

「日本型」製品開発プロセスとコンカレント・エンジニアリング

ボーイング 777 開発プロセスとの比較

青 島 矢 一

1 はじめに

本論文では、日本の製造企業の競争力の源泉として 1980 年代中旬以降注目された新製品開発プロセスの特徴をあらためて整理して、それを 3 次元 CAD を中心とした情報技術を核として近年進展しているコンカレント・エンジニアリングと比較する。3 次元 CAD を利用したコンカレント・エンジニアリングの事例としてはボーイング社の 777 開発の事例をとりあげる¹⁾。情報技術を最大限活用するような製品開発プロセスが、いわゆる「日本型」開発プロセスの延長上にあるのか、それとも両者の間には何か基本的な溝があるのかを把握することが目的である。

自動車や家電、エレクトロニクスといった領域で日本企業の国際競争力が急速に高まったことに対応して、1980 年代中旬ころから、マネジメントスタディの一環として日本の製造企業の新製品開発プロセスが注目されるようになった。日本企業の競争力が、製造上の品質の高さだけでなく、新製品導入頻度や技術的新規性にも強く起因していることが共通の認識となってきたことがその背景にあったと思われる。この認識の下で、世界的な競争力をもつ日本の製造企業の開発プロセスを実証的に明らかにしようとする試みが行われた (Clark and Fujimoto, 1991; Womack, et. al., 1990; Imai, Nonaka, and Takeuchi, 1985; Bower and Hout, 1988; Gomory, 1989)。

開発ステージの重複、品質の作り込み、機能横断的チームの活用、あいまいな分業関係、強力な統合者の存在などいわゆる「日本型」開発システムの

様々な特徴が、一連の研究を通じて明らかにされた。特に開発ステージのオーバーラップや機能横断的活動を通じた初期段階からの品質の作り込みといった特徴に注目して、日本型開発プロセスはサイマルテニアス・エンジニアリングと呼ばれたり、コンカレント・エンジニアリングの典型例として扱われることもあった。80年代後半から90年代にかけてこの「日本型」開発プロセスを米国企業を中心とする多くの海外企業が直接的あるいは間接的に学習して開発プロセスの効率化をはかってきたといわれている(例えば延岡, 1997 参照)。しかしながら、日本型開発プロセスの学習を1つのきっかけとして米国企業を中心に定着しつつある新製品開発プロセスは必ずしも80年代に注目されたいわゆる「日本型」開発プロセスと同一ではない。また、日本企業の新製品開発プロセス自体も、特にバブル期以降、変化しつつある(藤本, 1998; Baba and Nobeoka, 1997; 延岡, 1997)。これらはともにCAD/CAEに代表される情報技術の発展と強く関係している。

情報技術の中でも製品開発プロセスに特に大きな影響を与えているのがソリッドモデラーといわれる3次元CADである。主として製図効率を高めるために導入された2次元CADや初期の3次元CADとは異なり、3次元ソリッドモデラーは部品の詳細形状などの設計情報を全てデジタル情報として一元化する統合CADシステムを構成することにつながる(延岡, 1997; Baba and Nobeoka, 1997)。その結果、分業された様々な設計活動は、共有されたオンライン情報をベースに同時並行的に行われるようになる。その意味で、3次元の統合CADシステムの導入は、コンカレント・エンジニアリングへ向けた製品プロセスの革新という目標のもとに行われるのが通常である。

以下本論文で行う作業は、80年代にサイマルテニアス・エンジニアリングとかコンカレント・エンジニアリングと呼ばれた日本の製造企業の開発プロセスが3次元の統合CADを中核にした近年のコンカレント・エンジニアリングと本質的なレベルでどのような点で異なっているのかということを明らかにすることである。そうすることを通じて、情報技術の活用が確実に進

展している現在の流れが、日本企業の競争力の源泉の1つといわれた製品開発プロセスの特徴をさらに活かすことになるのか、それとも何らか基本的な変化を促すことにつながるのかということを検討する。またこのような比較相対化の作業を通じて、製品開発プロセスを特徴づける次元を明確にすることも本論文の目的である。新製品開発を特徴づける言葉が様々飛び交う中でそれらを概念レベルで整理する作業が重要であると思われるからである。

以下第2節ではまず、主として1980年代に指摘された日本の製造企業における開発プロセスの特徴をまとめる。続いて第3節では、ボーイング社のB777開発の事例を紹介することによって新世代の3次元CADを最大限活かしたコンカレント・エンジニアリングの特徴を明らかにする。その議論を受けて第4節では、いわゆる「日本型」開発プロセスとボーイングB777開発プロセスとを複数の次元に沿って相対化して両者の類似点と相違点を明確にする。そして製品開発プロセスにおける統合CADシステム導入の流れがいわゆる「日本型」開発プロセスに対してもつインプリケーションを議論する。

2 「日本型」製品開発システム

主として1980年代に行われた研究から明らかになった日本の製造企業の開発プロセスの特徴を誤解を恐れずに単純化するなら次の3つにまとめることができるであろう²⁾。

2.1 開発ステージのオーバーラップ

日本の製造企業の製品開発プロセスの特徴としてまず指摘されたのが開発ステージのオーバーラップである。基本設計、試作、詳細設計、金型設計、治工具設計、金型生産といった製品開発の各ステージを時間的にオーバーラップさせるやり方で、上流ステージが完全に終了してから下流へと作業が順次バトンタッチされる伝統的な米国流のシークエンシャル型の開発プロセスと対比された(Clark and Fujimoto, 1991; Imai, Nonaka and Takeuchi,

1985 ; Krishnan, Eppinger and Whitney, 1997). Fujimoto and Clark (1991) による自動車金型開発の日米比較はこれら2つの違いを極めて鮮明に示している。彼らによれば、日本企業のカ型開発では、最終設計図面ができあがる前に手配図というものが渡され、それと同時に金型の詳細な設計および鑄造が前倒しでスタートする。この段階で一次試作車が完成していないというケースもみられる。そして最終設計図面の引き渡しが行われる頃かそれより少し前には実際の金型切削が開始される。設計が終了する前に途中段階の情報を下流に流して、設計変更を承知の上で、金型設計や金型製作作業を早めにフライングスタートさせているわけである。それに対して米国の金型開発では、最終設計図面が引き渡されて初めて金型の詳細設計が始まる。したがって、実際の切削作業は最終図面の引き渡しから大きく遅れることになる。

