

第1章 CIMとは

本章では、CIMの前に、まずBIMについて、その背景とねらい、さらにBIMによってどういう意識改革が起きつつあるかを記す。次に、CIMという言葉のバリエーション、国土交通省の開始したCIMについて触れ、CIMの定義を記す。

Keywords

BIM, ウォーターフォール・モデル, フロントローディング, CIMの定義

1.1 BIMとは

2004年頃からBIMという言葉が盛んに建築の方で聞かれるようになった。BIMはBuilding Information Modelingの略であり、米国ジョージア工科大学のチャック・イーストマン（Chuck Eastman）教授が最初に使ったと言われている¹⁾。BIMは、図-1.1に示すように、中心にある程度標準化された3次元のプロダクトモデルがあり、それを様々なソフトウェア群がデータを一元的に共有・活用しながら統合的に設計・施工・維持管理を進めていくという新しい仕事の方法である。ここでいう3次元のプロダクトモデルとは、単なる3次元CADデータではなく、オブジェクト指向技術に基づいて、各部材や各部品がオブジェクトデータとして貯蔵され、各オブジェクトには各種属性情報が付与されるものである。属性情報には、部屋の名称や仕上げ、材料・部材の仕様・性能、コスト等多様な情報が含まれる。

1.1.1 BIMの背景

ここで、もう少し時代を遡ってBIMの背景から説明する。1970年代頃から、

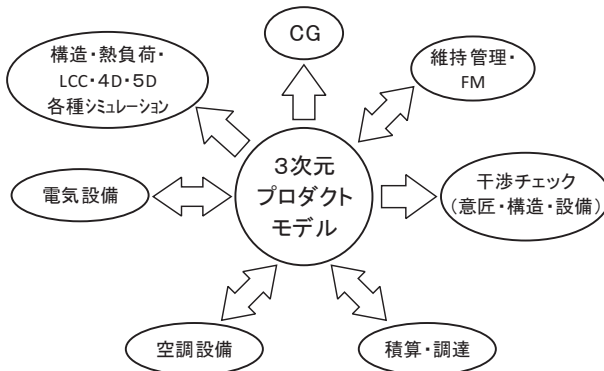


図-1.1 BIMの概念図

ビルディングの設計や施工において、図面作成、構造設計、静的・動的構造解析、熱流体解析、景観評価、積算、工程計画などを目的に、コンピュータが積極的に利用されるようになった。しかし、当時のコンピュータプログラムは、もともになるデータモデルが各プログラムや開発会社ごとに異なるため、あるプログラムで実行するために作成した入力データや計算した出力データを、他のプログラムに直接、入力データとして利用することができず、ユーザが再度、作成し直す必要があった。このようにコンピュータによる自動化がプログラムの内部だけで行われ、プログラム間のデータの流れが自動化されない状況を「自動化の島 (islands of automation)」問題という (図-1.2)。1980年代にこの問題をプロダクトモデルによって解決しようという研究が開始された。BIMという言葉はそうした努力の結果、生まれたものであり、たった3つの単語で内容をよく表していることから、瞬く間に広まったのである。

「自動化の島」問題を解決するためには、関連する複数のアプリケーションプログラム間でデータの交換や共有ができるようにする必要がある。その方法は2つある。図-1.3に示すように、一つは、各ソフトウェア間で互いにデータを変換できる「コンバータ」(converter)と呼ばれるプログラムを作成する方法であり、もう一つは、標準化されたプロダクトモデルと各プログラムとの間のコンバータを作成する方法である。前者は1対1の直接コンバータ法、後

1.1 BIMとは

者はプロダクトモデルを介する間接コンバータ法と呼ばれる。前者は、確実に各ペア間のデータ交換はできるようになるだろうが、 n 個のプログラムに対して、必要なコンバータは $n(n-1)/2$ 個必要となり、 n が大きくなれば、莫大な個数のコンバータを開発しなければならなくなり、非現実的である。一方、後者は、プロダクトモデルの標準化を達成するためには時間と労力が必要であるが、 n 個のプログラムに対して、コンバータは n 個だけ作成すれば良く、ソフト会社の負担が小さく、現実的なアプローチと言える。

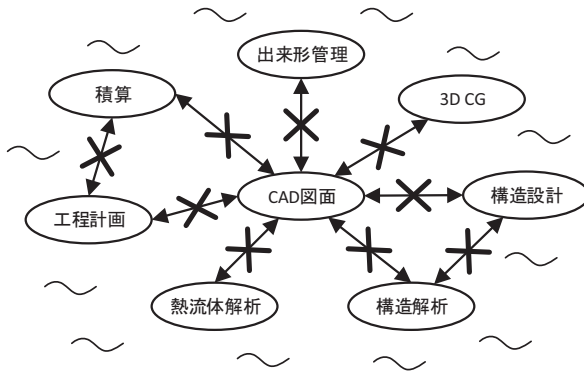


図-1.2 「自動化の島」問題

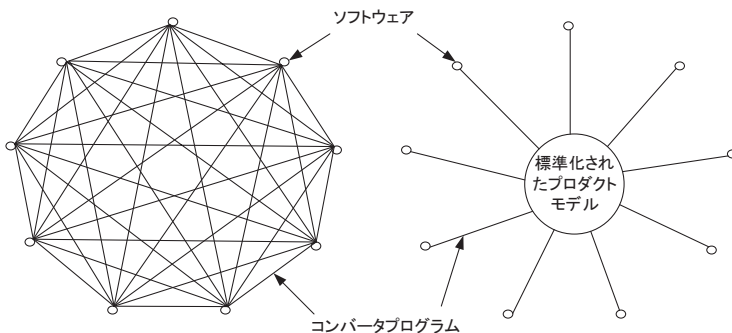


図-1.3 直接コンバータ法とプロダクトモデルを介した間接コンバータ法

BIMでは3次元モデルデータを使用することから、3次元的な可視化、各部材の体積や面積などの数量計算や、部材同士の干渉チェックが自動的にできるのは当然である。さらに、3次元に時間軸を加えた4次元モデルによって、施工順序の検討や建設コストと出来高の比較などを行うことが可能である。なお、BIMのMはModelingとなっているが、モデルを作ることがBIMなのではなく、建築ライフサイクルを統合化する新しい建設生産システムの方法を意味する。また、「BIMモデル」という言葉もよく耳にするが、本来はBIMのMはModelingの略なので、その後にmodelが来るのはおかしい。しかし、BIMという言葉が単なるモデリングではないという意識で使っていると解釈すれば、それ程目くじらを立てることではないと思われる。

