

デジタル化・感染症時代の サプライチェーン・ものづくり戦略

2020年9月

東京大学大学院経済学研究科 教授
東京大学ものづくり経営研究センター長
藤本隆宏

アフターコロナ時代のシナリオ：平時と有事の繰り返し

現時点では正確な予測はできず、複数のシナリオで考えるしかない

- ① **天然痘型**：現在の各国の感染爆発抑制の諸方策の効果が出始める一方、有効なワクチンや治療薬が開発され、感染とワクチン予防接種による集団免疫効果により、1～2年で感染が収束する。様々なパンデミック(世界的流行)が**十数年**に**一度**ぐらい起こる。
- ② **インフルエンザ型**：仮にインフルエンザのように、ワクチンは毎年更新されるが、カバーしきれず、**数年ごと**に新型のパンデミックが起こる。
- ③ **風邪型**：新型コロナウイルスが、致死率の高い風邪のようなものである場合、**毎年数か月**にわたるパンデミックが繰り返され、世界中で移動制限や外出禁止が恒常化する。ワーストケース

アフターコロナのシナリオ・・・世界規模での人の移動制限が、十数年程度に一度起こる、もっと頻繁に起こる、あるいは毎年起こる、等々、まだ予測できない。

「見えないグローバル災害」は未知の領域

「見える国内災害」(visible domestic disaster) : こえrまでは主にこれ

「見えないグローバル災害」(invisible global disaster) は未知の領域

災害大国日本の中で蓄積してきた「見える国内災害」への対応能力を、
「見えないグローバル災害」への対応にも活用して、国際的にみても高い
