



航空機開発に必須のシステムインテグレーション実現のための方策に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-11-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岸, 信夫 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00017532

大阪府立大学博士論文

航空機開発に必須のシステムインテグレーション
実現のための方策に関する研究

2021年7月

岸 信夫

要 旨

数多くの旅客機を世に送り出したボーイング社の元技術者によれば、旅客機は人類が造りうるシステムの中でおそらく最も複雑なシステム製品であり、そのため極めて技術スキルが高く、経験、知識の豊富なエンジニアがそれぞれ必死に努力を続け、これに加えて技術開発全体がうまくマネジメントされることで、ようやく旅客機が完成できるとのことである。さらに旅客機の完成機事業の創出と持続可能な発展のためには、まず、旅客機そのものの技術開発、すなわちプロジェクトマネジメント、要求設定、設計、試作、試験・検証を計画通りに進めることが中心となる。これに加えて事業企画、営業、契約、リース、ファイナンス、量産製造、サプライチェーン・マネジメント、カスタマ・サポート等の完成機事業を構成する各分野を統合的にマネジメントするとともに、不確実性の高い、巨大リスク、巨大規模の完成機事業を統合的に推進していくことが必要となる。

航空機の開発プログラムに議論を絞ると、高い安全性を持つ大規模高度複雑システムのシステムインテグレーション、高度な要素技術探求と開発、プロジェクトマネジメント、開発組織の構築、開発プロセスの設定、人的資源計画の策定、型式証明の取得などに関する様々な課題を克服する必要がある。これらの開発プログラム上の課題および克服の方策について、現在までのところ、実際の航空機開発に適用できる航空宇宙工学分野での体系的な研究や、完成機事業の実績、経験に基づいた包括的な開発プロセスなどの提案は、著者の調査の範囲では見当たらない。そこで、著者の 39 年間にわたる国産戦闘機、国産ジェット旅客機、および新たな空の輸送手段として大いに期待される空飛ぶクルマ(eVTOL vehicle, 以後 eVTOL という)の開発実務で得られた経験、知識と、従来の工学分野、例えば、プロジェクトマネジメント、システム工学、経営工学、航空宇宙工学といった関連する多分野の文献調査、専門家との闊達な議論を通して、航空機開発のための知識の体系化の研究を包括的アプローチで進めている。

本論文では航空機の開発プログラムでの様々な課題と克服の方策の中で、極めて重要な役割を果たすと考えるシステムインテグレーション実現のための方策について提言する。まず初めに、旅客機完成機事業の特徴、旅客機の開発プログラムの特徴、課題を抽出し、航空機開発上の課題を明らかにする。システムインテグレーションは航空宇宙分野の関係者にはその概念、役割、重要性など広く理解されているが、その定義はあいまいな概念の理解にとどまり、従来明確にされてこなかったた

め、本論文であらためてシステムインテグレーションを明確に定義する。次にプロジェクトマネジメントの視点を取り入れた、システムインテグレーション実現のための開発組織について提案する。続いて、システムインテグレーション達成度の評価指標について提案する。これは、いわゆる暗黙知として継承されてきたシステムインテグレーションを形式知化する新たな試みである。また、開発を計画通り進めるためにその進捗度を測り、計画から遅れが生じた際は、その都度適宜対処することが重要であるが、このシステムインテグレーション達成度の評価指標は開発の進捗度を表す指標としても活用できる。次に、今後、新規に開発する航空機、例えば eVTOL に適用されることが大いに期待されるウォーターフォール型とアジャイル型を融合したハイブリッド型開発プロセス、それに適した開発組織設計、システムインテグレーション達成度の評価指標についての提案をまとめる。最後にシステムインテグレーション能力を取得する工学的アプローチを提案する。

Abstract

According to retired engineers of the Boeing who has delivered many commercial aircraft to the world, the commercial aircraft may be probably the most complex system products that human beings can build. The commercial aircraft can be completed finally through well managing the entire technology and the engineers with extremely high technical skills, experience and knowledge continue to make desperate efforts. In order to create aircraft original equipment manufacturer (OEM) business for commercial aircraft and to develop sustainably, the main focus is to develop the technology of the aircraft itself, namely project management, requirement setting, design, prototype, testing and verification as planned. In addition to this, it is necessary to integrate and manage each field that constitutes the aircraft OEM business such as business planning, sales, contract, leasing, finance, mass production, supply chain management, customer support, etc., and to practice system integration in a broad term to promote highly uncertainty, huge risk, and huge-scale OEM business.