80年代以前に行われた研究が、開発ステージのオーバーラップはむしろ開発コストが増大につながるという結果を示していたように(例えば、Eastman, 1980), オーバーラップ型の開発は本来的にやり直しのリスクを含んでいる。金型開発の例でいえば、まだ最終設計図面が確定しない内に、金型の設計や製作へと資源投入が行われるため、設計変更の影響を受けてコストが増大する可能性が高い。その意味で、金型メーカーなど開発の下流工程を受け持つメーカーはリスクを負うことになる。この問題に対処するために、例えば日本の金型メーカーは設計変更をなるべく最小のコストで吸収できるような様々なノウハウやテクニックをもっているといわれる(Clark and Fujimoto, 1991, p. 236)。また下流メーカーの対応能力とともに注目されたのが上流と下流の緊密な情報交換である。オーバーラップを行うためには上流工程は早め早めに少しずつでも情報を下流に流し、どのような点で変更がおきそうなのかという情報を共有し、変更が起きたらすぐに対処するために情報のやりとりをしなければならない(Krishnan, Eppinger and Whitney, 1997)。こうした情報交換において日本企業は優れていた。それが、オーバーラッピング型開発プロセスを開発効率に結びつけることができた理由

であるといわれてきた。

ここでいう「オーバーラップ」とは実際の活動のオーバーラップであって、下流情報の単なる前だしとは異なる。開発初期段階から生産技術者や部品業者、金型業者、あるいは顧客が参加して、多面的な要件を早めに図面に反映させるといったやりかたもオーバーラップと呼ばれることがあるが、それは下流工程での資源コミットメントのタイミングを早めるような実際の開発作業自体の並行とは別のものと考えられる。

2.2 開発プロセス全体に渡る統合活動

日本の製造企業の製品開発プロセスの特徴として指摘されたことの2つ目は、開発上の統合作業を初期段階から始めて、それが開発プロセス全体を通じて継続されるという点であった。特に、そのための密接な機能横断的やりとりが注目された。

製品開発は、通常、分業された様々な活動の集合である。最終製品を生み出すには分業された活動をどこかの時点で統合しなければならない。例えば、飛行機の開発は、胴体、尾翼、主翼、油圧系、操縦系、空調など様々な部位開発に分けられるが、最終的に飛行機として首尾良く機能させるためにはそれらをどこかの時点で統合しなければならない。また飛行機開発は、製品概念設計、基本設計、詳細設計、強度解析、治工具設計、工程設計というように開発の流れに沿っても分業されており、それらの間で情報が正確に転写されるためにも統合活動が必要となってくる。さらに顧客のニーズを物理的製品として具現化するという意味では顧客ニーズの統合も必要になる (Clark and Fujimoto, 1991)。こうした統合活動を開発プロセスのどのタイミングでどの程度の頻度で行うかということが開発プロセスを特徴づける1つの次元となる (Eisenhardt and Tabrizi, 1995)。これを日本企業は開発の初期段階から部門を越えた直接的なやりとりを通じて行い、比較的あいまいな分業体制のもとで、開発プロセスを通じて継続的に反復しているといわれた。

例えば、開発の初期段階では、設計部門だけでなく生産技術部門や生産部

門、部品業者などが集まって下流工程で問題になりそうなことに関する情報を早めに取り込み、それを設計に反映させる。情報の前だしである。初期段階からの統合活動に関わる人々は部門横断的なチームを形成することもある。部門横断的なチームは各設計部門や機能部門からの代表者からなる場合が多く、それほど大きなチームではない。自動車のような大きなシステム製品の開発でもせいぜい十数人である。これら少数の人々が大まかな全体調整をした後、部門や組織の境界を越えた継続的なやりとりによる統合活動が開発プロセス全体を通じて行われる。こうした点で、最初になるべく詳細に計画を立ててタスクを明確に分割して、最後に一括して全体を統合するやり方をとりがちな伝統的な米国流の開発プロセスと対比して語られることが多かった (Imai, Nonaka, and Takeuchi, 1985)。

2.3 複雑性の柔軟な縮減：事前計画でなく事後的调整

3つめの特徴は、開発プロセスを通じて、製品コンセプトや製品設計が柔軟に変化するという点である。製品開発とは一面で、複雑性を縮減していく問題解決プロセスととらえることができるが (藤本, 1998), それが階層的に段階をおって行われるというよりむしろ市場変化に対応して柔軟に行われていることが指摘された。例えば、竹内・野中 (1985) は、パソコン、プリンタ、複写機、自動車、カメラの開発事例の観察をもとに、日本企業の開発プロセスの特徴を次のように記述している。

…トップが大まかな支持を与え、その枠内で、あるいはそこから少しはみ出しながら、販売、生産、開発の人員が相互に重複しながら製品開発を進めていく。この重複は、市場にできるだけ近いところまで含む形で行われるので、製品コンセプトとその実現が市場からのフィードバックに敏感に反応しやすくなっている。そこでは、各段階での多様性削減が厳密に行われるのではなくて、市場や生産の情報が入る度にあるいは増幅され、あるいは削減されるというフレキシブルなプロセスが見られ

る (p. 25)

つまり設計が固定化されていくプロセスが、明確にスケジュールされたフェーズによって管理されているのではなく、製造要件や市場ニーズの変化に臨機応変に対応して進められていた。製品の設計は顧客のニーズがはっきりしなければ最終的に決めることはできないという考え方のもとで設計変更は当然のこととして受け止められる。したがって、製品の詳細決定は開発プロセスの下流までもちこされる。例えば、自動車開発で開発プロセスの終わり頃になって、顧客ニーズの変更に対応してサスペンション形式を一変させるといったこともしばしばみられた。それは当然追加的に大きなコスト負担を強いることになるが、そのコストをうまく吸収できるような柔軟性をもっているといわれた。また、青島・福島(1997)はカシオ計算機によるデジタルカメラ QV-10 開発において、製品スペックが二転三転して最終的なスペックが固定されたのは量産段階に移行する直前であったことを記述している。

