

共通理解フレームワークとしてのサイバー・フィジカル・システムズ

中島 震^{1,2,a)}

概要： サイバー・フィジカル・システムズ (CPS) を、公共政策・産業政策ならびにソフトウェア・パラダイムの両面から鳥瞰する。「都市・アーバン」をフロンティアとするビジョン創造からの政策に関わる概念であることを述べる。ソフトウェアのパラダイムとしては、フィードバック・ループを中心とした見方に基づいて、ディペンダブルなシステムの開発に焦点がある。そして、第2次経済革命が蒸気機関から始まったことに対比して、CPS が第3次経済革命の端緒となることを論じる。

キーワード： 第3次経済革命, ソフトウェア・ディペンダビリティ, Industrie4.0, IoT, 公共政策.

1. はじめに

ようやく「ソフトウェア」が世間で認知されるようになってきた。こう云うと奇異に感じるかもしれない。自動車は多数のコンピュータを持ち、制御プログラムが稼働する。何故か、電子化と呼び、ソフトウェア化とは云わなかった。この状況が2013年になって大きく変化する。ドイツ発のIndustrie4.0 [2] は「モノづくり」の我が国を揺るがした。ソフトウェアの技術を活用する「考える工場」が製造の世界を変える。北米では民間主導のIndustrial Internet Consortium (IIC)^{*1}がIndustrie 4.0 と似た狙いを持つ。IICが技術系の動きである一方、Porter [21] はIoTによってビジネスが変革すると論じる。このように、経営学の分野から、ソフトウェアの重要性を指摘する声が聞こえてくる。テクノロジー側への黒船襲来だ。

今までも、さまざまな製品がソフトウェア化してきた。それでも、このような黒船は来なかった。何故、今、ソフトウェアなのだろうか。その答えをCyber-Physical Systems (CPS) に求めたい。2006年に提案されて以来、CPSとは何かについて、さまざまな理解が試みられた。どれが正しくて、どれが間違いと決めるものではない。何でも吸収する便利なキーワードと云える。実際、U.S.のNSFがスポンサーとなっているポータルサイトCPS-VO^{*2}は広範な技

術を含む。Industrie 4.0 も IIC も IoT も何もかも CPS と云いた気な様子を醸し出す。

本稿はCPSという言葉が誕生した経緯を振り返り、産業のソフトウェア化とCPSがどのように関わるかを整理する。そして、多様なステークホルダーがソフトウェアの重要性を確認する拠り所となる共通理解フレームワークとしてCPSを考える。つまり、CPSが技術のキーワードで終わらず、産業政策やビジネスの変革を象徴するキーワードになっていることを論じる。CPSに関する総合的なオピニオン・ペーパーである。

2. スマートな組込みシステム

「スマート」なシステム・製品という視点から、IoTとCPSの特徴を概観する。

2.1 IoT

ここまで略語のIoTをそのまま用いてきた。TはThingsを意味し、コンピュータ以外の装置機器を指す。一方、Iは微妙にニュアンスの異なる2つの言葉の割当が可能であろう。ひとつは、Interconnecting Nets of Things。従来、さまざまな通信機器が個別発展し、相互に接続することが難しかった。たとえば、電話網を使ったFAXとコンピュータ通信などは切り離されており、利用者自らが互いの通信網(Nets)をつなぐ労をとっていた。また、家庭電化製品が「電子化」(実はソフトウェア化)されると共に、ホーム機器通信網も発達した。さらに、多様なセンサーデバイスの登場によって外界情報を収集・活用する仕組みとしてセンサー通信網が整備された。これら個別に発展してきた多

¹ 国立情報学研究所
NII, Hitotsubashi, Chiyoda-Ku, Tokyo 101-8430, Japan

² 総合研究大学院大学
SOKENDAI

^{a)} nkjm@nii.ac.jp

^{*1} <http://www.iiconsortium.org/>

^{*2} <http://cps-vo.org/>

種多様な通信網を統合的に接続するという意味での IoT である。

2つめは、Internet of Things. ここで Internet とは、コンピュータ・ネットワークとして発展し世界的に整備・運用されているグローバル・インターネット (The Internet) のこと。上記に述べた多種多様な装置機器通信網をグローバル・インターネットに接続するという意味での IoT. テクノロジーからみると、前者の IoT が整備されることを前提として後者の IoT が実現する。さらに、IoT という言葉には、その先に、装置機器がクラウド・コンピューティングと連携するという世界像が描かれている。IIC や Porter の定義は、この2つめの IoT をベースとしている。

IIC が強調する Industrial という形容詞には、電子メール・Web・SNS などの個人的な活動を豊かにしたグローバル・インターネットの産業利用を進めたいという思いが込められている。以下、Porter[21] を参照して、この流れの考え方・期待を紹介する。

Porter は IoT によってネットワークにつながる装置機器を「スマートな製品」と呼ぶ。監視・制御・最適化・自律実行の4つの発展段階を定義する。クラウド・コンピューティングの中に「埋め込む」ことで、製品提供側による遠隔監視や利用者ごとのカスタマイズを可能にする。さらに、クラウド・コンピューティングを基本とするビジネス・エコシステムに埋め込むことで、さまざまなサービスを有機的に統合することができる。IoT の直感的な理解は、外界の情報をセンサー系でグローバル・インターネットの吸い上げというもの。一度、情報を取り込むことができれば、クラウド・コンピューティングの膨大な計算能力を活用して、さまざまな解析を施すことが可能になる。いわゆる、ビックデータの世界につながる。