サプライチェーンの頑健性 (supply chain robustness) を発揮できるか

見える物理的災害

自社やサプライヤーの「工場の中」が被災する



対策

日頃の予防策と、被災時のサプライチェーン早期復旧能力
(capability of supply chain recovery)



- ① 被災現場の「その場の復旧能力」
(capability of on the spot recovery)
- ② 代替生産の能力
(capability of substitutive production)

「見える災害」の対応策

品目ごとに、期間需要量、在庫量、復旧期間、代替生産準備期間を緊急調査

「在庫量 ÷ 期間需要量 = 在庫期間」で
在庫期間を把握

災害自体で需要急増する製品（医療用品やマスク）
… 需要急増で在庫期間急減… 要注意

サプライチェーン頑健性のための 3つの方策

全体として「サプライチェーン復旧期間<在庫期間」
(供給が止まらないこと)が目標

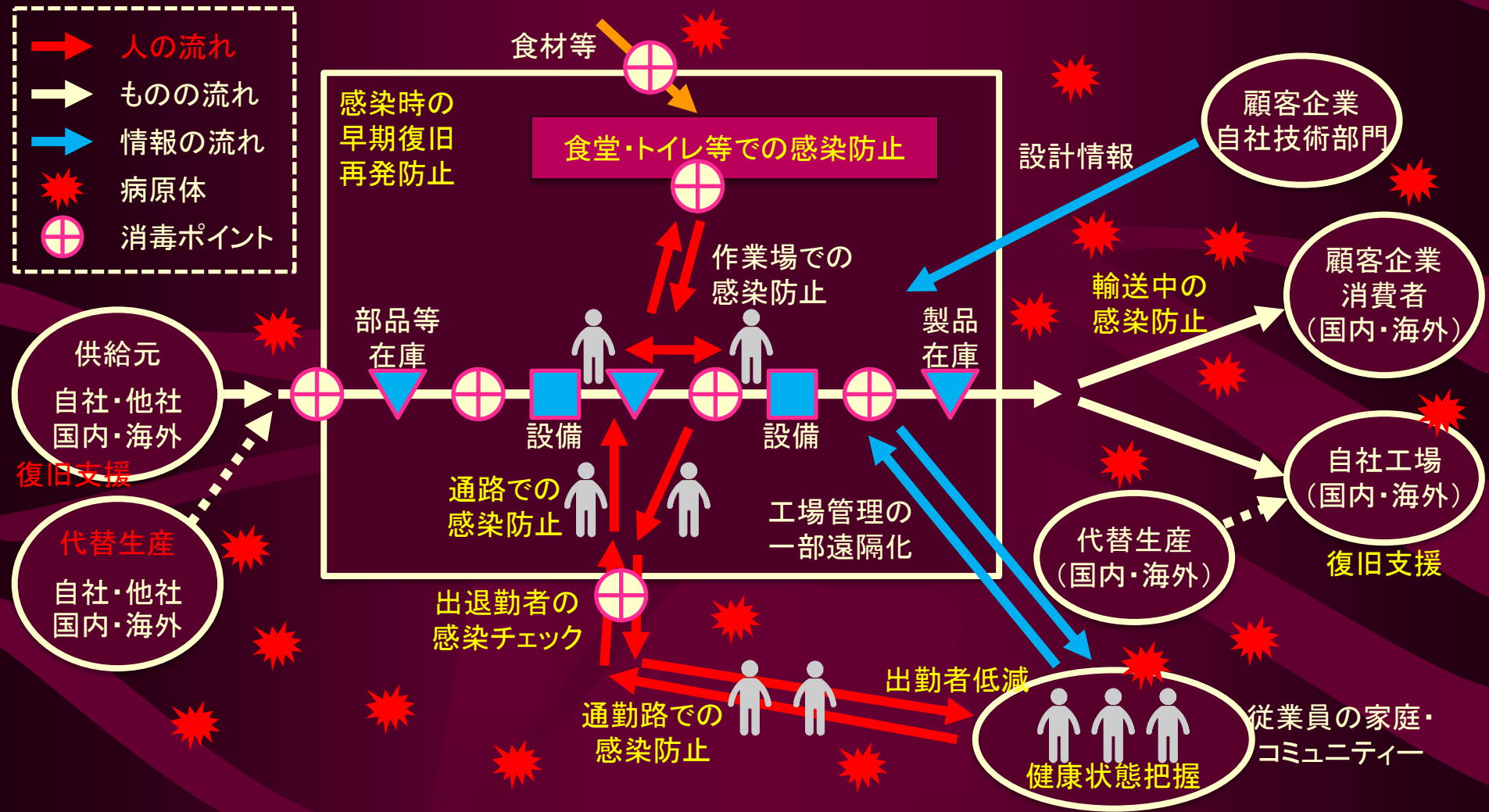
- ① 「被災現場復旧期間<代替生産準備期間」なら
「**その場復旧**」に全力投入(代替生産はバックアップ)
- ② 「在庫期間<被災現場復旧期間」かつ
「代替生産準備期間<被災現場復旧期間」なら、
被災現場復旧まで「**一時的な代替生産**」
- ③ 被災工場の復旧が長期的に困難なら「**恒久的な生産地切替**」
(同企業他拠点優先 → 他企業あるいは内製化の順で検討)