こうした方法は、明確なフェーズ管理のもとでステップごとに進捗状況を管理して、なるべく上流で設計を固定化しようとする米国流の開発プロセスと対比して語られた。

3 ボーイング 777 開発プロセス³⁾

この節では、3次元 CAD を全面的に活用したコンカレント・エンジニアリングの例としてボーイング社の 777 開発に焦点をあてる。1980 年代後半、ボーイング社は新しい旅客機を開発するにあたって従来の開発プロセスの全面的な見直しを行った。80 年代後半といえば日本の製造業の競争力が特に注目されていた時期であり、ボーイング社は新しい開発プロセスを確立する上で日本企業の開発方法から多くを学んだといわれる。実際、B777 開発がスタートする以前に、「Learn Japanese Way」という活動のもとで、ボーイング社の部長課クラスが日本の機体メーカー以外にも自動車や造船など日本の代表的企業を訪問していたことが報告されている(金丸, 1996)。また

新しい開発システムを研究する上での項目には「Japanese Way」という項目があり、生産技術者を日本の機体メーカーに派遣するなど、明確な意図をもって日本企業からの学習を行ったと思われる(田島, 1995)。さらに B777 開発がスタートする 1-2 年前には副社長クラスのマネジメントも日本の製造企業を訪問している。したがって、B777 開発で新たに採用された開発プロセスは、上述した「日本型」開発プロセスに通じるものがある。しかしいくつか重要な点で異なっている。それを明らかにするのが以下の記述の目的である。

3.1 開発プロセス革新の背景

B777 プロジェクトは、1990 年 10 月にユナイテッド航空から 34 機の発注を受けスタートした大型民間旅客機開発プロジェクトである。B777 は B767 と B747 の中間を埋める 350 席級の双発旅客機である。1980 年代後半、エアラインからは機体大型化の要求が強く出されていた。それに対し当初は既存の B767 をストレッチすることによって対応しようとしたが、ライバルであるエアバス社とダグラス社が 300 席超級の A300 や MD-11 の開発に着手していたこともあって、350 席クラスの新型機を白紙の状態から開発することを 1989 年に決定した、そして 1990 年に B777 開発プロジェクトが正式にスタートすることになった。このプロジェクトはボーイング社と日本企業との間の国際共同開発プロジェクトであり、日本からは三菱重工業、川崎重工業、富士重工業、日本飛行機、新明和工業の 5 社が開発と生産で参加した。日本企業の分担比率は開発・設計とも約 21% で、B777 開発にかかった総開発費約 5000 億円の内約 1000 億円を日本企業が負担している⁴⁾。各社の設計・生産分担は表 1 に示されている。日本企業各社から合計約 250 人の設計技術者もしくは生産技術者が基本設計の段階からシアトルに常駐し、後に説明するデザイン・ビルド・チーム(DBT)のメンバーとして設計活動を共同して行った。

B777 開発プロジェクトで注目すべき点は、前世代の B767 プロジェクト

表1 B777に参加した日本の機体メーカーとその分担比率

機体メーカー名	分担比率(日本企業の分担比率 21%を100とした場合の比率)*	分 担 領 域
三菱重工業	42.2%	後部胴体, 尾部胴体, 出入口ドア, バルク貨物ドア
川崎重工業	28.19%	前部胴体, 中央部胴体, 中胴下部構造, 貨物ドア, 圧力隔壁
富士重工業	19.15%	中央翼, 主脚ドア, 翼胴フェアリング
日本飛行機	5.66%	翼桁間リブ
新明和工業	4.8%	翼胴フェアリングパネル後半2/3, ドア部品

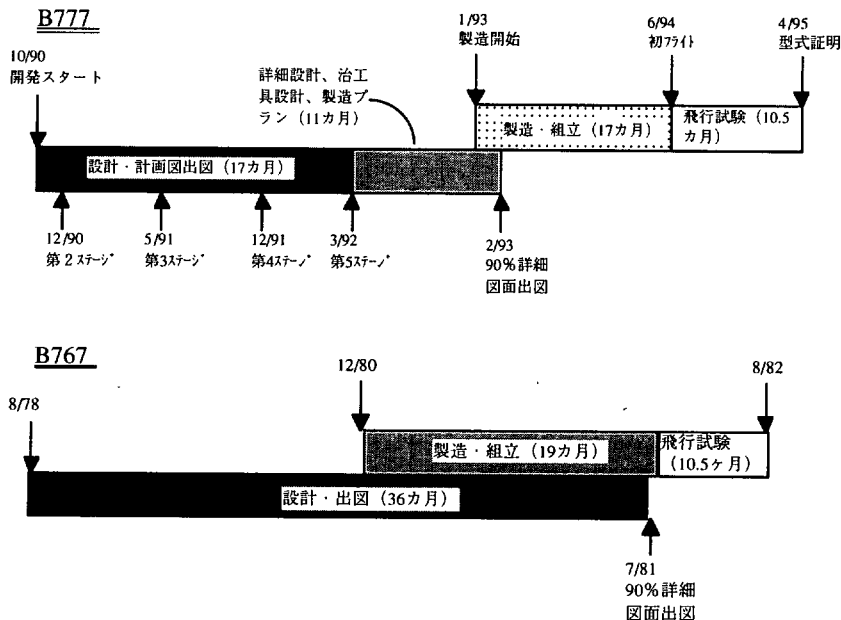
出所:『NIKKI MECHANICAL』, 1993年8月9日号 p.12~13の記述を参考に作成

注*: この数字は1993年時点の上記資料から推計したもので, 数字は時期により変動する。

とは全く異なる新しい開発手法を導入したことである。B777を開発するにあたってボーイングが新しい開発システムを導入した背景には、1980年代から始まる米国航空機業界における競争の激化があった。従来旅客機開発というのは機体メーカー主導で最高の性能を求めて開発を行いコスト積み上げに価格が決められていた。しかし、米国の航空業界が、1979年の航空自由化を転機に大小様々な航空会社を交えての過当競争の時代に突入すると同時に、航空機メーカー間の競争でも性能一辺倒から価格・コストが重要な要因になってきた。航空会社の要求に適切に応えるような機体を開発しないと生き残れなくなってきた。