2.2 CPS

CPS と IoT は似たテクノロジーと理解されることもあるが、異なるものと考えられるほうが、CPS の要点であるフィードバックの重要性を見落とさなくてすむ。

CPS の良い具体例は、車載ソフトウェアと云われる。制御系はセンサー入力情報をもとに制御ロジックの計算を行い、その結果をアクチュエータを通して制御対象装置に働きかける。一連の処理を期待される時間内で完了させ、このフィードバック・ループを続ける。一方、機能の多様化と実現機構の「電子化」に伴って、自動車は膨大な数のコンピュータ (ECU と呼ぶ) を持つリアルタイム分散システムと理解されるようになった。もとは機能特化した ECU を次から次へと搭載した。ECU 間の情報連携が必要になると共に、個別スター配線の信号ケーブル量が膨大になる。人間が乗る空間を物理的に圧迫する。これを回避することを目的として、車載ネットワークのバス化が必然となった。同時に、ORB 等の分散オブジェクト基盤と同様な発想で

プログラムのモジュール化を試みる*3。

分散ソフトウェアのアーキテクチャとしては妥当であるが、車載プログラムはリアルタイム性を要求する。リアルタイム性を担保するネットワーク化フィードバック系の構成という技術課題が登場した。車載ソフトウェアで生じた課題は、CPS の3つの挑戦課題 (第4.1節を参照) にうまく整理されている。

本稿は、CPS は IoT を含む一般的なコンピューティング・システムの仕組みを指すと考える。制御の基本はフィードバックである。つまり、IoT はセンサー入力という一方だが、CPS ではセンサー・制御の計算・アクチュエータの双方向フィードバックが基本機構をなす。

3. 第3次経済革命

CPS が代表するソフトウェアによる変革は、1970年代から続く大きな流れの中で考えるべきだろう。

3.1 経済活動の駆動力

Industrie 4.0 は第4次産業革命と訳される。ここで、第1次産業革命は18世紀半ばに英国で始まった軽工業、第2次は北ドイツと北米に波及し20世紀初頭から勃興した重化学工業と大量生産である。第3次を1970年代から進められた工場オートメーション (FA) とし、これに続く第4次ということ。実際のところ、FA ならびに Industrie 4.0 は工場の生産方式の革命である。経済活動の歴史からみた意義はイングランドの産業革命と大きく異なる。18世紀半ば、スコットランドにはアダム・スミスが居た。

新制度派経済学による歴史研究 [18] では、経済活動を2つの大きな変革からなるとする。第1次経済革命は、約1万年前、石器時代に起こった。狩猟や採集から農耕・定住生活への移行である。自然から与えられた恵みを受動的に得ていた人類が、農耕という積極的な働きかけによって豊かな収穫物を手に入れるようになった。人口が増加し、経済活動を支える様々な制度が作られた。

第2次経済革命は、前述した世界史での産業革命にはじまる。いわば生活経験の産業化であった農耕活動は、この時期に、自然法則の産業化に移行した。17世紀のニュートンを代表例として、英仏を中心に自然哲学が発展した。産業革命の契機といわれるワットの蒸気機関は熱現象を動力として使う。つまり、熱力学と制御の方法の産業化である。19世紀になって、このような自然現象への理解が大きく進展した。たとえば、電磁気学で有名なマックスウェルは熱現象による制御の安定性問題を扱っている。

この時代、現代的な自然科学は未だ存在しない。科学を専門に追求する人を意味するサイエンティスト (scientist) という英語が発明されるのは19世紀の半ばになる [14]。

*3 ドイツの産学コンソーシアム AUTOSAR 等

表 1 比較

	第 2 次経済革命	第 3 次経済革命
時期	19 世紀半ば ~ 1970 年代	21 世紀初頭 ~
産業の基礎	自然現象, 自然科学	人工的な規則, 論理
未来を語る言葉	「~になる」(受動的)	「~にする」(能動的)
適用限界	自ずから明らか (自然法則が規定)	人が決める (論理・規則が規定)
製品の寿命	故障・劣化	機能の陳腐化, バグ
リスク低減	事後検査, 定期検査	事前のデバッグ/バグリテ設計
ビジネスの形	垂直統合・巨大企業 1940 年体制 [17]	水平分業・エコシステム オープン・クローズ戦略 [19]
主流の思考法	モノ志向・還元主義	システム思考
制度支援	知財権	知財権+???

これを現代的な自然科学の誕生と考えたい。

さて、まさに重化学工業は自然科学の産業化だった。さらに、電力の産業利用が続いた。第 1 次経済革命が個人の体験や目にみえるものが経済活動を駆動した。第 2 次経済革命は電気に代表される目に見えないもの、自然法則という知識を活用することが産業化に必須な時代だった。この第 2 次経済革命の成功は 20 世紀終盤まで続いたと考えられる。21 世紀に変わる頃から、次世代の変革が始まる。ちょうど、日本の時代で「失われた 20 年」の頃、欧米を中心に第 3 次経済革命に突入したと云われる。その象徴的な黒船が Industrie 4.0 である。

