

令和4年度 産業と技術の比較研究 報告書

CPS のサプライチェーン

—CPS [Cyber-Physical-Systems]に関する分析 (IV) —

令和5年 5 月

一般財団法人 商 工 会 館

< 産業と技術の比較研究会 委員 >

座 長 児玉 文雄 東京大学名誉教授

委 員 岡松 壯三郎 (一財)商工会館前理事長

委 員 加納 信吾 東京大学大学院教授

委 員 柴田 友厚 学習院大学教授

委 員 馬場 康志 昭和女子大学教授

委 員 藤盛 紀明 NPO 国際建設技術情報研究所理事長

委 員 玄場 公規 法政大学経営大学院教授

委 員 鈴木 潤 政策研究大学院大学教授

はじめに

本年度は、CPS のサプライチェーンの競争力の実態把握を行った。分野としては、半導体産業のほかに、エネルギー産業、建設業、についても調査した。

さらに、サプライチェーンの一般的問題として、公共政策、研究開発、外部知識との関係を分析した。

目次

1. 「公共政策とサプライチェーンの形成：日米欧の動的比較」(児玉)
2. 「半導体サプライチェーンにおける技術覇権の交代：半導体露光装置の事例」(柴田)
3. 「エネルギー・サプライチェーン論」(岡松)
4. 「日米企業の研究開発・設備投資と収益性の分析と持続的成長戦略の重要性」(玄場)
5. 「ソフトウェア・サプライチェーンにおける変化と課題」(馬場)
6. 「建築産業の情報化・自動化とサプライチェーン」(藤盛)
7. 「外部知識の波及と技術進歩」(鈴木)

今後の方向

第1章 公共政策とサプライ・チェーンの形成

—日米欧の動的比較—

はじめに

政府が民間の技術開発を支援する政策手段として、特定産業の特定技術の開発を目的とする同業者からなる研究コンソーシアムがある。複数の産業について、複数の国の政府により実施された事例は多い。本稿では、超 LSI 技術開発について、日米欧にわたる研究コンソーシアムについて、分析した。その結果、同業者による研究コンソーシアムは、対象とした産業のサプライ・チェーンの形成や国際競争力の強化に有効であることが明らかになった。

1-1. 日本の超 LSI 研究組合

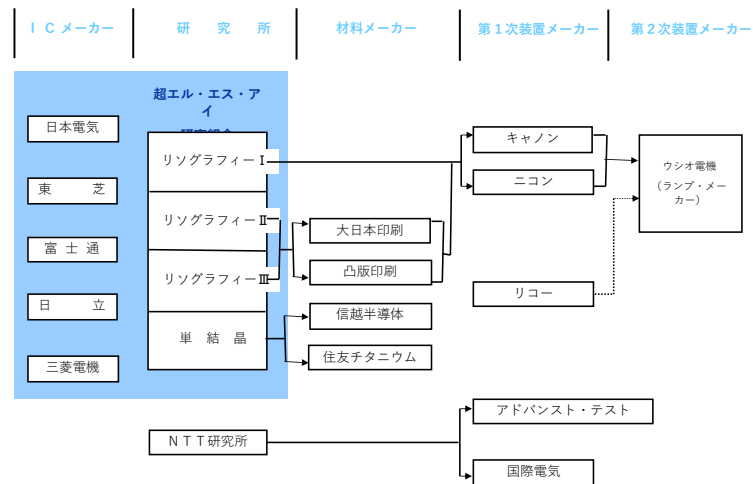
集積回路の開発が軍事部門から民間部門へ移行するにつれて、技術を開発することから国家の製造基盤を構築することに政策課題が移行した。日本においては、政府は、超 LSI 技術の開発のために、超 LSI 研究組合（1976～1979 年）を組織して、この移行を円滑に実現した。

研究組合には、日本の主要な IC チップ・メーカー全員が参加した。同業者間の共同研究により、彼らはチップ製造のための製造装置はどうあるべきかについて需要を明瞭に表現することができた。その結果、日本には、国際競争力のある集積回路製造のサプライ・チェーンが確立された。

共同研究は理論的には良さそうであるが、その実行は難しい。同じ産業の競争する会社による共同の研究においては、すべての参加者に対して共通の利益があることを確保することで、成功は決まる。それ故、チップ製造の方法に集中するよりはむしろ、組合が IC 製造装置のためのプロトタイプを開発することに、そして、シリコン（チップ製造の基本的な材料）の結晶化の過程を分析することに研究努力を集中させた。

すなわち、共同研究は、サプライチェーン技術の開発に焦点を合わせたのである。研究組合の中でも、このことは十分に意識されていた。筆者はこの事実を武石氏（業界の代表者として東芝から派遣され、共同研究組合の副所長を務めた）との 1986 年に行ったインタビューで確認した。図は VLSI の日本の開発に関与している主要な企業、そして、彼らの間の技術的なつながりを表す。

日本における超 L S I 開発の川上方向への技術的連関図



この研究組合がサプライ・チェーンの国際構想力強化に貢献した事例を、露光装置（ステッパ）を対象に分析した。超 LSI 開発の研究組合の初めには、ステッパ以外の 2 つの方法、すなわち、電子ビームによる直接印刷する方法や X 線による露光装置が、すでに開発され、そして、それらのプロトタイプも存在した。従って、ステッパはこれらの 2 つの方法の次の安全を確保するための第 3 候補として扱われた。誰も 1 本の髪の上に 40 本の線を印刷するレンズ技術を予想しなかったので、ステッパが第 3 の順位であることを否定することができなかった。ステッパを第 1 位の順位に押し上げるには、1 ミクロンの範囲内で焦点を維持して同程度の正確さでウエハの位置をコントロールするということが必要であった。従って、ステッパは、精巧な光学的フィードバック・メカニズムと、ウエハの表面に渡ってできるだけ均一にしておく厳しいコントロールが必要であった。

ニコンの吉田社長の「私の履歴書（日本経済新聞）」によれば、上記のようなことを可能にする基礎技術がニコンには存在したという。超高解像度レンズ、ウエハを動かす作業台の技術と光電管のセンサーの 3 つの技術である。高解像度レンズについて言えば、ニコンは、国内外で評価されたヒット商品を開発していた。作業台の技術に関しては、ニコンは、東京大学の天文台へ望遠鏡の正確な位置極めするための仕組みを提供していた。

共同研究がサプライ・チェーンに対して、貢献したものは、露光装置のような、サプライチェーンの一次サプライヤーに留まるものではなかった。本当の受益者は、2 次サプライヤーであったと言える。ウシオ・デンキ（ステッパに使われるランプのサプライヤー（図参照）が、結局ランプの世界市場を支配することになった。1983 年に、ウシオは日本のステッパ用のランプの 100 パーセントと世界市場の 50 パーセントの市場占有率を持つに至った。

1-2. 米国の研究コンソーシアム：SEMATECH

超 LSI 研究組合が産業のサプライ・チェーンの形成に貢献した日本の経験を一般化してみよう。1980 年代中頃に、米国半導体産業は（特にメモリ・チップで）日本の集積回路の製造業者に対して、その世界的な市場占有率のおよそ半分を失った。米国の半導体製造装置の競争力低下は等しく急激であった。それが、主要なアメリカのチップ・メーカーが最新の半導体技術で研究開発を促進するために SEMATECH（Semiconductor Manufacturing Technology、半導体製造技術）協同組合を組織するに至った背景である。SEMATECH（それは 1987 年に確立された）協同組合の設立の経緯を調査することによって、「サプライ・チェーン」の形成が、研究協同組合を組織することに、国境を越えても、有効な概念であったという証拠を提示する。

SEMATECH は、国家協同研究法令の 1984 年の議会の通過からこれまでに組織された何百もの協同組合の 1 つであり、従事している会社へ協同研究と開発に独占禁止法からの部分的な免除を与える。米国防衛技術の完全さが、外国の半導体に対しての依存の増大によって脅かされているのを恐れて、連邦政府は毎年 1 億ドルを SEMATECH の活動に助成することに同意した。

しかし、その多様な会員に適した研究プログラムを組織することに失敗して、1 年以上奮闘した後に、協同組合は、米国半導体産業を助けるための最高の機会は、そのメンバー間の直接の協力を強調することではなく、しかし、むしろ半導体製造装置を造る国内会社の地位改善することに集中することだと決定した。その結果、協同組合は、特に露光装置技術に集中した。露光装置市場の米国シェアは、1983 年の 71 パーセントから 1988 年の 29 パーセントに落ちていた。急速な低下の大部分は、GCA 社（同社は、1970 年後半に、「step-and-repeat」という方法、すなわち、ステッパーを発明した）によるものであった。米国の半導体製造装置産業の世界的な低落と日本の競争の急速な出現は、GCA を破産の淵に押しやった。

1988 年に、GCA は General Signal というコングロマリットによって買収された。GCA の明らかな失敗にも関わらず、SEMATECH が設立された時から、米国半導体産業の競争的位置の改善が見えた。1993 年に、8 年で初めて、米国企業は世界的な半導体市場の 43.4 パーセントを占めた、そして、米半導体製造装置産業は日本の 42.9 パーセントを凌いで世界的な市場の 50 パーセントをもう一度戻った。いくつかの他の要因が回復の一因となったとしても、SEMATECH はこれらの増加に対する称賛の多くに値するというコンセンサスが出来上がってきた。

半導体産業の政策について分析した Randazzese（Randazzese, L, Scientific American, 274(6), 1996）によれば、SEMATECH の偉大な成果は、それら自身の技術的な業績ではなく、むしろチップメーカーと装置サプライヤーとの関係を改善するのに役立ったというも

のであった。ほとんど敵対的であった会社は、現在綿密に協力している。これらの成果は、米国半導体産業の復興に対する協同組合の明らかな貢献と共に、オブザーバーによって広く賞賛された。1994年に、SEMATECHは、およそ800万ドルをSVGL（Silicon Valley Group Lithography System）に投資した。

しかし、2001年に、ASML（1984年のオランダのフィリップスから独立した）が、SVGLを買収した。SVGLからいくつかの重要な技術を得ることによって、ASMLは、今では世界最大の露光装置メーカーになった。

1－3．欧州での展開：ASML社の技術選択

ASML社の沿革は、1984年 フィリップス社とASM インターナショナル社が、それぞれ50%ずつ出資する合弁会社ASM Lithographyとして設立した。1988年には、2つの親会社からスピノフし独立した企業となり、旧社名の省略形のASMLを社名としたという経緯を経た。

オランダの研究者がASML社内での次世代技術の技術選択と開発を分析した（Nasiri 他4名：Incumbent Success in the Era of Ferment, Academy of Management Annual Meeting Proceeding, August 2019）。この分析によると、ASMLの飛躍的な発展には、技術の選択に関して、SEMATECHが重要な役割を果たすことになったという。1997年から2003年にかけて、将来技術のロードマップについて、毎年会議を開催するようになった。参加者は、100名以上の産業界のトップであった。チップメーカー、サプライヤー、著名な研究機関からの参加者が含まれていた。それぞれの技術分野の先駆者がいくつかのワークショップを主導した。参加企業は、このワークショップに参加することで、将来の発展コースがどのようなものであるかについての感触を得た。

露光技術について考慮された技術オプションは、

- E-Beam (and different applications like SCALPEL),
- X-ray,
- EUV,
- Ion-beam (IPL - Ion Projection Lithography),
- マスクを使わない、種々の開発段階にある、種々の技術アプローチ

であった。

ASML社は、SCALPEL, Ion-beam, EUV projectsに参加した。興味深いことは、1997年から2003年にかけて、異なる技術の間の、専門家のランキングが大きく変化したことである。EUVは最初の専門家のトップリストには入っていなかったが、次世代露光技術の候補として、大多数の専門家に支持されるようになった。

ASML社のSEMTECHへの参加を、次のように総括している。SEMATECHが共同研究として取り上げた、新しい技術レジームへの投資は高額で、正しいレジームの選択は極めて重要である。したがって、業界の主要プレーヤーが主導する共同研究への参加は、便益

が高いのである。そこで、SEMATECH による共同研究には多くに企業が参加した。最終的には、勝者となった技術を開発した企業は特別な利益を受けるが、2つの競合技術を、同時に開発することは、一企業だけでできることではなかったのである。

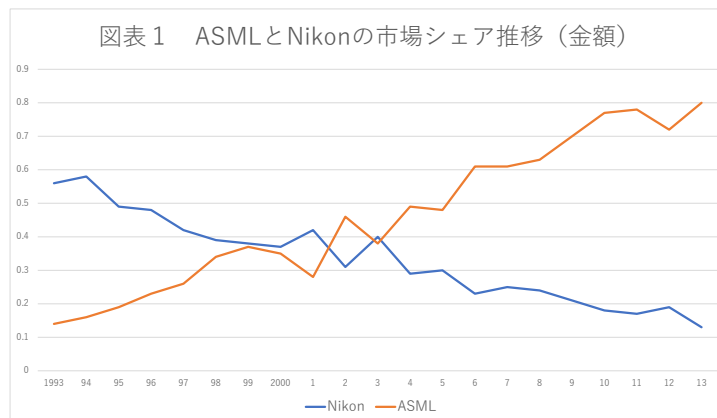
第2章 半導体サプライチェーンにおける技術覇権の交代 ：半導体露光装置の事例

1 はじめに

2023年1月17日、米国バイデン大統領はオランダのルッテ首相とホワイトハウスで面会し、半導体供給網の懸念について懇談したと、ホワイトハウスは報じた。半導体供給網に関してなぜオランダが関係するのか、と奇妙に思われるかもしれない。

半導体チップの生産プロセスとは、多様な工程から成る複雑で長いプロセスであり、多くの種類の製造装置が関与しているのだが、そのほとんどで日米の企業が高いシェアを占めている。しかし、半導体の生産プロセスの中で最も重要で微細化に大きな影響を与える露光プロセスを司る露光装置では、現在、日米企業の影は薄い。オランダのASMLが一人勝ちと言っても良い圧倒的なシェアを占めている。バイデン大統領がオランダの首相と面会しなければならなかった理由はまさにここにある。

半導体露光装置とは、フォトマスクと呼ばれる原画に描かれた電子回路パターンを光源の光で投射して、投影レンズで回路線幅を縮小し、感光材が塗布されたウェハーに焼き付ける装置である。微細な世界での超精密な制御を必要とすることから「史上最も精密な機械」と言われる。その高度な技術力を必要とする露光装置で、オランダが独走しているのである。



出所：林征治（2016）のデータを参考にして筆者作成

だが実は、かつて日本企業は露光装置で圧倒的なシェアを占めていた。図表1にみるように、ニコンは95年まで世界市場の半分以上を占めていたし、同様に露光装置を作っていたキ

ヤノンと合わせると当時の日本企業の存在感は大きなものがあった。しかし図表1が示すように90年代後半からASMLの台頭が始まる。そして、2000年代初頭を迎えると、ニコン、キャノンとASMLの間でデッドヒートが繰り広げられることになるが、2000年代後半にかけて、ASMLは日本企業を大きく引き離してゆく。極めつけは、最先端のEUV露光装置を開発・製造できる企業は、世界で唯一ASMLだけしかいなくなってしまったという点である。その結果2022年現在、技術的にも金額的にもASMLの一人勝ちと言っても良い状態が生まれた。

EUVとはExtreme ultra violet（極端紫外線）の略で、通常の紫外線よりも波長が非常に短い紫外線（13.5nm）を言い、X線にかなり近いところに位置する。EUV露光装置とは、光源にこのEUVを使って露光を行う装置を指し、7ナノなどの線幅を持つ最先端半導体チップはEUV露光装置でしか作ることとはできない。光源にEUVを使うというアイデア自身は80年代からあったが、実用化・産業化に至るまでになんと約30年に及ぶ忍耐投資を必要としたのである。EUVを導入した半導体チップの生産ラインで、初めて実際に製品が作られるのは2019年になってからである。この間に、技術覇権は日本からオランダに移行したと言わざるを得ない。

本稿は、「史上最も精密な機械」と称されるこの産業分野で、技術覇権の交代がなぜ生じたのか、そのメカニズムの一端を解明しようとする探索的な論文である。

2 技術進化の軌跡

半導体産業の技術進化は、1年半ごとに集積度が倍になるというムーアの法則によって示されており、この実現に向けて、半導体産業では長年にわたり微細化競争が繰り広げられてきたのである。この微細化競争のカギを握る製造装置こそが、半導体露光装置であり、最も重要な性能は、半導体チップの線幅を規定する解像度である。従って、露光装置の技術革新の焦点は、如何にして解像度を上げることができのかという点に絞られてきた。

露光装置の解像度は、レイリーの式と言われる次の一般式で計算される。

解像度を表すレイリーの式：

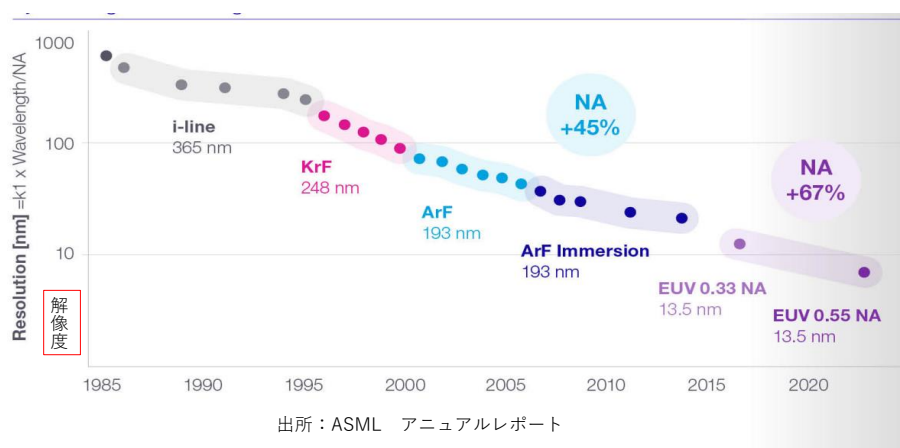
$$\text{解像度} = K (\text{プロセス係数、一定}) \times \lambda (\text{光源の波長}) / NA (\text{レンズの開口数})$$

つまり解像度を上げるには、光源の波長を短くするか、レンズの開口数を大きくすれば良いということになる。したがって、波長が短い光を光源として使える露光装置の開発が長年追求されてきたのである。こうして図表2が示すように、可視光から紫外線へ、そしてKrFやArFなどのエキシマ・レーザー（DUV）へ、そしてEUVへという短波長化が35年にわたって追求されてきた。

だがこれは単に、光源だけを変えれば済むと言う単純な問題ではなかった。使う光の性質が変わることで、ウェハーの処理や感光材など他の多くの装置にまで連鎖的に影響が及

ぶからだ。特にEUVはX線に近い領域に位置するために、装置全体のみならず半導体チップ生産プロセス全体が大きな影響を受けた。後ほど詳しく説明するが、EUV露光機の実用化に30年に及ぶ忍耐投資を必要とした理由はここにある。

図表2 35年に及ぶ解像度の向上



一方、同じ光源を使ってもNAを大きくできれば解像度は向上する。レンズの開口数NAとは、レンズの明るさのことであり、屈折率と光の入射角で決まる。つまり、レンズの大きさや性能が影響を与える。レンズ技術を強みとするニコンやキャノンが、露光装置市場で長年競争優位を築いてきたのはここに理由がある。

例えば露光に用いる光が紫外線になると、通常の光学ガラスを透過しなくなるために、ニコンは紫外線の透過性の高い合成石英ガラスの開発を1986年にスタートした。そして1987年、投影レンズ用の合成石英ガラスの製造に成功し、その量産化によって半導体産業の進化を下支えしたのである。

しかし無限にレンズを大きくしたり改善したりできるわけではない。従ってレンズを変えずとも、屈折率をあげることでNAを高める方向にも技術革新が向かったのである。これが液浸技術(Immersion)だが、ここでもニコンは先駆的な技術実績を上げている。NAは空気中ではせいぜい1.0にしかならないのだが、水の中だと屈折率が上がる関係でNAが1.0以上になる。水の屈折率(1.44)が空気の屈折率(1.0)よりも高いことをうまく利用したのだ。

この原理を活用して、光源やレンズを変えずに解像度の向上を達成したのが、液浸露光技術(Immersion lithography)である。この技術を使うと、投影レンズとシリコンウェハの間を純水で満たし、水自体をレンズのように使うことで、光源を変えずとも解像度を高めることができる。ニコンは、この技術を活用したArF液浸露光機を2004年にプレスリリースした。他方で、この液浸技術を巡り、ニコンとASMLの間では近年まで特許紛争が繰り返された点も、指摘しておかなければならない。

3 ASML の成長過程

ASML の今に至るまでの成長の軌跡を確認しておこう。

ASML は 1984 年にフィリップスと ASMI を親会社とする子会社として誕生した。その際の従業員は若干 31 人だったという。当時は、高圧水銀ランプの g-line と i-line が主流であり、エキシマレーザーは未だ主流にはなっていない。ASML は 1986 年、最初の g-line ステッパー (PAS 2500/10) 出荷した。同年、レンズメーカーであるカール・ツァイス社との提携を結ぶ。さらに 1987 年、最初の i-line ステッパー (PAS 2500/40) を出荷した。

実は丁度この頃、オランダから遠く離れた台湾でその後の半導体産業に大きな影響を与えるもうひとつの企業が創業されることになる。1987 年、台湾に設立された TSMC である。半導体の生産に特化したファブドリーという新しいビジネスモデルをもって、TSMC は半導体産業に参入した。その設立に際して奇しくもフィリップスが資金を提供し、TSMC の経営に関与することになる。つまりフィリップスは、ASML とその潜在顧客でもある TSMC という 2 つの企業の設立と経営に関与することになるのである。

図表 3 ASML の売上高推移



ASML の最初の成功は、1991 年に出荷され現在まで使われている PAS 5500 ファミリーで、これにより売り上げが大きく伸びた (ASML、2004)。PAS は、Philips Automatic Stepper の略である。その後の ASML の成長は図表 3 のとおりである。売り上げは、リーマンショック時の一時的な落ち込みを除けば、右肩上がりの成長といって良いだろう。図表 3 をみて気が付くことは、2015 年以降、売上高の傾きが急になっているという点だ。これは EUV の産業化に成功したことが大きく関係している。EUV 産業化の成功は、技術的なブレークスルーであると同時に、売り上げ増にも大きく寄与したのである。2022 年の時点で、EUV 露光機がなんと ASML の売り上げの半分近くを占めている。

従って ASML の成長メカニズムは、ニコンやキャノン等先行者へキャッチアップする

論理と、EUV という技術フロンティアを開拓する論理の2つを、分けて考えるのが妥当であろう。

3. 1 モジュラー設計が生み出す高いアップグレード性

既に述べたように、露光装置とは史上最も精密な機械と言われている。このような性質を持つ露光装置の開発に対して、中馬（2006）が明らかにしたようにASMLはモジュラー設計を採用したのである。このモジュラー設計は、現在に至るまでASMLの製品開発を徹底している設計思想であり、最近はニコンもまた露光機にモジュラー設計を採用している（ニコン アニュアルレポート2018）。

露光装置の基幹ユニットは、ウェハー・ステージ、レチクル・ステージ、照明系、搬送系、ボディーなどから構成されるが、モジュラー設計を採用するということは、これらの基幹ユニット間でできるだけ相互干渉が生じないように、事前に切り分けとつなぎ方のルール化を行うということを意味する。つまり基幹ユニット間の独立性が高いのである。