「見えない災害」への対処 — 外に対する防御

- ① 「見える災害」 被災するのは工場の中。対策は中の「復旧」(recovery)
- ② ウイルスによる「見えない災害」 被災しているのは工場の外。対策は、外に対する「防御」(defense)

「水攻めにあった城の防衛」に近い
存続に必要な兵糧は搬入、外からの感染侵入を防ぎ、
中での感染蔓延を防ぐ

感染拡大に対する生産拠点の「防御力」 — 人とものとの情報の流れ図

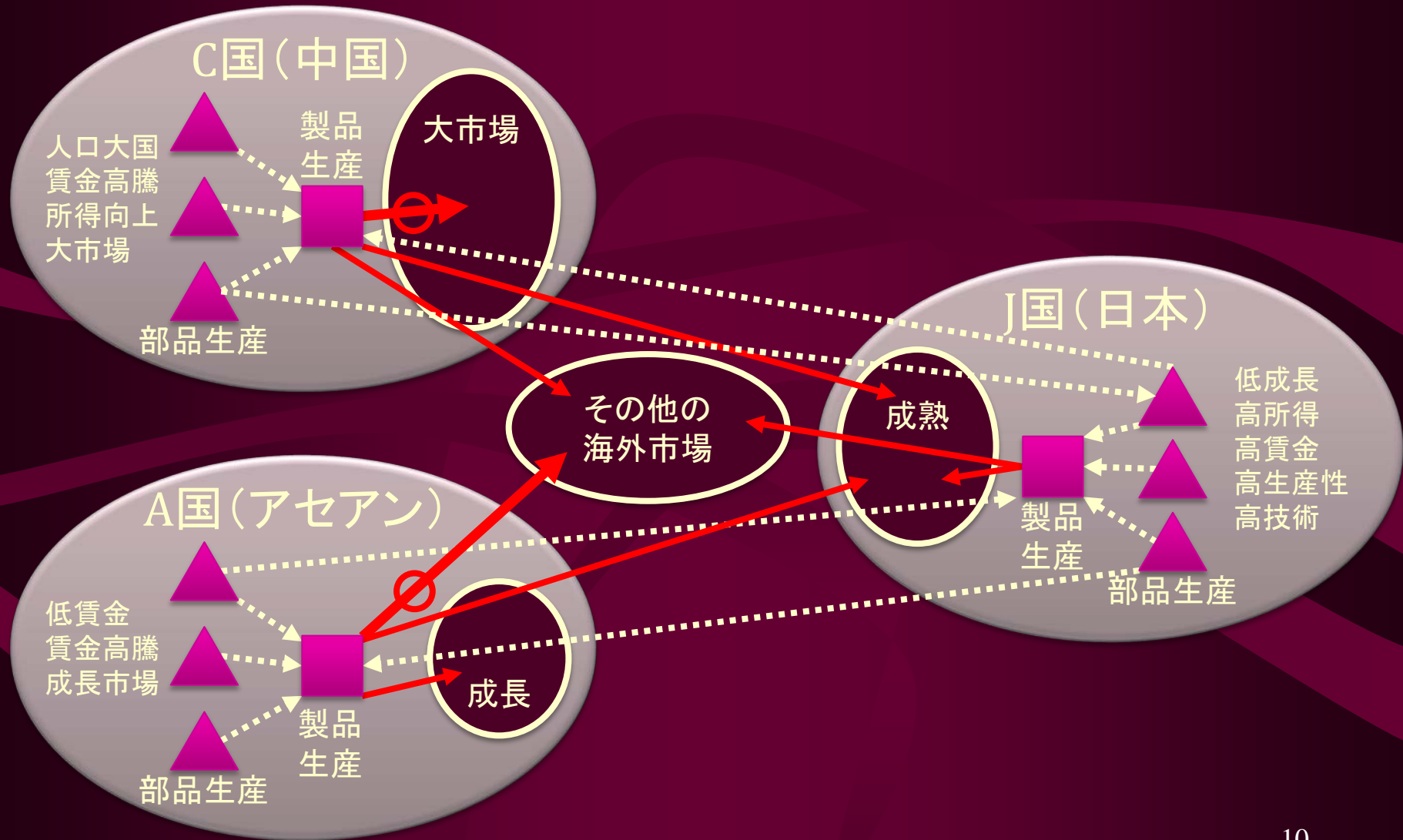


図から：新型コロナウイルス感染に対する工場の防御能力

- ① 工場出入口での出退勤者・来訪者の**出入管理**(感染者の入出構防止)
- ② 工場内に搬入される**資材・食材等の衛生管理**
(汚染資材等からの接触感染の防止)
- ③ 工場内の**衛生管理**(手洗い、消毒、その他)
- ④ 工場内でのクラスター感染の防止のための**物理的距離**や**時差**の確保
(手渡しライン中止、コンベア復活、洗浄消毒工程挿入、ライン数増加、一人屋台方式、自動化・無人化、通路の一方通行化、集合朝礼の停止、コミュニケーションの遠隔化、交替制の時間差の拡大、時差入構による始業時の混雑防止、他)
- ⑤ **出勤者数の低減**(事務職・技術職等の在宅勤務、操業の計画休止・減産、他)
- ⑥ **通勤退勤時の感染防止**(公共交通機関の回避、通勤者ライドシェア等)
- ⑦ 従業員の**在宅時**の健康状態把握・健康管理支援
- ⑧ 工場から搬出される**製品等の衛生管理**(汚染製品の出荷防止)
- ⑨ 工場内で感染者が発生した場合の、迅速な洗浄消毒作業などによる**早期の工場復旧**
- ⑩ 被災した川上・川下の自社工場・サプライヤーの**復旧支援**