3.2 オープン・イノベーション

第 3 次経済革命と呼ばれる大きな変革、このルール変更を起こしたのは、ソフトウェアである。表 1 に、第 2 次と第 3 次経済革命の違いを整理した。産業の基礎が異なることから、さまざまな点で、今までの方法が適さない。このようなソフトウェアの役割はイノベーション論でも議論されている (例えば [24] 序論)。

アダム・スミスは「見えざる手」という言葉で、需要と供給の市場バランスを表現した。1970 年代チャンドラーは、垂直統合型企業の経営マネジメントを「見える手」と呼んだ。自社 R&D 活動が産み出した技術をベースに、大量生産によって規模と範囲の拡大・成長を遂げる。その後、脱垂直統合・市場を通じる協働というオープン化の時代を迎えた。1990 年代半ば、ラングロアは、チャンドラー型企業の経営マネジメントが行き詰まっていることを「消え行く手」と述べた。さらに、21 世紀になって、小川 [19] は、オープン・イノベーションの時代、新しい形の経営戦略を「伸びゆく手」と名付ける。「消え行く手」のような受け身の経営ではない。積極的に標準化を主導する企業戦略である。

表 1 に合わせてみよう。「見えざる手」を経て、第 2 次経済革命が勃興し、その最盛期に「見える手」を迎える。その後、「消え行く手」と共に時代が移り、「伸びゆく手」の第 3 次経済革命に突入する。以下、モノづくり立国として世界経済に貢献してきた日本の状況を概観し、国家 (ドイツ) が主導する「伸びゆく手」としての Industrie 4.0 の真の脅威を考える。

野口 [17] は、モノづくり立国の成功・高度経済成長の要因を分析した。この時期、先端産業分野は重化学工業を中

心とするもの、自然科学の産業化の時代だった。大組織内部での分担と連携を中心とする垂直統合型が生産効率を発揮する分野であり、「見える手」の経営マネジメントが最も良く機能した。さらに、これを支えたのが、野口が「1940 年体制」と呼ぶ戦時中に確立された経済システムである。組織内に蓄積するノウハウが擦り合わせによる改良製品を産み出した。結果、右肩上がり成長を示すが、1980 年代後半に頂点に達した後、1990 年代は崩壊したバブルの後始末に翻弄される。この頃、欧米の環境が大きく変化する一方、日本の製造業が対応できなかった。ICT 革命のおかげで情報処理コストと通信コストが劇的に低下し、小回りのきく小組織・ベンチャー企業の登場を可能にした。いわゆる、シリコンバレー物語*4 であり、垂直統合から水平分業へ、というオープン化、「消え行く手」の時代になる。

オープン・イノベーションの標準的な考え方は、ビジネス・エコシステムの形成、技術市場での協働であり、自社の技術に加えて他社の知識・リソースを活用することを前提とする。シリコンバレーから工場が消え、製造は遠くアジア・中国で行われる。自社の技術を知財権で守る一方、オープン標準によって仲間をつくる。独禁法に抵触しないように、オープンなコンソーシアム活動を通して協働する。オープン標準が規定する「インタフェース」に合わせてコンポーネントを製造すれば広範な製品に組込まれる。ITC 革命の頃といえども、製品を電子化と呼ぶような装置主体の考え方が通用する時代は、知財権とオープン標準が良い武器だった。ところが、製品そのもののソフトウェア化によって、「伸びゆく手」がオープン・イノベーションを支配する時代になる。第 3 次経済革命への突入といえる。

「伸びゆく手」は小川のオープン&クローズ戦略を端的に表す言葉 [19]。以下、仮想的なオープン・ソースのスマホ基盤ソフトウェアを例として、オープン&クローズ戦略の基本的な考え方を説明する。

オープン・ソースなので、自前で開発したモバイル端末装置にスマホ基盤ソフトウェアを搭載すれば、ただちに「スマホ」ビジネスに参入できる。以降、新たな機能の版がリリースされる都度、改訂版をポーティングすれば、ソフトウェア開発への投資をせずに、最新機能のスマホを市場に投入し続けることが可能になる。

現実には、ポーティングに際しては、プログラム・テストによって信頼性を保証しなければならない。時にはモバイル端末装置の改訂も行うだろう。プログラムや装置を改訂する際に行うプログラム・テストは新規部分のテストだけではすまない。従来から提供する機能の動作確認を行う回帰テストを伴う。規模が大きくなり、さらに、頻繁に改版が行われると、プログラム・テストの最中に、次期版がリリースされるという事態さえまねく。

*4 シリコンバレー物語が神話であることは第 4.3 節で触れる。

スマホ基盤ソフトウェアの提供元は、この時間差を利用することで、ビジネスを優位に進めることができる。

ひとつの方法として、改版を行わないという判断もあり得るだろう。ある時点から、自社専用スマホ基盤ソフトウェアの開発を枝分かれさせる。そうすれば、自社の判断で改訂計画を立案できる。ところが、この仮想的なスマホ基盤ソフトウェアの契約に、「無料で利用しても良いが、その改版権は提供元に帰属する」のような項目があったら何が起ころうか。開発の枝分かれができない。このような許諾契約によって、提供元は利用側のビジネスを支配できてしまう。

オープン&クローズ戦略とは、ビジネス・エコシステムの中で、外部に公開するものと自社内で保持するもののバランスをとることで、オープン・イノベーションでの協働でありながら、ビジネスの主導権を常に握ろうとする経営戦略。ここで「伸びゆく手」は、知財権・オープン標準やソフトウェア基盤だけでなく、利用許諾の契約も関わる。そして、この戦略は、ソフトウェア化した製品の領域で端的に見られる。Industrie4.0の真の脅威は、後発の参加者が、提供側の「伸びゆく手」に翻弄されることなのだ。