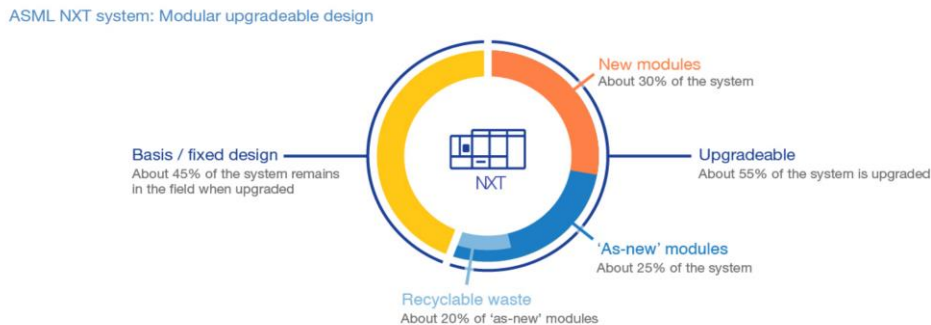
このような独立性の高さは以下のような主として3つのメリットをユーザーにもたらした。第1に、露光機の最終組み立て工程におけるユニット間の調整作業を効率化できることで、製品立ち上げに必要な期間が大幅に短縮可能になる、つまりリードタイムが短縮できる。1991年に出荷されたPAS5500の特徴の一つは、この立ち上げ時間の大幅な短縮である。

第2に、基幹ユニット毎の修復と交換ができることから、保守の効率が高まり、ダウンタイム時間を削減でき、装置の稼働率を大きく向上できるという点である。半導体製造装置は、半導体チップ生産工場のコストの大きな部分を占めているために、装置の稼働率はユーザーの収益性に直結するのである。

第3に、ユニット毎のアップグレードができることから、製品のアップグレード性が高まる。微細化の追求に伴い光源を変更する場合であっても、モジュラー設計であれば、光源ユニットの交換だけですむ。ASMLが成長する契機となり、91年に投入されたPAS5500の場合、そのボディーは、90年代を通して継続的に使用された。光源がi-lineであろうが、エキシマレーザーであろうが同じボディーで対応できたのである。

ASMLが採用したモジュラー設計は、上記のようなメリットをユーザーにもたらしたが、なかでもASMLが重視したのはアップグレード性である。図表4は、TWINSCAN:NXTという製品ファミリーを例にとり、そのアップグレード特性を表している、それによれば、重量基準で45パーセントは、製品ファミリーを通して共通で使われておりアップグレードしても変わらない。残り55パーセントは、アップグレード可能な製品領域といっており、その内の30パーセントは全く新しいモジュールとしてアップグレードされ、25パーセントは、修復後新しいモジュールとして再使用可能になる。

図表4 ASML露光機のアップグレード特性



出所・ASML 2017 アニュアルレポート

ASML 露光機はこのように高度なアップグレード特性を持つ。半導体チップメーカーであるユーザーは、既に保有している露光機をアップグレードすることで、新しい露光機に買い替えなくとも、高性能で高機能な露光機能を実現できることになる。既存の露光装置がアップグレードされながら継続的に使われ続けるために、ASML 露光装置の製品寿命は長い。その結果、過去30年間に販売されたASML 露光機のうち、なんと95パーセントが、いまだに生産ラインで稼働しているのである（ASML アニュアルレポート）。

3.2 システム・アーキテクトとしてのASML

中馬などの先行研究が明らかにしたように、ニコンやキャノンと比べてASMLの際だった特徴は、自社はソフトウェア開発に専念し、それ以外の多くを世界中の部品メーカーへアウトソーシングしているという点である。コア部品であるレンズは、ドイツのCarl Zeissが作っており、ボディはフィリップスが作っている。ASMLはそれらのコア部品を調達し、露光装置として一つにまとめあげている。自らをシステム・アーキテクトでありシステム・インテグレータであるとして自己規定しているゆえんである。

そもそもなぜASMLはアウトソーシングに軸足を置いているのだろうか。そこにはASML出生の事情があった。1984年フィリップ社の露光装置部門から分社化してASMLが設立された当時、フィリップスとの関係以外には工場も資金もなかったために、世界中の供給業者から調達した部品を用いて露光装置を作り上げてゆく以外に方法がなかったという説明だ。

アニュアルレポート（例えば2020年）によれば、ASMLは約5000のサプライヤーと取引をしているが、そのうち、製品関連サプライヤー、つまり部品納入業者は約780程度である。そのうち、ASMLが重要サプライヤー（Critical suppliers）として認定しているのは、約190程度である。この重要サプライヤーは、ASMLと直接取引をしているいわゆるティア1に属するサプライヤーである。

サプライヤーの地理的分布をみると、業者の数では、アジアや北米も含めて世界中に満遍なく広がっているが、金額ベースでみると、オランダと欧州で約8割をしめている。つまり大きな金額の取引は、欧州近郊という近隣領域に集中しているとも言える。

ASML はシステム・アーキテクトとして、世界中に広がるサプライヤーのリスク管理をしながら、同時に製品として統合する能力を高めていったに違いない。重要サプライヤーとそれ以外のサプライヤーを区別している点にも、リスク管理の一端をうかがい知ることができる。

一方で、サプライヤーを活用する方法は、モジュラー設計という ASML が初期に採用した設計思想と極めて相性が良い方法だったという見方もできる。独立性が高い基幹ユニットごとにサプライヤーに委託すれば、効率的かつ効果的に製品開発をすすめることができるからだ。因果関係の矢印がどちらに向かっているのかは定かではないが、いずれにしても、モジュラー設計とシステム・アーキテクトの両者は相互に補い合いながら、ASML の経営の仕組みとして確立していったものと考えられる。

3. 3 生産性（スループット）という価値次元の追求

この産業が誕生して以来、微細化を追求する半導体チップメーカーは、解像度が高い露光装置の開発をメーカーに要求してきた。従って半導体露光装置にとって最も重要な提供価値は、露光装置の解像度の向上であった。ユーザーであるチップメーカーがそれを要求するのであるから、いわば当然と言って良い。

他方で、解像度以外に、露光装置の生産性（スループット）が重要な価値基準として90年代以降台頭してきた。生産性とは、単位時間あたりで露光できるウェハースの枚数で計る。生産性が高まるほど、単位時間あたり多くのウェハースを露光できるために、半導体チップの生産コストは低下し、チップメーカーのコスト競争力は高まることになる。

ASML の成長過程で気が付くことの一つは、微細化競争が展開される中にあって、生産性という新たな観点にいち早く着目してそれを早くから追求し、生産性の向上を製品に取り込んだ点にある。生産性に影響を与えるのは、ウェハース・ステージの高速移動・停止や露光時間などだが、それ以外にウェハースサイズもまた大きな影響を与える。一つのウェハースから取れるチップの枚数が増えるほど、生産性は高まるからである。1980年代の主流は100mmだったが、次第に150mm、200mmと拡張されてゆき、2000年を境にして、300mmウェハースの生産と使用が本格化することになる。

図表5は、1990年代、200mmのウェハースを使用する場合の、各社露光装置の生産性を比較したものである。いずれの年度においても、ASML の生産性が上回っていることがわかる。この時代は、ASML 設立後約10年が経過した草創期であり、製品ファミリーPAS5500を事業化した時期だが、この露光機の大きな一つの売りは、高い生産性にあったのである。

図表 5 200mmウェハサイズでのスループット（枚数・時間）比較

	1993	94	95	96	97
ASML	63		80	80	96
Nikon	50	60	50	70	85
Canon	41	58	53	74	90

各年度に各社から出荷された露光機のスループットを比較している。同一年度に複数の製品を出荷されている場合は、高いほうのスループットを採用している。ウェハサイズは、200mmで統一している。
スループットの観点では、ASMLの露光機は他社よりも優れていることがわかる。

出所：廣田義人（2001）「半導体露光装置ステッパーの開発、普及とその要因」『技術と文明』12巻、2号（118）のデータを参考にして筆者作成

2000年代に入り、生産性を大きく引き上げた革新がASMLから生まれた。2つのウェハ・ステージを持つDual Stage技術というイノベーションである。これは文字通り、1つのウェハが露光過程にあるときに、もう一つのステージにあるウェハにおいて、露光に先立つ位置決め計測を並行して行うことで処理量を上げるといったものだ。ASMLは2001年に出荷した露光装置TWINSCANで、この技術を初めて実装した。他方、ニコンがこの技術を実装した装置を初めて出荷したのは、2005年である。生産性向上の追求において、ここに4年の差が生じた。このDual Stage技術は、解像度をあげるものではなくて、あくまでも生産性を高める技術である、という点を改めて確認しておきたい。

ここで、なぜASMLは解像度競争のみに突き進むのではなくて、生産性という別次元に着目したのだろうかという疑問が生じるだろう。それは、90年代から2000年初頭にかけて当時のASMLの主要顧客が、台湾や韓国などの新興の半導体メーカーだったからではないかと考えられる。当時の主要な半導体チップメーカーと言えば、インテルや東芝、日本電気だったであろう。しかし、ASMLの当時の顧客は主力半導体メーカーではないTSMCやサムスンなどの新興メーカーだったのである。これら新興メーカーの需要は、主力メーカーのそれとは全て同じわけではない。高機能・高精度の露光装置を追求する主力半導体メーカーと比べて、新興の半導体メーカーはコスト競争力を追求する傾向があるはずだ。

そのような推論を裏付けるデータがある。榎波・田路（2017）は、90年代後半から2000年代を通して、ASMLとニコンの顧客層を調べたが、それらが明らかに異なっていることを示した。例えば、ASMLの場合、上記期間の筆頭顧客はサムスン又はTSMCであり、時期にもよるがどちらかの企業が3割近くのシェアを占めている。一方でニコンの場合、同じ期間を通してインテルが圧倒的な顧客であり続けた。ニコンはインテルから「プリファード・クオリティー・サプライヤー（PQS）賞」を数度にわたり受賞しているが、そのことから伺いすることができる。2014年度の受賞に際して、インテルはニコンについて次のように述べている。

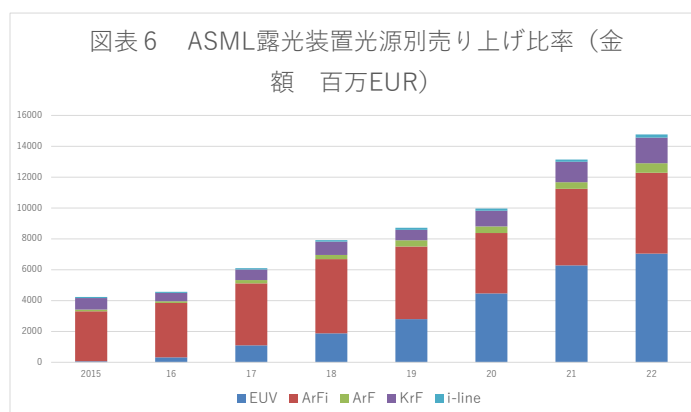
「過去30年間ニコンは、最先端のスキャナーを競争力のある価格で供給していただいている優秀なサプライヤーであり、インテルにとって重要なパートナーです。インテルと協力し、開発と工場立上げにおける技術ならびに製造に対する要求をサポートし、迅速に解決策を導き出すニコンの能力は素晴らしいものです。」（ニコン ホームページ）

このように顧客層が大きく違っていたが、ASMLであれニコンであれ、自社の顧客の需要に答えようとした点では何ら変わるところはない。ASMLは、顧客である新興半導体メーカーの需要に答えようとしたのである。とするならば、両社の命運に影響を与えた要因のひとつには、想定する顧客層の違いがあったと言えるのかもしれない。この論理は、工作機械産業において、米国から日本への技術覇権の交代の背後で働いた論理と極めて類似しているという点を指摘しておきたい。

4 EUV という技術フロンティアの開拓

EUVは現代で最大の技術的ギャンブルだったと言われる。産業化までに20年以上にも及ぶ忍耐の期間、そして政府支援も含めて莫大な投資が必要だったからである。EUV開発の初期段階から米国は96年にEUV LLCを、欧州は98年にEUCLIDESという研究コンソーシアムを形成し、ASMLのEUV研究を技術的にも財政的にも後押しした。

それ以外にASML単体で2017年までEUV研究に、90億ドルの投資を行っている（ASML）。さらに後述するが、顧客である半導体チップメーカーをも巻き込んだCCIP（Customer Co-Investment Program）という革新的な投資プログラムをたちあげ、莫大な資金調達にも成功した。2013年にCymerの買収は、この資金を使って行われた。最大の技術的ギャンブルだったと言われるゆえんだろう。



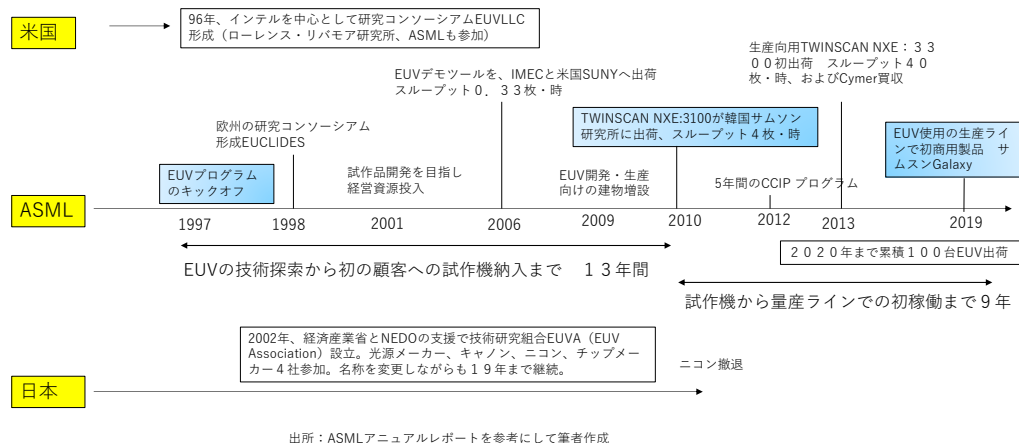
出所：ASML アニュアルレポートを参考にして筆者作成

EUV 露光装置の産業化の成功は、半導体産業全体の進化をもたらしたことは言うまでもない。一方で、ASML 自身にも多くの経済的果実をもたらした。図表 6 は光源別の露光装置売上比率の推移を示しているが、EUV の産業化が収益にいかに関与したかを如実に物語っている。出荷台数は 2022 年時点で約 30 台程度だが、売り上げの半分近くを EUV が占めている。

図表 7 は、EUV 露光装置の産業化に至る軌跡を ASML の動向を中心に整理したものである。ASML が EUV の技術探索を開始した時期を 97 年として、EUV 露光機を使った半導体量産ラインで実際の製品が初めて作られた 2019 年を産業化が実現した時期とするならば、実に 22 年の歳月を要したことになる。この期間はさらに 2 つに分けて考えることができる。技術探索の開始から 2010 年に EUV 露光機の試作品が実際の顧客（韓国サムスン）の研究所に納入されるまでが 13 年、そして試作品開発から EUV が量産ラインで使われて実際に価値を生み出すまでに 9 年である。

ASML で EUV プログラムの立ち上げに関与した CTO は、当初、EUV の量産ラインへの導入は 2006 年頃にはできだろうと考えていた、と回想している。そしてこれほど時間がかかるとは思ってもみなかった、とも述懐する（ASML アニュアルレポート）。なぜこれほどの時間を要したのか。そこには 2 つの大きな理由があった。

図表 7 EUV 露光装置の産業化への軌跡



1 つは EUV 露光機自身の開発の困難さに関わる問題である。EUV を光源とする露光機を作ることは、露光機の多くの構成部品を特別に新しくしなければならないことを意味した。特に困難を極めたのは光源の出力や光学系だった。また、ウェハを処理する生産性の向上も半導体チップの量産ラインに EUV を導入するためには大きな障害となった。例えば、2006 年のデモツールとして出荷した EUV の場合、スループットはなんと 0.33 だったし、2010 年に韓国サムスンの研究所に納入した EUV でもたかだか 4 だった。これは 1 時間に 4 枚のウェハしか露光できないということの意味するのだが、これでは、

量産ラインの実用に資することは難しい。現在の EUV 露光機のスループットは 170 であり、生産性は大きく引き上げられたのである。

2 つめは、EUV 露光機を導入する顧客の半導体生産ライン全体の最適化が必要だったという点だ。EUV の価値を最大に引き出すためには、レチクルや感光材、さらには EDA などの設計ツールに至るまでの大幅な変更が必要だった。EUV 露光機の導入は他の製造装置にも影響を与えるために、他の製造装置メーカーの協力も必要になったのである。そして、半導体チップを生産するメーカーは、自社の生産ラインで EUV をどう使えばその性能を最大化できるのかということ、自身が研究し学習しなければならず、それに大きな時間を要した。つまり顧客の側でも新たな研究と学習を必要としたのである。2010 年に初めて顧客に EUV 露光機が提供されたのだが、提供先が研究所だったのにはそういう理由があった。

EUV の産業化にこぎつけるには、顧客である半導体メーカーの密接な関与が必要だったのである。そこで 2012 年に ASML は、顧客を巻き込んだ 5 年間の CCIP (Customer Co-Investment Program) プログラムを立ち上げた。既に述べたように試作品が初めて顧客に納入されたのは 2010 年だったが、試作品の納入後、このような大きなプログラムを立ち上げなければならなかったというのは、試作品による技術検証の後、実用化までに、いかに多くの努力が必要だったかを物語っている。

CCIP とは、主要な半導体チップメーカーであるインテル、サムスン、TSMC の 3 社がそれぞれ、15%、5%、3% の ASML の株を購入して ASML に直接投資を行うというものだ。直接投資の総額は、3.85 (billion) ユーロにもなった (ASML、2012)。さらにこれらの 3 社は、2013 年から 2017 年の間に、ASML の研究開発に 1.38 (billion) ユーロを投資することで合意した。これらの投資への見返りとして、3 社は EUV 露光機を優先的に獲得する権利を得た。

これら 3 社は、半導体チップメーカーという意味では競合関係にある。一方で、半導体の微細化を推し進めるために EUV 露光装置を等しく待ち望んでいるという意味では、同じ土俵に乗っていたとも言える。3 社は CCIP プログラムに参画することで、ASML へ研究開発投資のみならず直接投資を行い、リスクをも ASML と共有した。EUV の産業化という点では ASML と半導体メーカーは運命共同だったのである。

5 考察：エコシステムと両利きの経営

こうして ASML は長期にわたる研究開発投資を継続し、EUV 露光装置の産業化にたどり着き、露光装置産業で一人勝ちと言っても良い圧倒的な位置を占めるにいたった。ここにはどのようなメカニズムが働いていたのだろうか。そして ASML の成功はどう説明できるだろうか。特に EUV の成功要因へ、2 つのフレームワークによって接近してみたい。EUV エコシステムを稼働させるプラットフォームリーダー、そして両利きの経営という 2 つのフレームワークである。

EUV 露光機の実用化に、業界関係者の予想を超えてこれほどの時間と投資を必要とし

た理由の1つは、露光機単体の開発では十分ではなく、他の製造装置メーカーの参画と支援が必要だったという点にある。これは単に露光機のサプライヤー・マネジメントを超えたところのもっと広い範囲の協力関係を必要とした。ここでエコシステムという概念が出てくるゆえんである。

それがなければ、EUV露光機の機能を最大限に発揮できるような半導体生産プロセスを構築できない。EUVを組み込んだ半導体生産プロセス全体を最適化するために、露光装置以外のところでもASMLは汗を流したのである。もちろん、他のメーカーのために流した汗は、最終的にはEUV露光装置の売上や保守サービスとして、巡り巡ってASMLの利益として回帰するはずなのである。

歴史を振り返ると、インテルがPC産業全体を進化させるためにリーダーシップを取り、他のメーカーの協力を得ながら伝送路であるバスの革新を推し進めた先行事例をほうふつとさせる。伝送路のスピードが上がらなければ、いくらプロセッサのスピードだけが上がっても製品としてのPCのスピードは向上しないからだ。インテルは自社製品以外のところでも労を惜しまなかったのである。同様に、露光装置産業全体の進化のために、ASMLは自社製品を超えたところでリーダーシップを発揮したのである。このような製品単体を超えたエコシステムという広い視野をASMLが持ったことが、EUV産業化の成功を支えた1つの要因だったに違いない。

さらに、なぜASMLは困難なEUVから撤退することなく、長期にわたりEUVへ投資できたのだろうかという疑問が生じるだろう。キャノンやニコンは早々にEUVから撤退したからだ。これを考えるに際しての有力なフレームワークは、両利きの経営というフレームワークである。

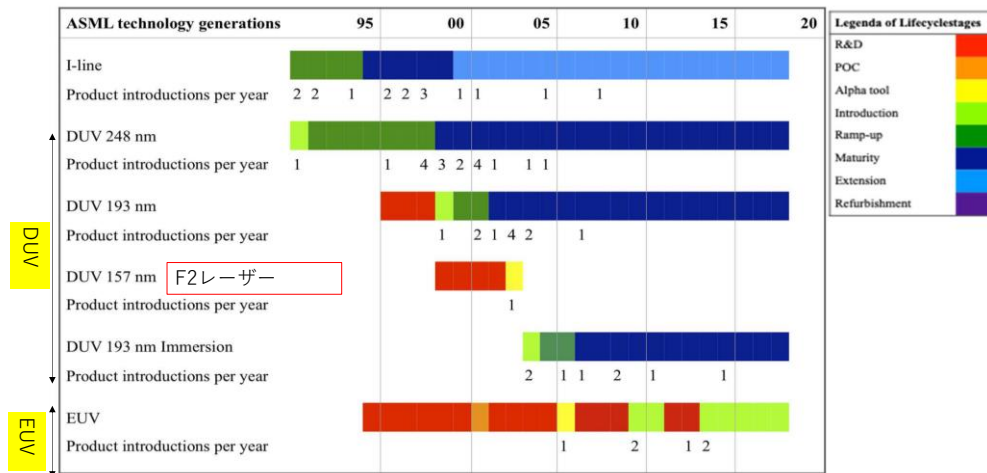
90年代ごろから光を光源に使う露光装置の物理限界がささやかれ始め、次世代技術の探索が始まった。X線やイオンビームなども当初は有力な光源の候補だったが最終的にはEUVが最右翼候補として残った。97年ごろからASMLはEUVプログラムをキックオフする。しかしEUVは、13.5nmという非常に短い波長をもち、KrFやArFと比べても波長が一桁違う。248nmのKrFから193nmのArFへは漸進的な革新であるに対して、そこからEUVへ到達するには不連続的な飛躍を必要としたとあって良い。

図表8は、ASML露光装置の光源別ライフステージを比較したものだが、DUVに比べてEUVの研究段階、つまり探索過程の長さが顕著である。2000年を過ぎると液浸（immersion）以外のDUV露光装置は既に成熟段階に到達している。これ以降、DUVを光源として使った露光装置の技術体系は安定的なものになりドミナントデザインが確立したとみることができる。以降、改良と改善を積み重ね、DUVは収益の柱に成長する。既存技術の深堀りと活用（Exploitation）とあって良いだろう。

それに対して、EUVは2005年になってもデモツールの段階であり、2010年になってようやく試作品が顧客での研究と学習のために提供されたに過ぎない。まだまだEUVの技術挙動は明らかではなく、EUVという新技術の探索（Exploration）が長く続いた

といって良いだろう。

図表 8 ASML露光装置の光源別ライフサイクルステージ比較



出所: "Incumbent Success in the Era of Ferment: The Selection of the Next Generation of Technology"
 Mohammad N. Nasiri, Susanne van der Velden, Niels Noorderhaven, & Henk Akkermans Tilburg University August 2019 Academy of Management Annual Meeting
 Proceedings 2019(1):18560

2000年から2015年にかけて、ASMLはDUV露光機の改良開発(Exploitation)に投入しながらも同時に、EUV露光機の探索(Exploration)にも手を緩めることがなかった。DUV開発から得られる利益をEUVの研究開発へと投資したのである。既に述べたが、ASMLは2017年までに、EUVに対して90億ドルもの研究開発投資を単体で行っている。この巨額な投資は、金の成るDUV事業があって初めて可能になったはずだ。こうしてASMLは約15年にも及ぶ両利きの経営を実践した。

一方でキャノンとニコンは、ASMLとほぼ同時期にEUVの技術探索を開始しながらも、利益が短時間に確実に見込めるDUVへの傾斜を強めてゆき、ついにはEUVから撤退するに至った。EUVにあくまでも食らいついたASMLに対して、早々に撤退した日本勢という対比が可能かもしれない。ではASMLはニコンやキャノンに比べて、EUVの将来性に関する確固とした見通しを持っていたのだろうか。いや、そうとはいえない。例えば2010年に至ってもASMLのアンニュアルレポートは、経営のリスク要因としてEUV事業の不透明性と不確実性を指摘しているからだ。

とするならば、ASMLと日本企業のEUVに対する見方の違いと執拗さは、一体何によってもたらされたのだろうか。これについては今後の更なる調査・研究が必要である。

参考文献)

ASML アンニュアルレポート (1995~2020)

An-Chi Tung and Henry Wan.2023. "Organizational Investment: The case of ASML-Can the Product Make the Producer." Foreign Trade Review 58(1)176-191.