When discussions are focused on aircraft development programs, it is necessary to overcome various problems related to system integration of large-scale advanced complex systems with high safety, advanced elemental technology exploration and development, project management, construction of development organization, development process setting, formulation of human resource plan, acquisition of type certification, etc. To date, systematic research in the field of aerospace engineering that can be applied to actual aircraft development, and proposals, standard development processes, etc. based on experience, such as results of aircraft OEM business are not found in the scope of the author's investigation. Therefore, through the author's 39 years of experience and knowledge acquired by developing domestic fighters, domestic commercial aircraft, and eVTOL (electric vertical take-off and landing) vehicle, which are greatly expected as a means of transporting new skies, and extensive literature research and discussion with experts in the field of conventional engineering, such as project management, systems engineering, management engineering, aerospace engineering, etc., the research of the systematization of knowledge for aircraft development is advanced by a comprehensive approach.

In this thesis, the author proposes measures for realizing system integration, which we consider to play an extremely important role in various problems and overcome measures in aircraft development programs. First of all, the features of the aircraft OEM business, and the characteristics and the problems of the development program of the commercial aircraft are

extracted, and the major challenges in the aircraft development are clarified. System integration is widely understood by aerospace field, but its definition is only an understanding of ambiguous concepts. Therefore, system integration is clearly defined again in this thesis. Next, development organization for realizing system integration from the viewpoint of project management is proposed. In Chapter four, an evaluation index of system integration maturity is proposed. This is a new attempt to formalize system integration explicitly, which has been inherited as so-called implicit information. In addition, it is important to measure the progress level in order to proceed with development as planned, and to deal with the delay from the plan as appropriate each time, then this evaluation index of the system integration maturity can also be used as an index to represent the progress of development. In Chapter five, the author summarizes proposals for hybrid development process that merges waterfall type and agile type, which is highly expected to be applied to newly developed aircraft, eVTOL vehicle, development organization design suitable for it, and evaluation index of system integration achievement. Finally, an engineering approach to acquire system integration capabilities is proposed.

目 次

要 旨.....	i
Abstract	iii
目 次.....	v
略 語.....	ix
第1章 序 論.....	1
第2章 航空機開発の課題.....	5
2.1 旅客機完成機事業の特徴.....	5
2.2 旅客機開発プログラムの特徴, 課題.....	6
2.2.1 プロジェクトマネジメント.....	6
2.2.2 技術開発.....	7
2.2.3 型式証明(Type Certification).....	8
2.3 まとめ.....	9
第3章 システムインテグレーションとその実現のための開発組織.....	11
3.1 システムインテグレーションとは何か?.....	11
3.1.1 システムインテグレーション実現のためにプロジェクトマネジメン トとシステムズエンジニアリングをどう活用するか?.....	13
3.1.2 なぜ航空宇宙分野ではシステムインテグレーションを殊更に最重要項目 として扱うのか?.....	14
3.1.3 モジュール型開発におけるシステムインテグレーションをどう進める か?.....	16
3.2 システムインテグレーション実現のための開発組織.....	17
3.2.1 開発組織の基本設計思想.....	17
3.2.2 日本での航空機開発組織の変遷の実際.....	18