4. 公共政策

4.1 CPS 誕生の頃

CPSは2006年頃、NSFのGillによる造語である。ICTのビジネスでもなく、学術研究でもなく、公的研究資金の計画立案・配分機関から出てきたことに、CPSの特殊性がある。これに先立つ欧米の状況（たとえば[24]第1章参照）を整理しておくことでCPS出現の理由を窺い知ることができよう。

欧州では1984年のルクセンブルグ宣言からイノベーション政策のひとつとして、フレームワークプログラム（FP）を主導してきた。1998年に始まったFP5では組込みシステム開発（ESD）の研究開発分野でARTISTプロジェクトが実施された。ARTISTは、Network of Excellence（NoE）というカテゴリで、研究開発ロードマップの整備、研究課題の提示による公募、教育ならびに産業界への技術移転といった幅広い活動を行う。2005年に刊行されたARTISTロードマップ[4]は、ESDソフトウェアの高信頼化技術に関する良質の研究サーベイ論文集になっている。

2000年のリスボン戦略でFP予算の大型化を実現する。ESDの分野では、FP5のARTISTの発展形であるFP6のARTIST2、FP7のArtistDesignが欧州におけるESD研究開発のコントロールタワーの役割を担う。2007年からのFP7で、2つの方向でESD研究開発を強化する*5。第1に産学連携を強化し市場指向を明確化した。具体的

には、Joint Technology Initiative（JTI）という枠組みで、ARTEMISを発足させた。ARTEMISは参加する民間企業とのマッチング・ファンド形式をとり、産業界への実用化研究を目的とする。一方、FP7のICTでのESDは基礎的な学術研究を含む。研究テーマ採択に際して、ARTEMISとの棲み分けを明確化する。第2に、ARTIST研究者と北米研究者の協調・共同研究を推進する。

この欧州の動きを背景に、U.S.で登場したキーワードがCPSである。2007年に公表されたPCAST答申書*6の第4章でCPSの重要性が指摘されている。2008年には技術的な観点からの補足レポート*7が公表された。

CPSの狙いは、J. WingによるCPSフラワーに、うまく要約されている[27]。花芯に基礎研究を、多数の花びらに多様な産業セクターを配置する。そして、産業界・政府（軍を含む）・学術界が、花芯から花びらまでの、どの部分の研究開発を担うかを図示したもの。さらに、共通する（花芯に相当）挑戦課題を、(1) 離散と連続の共存、(2) 大容量・不確実なデータ、(3) 大規模ネットワーク化、と整理する。花びらには、自動車・医療・航空・鉄道など、ARTEMISと同様な産業応用を想定する。

CPS研究応募の注意点として、「提案者がCPSを定義する」とことと云う。つまり、CPSという大きな傘テーマの下、そのビジョンの具体化を研究活動の一部に含める。2009年には公表されたホワイトペーパー*8では、ARTEMISを意識して産学連携の仕組みについて論じた。より強固な産学連携の必要性をうたい、基礎研究と製品化研究を同時並行・両輪で進めることの重要性を説く。興味深いことに、このレポートには「Japan」という単語が一度も出現しない。1980年代の知識情報処理・ICOTならびに1990年代の半導体・スパコン摩擦の時代に、U.S.の論調が対日を意識していたことと比べると、CPSの分野で日本の影が薄いことがわかる。

以上をまとめると、CPSは2つの意味での同時進行を強調していることがわかる。新しい課題・ビジョンの発見とその解決技術に関して基盤技術と応用技術を同時進行させること、産学連携を推進するという観点から基礎研究と製品研究を同時進行させること。欧州のESDやARTEMISならびに北米のCPSに共通することは、産学の新しい連携によって知識・技術と同時に市場を創出するという点にある。

なお、欧米では研究者の交流が活発である。たとえば、2005年からNSFのTRUST（Team for Research in Ubi-

*5 FP7の状況については文献[5]に概要が報告されている。この報告には米国の状況についての記載もあるが、「神話」にしたがった記述が多い。神話が神話であることは第4.3節を参照のこと。

*6 President's Council of Advisors on Science and Technology : Leadership Under Challenge: Information Technology R&D in a Competitive World. August 2007.

*7 Cyber-Physical Systems. Executive Summary, Prepared by the CPS Steering Group March 6, 2008.