1.1.2 BIMのねらい

通常、建築の設計は、建築家が意匠設計、その後に構造技術者が構造設計、設備技術者が設備設計、そして施工業者が生産設計というプロセスで順番に進んでいく。従来のこのような方法は滝が水を落ちるように、順番に仕事をするため、ウォーターフォール・モデル (waterfall model) と言われる (図-1.4の上)。この方法では、下流工程で、上流工程のミスが見つかった時に、水を下から上に持ち上げるのが大変なのと同様、上流工程に差し戻してやり直すということが難しい。そのため、結局そのミスがそのまま下流まで行ってしまい、無理やり下流工程で調整を強いられることが多い。米国では、施工段階で設計段階でのミスが発見されると、RFI (Request for Information) と呼ばれる質問書が施工会社から発注者へ提出され、RFIが何通も提出されると工事がストップし、訴訟にまで進むこともある。また、上流工程から下流工程に渡される情報は、原則として契約書に記載されている文書、図面、あるいはそれらのデータのみであり、設計者や技術者の意図や考慮した事項、選択肢があった場合の選択の理由、その他各種データなどは、下流工程に伝わらず、捨てられるか、倉庫に死蔵される。さらに、下流工程の技術者が上流工程の設計者に対して言いたいこと、例えば提案や改善事項などがあっても言う機会がない。

一方、BIMでは、同時進行的に全員がお互いにデータを共有し、やり取りし

1.1 BIMとは

ながら協調的に進めていく。そのため、まず時間が短くなるというメリットがある。次に、従来方法でいう上流工程の設計にミスがあった場合は、すぐに他の技術者から指摘ができ、修正も即座にできる。そもそも、3次元モデルで設計すれば、2次元の図面よりはるかにミスが発見しやすい。さらに、上流工程の設計者の意図や選択理由などを下流工程の技術者は聞くことができ、下流工程の技術者は上流工程の設計者や技術者に提案ができるため、より良い設計につながる。設計、施工段階のデータを蓄積し、構造物が完成した時には、それまでの全てのデータを引き継ぐことができ、維持管理において、事故や不具合が発生したときに、原因解明や処置方法の検討に役立つ。

そのため、BIMではまず仕事が効率化でき、ミスが減り、コストが削減でき、より良い設計ができるようになり、施工しやすいということが期待されているのである（図-1.4）。

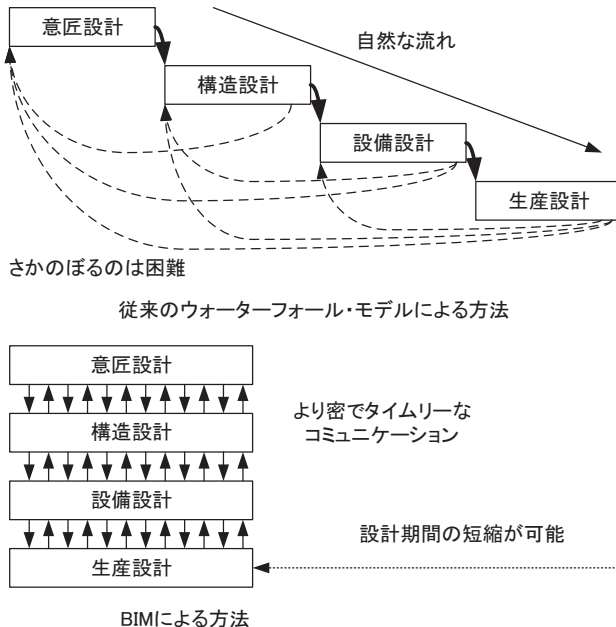


図-1.4 ウォーターフォール・モデルとBIMによる方法の比較

BIMのもう一つのねらいは「フロントローディング」である。図-1.5のグラフは横軸が時間軸で、縦軸が業務量あるいは効果を示すが、右肩上がりの曲線は設計変更をどの段階で行うと、それによってどれだけ建設コストが増えるかを示す。下流側になればなるほど、その増分が大きくなることがわかる。逆に右肩下がり曲線は、設計変更によって建設コストと、構造物の機能への効果がどれだけあるかを示す。初期の段階だと、いろいろな選択肢があるため、変更を行えば非常にその効果が大きい。下流工程になるに従い、効果が小さくなる。

現状の設計にかかる業務量は、右側の山形の曲線で表される。これを前倒しにすることを、フロントローディング (front loading) という。フロントローディングすることによって、まず設計変更の効果が大きくなり、一方、建設コストの増分が減るといふ、2つの効果があると言われている。

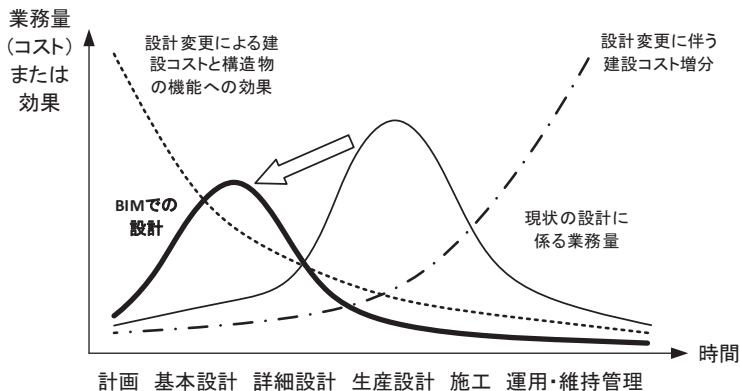


図-1.5 BIMのねらい（フロントローディング）

1.1.3 BIMによる意識改革

BIMは、設計と施工の根本的な考え方を変えつつある。従来は、建築物を設計や施工する際、施工費を最小化することが最も重要で、維持管理やビルの操業コストは微々たるものだという認識だった。しかし、エネルギー価格の高騰

1.2 CIMの開始

や、LCC（Life Cycle Cost：ライフサイクルコスト）への目覚め、工期短縮による事業そのものの開始の前倒しの必要性、建物の更新に伴う建設廃棄物の環境への影響などが背景となり、施工費を最小化することよりもLCCの最適化、つまり部分的に最適化するのではなく、全体を最適化していく必要があるという意識に変わりつつある。

このような背景から、多少建設費が高くても、断熱材の増量、窓ガラスの二重化、サッシ材料の改善等を積極的に進めるようになりつつある。また、構造物のコンクリートは、場所打ちで行った方がコンクリートのボリュームを減らすことができることから、通常は施工費が安くなる。しかし、BIMでは、工期、環境、メンテナンスなどを考慮し、プレキャスト・コンクリートを採用する方が良いという意識に変わりつつある。BIMを使えば、こうした比較検討が格段に短時間でできることも背景にある。

BIMは、日本でも2008年頃から建築業界で徐々に機運が盛り上がり始め、2010年3月、国土交通省官庁営繕部は、2010年度の官庁営繕事業の対象事業に対してBIMを用いた設計を試行することを明らかにし、実際に複数の国の建築物の設計と施工にBIMを適用させた。さらに、2014年3月に国交省は「官庁営繕事業におけるBIMモデルの作成及び利用に関するガイドライン」（略称「BIMガイドライン」）²⁾を発行した。