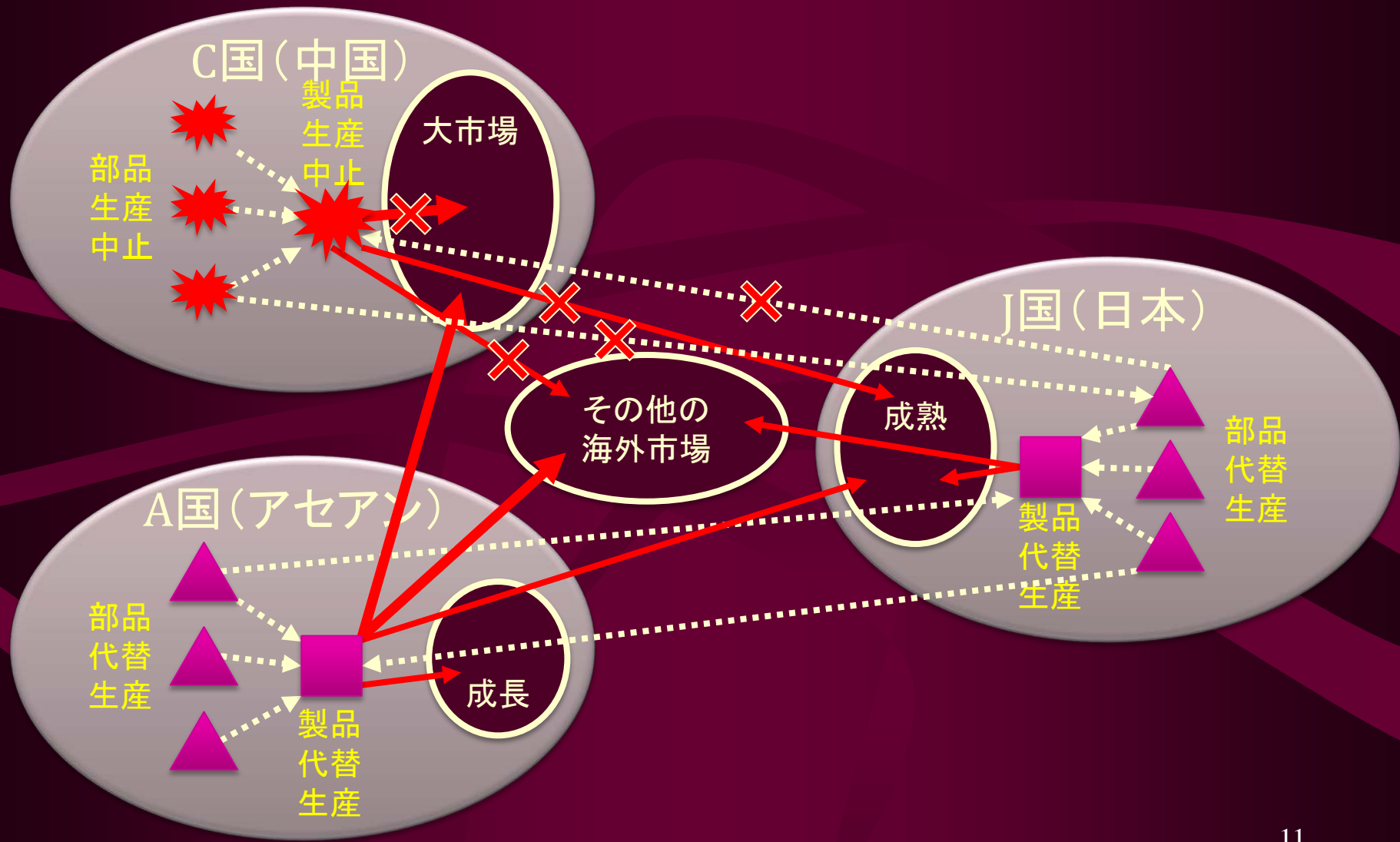
アフターコロナ時代のグローバルサプライチェーン(アジア)

— 平時はあくまでも国際競争力を重視 —



アフターコロナ時代のグローバルサプライチェーン (C国非常時の場合)

— 被災時には、サプライチェーン頑健性モードにスイッチ —



平時は競争力ファースト、緊急時は災害対策(頑健性)ファーストで

平時 業態や企業方針に応じて、① 国際競争力を無理なく維持できるグローバル・サプライチェーン、
② あるいはローカル完結サプライチェーンを維持。

緊急時 現地の復旧能力とともに、被災長期化の場合は、国内に設計情報を移転して、国内代替生産を迅速に開始できるような、代替生産能力、および国内部品等を活用する代替設計能力を、日頃から鍛えておく。
中心となる最もロバストな中核拠点は、比較優位製品であれば日本であろう。

平時と緊急時でモードを迅速にスイッチできる サプライチェーン柔軟性を

- ① 平時がグローバルサプライチェーン優位と判断される場合、無理なローカル化ではなく、いざとなればローカル切替ができる「バーチャル・ローカル」なグローバル・サプライチェーンを構築する。常に国内外の復旧・代替能力を鍛えることが重要
- ② 平時がローカル完結サプライチェーン優位（地産地消）と判断される場合、ある地域が被災した場合は、他国で部品や完成品の代替生産切替ができる「バーチャル・グローバル」なサプライチェーンを構築する。常に国内外の復旧・代替能力を鍛えることが重要

感染症時代のデジタル製造業

基本的な考え方：

- ・**災害は忘れる前にやってくる。**
見える災害(地震、水害、火災...)、見えない災害(感染症...)
- ・**しかし競争は毎日やってくる。**
競争力を維持しつつ、災害復旧力、代替生産力、感染防御力を強化
- ・2020年代の競争環境の基本は、
サステナビリティ、デジタル化、グローバル競争(広義のSDG)
- ・感染症対策により、リモート化、デジタル通信化が進展。「**仮想現場**」の登場
 - ① **勤務場所のリモート化** (例:テレワーク・在宅勤務) → オンライン会議
 - ② **職場内のリモート化** (例:工場内での作業者間のディスタンス維持) → 工程再編
 - ③ **制御のリモート化** (例:生産工程のリモートコントロール化) → 現場の組織能力？