*8 Industry-Academy Collaboration on Cyber Physical Systems (CPS) Research White Paper V0.1, August 31, 2009.

uitous Secure Technology) と EU の IST が支援するワークショップが実施されている。研究者レベルでの相互交流は活発に行われていることは言うまでもない。

4.2 北米から欧州へ

U.S. における CPS は、コンピュータ科学を含む工学分野への研究支援という形で具体化された。CPS フラワーに示されているように、さまざまな産業・工学がソフトウェア化するからである。その代表例として、CMU の Computational Modeling and Analysis for Complex Systems (CMACS) がある。ハイブリッドシステムの形式検証に関わる研究が主なテーマであり、制御工学の研究者との共同プロジェクトとして立ち上げられた。

U.S. の CPS 関連活動は教育カリキュラムの整備をひとつの大きな目標としている。コンピュータを専門としない他工学分野の専門家が自身の応用領域でソフトウェア技術を活用する能力を身につけることが必須だからである。U.S. の雇用市場予測では、工学分野の 70% がコンピュータ関連という^{*9}。CPS という複雑なソフトウェア構築の技術を近づきやすいものにならなければならない。CMU では、標準的な教育カリキュラムを Complex Systems Science & Engineering (CSSE) と命名した。Lee による本 [10] ならびに Alur [3] による本は、いずれも学部上級から大学院修士レベルの教科書である。リアルタイム・システムやハイブリッド・システムの基本的な事項を網羅し、CPS ソフトウェアのモデルベース開発 (Model-based Development) に必須の素養を要領よくまとめた。

その後、CPS というキーワードは、欧州で新たな方向から整理される。ドイツでは、CPS の研究動向、欧州域の研究開発支援の枠組みである ITEA2 や ARTEMIS との関係を踏まえ、国内産業の競争力強化を柱として CPS 領域に関する調査研究を行った。2010 年 5 月から 18 ヶ月間実施され、2010 年 12 月の中間レポート^{*10}を経て、2011 年 12 月に AgendaCPS の最終版 [1] が公開された。この調査研究は 2009 年 12 月の NRES^{*11} をベースにドイツの強みである組込みシステムの将来像を描き、その技術領域として CPS を位置づける。

AgendaCPS では、重要な応用セクターとして、移動性 (特に、自動車)・医療健康 (遠隔診断、等)・エネルギー (スマートグリッド)・製造オートメーション化の 4 つを示す。この将来の「スマート・ビジョン」と、これまでに実施した FP6 (ESD) ならびに FP7 (Networked ESD) の成果との橋渡しをする新しい技術領域として CPS を位置づける。こ

のレポートの論旨から、Industrie 4.0 は、Agenda CPS の考え方を製造オートメーションに適用した具体例と考えることもできる^{*12}。

EU のフレームワーク・プログラムは FP7 が 2014 年に終わり、Horizon2020 に受け継がれた。この時、JTI が再編され、FP7 の ARTEMIS は Electronic Component and Systems for European Leadership (ECSEL) となる。その「Smart CPS」の図表は、AgendaCPS のものを流用している。ドイツの影響が大きい。

このように CPS の背後に U.S. と欧州 EU のピンポン・ゲームを見ることが出来る。以下、私見であるが、より長い期間でのラリーがあることを指摘する。1980~90 年代欧州での ICT の状況を思い出してみよう。コンピュータ産業の主要な欧州企業は舞台から消え、世界の中心は U.S. と日本のメインフレーム・メカになる。さらに、グローバル・インターネットによって U.S. の世界的な ICT 支配が現実化する。ICT を抜きに国際的な競争力を維持することは困難。欧州は何かしらの強みをベースに新たな公共政策を起こすことが急務だった。その強みは、組込みシステムであり、高い信頼性を目指す形式手法・形式検証の技術。このことは、ARTIST ロードマップや、自動車分野の AUTOSAR 周辺の学術研究^{*13}から知ることが出来る。

換言すれば、The Internet 対抗としての ESD があり、その後、ESD/ARTEMIS 対抗として CPS が登場した。今、Industrie4.0 や IIC は、より The Internet, クラウド・コンピューティングとの結びつきを強化している。欧米のラリーの陰に日本は隠れたまま姿が見えない。

4.3 公的研究資金の役割

CPS の生い立ちに関わる U.S. の公共政策について、マツカートの「企業家としての国家」[12] を紹介する。U.S. のベンチャ企業育成の中で、公的な支援資金が果たした役割を解説した書である。

新しい技術を考案したベンチャ起業家が、民間投資家 (エンジェル) の資金支援で、リスクをものともせずビジネスを立ち上げていくという一般に流布されているシナリオが神話にすぎないこと、つまり、事実と反することを論じた。換言すると、技術革新の本当の波を作ったのは「国家 (税金を原資とする公的資金)」であって、ベンチャ起業家や民間投資家は単に「波に乗る人」。国家は「企業家」の精神を持ち、広範な公共政策の一環として、イノベーションを推進する。知識創造から市場創造までを支援した。公的支援を行う理由は、新しい市場によって、企業の活動が活発になり、同時に、新たな雇用が創出されるから。マツカートはアップルの iPhone を事例として具体的に論じ

^{*9} <http://logos.cs.uic.edu/recruit/csstatistics.html>

^{*10} M.Broy, K.H. Kagermann and R. Achats (eds.): Agenda Cyber Physical Systems - outline of a new research domain (intermediary results), Dec. 2010.

^{*11} SafeTRANS: National Roadmap Embedded Systems, March 2010.

