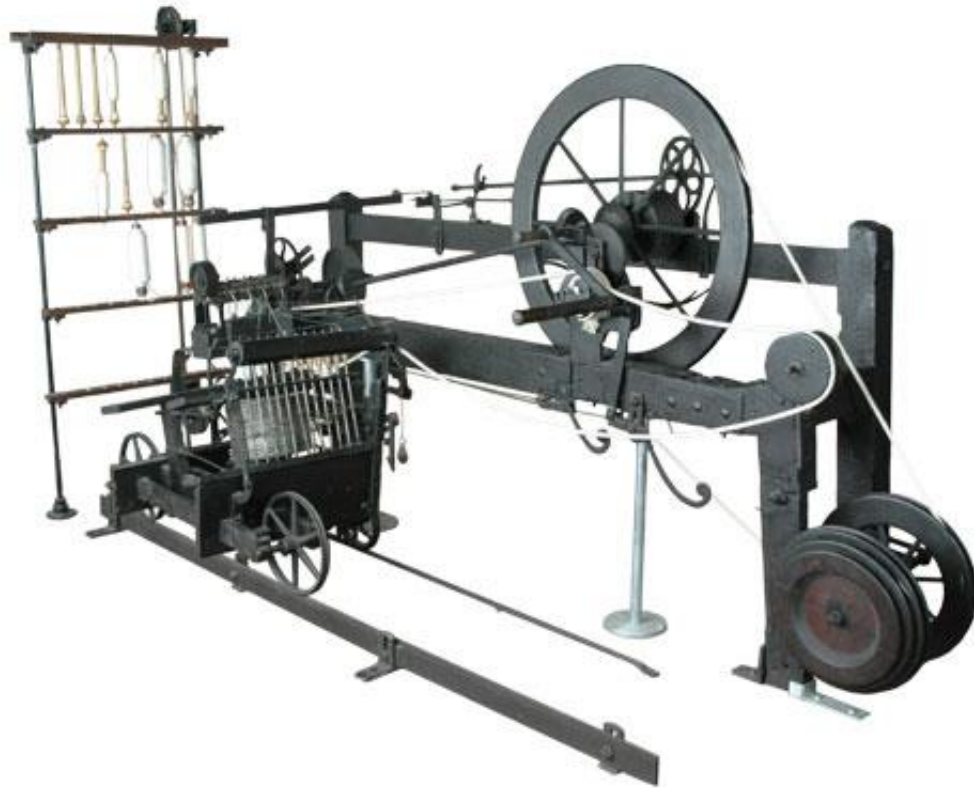
道具の技術革新と農業生産性の増大

労働尊重のエートスが普遍化

プロテスタントの労働神聖化は経営層のみ

- 学制頒布（1872）から1年間で小学校が全国で12588校が建てられ、高価な学費にもかかわらず就学率は50%を超えた。
- 豊富な熟練工の存在は戦前の日本の産業の大きな強みであった。富国強兵の基礎
- その伝統は「現場力の強さ」として現在にも受け継がれている。
- 規格化、機械化、システム化などの未成熟をもたらした。
- 精神主義と目に見える成果のみに注力する伝統を作り上げた。

産業革命 Industrial Revolution



産業革命中期の紡績機
2017/12/26

勤勉革命 Industrious Revolution



二宮尊徳の勤勉革命の象徴) 少年時代の石像 24

目次

- システム構築の基本スキーム
- モジュール化
- 第三次科学革命
- 産業革命と勤勉革命
- 日本の強みを生かすシステム化

$$SV \text{ (システム価値)} = EV \text{ (要素の総価値)} + IV \text{ (統合価値)}$$

- モジュール化は二つの相反する動きをもたらす。
 - ① EV を小さくすることによって IV を相対的に上げる。
要素のコモデティ化 (例 携帯電話)
Integral type
 - ② IV を小さくすることによって EV を相対的に上げる
使いやすいインターフェイス (プラットフォーム) 開発
とその公開 (例 PC)
Modular type

Modular 型・Integral型・すり合わせ型

- $SV=EV + IV$ でIVが相対的に小さいシステムはModular 型、IVが相対的に大きなシステムはIntegral 型である。
- 日本的な「すり合わせ型」（藤本隆宏）はインターフェイスが未熟であるためにEVとIVが分離されず、IVの相当部分をEVを上げることによってカバーする技術である。
- インターフェイスは常に「すり合わせ」を必要とする。ただしそのすり合わせはグローバルな普遍的な視点を持つものでなければならない。「すり合わせ」は決して日本だけのものではない。

新しいシステム化の流れ

- $S V = E V + I V$ において、 $E V$ と $I V$ の調和的な共栄によって $S V$ を増大させること。
- そのためにはインターフェイス（プラットフォーム）に「人間の能力」が発揮できる余地を十分残すこと。
新しい形の「仕上げ工」の役割の定式化
- 人間の能力を十分に生かしそれが伸びるシステムを作ること

Digital Triplet (Cyber + Physical + knowledge) は
重要

ご清聴ありがとうございました。