そうした中でボーイングは過去の開発、特にB767開発のレビューを徹底して行った。そこでわかったことは開発・生産の労働コストの約半分が設計変更や設計エラーから生じているということであった。例えばB767開発では、ドアの設計だけで13,000件以上の設計変更や設計ミスがあったことがわかった(Sabbagh, 1996; p. 91)。特に開発プロセスの後半において起きる設計変更の開発コストや開発期間に対する影響は大きく、設計変更が多い

図1 B777 と B767 開発プロセスの流れ



出所：川崎重工工業資料と筆者ヒアリングより

ことは飛行機の初期品質にもマイナスの影響を与えていた。そこで設計変更もしくは設計エラーをいかになくすのが開発上の最重要課題となった。

設計変更は通常2つのルートから生じる(金丸, 1995)。第1は、部品間の干渉によって生じるものである。これは設計者のミスによるものが多い。3次元空間の中に多くの部品を複雑な形で押し込めるような設計を2次元の図面に落とし込むとなるとどうしてもミスは避けられない。第2のルートは、製造要件やニーズの変化、競合他社の動向にあわせて製造部門や顧客から出される事後的な要求に対応するために生じるものである。前者については、全ての部品を3次元データ化してコンピュータ上で仮想組立を行うことによって対処することになった。後者の問題については開発設計の初期段階から製造部門や生産技術部門、品質保証部、さらに顧客であるエアラインまでも

巻き込み、互いに意見を交わし、一緒になって開発を進めていくことが提案された。このように設計情報を3次元ソリッドモデルとして一元化すること、そして初期段階から各部門が一体となって開発を進めるという2つの要素がボーイングの新しい開発プロセスの中核にあり、それは Preferred Process と呼ばれた。

3.2 B777 開発プロセスの特徴

3.2.1 3次元ソリッドモデルへの設計情報の一元化と仮想組立

B777 の開発プロセスにおける第1の特徴は、25万点にも及ぶ部品全ての設計データが「CATIA」の3次元CADデータとして定義され一元管理されたことである。これはデジタル・プロダクト・デフィニション (DPD) と呼ばれた。その結果、コンピュータ上で仮想組立 (デジタル・プレアセンブリー : DPA) や解析が同じデータを用いて行うことができるようになりフルスケールのモックアップを全面的に廃止することに成功した⁵⁾。ボーイングはB777の設計チームに合計2,200台のコンピュータ端末を配布し、それらは全て8台のIBMのメインフレームコンピュータに接続されデータが共有された。B777開発に参加した日本の機体メーカー5社とボーイングとはコンピュータ・テクノロジー・インテグレイタ社 (本社名古屋) にあるホストコンピュータを介して設計データのやりとりを行っていた。日本の機体メーカーは自分たちの担当部位だけでなく、それに関連する部位の設計データにはいつでもアクセスできるようになっている。

3次元ソリッドモデルとしての設計情報の一元化は様々な効果をもたらした。まず設計情報をデジタル情報として一元化することによって、開発プロセスにおける情報の転写プロセスを極めて単純化した。図面ベースの従来の開発では、最終図面が出図された後、それをもとに一からNCプログラムを作成する必要があったし、治工具設計図面もあらためてつくらなければならなかった。しかし部品形状データが3次元デジタルデータとして定義されることによって直接的にNCプログラムや治工具設計ができるようになった。

さらに DPA は、設計エラーの多くを占める干渉問題の早期解決に役立った。設計データはオンラインで共有されるため設計者は毎日でも干渉のチェックを行うことができる。また後述するように、6つのステージでデザインを凍結して DPA による集中した干渉チェックを行い、設計エラーを後に持ち越さないようにしていた。

実際に最重要課題であった設計変更・設計エラーについては、設計者の誤認による図面変更回数が B767 のときと比べて約 30% 減少した。また、部品取り付け時の不整合が 70% 程度減少している。さらに、3次元 CAD データを直接利用することにより NC プログラミングにおけるミスが十分の一下になった⁶⁾。全体の開発リードタイムは B767 開発の場合よりも多少長くなったが⁷⁾、その分、計画図段階での精度は格段に高まったといわれる。図 1 は B767 と B777 の開発の流れを比較している。B777 開発では生産が始まる前に 90% の詳細設計図が出図されているのに対して、B767 では生産が始まった後も重複して長い間設計作業が続けられているのがわかる。B777 開発では製造要件などを盛り込んだ完成度の高い図面が早い内に出図されそれ以降の設計変更はほとんどなかったことを示している⁸⁾。

これらの直接的な効果とともに重要なことは、3次元 CAD による設計情報の一元化が、設計部門を越えた様々な部門との共同作業を可能にした点である。CATIA での設計結果は 3次元のビジュアル情報としてスクリーンに映し出される。2次元図面では内容を理解できなかった設計の素人であってもイメージを共有できる。以前には実際にモックアップをつくってみなければわからなかったような複雑な部品間の関係まで鮮明に映し出される。それによって設計の早い段階から、治工具設計や製造などの下流工程やカスタマーサービスの人々など様々な人々が一緒になって意見を言い合うことができるようになった。その意味で、次に説明する DBT や CPD といった開発プロセスの特徴は一面で 3次元 CAD の全面的導入によって支えられている。

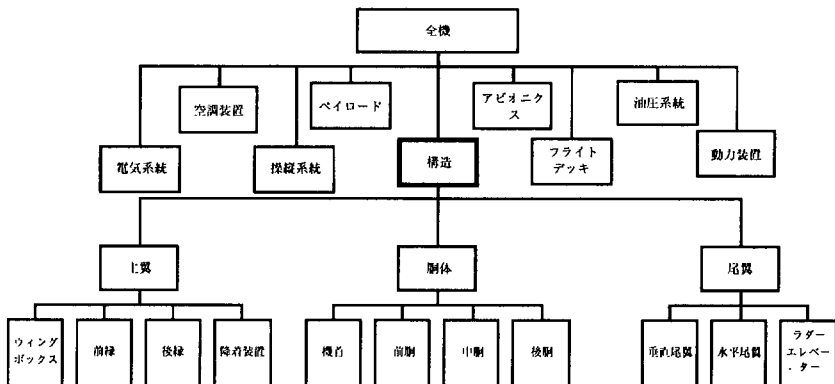
3.2.2 統合活動の前倒し、設計の同時並行化、厳密なフェーズ管理

B777 開発では開発プロセスの初期段階から、構造設計、装備設計、資材、生産技術、製造、品質保証、マーケティングなど様々な部門の人々が集まってチームを組んで、治工具設計や製造上の要件、品質保証、メンテナンスなど下流工程での要件も含めて総合的に検討してその結果を設計図面に反映させている。言い換えれば、設計と生産、構造設計と装備設計といった分業されたタスク間の統合活動が前倒しで行われている。こうしたチームはデザインビルドチーム (DBT: design build team) と呼ばれる。DBT には顧客であるエアラインが参加することもしばしばであり、顧客の要求が初期段階から直接設計に反映されることになった。DBT の背後にある思想は Working Together と呼ばれ、それは基本設計の段階から関連する全ての当事者を集め、対等な立場で、オープンな議論をして、一緒に問題解決を行おうという思想である。この思想のもと 8 つのエアラインが DBT に参加していた⁹⁾。