Baldwin, Carliss Y., and Kim B. Clark. 2000. Design Rules: The Power of Modularity. The MIT Press.

Chuma, Hiroyuki. 2006. “Increasing Complexity and Limits of Organization in the Microlithography Industry: Implications for Science-based Industries.” *Research Policy* 35(3): 394-411.

Mohammad N. Nasiri , Susanne van der Velden , Niels Noorderhaven , & Henk Akkermans.2019”Incumbent Success in the Era of Ferment: The Selection of the Next Generation of Technology “ [Academy of Management Annual Meeting Proceedings](#) 2019(1):18560

中馬宏之.2005 “我が国半導体露光装置産業が直面する複雑性と組織限界”

榎波・田路、2017.アーキテクチャー進化における製品開発マネジメント、『一橋ビジネスレビュー』Win.214-227.

廣田義人 (2001)「半導体露光装置ステッパーの開発、普及とその要因」『技術と文明』12巻、2号 (118) の

林征治.2015.オープンイノベーション論の再考－半導体露光装置産業の事例から．『立教大学 経営学論集第86集』

第3章 エネルギー・サプライチェーン議論

エネルギーは国民生活、経済活動等の基本、その「低廉・安定」供給が必須と言われてきたが、近年「環境配慮」が加わった。

1 その代表的なものが温暖化問題である。

原因物質としての CO₂ の発生では、主として移動体からの排気ガスであるが、その他煙突からの煙、さらに家畜の口から排気などがある。しかし、対応として、もっぱら移動体からの排気ガスの削減に議論が集中している。

温暖化の被害としては、海水温の上昇に伴う水位の上昇は例えばツバル水没の危機が、また

北極・南極の氷の溶解による白熊・ペンギンへの悪影響が、あるいはシベリア凍土溶けによる地域の洪水等が挙げられている。

さらに温暖化による異常気象として熱波による山火事の頻発、豪雨による河川の氾濫がみられる。

他方忘れてはいけないのは、CO₂ の吸収源として植物の生長、また海水への溶け込み、さらに海中の植物による吸収も評価が必要がある。

これらの現象は世界経済に大きなお響を及ぼしている。

2 電源からの排気ガスが問題とされるが排気ガス 0の電源として、太陽光や風力、地熱といった地球資源の一部など自然界に常に存在するエネルギーの活用についてのわが国の状況は、

- 1) 地熱－環境対策との調整（騒音問題から地元の合意が必要）から開発進まない
- 2) 水力発電－開発地点に限られるうえに環境意識が強いわが国ではあまり期待できない
- 3) 内陸風力発電－適地少ない 地元は騒音被害を訴えてくる
- 4) 洋上風力発電－デンマーク・英国で進みつつありわが国でも巨大化して徐々に進展
- 5) 太陽光の間接輸入－砂漠で蓄電しこれを持ち込む 国際的協力体制による対応
- 6) わが国の原子力発電の稼働は地域の合意の取り付けが課題（新潟・福島）

3 原子力発電の位置づけ－国ごとの政治と経済の関係から対応が分かれ、さながら、「Beauty Contest」化の様相を呈している。

－ 他国は本当にできるのか？ 日本は生真面目で損をするのではないのか？という疑問を抱えつつ進めていくこととなる。

－ ゆくゆくは次世代炉開発が必要であり、そのためのベンチャーの育成、小型研究炉の建設に必要な財政的支援、国際協力の推進が求められる。

- 4 温暖化問題は、そもそも地球大の対応が求められるのではないのか？ 地球規模の課題 とすると 国際的組織での取り組みがある。仮に先進国が CO2 排出 0 になっても途上国が CO2 排出継続では地球環境は守れない。

言い換えると、先進国は国内での削減よりも低コストで削減できる途上国で削減をし、これを国内分にカウントすることは一つの選択肢である。

途上国援助の方策として、技術と資金・人材育成等の取り組みがある。

- 5 21 年 10 月策定の第六次エネルギー基本計画で「2050 年カーボン・ニュートラル」を目指し安全性 (Safety) を前提とした上で、エネルギーの安定供給 (Energy Security) を第一とし、経済効率性の向上 (Economic Efficiency) による低コストでのエネルギー供給を実現し、環境への適合 (Environment) を図る、いわゆる「S + 3 E」である。同時に先進国を中心として 2050 年までに自国における温室効果ガスの排出をネットゼロにする方針を示す中、日本も 2020 年 10 月に 2050 年「カーボン・ニュートラル」を宣言している。

6 再生可能エネルギー

- 1) 同じくエネルギー基本計画では国内電源に占める再生可能エネルギー（以下、「再エネ」とする）の比率を現行の 2 割から 30 年度 36~38%に引き上げる目標を掲げる。
- 2) 政府各省庁調達する電力目標では 2023 年度 少なくとも 35%を再エネでとなっている
- 3) 政府関係機関の消費電力の再エネ比率を 30 年度までに 60%に高めること その実現に向けて 25 年度 40%、27 年度 50%と段階的に引き上げ、30 年度を待たずにできるだけ早く 60%の達成につなげることを目指す。

- 7 パリ協定 2015 年の国連気候変動枠組み条約締約国会議 (COP21) で採択され、2016 年発効したもの。そこでは温暖化ガス削減を取り決め 世界共通の「2 度目標 (努力目標 1.5 度以内)」すべての締約国が目標の策定・提出義務がある
ただし、これについては逆風が強い 殊に 欧州の動きに注意する必要がある。

- 8 ウクライナ侵攻では「日米欧対中露の経済のブロック化」が進み、新冷戦の展開とみられる

先進国についても昨今ウクライナ＝ロシア戦争でやや議論が戻っているのではないのか？

この動きから新たに生ずる疑問として、国内に（油田などの）重要な資源があるかどうかで分断が進むことになるのではないのか。グローバルなものの流れが見直され「リショアリング（国内回帰）」が進むことになるのか。

今後この動向を注視すべきであろう。

9 その他 水素をめぐる議論；

次世代の脱炭素燃料として有力なのは水素であり、その供給をめくり様々な議論がある。

「水素基本戦略」によると、40年供給量を現状の6倍の1200万トン程度に増やすことを目指し、このために今後15年間に官民で15兆円の投資計画を検討するとみられる。

課題は現在水素の供給価格は100円／ m^3 で既存燃料の最大12倍に相当し、30年に価格を少なくとも3分の1に引き下げることができるかが課題である。

欧米も水素導入に向け政府が後押ししている。

第4章 日米企業の研究開発・設備投資と収益性の実証分析

1. はじめに

日本の製造業の収益性の低下が指摘されて久しい。1980年代まで高い収益性を示していたが、その後は日本の製造企業の収益性の水準は低下していると言われており、この低下の原因の一つとして研究開発投資及び設備投資の効率性の低下があるとされている。今後も2022年度の本研究会の課題となったサプライチェーンの課題などもあり、事業環境の不確実性が高まっている。日本の製造業は今でも高い技術力を有しており、魅力的な製品を提供し続ける能力は十分保持しているが、この不確実性を乗り越えるための戦略的マネジメントが不可欠である。例えば、研究開発投資及び設備投資の効率性が下がっているからと言って、安易に「投資額を減らす」という経営判断は従来蓄積してきた技術力を低下させることに直結するため、とても推奨できるものではない。後ほど述べるように研究開発及び設備投資と収益性は米国企業でも負の関係が認められており、その中でも持続的な競争力の維持し、将来の飛躍的な事業成長を意図した戦略的マネジメントを実施している米国企業があることを踏まえると日本企業においても、事業環境の不確実性を踏まえながら独自の経営判断が不可欠と考えられる。

ただし、そもそも、日本の製造企業の研究開発投資の効率性が低下していることを示す実証的な分析結果は未だ十分とは言えない。研究開発と企業業績について既に実証的な研究があるが、むしろ、研究開発投資と企業のパフォーマンスには正の相関関係が示唆される結果も多い。ただし、日本の製造業全般としては、収益性が低迷していることは事実であり、その要因として、研究開発の効率性の低下は議論されている。また、研究開発と並び製造企業にとっては設備投資がイノベーションの源泉としてとても重要である。なお、設備投資は、直接、生産設備等に投資されるものであり、研究開発投資に比べて、その成果が収益に結実するまでの不確実性も低いと考えられる。そのため、設備投資の収益性への貢献は十分に認められるとも考えられる。

また、そもそも、このような研究開発投資及び設備投資の効率性の低下は日本だけの現象なのかという疑問がある。後に示すように近年企業収益の高さが称賛されている米国企業においても効率性の低下が指摘されている。それであれば、そもそも効率性が低下しているからといって安易に投資を減らすというのではなく、将来の企業成長のためには不可欠な投資と考えて、戦略的な経営判断により、積極的に研究開発投資を及び設備投資が重要であるという考え方も可能である。

これらのような問題意識から、本章では筆者も共同研究者となった日本及び米国の製造企業の研究開発投資及び設備投資と収益性との関係を豊富な定量データを元に分析を行った二つの研究成果を引用したい（今橋ら、2023）[1]、（鈴木、2023）[2]。両方の研究とも、すなわち日本及び米国の製造業においては、分析対象年度のすべての年度において、研究開発投資と収益性は負の関係にあり、また、多くの年度で設備投資が負の関係であることを実

証している。すなわち、研究開発投資及び設備投資を安易に放棄するというのではなく、今後、イノベーションが不可欠な企業においては戦略的に積極的な投資が不可欠であるという考え方が不可欠であると考えられる。

2. 既存研究

製造企業の競争力の最大の源泉は技術であり、研究開発活動は極めて重要である。ただ、日本企業の研究開発の効率性が低下しているのではないかと指摘する既存研究も少なくない。榊原ら（2002）[3] は研究開発の効率性に関する既存研究を整理し、研究開発の効率低下は疑問の余地なく確認できるわけではないが、効率性の低下を示唆する研究が多くあり、その要因として、日本企業の技術戦略に課題があるとしている。ただし、過去に研究開発と収益性に関して実証的な分析を行った研究においては、研究開発投資と企業のパフォーマンスには正の相関があるとする結果が示されている。例えば、鄭（2005）[4]は東証1部、2部の上場銘柄のうち売上高研究開発費が1%以上の企業の株式を対象に分析し、1年間株式を保有した際のリターンについて検証している。その結果、売上高研究開発費の比率の高い企業は超過利益をもたらす結果が得られたと主張している。また、榊原ら（2006）[5]は、日本の製造業を対象として、売上高研究開発費の比率が高い企業はPBR（Price Book Value Ratio）の高い成長株であることを見出し、特に売上高研究開発の比率の高い企業が多い産業においては、研究開発投資が時価総額に対して有意に正の効果を与えていることを指摘している。

その一方で、筆者による定量的な実証分析として、2008年度の製造企業のデータを分析し、サービス化比率が高い企業ほど収益性が高く、その一方で、研究開発費比率が高い企業ほど収益性が低い傾向にあるという分析結果がある（玄場、2012）[6]。この結果は、日本の製造企業の研究開発投資の効率性が低下しているという指摘と整合的とも言える。さらに筆者は長期的な分析結果を行い、研究開発投資と収益性は、2000年代前半までは正の関係にあるが、近年は負の関係にあり、また、設備投資についても有意な結果が得られていない年度があるものの、2010年度までは概ね正の関係にあったが、設備投資比率も収益性には有意に負の関係にあることを示した（玄場ら、2016）[7]。これらの分析結果については、業種ごとの実証分析が重要であるとの批判があり、筆者は2015年度のデータを用いた分析を行っており、結果としては医薬品と生産用及び業務用機械器具製造業において有意に負の値となったが、他のほとんどの業種が有意な結果が得られないものの正の値となった（玄場ら（2017）[8]）。すなわち、同じ製造企業であっても業種によって研究開発及び設備投資の戦略に大きな差異があり、業種別の事情及び長期的なイノベーション戦略の変化も踏まえた詳細な分析が今後必要であることが述べられている。

そして、周知のように2019年に発生した新型コロナウイルス感染症拡大は企業の収益性に大きな影響を与えた。そのため、前述の今橋らの研究において、2015年度から2021年までのデータを収集し、日本の製造企業の研究開発投資・設備投資と収益性の関係について実証

分析が示されている。以下に、その分析方法及び分析結果を引用する。

3. 日本企業の分析手法

まずは、日本企業の分析結果を以下に紹介する。(今橋ら、2023))の分析対象は、2015年度から2021年度に日本の上場市場に上場している製造企業である。データは日経 NEEDS データベースを用いて収集を行い、2015年度から2021年度の売上高、営業利益、研究開発費、設備投資費を計上している企業が分析対象となっている。全製造業の分析対象企業数はおおよそ1,300企業である。

各企業の研究開発費比率及び設備投資費比率と収益性との関係を定量的に実証するため、売上高営業利益率を被説明変数、各企業の売上高研究開発費比率(以下、研究開発比率)及び売上高設備投資費比率(以下、設備投資比率)を説明変数とした重回帰分析を行っている。なお、規模が大きい企業ほど利益性が高い規模の利益は一般に知られていることから、企業規模の代理変数として各企業の売上高を説明変数として加えている。以下に説明変数及び被説明変数それぞれの定義を示す。

【被説明変数と説明変数の定義】

営業利益率：営業利益／売上高

研究開発比率：研究開発費／売上高

設備投資比率：設備投資費／売上高

企業規模：log10(売上高)

4. 日本企業の分析結果

各年度の重回帰分析の結果を図表1に示す。それぞれ、修正済み決定係数及び説明変数に対する回帰係数であり、*は各係数の有意水準を示している。なお、研究開発比率と設備投資比率の説明変数間に高い関連性がある場合、多重共線性を避ける必要があるため、分散拡大要因 VIF (Variance Inflation Factor) を算出して判断した。VIF 統計量が10以上であれば、多重共線性が問題となるため、VIF 統計量が10以上の場合はどちらかの説明変数のみを用いた回帰式で分析を行った。

年度	研究開発比率		設備投資比率		企業規模		定数		決定係数 補正R2
		有意		有意		有意		有意	
2015	-1.49	**	-0.07		0.024	**	-0.005		0.952
2016	-1.22	**	-0.06		0.043	**	-0.100	*	0.988
2017	-1.35	**	0.07		0.005		0.08	**	0.996
2018	-1.29	**	—		0.020	*	0.02		0.997
	—		-10.64	**	0.174	**	-0.19		0.930
2019	-1.52	**	0.92	**	-0.021	*	0.17	**	0.996
2020	-1.33	**	—		0.008		0.06		0.994
	—		-13.44	**	0.162	*	0.06		0.936
2021	-1.25	**	0.12	**	0.200	**	-0.88	**	0.999

* :5%有意、* *:1%有意

図表 1 日本の製造業企業の分析結果

ほとんどの年度において、研究開発比率の係数は有意に負の値となっている。また、設備投資比率については、2019 年度と 2021 年度は有意に正の値となる結果が得られたが、有意に負の年度も多い。やはり前述のように日本の製造企業の研究開発費の効率性が低下しているという指摘と整合的な結果が得られ、設備投資についても効率性の低下に悩む企業が多いことが示唆されている

5. 米国企業の分析手法

研究開発及び設備投資の効率性の低下は日本企業だけなのであろうか。この点、実は米国企業でも効率性が低下していると指摘する研究がある。例えば、経済産業省産業技術環境局（2021）「我が国の産業技術に関する研究開発活動の動向」によれば、米国企業は、多額の研究開発費を費やしているが、それが効率的に利益に結び付いていないことが示唆されており、研究開発投資の効率性の低下が指摘されている [9]。また、1996 年～2005 年と 2006 年～2015 年を第 1 期と第 2 期の期間に分けて、研究開発の効率性（研究開発効率性＝生産性上昇率/研究開発支出）の低下に関する研究結果によれば、米国製造業の場合、第一期と

第二期を比較すると、第二期の方が研究開発の効率性が低下している[10]。さらに米国の研究開発の効率性が年率 10%程度で低下していることを示す研究結果もある[11]。また、投資後の利益のバラツキに関する研究もある。研究開発投資によってもたらされる将来便益が、設備投資と比較すると、非常に大きな不確実性を有することを報告している[12]。このような既存研究を受けて、前述の鈴木ら（2023）は米国企業の研究開発・設備投資と収益性との実証分析を行っている。以下、その結果を引用しよう。分析対象は、米国の上場市場に上場している企業である。データは FactSet を用いて収集を行った。2015 年度～2021 年度の売上高、営業利益、研究開発費、設備投資の費用を計上している企業のデータを用いた。サンプル企業数を以下に示す。

年度	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
企業数	1224	1277	1338	1470	1594	1710	1791

図表 2. 米国企業の分析対象企業数

分析方法は今橋ら（2023）と同じである。以下に説明変数及び被説明変数の定義を示す。

【被説明変数と説明変数の定義】

営業利益率：営業利益/売上高

研究開発比率：研究開発費/売上高

設備投資比率：設備投資費/売上高

企業規模：log10（売上高）

6. 米国企業の分析結果

重回帰分析の結果を表 2 に示す。本章の主題である研究開発投資及び設備投資比率の係数の正負のみを引用した。決定係数は修正済み決定係数であり、***は各係数の有意水準を示している。なお、多重共線性は問題ない。日本企業と同様に研究開発比率の係数は全ての年度で有意に負の値であった。また、設備投資比率の係数については、2019 年度及び 2021 年度は有意に正の値であるが、それ以外は、全ての年度で有意に負となる結果が得られた。

年度	研究開発比率の係数の正負	設備投資比率の係数の正負	決定係数
2015	— ***	— ***	0.778
2016	— ***	— ***	0.878
2017	— ***	— ***	0.977
2018	— ***	— ***	0.933
2019	— ***	＋ ***	0.933
2020	— ***	— ***	0.206
2021	— ***	＋ ***	0.998

図表 3 米国企業の分析結果

(注) 被説明変数は売上高営業利益率

どの年代も多重共線性はなし

*** : 0.1%有意

7. 考察

前述のように米国企業においても研究開発比率に関しては、前述のように米国企業の研究開発費の効率性が低下しているという既存研究があり、鈴木ら（2023）の研究でも、それらの指摘と整合する分析結果が得られたことになる。それでは、研究開発投資を安易に辞めれば良いのだろうか。もちろん、研究開発費を削減すれば収益率は向上するかもしれないが、その後の企業成長は困難になる企業が多いことも明らかである。例えば、代表的な業界である半導体業界の場合、2023 年現在、足元では市況が低迷しているが、研究開発を遅らせると次世代品で競合他社にシェアを奪われ、競争に負けてシェア低下や再編につながる可能性があり、収益悪化につながるかもしれないが、長期的な視点で継続的に研究開発投資の必要があると言われている[13]。

その一方で研究開発費を削減して収益率を向上しようとする企業があることも事実である。この点、数多くの企業データを用いて、企業の業績予測が研究開発に与える影響について実証分析を行った研究がある[14]。この研究においては、1980 年から 2001 年までの米国製造企業の研究開発費を対象に企業のパフォーマンスなどが研究開発投資に関する意思決定にどのように影響するかを分析した結果、業績目標を達成する可能性が低いと想定された場合には研究開発活動が活発化し、対照的に、自社のパフォーマンスが高く改善すると期待される場合、研究開発活動が低下するというものである。すなわち、経営のパフォーマンスが十分であると想定されるのであれば、株主の代理人である経営者としては利益を確保するために、むしろ研究開発投資に消極的になるということになる。

次に、設備投資比率については有意に正の係数を示す年度があるものの、やはり負の年度が多い。日本と比べれば明らかに高い収益性を誇っている米国企業であるが、研究開発と同様

に設備投資も戦略的な意思決定が不可欠であることが分かる。

8. 結論

本章で示すように日本のみならず米国企業においても研究開発及び設備投資の効率性の低下が示唆された。この結果からは、企業は投資を辞めて収益率を向上させるか、あるいは持続的な成長を目指して投資を継続するかの難しい経営判断に迫られていることが分かる。

ただし、グローバル企業として成長している著名企業では、敢えて今後の企業の成長を実現するために積極的な研究開発投資を行っている。例えば、鈴木ら（2023）の研究では、GAFAと呼ばれる成長企業の研究開発投資額及び売上げに対する比率も日本企業とは桁違いの値となっていることが紹介されている。具体的には、Amazon が 732 億ドル、Alphabet が 395 億ドル、Apple が 262 億ドル、Facebook が 353 億ドルと為替によって比較する値が上下するものの、日本企業で最大の投資額と考えられるトヨタ自動車の約 1 兆円を大きく凌駕しており、売上高に占める研究開発費については、Facebook が 30%と最も高く、Alphabet が 14%、Amazon が 14%、Apple が 7%となっている。ただし、営業利益率も極めて高い。具体的には Apple が 30%と最も高く、Alphabet が 26%、Facebook が 25%、そして、Amazon が最も低く 2%となっている。研究開発費が世界最大の Amazon は、儲かっていないにも関わらず、研究開発投資に邁進している。一方、4 社の中で最も利益率の高い Apple の売上高研究開発費比率が最も低い。

これに対して、日本企業の研究開発費と営業利益率は少し見劣りしていることは否めない。今橋ら（2023）では、具体的な企業の数字が紹介されている。2021 年度間の上場企業の製造業のなかで研究開発費が多い企業は、トヨタ自動車（1 兆 904 億円）、本田技研工業（7,801 億円）、日産自動車（5,035 億円）と大手自動車企業が並んでおり、次いで、デンソー（4,900 億円）、武田製薬工業（4,558 億円）となっている。ただ、これらの企業でも売上高研究開発比率及び営業利益率は大きく異なっており、それぞれ、トヨタ自動車は 4%、8.1%、本田技研工業 5.9%、5%、日産自動車 6.4%、-1.9%となっている一方で、デンソーが 10%、3.1%、武田薬品工業が 14.3%、15.9%であった。

ただし、だからといって研究開発及び設備投資などの企業の成長に不可欠な投資活動を安易に辞めることを推奨することはできない。冒頭でも述べたが、今後も 2022 年度の本研究会の課題となったサプライチェーンの課題などもあり、事業環境の不確実性が高まっている中、この不確実性を乗り越えるための戦略的意思決定により、競争力を向上させる戦略的マネジメントが不可欠である。研究開発投資及び設備投資の効率性が下がっているからと言って、安易に「投資額を減らす」という経営判断は従来蓄積してきた技術力を低下させることに直結する。高い収益性を誇っているとされる米国企業でも研究開発・設備投資と収益性には有意の負の関係が認められており、その中でも持続的な競争力の維持し、将来の飛躍的な事業成長を意図した戦略的マネジメントを実施している米国企業がある。日本企業においても、不確実性を踏まえながら独自の経営判断が不可欠と考えられる。

参考文献

- [1] 今橋裕、鈴木貴之、玄場公規「コロナ禍をふまえた日本製造企業の研究開発投資及び設備投資と収益性の定量分析」日本 MOT 学会第 14 回年次研究発表会、2023
- [2] 鈴木貴之、今橋裕、玄場公規「アメリカ企業の研究開発投資及び設備投資と収益性の定量分析」日本 MOT 学会第 14 回年次研究発表会、2023
- [3] 榊原清則，辻本将晴；「日本企業の研究開発の効率性はなぜ低下したのか」ESRI Discussion Paper Series No.47，内閣府経済社会総合研究所，2003
- [4] 鄭義哲；R&D 企業の株式パフォーマンス-以上リターンと R&D ファクター，証券アナリストジャーナル 10 月号，pp.98-10，2005
- [5] 榊原茂樹，與三野禎倫，鄭義哲，古澄英夫；企業の研究開発投資と株価形成，証券アナリストジャーナル 7 月号，pp48-58，2006
- [6] 玄場公規；「製造業の多角化の定量分析」，研究技術計画学会年次学術大会講演要旨集，27，pp1082-1085，2012
- [7] 玄場公規，竹岡紫陽，今橋裕，上西啓介；「日本製造企業の研究開発投資・設備投資と収益性の実証分析」，研究・イノベーション学会年次学術大会講演要旨集，31，pp814-817，2016
- [8] 玄場公規，今橋裕，竹岡紫陽；「日本製造企業の研究開発投資・設備投資と収益性の定量分析」，研究・イノベーション学会年次学術大会講演要旨集，32，pp373-376，2017
- [9] 経済産業省 産業技術環境局（2021）、我が国の産業技術に関する研究開発活動の動向－主要指標と調査データ－
- [10] MIYAGAWA Tsutomu & ISHIKAWA Takayuki, 2019. "On the Decline of R&D Efficiency," Discussion papers 19052, Research Institute of Economy, Trade and Industry (RIETI).
- [11] Bloom, N., and Jones, C. I., and Van Reenen, J., and Webb, M.; "Are Ideas Getting Harder to Find?" American Economic Review 2020, Vol.110, No.4, 1104-1144, 2020.
- [12] Kothari, S. P., T. E. Laguerre, and A. J. Leone.; "Capitalization versus Expensing: Evidence on the Uncertainty of Future Earnings from Capital Expenditures versus R&D Outlays", Review of Accounting Studies, Vol.7, pp.355-382, 2002.
- [13] 半導体装置開発、「顧客の近く」必須に 日立ハイテク、米台韓拠点に数百億円、K O K U S A I、サムスン付近で増強. 日本経済新聞. 2023 年 2 月 8 日，朝刊，p.14.
- [14] Chen, WR. ； "Determinants of Firms' Backward- and Forward-Looking R&D Search Behavior", Organization Science, INFORMS, Vol.19, No.4, pp.609-622, 2008.