1.2 CIMの開始

1.2.1 CIMという言葉の誕生

2012年4月、国土交通省の当時の技監（後に事務次官）である佐藤直良氏が、一般財団法人日本建設情報総合センター（以下、JACIC）のセミナーで「CIMのススメー建設生産システムのイノベーションに向けて」というタイトルで講演をされた。CIM（Construction Information Modeling）という言葉が、日本で初めて公に発表されたのがこの時であった。CIMという言葉は、実は情報工学や機械工学の分野ではComputer Integrated Manufacturingの略であり、もう既

に30年以上使われているため、他の分野で使う際には注意を要する用語である。なお、佐藤氏は、2013年11月の第1回土木建築情報学国際会議（ICCBEI 2013）の基調講演では、CIMに「I」を一つ加え、MをManagementに変えて、CIIM（Civil Infrastructure Information Management）という用語と概念を披露された³⁾。

また、日本では、CIMのMは、Modelingだけではなく、Managementを含むということから、Construction Information Modeling/Managementの略とする人々もいる。

2014年6月下旬に米国フロリダ州オーランドで開催された第15回ICCCBE（International Conference on Computing in Civil and Building Engineering）⁴⁾という国際会議で、今までBIM for Infrastructure、つまり社会インフラのためのBIM、あるいはInfrastructure BIMと呼ばれていたものをCIM（スィム）と呼ぶアメリカ人が何人かいた。ただし、Civil Infrastructure Modelingの略であるとのことであった。また、香港にはCivil Information ModelingがCIMの略だとする人々もいる。インターネットでCIMを検索したところ、2011年に発行された「Machine Control」⁵⁾という米国の雑誌では、Marco Cecalaという技術者・経営者がCivil Integrated Managementの略としてCIMを提案していることがわかった。その記事には、FHWA（Federal Highway Administration：連邦道路管理局）が中心となって、AASHTO（American Association of State Highway and Transportation Officials：米国全州道路交通運輸行政協会）、ARTBA（American Roads and Transportation Builders Association：米国道路交通建設者協会）、AGC（Associated General Contractors of America：米国総合請負業者協会）の協力のもとCIMを推進しよう、ということが記載されていた。

いずれにしても、こうした造語は、流行り廃りがあり、どれが将来まで残るかどうかは不明であるが、土木分野のBIMを意味する言葉としては世界的にCIMが定着し、それが何の略かは、国や地域によって異なるが、日本ではConstruction Information Modelingだということではほぼ定着したようである。

1.2.2 国土交通省のCIM開始

国交省ではCIMのパイロットプロジェクト（試行業務）を2012年度に開始し、まず11件の詳細設計のプロジェクトで通常の2次元CADの図面の他に、3次元モデルも作成し、どのように利用できるかを検討した。同時に、国交省が中心となり「CIM制度検討会」を、JACICが中心となり「CIM技術検討会」を組織化し、検討を開始した。試行業務では、関係者にアンケートも行い、CIM利用による改善点と問題点を確認した。翌2013年度は詳細設計だけではなく、もう少し上流の計画的な基本設計を含めた13件の設計業務と、下流側の47件の施工の試行プロジェクトが行われた。2012年度から国が中心となって開催するCIM制度検討会と民間が中心となって開催するCIM技術検討会が年に数回ずつ開催され、特にCIM技術検討会では毎年度、報告書が作成されており、電子版の報告書はJACICのホームページからダウンロードすることができる⁶⁾⁻⁸⁾。

このようにCIMについては様々な取組みがなされているが、現状では市販の3次元のCADを使い、可視化や干渉チェック、数量計算等ができるということに留まっている。建築のBIMの方で行っているような、例えばプロダクトモデルでデータを皆で共有するところまでは、まだ進んでいない。建築の方では標準化されたプロダクトモデルが存在するが、まだ土木の方では存在しないということが一つの妨げになっている。

1.3 CIMの定義

CIMは、前節で記したように、最近できた造語であり、学術的に確立された用語ではない。しかし、日本の土木分野では、欧米でよく使われている「(Civil) Infrastructure BIM」や「BIM for (Civil) Infrastructure」とほぼ同様な意味合いで、広く使われていることから、何らかの定義をし、共通の概念を関係者で共有することは意義があることだと考える。

国土交通省では、2012年度、CIMを次のように定義している⁶⁾。

「CIMとは、調査・設計段階から三次元モデルを導入し、施工、維持管理の各段階での三次元モデルに連携・発展させることにより、設計段階での様々な検討を可能とするとともに、一連の建設生産システムの効率化を図るものである。三次元モデルは、各段階で追加、充実化され維持管理段階での効率的な活用を図る」

一方、2012年度と2013年度のCIM技術検討会の報告書^{6) 7)}では、CIMの理念を以下のように記している。

「公共事業の計画から調査・設計、施工、維持管理、更新に至る一連の過程において、ICTを駆使して、設計・施工・協議・維持管理等に係る各情報の一元化および業務改善によるいっそうの効果・効率向上を図り、公共事業の安全、品質確保や環境性能の向上、トータルコストの縮減を目的とする。

一連の過程を一体的に捉え、関連情報の統合・融合により、その全体を改善し、新しい建設管理システムを構築するとともに、建設産業に従事する技術者のモチベーション、充実感の向上に資することも期待する」

さらに、2013年度のCIM技術検討会の報告書「CIM 2014」⁸⁾では、CIMを以下のように定義している。

「CIMは、Construction Information Modelingの略称であり、建設構造物に各種の情報を追加したモデルを作成し効率化を目指す取り組みである。最近では、単なるモデル化だけでなく、こうした技術を用いたマネジメント（Construction Information Management）として捉えられることも多い」

ここで、同報告書では、CIMを活用することにより、①コスト縮減、工期短縮による効率的な社会資本整備、②ストック型社会への転換、③環境に配慮した社会資本整備に対応することを目指すとしている。さらに、構造物のライフサイクルを限られた資源で実施、管理するためには、業務フロー、執行体制の見直しと、これを実現するためのデータ作成、可視化、データ蓄積技術の確立が不可欠だと述べている。

筆者は、CIMを以下のように考えている。

「3次元の形状情報と属性情報を持つ標準化されたプロダクトモデルを、社

会インフラの計画、設計、施工、維持管理、更新（撤去）のライフサイクルを通じて、発注者、設計者、施工者、下請け業者、市民、各種団体が、必要に応じて情報アクセスの制限は加えるものの、基本的には皆でインターネット上で共有する。各プレーヤが、時には共同作業を伴いながら、自分達のソフトウェアで同時進行的に行った作業成果をプロダクトモデルに加えていき、プロジェクトに関する会議室での、あるいはインターネットによる遠隔会議でのプレゼンテーションと意見情報交換を通じて、新しいアイデアを出し合う。これにより計画・設計・施工でのミスや無駄を減らし、プロジェクトのLCCの縮減、設計・施工の工期短縮、環境に配慮した、より良い社会インフラを建設し、供用する新しい仕事の方法である」