ホワイトカラー(オフィス)とブルーカラー(工場) (1)

(1) ホワイトカラーの仕事: テレワーク化がより容易。しかし課題もある

不完全な情報インプット → 作業(非定型的) → 期待される情報創造アウトプット

作業指示の際、必要な情報インプットがかなり不足

→ 上司、職場仲間、自力での情報補填が必要

情報余力のある人材: 情報インプット不足を自ら補える; 他者の情報インプット不足も補える

テレワークは、

- ① 情報余力のある人材の生産性を高め (他人の面倒見から解放されるので)
- ② 情報余力のない人材の生産性を低め (周囲の情報インプット補填が得られにくいので)、
- ③ 中間管理職の情報処理負荷を高める (情報余力の無い人が周囲より上司に頼るので)

「テレワーク時代はジョブ型で」という単純な話ではない。仕事の流れをよく考えよ。仕事は**ジョブ型**になれば、情報インプットの補填は、本人が行う必要がある(プル型)。情報インプット要求に柔軟に応じる、職場メンバー間の水平的な情報補填の強化が必要。

ホワイトカラー(オフィス)とブルーカラー(工場) (2)

(2)ブルーカラーの仕事:テレワーク化がより困難。現場にいる必要がある

ほぼ完全な情報インプット → 作業(定型的) → 期待される情報転写アウトプット

主な仕事は、手作業や機械操作 ... 設計情報(付加価値)のモノへの直接・間接の転写。

事前の訓練により、必要な情報インプットはほぼ完備 → 異常時には、通報し指示を待つ

異常時1%の情報不足は(班長の指示等で)瞬時に補足しないと生産ラインは直ちに止まる

時間をかけ、複数作業の習得、異常対応、設備点検、品質管理、現場改善、部下の面倒見などの仕事を習得し、多能工化し、多能的なスキルに応じて、報酬と昇進を得る(職能給)

統合型ものづくりのブルーカラーの世界は、簡単にジョブ型、職能給になるわけではない。

新興国(例えば中国)では、感染症を契機に 工場のリモートコントロール化が進む可能性が大。

- パンデミック発生以前からすでに、制御室からフロアを遠隔操作する志向は強かった。
- 感染症時代、この傾向が一気に強まる可能性がある。2階の制御室からSCADAで遠隔操作。
モニターを通じてサイバーフィジカルシステム(CPS)を見ているのは2階の遠隔操作者のみ。
- 工場フロアには、異常に対して瞬時に自発的に動ける人間集団は想定されない可能性あり。
モジュラー型製品の、シンプルな流れの大量生産工場が指向される可能性が高い。
- したがって、異常にも改善にも対応できる作業集団をフロアに置く、日本に多い変種変量工場とは、工場のパターンの違いが大きくなる可能性もある。

しかし日本の国内優良工場では、異なる展開が予想される

「設計の比較優位論」に基づくなら、現場の作業集団の統合型組織能力が強い日本の優良現場は、調整集約的な製品や工程において、グローバルな競争優位を維持する可能性がある。

大競争に加えて、大災害に対する経験値も相対的に高い日本企業の国内中核工場は、蓄積された。

裏の競争力、災害復旧能力、代替生産能力、感染防御能力により、能力移転の中核拠点となりやすい。

他方、デジタル・マニュファクチャリングにおいては、半導体の集積度上昇（ムーアの法則）により、新しいICT技術がより安価に提供されるようになる。... サイバーフィジカルシステム(CFS)、IoT。

ローカル5G通信技術、AI(人工知能)、量子コンピュータ、各種センサー ...

しかしこれらのICT技術は、あくまでも、「良い設計のよい流れ」を作るための手段である。

これらのICT技術は、現場の作業集団の代替ではなく、その組織能力の増強に使われるだろう。

上空・低空・地上のアナロジー(ICTとFAの例)

重さのない世界

上空

①ICT層(サイバー)

インターネット、スマホ・システム、
ソーシャルネットワーク
セキュリティ、帯域保証など課題
オープン・アーキテクチャ、プラットフォーム
アップル、グーグル、アマゾン、フェイスブック

インターネット、AI
クラウドコンピューティング
ERP

低空

③ サイバーフィジカル インターフェイス層

高度な情報解釈・翻訳・蓄積機能や
選択的透過機能を持つ工程別スパコン？
工場・工程の超インテリジェント化
インダストリー4.0の主戦場？
GE, IBM, シーメンスなど(日本は?)