^{*12} Siemens に代表される Smart Factory の流れが、CPS と一緒になって、Industrie4.0 が形作られたと考えるほうが良い。

^{*13} たとえばドイツの AVACS プロジェクトなど

ている。

iPhone や iPad が代表するモバイル端末が広く使われるようになると共に、AT&T が 1993 年に作った「You Will」*14 という TV コマーシャルが注目を集めた。豊かなネットワークを利用した未来を語るイメージ・フィルムである。現在の我々が iPhone や iPad を使用するシナリオ、まさにそのもの。初代の iPhone が登場する 2007 年から 10 年以上もさかのぼることに注意して欲しい。

マツカートは、iPhone が用いている技術要素を数え上げる。そして、リチウム電池・液晶ディスプレイ・移動体無線・インターネット・音声認識など、その多くが DAPRA 等の公的研究資金による研究成果であることを示す。つまり、アップル社は DAPRA モデル*15 による知識創造の結果を利用したにすぎないと説明する。

さらに、U.S. には Small Business Innovation Program (SBIR) というリスクの高い新規事業への公的な資金投資の枠組みがある。アップル社は、SBIR の支援を得て、市場創出を行った。もちろん民間投資家による提供資金も多くあったと思われるが、アップル社が成功する見通しを得た後の投資にすぎない。回収を期待できない投資を避けるのは、ちょっと考えれば当たり前のことである。それなのに、我々はシリコンバレーの神話を聞かされてきた。

ここで、話を単純化して、iPhone に見られるイノベーションを振り返る。時代の流れの事実として、1993 年には既に「You Will」によってビジョン創造が完了していた。DARPA モデルの研究資金による知識創造の結果、多種多様な技術が公になる。さらに、SBIR の提供資金で市場創造につながった。AT&T というメガ・エンタープライズが創造したビジョンを傍目に、国家は公共政策として要素技術の基礎から応用までの研究開発を先導すればよかった。

ところが、CPS が誕生する 2006 年頃、AT&T は分解し傘下のベル研究所は変質した。XeroxPARC を含めて、名だたるメガ・エンタープライズの中央研究所時代が終わっていた。新しいビジョンを創造する力を民間が失いつつあった。だから、「企業家としての国家」が表に出て、新しいビジョンとして CPS を提示し、知識創造を先導する必要があったと云えるのではないか。CPS 研究公募にあった「提案者が CPS を定義する」ことは、ビジョン創造も公共的な資金で支援する、国家が丸抱えせざるを得ない状況であることを示すように感じる。

この節を終えるにあたり、CPS と教育との関係を再び考える。一般に知識創造の結果が市場創造に結ぶつく時、その市場での企業活動には新しい知識の習得が必要となる。それには、適切な教育の支援が不可欠である。U.S. の CPS が大学上級から修士課程*16 での教育カリキュラムに触れて

いることを、よく理解できる。

5. CPS ソフトウェアの工学

5.1 ソフトウェアのパラダイム

Floyd は「プログラミングのパラダイム (The Paradigms of Programming)」と題するチューリング賞受賞講演で、プログラム作成時に拠る所とする基本的な考え方を「パラダイム」と呼んだ [7]。もともとパラダイムは、世界を認識する理論・基準・方法などからなる知識の体系のこと。クーンによると、科学の革命は、古いパラダイムを捨て、新しいパラダイムに置き換わることで生じる。ソフトウェアの分野では、計算パラダイム・設計パラダイムなどと云う。ソフトウェアに関わる人々が共通して理解する見方をパラダイムと呼ぶ。

ソフトウェア・パラダイムの代表例はオブジェクト指向コンピューティングであろう。データ構造に処理手続きを一体化させた「手続き埋め込みデータタイプ」というプログラム作成手法からはじまった。記述対象とプログラム要素のセマンティックギャップを埋める概念として「オブジェクト」が導入される。オブジェクト指向プログラミング言語 Smalltalk は実世界の対象をオブジェクトとして書き表す「シミュレーション」の記述言語と云われた。その後、ソフトウェアシステム開発の上流工程にも、オブジェクトの考え方が適用される。分析や設計「パラダイム」になり、記述形式として UML が標準となった。

オブジェクト指向パラダイムの貢献は、モデリングの視点を書き表す UML、再利用に向けたプログラム部品、オブジェクト指向フレームワークと呼ぶプログラム構成技法、など。開發生産性の向上に多大な成果をあげ、現在では、産業界で広く採用される「パラダイム」となっている。

本稿で、CPS は新しいソフトウェアのパラダイムであるとする。第 2 節ではスマートな組込みシステムとして CPS を理解した。技術発展の流れから考えると、この見方は妥当だろう。一方、オブジェクト指向プログラミングも初期のグラフィック・ウィンドウ・システムからはじまり、一般のソフトウェア・システムに対象を広げた。新しいソフトウェア技術にとって、初期のキラー・アプリケーションは不可欠である。同時に、いつまでもそこに居続けるだけでは、技術の広がりを見る事ができない。他と区別される本質的な特徴に注目してみよう。オブジェクト指向パラダイムは、オブジェクトを中心とした見方に基づき生産性向上の技術として成功を取めた。

本稿では、CPS をフィードバックを中心とした見方に基づきディペンダブルなシステムを開発する新しいソフトウェア・パラダイムであるとする。

5.2 フィードバック

第 2.2 節で触れたように、組込みシステムが行う装置制

*14 <https://www.youtube.com/watch?v=TZb0avfQme8>

*15 技術に役立つ科学の研究, テクノサイエンス。

*16 日本でいえば専門職大学院

御の基本的な枠組みはフィードバックである。フィードバックは制御工学・制御理論で研究されてきた技術であり、それ故、コンピュータ科学と制御工学の融合としてCPSを理解することがある。一方、フィードバックは、より一般的で基本的な見方であることを思い出そう。