ただ、現状のCIMは、当然のことながら、ここまで達してはおらず、今後、10年から20年くらいの先進諸国の努力によって、いずれ実現する将来像だといえる。図-1.6は、プロダクトモデルをライフサイクルを通じて共有しながら進めていく様子を示している。図-1.7は、その過程を時系列的に模式化したもので、中心の構造物のデータモデル（プロダクトモデル）の大きさが、徐々に大きくなっていく様子を表しており、各プロセスにおいて、主担当だけでなく全プレーヤが程度の差はあれ、関与していることに注目されたい。

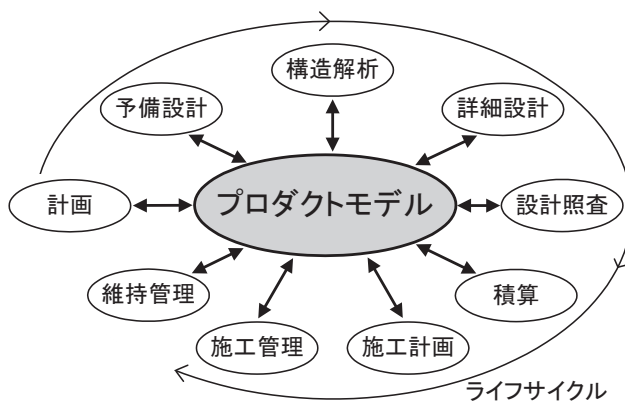
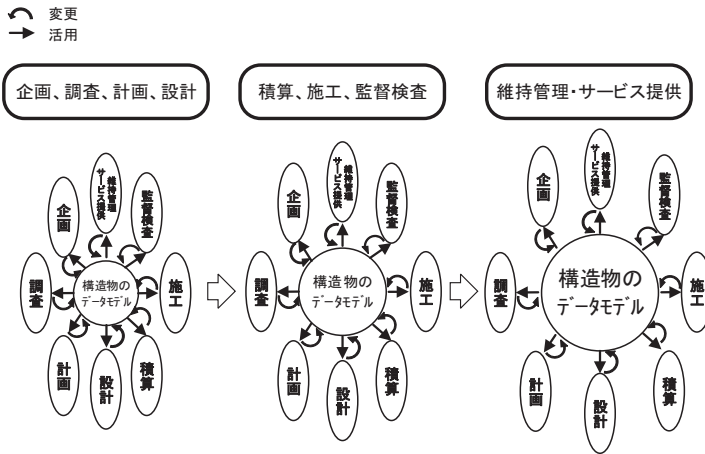


図-1.6 CIMとライフサイクル



図ー1.7 プロダクトモデルのデータを共有し、進化していく様子

参考文献

- 1) Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, Kathleen Liston: BIM Handbook, A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors, Second Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- 2) 国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課施設評価室：「官庁営繕事業におけるBIMモデルの作成及び利用に関するガイドライン」(BIMガイドライン), 2014.
- 3) Naoyoshi Sato: Construction Information Modeling, Proceedings of the First International Conference on Civil and Building Engineering Informatics, Nobuyoshi Yabuki and Koji Makanae (Eds.), Nov. 7-8, Tokyo, Japan, p.3, 2013.
- 4) Proceedings of the 15th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, June 23-25, Orlando, FL, USA, 2014.
- 5) Marco Cicala: The Profitable Implementation of CIM, Civil Integrated Management, Machine Control, Vol. 1, No. 1, pp.41-43, 2011.
- 6) CIM技術検討会：CIM技術検討会平成24年度報告, 2013.

1.3 CIMの定義

http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/study/pdf/h24/CIM_Report130430.pdf

7) CIM技術検討会：CIM技術検討会平成25年度報告，2014.

http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/study/pdf/h25/H25report_0519.pdf

8) CIM技術検討会：CIM技術検討会平成26年度報告，2015.

http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/study/pdf/h26/h26report_0522.pdf

第2章 建設分野を取り巻く課題

本章では、まず、日本の建設分野が直面している種々の課題について概説し、次に、土木分野が有する特徴を特に製造業と比較して論じ、最後に、海外の建設分野の状況を日本と比較しながら紹介する。

Keywords

担い手不足、労働生産性、発注方式、土木、建築、国際性

2.1 日本の建設分野

2.1.1 建設投資額と建設業者数

日本の民間と政府を合わせた建設投資額がピークだったのは1992年度で、その額は約84兆円であった。その後、著しく減少し、2010年度に約41兆円と半分以下まで落ち込んだが、その後、増加に転じ、2013年度は、約50兆円とピーク時の40%減となっている。建設業者数は、2012年度末で約47万業者で、1999年度末のピーク時の約60万業者から約22%減である。建設業就業者数は、2013年平均で499万人で、1997年平均のピーク時の685万人から約27%減となっている（図-2.1）¹⁾。

2.1.2 高齢化と若年層の減少

建設業就業者の年齢別内訳をみると（図-2.2）、2013年、55歳以上が約34%、29歳以下が約10%と高齢化が進行しており、1997年でそれぞれ、24%、22%であったことから進行の度合いが急激であり、他の産業と比較しても突出していることから、深刻な課題といえる。特に、いわゆる担い手が不足し、