3.2.3	開発組織の実例と組織設計の考え方の検証.....	25
3.2.4	サブプロジェクト方式を取り入れた開発組織.....	27
3.3	まとめ.....	29
第4章	システムインテグレーションの達成度指標の提案と評価.....	31
4.1	システムインテグレーション達成度の評価.....	32
4.2	評価指数の新たな提案.....	35
4.3	SIMLの簡易評価と考察.....	39
4.4	まとめ.....	42
第5章	アジャイル開発に適応する開発プロセス，およびシステムインテグレーション達成度の評価指標.....	45
5.1	旅客機とeVTOLの開発プログラムの比較.....	45
5.2	旅客機とeVTOLの開発プロセスの違い.....	48
5.3	ウォーターフォール型開発とアジャイル型開発.....	49
5.3.1	ウォーターフォール型開発について.....	49
5.3.2	アジャイル型開発について.....	50
5.4	ハイブリッド型開発.....	51
5.5	ハイブリッド型開発のシステムインテグレーション達成度について.....	53
5.6	まとめ.....	55
第6章	システムインテグレーション能力を取得するための教育，および研究アプローチ.....	57
6.1	システムインテグレーション能力を取得するための工学教育.....	58
6.2	新たな教育・研究の工学的アプローチ - 安全性解析手法.....	60
6.3	新たな教育・研究の工学的アプローチ - 実開発作業への学生の参画（長期インターンシップ）.....	62

6.4	まとめ.....	6 2
第7章	結 論.....	6 5
参 考 文 献	6 9
謝 辞	7 3
論文の基礎となる発表論文	7 5

略 語

AEHF: Advanced Extremely High Frequency

AMS: Air Management System

ASA: Aircraft Safety Assessment

CCA: Common Cause Analysis

CDR: Critical Design Review

CMA: Common Mode Analysis

CONOPS: CONcept of OPERATIONs

CRLs: Capability Readiness Levels

CS: Customer Support

DOD: Department Of Defense

EME: Electromagnetic Effect

eVTOL: electric Vertical Take-off and Landing

FAR: Federal Aviation Regulation

FHA: Functional Hazard Assessment

FMEA: Failure Modes and Effect Analysis

FMES: Failure Modes and Effect Summary

FTA: Fault Tree Analysis

GPS: Global Positioning System

GPS OCX: Global Positioning System Operational Control System

IMM: Integration Maturity Metrix

IPT: Integrated Product Team:

IRL: Integration Readiness Level

JMS: JSpOC (Joint Space Operations Center) Mission System

MOT: Management Of Technology

MRL: Manufacturing Readiness Level

MUOS: Mobile User Objective System

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NPOESS: The National Polar Orbiting Operational Environmental Satellite System

OJT: On the Job Training

PDR: Preliminary Design Review

PMBOK: Project Management Body of Knowledge

QA: Quality Assurance

RAA: Responsibility Authority Accountability

SCM: Supply Chain Management

SBSS: Space Based Space Surveillance

SIML: System Integration Maturity Level

SRL: System Readiness Level

STPA: System-Theoretic Process Analysis

STAMP: Systems Theoretic Accident Model and Processes

TC: Type Certification

TIA: Type Inspection Authorization

TRL: Technology Readiness Level

VTOL: Vertical Take-Off and Landing

V&V: Validation & Verification

WBS: Work Breakdown Structure

第1章 序 論

国産ジェット旅客機 SPACEJET M90(旧 MRJ90)は日本における約 50 年ぶりの旅客機開発であり，航空機設計上の課題，多様な国籍や経験を持つ技術者や研究者の人材マネジメント上の課題，プロジェクトマネジメントに不可欠な業務プロセスと大規模開発試験設備，試験上の課題，認証取得上の課題，サプライヤとの共同開発といった主要な課題を克服しつつ，機体の安全性を担保する国の型式証明を取得するための手続きなどに限った最小限の体制となるものの，2021 年以降の初納入を目指し，今も開発努力を続けている [1-3]．これらの様々の課題，およびその対応について，従来，わが国では航空宇宙工学分野での体系的な研究や，旅客機の完成機事業の開発実績に基づき企業がまとめた実務的，包括的な開発のプロセスといったものは見当たらない．