ダビドウは「つながりすぎた世界」[6]で、コネクティビティがベースとなったフィードバックが引き起こす現象を論じている。SNSに関連する話題として、著名人のブログ炎上の例を考える。ある書き込みがきっかけとなり、次から次へと続く書き込みが連鎖反応をおこす。少数の意見はかき消され、多数派の方向へと雪だるま式に書き込みが続く。誰も意図しない結果が生じることもある。ダビドウは、このような「過剰結合」を社会的な側面から「思考汚染」と呼び、その危うさを指摘した。これは、まさにフィードバックの現れであろう*17。

LevesonのSTAMPは宇宙ロケットの安全性分析手法で、Systems-Theoretic Accident Model and Processesの略[11]。従来は、システムを構成要素に分割し、各々の故障確率から全体の安全性を議論する「還元主義」の方法をもとにしていた。これは、要素間の静的な関係をベースとするものだった。ダイナミックに変化する環境下で安全性を保証する機構の分析法として妥当ではない。そこで、宇宙ロケットならびに取り巻く環境の全体を多数のコンポーネントが構成すると考え、これらがフィードバック制御ループの安定状態にあるとする。不安定化する擾乱が安全性への脅威であり、これを抑えるようなフィードバック制御を求める。STAMPは具体的な道具として、ビジネス・ダイナミクス分析で提案されたCausal Loop Diagram (CLD) [23]の考え方を採用した。

フィードバックの重要性を明確に述べたのは、ウィーナーのサイバネティクス[26]であろう。あらゆるシステムにおいて、フィードバック制御と通信が本質的な役割を果たす。CPSの「サイバー」はサイバネティクスから派生したとも云われる([10] p.5)。これは、CPSの本質が、フィードバックという考え方に基づくからである。つまり、CPSは、CLDやSTAMPのようなダイナミックに変化する環境の分析方法からはじまり、組込みシステムの制御プログラムの仕組みまでを含む統一的な考え方、パラダイムである。

5.3 ディペンダブル

CPSはスマートな社会の基盤を構成する。複雑かつ大規模なシステムを構築できるようになったことが、同時に、社会に大きなリスクをもたらす可能性を増やす。ソフトウェア・システムがディペンダブルであることを示す証明書(certificate)を与える科学的な方法の研究進展が重要で

あるというレポートが2007年に提出された[16]。「当たり前前の事故」[20]ならぬソフトウェアに付き物の「当たり前前の不具合」への対応である。

一般にディンダブルな工学システムは、信頼性と安全性という2つの性質に分けることができる[13]。ソフトウェアについては次のように考えれば良い。

- 信頼性：期待される、あるいは決められた要求機能を果たす事
- 安全性：要求機能が果たせなくなった時、外界に深刻な影響を与えない事

ソフトウェア開発の標準的な方法に即して考えてみる。ソフトウェア・システムの開発は要求仕様の整理からはじまる。要求仕様を満たすように設計を進め、最終的にプログラムを作成する。ここで、要求性質には、機能仕様もあれば、実行時性能といった機能外仕様も含む。設計からプログラミングに至る過程で誤りの混入を避け、整合性のある実行可能な記述を得る。形式手法による「構築からの正しさ」の方法やプログラム・テストによる事後検査の方法など、ソフトウェア工学の研究結果が知られている。

一方、ソフトウェア・システムは外界との相互作用があるからこそ、その有用性を発揮する[9]。開発の段階で、システムの利用局面を完全に予測でき、かつ絶対的な信頼性を達成できれば、完全にディペンダブルなシステムを構築できるかもしれない。これは一般には不可能であり、絶対的な信頼性の実現が不可能であると共に、開発時に想定しなかったような状況がシステムの実行時に生じることもある。その原因は、装置機器の故障、運用ミス、使用方法の誤り、あるいは、意図的な攻撃*18など多岐にわたる。原因は何であれ、そのような要求機能を果たせなくなった時であっても、外部環境・利用者に悪い影響を与えないのが安全なシステムである。

従来のソフトウェア工学(例えば[8])は、ディペンダブルなソフトウェア・システム開発に関して、その一部分である信頼性についての技術体系であることがわかる。要求仕様を整理する段階で、機能が果たせなくなった場合への対応を予め考えることで、はじめて安全性の問題を扱うといえる。一方で、安全性はシステムの外側への影響を考慮することであり、外部世界の因果関係を知る必要がある。先にみたように、LevesonのSTAMPは宇宙ロケットという応用ドメインでの外部世界の分析方法を提供する。ここでは、フィードバックの考え方が中心をなす。フィードバックとディペンダビリティが密接に関係することがわかる。

6. 議論

本稿で、Cyber-Physical Systems (CPS)の解説を試み

*17 [15]の議論。

*18 セキュリティは外部からの意図的な攻撃が原因となる安全性の問題と考えた。LevesonはSTAMPをセキュリティ分析に応用することを示唆している。

た。さまざま理解が語られる理由のひとつに、CPSの「システム」がエンジニアリングの対象ではなく概念的な系だからであろう。また、公共政策の中から誕生したものであり、技術の言葉でない点にもある。ソフトウェアの観点からは、CPSはスマートな組込みシステムの技術を超えた一般性のある考え方であり、フィードバックを中心とする新しいパラダイムと見なした。

本稿は、コンピュータや隣接工学分野に関わる人々ならびに産業政策や公共政策に関わる人々、そしてイノベーションを担う主役のビジネスに関わる人々が、共通して理解することが期待されるキーワードであることを説明した。CPSを理解することは、まさに「2つの文化」[22]の壁を乗り越えることである。