第2章 建設分野を取り巻く課題

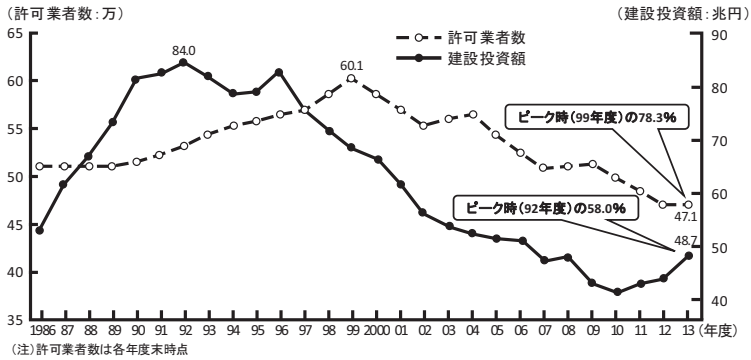


図-2.1 建設投資額と建設業者数の推移¹⁾

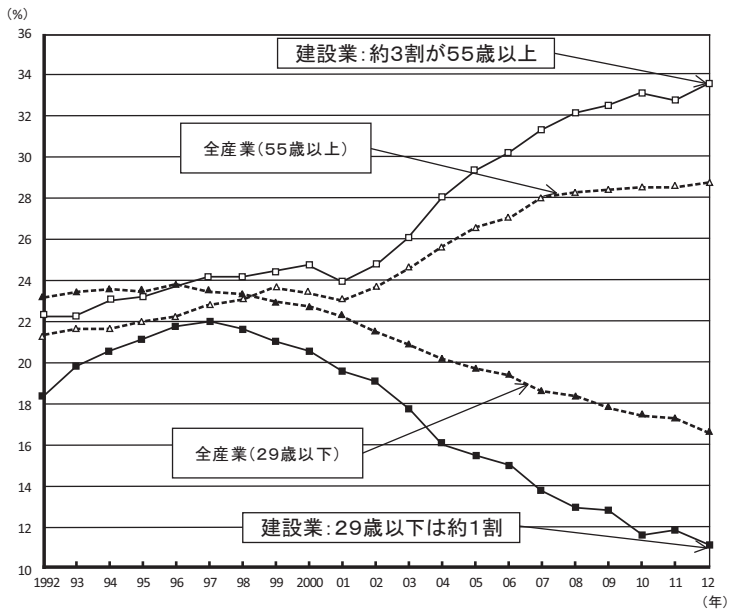


図-2.2 建設業就業者の高齢化²⁾

次世代への技術継承がうまくできず、今後の建設産業の行く末が懸念されている。

2.1.3 低い労働生産性

労働生産性の推移に目を転じてみる。ここでいう労働生産性とは、実質粗不可価値額を就業者数と年間総労働時間数で割った値である。図-2.3¹⁾に示すように、建設業は、1990年に3,531円／（人・時間）であったのが、2012年には2,518円／（人・時間）と約3割減となっているのに対し、製造業は、2,583円／（人・時間）から5,259円／（人・時間）と約2倍になっている。2012年で比較すると、建設業の労働生産性は、製造業の半分しかないということがわかる。

2.1.4 経年劣化する社会インフラ

2012年12月2日、山梨県大月市笹子町の中央自動車道上り線笹子トンネルで天井板（コンクリート板）が約130mの区間にわたって落下し、9名が死亡、2名が負傷した。以前から、専門家の間では社会インフラの経年劣化が話題になっていたが、この事故は社会的にも大きなショックを与え、社会インフラの点検、維持管理への関心が高まっている。

高度経済成長時代に建設された大量の社会インフラが2025年頃から更新期を迎え始めることから、多額の維持管理費と更新費が増加していき、このままでは将来、現状の公共建設投資額を超えてしまうというのではないかという懸念もある。日本の財政は厳しい状況であることから、構造物の耐用年数を超えて

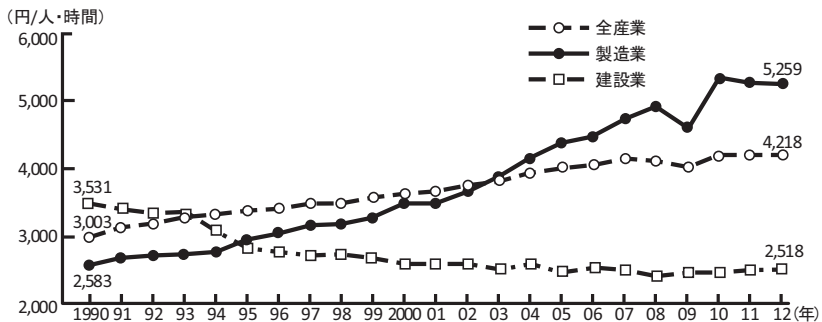


図-2.3 建設業と他の産業の労働生産性の推移¹⁾

の長寿命化への取組みを行う一方、過疎地域において利用頻度が低い構造物については供用停止や撤去についても議論されるようになってきている。

2.1.5 公共事業の発注方式

日本の公共事業の発注方式は、根本的に昔から変わっておらず、原則は競争入札であり、最も低い入札金額の施工業者が落札する。しかし、発注者は入札前に予定価格を算定しておき、施工業者の入札金額が予定価格よりも全て高ければ、「不落」となり、予定価格以下になるまで入札を繰り返すことになる。また、予定価格が低そうな工事では、どの施工業者も入札に参加しない「不調」となることがある。2011年3月11日の東日本大震災以降、不調・不落が増加し、問題となっている。

一方、以前は、発注者が発注工事の難易度や企業の規模や技術力から適切と考える10社程の施工業者を選んで入札を行う「指名競争入札」が一般的であったが、談合の温床のもとだという指摘から、指名をしない「一般競争入札」が通常、採用されるようになった。しかし、そのため、十分な技術力や資金力がない企業が低価格入札（ダンピング）によって落札するようになり、施工中の事故の頻発、手抜き工事、品質の低下を招くようになった。特に、品質低下は深刻であり、施工費が多少安くても、品質が低い構造物は、その後の劣化が酷く、結局多額の維持管理費がかかるだけでなく、事故につながるなどの問題を抱える。

そこで、国は、2014年6月に公共工事の品質確保の促進に関する法律（品確法）を中心に、密接に関連する公共工事の入札及び契約の適正化の促進に関する法律（入契法）と建設業法も一体として改正を実施した。これにより、将来にわたる公共事業の品質確保とその中期的な担い手の確保、ダンピングの防止等の基本理念が追加されると共に、これを実現するために、発注者の責務を明確化し、事業の特性等に応じて選択できる多様な入札契約方式の導入や活用を位置付け、行き過ぎた価格競争を是正することが期待されている。これについては、第13章で再度触れる。

2.2 土木分野の特徴

土木分野は、どの国にとってもなくてはならない重要な産業分野の一つであるが、製造業と比べると同じものづくりの産業であるにもかかわらず、相当な違いがある。本節では、土木分野の特徴について触れる。

2.2.1 公的・重厚長大

まず、他の分野と大きく異なるのは、土木構造物は公的なものであり、特定の個人や企業が独占的に利用して利益を得るようなものではなく、大勢の人々が日常、無料あるいは安い使用料で利用することである。通常、土木構造物は大規模で非常に重く、自ら移動したり、移動させたりすることはほとんどない。従って、土地と密接なつながりがあり、既に地域のマスタープラン等があれば確認と交渉が必要になったり、私有地に構造物を作る際には、買取り、立ち退きや使用許可が必要であり、その交渉や契約に長期間を要する場合が多い。構造物の価格は極めて高価であり、1兆円を超えるような構造物もある。

土木構造物を計画、設計、施工、維持管理していく上では、関係する人々や企業、団体等が非常に多く、特に、近隣の住民、利用する市民、地方自治体、政治家、環境保護団体などのステークホルダ達との間の合意形成は極めて重要で、これに失敗すると、プロジェクトそのものが頓挫したり、長期化する可能性がある。そこで、説明会やパブリックコメント募集など様々な取り組みがなされている。