一方，欧米では数多くの旅客機開発の実績があり，各企業ではそれぞれの経験に基づき標準的なプロセスとして整理され，継承されていると考えられる．また，これらの開発に対しての事象研究も数多く報告されている [4]．そこで，日本の航空機の完成機事業を確固たるものにするためには，防衛省機，国産ジェット旅客機や空飛ぶクルマの開発経験に基づいた，旅客機を含む航空機開発の包括的な開発プロセスの設定を目標に航空宇宙工学のみならず，新たに多分野を統合して，研究を進めていく必要がある．本研究は開発実務経験者からの実際の開発業務に関する聴取，分析，および総合と評価，ならびにプロジェクトマネジメント学，システム工学，経営工学，航空宇宙工学といった関連する多分野の文献調査，専門家との闊達な議論を通して，航空機開発のための知識の体系化を目指している．

本論文はこれら体系的研究の成果として，航空機完成機事業に必須のシステムインテグレーション実現のための方策を提案する．これは航空機開発の包括的な開発プロセス設定の資となる．また，システムインテグレーション実現のための方策の研究は，従来の経済学や経営学的視点から捉えた技術経営(Management Of Technology: MOT)にモノづくりという航空宇宙工学の視点を加えた新たな総合的，包括的なMOT研究となるとともに，他の工業分野への適用も視野に入れた新たな工学的研究としても極めて重要である．

第2章では航空機開発上の重要課題を明らかにするために，旅客機をその研究対象として取り上げ，技術開発，事業企画，営業，契約，リース，ファイナンス，量産製造，サプライチェーン・マネジメント，カスタマ・サポート，等の各分野を鳥瞰

した旅客機完成機事業の特徴についてまとめる。次に旅客機の開発プログラムに焦点を当てて、開発上の特徴、課題について、国産ジェット旅客機 SPACEJET M90(旧 MRJ90)の開発経験をもとに、開発を推進するプロジェクトマネジメント、大規模高度複雑システムのシステムインテグレーション、要素技術の発掘と新規開発、大規模開発試験設備の建設、および高い安全性基準を満足させるための型式証明の観点で抽出する。

第2章で抽出された航空機開発上の課題について、個々の課題について対応することが必要であり、それぞれ大変な取り組みとなるが、第3章以下では特に航空機の技術開発上の課題の克服のために極めて重要な役割を果たし、航空機開発に関連するすべての技術活動を統合化するために必須であるシステムインテグレーション実現のための方策として、開発組織の設計、達成度評価指標の導入、および今後の航空機開発に適用する開発プロセスについて検討、提案していくこととする。

第3章ではまず初めに従来明確ではなかったシステムインテグレーションについて、プロジェクトマネジメントおよびシステムズエンジニアリングの観点からシステムインテグレーションについての考察を示し、定義する。航空宇宙工学分野で最重要とされるシステムインテグレーションであるが、狩猟社会、農耕社会、工業社会に続く、今後の情報社会はモジュール構造型の産業組織を前提とするネットワーク経済性を追求すると言われている[5]。そこで、インテグレーション型開発を標榜する航空宇宙産業はこの問題に対し、どう対応すべきかについて述べる。次にシステムインテグレーションを実現するために必要となる開発組織にプロジェクトマネジメントの視点を取り入れた新しい開発組織形態を提案する。

第4章では日本における航空機開発の実績、経験を踏まえたシステムインテグレーション達成度の評価指標を新たに提案する。これは、いわゆる暗黙知として継承されてきたシステムインテグレーションを形式知化する新たな試みである。また、開発を計画通り進めるためにその進捗度を測り、計画から遅れが生じた際は、その都度適宜対処することが重要であるが、このシステムインテグレーション達成度の評価指標は開発の進捗度を表す指標としても活用できる。技術開発の各段階で、目標に対する達成度を評価し、必要な場合は計画変更を行い、次の段階に進む必要があるが、その達成度評価に本指標を用いることができる。続いて、プロジェクトマネジメントの視点を取り入れた、システムインテグレーション実現のための開発組織について提案する。

第5章では第4章までに述べた大規模高度複雑システムの旅客機と対比する形で、今後の新たな航空機開発たとえば、eVTOL vehicle (以後eVTOLという)の開発に活用されることが大いに期待される開発方式について、それに適応する開発プロセスと