第5章 ソフトウェア・サプライチェーンにおける変化と課題

5.1 はじめに

Sonatype (2021) によれば、Java や Python など主要な 4 つのオープンソフトウェア（以下 OSS: Open Source Software）開発環境において、2021 年までに 3,745 万件以上のソフトウェア部品（原文では components and packages）が利用可能になっており、うち 2021 年だけで全体の 17%にあたる 630 万件が増加したとしている。また、2021 年には 2 兆 2,000 億件を超える OSS ソフトウェア部品が利用のためダウンロードされており、これは前年比で 73%増加しているとしている。

このように商用も含めソフトウェア開発に OSS ソフトウェア部品は欠かせない存在になっているが、一方では悪意ある改変をソフトウェア部品に加え、これを商用ソフトウェア開発のサプライチェーンに忍び込ませようとする試み（ソフトウェア・サプライチェーン攻撃）が急速に増加している。Sonatype (2021) によれば、このような攻撃は 2015 年から 2019 年で 216 件だったものが、2019 年から 2020 年の 1 年で 929 回に増加し、更に 2021 年までの 1 年間では 12,000 件を超えるに至って、増加率は前年比で 650%に達している。

本稿では、ソフトウェア調達におけるサプライチェーンに発生した大きな変化と、その変化に潜む課題が生み出した Log4j 問題と SolarWinds 社事案を振り返りながら、ソフトウェア・サプライチェーン攻撃に対する今後の対策について解説する。

5.2 ソフトウェア・サプライチェーンの変化と課題

IPA (2014) は、ソフトウェア・サプライチェーンを「ソフトウェアの開発から、それがエンドユーザに使用されるまでの流通、その後の運用・保守、およびユーザが組合せて利用するまでの、それに関与する組織の活動、役割、情報、資源等を指す」と定義している。そして、近年発生しているサプライチェーン変化の特徴について、①「水平分業型への変化」、②「供給者仕様決定型への変化」、③「ユーザ組合せ型への変化」の 3 つの観点から整理している。

このうち「水平分業型への変化」については、かつて企業グループ内でインテグレータとして最終製品化を担う企業がグループ内子会社等からソフトウェアを調達していたものが、製品ライフサイクルの短縮化に伴い調達がグループ内で完結できなくなり、グループ外からの調達が増加していった変化を指している。

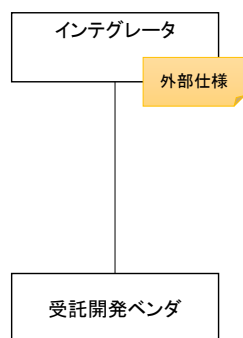
「供給者仕様決定型への変化」については、かつてはソフトウェアを調達する側が品質要求等を含む外部仕様を作成し受託開発企業に提示していたものが、ソフトウェア開発において OSS や商用オフザシェルフ（以下 COTS: Commercial Off-The-Shelf）の利用が広がるにつれ、外部仕様の決定権が OSS ベンダ、COTS ベン

ダ等に移行していったことを指している。

「ユーザ組合せ型への変化」については、初期のパソコン市場において見られたように、統合ソフトウェアベンダが複数のソフトウェア部品を組み合わせで多機能の製品を提供するのではなく、スマートフォンにおけるアプリ利用に見られるように、複数の企業から提供されるソフトウェア製品（多くはアプリ）をエンドユーザが組み合わせで利用するようになったことを指している。この場合も、外部仕様の決定権がソフトウェアベンダからアプリ等の提供者に移行している。

これら3つの変化によりもたらされる共通の課題は、外部仕様の決定権が、統合ソフトウェアベンダやインテグレータから、水平分業化し複雑な供給ルートを形成する多数の開発ベンダや OSS・COTS ベンダに移行したことで、ソフトウェア部品レベルでの横断的な品質保証が不可能となり、予期せぬ脆弱性の発生や不正プログラムの混入の危険性が急速に増大している点にある。

【調達者が仕様決定していた時代】



【供給者が仕様決定する時代】

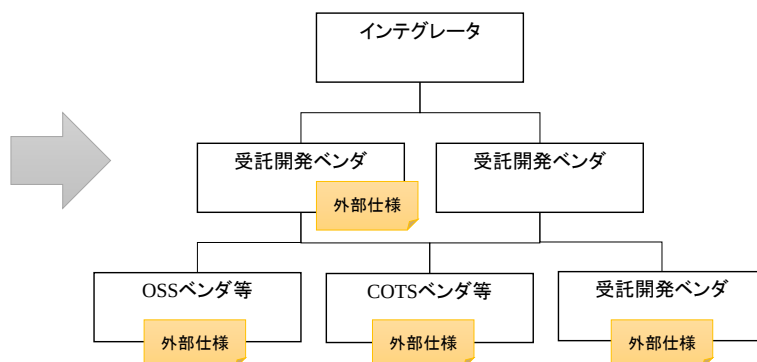


図 5-1 ソフトウェア・サプライチェーンと外部仕様決定者の変化

(IPA (2014) より筆者作成)

5.3 Log4j 問題により表面化した課題

2021 年 12 月 10 日頃より、ソフトウェア部品「Apache Log4j」（以下 Log4j）に重大な脆弱性が存在し、外部から任意のコードが実行可能であるとの報告が相次いだ(JPCERT(2022))。Log4j はシステムのログを記録するための小さなソフトウェア部品で、広く使用されている Java という言語で開発され OSS として提供されていた。

ソフトウェアの脆弱性については、国際的に統一した評価基準を提供する「共通脆弱性評価システム」（CVSS: Common Vulnerability Scoring System）により評価されるが、この Log4j の脆弱性は影響度最大との評価だった。ただし、外部から任意のコードが投入可能という脆弱性はたしかに非常に危険だが、近年ではそう珍しい事例ではなく、年に数回程度の頻度で報告されている。

問題は、ログを採取し記録するという機能は、ほぼすべてのシステムで必要になる汎用性の高いものであり、自由に利用可能な OSS である Log4j が非常に広い範囲で採用され、あまりに多用されているために、どこで使用されているのか把握が困難になっていたという点にある。

前述したように、ソフトウェア・サプライチェーンの変化により、システムを構成するソフトウェアは水平分業化・階層化された多数のソフトウェアベンダにより外部仕様が把握され、さらに部品レベルでは OSS・COTS ベンダが仕様決定する構造で、最終的にはシステムによりサービスを提供する事業者により、そういったソフトウェアが組み合わされて使用されるため、Log4j のような最小レベルのソフトウェア部品がシステムのどの部分に使われているかは、その把握が非常に難しくなっている。

米国のサイバーセキュリティ企業の tenable 社が 2021 年 12 月 22 日時点の調査結果として公表（tenable（2021））した内容によれば、さまざまな種類のサーバ、Web アプリケーション、コンテナ、IoT デバイスなど、ネット上の全資産の 1 割に Log4j の使用が検出されており、その影響は多くの産業・地域に及んでいるとされた。

また、警察庁（2021）は、脆弱性が報告された 2021 年 12 月 10 日の直後から、図 5-2 のようにこの脆弱性を狙った外部からの攻撃が活発化していると報告しており、複数の通信手段を使って攻撃していることから、Log4j が Web や遠隔操作機能、外部検索機能など多様な環境に使用されている可能性が示唆される。

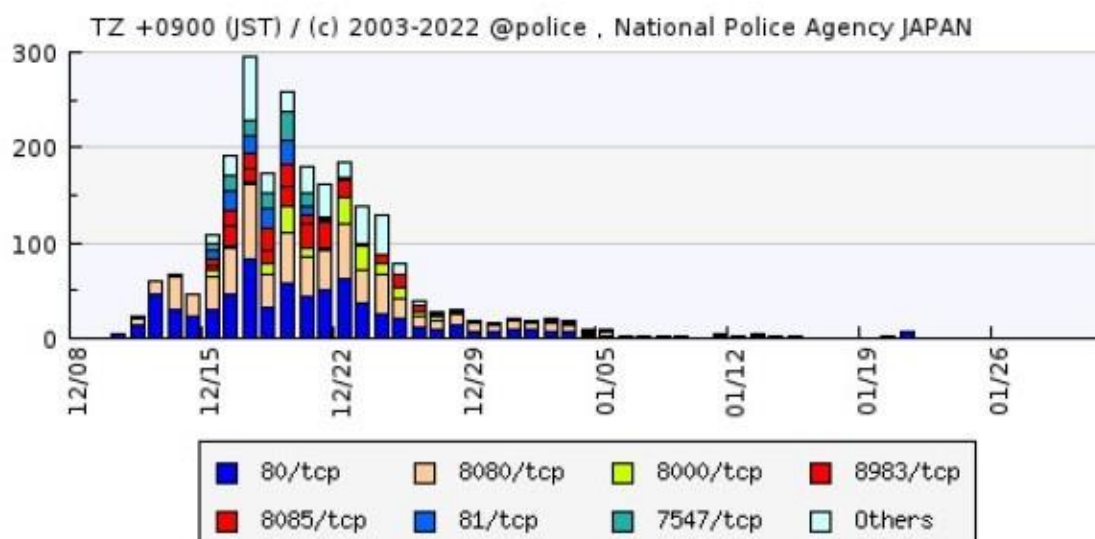


図 5-2 Log4j の脆弱性に対する外部からの攻撃状況
（警察庁（2021）より引用）

このように、大型の SaaS レベルから監視カメラなど超小型の IoT デバイスレベルまで、使用されるソフトウェアの種類、機能、品質、セキュリティレベルといった情報が広範かつ階層化された大量の供給者に分散保持されているため、ソフトウェア部品の脆弱性が判明しても、どの資産に対して対策をすればよいか、判別が非常に困難になっているのが実情になっている。

5.4 SolarWinds 社事案

2020 年 12 月、米国のセキュリティ企業 FireEye 社が、ネットワーク管理用として広く使用されている SolarWinds 社の製品を通じて、大規模にマルウェアが広まっていると発表した (FIREEYE (2020))。

このマルウェアは、ソフトウェア開発のサプライチェーンのかなり上流において同社製品のアップデートデータに意図的に仕掛けられていた。しかも、製品やアップデートデータに、同社の正規製品であることを示す証明書 (以下、コード署名証明書) を付与するプロセスにも問題があったとみられ (digicert (2021))、製品やアップデートデータにマルウェアが含まれているにも関わらず、同社の正規製品としてコード署名証明書が付与されて流通し、ダウンロード時のセキュリティソフトによる検出も回避されていた (digicert (2021))。

このマルウェアはバックドア型であり、外部から命令を送り込むことで、PC やサーバーなど稼働環境にあるファイルの改変、削除、プロセスの実行・停止、システムの再起動などが可能になっていた (Trend Micro Research (2020))。このマルウェアは 2020 年 3 月から 6 月にかけて約 18,000 ユーザに製品やアップデートデータに紛れてダウンロードされており (Solarwinds(2020))、影響を受けた米国組織は財務省、商務省、国防総省、国土安全保障省、国務省などの政府組織や、Cisco, Nvidia, Intel, Deloitte などの民間企業など多数に及ぶとされた (井上 (2021))。

多数の米国の中核的な組織に攻撃を加えながら、マルウェアの拡散開始から 9 カ月にもわたってその攻撃を検知できなかったこの事案について、米マイクロソフト社のブラッド・スミス社長は「世界史上最大規模かつ最も巧妙な攻撃」との認識を示し、「ゆうに 1,000 人を超えるエンジニアが対応に当たっている (筆者註：攻撃に参加しているとの意味) との結論に達した」と述べている (ロイター (2021))。この攻撃については当初からロシアの関与が指摘されていたが、2021 年 4 月 15 日、ホワイトハウスは声明を出して、この攻撃はロシア対外諜報庁(SVR)に責任があること、その対抗措置として財務省による対象企業への経済制裁、ロシア外交官 10 名の追放、同盟国とのサイバーセキュリティ協力の強化を挙げた (山添 (2021-b))。

5.5 顕在化したソフトウェア・サプライチェーンの課題と対策

図 5-1 に示したような、長年にわたるソフトウェア・サプライチェーンの変化により、外部仕様の決定権が、最終製品を提供する統合ソフトウェアベンダやインテグレータといった調達側から、水平分業化し中間製品や部品を提供する多数の開発ベンダや OSS・COTS ベンダといった供給側に移行したことで、ソフトウェア部品構成の把握や部品の正当性の保証が困難になっている。

そして、Log4j のような問題が発生してもインテグレータや製品利用者が影響を特定することを困難にしたり、SolarWinds 社事案のようにマルウェアを部品レベルで故意に混入されているにもかかわらず、正規製品として認証して配布してしまうといった事故の原因となっている。

以上の議論により、現在のソフトウェア・サプライチェーンが内包する問題点として、以下の 2 点を指摘することができる。

- ① ソフトウェアの最終製品、中間製品におけるソフトウェア部品構成の明確化
- ② 第三者による介入を排除するコード署名証明書の発行プロセス

このうち上記①については、は SolarWinds 社事案を受けて 2021 年 5 月 12 日にバイデン大統領が署名した大統領令（THE WHITE HOUSE（2021））において、ソフトウェア・サプライチェーン強化の一環として、SBOM（Software Bill Of Materials）の運用強化を求めている点が注目されている。

SBOM とは、ソフトウェアを構成する部品の構成表であり、ソフトウェア部品名とバージョン、部品を組み込んだサプライヤなどの情報が、全部品に関して記述される。この情報を、サプライチェーンの最も上流側で開発された基本部品の段階から提供し、中間製品、最終製品へと情報を集積することで、サプライチェーンの下流に至っても、製品を構成するすべての部品と提供者を確認可能にしている（図 5-3 参照）。すでに食品の世界では、サプライチェーンで加えられた原材料の情報が、最終製品において一覧できるが、同様の機能をソフトウェア・サプライチェーン上で実現しようとするものだ。

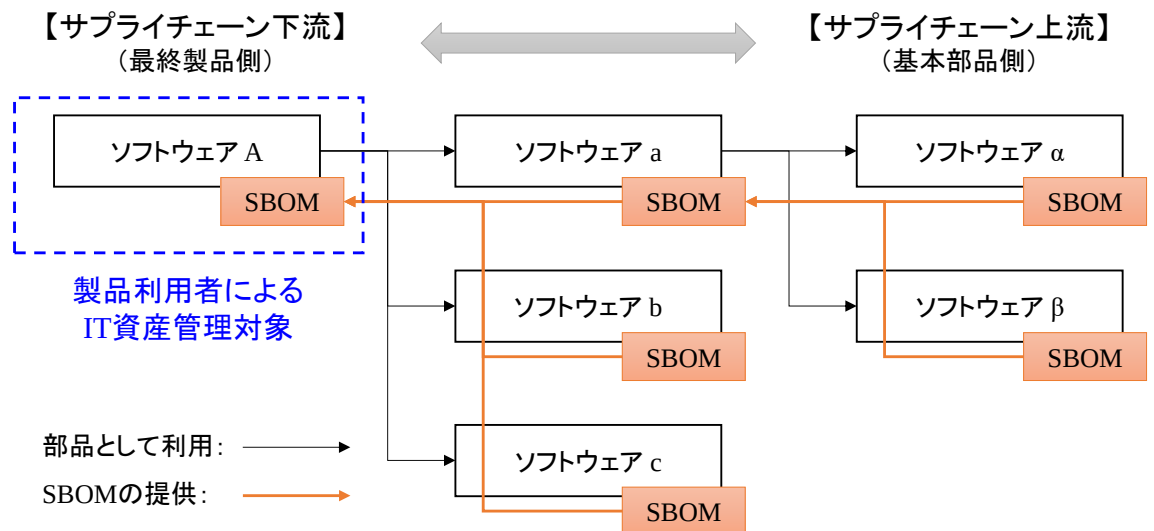


図 5-3 SBOM によるソフトウェア部品構成情報の管理
(PwC (2022) より筆者作成)

民間企業や政府機関、一般の消費者などは、最終製品を IT 資産の管理対象としているが、従来は Log4j のような問題が発生しても、管理している製品にその部品が含まれるのか、つまりその製品に脆弱性が存在するのかは、製品提供者からの情報提供がなければ判断できなかった。これに対して、SBOM による部品構成管理が強化されれば、どのサプライヤによってどのようなバージョンの Log4j が製品に組み込まれているかが、サプライチェーンの末端においても把握可能となるため、問題への対処を迅速化できる。

SBOM により、上述した①のソフトウェア部品構成管理の問題は理論的には解決可能だが、しかし上述した②のコード署名が大きな問題として残る。SBOM による情報集積が有効となるのは、サプライチェーンの各プロセスでサプライヤが付加した SBOM が正確であることを、各サプライヤが証明できる場合に限られる。しかし現状では、SolarWinds 社事案に関して示されたように、マルウェアを混入したソフトウェアをサプライヤの正規の製品であるかのようにコード署名することが可能になっており、同様の方法で、マルウェアの存在を隠した SBOM をソフトウェアに付加しコード署名することも、また可能である。

第三者によりコード署名が偽造される問題は、署名に用いられる暗号鍵を国際的に管理している PKI (公開鍵暗号基盤: Public Key Infrastructure) の根幹を揺るがす問題であり、その解決策については本稿執筆時点でも、まだ議論の途上にある (KIMURA (2023))。

5.6 おわりに

本稿では、近年注目された Log4j 問題と SolarWinds 社事案の二つの問題と、ソフトウェア調達に関わるサプライチェーンの変化の関係について解説した。大規模かつ迅速なソフトウェア開発を可能とするように、受託開発ベンダー間の分業が進み、ベンダーの階層化が進む中で、サプライチェーンは複雑化しながら長くなり、ソフトウェアの最終調達側からはどのような部品が使われているのか、どの部品を誰が採用し品質保証しているのか、ますます見えにくくなっている。また、コード認証に使用する暗号鍵の管理もルーズになってきており、第三者のつけ入る隙が生まれている。食品や医薬品などセキュリティとセーフティを厳しく求められる分野の知見を、ソフトウェアの世界にも今後適用する必要があるだろう。

【参考文献】

- [1] digicert (2021) 「SOLARWINDS 社製品への攻撃：コード署名が原因なのか？」
<https://www.digicert.com/jp/blog/is-code-signing-to-blame-for-solarwinds-attack> 2023 年 3 月 26 日参照
- [2] FIREEYE (2020) “Highly Evasive Attacker Leverages SolarWinds Supply Chain to Compromise Multiple Global Victims With SUNBURST Backdoor”
<https://www.mandiant.com/resources/blog/evasive-attacker-leverages-solarwinds-supply-chain-compromises-with-sunburst-backdoor> 2023 年 3 月 26 日参照
- [3] HITOMI KIMURA (2023) 「コード署名変革の前夜」
https://jsac.jpCERT.or.jp/archive/2023/pdf/JSAC2023_2_LT1_jp.pdf 2023 年 3 月 26 日参照
- [4] IPA (2014) 「ソフトウェアサプライチェーンにおける変化と課題」
<https://www.ipa.go.jp/files/000040879.pdf> 2023 年 3 月 26 日参照
- [5] JPCERT (2022) 「2021 年 12 月に公表された Log4j の脆弱性について」
<https://www.jpCERT.or.jp/newsflash/2021122401.html> 2023 年 3 月 26 日参照
- [6] PwC (2022) 「SBOM 普及の本格化～ソフトウェアサプライチェーンの構造的な課題と解決策～」
<https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/column/awareness-cyber-security/vulnerability-management-sbom1.html> 2023 年 3 月 26 日参照
- [7] Solarwinds (2020) “FORM 8K: CURRENT REPORT”
<https://www.sec.gov/ix?doc=/Archives/edgar/data/1739942/000162828020017451/swi-20201214.htm> 2023 年 3 月 26 日参照