DBT は一種の機能横断的チームであるが、それが飛行機の部位ごとに形成されていることに大きな特徴がある。図 2 に示されるように DBT は、機首、後縁、水平尾翼、ウィングボックス、空調、油圧系統など飛行機の各部位別ごとに分かれている。これらの各部位はさらに細かく分解されてそれぞれが別々の DBT によって担当される。部位の構造的関係に即して DBT は階層的に管理されている。例えば、主翼の後縁 (トレイリング・エッジ) の部分だけでも 10 の DBT が組織された¹⁰⁾。その内の 1 つであるアウトボード・フラップ DBT にはカスタマーサービス、構造設計、工場、製造技術、治工具設計、材料、空力、品質保証、さらにフラップの製造を担当するイタリアの Alenia 社を含む 20 名が参加していた (Sabbagh, 1996)。各 DBT は同一オフィス内で顔をつきあわせながら一緒に仕事をする。DBT のサイズについては試行錯誤が繰り返されたが、次第にチームの単位が小さくなって、最大で約 240 の DBT が組織された。最終計画図 (部品の製造図や組立図を作成する前の段階の最終設計図) が出図されるまではほとんど全ての設計活動がシアトルに集まった DBT を通じて行われていたといえる。

DBT は部位ごと細かく分かれて組織されているため部位もしくは部品間

図2 デザインビルドチームの構成



出所：二井真治、『航空技術』No.489、9512、p.26

での設計の統合が問題になる。もちろん設計は全て3次元ソリッドモデルで定義されていて仮想組立が可能であるため、自分の設計と関連部分との設計の整合性はコンピュータ上で即座にチェックできる。しかし、各DBTはそれぞれ極めて自律的に運営されているため、相互の設計変更が際限なく続いて設計が無限に変化していく可能性がある。どこかでデザインを固定化しなければならない。この点についてB777開発では開発プロセスを6つのステージに分解してフェーズ管理を厳密に行うことによって対処している(Sabbagh, 1996; 中井1992)。6つのステージ内では各DBTは自由に設計活動を進める。しかし各ステージの終わりでは必ず全ての設計が一旦ストップする。これは凍結(freeze)と呼ばれる。その後数日は全てのDBTが各々の設計活動を中止し、DPAを利用して部位間の統合や干渉の問題に集中することになる。この間に干渉問題を解決するために、普段は顔を合わせない人々とのやりとりが行われる。そして干渉問題が全て解決されてインターフェース部分が固定化されると再び次の設計へと進んでいく。こうしたサイクルを5回繰り返すと最終の計画図が完成し、部品製造図などの詳細設計活動

のステージへと進む。既出の図1から、計画図作成段階で5つのステージがあることがわかるであろう。これらのステージを越えるごとに、DPAは比較的粗い段階からより精緻な段階へと進められていくようにスケジュールされていた。第5ステージが終了して最終計画図が出される段階では既にコンピュータ上で各部品の細部形状から組立位置まで定義され、干渉なく組み立てられ、各部品やシステムが計画された機能を発揮できることが確認される。そしてその後は部品の製造図の作成のための詳細設計や治工具設計、製造の詳細プラン作成へと以降する。DBTのメンバーとして日本側の機体メーカーから計画図作成のためにシアトルいた多くの人々がこの段階で日本に戻ってきて、詳細設計チームの中心となった。日本の工場での詳細設計には約400人の人々が参加した。

様々な部門の人々が初期から集まって最適設計を決めていくDBTは、従来シークエンシャルに行われていた設計作業を、同時並行的に行うことを可能にした。B777以前の開発では、まず構造設計の出図が行われ、その後に強度解析や装備設計が加味されていた。その結果、構造設計に変更が加えられ、改訂版があらためて出図される。一方製造プランも構造設計の出図後に始められ、詳細な製造プランを待って治工具の最終設計が行われる。製造プランは構造設計の改訂を受けて改訂され、さらに製造プランの改訂は治工具設計の改訂へとつながっていた。それに対してB777開発では、構造設計や装備設計などの設計部門から製造、資材、品質保証、それに顧客であるエアラインまでの関連する様々な部門がDBTとして一緒に最適な製品形態や生産方式を決定する。そのプロセスでは、構造設計、装備設計、強度解析、製造プラン、治工具設計などが同時並行的に検討される。こうしたやり方はCPD (Concurrent Product Definition) と呼ばれた。構造設計の計画図作成の早い段階から強度解析の結果が図面に反映され、装備設計とは常にインターフェースを保ち、製造プランや治工具プランは製造性を計画図に反映させながら進められる。最終計画図ができあがると、それをもとに詳細設計、治工具設計、製造の詳細プランが並行して進められ、最終的には詳細設計図、

治工具設計図、製造指示書など製造に必要な書類一式が同時に発行される。

4 「日本型」開発プロセスと B777 開発プロセスの相違

第2節では、「日本型」開発プロセスといわれたものの3つの特徴をまとめた。3つの特徴はそれぞれ、製品開発プロセスを特徴づける特定の次元に対応している。以下ではそれらの次元に沿って「日本型」開発プロセスと B777 開発プロセスを比較していこう。

第1の次元は開発ステージの時間的オーバーラップの度合いである。これは主に開発期間の短縮化と関わっている。例えば、製品設計と工程設計の各ステージの長さがそれぞれ変わらないのであれば両者を時間的にオーバーラップさせれば全体のリードタイムは短くなる。もちろん、オーバーラップによって下流工程は上流工程での設計変更によるリスクを負うことになる。このリスクに対して、上流工程と下流工程の間で密接な情報のやりとりを行ったり、設計変更に対する下流工程の吸収能力を高めたりして対応していたのが日本型プロセスの特徴であった。