して、ウォーターフォール型とアジャイル型を融合したハイブリッド型開発方式を提案する。更にハイブリッド型開発方式に適用可能なシステムインテグレーション達成度の評価指標を提案する。

第6章では大規模複雑システムの代表である旅客機と、今後の新たな航空機開発、たとえば、全電気航空機、eVTOLなども視野に入れたシステムインテグレーションの能力取得のための工学教育、および研究アプローチについてまとめる。

第7章では本研究の結論と今後の課題をまとめる。

第2章 航空機開発の課題

本章では航空機開発上の課題を明らかにするために、人類が構築できる最も複雑なシステム製品と言われている旅客機をその研究対象として取り上げ、航空機そのものの技術開発、事業企画、営業、契約、リース、ファイナンス、量産製造、サプライチェーン・マネジメント、カスタマ・サポート、等の各分野を鳥瞰した完成機事業の特徴についてまとめる。次に旅客機の開発プログラム上の特徴、課題についてまとめる。

2.1 旅客機完成機事業の特徴

航空機産業が次世代産業として期待されていることは一般的によく知られており、極限環境での安全性確保、高い革新性、高い経営リスク、政策的支援、グローバル産業、開発遅延につながる高い基準の安全性認証がその特徴とされている[6]。また航空機産業は単独の事業として完了するのではなく、エアラインにおける運航や整備などを含めた継続的長期的な事業であり、駅伝に例えられる[7]。

著者は37年にわたり国産の戦闘機、旅客機などの航空機の開発実務に携わってきた。その経験から、航空機はシステムインテグレーションが必須の大規模高度複雑度システムであると認識している。また旅客機の完成機事業は企画、営業契約、プロジェクト、設計、試験から構成される開発、製造、サプライチェーンから構成される量産、カスタマ・サポート、リース、ファイナンス等の各分野を統合的にマネジメントするとともに不確実性の高い、巨大リスク、巨大規模の総合力事業を統合的に推進していくことが必要となる。

旅客機の完成機事業は巨額の投資、長期の回収期間を要し、景気等の周辺環境に左右される、ハイリスク・ローリターン・ビジネスである。一方、東京大学大学院航空宇宙工学専攻の航空宇宙工学の理念に掲げられている「他分野へスピンオフできる最先端技術を創生する航空宇宙工学」[8]に見られるように、旅客機への高度な要求、高い安全性基準に対応するために必須のシステムインテグレーション、高度な要素技術開発、開発手法を一度獲得すると、それは他産業への技術波及、イノベーター的な産業発展へも寄与できることが知られている。