コントローラ(PLC)
MES
産業用Ethenet
エッジ/フォッグ
コンピューティング

重さのある世界

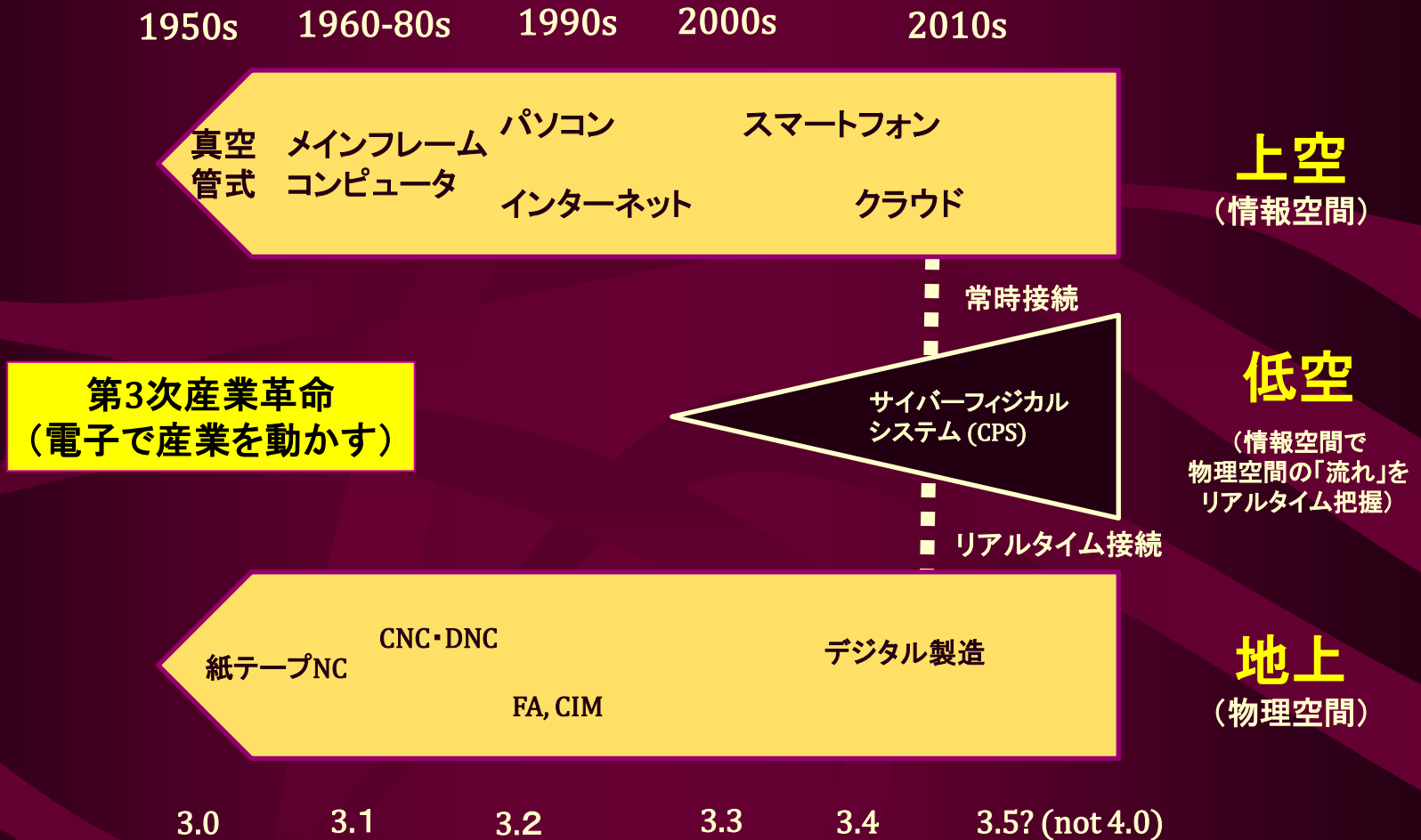
地上

② 現場・現物(フィジカル)FA

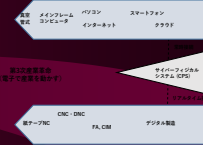
リアルタイム情報による「流れ」の最適化と改善
迅速なフィードバック、自動化、トヨタ式、TPM
現場の言葉で使いこなす「一回転寿司型IT」
クローズド・アーキテクチャ、製品勝負
トヨタ、VW, ..通常の製造業

フィールドバス
センサー、
アクチュエータ、
FA機器

2010年代には、サイバーフィジカルシステムと「低空」が出現した



2010年代は「低空戦」の準備期間であった



第3次産業革命：電子が産業を動かす時代。そこでは、2系統のコンピュータが、別々に進化してきた・・・

- ①「上空」・・・ビジネスコンピュータ(メインフレーム→パソコン) ... InputもOutputも情報空間に留まる
- ②「地上」・・・ファクトリーコンピュータ(FA:紙テープ:NCとPLC) ... 物理空間のモノをコントロール