2.2.2 単品現地生産・長期間

土木構造物は基本的に単品生産であり、現場生産であることも特徴的である。構造物を造る場所の条件は、相手が自然であることから、一つとして同じものではなく、プロジェクトごとに設計条件を定めながら設計していく。特に、地盤状況は、ボーリングや調査トンネルなどを施工しながら調査する必要がある、多額の費用がかかる。従って、設計段階で完全に地盤状況を把握してから施工

することは事実上不可能であり、実際は、ある程度の調査で大凡の設計を行い、後は施工段階で変化に応じて設計変更しながら工事を進めることが多い。製造業では、一旦設計をしたら、後は大量生産を行うため、生産前に厳密な設計が必要であり、土木分野とは大きく異なる。

土木構造物のライフサイクルは、計画・調査、設計、施工、維持管理と進むが、その期間は、極めて長く、計画が始まってから工事が完成するまで短くても数年、長ければ数十年かかる。また、構造物の耐用年数は数十年であり、実際は、補修しながら、耐用年数を超えて利用することが多い。その長い年月の間には、予想しえないような天変地異や事件が起こることがある。

2.2.3 分散

製造業では、原材料や部品等の調達以外は、設計から製造まで一社で統合的に管理しながら生産するため、生産コスト、人員配置、工程などの生産プロセスの全体最適化を実現することができる。一方、土木構造物の場合は、大きなプロジェクトを複数の小さな工区に分割し、発注者である官公庁等が計画、測量、地質調査、基本設計、環境影響調査、詳細設計、施工、点検、維持補修等、数多くの独立し分断された業務を、単年度予算で、毎回入札で決まった業者（そのため、異なる業者になることがある）に発注している。特に、設計と施工を分離して発注することが公共工事の場合は当然となっており、設計と施工の間で情報が分断されている。そのため、業務と業務をつなぐことができるのは発注者だけで、受注者同士は業務が異なれば連携できず、プロジェクト全体をライフサイクルを通じて一貫して統合的に管理することは極めて困難である。また、各業務を受注する業者は、多層多重構造になっており、下請け、孫請け、曾孫受け、玄孫受けと業務は細かく分断されていく。このように、製造業の統合（integration）に対して、土木事業は分散（fragmentation）という言葉でうまく表現できる（図-2.4）。

このように、土木構造物の生産プロセスは、分散しているため、調査によって得られた情報や設計データ、計測データなどの大半は共有されず、数年すれ

ば逸散してしまう運命となっている。また、設計を行う建設コンサルタントや施工を行う請負業者でも、納入品のコピーや重要文書を除けば、ほとんどの書類、データは、いずれ捨てられるというのが現状である。一方、製造業では、設計、製造過程で生まれた書類やデータは貴重なノウハウを有するものであるから、厳重に保管していることが多い。

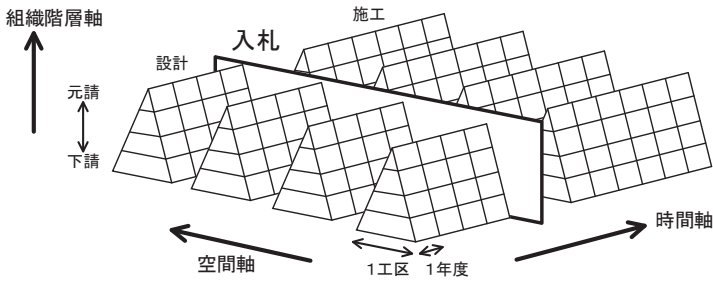


図-2.4 土木事業は分散傾向

2.2.4 官主導・国内指向

製造業では、製品に対する責任は生産者にある。購入者が通常の利用をしている限り、事故や不具合があった場合、購入者に責任がある、などということになることはまずあり得ない。一方、土木構造物の場合、発注者である官公庁等には土木技術者がいて、プロジェクトを上記のように細かく分けて業者に発注しているものの、基本的には自分たちで技術的にも立案、管理していることになっている。従って、業者の落ち度や手抜きといったことが明らかでなければ、責任は発注者（すなわち購入者）が負うことになる。そうしたこともあって、発注者の方が受注者より上の立場にあるように感じている人が多く、受注者は下の立場なのだからという「甘え」を持っていることも散見される。

日本の製造業は、特に冷戦終結後のグローバル化によって、海外企業との熾烈な競争を余儀なくされているが、土木建築の建設業は、日本語以外の外国語は通じず、地縁や人の縁に基づく永続的な企業関係を好む日本に、海外企業が入り込むことは極めて困難であるため、国内においては国内企業間の

みの競争となっている。一方、海外での国内企業の売上高は、次節で示すように、欧米諸国と比べて低い。

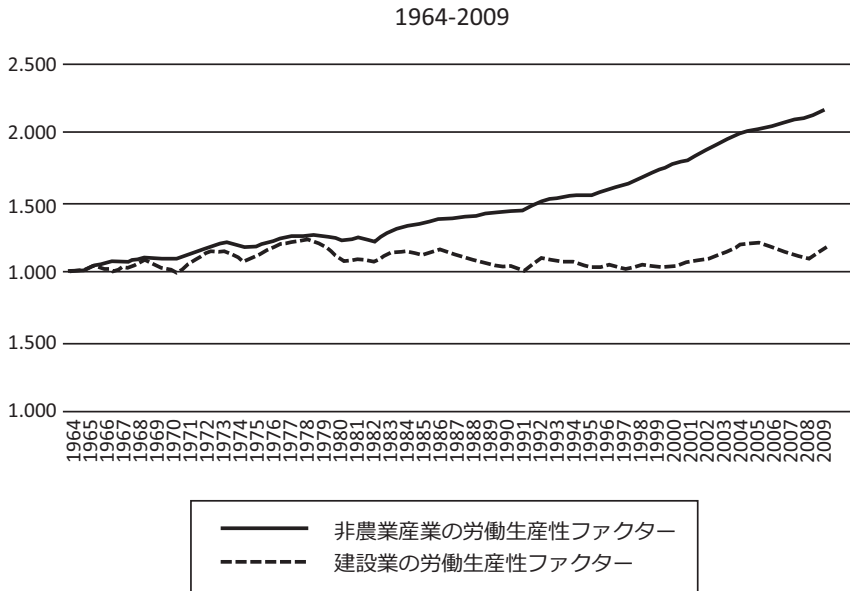
2.3 海外の建設分野

2.3.1 労働生産性の比較

海外においても建設業の労働生産性が製造業と比べて低い状態であることが、以前から指摘されている。例えば、米国では、スタンフォード大学のCIFE（Center for Integrated Facility Engineering：総合化施設工学センター）の調査によれば、図-2.5に示すように、1964年における建設業と製造業の労働生産性を1,000とすると、建設業はほとんど変わらないのに対し、製造業は年々増加し、2009年には2倍の2,000を超えているのである³⁾。この理由として、製造業は一度設計すれば工場において大量生産できるのに対し、建設業はプロジェクトごとに設計が異なり、建設現場で単品生産しなければならないことが挙げられる。さらに、製造業では、マーケティングから設計と製造が一体化し、部品メーカーの間でも各種情報が電子化され、スムーズにやり取りされているのに対し、建設業では、分散化・多重階層化した業者間で、電話やFAXといった旧態依然とした情報のやり取りがなされていることも課題であった。最近では電子メールを用いているが、基本的に、直接オペレーションが可能なファイルのやり取りをしなければ、FAXと効率はそれ程変わらない。