2.2 旅客機開発プログラムの特徴, 課題

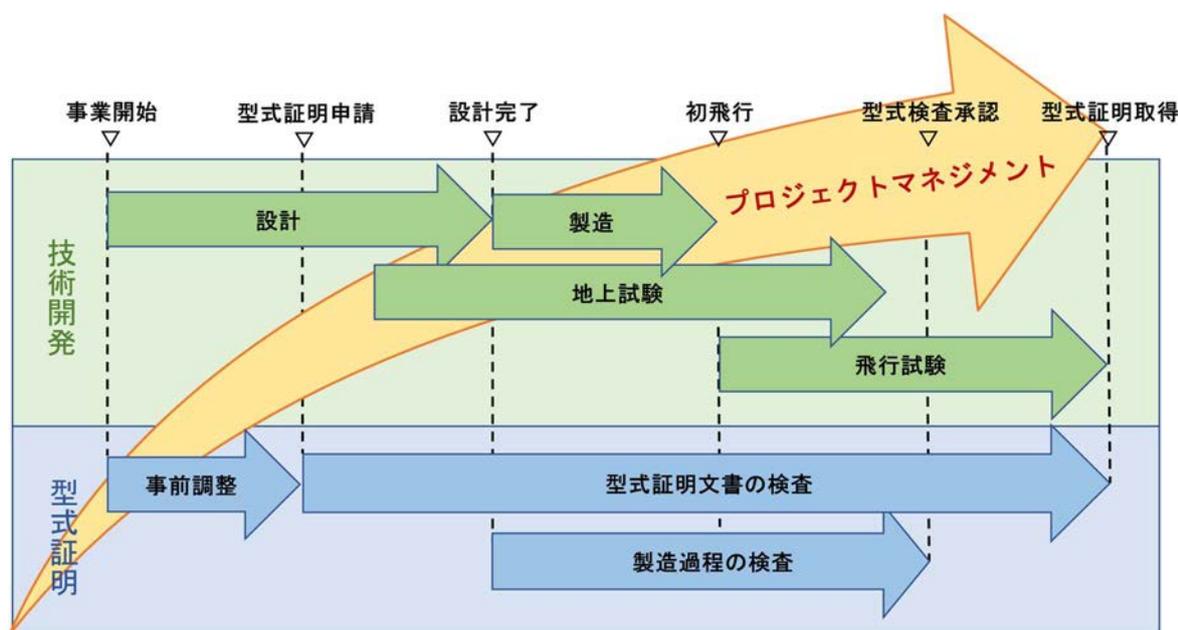
旅客機の開発プログラムの特徴, 課題は大きく分けて, プロジェクトマネジメント), 技術開発および型式証明がある. これらの関係を第 1 図に示す. 旅客機の開発プログラムは, 開発の主要な出来事を計画通り完了できるように技術開発と型式証明の活動が歩調を合わせ, 統合的に進められて行くように管理される. この管理活動がプロジェクトマネジメントである.

以下で, プロジェクトマネジメント, 技術開発および型式証明について順に明らかにする. まず初めに, プロジェクトマネジメントには以下 2 点がある.

2.2.1 プロジェクトマネジメント

開発人員が 1000 人を超え, かつ多国籍, 異文化の人員からなる, 巨大規模の旅客機開発チームのプロジェクトマネジメントは, F-2 戦闘機開発の 330 人規模の日米二カ国での戦闘機開発チーム[9]でのマネジメントとは大きく異なる. そのプロジェクトマネジメントの特徴は以下の 2 点と考えている.

- ① 経験に裏打ちされた開発プロジェクトマネジメント
- ② 多国籍異文化をベースとするプロジェクトマネジメント



第 1 図 旅客機の開発プログラムの進め方

これらの特徴への対処すべき課題は以下の通りである。

まず①の経験に裏打ちされた開発プロジェクトマネジメントに対しては

- PMBOK (Project Management Body of Knowledge)手法[10]の導入
- Integrated Product Team(IPT)マトリクス組織[11]の採用
- 意思決定プロセスの標準化

次の②の多国籍異文化をベースとするプロジェクトマネジメントに対しては、

- グローバルな流動人材の活用のための、組織・風土、異文化交流プロセス、設計外注プロセスの構築
- 開発知見の組織内蓄積と情報管理（データ、文書）
- 標準化された実証済みの汎用ツールの活用
- 研究，設計，工作，営業，契約，Customer Support(CS)，Supply Chain Management(SCM)，Quality Assurance(QA) 部門の人材採用と育成，および産官学人材交流

2.2.2 技術開発

ボーイング社の元技術者からのヒアリングによれば、旅客機は人類が造りうるシステムの中でおそらく最も複雑なシステムでとのことであり、またスキルの高い、経験豊富なエンジニアがそれぞれ必死に努力をし、これに加えてエンジニア全体がうまくマネジメントされることで、ようやく旅客機が完成できるものとのことである。旅客機の技術開発の特徴、課題は以下の通りである。

① 大規模高度複雑システムのインテグレーション

- 設計と要素技術（空気力学、性能、飛行特性、荷重、構造、飛行制御、装備、アビオニクス、エンジン、ソフトウェア、安全性・整備性・信頼性など）、設計の妥当性確認と検証(Validation and Verification : V&V)[12]、各種検証・試験（システム試験、ソフトウェア統合試験、環境試験、構造試験、全機機能試験、飛行試験など）の大規模高度複雑技術のシステムインテグレーションの実現