2010年代に上空と地上の融合が本格化。「低空」領域の出現
中核技術は「サイバーフィジカルシステム(CPS)」、デジタルツイン、IfT(Information from Things)

独のインダストリー4.0(本当は3.5?)も、日本のソサエティ5.0(本当は4.5?)も、CPSが中心コンセプト

ところが、2010年代、本格的なCPSに必要な技術や需要の準備に10年以上がかかった。
ムーア法則停滞で、CPSモジュールのコストが下がらず、企業も投資に慎重。流行と幻滅のサイクル
その間「今度こそ本命！」との流行の繰り返しであったが、十分なスケールのものは結局出なかった。
(Smart Grid, 3D-Printer, I4.0, S5.0, IoT, AI, 中国のメモリー半導体需要、Data Center, 自動運転・・・)

しかし2020年代、そろそろ離陸ポイントに来るか？ スマート製造がその先鞭に？ 低空戦はこれから

供給側: 10年で100分の1の微細化(ムーア法則継続)の技術革新が再起動。
極短紫外光(EUV=Extreme Ultra Violet)露光技術革新で2030年までムーア法則継続へ(線幅1ナノへ)

需要側: 10年で10倍の需要の探索: CPSモジュールの価格低下で、スマホの次の半導体の大需要は、
設備金額の高い順に、スマート製造、スマートモビリティ、家庭用スマートエネルギーの順？(安井公治説)

「低空戦」の動向 グローバルとローカルのバランス

「上空企業」(e.g., GAFA)も「地上企業」(e.g., GE, Siemens、三菱電機)も参入可

「上空」の広いグローバル・ネットワーク力と、
「地上」の深いローカル知識、アセット知識のバランスが鍵 (GE, UBERの教訓)

シーメンスはアセット知識を持つDigital Manufacturing に絞り、M&Aも抜け漏れなく
行い、現状で成功(Digital Manufacturing 高利益、中国50%、その80%はハード)

GEは、コンセプトは素晴らしいが、自らのアセット知識を過小評価? 出遅れ。

日本では、設計情報系(PLM/NC等)と管理情報系(ERP/MES/PLC等)の標準化が
課題。M社、F社、O社、H社など「薩長連合前の薩長」状況か。

うまく「同盟」が出来れば、欧米勢と「天下三分の計」が可能か。

ムーアの法則続行で、日本の機器メーカーにもチャンス(レーザー、電子描画、真空等)

5Gはローカル5G先行? クローズド、ワイヤレスマシン化、柔軟なレイアウト変更
などで、現場継続改善が得意な日本の優良ものづくり企業は有利?

低空戦の本格化は2020年代か

- 低空層の中核システムは、地上とリアルタイム、上空とオールタイムでつながり、地上の動きを写し取るデジタルツイン、サイバーフィジカルシステム(CPS)
CPSには接続デバイスのCPSモジュールが要求され、そこにはCPU, GPU, メモリー、5Gチップ、AIチップ、アンテナなどが集結する必要がある(安井2020)。
- 特に5G・AIチップには最先端の半導体が必要。ムーアの法則の続行が必須。
しかし2010年代の大半、ムーア法則は減速。トランジスタ当たりコストは下がらず。
このため、CPSモジュールのコストも下がらず。CPS導入も進まない。
- しかし2018年ごろから、技術的隘路であった露光装置のEUVレーザー技術に革新
ムーア法則が復活、量子コンピュータ実用化も含め、CPSの供給側の隘路は緩和
- 需要側でも、スマートフォンの次の大需要がなかなか見つからない。
2010年代には、スマートグリッド、3Dプリンター、インダストリー4.0、自動運転車が
「次はこれだ」と喧伝され、流行と幻滅のサイクルを繰り返した。
- しかし、ムーア法則の再起動で、CPSモジュール価格が、数十万円→数万円→数千円
と下れば、購買力に応じ、デジタル製造→自動運転車→家庭向けスマートグリッド
といった順番で、寝ていた潜在需要が顕在化の可能性(安井2020)。
供給・需要の隘路が緩和、低空層の競争本格化は2020年代か (⇔2015年の4.0誤報)