- [8] sonatype (2021) “2021 State of the Software Supply Chain Report”
<https://www.sonatype.com/resources/state-of-the-software-supply-chain-2021> 2023 年 3 月 26 日参照
- [9] tenable (2021) 「評価された資産の 10 分の 1 は Log4Shell に対して脆弱」
<https://jp.tenable.com/blog/one-in-10-assets-assessed-are-vulnerable-to-log4shell> 2023 年 3 月 26 日参照
- [10] THE WHITE HOUSE (2021) “Executive Order on Improving the Nation’s Cybersecurity”
<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/05/12/executive-order-on-improving-the-nations-cybersecurity/> 2023 年 3 月 26 日参照
- [11] Trend Micro Research (2020) 「SolarWinds 社製品を悪用、米政府などを狙う大規模サプライチェーン攻撃」
https://www.trendmicro.com/ja_jp/research/20/1/massive-supply-chain-attack-that-exploit-SolarWinds-products-to-target-the-US-Government-and-other-organizations.html 2023 年 3 月 26 日参照
- [12] ロイター (2021) 「米政府サイバー攻撃「史上最大かつ最も巧妙」＝マイクロソフト社長」
<https://jp.reuters.com/article/cyber-solarwinds-microsoft-idJPKBN2AF07Y>
2023 年 3 月 26 日参照
- [13] 井上大介 (2021) 「サイバー攻撃の動向とサイバーセキュリティ研究・人材育成の最前線」
https://www.soumu.go.jp/main_content/000785337.pdf 2023 年 3 月 26 日参照
- [14] 警察庁 (2021) 「Java ライブラリ「Apache Log4j」の脆弱性 (CVE-2021-44228) を標的とした攻撃の観測について」
<https://www.npa.go.jp/cyberpolice/important/2021/202112141.html> 2023 年 3 月 26 日参照
- [15] 山添博史 (2021-a) 「ロシアをめぐるサイバー問題—ロシアの情報セキュリティ概念と SolarWinds 社事案」 研究報告「大国間競争時代のロシア」(令和 2 年度 ロシア研究会), No.11, pp103-111.
https://www.jiia.or.jp/pdf/research/R02_Russia/11-yamazoe.pdf 2023 年 3 月 26 日参照
- [16] 山添博史 (2021-b) 研究レポート「米露関係における SolarWinds 社サイバーセキュリティ事案」
<https://www.jiia.or.jp/research-report/russia-fy2021-01.html> 2023 年 3 月 26 日参照

日参照

第6章 建築産業の情報化・自動化とサプライチェーン

6.1 序論

建築業の特徴は「一品受注生産（典型的な請負業）」「労働集約型生産」「現地屋外生産」である。この本質はゼネコン業が発生した戦国時代から変わらず、その本質が建築産業のサプライチェーンのあり方に大きく影響している。建築産業の本質を分析するために、歴史的観点から「情報化・自動化とサプライチェーン」を議論する。

建築産業においても情報化と自動化・ロボット化の進展は目覚ましい。人類の情報伝達の起源に遡り、情報伝達の根源から技術革新時代のIT技術の活用状況を考察し情報化技術活用が建築のサプライチェーンの明確化に効果があるかを論ずる。建築生産の自動化の歴史は考察し、自動化・ロボット化がサプライチェーンに与える影響を考察する。

建築の生産は製造業と異なり、街・近隣・自然・安全・天候・多様な職種・多様な材料・多くの規則など複雑な仕組みの中で行われる。請負業・受注産業で現地屋外生産、多くの許認可作業も伴いCSR（企業の社会的責任）、SDGsの観点も必須事項である。従って生産性のみならず、Q(品質) C(コスト) D(工期) S(安全) E(環境)を考慮して行う必要がある。このような建築産業の特性とサプライチェーンの関係を探る。

日本では建設＝建築＋土木　と言う概念である。建設業は建築工事と土木工事を行う企業、建築業とは建築工事を行う企業である。大手ゼネコンは建設業であるが、竹中工務店は土木工事の別会社があり、イメージとしては建築業である。本論で扱うのは建築分野の情報化・自動化であるので「建築業」を主として使用するが、ゼネコン全体として論ずる場合など必要に応じて「建設業」「建設産業」と記す。

6.2 建築業のBL サプライチェーンとCW サプライチェーン

建築業は多くの面で製造業と大きく異なる。序論で述べたように建築業は典型的な「請負業」で、古くからある「旦那」と「出入りの大工（工匠）」の関係である。例えば、大手建設会社ではつい最近までメインの入り口は発注者のみを使用し、社員は脇の小さなドアから出入りしていた。江戸時代では「出入りの大工」が建築・維持管理の全てを担当してきた。

「出入りの大工」なので、かなりの頻度で「旦那」のところに伺い、不具合などを聞いて維持管理をし、更には取り壊し・新築などを行ってきた。「出入りの大工（工匠）」は多くの職人を抱え、あるいは臨時採用して仕事をしてきた。従って建築業のサプライチェーンとは「旦那」―「工匠」の関係である。現在で言えば「発注―企画―設計―施工―施設運営―維持管理―取り壊し」の建物（ビル）のライフサイクル（Building Lifecycle）が重要なサプライチェーンとなる。これをBL サプライチェーン（仮称）と呼ぶことにする。

このBL サプライチェーンの全てのステップに軸の異なるサプライチェーンが存在する。

「発注」と言う行為にも「事業計画」「資金調達」「発注建物の企画」「土地取得」「地盤調査」などの作業が伴い、その全てに担当する企業が存在する。特に建築施工では元請（特定建設

業・ゼネコン）の下に具体的に建築工事を担当する29種類の下請（一般建設業・一次協力業者）が存在する。この元請-下請の流れにも工事を担当するサプライチェーンがある。これを Construction Work サプライチェーン：CW サプライチェーン（仮称）と呼ぶことにする。

経済安全保障問題に関係するとされるサプライチェーンの問題は建設産業のビジネスにも大きく影響する。しかしながら日本の建設産業のトップ団体である日本建設業連合会（日建連）、日本建築学会では、「経済安全保障」と銘打った動きは見当らない。土木学会では少し議論が出されているが、大きな話題にはなっていない。建築・住宅分野では最近ウッドショックが言われた。在宅勤務などの影響で欧米における住宅需要の高まり、追い打ちをかけるようなロシアのウクライナ侵攻によってロシア産木材の輸入の滞りがあった。

林野庁の報告書によれば、我が国の森林面積は国土の3分の2に当たる約2,500万haで、世界有数の森林国である。森林蓄積は人工林を中心に毎年約6千万m³増加し、現在は約54億m³面積ベースで人工林の半分が50年生を越えて成熟し、利用期を迎えている。従って特にロシア産木材に頼ることなく自国木材で十分まかなえる。林野庁は、林業の成長産業化と森林の適切な管理の両立を目指して、令和7年度の国産材供給量4,000万立方メートルの達成に向けて、路網整備の推進に取り組んでいる。しかしながら路網の総延長は増加しているが、木材輸送などに重要な林道の整備が遅れている。走行車両の大型化等に対応できるようにする必要がある。

ウッドショックに続いてアイアンショックが起これば建築鉄骨ファブリーケーター業界でも大きな話題となった。2021年に入ってから発生した建築用鉄鋼材料や棒鋼の価格が高騰である。しかしながら、この価格高騰は現在議論されている経済安全保障議論とは異なる現象である。新型コロナの影響で鋼材の需要は一時減少したが、コロナが収束に向かったことで、世界の経済活動が再開し、需要が拡大したことが原因である。日本は、鉄鉱石をはじめとする鉱物資源の多くを海外からの輸入に依存しており、世界規模での鉄鉱石の供給不足が価格高騰の要因である。

建設産業は経済安全保障推進法が指定する「基幹インフラ」に該当しないが、指定された基幹インフラ（空港・鉄道・水道など14分野）の建設には大きく関わっている。建設産業のサプライチェーンでは経済安全保障問題は政治問題や戦争ではなく、コロナなどの疫病によるパンデミック、気候変動、自然災害、地政学的混乱などの方が影響する。建設業・建築業の特徴は「労働集約型生産」「一品受注生産」「現地屋外生産」「請負生産」「大型複雑生産」「工事毎に変化する生産手段」「外部依存生産」である。このことにより、CW サプライチェーンは非常に複雑であり、1次協力業者までは明確化出来るが、2次以降の明確化は困難である。

建築・土木・不動産業界企業の現在のサプライチェーンの取組は経済安全保障の観点ではなく、SDGS、CSR、地震等の災害対策の観点からのものがほとんどである。

6.3 建築と建築産業の本質

6.3.1 建築の本質

建築業の歴史から建築の本質を探る。中世の荘園時代、建築工匠が「座」と言う組織を持ち、社寺や貴族の工事を独占していた。戦国時代になると城下町建設が始まり、工事量が急増し、従来の特権的な少数工匠の「座」で対応出来なくなった。「座」はなし崩し的に解体し、工匠の活動は自由化した。工匠は戦国武将と結びつき日本各地から職人を集め、大型工事を指揮するようになった。総合建設業（ゼネコン）の奔りである。工匠は様々な材料、資材と様々な技能を持った多数の職人を駆使して工事を進めた（材工共）。即ち高度に「労働集約型生産」で、このことは現在のゼネコンにも引き継がれている建設産業の特徴の一つである。戦国武将の城郭や町づくりは武将毎に考案され、多くは秘密とされた。従って工匠の請け負う工事は一つとして同じものがなく、全て「一品受注生産」「現地屋外生産」であった。この「一品受注生産」「現地屋外生産」と言うスタイルは今に続く建設産業の特質の一つである。現代の建設職人はゼネコン間を自由に移動するが、戦国時代の職人も特定の工匠、武将に限定せず、今以上に自由に活動していた。建設工事の作業員が特定のゼネコンに限定せず、自由に活動するのは歴史的慣例である（図 6-1）。江戸時代は、幕府の作治方が作事奉行を頂点に組織され、多くの工事は直営で行われていた（図 6-2）。



図 6-1 戦国時代「座」が解体し「工匠」が工事を指揮。
（ゼネコンの始まり）

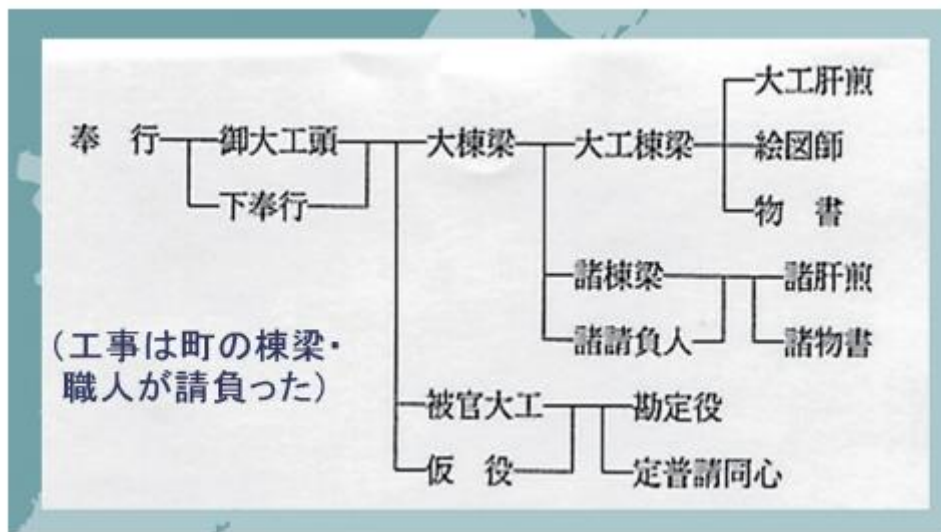


図 6-2 江戸幕府の作事方組織 資料〔1〕より引用

徳川幕府体制維持の一環として職人の自由度はかなり制限され、庶民住宅も図面・仕様が作事方に厳しくチェックされた。しかし、次第に手間請負が主流となり、幕府の作事方は設計監理を主たる業務とするようになった。結果、町の棟梁・職人が請負業者（ゼネコン）となり「仲間」を結成した。「仲間」では「座」のような特権は廃止され、就業権利は自由平等であった。ゼネコンの特徴の一つがこの受注産業であるということは建設産業の始まりからである。中世から江戸時代、建設事業の流れ・職人の活動は、時代の流れによって変化した。職人の活動は比較的自由であった。職人が自由に活動するということは建設産業のサプライチェーン把握を困難にする要因の一つである。

現在の建設業・建築業の特徴である「労働集約型生産」「一品受注生産」「現地屋外生産」はゼネコンの始まりの中世「工匠」時代から引き続いているものである。

6.3.2 建築業の生産に必要な要素

製造業では生産性向上が最大の課題のように思われる。生産性で問われるのはコスト・工数・人数なので、これを如何に最小にするかが課題である。一方大手製造業では品質検査で問題が発生し、今後は品質・検査がより重視されるようになっていくと思われる。建築業の生産活動は製造業のような工場内と言う限られた環境で生産活動とは大きく異なる。街・近隣・自然・安全・天候・多様な職種・多様な材料・多くの規則など複雑な仕組みの中で行われる。そのため建築生産では生産性向上のみならず QCDSE が重要である。Q(品質) C(コスト) D(工期) S(安全) E(環境) である。単に生産性のみを上げれば良いという概念は早い時期から否定され、QCDSE の総合的な活動が必要とされている。最近では E(環境) が重視され、ゼネコン各社ともに SDGS を標榜している。受注産業であるため CSR も重要要素である。建設生産の CW サプライチェーンを論ずる場合にはこれらのことを勘案する必要

がある。そのために建設業におけるQCDS E活動について論ずる。

1) Q(品質)

品質管理は統計的管理、TQC、カイゼン、TQM、ISO9000、DXと変遷してきた。情報化の時代では品質管理にもDXと言う論が多い。全ての生産活動でQ(品質)が重要なことは論を待たないが、以前のTQC(TQM)活動と最近のDX活動には似たような現象(問題)がある。TQC(TQM)が何故衰退したかについて各種の記事・論文では以下のように指摘されている。イ)「品質管理さえすれば、経営は安泰」というような風潮ができてきた。ロ)「品質管理さえすればモノは買ってもらえる」と誤解されるようになった。ハ)QC活動はQCサークル大会での発表やデミング賞を取るために本業そっこのけで働く。ニ)QC活動の実務メンバーは自分たちが担当する工程を対象に取り組むが、生産工程全体では全く意味のないケースが多い。ホ)日科技連等から派遣された指導員は、個々の企業の生産の実態などほとんど理解していないので、書類を作る形式は分かっても中身は指導する方が知らない。ヘ)QCサークル活動そのものが目的となっている。ト)経営者・経営スタッフ・管理監督者がやるべきことを、TQCやQCサークルに尻拭いさせている。

一方DXについては以下のような問題点が指摘されている。イ)単にDXの必要性が認識されているだけで、経営戦略が不透明で具体的な実施事項に会社としての方針がない。ロ)DXを実施すれば経営が改善され業績が伸びると考えている。ハ)社会や同業他社の流れに乗り遅れないようにしているだけ。ニ)DX改革の成功率が非常に低い。マッキンゼー・アンド・カンパニーの調査によると、DXに成功する企業の割合は16%、企業変革の成功率が約30%、製造・エネルギー・インフラ・製薬といった業界に限定すると、デジタル変革の成功率は4~11%。ホ)Transformationは「変革」「変容」の意味を持っており、何かを根本から大きく変えること。従ってDXのゴールは「テクノロジーを活用したビジネスモデルの変革と優位性の確立」だが、実際は既存のシステムや業務プロセス、ビジネスモデルを維持したまま、ただテクノロジーを導入するだけになっている。ヘ)DXの成功しない要因は、経営者のコミットメントや理解度、企業文化、デジタル人材の不足。ただIT投資を進めるだけでは、DXの成功に繋がらない。ト)経営者がDX推進を現場に丸投げしている。チ)外部コンサルタントが会社の実情を知らずに推進・指導する。リ)社内でのデジタル人材不足。ヌ)既存システムが重荷で変えられない。TQCで問題だった事とDXの現状は酷似している。

日科技連は、TQMについて以下のように解説している。「世界を相手にした競争の中では、ただ単に品質が良い、価格が安いというだけでは生き残れません。変化する市場の中で、いかにしてお客様から求められる品質や共感される価値を生み出すかが重要なポイントになります。そのためには、戦略・企画・設計・技術・製造・販売・サービスなど、すべての部門、全社において品質や価値を理解し、それらを生み出そうとする取り組みが必要になります」。重要な指摘である。

品質管理はゼネコン社員の重要な役割であるが、検査などには協力業者が必要である。検査は重要な分野なので CW サプライチェーンは一次協力業者（検査会社）で止まっているのが通常である。しかしながら、検査に二次・三次協力会社が存在して、長い CW サプライチェーンとなると問題が発生する。

2) C（コスト）

コスト削減の基本は計画・設計の段階で如何に工夫するかであるが、建築生産では設計（設計事務所設計）と施工が異なるケースが多い。建築 DX の基本の BIM 活用でも設計事務所とゼネコン間の断絶問題が未だ解決されていない。建築ではデザイナーが最上流におり、著名な設計者の場合、施工のし易さ・コストダウンを全くしない場合もある（図 6-3）。建設産業の労働生産性は長い間変化していない。その理由は「労働集約型生産」「一品受注生産」「現地屋外生産」であり、更には「需給変動の波が大きい」ことである。

購買システムの改革とサプライヤー管理の徹底、自動化による人件費削減、工場生産化による現場作業減少、工事原価のリアルタイム把握がより重要である。

コスト管理は建築現場での重要事項なので現場係員が行うのが通常であるが、原価積算やコスト管理を行う企業・コンサルタントも存在する。従来では考えられなかった CW サプライチェーンが発生し、この現象は更に増大すると予想される。



図 6-3 設計者と施工者の連携が建設生産性の基本

3) D：工期短縮

建築業の工期短縮の実例を紹介する。製造会社は常に激しい国際競争に晒されている。建設会社に対する次のような要求は良くある例である。「台湾、韓国との競争が激しく、商品価格があつという間に低下する。新商品の半導体は、1 カ月でも早く競争相手に先行して販売したい。従って会社方針が出たらただちに工事を開始し半年以内に工場を稼働したい。発注者のこのような要求に応えるために、通常その規模の工場は 1-2 年程度の工期を必要とする場合でも、建設業はその P J を受注するために、技術開発部門で直ちに超短期工法（半年程度）を検討・提案する必要がある。グローバル産業となった日本製造業は激しい国際競争に晒され、近年の日本企業の衰退にみるように、経営判断を過てば超一流企業と言えども消滅する。

工期短縮のための開発工法の具体例を紹介する。地下工事は改善の余地が残されており、地上・地下を同時施工して工期短縮を図る工法なども重要である（図 6-4）。外注発注していたプレキャストコンクリートを現場で製作し、部材の運搬距離を短くすることも良く行われる。現場の垂直統合のサイト PCa 工法である（図 6-5）。生コンクリートを現場で製造するのも現場生産の垂直統合の一形態である。機能の一体化、複合化も重要な生産改革要素である。建築生産では運搬・揚重をいかに短縮、削減するかも重要な生産改革である。図 6-6 の建築・設備一体化工法もその例である。工期短縮とコストダウンは表裏一体の活動である。このようなコストダウンに伴う工法改革は CW サプライチェーンを大きく変革する。工事の一部における変更の場合は対処可能であるが、完全自動建築工法のような多くの CW サプライチェーンに変更を求める場合は困難が生ずる。

工期・工程管理は建築現場の最重要項目で、現場員が直接行うのが通常であるが、最近の人材不足などで現場管理・現場監督代行企業もある。CW サプライチェーンは時代により変化し、以前は考えられなかったサプライチェーンが発生している。このような新サプライチェーンの企業が二次・三次に仕事を出しているかは不明である。過去に建設工事の一括下請負と言う方法が存在したが、国土交通省は「一括下請負の禁止について」（平成 4 年 12 月 17 日付建設省経建発第 379 号建設省建設経済局長通達）等で禁止を計っている。

地下と地上の同時並行作業



図 6-4 地下工法にはコストダウンの工夫の余地が大きい

部材の先行製作



図 6-5 サイト PCa 工法

作業領域の変更



図 6-6 建築・設備一体化工法

4) S (安全)

CW サプライチェーンで最も重要な要素が S (安全) である。建築現場では「安全第一」は C, D に優先する必須事項であるが、建築現場では死亡事故が時々発生する。建築現場での死亡事故の状況を分析すると、どうしてこんなことが起こるのかという疑問を抱く場合が多い。事故の発生はほとんど理解に苦しむ行為である。例えば、自らが乗っている足場を自らが切断して落下するなどの行為である。注意しているにも関わらず「何故?」という事故の発生する根本要因の検討が必要である。建設会社では、新しい支店長が赴任すると死亡事故が発生するという不思議な現象がある。ある工事現場で同じ状態で鉄骨の柱を繰り返し建てていた現場があった。数十回目の柱工事の際に事故が発生した。今までと全く同様な作業であった。昨日も安全だから今日も安全との意識・惰性が問題である。建設現場や鉄骨製作工場に入った瞬間、この現場・工場は品質も良く、事故もなく利益が上がっているなど感

ずることがある。鉄骨製作工場が整理整頓されており、働く人々がきびきびしているなどの状態の場合である（図 6-7）。



図 6-7 工場に入った瞬間安全と品質管理の状態は分かる

安全対策には失敗の分析や制度整備などは必要条件であるが、働く環境や働く人々の意識がより重要である。組織の長の意識とその浸透、働く仲間のコミュニケーションが重要であり、このような環境では安全コストが少なくとも実質、安全は確保できる。現場での朝礼・体操（図 6-8）、「ひやりはっと運動」などは地味ではあるが、大切な行為である。失敗・事故の直接の原因はあったとしても、その発生要因は幅広いものである。どんなに注意しても事故は発生するものと考えなければならない。大きな事故の前にいくつもの軽い事故がある。僅かな事故の発生でも、目に見えない問題がないかの検討が「安全」確保の基本である。



図 6-8 朝、安全確認・作業内容確認・体調確認と安全意識の高揚は重要

技術も高度化・多様化しており前の常識では対応できない事象も発生している。朝礼もデジタルツールが使用され、分散・短時間になっている。情報化時代となり各種のセンサーや監視カメラ、更にはA Iの活用が盛んである。しかしながら安全確保はI T技術のみでは達成出来ない、作業現場全体の雰囲気・作業員の意識などが重要であることを再確認する必要がある。CW サプライチェーンのS（安全）ではサプライチェーン関係者全体の一体感が重要である。

5) E（環境）

日建連は建設工事の環境保全としてC（低炭素社会）R（循環型社）

N（自然共生社会）P（建設公害防止）を注視している。Cとしては太陽光発電、風力発電、LED利用、節水、各種緑化などである。Rは廃棄物削減、木材・廃材の再利用、分別の徹底である。Nは生態系保全、代替型枠利用、光害防止、希少種移植などである。Pは騒音対策、大気汚染防止、粉塵防止などである。図6－9に示すように建設廃棄物の全廃棄物に占める割合は大きい。環境が最大の社会的課題であり、ビジネス的にも最大の課題である。

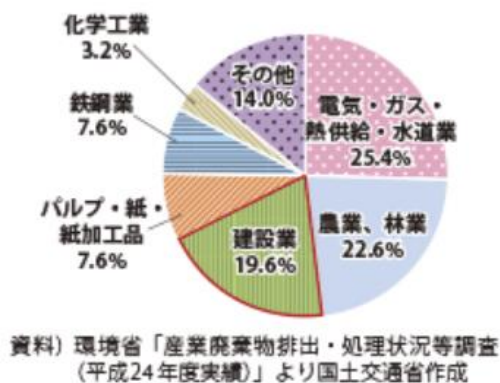


図6－9 建設業の廃棄物は全廃棄物の約20%

建設破棄物の処理状況を表6－1に示す。このような廃棄物処理にもサプライチェーンがある。

対象品目	指 標	H17実績	H20実績	H24実績
アスファルト・コンクリート塊	再資源化率 (%)	98.6	98.4	99.5
コンクリート塊		98.1	97.3	99.3
建設発生木材	再資源化・縮減率 (%)	90.7	89.4	94.4
建設汚泥		74.5	85.1	85.0
建設混合廃棄物	排出量 (万 t)	293	267 (H17比9%減)	280 (H17比5%減)
建設廃棄物全体	再資源化・縮減率 (%)	92.2	93.7	96.0
建設発生土	利用率 (%)	80.1	78.6	88.3