米国のNIST（National Institute of Standards and Technology：米国国立標準技術研究所）が2004年に発表した調査によれば、分散化し階層化した多くの業者が、2次元の図面を用いて、共通のデータ仕様に基づく3次元のモデルデータのやり取りができないことによる建設業における損失は、米国だけで、年間158億ドル（約1兆8千億円）になるということである⁴⁾。

こうしたことが背景となって、米国では2004年頃から、BIMを本格的に採用しようという動きが始まったと考えられている。イーストマン教授がBIMという言葉を使い始めたのは、NISTの調査結果が公表された2004年と同じ年で

図-2.5 米国の建設業と製造業における労働生産性の変化³⁾

あることは興味深い。

2.3.2 企業規模と国際性

一方、建設分野の企業に目を転ずると、欧米先進諸国は、既に相当な社会インフラが揃っていることもあり、特に大手企業は、国外への進出が盛んである。2012年における国外売上高の比率は、欧州の大手11社は62.1%、米国の大手2社は78.0%となっており、国内より国外の方が多いのである。一方、日本は、大手4社でも同年13.5%と、圧倒的に国内が多い¹⁾。

これは、日本と外国との間で設計や施工に関する仕事のやり方が大きく異なるため、日本国内で育った技術者がすぐに海外で役立つわけではなく、契約や発注者との関係などを勉強し直さなくてはならないことにも由来すると思われる。

2.3.3 土木と建築の分類

日本では土木と建築は対象とする構造物の種類により明確に分かれている。すなわち、道路、鉄道、橋梁、トンネル、河川、港湾などの社会基盤施設が土木分野で、ビルディングや家屋は建築分野となっている。しかし、欧米に目を転ずると、実はCivil EngineeringとArchitectureは日本の土木と建築とは相当に分け方が異なるということに気付く。図-2.6に示すように、構造物の種類にかかわらず、構造、水理、土質、材料、施工、環境、設備といった、サイエンスの内、主に力学（熱力学を含めて）に立脚している学問分野がCivil Engineeringであり、意匠設計や景観といった美学や感覚といった職人的な教育を行うのがArchitectureである。従って、Civil Engineeringの方がより広い範囲をカバーしているため、大体どこの大学にもCivil Engineeringの学科はあるが、Architectureは数多く学科を作ってしまったら、学生が余って就職先がなくなるので少ない。また、Architectureの学科は工学部の中にはなく、建築学部として独立しているか美術系や生活系の学部に属していることが多い。また、通常の4年教育ではなく、5年教育を課していることがある。

筆者は昔、米国のスタンフォード大学のCivil Engineering学科で構造工学の授業を受けた時、ビルディングの構造と基礎に関することばかりだったので大いに面食らったが、欧米では当然ということだった。

従って、BIMというのは、欧米の場合、Architectureを学んだ建築設計者とCivil Engineeringを学んだ構造・地盤、設備、生産、施工技術者が、フロントローディング（設計の前倒し）によって、同じ土俵でプロジェクトを進めようとする相当に果敢なチャレンジをしているとも見ることができる。一方、日本の建築分野は意匠設計者も、構造・地盤、設備、生産、施工技術者も建築を同じ学科と一緒に学んだ「仲間」がBIMをやっているという見方もできるのである。

日本では土木と建築の区分は極めて強く、構造や土質などはほとんど同じようなことを扱っているのに、会社や役所では縦割りになっている。学の世界でも、多少はクロスオーバーがあっても、土木で使う、死荷重、活荷重、照査などの用語は建築では使っておらず、それぞれ、固定荷重、積載荷重、検定と呼

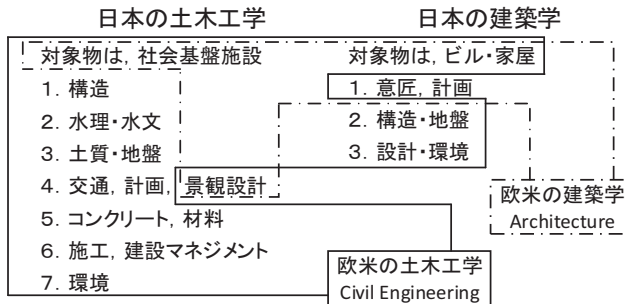


図-2.6 日本の土木・建築の分け方の違い

んでいる。従って、BIMからCIMへの水平展開は、日本の方が欧米よりもハードルが高く、より多くの努力を要するかも知れない。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会：建設業ハンドブック2014，2015.
- 2) 山下真治：国土交通省におけるCIMの取り組み，建設マネジメント技術，2015年6月号，pp.7-10，2015.
- 3) Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, Kathleen Liston: BIM Handbook, A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors, Second Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- 4) M. P. Gallaher, A. C. O' Connor, J. John, L. Dettbarn, and L. T. Gilday: Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry. Gaithersburg, MD, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce Technology Administration, 2004.

第3章 設計・施工と情報伝達の歴史

設計という行為は、発注者や利用者のニーズを満足させ、安全で、経済的で、建設可能で、耐久性もあり、住民や環境への影響が少ない構造物の形状や材料、強度、数量、仕様等を決めることである。その決定プロセスについては第9章で触れるが、本章では、設計した内容、すなわち設計者の意図を発注者や施工者、あるいは関係する人々にどのようにして伝達するかという情報伝達手段に関して歴史を振り返りつつ、考察する。

Keywords

歴史、デカルト座標系、画法幾何学、図学、青図、コンピュータ、CAD
M2M、部分最適化、全体最適化

3.1 大昔の設計と施工

大昔は、一体どのようにして建物や橋などの構造物を設計し、施工していたのであろう。

奈良県明日香村にある飛鳥寺は、6世紀末に建てられた日本最古の本格的仏教寺院であるが、建立に当たっては百済から金堂の模型が日本へ献上され、技術者が数名から百名（人数については諸説あり）派遣されたという記録が残っている。また、奈良の東大寺正倉院には日本最古の図面が保管されているが、東大寺の講堂や僧房、食堂などの平面レイアウトを麻の布に描いたもので、我々が現在思っているような図面とは異なる¹⁾。