AI・量子コンピュータをめぐる国際的な陣取り合戦

AIもコンピュータも、タイプにより得意領域が異なる。日米欧も得意領域が異なる

適用問題 論理的推論	マッチング問題	コントロール問題	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> 米国プラットフォーマーが強い「</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> 日本の優良製造現場が強い「</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> 欧州のコンソーシアムが強い「</div> </div>
Induction 帰納的推論	ビッグデータ・機械学習AIによるマッチング向上と資産稼働率向上 米メガプラットフォーマーが強い領域	現場の熟練者の技能 日本の製造企業が従来得意としてきた領域 その測定と形式知化が課題	何故できるのかわからないが結果的に問題は解けている (ヒューリスティックスの発見)
Abduction 仮説構築的推論	人間が主役 しかし量子コンピュータAIがかなり大きく支援できる？	人間が主役 (特に現場集団) しかし量子コンピュータとAIがある程度は支援できる？	帰納法→演繹法へのスイッチ
Induction 演繹的推論	最適組合せ問題 (最適ルート) 情報科学的接近 (OR) 効率的アルゴリズムの設計 超大量演算：量子コンピュータが活躍？	物体の動作シミュレーション バーチャルエンジニアリング 欧州勢が時間をかけ準備 大量演算ならスーパーコンピュータ活躍？	問題の定義(ルール)は明確だが、どうやったら解決できるかわよく分かっていない。 (良いアルゴリズムの設計)
	どの組合せが最適か	どの軌道が最適か	

結論:「良い設計の良い流れ」の基本は変わらない

目的と手段を混同しないこと: 生産においても開発においても、付加価値(設計情報)の良い流れを作ることが目的。

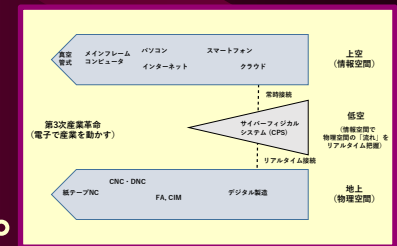
IoT、4.0、サイバーフィジカルシステム、ロボット、AI、量子コンピュータ・・・すべてその手段。

要は、現場(できれば広域の現場)で働く人々が、現場のモニター(コックピット)や白板で、設計情報やものの流れに関する情報を、できるだけリアルタイムに近い形で把握し、共有し、計画とのずれを知り、30分後、1時間後、4時間後に起こりうる「渋滞」を予知し、現場内・現場間の助け合い(できるだけ広域の助け合いも含む)につなげること。

それによって、稼働率が高くても「渋滞」を起こさない、擦り合わせ型製品の変種変量工程を進化させること。

IoTの形態や有無に関わらず、目指すべき方向はこれであろう。

要するに、TPSとCPS(サイバーフィジカルシステム)の融合である。



参考文献

- ・製品開発の基本的「成功パターン」とは何か(自動車) → 藤本・クラーク『製品開発力』ダイヤモンド社
- ・効果的製品開発手法の異なる産業間での比較(コンピュータ、医薬、他)
 - 藤本・安本共編著『成功する製品開発』有斐閣
- ・トヨタ自動車の強さの源泉は何か? → 藤本『生産システムの進化論』有斐閣
- ・製品アーキテクチャのコンセプトを戦略に活かすこと
 - 藤本・武石・青島編『ビジネス・アーキテクチャ』有斐閣
- ・文系・理系の溝を埋めることをねらった生産管理・技術管理の教科書
 - 藤本『生産マネジメント入門(上)(下)』日本経済新聞社
- ・自動車産業はなぜ強かったのかを問う同時代史 → 藤本『能力構築競争』中公新書
- ・ものづくり現場発の戦略論の提案 → 藤本『日本のもの造り哲学』日本経済新聞社
- ・対中国戦略へのアーキテクチャ論の応用
 - 藤本・新宅編著『中国製造業のアーキテクチャ分析』東洋経済新報社
- ・サービス業にも広がる「開かれたものづくり」 → 藤本他『ものづくり経営学』光文社新書
- ・日本の強いプロセス産業への応用 → 藤本・桑嶋編『日本型プロセス産業』有斐閣
- ・現場発の国家政策・地域振興・産業活性化 → 藤本『ものづくりからの復活』日本経済新聞社
- ・複雑化する製品・工程・人工物に企業はどう対応するか
 - 藤本編『「人工物」複雑化の時代』有斐閣
- ・地域インストラクタースクールへの取組 → 藤本・柴田編『ものづくり成長戦略』光文社新書
- ・ものづくり現場の視点から見た日本産業論 → 藤本『現場主義の競争戦略』新潮新書
- ・グローバル経営とものづくり経営を両立させるITシステム → 藤本・朴編『ITを活かすものづくり』日経出版社
- ・2010年代のものづくり現場の再評価 → 藤本・新宅・青島編『日本のものづくりの底力』東洋経済新報社
- ・まずは現場の潜在力を正確に評価できる本社能力を → 中沢・藤本・新宅『ものづくりの反撃』ちくま新書
- ・上空と地上をつなぐ知恵を用いた現場発の企業戦略論 → 藤本『現場から見上げる企業戦略論』角川新書