※縮減とは、焼却、脱水などにより廃棄物の量を減ずる行為をいう
資料) 国土交通省「平成24年度建設副産物実態調査」

表 6-1 建設廃棄物の再利用状況

建設会社の廃棄物処理は精力的で分別収集（図 6-10）が徹底している。汚泥処理もいろいろ工夫されている（図 6-11）。耐火被覆工事（図 6-12）やダイオキシン対策は社会的に大きな課題となり建設業各社は精力的に対策工法を開発した。



図 6-10 建設現場の廃棄物分類は徹底している



再生安定液製造設備



再生した安定液

図 6-11 掘削安定液ベントナイトの再利用



図 6-12 耐火被覆の無害化

2015 年 9 月の国連サミットで「SDGs（持続可能な開発目標）」が採択された。SDGs は狭義の環境ではなく、「地球環境」として地球という大きな視野でとらえたものである。SDGs が掲げる 17 のゴールは、環境、社会、人権、教育など、世界が抱えるさまざまな問題の解決を目指したものである。建設業もその経営理念や経営計画の重要課題として SDGs に取り組んでいる。建築現場の Q C D S E 管理は建設業の最重要業務であるが、CW サプライチェーンの新たな企業として、現場管理代行会社（一次サプライチェーン）が存在する。この場合は経済安全保障と言う観点での議論はない。但し C S R と問題では現場管理代行会社そのものの品質管理が重要問題と考える。

6.4 建設業の情報化とサプライチェーン

6.4.1 情報伝達の歴史から建設業・建築業の情報伝達の本質を考える

情報伝達手段の急激な変化・発展により、情報を活用した詐欺の増加、企業間や国家間の情報戦争、役所や企業や病院などへのサイバー攻撃、ネット中傷、情報セキュリティ問題のクローズアップなど情報は社会問題として大きくクローズアップされてきている。CW サプライチェーンでも情報伝達は最重要課題である。情報伝達のミスは工事全体の QCDSE に大きな影響を与える。そのため「情報伝達も歴史」を一度検討してみる。

人類が類人猿と大きく異なったのは言語を獲得したからと言われている。言葉を獲得する前の人類のコミュニケーションは類人猿や他の動物と同じく、表情、身振り手振り、発声、スキンシップなどであった。人類は言語を用いることにより、他の個体とより容易に、より深い意味の情報交換できるようになった。「情報」とは「送り手」から「受け手」に伝えられる知識、「受け手」の行動に変化を与える知識、個体間の意思疎通になる知識である。情報化の時代こそ人間の情報伝達の基本を認識することは重要である。サプライチェーンにおける情報伝達の基本は何かを検討する必要がある。

人類の生存や繁栄にとって情報を素早く・確実に伝える手段の開発は重要なものであった。

人類にとって最初の情報伝達手段は人間の言葉であるが、更に重要な情報伝達手段に文字の発明がある。文字の起源と歴史についても諸説がある。シンボルや記号のような原文字の使用は前期新石器時代、紀元前7000年と言われている。文字体系として知られている最古のものの一つはメソポタミアのシュメール人が使用した楔形文字で紀元前3500年頃。文字を記載するものとしては粘土、骨、亀甲、石、動物の皮、パピルス、紙があり、今はパソコン・モバイルになっている。情報を伝達する最古の手段としては紀元前4～6世紀頃の古代ペルシャの駅伝制があり、動物の皮に書かれたアラム語（古代西アジアの共通語、イエス・キリストの母語）の文字が、騎馬によって運ばれた。郵便の始まりとも言える。狼煙や太鼓による通信も早い時期からある。狼煙は戦いの武器として古くから世界中で利用されている。中国でも紀元前8世紀の西周（中国古代最初の王朝殷の次の王朝）の幽王が狼煙を利用したことが知られている。狼煙は戦いでも重要な役割を占め、狼煙の上げる回数、狼煙の色によってある程度詳細な内容を伝えるように工夫していた。情報の伝達が人間・人間集団の生き残りの重要手段であったことが理解できる。現在の情報伝達は企業・産業の生き残りの重要手段である。そのためにはBLサプライチェーン、CW サプライチェーンの情報伝達のあるべき姿を検討する必要がある。

日本においても狼煙は弥生時代（紀元前7世紀～紀元3世紀）から存在している。日本列島が一つのクニとして纏まる前には西日本では各地の首長が独立していた。それが一つのクニとして纏まる前段として幾度となく首長間の戦いがあった。そのために西日本各地で高地に集落が築かれ、敵の襲来を狼煙で連絡しあっていた。日本で狼煙が最も重要視されたのは白村江の戦い（新羅・唐連合軍 VS 百済・倭連合軍の戦い。百済・倭連合軍は大敗した）での敗戦である。日本（倭）が恐れたのは新羅と唐の連合軍が倭（日本列島）に攻め込んでくることだった。そのために対馬から九州、瀬戸内海、ヤマト（大和）に延々と山城・狼煙台を設置した（図6-13）。

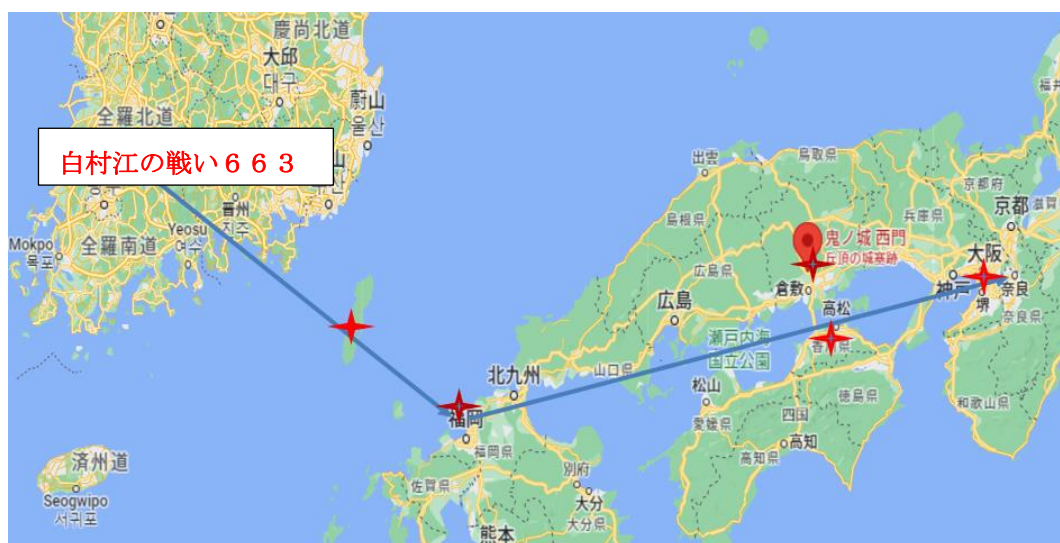


図 6-13 白村江の戦（663）で新羅・唐連合軍に敗れた
倭（日本）は対馬・大和のルートに狼煙台と山城を設置した

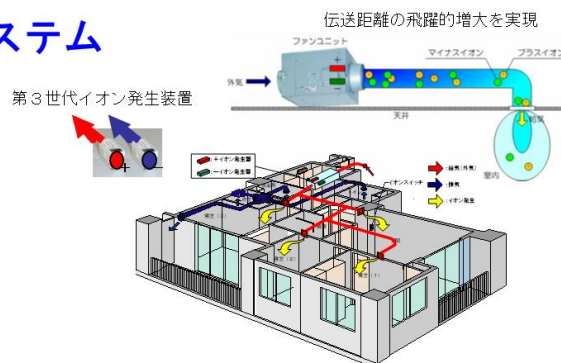
近代の国家間戦争・企業間の経済戦争でもサイバーセキュリティが重要課題となっている。その手法は I T・I O T・A I と多彩化・広域化・グローバル化・高スピード化しているが、情報リスクの予測は、情報伝達の歴史を研究することで得られる可能性が高い。子供の教育にはスキンシップ、絵本の読み聞かせ、口元・表情での伝達が大切である。I T・オンラインの時代であるが、人間はやはり生き物であり、言葉の発明以前に使っていた類人猿時代の情報伝達方法は今後も重要である。建設産業のサプライチェーンに対しても、B L・C W いずれのサプライチェーンにおいても I T 技術で情報を伝えればそれで良いと言うものではない。I T 技術で伝えるべき情報と Face to Face でこそ伝わる情報があると考ええる。

6.4.2 情報化時代の始まりへの建築業の対応

コンピューターやインターネットの 開発・活用は 1960 年代前後から始まった。情報化時代の始まりに対し、建築業界の技術的対応は、IT 機器の建物側の環境整備が主たるものであった。コンピューターなどの電子機器から発生する熱の処理、有線で機器間を接続するための空間構成、電波の外部漏れを防ぐ電磁シールド技術の開発など、コンピューターをはじめとする情報系機器の活用・保全のための空間環境技術の開発であった。更に通信機器優先の室内環境によってシックハウス問題が発生し、その対策に追われることになった。

■プラスマクラスターイオンダクト搬送システム

- ・室内除菌／ウイルス対策
- ・ダクトでイオンを搬送
- ・世界初



■放電型光触媒脱臭装置

- ・優れた脱臭効果
- ・放電エネルギーで光触媒を励起

完成システムイメージ（集合住宅用）

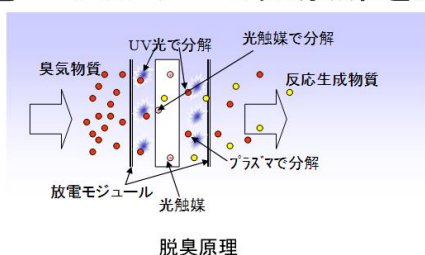


図 6—1 4 情報機器設置による空間環境悪化を防御する技術開発

情報機器対応環境および人間環境空間確保の技術の開発（図 6—14）はゼネコンの研究所が行ったが、工事は CW サプライチェーンの設備ゼネコンと言われる一次協力会社が行った。二次以降の CW サプライチェーンは設備ゼネコンのビジネス範囲で、建設業者の管理外である。建築行為（設計・施工）のために情報システムを活用する技術の開発は遅れて開始された。多くの産業で IoT が取り入れられ、CPS 的活用が行われているが、建築産業の情報化、IoT 活用では CPS 的活用は非常に少ない。建築業はプロジェクトマネジメント業で、情報化の時代でも CW サプライチェーンとしては一次協力会社をマネジメントする関係にとどまっている。

6. 4. 3 建築技術の発展の歴史から BL・CW サプライチェーンを考える

建築業およびその建築技術の発展の歴史を振り返り、サプライチェーンのあり方を考える。まずは日本建築技術の粋の頂点である桂離宮から建築とは何かを考える。桂離宮にはいくつかの建物がある。月見台を持つ古書院・中書院・新御殿の美しさは格別である（図 6—15）。この書院は月を楽しむために建てられたもので、王朝文化・貴族文化の象徴であり、風雅を楽しむ豊かな教養に溢れている。世界に一つしかない文化であり、製造業の大量生産商品（モノ）とは対極にある造形品である。この書院の軒は月を長く見るができるように、通常の軒先よりも極端に短くされている。常識にとらわれない自由奔放な設計である。桂離宮は八条宮家の智仁（としひと）親王及び智忠（としただ）親王と工匠・造園師の密接な連

携の賜で、発注者－施工者の BL サプライチェーンが重要である。



図 6－15 桂離宮の書院は発注者（八条宮家親王）－施工者（小堀遠州の影響を受けた工匠）のサプライチェーンの連携の作品

飛鳥時代以来、建物の設計・施工に 関わる棟梁の技術は口伝・秘伝で伝承された。そのため大工達の技術は不揃いであった。江戸時代初期、大工達の技術の不揃いを統一するために、木割り・規矩術が完成された。この二つの技術は意匠設計（デザイン）・木造事（施工）の基本技術であり、工事の生産性向上のための技術でもあった。多くの寸法の部材を持つ大型工事を良品質・短工期で完成させるにはこの二つの技術は必須の技術であった。桂離宮の書院も木割り、規矩術と言う大工の技術によって完成されたが、それにとらわれない自由さが建築美を創り出している。桂離宮の美しさは書院以上に、庭園と配置された茶室の美である。桂離宮の庭園（図 6-16）はブルーノタウトが評したように、世界のすべての人々が愛する日本の建設技術である。この庭園も智仁（としひと）親王及び智忠（としただ）親王と茶人の小堀遠州の影響を受けた工匠・造園師の趣味・嗜好の結集である。発注者－施工者の建築生産の BL サプライチェーンのあり方がやはり重要である。



図 6-16 桂離宮の茶室（松琴亭）と庭園

日本庭園の始まりは神の象徴である磐座で、自然物に神が宿ると言うのは縄文時代以来の日本人の宗教心である。建築物は人類生存のための覆いとしてだけではなく、宗教行為、権威を示す行為、精神生活を豊かにするため、文化・芸術を楽しむため、地域を豊かにするために建設されてきた。各々、個性豊かであり、いかに他と異なるかが基本にある。建設技術の歴史を振り返ると、寸法測定技術、作図技術、接合技術、切断技術、構造技術、掘削技術、運搬技術、揚重技術で、「情報を伝える技術」という概念はない。建築設計の情報化の発展を振り返ってみると、意匠・デザインは芸術の分野で IT に馴染まないという意見は、今でも意匠設計者の間にある。CW サプライチェーンの企画・設計部分では今後も IT 技術に馴染まないものが残ると考える。

6. 4. 4 建築生産における情報化と CW サプライチェーン

建築デザインの分野では、50 年ほど前までは設計作業は製図版に T 定規を当て、鉛筆で書いたものにカラス口で墨入れするという作業であった。その後ドラフターで製図するという時代に進歩し、IT 技術の出現により CAD が出現した。世界初の CAD ソフトウェアは、1963 年、マサチューセッツ工科大学の Ivan Sutherland 博士が作成した「Sketchpad」で、1982 年、John Walker が Autodesk 社を設立し、パソコン向け CAD ソフトウェア「AutoCAD」を発売した。「AutoCAD」は建築業界での利用を想定していたので、建築業界に広く普及した。現在、盛んに活用されている建築 BIM は Autodesk 社が優勢である。

施工分野の生産性向上には多くの施策があるが、その基本は省人化である。建設分野での情報技術活用は米国のエンジニアリング会社が早い。その場合も情報化システムを採用することによってどの程度省人化できるかが、採用決定要因であった。国土交通省は「情報化施工推進戦略」を 2008 年にまとめ、2015 年に建設現場での ICT 導入を測量・設計・施工・管理の全プロセスに広げ、2016 年には「i-Construction～建設現場の生産革命～」を策定、建設施工の情報化が本格的に開始された。しかし、これらのほとんどは土木工事にに関するもの

であった。そこで建築 ICT 革命として「建築 BIM 推進会議」が国土交通省によって設置された。

建築の生産プロセス（設計・施工・維持管理）を通して生産性向上を図るとしているが、IoT や CPS については語られていない。IoT 時代のキーワードは、技術的には CPS・DigitalTwin・Big Data・Deep Learning であり、ビジネス的にはプラットフォーム・Servitization・DX である。IoT は通常、測定対象物（Things）にセンサーを設置して情報を発信させる。

製造業では測対象物は少数（点的）で、閉じたフィードバックグループで特定部品の最適化を図る（CPS）。建設産業の工事対象（道路・都市・各種施設と周辺・人や車の動き）における IoT の対象物は線的、面的、空間的、時間軸的と多次元である。更に建設産業が扱う範囲はモノ（things）以外に人の（移動・位置・動き）、人の（五感・満足度・好み・ニーズ）、波動、温度、湿度、放射線、照度など多様である。多地点の多様なセンサーから同時あるいは逐次発信されるデータの解析精度と速度、リアルタイムな情報発信が要求される。このような状況が建築における IoT 設置の目的であるため、DigitalTwin 活用、建築 BIM と IoT との連動などが期待されている。都市や空間は 4 次元・DigitalTwin 的で、スマートシティは建築産業での IoT・BIM・DigitalTwin の活躍の場である。スマートシティ建設における BL サプライチェーン、CW サプライチェーンは複雑で分析困難である。

6.4.5 建築の新情報システム BIM の普及と CW サプライチェーン

国土交通省主導の「建築 BIM 推進会議」の目的は「建築生産プロセスのデジタルデータの連携により生産を効率化する。さらにその生産データを循環させ、より高効率な生産体制を確立する。次いで、建物のライフサイクルを通じてのデータを蓄積して、新たな生産体制・システムの知見に繋げる。次にそのデータを物流、不動産投資、建物評価、都市データへ広げ、スマートシティのような面的分野にも繋げていく」としている。しかし、現在の建築 BIM は目的確保の第一歩「建築生産プロセスのデジタルデータの連携」の段階で躓いている。設計・施工・維持管理の各ステップで情報遮断があり、後工程になるほどメリットが薄れる（図 6-17）。

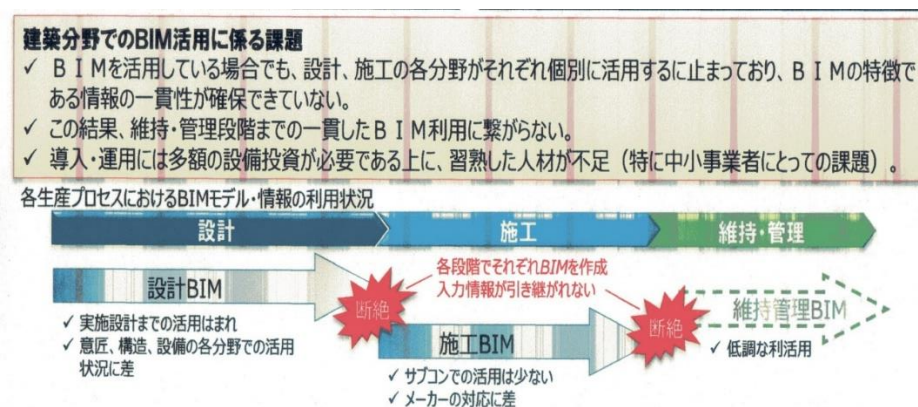


図 6-17 建築 B I M の設計・施工・維持管理での分断
(第 1 回建築 B I M 推進会議資料)

各設計事務所からの報告では事情はより複雑で、同じ設計事務所の設計でも意匠・構造・設備で異なる BIM ソフトを利用しているケースがあり、各分野でそれぞれ作業に適したソフトを選んでいいると言う。構造では BIM の前に構造解析ソフトで解析が行われるが、構造ソフトも多様で、設計事務所独自に開発したソフトも活用されている。大スパン建築の構造解析では、1) 計画初期の架構計画、2) 詳細設計の構造解析、3) 作図段階で異なるソフトを活用しており、通常の構造解析でも主架構と雑構造部材では利用するソフトが異なると言う。

設備 BIM は構造以上に混乱状態と言われている。設備設計は専用 CAD で行われ、その後設備 BIM に転換するケースが多い(構造設計と似た状況)。設備設計は意匠の 2 次元図面に線を引くもので、具体的な納まりはサブコンが決めている。その設備サブコンが決定するのはかなり遅れるので事情はさらに 複雑である。設備も実際は電気・機械と全く異なる工学分野の複合で、両方でサブコンも異なるケースが多い。建築では設計変更がかなり多く、BIM 活用でも障害となっている。設計変更は後工程ほど大きな影響を受けるので設備 BIM にとっても大変である。

建築 BIM 活用の目的達成では設計・施工・維持管理の一貫性が重要・必須だが、第一ステップの設計段階でさえ多くの情報遮断がある。建築 BIM 一貫性の最大課題は維持管理 BIM への連携の遅れで、その要因の一つは設計・施工に必要なデータと維持管理に必要なデータの内容が大きく異なっていることである。前者は形状情報が主となるが、後者は属性情報が主である。維持管理の最重要データは設備情報で、設備 BIM が進展しなければ、維持管 BIM は進展しない。設計―施工―維持管理における BIM の不統一は、CW サプライチェーンの流れを分断している。情報化は建築の CW サプライチェーンをより複雑にし、混乱させている。

6. 4. 6 大手ゼネコンの情報化への取組みとサプライチェーン

「施工」の現場管理は建設機械の動き・作業員の動き・出来高・品質が重要であるが、施工 BIM との連動は未だ不十分である。大手ゼネコンはこの分野の技術開発を活発に行っている。鹿島の K-Field はセンサー技術を駆使して、仮想空間に人・材料・車を表示し現場管理に活用している。大林組はクレーン操作の安全・効率化のため BIM と連動した 3D 画像を活用している。BIM・IoT・AR・MR・自動化の連携でこの流れも加速しつつある。「施工」の CW サプライチェーンの一つに、ゼネコン―サブコン―部品―材料の流れがある。ゼネコン―サブコンの流れでは、鉄骨ファブリケーター(サブコン)の情報化・自動化、BIM の活用が最も進んでおり、情報化・自動化が最も効果を上げている CW サプライチェーン(サブコン)である。しかしながら他のサブコンではあまり進んでいない。

建築 BIM は一つのビル建設への適用から立体空間（都市デジタルツイン）への適用・展開が急進展している。建築 BIM のスマートシティへの展開である。清水建設は豊洲スマートシティの中核部分の開発を担当し都市デジタルツインを推進している。鹿島・大和ハウス工業が設計・施工を担当した東京・羽田空港に隣接する大規模複合施設「HANEDA INNOVATION CITY」では K-Field（BIM 活用）も活用している。鹿島は大阪のオービック御堂筋ビル新築工事で、各フェーズにおける建物データの連携を可能にする BIM によるデジタルツインを実現した。スマートシティでは BL サプライチェーンも CW サプライチェーンも複雑で分析は困難である。

6. 4. 7 発注者・不動産管理の BIM と BL サプライチェーン

STARTS CORPORATION は「総合生活文化企業」を称するグループ企業で、土地・建物の活用に関する総合事業を行う企業群である。10 年程度前から BIM に先導的に取り組んできている。建物の事業計画―投資判断―企画設計―シュミレーション―詳細設計―施工計画―現場管理―維持管理までを一貫として行う BIM-FM PLATFORM の構築を行い、ビルオーナーと建設関係者（開発会社―設計事務所―施工会社―ビル管理会社―投資会社）の両方にコンサルタントを行うとしている。これはビルのライフサイクルに関わる BL サプライチェーンである。更に現在では建物の建築における材料調達から設計・施工・メンテナンス到る商取引を、より効率的、合理的に行うために、BIM と EC を結合した BIM-EC PLATFORM を構想し、「EC コンソーシアム」を結成してその一部を推進し始めている。BL サプライチェーンに発注・決算などの商取引までを含めようとする構想と考えられる。これによりビルのライフサイクルビジネスに関わる全ての商取引について、発注者からビル管理会社にいたる全て関連企業にサービスしようとするものである。

建設工事における CW サプライチェーンの事例として、鉄筋工事が示された。BIM-FM PLATFORM を活用し構造計算データを BIM 鉄筋モデルに変換して加工リストを作成する。そのデータを鉄筋自動加工機械に導入し曲げ切断加工を行う。これにより積算作業の重複防止、加工リスト作成手間の廃止、加工機への入力ミス防止が行われる。建築生産の一次協力会社の鉄筋専門業者との BIM 連携の例が示された。先述のように、鉄骨工事では設計データと鉄骨ファブrikレーターとの BIM 連携が行われているが、鉄筋工事にも BIM が活用しようとする例である。（図 6-18）



図 6-18 BIM に鉄筋加工サプライチェーンの自動加工
(委員会 スターツコーポレーション 関戸博高他講演資料より引用)