第3節で見たように、第3次経済革命の鍵はソフトウェアにあること、第4.3節で論じたようにCPSが従来の公共政策と異なりビジョン創造を含むこと、を指摘した。第2次経済革命の時代あるいは1940年体制が機能する時代であれば、官の産業政策は「民間が既に持つ競争力の舵取りを行うこと」^{*19}でよかった。

一方、CPSおよびその製造業への応用であるIndustrie4.0では、何が競争力の源泉になる得るかを考えるビジョン創造が、「企業家としての国家」[12]の重大事項。さらに「伸びゆく手」[19]を円滑に進める制度設計も大きな課題となる。産業政策から教育までを含む公共政策の戦略が、第3次経済革命における日本の未来を決める。

最後に、CPSが見ているフロンティアが何であるかを考えよう。21世紀、未開拓のフロンティアとして、宇宙や海洋が挙げられる。ここでは、「都市・アーバン」もフロンティアであり、CPSが進む方向であるとした。世界の人口増加と共に、都市の数の増大が予測されている。過密集中する都市に共通の課題は、公共資源の有効利用だろう^{*20}。この社会的な問題に対する解決への道筋を考えることがCPSそのものであり、システム思考によるエンジニアリング[25]の要点でもある。

7. おわりに

本稿の準備に時間的な余裕がなかったことから、本来であれば原典を確認すべきところ、記憶^{*21}に頼った記述を行った箇所が多々ある。その結果、思い違いから生じる誤りの可能性が混入している可能性を排除出来ない。まずは、このようなオピニオン・ペーパーの公表を優先した次第である。今後、改訂していくこととしたい。読者のお力を借りることができれば幸いである。

^{*19} ホッチキス行政(?)

^{*20} 都市国家シンガポールは2014年にSmart Nationという概念を打ち出した。

^{*21} SSR調査研究。 <http://iisf.or.jp/SSR/groups{2010,2011}.htm>

謝辞 小川紘一先生ほか「第3次経済革命研究会」メンバーの皆様へ感謝する。

参考文献

- [1] ACATECH (ed.): Cyber-Physical Systems - driving force for innovation in mobility, health, energy, and production, 2011.
- [2] ACATECH (ed.): Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0, 2013.
- [3] R. Alur: Principle of Cyber-Physical Systems, The MIT Press, 2015.
- [4] B. Bouyssoumou, J. Sifakis, (eds.): Embedded Systems Design - The ARTIST Roadmap for Research and Development, Springer, 2005.
- [5] 産業競争力懇談会 (COCON): ソフトウェア生産革新技術への各国の取り組み状況, in エンタプライズ・ソフトウェア生産革新プロジェクト, pp.25 - 38, 2010年3月12日, <http://www.cocn.jp/report.html>.
- [6] W.H. ダビドウ: つながりすぎた世界, 酒井泰介訳, ダイヤモンド社, 2012.
- [7] R.W. Floyd: The Paradigms of Programming, CACM, 22(8), pp.455-460, 1979.
- [8] C. Ghezzi, M. Jazayeri, and D. Mandrioli: Fundamentals of Software Engineering (2ed.), Prentice Hall 2003.
- [9] M. Jackson: The Role of Formalism in Method, Proc. FM' 99, pp.56-56, 1999.
- [10] E.A. Lee and S.A. Seshia: Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach, <http://LeeSeshia.org>, 2010.
- [11] N. Leveson: Building a Safer World, The MIT Press, 2011.
- [12] M. マツカート: 企業家としての国家, 大村昭人訳, 薬事日報社, 2015.
- [13] 向殿政男: コンピュータ安全と機能安全, IEICE Fundamentals Review, 4 (2), pp.129-135, 2010.
- [14] 村上陽一郎: 科学・技術の二〇〇年をたどりなおす, NTT出版, 2008.
- [15] 中島震, みわよしこ: ソフト・エッジ, 丸善出版, 2013.
- [16] National Academy of Sciences (ed.): Software for Dependable Systems - Sufficient Evidence?, National Academies Press, 2007.
- [17] 野口悠紀雄: 戦後経済史, 東洋経済新報社, 2015.
- [18] D.C. ノース: 経済史の構造と変化, 大野一訳, 日経BP社, 2013.
- [19] 小川紘一: オープン & クローズ戦略, 翔泳社, 2014.
- [20] C. Perrow: Normal Accidents, Princeton University Press, 1999.
- [21] M.E. Porter and J.E. Heppelmann: How Smart, Connected Products are Transforming Competition, Harvard Business Review, November 2014.
- [22] C.P. スノー: 二つの文化と科学革命, 松井巻之助訳, みすず書房, 2011.
- [23] J.D. Sterman: Business Dynamics - Systems Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw-Hill, 2000.
- [24] 徳田昭雄, 立本博文, 小川紘一 (編著): オープン・イノベーション・システム, 晃洋書房, 2011.
- [25] O.L. de Weck, D. Roos, and C.L. Magee: Engineering Systems, MIT Press, 2011.
- [26] N. ウィーナー: サイバネティックス (第2版), 池原・彌永・室賀・戸田共訳, 岩波書店, 1962.
- [27] J.M. Wing: Cyber-Physical Systems, Computer Research News, 21(1), p.4, 2009.