B777 開発は一面でこうしたステージ・オーバーラップを極限まで押し進めているようにも見える。CPD では構造設計、強度計算、装備設計など異なる設計作業だけでなく、製造プランや治工具設計までの全部門が DBT を通じて密接にやりとりしながら同時並行的に作業を行う。最終的には詳細図面と治工具図面、製造指示書が同時に発行される。しかしながら、設計変更に対するリスクを下流工程が負うような形での時間的オーバーラップが行われているわけではない。前出の図1からわかるように設計ステージと製造ステージの時間的オーバーラップは B777 開発においてはむしろなくなっている。

確かに最終計画図が出図されるまでの間に、DBT での活動を通じて、治工具プランや製造プランの検討が並行して進められる。しかしこの段階では具体的に大きな資源コミットメントが発生しているわけではない。実際の治工具設計や製造の詳細プランは最終計画図が出図された後にスタートしてい

る。治工具設計では3次元設計データが直接利用される。最終計画図までには既に5段階のDPAが行われれば完全な干渉チェックが行われているしDBTを通じて製造上の要件も盛り込まれている。上流での設計活動が未だ不確実な状況で、下流活動がフライングスタートするといった意味でのオーバーラッピングは見られない。B777開発で特徴的なのは具体的な作業の時間的オーバーラップではなく、むしろ下流の製造上の情報が徹底して前倒しで検討され設計図面に反映されることにある。

2つ目の次元は、統合作業を開発プロセスのどのタイミングでどの程度の頻度で行うのかという次元である。日本型開発プロセスでは、小規模の機能横断的なやりとりによる全体的な調整・統合が初期段階から始められ、その後、開発プロセスを通じて自発的な部門間のやりとりによる継続的な調整・統合作業が行われる。この調整・統合能力の高さが最終製品の統合力(Integrity)を高めているといわれた。

それに対してB777開発プロセスでは、部門間にまたがるような調整・統合問題を開発の初期段階に前倒しして徹底的かつ体系的に解決している。3次元CADを利用すると、異なる設計部門、機能部門間での調整・統合が必要になるような問題が従来よりずっと早くに発見することができるようになる。この利点を十分に活かすような公式の仕組みをB777開発プロセスはもっていた。それがDBTと6つのステージごとのデザイン凍結である。飛行機のような大規模システムの統合問題を全てまとめて解決しようと思うと複雑すぎて到底対処できない。各DBTの規模が大きかった初期のころには混乱が多く無駄が目立ったというのがそれは容易に理解できる(金丸, 1995)。そこでボーイングはDBTを細かい部位ごとに分割した。全体デザインを事前に細かい部位に分解することによって、各チームが自律的に対処できるレベルにまで複雑性を削減しているわけである。各DBTは自律的な機能横断的チームとして物理的空間を共有する。このように体系化された公式の機能横断的チームは日本型開発プロセスではあまりみられないものである。部位ごとに分けられたDBT間の統合は、6つのステージの終わりごとのDPA

による集中的な干渉チェックによって行われる。もちろんこれができるためには各部位への分割方法が安定的であり、各部位を比較的独立なものとして考えることが可能である必要がある。飛行機のようにアーキテクチャーが安定している製品の場合にはその条件を満たしやすいということはあるだろう。

日本型開発プロセスで統合・調整活動が開発プロセスの下流にまで渡って行われていたのは、1つには、統合・調整問題を早期に発見できる3次元CADのようなツールがなかったからだと考えられる。結果として開発プロセスの後段階で調整するような柔軟な構造をもつことが要求された。統合・調整活動が下流にまで持ち越されたもう1つの理由は、設計図面に曖昧性が残されていたことにある。開発プロセス後半での部門横断的やりとりの多くは、情報の転写プロセスに関わっている場合が多い。2次元の設計図面では、例えば、家電製品の筐体のエッジの曲面の詳細形状を正確に表現するといったことは非常に難しい。したがって設計者はその部分を曖昧なまま残し、金型設計や製造の段階で金型設計者や金型メーカーとの調整によってその部分のイメージをすりあわせていくというようなことが行われていた。しかしながら設計情報が3次元ソリッドモデルとして定義されるとそういった曖昧な部分は全くなくなる。設計情報の解釈やすりあわせを目的としたやりとりは不要になる。設計情報を3次元デジタルデータとして一元化することの重要なインプリケーションは開発プロセスにおいて情報の転写を正確に行うための部門間のすりあわせ作業を不要にするということである。

統合作業のタイミングと関連して開発プロセスを特徴づける次元が、製品スペックや製品設計を計画に沿って早めに固定化するのか、それとも市場環境などの外部状況に合わせて柔軟に変化させるのかという次元である。日本型開発プロセスは後者の特徴をもつといわれた。そのために製品スペックや設計情報は製品の発売になるべく近いことまで持ち越される傾向にあった。それに対してB777の開発プロセスには、計画に沿って段階的にしかも早めに製品スペックを固定化していこうとする発想がある。もちろん、計画図作成段階におけるDBTを通じて、顧客の意見が反映され、設計の変更が柔軟

に行われるという側面はある。しかしそれも、6つのステージにわけたフェーズ管理によって段階的に固定される仕組みとなっている。基本設計の段階からエアラインの積極的な参加を促したのも、なるべく早くから顧客ニーズを把握して設計を安定化させようとする意図と関係している。こうしたことが可能になるのは飛行機という製品の特性とも関係している。飛行機は基本的に受注開発、受注生産であって、開発をスタートする段階では既に特定のエアラインに対しては納入が約束されている。その意味で顧客であるエアラインもリスクを負っているといえる。それゆえ、後段階になってから開発プロセスを混乱させるような無理な要求を出してくることは得策でない。初期段階できちっと要求を取り込んでおけば、その後は開発を根本から揺るがすような問題が顧客側から持ち込まれる可能性はそう高くない。したがって開発初期段階で製品スペックを固定化してもそれほど問題にならない。