西洋においても、現在のような図面が描かれるようになったのはつい200年程前であり、それまでは、正面や側面から見た図絵、平面レイアウトの図、平行投影法で3次元的に描かれた図絵で設計され、しばしば模型を作って確かめ

ながら設計・施工されたという。設計者は頻繁に現場を訪れ、陣頭指揮しながら施工したと考えられている。また、石工などの技能者は、石切りの方法や施工のための詳細な図絵の描き方は秘伝とし、弟子以外には教えなかったと言われている。なお、透視図法による絵の描き方を確立したのは、レオナルド・ダ・ヴィンチ（Leonardo da Vinci）（1452-1519）だとされている¹⁾。

このように、大昔は、設計者や技術者は現在のような正確な図面に基づいて設計や施工を行ったのではなく、3次元的なイメージを頭の中に持ち、その一部を紙や布の上に描いて、イメージを何とか共有化しようとしたが、とても詳細なところは伝わらないため、模型を作ったり、現場で現物を見ながら指示を出したり、話し合ったのだと推察されている。

3.2 デカルト座標系

現在、我々は2本の直線の交点や円弧と放物線の接点などの座標値を正確に計算することは、容易にできる（図-3.1）。こうした計算が大昔からできていると思っている読者が多いかも知れない。しかし、今当たり前のように使っている座標系に至る平面上の座標の概念を確立したのは、フランスの哲学者・数学者であるルネ・デカルト（René Descartes）（1596-1650）であり、17世紀前半なのである。彼は、「方法序説」²⁾の補遺の一つである「幾何学」³⁾の中で図形と数式の関係进行を明らかにした。直交座標系のことを欧米では「デカルト座標系」（Cartesian coordinate system）と呼ぶ。Cartesianとは「デカルトの」というラテン語Cartesiusを英語に訳したものである。日本でも以前はそう呼んでいたが、なぜか最近では単純に直交座標系と呼んでいる。発明者に対する尊敬の念が足りないと思ふ。

直交座標系の発明は、それまで全く別の学問で接点がなかった代数学とユークリッド幾何学を融合したわけで、数学において非常に大きなインパクト（影響力）があった。直線、円、放物線、円柱、円錐、球体などの2次元、3次元の図形を数式で表すことができ、それらの交点や接点などを代数学的に求める

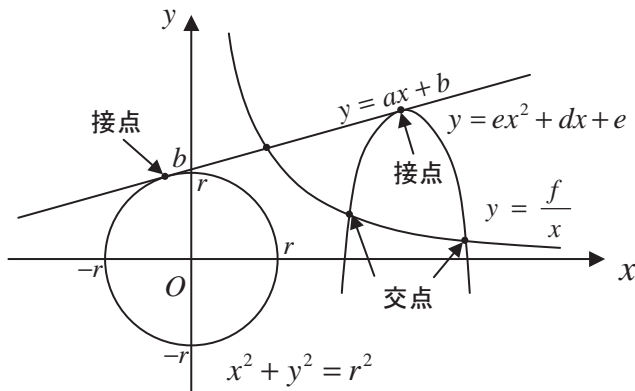


図-3.1 デカルト座標系による幾何学と代数学の融合

ことができるようになったのである。デカルト座標系の発明がなければ、その後のニュートンとライプニッツによって発明された微積分、すなわち解析学はなかったであろう。ただ、その後、幾何学が解析学の従のような立場になってしまったため、図形を図形のまま学問的に扱うことがなござりになってしまった。

3.3 画法幾何学と青図

図形を図形のまま扱うことに再挑戦したのが、フランスの数学者・物理学者のガスパール・モンジュ (Gaspard Monge) (1746-1818) である。デカルトから150年経っていた。彼は、3次元の図形(立体)を2次元の紙の上にとしたら数学的に正確に描けるかを考え、画法幾何学を1795年に創始した。彼のおかげで、設計者などの頭の中にある3次元的な機械や構造物のイメージを、他人に間違いなく伝達できる製図という手法が確立していったのである(図-3.2)⁴⁾。ちょうど、18世紀末から19世紀初めは英国から始まった産業革命の真只中であり、設計した機械や構造物を速く正確に作るためには欠かせぬ技術となった。

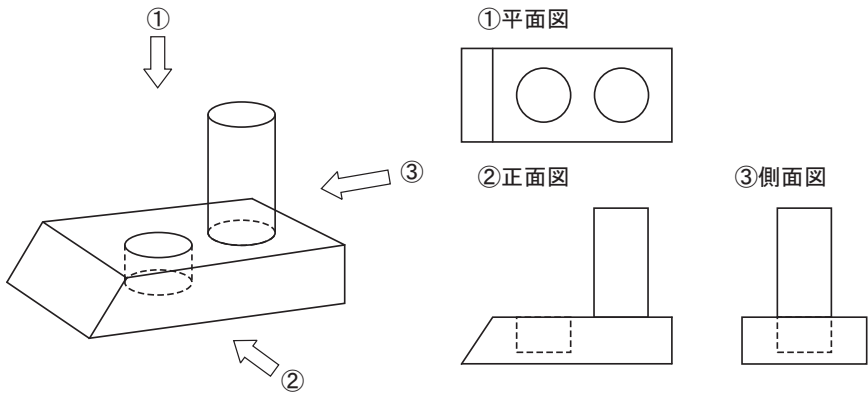


図-3.2 画法幾何学による第三角法

ただ、画法幾何学によって製図はできるようになったが、多くの図面を安く印刷する方法がなかった。大きな紙に図面を印刷するためには非常にお金がかかったため、19世紀は大きな図面をコピーできず、原図のみか、手で書き写す必要があった。この問題を解決したのが、英国のサー・ジョン・ハーシェル (Sir John Herschel) (1792-1871) である。彼は、天王星を発見したウィリアム・ハーシェル (William Herschel) の息子である。彼は、1842年に青図 (ブループリント) と呼ばれる青写真技術を発明し、19世紀後半から20世紀初め頃から非常に大きな図面を安く大量にコピーできるようになった。そのおかげで、設計者と製造者あるいは施工者は分離できるようになったわけである。これによって、設計者と製造者あるいは施工者は、それぞれ専門化していき、自分の領域の中で、最適化を目指す部分最適化の時代へと移ることになる。また、技術者は3次元の物体イメージを2次元の図面に正確に描くことと2次元の図面から3次元の物体イメージを頭の中に正確に描く技術を習得しなくてはならなくなった。このため機械、建築、土木などの工学教育においては、図学と製図に相当な時間を費やす必要が生まれた。