6.5 自動化施工と CW サプライチェーン

6.5.1 建築自動化・ロボット化の歴史

建設工事で最も早く自動化が進んだのは鉄骨溶接作業で、2000 年代初期には自動化がかなり普及した。溶接技術は日本が最も世界に誇る技術で造船、パイプライン、自動車など溶接部の自動化は世界に先駆けて日本が行ってきた。その技術の波及が建設業界にも及び、多くの鉄骨溶接ロボットが開発された。鉄骨の仕口部分は自動化に多くの障害があるが、その連続溶接を可能にし、夜間溶接、24 時間稼働を可能にしていた。(図 6-19)



図 6-19 建築鉄骨の自動溶接・ロボット化は 2000 年代初期にはかなり普及

鉄骨ファブリーケーターの溶接自動化が成功した理由は、①ユーザーサイドのニーズが明確でメーカーがそれを十分 把握していた。ユーザー・メーカー一体の開発とも言える。②ぎりぎりの経営を強いられている鉄骨ファブリーケーター（ユーザー）自らが実用化、経済性を真剣に考え、改善を加えてカスタマイズし、メーカーがその知恵を採用していった。③浮沈を掛けたメーカー間の激しい競争が価格、性能発展に大きく寄与した。④工場溶接ロボットではロボットは動かさず、製品を動かす方針だった。鉄骨ファブリーケーターは CW サプライチェーンの一つだが、一次協力会社として最も早く自動化に成功したサプライヤーである。

大手建設会社も早い時期から建設ロボット開発を行い、早い時期に百数十種類のロボットを開発したが、そのほとんどは実用化に失敗している。その要因は前述の鉄骨ファブリーケーターの工場溶接ロボット成功要因の裏返しである。大手建設会社が自らの作業ではない、CW サプライチェーンの一次協力会社の作業をロボット化に成功することは困難であった。

6. 5. 2 完全自動化建築の歴史

1990 年代になると、建設現場でのロボットが成功しない要因として、設計や現場生産システム全体の問題が議論された。これまで開発されてきたロボットが既存現場の作業の一部にだけ適用すると言うことが、ロボット活用を妨げる基本問題との認識であった。ロボット使用を考慮した現場システムや設計が行われればロボット活用が革新的進展するとの発想であった（図 6-20）。その結果、現場内部は完全に工場ようになった（図 6-21）。

- ビル全体の施工自動化を目指すシステムへの取組み
- ビルの作り方を含めた新しい施工システムの提案
- 建設会社8社12システム開発、20現場以上に適用

（技術の特徴）

- 自動化・工業化・情報化技術の統合
- 作業環境の全天候化
- 搬送や組立て、接合などの自動化
- 積層工法、ユニット化・プレハブ化工法
- 情報管理システムの統合



図 6-20 1990 年代に語られた建築生産におけるロボット化の経緯



図 6-21 清水建設ビル自動化システム「スマートシステム」の内観

このシステムでは揚重を厳格にコントロールしたために、現場廃棄物が極端に減少した。現場地球環境効果は抜群であった。しかしながら、設備投資金額、償却費などにコストがかかり収益が大きな課題となった。バブルがはじけて現場のコストダウンが厳しく求められるようになり、いくつかの企業の完全自動化工法は挫折した。当時の建築現業担当役員は自動化建設工法には否定的であった。自動施工システムによるビルの着工は、清水建設では 1991 年（平成 3 年）、大林組では 1993 年（平成 5 年）であるが、研究開発構想の着手はほぼ同じ時期の 1980 年代後半ころと思われる。大林組では 1989 年（平成元年）に「ABCS」のコンセプトを発表した。清水建設の場合、当初は建築本部生産技術部の技術者が個人的に構想して 1988 年（昭和 63 年）に開発に着手、1991 年（平成 3 年）には技術研究所内の制震実験等建設で試行した。清水建設、大林組に始まったビル自動化建設システムは他の会社にも波及し 8 社で開発され、20 以上の現場で施工された。当初のシステムは完全自動化指向であり、全天候 屋根や機械・設備に多大な費用を要し、開発陣と現業の間で議論が激しく行われたが、準大手建設業でも続々開発が行われた。（図 6-22）

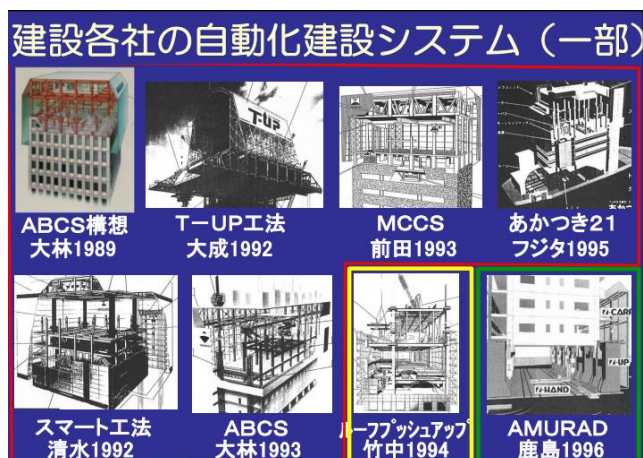


図 6-22 ゼネコン各社の自動化建設工法
(委員会 大林組浜口氏講演資料より引用)

6. 5. 3 完全自動化建築と CW サプライチェーン

委員会における大林組技術研究所生産技術研究部部長浜田耕史氏の見解では建設自動化が CW サプライチェーンに与える影響は以下である。(図 2-23)

- 1) 自動化機械に資材の情報を転送する必要がある。機械に対して素材が何ものかを教えるため、当時は、バーコードを使って部材情報を転送していた。そのため、CW サプライチェーン上の様々な資材を製造する工場で、バーコードをつけて来てもらう必要があった。資材工場としては、余計な仕事が増えていた。しかも、プロジェクトごとにバラバラの ID を付けたりしている。
- 2) 自動化に適した部品にするため、鉄筋コンクリート構造の自動化システムでは、ありとあらゆる部材をプレファブ化し、部品にして持ってくるように変更した。(これは CW サプライチェーンに変更を要求することになる)
- 3) 従来は割と工事現場で現場合わせてできていたものを、非常に早い段階で様々なものを決めて作っていく必要があった。スマートに作業が進んでいるように見えても、逆に CW サプライチェーンの上流側にお願いする業務が発生する。



図 6-23 建設自動化では従来のサプライチェーンに負荷を与える
(委員会 大林組浜口氏講演資料より引用)

6. 6 大手建設業のサプライチェーンへの取組み

- 1) 鹿島建設は「サプライチェーン行動ガイドライン」を制定し以下の取組みを行うとして、

法令の遵守、人権の尊重、環境への配慮、品質の確保等へ取組む。CSR、SDGS への取組みと言える。

2) 大林組は CSR 調達を行うとしている。

3) 大成建設は「サステナブル調達ガイドライン」を策定している。内容は CSR、SDGS への取組みと言える。

4) 竹中工務店は「調達方針」を制定している。内容は CSR,SDGS である。

5) 清水建設は「シミズグループ CSR 調達基本方針」及び「シミズグループ CSR 調達ガイドライン」を制定している。CW サプライチェーン企業（グループ企業）にそれらへの取組みをアンケートして公表している。（図 6-24）

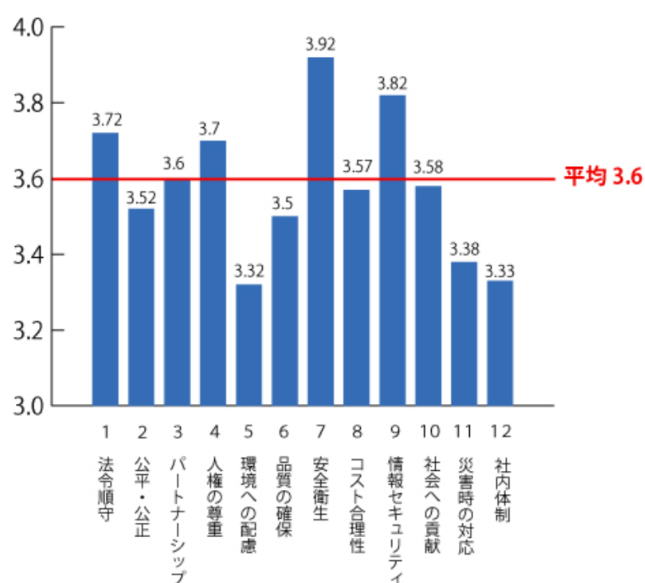


図 6-24 清水建設グループ会社（CW サプライチェーン）の CSR への取組みアンケート結果（清水建設提供）

半導体などでは経済安全保障が大いに騒がれているが、建設の CW サプライチェーンでは経済安全保障が問題とならない。その理由は建設産業では協力業者でも建設素材でも代替品が多いことによると考える（図 5-25）。ウッドショック、アイアンが一時話題になったが直ぐおさまったのもそのためである。

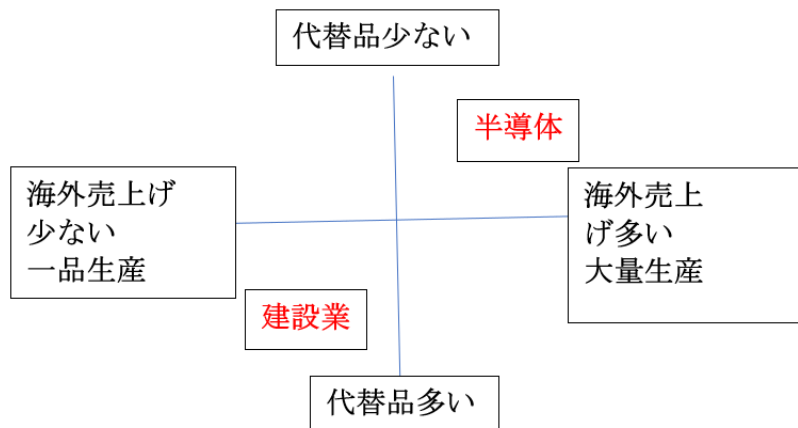


図 6-25 建設業の CW サプライチェーンの協力業者・素材は代替が多い。

6. 7 まとめ

建築産業のサプライチェーンは発注サイドから見た場合と施工サイドから見た場合には異なる流れと考える議論した。発注者から見た場合は「発注—企画—施工—施設運営—維持管理—取り壊し」の建物（ビル）のライフサイクルが重要なサプライチェーンとなる。これを BL サプライチェーンと呼ぶことにした。BL サプライチェーンの全ての施工側面にもサプライチェーンが存在する。「発注」と言う行為にも「事業計画」「資金調達」「発注建物の企画」「土地取得」「地盤調査」などの作業が伴い、その全てに担当するサプライチェーン企業が存在する。特に建築施工では元請（特定建設業・ゼネコン）の下に具体的に建築工事を担当する 29 種類の下請（一般建設業・一次協力業者・サブコン）が存在する。この元請（ゼネコン）-下請（サブコン）の流れにも工事を担当するサプライチェーンがある。これを CW サプライチェーン（仮称）と呼ぶことにした。

BL サプライチェーンでは発注者の作業を分担する企業や施工管理を分担する企業など新しい企業も出てきているが、関係企業の把握は容易である。そのためか建築情報化の最重要技術の BIM でも新しい動き、例えば BIM と EC を結合した BIM-EC PLATFORM などが出現している。

一方 CW サプライチェーンは情報化が進んでもその複雑さは修正されていない。建設自動化では CW サプライチェーンに負荷を与える現象も生じている。この要因は、古来以来の建築業の特徴である「一品受注生産（典型的な請負業）」「労働集約型生産」「現地屋外生産」が現在でも変わらないためである。

建築・土木・不動産業界企業の現在のサプライチェーンの取組は経済安全保障の観点ではなく、SDGS, CSR、地震等の災害対策の観点からのものがほとんどである。これも建設業・建築業の本質によるものである。

参考文献

1. 荒木睦彦『日本の建設業』槇書店、1993
2. 「全自動ビル建設システムの開発」、大林組 浜田耕史、委員会資料
3. 「BIM-EC Consortium」、スターツコーポレーション（株）関戸博高、
j 委員会資料
4. 鹿島 HP、大林組 HP、大成建設 HP、竹中工務店 HP、清水建設 HP
5. 藤盛紀明「建設関連産業の未来のための技術評論」『鉄構造技術』、
鋼構造出版

連載第 128 回 建築 B I M の夜明け 2021 年 3 月

連載第 139 回 大手ゼネコンの建設 DX 2022 年 2 月

連載第 147 回 サプライチェーンと経済安全保障 2022 年 12 月

連載第 151 回 「人類と情報」について考える 2023 年 2 月

第7章 外部知識の波及と技術進歩

7.1 はじめに

昨年度の報告書で筆者は、「サプライ/バリューチェーンの進化的ボトルネック」という概念を提唱した。すなわち、“仕様の定まったある財”、いうならば「きょうの製品」の生産にかかる生産供給連鎖上のあい路は、ある意味、スタティック（定常的）なあい路であるという事ができる。一方、サプライチェーン／バリューチェーンをイノベーションや DX の視点で俯瞰すると、中長期的な「あしたの製品」あるいは「あさっての製品」の開発にかかわるあい路が存在する可能性がある。

財やサービスには、イノベーションによって新製品や新サービスが生じ、旧世代の財やサービスを置換することによって絶え間なく変化していく。このような変化に対処・追従することができなくなった企業や産業は、中長期的には衰退していく運命にある。特に、ある産業が大きな（急速な）変化に直面しており、かつその産業における“イノベーションのドライバー”すなわち、知識や知的財産、研究開発ツールや高度人材等の社内外のサプライヤーが、特定の地域や技術、知財、組織・部門等に高度に依存している場合には、それが重要な進化的ボトルネックになる可能性があると考えられる。

本報告は上記に関連し、民間企業が大学や公的研究機関等の外部知識をどのように活用しているのか、いくつかの仮説を設定し特許データによる実証分析を行ったものである。

7.2 仮説の設定と分析方法の概要

(1) リサーチ・クエッションと仮説

まず、“外部知識の活用は重要技術の進歩を促進するのか？”という基本的な問いに関する仮説の設定を検討してみる。これには、以下に示すような「分析の単位」および「観察の単位」を異にするいくつかのパターンが考えられる：

H1：重要な発明は、外部組織の関与から生じる（特許レベル仮説）

H2a：重要な発明には、外部知識との接点となる発明者が関与する（特許レベル仮説）

H2b：外部発明者と協力する発明者が、重要な発明に関与する（発明者レベル仮説）

H3：外部と共同発明を行う企業は重要な発明が多い（企業レベル仮説）

上記のうち H2a と H2b は、「発明」と「発明者」という異なるカテゴリーの要素の性質に着目したものであるが、実は同じ問いの見方を変えた表現とみることもできる。特定の発明

の重要性については、①特許の権利化と維持期間や、②外国での特許の権利化、③特許の被引用、などが指標として利用可能である。一方、発明者の重要性については、個人のパフォーマンスとしての発明件数に加えて、上記の問題意識においては「外部知識をどれだけ利用しているか」が問題となる。発明者による知識の利用を直接計測することは難しいが、“発明-発明者”という関係から、組織の中での特定発明者の立ち位置を分析することによって、他の発明者との程度関係を持っているかを推測することが可能ではないかと考えられる。今回データとして用いる“発明-発明者”という関係は、複数の発明者が複数の発明に関与することから、典型的な 2-mode ネットワーク（もしくは 2 部グラフ）と呼ばれる関係を構成している。このため、そのネットワーク中の特定ノードの特性を明らかにする社会ネットワーク分析の手法を適用することが可能である。

(2) 2-mode ネットワークと中心性について

一般的に、Mode X と Mode Y という 2 つの属性があり、X の内部の関係や Y の内部の関係が不明で X-Y の関係のみが観測可能な場合を、2-mode ネットワークと呼んでいる（図 1）。今回対象にしているデータでは、Mode X が発明者、Mode Y が特許に相当する。2-mode ネットワークのデータは 1-mode に変換することが可能（どちらの mode でも）であり、変換された 1-mode ネットワーク内の関係性に関して各ノードの重要性やクリーク（サブグループ）などを明らかにすることができる。

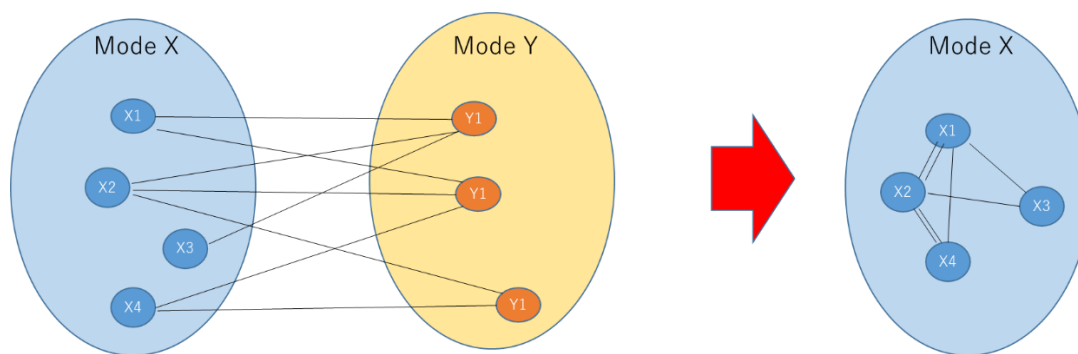


図1 2-mode ネットワークの概念と 1-mode ネットワークへの変換

ネットワーク内のノード（この場合は「個別発明者」に相当する）の重要性や影響力については、社会ネットワーク分析の分野で各種の“中心性”という概念が用いられている。中心性指標にもいくつかの種類があるが、次数中心性、近接中心性、媒介中心性、固有ベクトル中心性の 4 種類が比較的良好に利用される。

- 次数中心性：各ノードが持つリンクの数
- 近接中心性：他の全てのノードへの距離の平均値の逆数

- 媒介中心性：他の 2 つのノード間を結ぶ最短経路が当該ノードを通過する割合
- 固有ベクトル中心性：リンク先ノードの重要性によって重みを付けた次数中心性

本稿でもこれらの変数を利用するが、発明者ネットワークはあくまでも 1 企業の中の分析を行うという限界を有している。なぜなら、2005 年に日本で出願された特許は 39 万件余りで、これらにかかわった発明者はのべ 100 万人程度に達する。これら全体のネットワークの分析は、現時点では筆者の手に余る。このため、発明者ネットワーク分析の結果を利用する特許価値の分析は、特定企業の事例を対象とせざるを得ないことをお断りしておく。本稿では、この事例分析の対象として、日本の医薬品産業のリーダーであるタケダ薬品工業を選択した。

(3) 分析に用いる変数について

本稿では、2005 年に民間企業から出願された全特許について、個別特許レベルの分析を行うため、以下の 3 つのカテゴリーの変数を作成した。

- 被説明変数：個別特許の重要性の代理変数
 - 審査請求：出願された特許が審査請求されたかどうか（ダミー変数）
 - 登録：出願された特許が登録されたかどうか（ダミー変数）
 - Over_10：出願された特許が登録後 10 年以上維持されたかどうか（ダミー変数）
 - Maintain：登録後の維持日数（2018 年 6 月 30 日まで）
 - Familysize：当該発明が出願された先の国の数
 - Citation：当該発明が世界中の審査機関で引用された回数
- 説明変数：個別企業の外部知識との接触の代理変数
 - 共同発明者数：社内外で何人の発明者が当該特許に関与したか
 - 共同出願：複数の出願人が関与したかどうか（ダミー変数）
 - 外国機関関与：外国企業・機関が出願人に含まれるかどうか（ダミー変数）
 - 公的機関関与：国研や公設試、特殊法人、財団法人などが出願人/発明者として関与したかどうか（ダミー変数）
 - 大学関与：大学や各種学校が出願人/発明者として関与したかどうか（ダミー変数）
- コントロール変数
 - 技術分野：筆頭 IPC を WIPO の技術分野 35 分類に集約した（ダミー変数：base は Analysis of biological materials“
 - 出願月：特許が出願された月（ダミー変数：base は 1 月）

さらに、上記に加えて 2005 年にタケダ薬品から出願された 111 件の特許（うち 16 件は

登録延長出願なので、実質的には 95 件) の分析を行うため、以下の 6 種類の説明変数を用いた。

- 説明変数：個別発明者の外部知識との接触の代理変数
 - 累積発明期間：初めて特許出願を行ってから 2005 年 1 月 1 日までの日数
 - 過去の技術範囲：過去 10 年に関与した特許の筆頭 IPC subclass 種類の数
 - 次数中心性：どれだけ幅広い研究者と共同発明を行ったか
 - 近接中心性：他のすべての発明者との近さの平均値
 - 媒介中心性：任意のグループ内での中心的人物

なお、先に述べた固有ベクトル中心性については、次数中心性との共線性が強いことが判明したため、説明変数から除外している (図 2)。

1 件の特許に複数の発明者が記載されている場合には、上記の個別発明者単位の変数の平均値を説明変数として用いた。

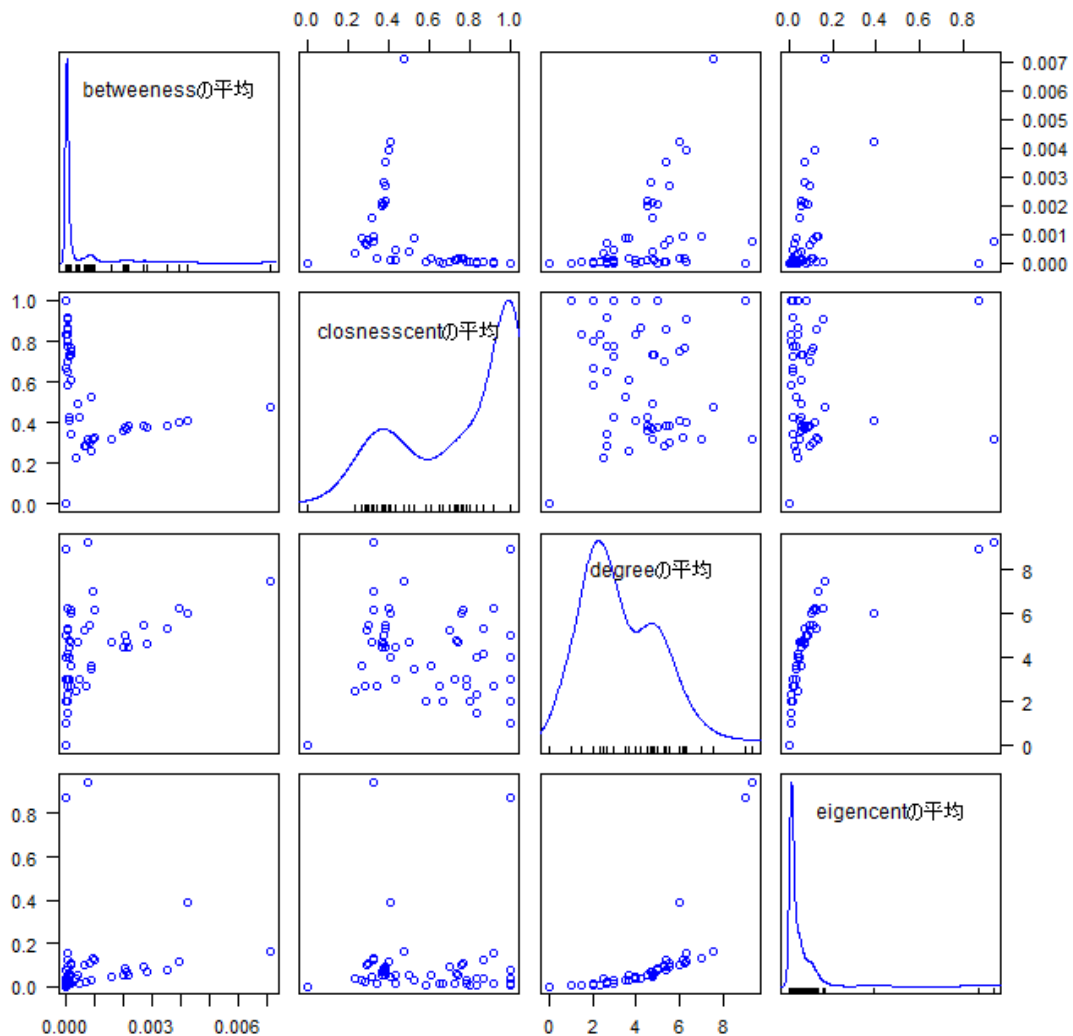


図2 各種の中心性指標の相関（タケダ薬品の発明者の例）

7.3 分析結果

(1) 2005年に民間企業が出願した特許

分析の対象とする特許は、2005年に日本で出願された全特許から、国研等の公的研究機関もしくは大学が単独に出願したものを除いた特許である。これらには、民間企業（国内外）が出願者として関わっており、また共同出願相手として国研や大学等が関わっている場合もある。合計は391,453件であり、このうち外国機関が関与しているものは63,164件であった。また、全体のうち共同出願特許は30,477件で、共同出願相手として国研等の公的研究機関が関わっているものは1,730件、共同出願相手として大学が関わっているものは2,984件であった（図3）。