以上の議論を B777 開発についてまとめると次のようになる。(1) 機能横断的なやりとりによる統合活動を重視して設計品質をつくり込むという思想は日本型開発プロセスの延長にある。(2) 上流での設計変更を前提として開発ステージを時間的にオーバーラップさせてリードタイムを短縮化するという特徴はみられない。(3) フェーズ管理に基づいて開発の上流で計画的に複雑性の削減をおこなうという点では伝統的な米国流の開発プロセスの流れにある。

3次元 CAD 技術がなかった頃には、上流で秩序だって階層的に問題解決を行う伝統的な米国流の発想は、機能部門間をバトンタッチするシークエンシャルな開発プロセスと馴染みが良かった。しかしそれが統合・調整問題における混乱を生み出す原因となっていた。ところが、3次元 CAD の出現は、機能横断的な活動による製品統合を重視するという日本型開発プロセスの発想と上流で秩序だって計画的に問題解決を行う米国流のやり方との両立を可能にした。こう解釈できる。

5 3次元統合CADシステムを核とした開発プロセスの日本型開発プロセスへの影響

前節までの議論を基礎として、最後に、3次元統合CADの進歩による製品開発プロセスの革新がいわゆる日本型開発プロセスの強みの源泉にどのような影響をもたらすのかを議論しよう。

まず、3次元CADによって設計情報がビジュアル化されると機能横断的、部門横断的やりとりの有効性が高まる。その意味では機能横断的やりとりを特徴とする日本型開発プロセスを経験していることは、一般に、3次元CADの導入による開発プロセスの変革に有利に働くといえる。しかしながら、統合・調整問題の早期発見という3次元統合CADの特徴がもっとも効果的に活かされるのは、開発初期段階で体系的に統合問題を解決するような機能横断的活動が行われる時である。したがって、開発初期段階での集中した統合調整を行えるような組織的しくみが必要になってくる(延岡, 1997)。単純に、開発初期段階から関連各部門の人々が全て集まって無秩序にやりとりをするとむしろ混乱を生み出すことになるかもしれない。特に飛行機に代表されるような複雑なシステム製品の場合はそうである。日本型開発プロセスでの機能横断的活動は自発的、ボトムアップ的に行われる傾向があったが、前倒しで集中して統合問題を解決するにはより計画されて秩序だった仕組みが必要になる可能性がある。B777開発では部位ごとに細かくわけたDBTが活用された。つまり小規模の機能横断的チームが対処できるレベルに問題を分解したわけである。しかしそこではどのように部位に分解するのが鍵となってくる。相互依存性が高い部位間を分割すると後の統合問題が難しくなる(von Hippel, 1990)。したがって、開発初期段階で徹底して統合問題を解決する上では、製品構造成なり製品アーキテクチャーを最初に把握することが必要になるといえるかもしれない。最初の段階における問題の構造化、デザインによる複雑性の縮減が重要になる。その意味で、曖昧な製品コンセプトからスタートして徐々に全体像をつくっていくような日本型開発プロセ

スの特徴は変革をせまられる可能性がある。

第2に、統合CADの本質は設計情報を一元化することであり、それは開発プロセスにおける情報の転写プロセス（例えば、設計図面、金型図面、解析モデル、治工具図面、NCデータ間での情報転写）を単純化、究極的には不要にすることにつながる。そのことは後工程における、設計と生産技術、部品メーカー、金型メーカーなどの間でのすりあわせ調整作業が不要になっていくことを意味する。日本型開発プロセスの強みの1つがこうした後工程における人間的なやりとりを通じたすりあわせや調整能力にあったとすると、その部分の相対的重要性は低下すると考えられる。また、統合活動の前倒しによって設計変更が大幅に減少すれば、下流工程での設計変更に対する吸収力のもつ意味も小さくならざるを得ないであろう。

さらに設計情報の一元化は究極的には既存の分業構造を崩す可能性をもっている（延岡，1997）。例えば、3次元CADの導入は外装デザイナーに対して肉厚までも含めたソリッドモデリングを要求している。また設計者自身も生産要件や金型要件を取りこんだ設計をすることができるようになるため、生産技術についても精通していかなければならなくなる。こうした動きは究極的には、例えば、デザイン、設計、金型設計、生産技術といった従来の分業構造が統合化される方向を示唆している。そうなると分業された機能部門間の密なやりとりによる調整・統合といった組織的能力は、様々なスキルを併せ持つ個人の能力によって代替される可能性がある。部門間、組織間の調整能力でなく、そうした個人を教育することへ努力を投入する必要性がでてくる。

最後に、3次元統合CADの能力を活かそうとする開発プロセスでは達成できないこと、むしろ犠牲になることとして、市場変化への柔軟な対応ということがあげられる。3次元CADをベースとした開発プロセスでは前倒しで問題解決を行うため、早い段階で製品スペックが固定化される傾向がある。また従来であれば製造段階で部分的に図面に手を入れて対応できた設計変更も、3次元ソリッドでデータが一元化されると、変更の度にソリッドモデル

をつくりかえなければならない。そうした点で後工程における顧客ニーズの変化に対する柔軟性は相対的に乏しくなる。この点で日本型開発プロセスのもっていた柔軟性がどのようにCADベースの開発プロセスに組み込まれるのかが、特に消費財の領域では競争上重要になるであろう。ただし、統合CADの導入によって開発リードタイムが大幅に短縮されるようになると、市場ニーズへの対応は1つの開発プロセスを通じて行われるのではなく、むしろ短いスパンでの製品導入を繰り返すことによって行われるようになるのかもしれない。

参考文献

- Baba, Y. and Nobeoka, K. (1998) "Towards Knowledge-based Product Development: the 3-D CAD Model of Knowledge Creation," *Research Policy*, 26, pp. 643-659.
- Clark, K. B., and T. Fujimoto (1991), *Product Development Performance: Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry*. Boston MA: HBS Press.
- Cusumano, M. A. and R. W. Selby. (1995). *Microsoft Secret: How the World's Most Powerful Software Company Create Technology, Shapes Markets, and Manage People*. New York: Free Press.
- Eisenhardt, K. M. and B. N. Tabrizi. (1995). "Accelerating Adaptive Processes: Product Innovation in the Global Computer Industry." *Administrative Science Quarterly*, 40: 84-110.
- Gomory, R. E. (1989), "From the Ladder of Science to the Product Development Cycle." *Harvard Business Review*, July-August.
- Hartley, J. R. (1992). *Concurrent Engineering*. Cambridge: Productivity Press
- Imai, K., I. Nonaka and H. Takeuchi. (1985). Managing the New Product Development Process: How Japanese Learn and Unlearn. In K. B. Clark, R. H. Hayes and C. Lorenz (Eds.), *The Uneasy Alliance: Managing the Productivity-Technology Dilemma* Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Krishnan, V., S. Eppinger, and D. Whitney (1997) "A Model-based Framework to Overlap Product Development Activities," *Management Science*, Vol. 43 No. 4.

- Sabbagh, K. (1996), *21st-Century Jet: The Making and Marketing of the Boeing 777*, Scriber, New York.
- Stalk, G. and T. H. Hout. 1990. *Competing Against Time: How Time-Based Competition is Reshaping Global Markets*. London: Free Press.
- von Hippel, E. (1990). "Task partitioning: An innovation process variable." *Research Policy*, 19: 407-418.
- Womack, J., D. Jones and D. Roos (1990), *The Machine that Changed the World*. New York: Rawson Associates.
- 青島矢一 (1997)「新製品開発プロセスにおける CAD 技術の影響：ボーイング 777 開発の事例から」『3 次元・デジタル技術が開発・生産に与える影響』第 5 章, (財)機械振興協会平成 9 年度報告書
- 金丸允昭 (1996)「ボーイング 777 の国際共同開発—よりよい開発プロセスの確立を目指して—」日本機械学会誌, Vol. 99, No. 932
- 航空技術編集部 (1993)「日本における B777 の製造」航空技術 1993. 11.
- 全日本空輸 (株) 整備本部「特集：ボーイング 777 (その 1)」航空技術 No. 489 [9512]
- 竹内弘高, 野中郁次郎 (1985)「製品開発プロセスのマネジメント」ビジネスレビュー, Vol. 32, No. 4
- 中井治夫 (1991)「B777 プロジェクトについて」機械振興, H3. 2.
- 中井治夫 (1992)「777 の動向」機械振興, H4. 2.
- 中井治夫 (1993)「開発の現状—777」機械振興, H5. 10.
- 中井治夫 (1994)「777 開発の状況」機械振興, H6. 11.
- 延岡健太郎 (1997)「新世代 CAD による製品開発の革新」国民経済雑誌, 第 176 巻第 6 号
- 延岡健太郎 (1997)「米国自動車企業の競争力向上における日本の経営手法の学習」神戸大学経済経営研究年報第 47 号
- 藤本隆宏 (1997)『生産システムの進化論』有斐閣
- 藤本隆宏 (1998)「フロントローディングによる能力開発競争：自動車製品開発の新展開」『ビジネスレビュー』No. 46. 1
- 二井真治 (1994)「DBT にもとづく成果報告」第 32 回飛行機シンポジウム, 日本航空宇宙学会
- 二井真治 (1995)「DBT 活動にもとづく成果報告」航空技術, No. 489 [9512]
- 日本航空 (株) 整備本部整備訓練部「特集：ボーイング 777 (その 1)」航空技術 No. 490 [9601]

- 門屋正臣(1997)「大型双発旅客機 B777 の開発」機械振興協会研究会用資料
- 林宏一(1994)「B777 開発におけるワーキング・トゥゲザー」第32回飛行機シンポジウム, 日本航空宇宙学会
- 山根里司, 小林勝之(1994)「777 製造部門における CATIA 活用事例」第32回飛行機シンポジウム, 日本航空宇宙学会
- 「4.4.3 コンカレントエンジニアリング」建築生産情報統合化ガイドブック, 日本建築学会編, 1995年
- 「Special Report: 生産コスト削減目指す B777」NIKKEI MECHANICAL, 1993. 8. 9.
- 「特集モノ作り維新: 組織を越えて知恵を結集」日経ビジネス 1993年9月20号

- 1) B777 の事例をとりあげるのは, それが25万点にも及ぶ部品からなる複雑な大規模システムである飛行機を, 3次元ソリッドモデラーによって完全にコンピュータ上で設計, 試作を行ったという意味で最も先進的な事例であるからである。
- 2) 80年代の調査は主として自動車や家電, OA 機器など一般に日本企業が競争力をもつアセンブリ製品に関して行われており, ここでまとめる特徴はこれらの産業や製品にみられた特徴である。その意味で「日本型」とくくってしまうことは誤解があるかもしれない。
- 3) 特に参照のない場合, 本節における記述は, Sabbagh (1996), 田島 (1995), 二井 (1995), 中井 (1991, 1992, 1993, 1994), 金丸 (1993), 『NIKKEI MECHANICAL』1993. 8. 9, 『航空技術』No. 489, 95. 12, 『航空技術』No. 464, 93. 11, (財)日本航空機開発協会常務理事門屋正臣氏による発表内容(1997. 1. 30, 1997. 12. 5)を総合的に参照しているものとする。また本記述は, 青島 (1997) の事例部分をベースにして加筆し修正したものである。
- 4) 『NIKKEI MECHANICAL』, 1993年8月9日号, p. 12.
- 5) ボーイングが CATIA を導入したのは1986年である。その後3次元データとして全てを設計することを決定すると同時に, ボーイングのコンピュータ・スタッフが CATIA のアドオンプログラムとして EPIC を開発してデジタルデータによる仮想組立 (DPA: digital pre-assembly) を可能にした (Sabbagh, 1996)。
- 6) (財)日本航空機開発協会常務理事門屋正臣氏の発表用資料より (1997年1月30日, 機械振興協会 経済研究所)。
- 7) これは後行程でのやり直しをなくすために開発の初期段階で徹底して時間をかけて図面の精度を高めたこと, それに加えて3次元ソリッドモデルで全ての部

品を設計したことが原因といわれている。全てを3次元ソリッドで設計することはボーイングでも初めての試みであり、2次元の世界に慣れ親しんだ設計者の適応力の問題やCADソフトの継続的改良による混乱等があった。

- 8) B777のその他の開発成果については青島(1997)を参照。
- 9) Working Together Airlineはローンチングカスタマーであったユナイテッド航空と全日空に加えてブリティッシュ・エアウェイズと日本航空など合計8社であった。

(一橋大学専任講師)