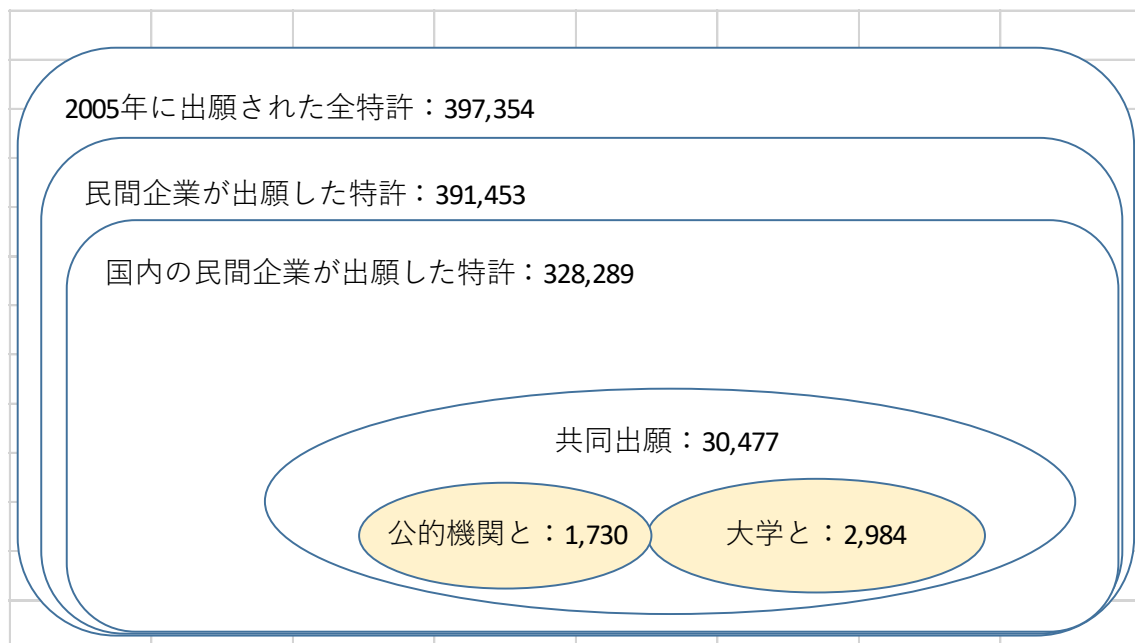


図3 2005年の企業出願特許サンプルの構成

一般化線形モデルによる回帰分析結果の概要を表1に示す（コントロール変数を含めた詳細結果については、参考表1を参照のこと）。まず左側3種類の被説明変数であるが、「審査請求」＜「登録」＜「over_10」は、この順に価値が高くなっていく特許と見なして良いだろう。

「共同発明者数」はいずれのカテゴリの被説明変数に対してもプラスで有意であるが、係数の値は徐々に小さくなっている。これは、社内のみの単純な共同発明者数の増加、言い換えれば“三人寄れば文殊の知恵効果”は、重要な発明に関してはあまり当てはまらないことを示しているようである。

外部組織との共同作業を示す「共同出願」は、審査請求や登録に対しては有意にプラスの効果を持っている。一方、10年以上維持される特許については統計的に有意な関係がない。

出願人が外国企業である場合は、いずれのカテゴリでもプラスで有意であるが、登録や10年維持など価値の高い特許については係数が審査請求の1/20程度になっており、その効果は大きくないものと考えられる。

共同出願の相手に国研などの公的機関が含まれる場合には、全てのカテゴリに対してプラスで大きな効果がみられる。特に、10年以上維持される特許に対する効果は、他のどの説明変数の影響よりも格段に大きい。

共同出願の相手に大学が含まれる場合には、審査請求や登録には有意にプラスの効果がみられるが、10年以上維持される特許には関係がない。この点に関しては、公的機関の関与との違いが際立っている。

被説明変数「maintain」は、前述のように特許の維持期間を示しているが、分析の対象サンプルを登録された特許のみに限定しているため注意が必要である。この結果を見ると、共同出願特許は登録されても維持期間が短く、外国企業の特許も維持期間が短い。公的研究機関の関与する特許は維持期間を延ばす効果を持っているが、その効果は共同出願のマイナス効果により減縮されている。大学との共同出願は維持期間に対して有意な効果を持っていないようである。

被説明変数の「familysize」は、外国への出願の広さを表している。外国企業の特許は、当然のことながら広く日本以外にも出願され大きな familysize を有している。共同出願と大学の関与は、ともに familysize に対してマイナスで有意な効果を示しており、大学との共同出願は外国には出願されにくいことを示している。

被説明変数の「citation」は、後続発明に際して引用された回数を示している。外国企業の場合にはこの値が非常に大きい、これは familysize の大きさとも関係しているであろう。共同出願は citation に対して有意にマイナスであり、公的研究機関や大学の関与は統計的に有意でない。

上記を総合すると、日本企業は重要な発明にかかわる外部知識を主に国研等の公的研究機関から得ており、大学の貢献はあまり大きくないものと考えられる。

表1 2005年の全企業出願特許に関する回帰分析結果の概要

被説明変数 説明変数	d_審査請求 (logit)		d_登録 (logit)		d_over_10 (logit)		maintain (gaussian)		familysize (poisson)		citation (gaussian)	
	係数		係数		係数		係数		係数		係数	
(Intercept)	0.10306		-0.58704	***	-2.02506	***	3518.770	***	0.48772	***	-1.02176	
共同発明者数	0.18771	***	0.12065	***	0.06802	***	-0.674		0.04229	***	1.29567	***
d_共同出願	0.10149	***	0.07428	***	-0.02789		-30.498	***	-0.10460	***	-2.16329	***
d_外国機関関与	1.23149	***	0.06188	***	0.07166	***	-126.576	***	1.57059	***	19.90817	***
d_公的機関関与	0.41214	***	0.28070	***	0.37642	***	63.928	**	-0.03244	.	-0.50748	
d_大学関与	0.30163	***	0.20310	***	0.07955		-9.337		-0.09941	***	0.88582	
技術分野コントロール (base= "Analysis of bio")				Yes								
出願月コントロール (base= "出願月[T.1月]")				Yes								
observations	391,317		391,317		391,317		162,868		391,317		391,317	
有意水準 *** 0.1%有意: **1%有意: *5%有意: .10%有意												

(2) 2005年にタケダ薬品工業が出願した特許

前述したように、タケダ薬品は2005年に95件の特許を新規に出願している。タケダ薬品工業は、歴史的に見て日本の製薬産業のトップとして膨大な研究開発費を投入してきた企業であるが、図4に示すように特許出願数はもともと決して多くはなく、さらに2000年代に入って出願数の減少傾向が顕著である。

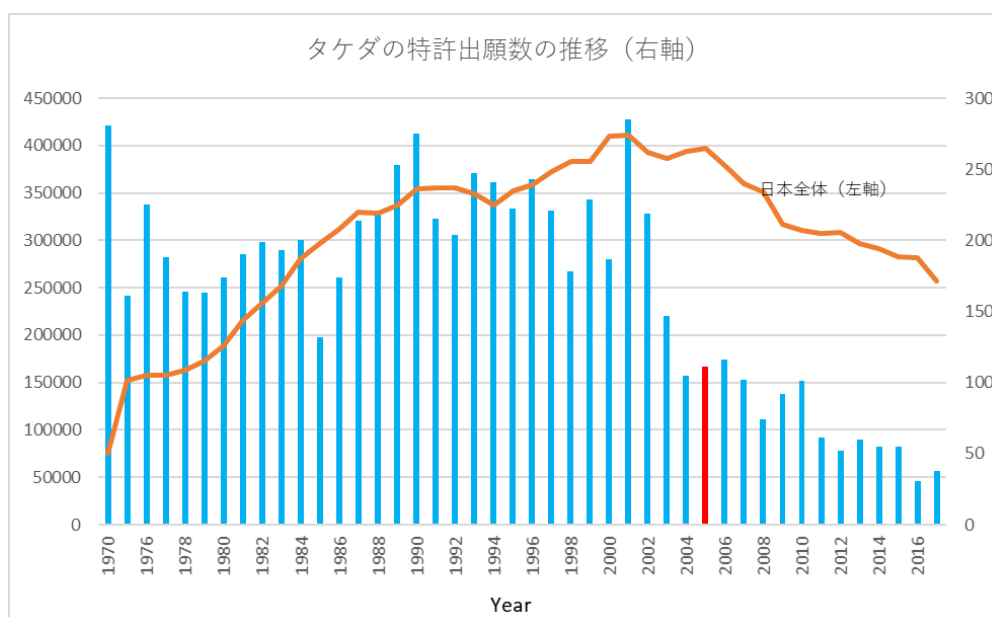


図3 タケダ薬品工業の特許出願数の推移

新規に出願された 95 件の特許のうち、審査請求されたものが約 83%、登録に至ったものが約 44%、登録後 10 年以上維持されたものが約 11%であり、この割合は日本全体の平均値と大きな違いはない（表 2）。

表 2 2005 年に出願された特許

	出願数	審査請求	登録	10年以上維持
日本全体	397,354	284,119	165,981	46,140
	100%	71.5%	41.8%	11.6%
タケダ薬品	95 (111)	79	42	10
	100%	83.2%	44.2%	10.5%

タケダ薬品の 2005 年に出願された特許について、発明者間の共同発明関係（2-mode ネットワーク）を元データとして、1-mode の発明者ネットワークを視覚化したものが図 4 である。いくつかの密なクラスターと、各クラスター内の中心的発明者が存在することがわかる。これら 258 名の発明者の中心性指標を計算し、前述の説明変数を作成した。

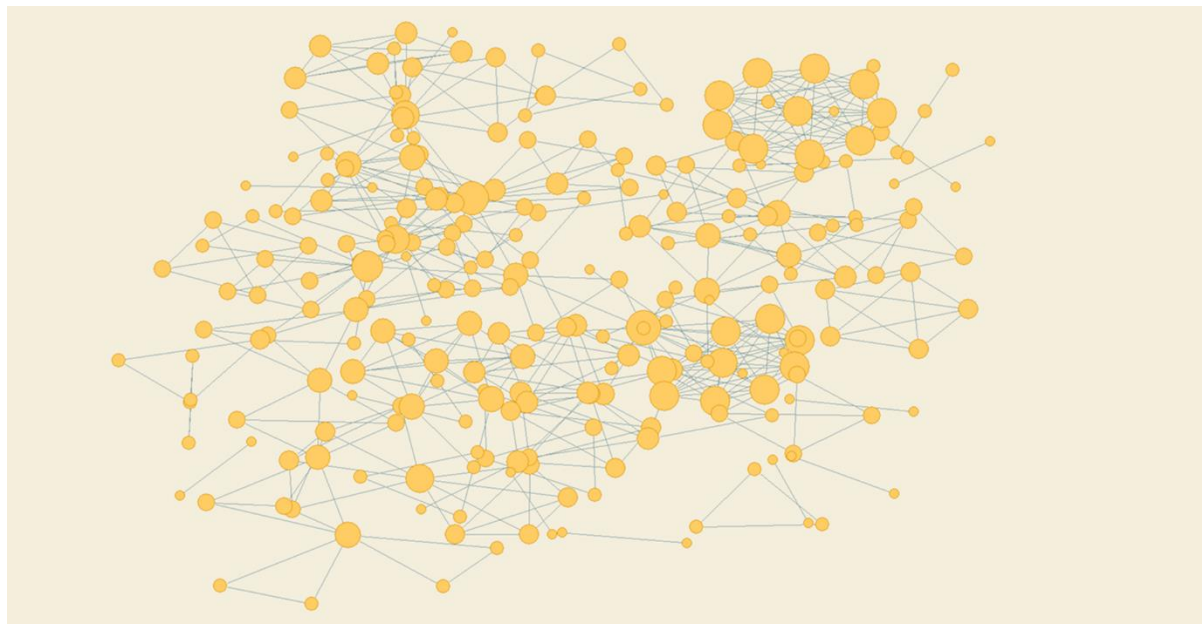


図 4 タケダ薬品の 2005 年時点の発明者ネットワーク（共同発明関係）

タケダ薬品の 2005 年出願特許の回帰分析結果を表 3 に示す。このサンプルでは外国出願人の関与は 1 件もなかったため、説明変数からは省いている。また、登録件数が 42 件しかなかったため maintain（登録後の維持期間）のデータの分析は行っていない。

この分析結果からは、サンプルサイズの制約もあり、あまりはっきりとした効果が観察されなかった。いくつかの中心性指標について、登録やファミリーサイズへのマイナスの影響が示唆されているが、統計的な有意性はあまり高くない。また、中心性指標以外の説明変数では、公的機関の関与が familysize に対して若干プラスの効果を、また共同出願がマイナスの効果を示しているようである。

表 3 2005 年のタケダ薬品出願特許に関する回帰分析結果の概要

被説明変数	d_審査請求 (logit)		d_登録 (logit)		d_over_10 (logit)		familysize (gaussian)		citation (gaussian)	
説明変数	係数		係数		係数		係数		係数	
(Intercept)	1.6040		-0.280		2918.36	***	9.0559	.	33.3855	**
共同発明者数	0.0893		-0.104		-76.30		1.4332		1.7632	
d_共同出願	-18.2468		-15.076		-622.99		-13.1281	.	-8.2173	
d_公的機関関与	35.4848		33.652		217.82		14.5589	.	8.3452	
d_大学関与	36.2628		18.030		753.67		7.9793		-9.3087	
次数中心性	-0.1144		0.458		35.69		-0.0831		-0.7542	
近接中心性	-1.9697		-2.521	*	605.71		-4.7411		-15.1744	
媒介中心性	-341.6445		-1022.2	**	25971.9		-985.65		2949.9	
過去の技術範囲	0.5451		0.050		-33.84		-1.9573	.	-1.3598	
累積発明期間	0.0688		0.088		12.05		0.3419		-0.7515	
observations	95		95		95		95		95	
有意水準 *** 0.1%有意: **1%有意: *5%有意: .10%有意										

7.4 最後に

冒頭で示した“外部知識の活用は重要技術の進歩を促進するのか？”という問いに対する答えに対して、ある程度の見通しが得られた。まず、公的機関（多くの場合は産総研などの国立研究機関である）が、民間企業の重要な発明に対して貢献していることが示唆された。一方、大学の貢献は、公的機関に比べて弱くはっきりしない。今回の分析の対象とした特許が 2005 年時点のものであり、国立大学法人化の翌年であることを考慮すると、この結果は当然のことかもしれない。国立大学が積極的に民間企業と特許を共同出願し始めたのは、もう少し時間がたってからのことなので、この点に関しては、今後のさらなる分析が必要であ

ろう。

さらに今回は、個々の発明者に関して試行的に社会ネットワーク分析の中心性指標を作成し、特許の価値との関係を調べた。発明者の中心性は、あくまでも企業内部の知識の共有や交換を主に表していると理解することができる。この点、今後はサンプルサイズの増大をはかるとともに、他の指標との連結を検討すればより有用な知見が得られるものと考えられる。

以上

参考表1 2005 年の全企業出願特許の回帰分析結果の詳細

		d_審査請求 (logit)		d_登録 (logit)		d_over_10 (logit)		maintain (gaussian)		familysize (poisson)		citation (gaussian)	
変数		係数		係数		係数		係数		係数		係数	
(Intercept)		0.10306		-0.58704 ***		-2.02506 ***		3518.770 ***		0.48772 ***		-1.02176	
共同発明者数		0.18771 ***		0.12065 ***		0.06802 ***		-0.674		0.04229 ***		1.29567 ***	
d_共同出願		0.10149 ***		0.07428 ***		-0.02789		-30.498 ***		-0.10460 ***		-2.16329 ***	
d_外国機関関与		1.23149 ***		0.06188 ***		0.07166 ***		-126.576 ***		1.57059 ***		19.90817 ***	
d_公的機関関与		0.41214 ***		0.28070 ***		0.37642 ***		63.928 **		-0.03244 .		-0.50748	
d_大学関与		0.30163 ***		0.20310 ***		0.07955		-9.337		-0.09941 ***		0.88582	
技術分野コントロール (base= "Analysis of bio")													
	Audio-visual	0.10220		-0.26927 ***		0.03042		65.816 *		-0.15548 ***		2.78519 **	
	Basic commun	0.34384 ***		-0.03517		0.28122 **		132.668 ***		-0.13985 ***		2.79435 **	
	Basic materi	0.18264 *		-0.14544 *		-0.29317 **		-205.246 ***		0.01971		2.56894 **	
	Biotechnolog	0.24711 **		-0.34810 ***		-0.20888 *		-79.728 *		0.28383 ***		7.27520 ***	
	Chemical eng	0.29190 ***		-0.05749		-0.08122		-69.345 *		-0.13889 ***		1.68354 .	
	Civil engine	0.42599 ***		0.19655 **		0.14687		30.837		-0.31831 ***		0.75910	
	Computer tec	0.13414 .		-0.24531 ***		0.06674		95.022 **		-0.15116 ***		7.76144 ***	
	Control]	0.29769 ***		-0.13717 *		-0.00149		34.363		-0.13475 ***		4.49734 ***	
	Digital comm	0.47741 ***		0.24988 ***		0.45159 ***		144.383 ***		-0.05681 ***		6.12841 ***	
	Electrical m	0.28795 ***		-0.03159		0.05944		12.421		-0.22652 ***		3.27442 ***	
	Engines, pum	0.22798 **		-0.06479		0.11439		112.611 ***		-0.20910 ***		1.82195 .	
	Environmenta	0.20907 **		-0.12078 .		-0.08355		-10.032		-0.26065 ***		1.70316 .	
	Food chemist	0.22651 **		-0.17513 *		-0.19361 .		41.033		-0.05647 **		0.59098	
	Furniture, g	0.68151 ***		-0.15395 *		0.20641 *		94.789 **		-0.27334 ***		2.52827 **	
	Handling]	0.14529 .		-0.03504		-0.12208		-37.614		-0.14552 ***		1.21444	
	IT methods f	-0.14216 .		-0.97269 ***		-0.67811 ***		-52.810		-0.23375 ***		5.10991 ***	
	Machine tool	0.38900 ***		0.11491 .		-0.08022		-56.978 .		-0.13792 ***		1.54774	
	Macromolecul	0.33571 ***		-0.00612		-0.28594 **		-249.954 ***		-0.02680 .		2.48889 *	
	Materials, m	0.58259 ***		0.36383 ***		-0.02420		-105.069 ***		-0.03628 *		1.98434 *	
	Measurement]	0.37580 ***		0.04535		0.05529		9.924		-0.22356 ***		3.04510 **	
	Mechanical e	0.20494 **		-0.21462 ***		-0.19116 .		-12.133		-0.20724 ***		1.12934	
	Medical tech	0.27247 ***		0.10495		-0.14940		-78.528 **		-0.03602 *		13.21846 ***	
	Micro-struct	0.18536		-0.35961 **		-0.09164		-32.117		-0.27010 ***		6.42897 **	
	Optics]	-0.13584 .		-0.32549 ***		-0.14422		18.194		-0.27202 ***		2.59113 **	
	Organic fine	0.20727 **		-0.30173 ***		-0.15806		-54.173 .		0.29227 ***		-1.24547	
	Other consum	-0.02731		-0.24047 ***		-0.07077		49.402		-0.18963 ***		1.55194	
	Other specia	0.10562		-0.03628		-0.13519		-55.830 .		-0.17231 ***		1.03623	
	Pharmaceutic	0.18161 *		-0.53642 ***		-0.54413 ***		-266.079 ***		0.33942 ***		0.24918	
	Semiconducto	0.36159 ***		-0.11050 .		0.04244		-3.903		-0.17976 ***		6.60951 ***	
	Surface tech	0.31085 ***		0.10917 .		-0.13494		-82.447 **		-0.13534 ***		1.92441 .	
	Telecommunic	0.24991 ***		-0.02109		0.33025 ***		170.772 ***		-0.03429 *		4.57409 ***	
	Textile and	-0.26455 ***		-0.33842 ***		-0.29153 **		-7.633		-0.19408 ***		1.22939	
	Thermal proc	0.32097 ***		-0.15178 *		0.09262		62.706 *		-0.28141 ***		1.49718	
	Transport]	0.38684 ***		0.16979 **		0.22570 *		57.814 .		-0.20779 ***		2.94589 **	
出願月コントロール (base= "出願月[T.1月]")													
	出願月[T.2月]	-0.00830		-0.01716		-0.04567 .		-30.182 ***		0.01246 *		-0.00928	
	出願月[T.3月]	-0.00154		-0.01276		-0.10128 ***		-60.433 ***		-0.01508 **		-0.35922	
	出願月[T.4月]	0.06772 ***		0.03412 .		-0.11211 ***		-101.898 ***		0.01508 **		-0.06915	
	出願月[T.5月]	0.08090 ***		0.03695 *		-0.10285 ***		-112.265 ***		0.05130 ***		-0.07038	
	出願月[T.6月]	0.04198 *		0.06167 ***		-0.12762 ***		-128.524 ***		0.00927 .		-0.12333	
	出願月[T.7月]	0.01233		0.06125 ***		-0.19708 ***		-163.572 ***		0.01756 ***		-0.18637	
	出願月[T.8月]	0.03648 .		0.06195 ***		-0.20509 ***		-178.385 ***		0.02901 ***		0.24734	
	出願月[T.9月]	0.04169 *		0.08247 ***		-0.24362 ***		-208.665 ***		0.02155 ***		0.56415 *	
	出願月[T.10月]	0.05338 **		0.08369 ***		-0.29364 ***		-242.036 ***		0.01081 *		-0.25810	
	出願月[T.11月]	0.02879		0.12483 ***		-0.25168 ***		-248.394 ***		0.00282		-0.35940	
	出願月[T.12月]	0.03270 .		0.11910 ***		-0.29863 ***		-269.968 ***		-0.01462 **		-0.96753 ***	
observations		391317		391317		391317		162868		391317		391317	
有意水準 *** 0.1%有意: **1%有意: *5%有意: . 10%有意													

今後の方向

ここ数年間は、CPS (Cyber-Physical-System) について、様々な観点から分析を試みてきた。しかし、デジタル技術体系が世の中に浸透し、広く産業構造や社会基盤にまで影響が及ぶようになると、デジタル技術が社会全般に「変革」を強いるようになる。そこで、「デジタル・トランスフォーメーション」(DX, Digital Transformation) という表現が流布されるようになって来た。そこで、今後は、DX という観点から、日本の産業技術システムの展開を議論する必要がある。