② 要素技術の発掘と新規開発

- オープン・イノベティブ、カスタマ・オリエンティッドな新要素技術の発掘

の仕組みの確立と開発の実践，システムインテグレーション

- ▶ 技術成熟度レベル(Technology Readiness Level :TRL)[13]を用いた新要素技術の成熟度評価とリスク評価，産官学の適切な研究開発分担

③ 大規模開発試験設備建設と有効活用

- ▶ 風洞試験設備（低速，遷音速，超音速，高レイノズル数など），エンジン試験設備（地上試験，高空模擬試験），装備品試験設備，耐雷試験設備，非常着水試験設備，環境試験設備，電磁干渉試験設備，高速度コンピュータの建設，既存設備の有効活用
- ▶ 各種設計および要素技術に対応する実証済みの汎用解析ツールの導入

2.2.3 型式証明(Type Certification)

2017年1月23日に，国産ジェット旅客機 SPACEJET M90 (MRJ90)の納期は2020年半ばと発表されている．これは通算5回の納期変更である．主に型式証明取得上の問題があったことがその理由と報道されている．三菱航空機は現在も「型式証明取得上の課題」に取り組んでいる[1]．型式証明とは航空機の型式の設計，航空機の製造過程及び完成後の現状について，安全性，騒音及び発動機排出物に関する基準に適合することを国土交通大臣が証明することである．また，型式証明取得のためには，安全性検証，開発保証プロセスにより設計の妥当性を確認する必要がある．型式証明取得と必要な検査に合格することで耐空性証明が取得でき，航空機の運航が開始できる．ここで，参考文献[14]を参考に安全性検証，開発保証，耐空性を定義する．安全性検証はリスクが許容される状態を工学的判断に基づいて評価すること，開発保証とは要求，設計，実装におけるエラーが特定され，修正され，システムに適用される証明基準を満たすことを十分なレベルの信頼性で立証するために用いられる計画的かつ体系的なすべての行動，耐空性とは意図された機能を達成するために安全な方法で動作する航空機，サブシステム，または部品の状態である．

これらの項目に約50年ぶりの旅客機開発での経験不足との観点も合わせて，伊藤他[1]が試験上の課題，型式証明取得上の課題について指摘しているが，これらから「型式証明取得」の課題への対処は以下の4点と考えている．

- ① 各基準の理解と設計の確定
- ② 開発経験に基づく検討対象の合理的絞り込みと設計の確定
- ③ 研究開発に係る実証済みの設備，および設計支援ツール，ならびに型式証明用ツ

④ 型式証明活動と技術開発を統合するシステムインテグレーション

2.3 まとめ

航空機産業は極限環境での安全性確保，高い革新性，高い経営リスク，政策的支援，グローバル産業，開発遅延につながる高い基準の安全性認証がその特徴とされる．本章では航空機開発上の課題を明らかにするために，旅客機完成機事業をその研究対象として取り上げた．旅客機の完成機事業は巨額の投資，長期の回収期間を要し，景気等の周辺環境に左右される，ハイリスク・ローリターン・ビジネスである一方，技術開発手法を一度獲得すると，それは他産業への技術波及，イノベーションな産業発展へも寄与できる．旅客機の開発プログラムの特徴，課題は，1点目が開発を推進するプロジェクトマネジメント，2点目が技術開発として大規模高度複雑システムのシステムインテグレーション，要素技術の発掘と新規開発，大規模開発試験設備の建設と有効活用，3点目が高い安全性基準を満足させるための型式証明，安全性証明，開発保証，耐空性がある．これらへ個々に対応していくことが極めて重要である．旅客機の開発プログラム上の課題と対応の中で特徴的であり，航空機開発において関連するすべての技術活動を統合化するために，極めて重要になるのは大規模高度複雑システムのシステムインテグレーションの実践である．次章以降で，システムインテグレーション実現のための方策として，開発組織の設計，達成度評価指標の導入，および今後の航空機開発に適用する開発プロセスについて検討，提案していくこととする．

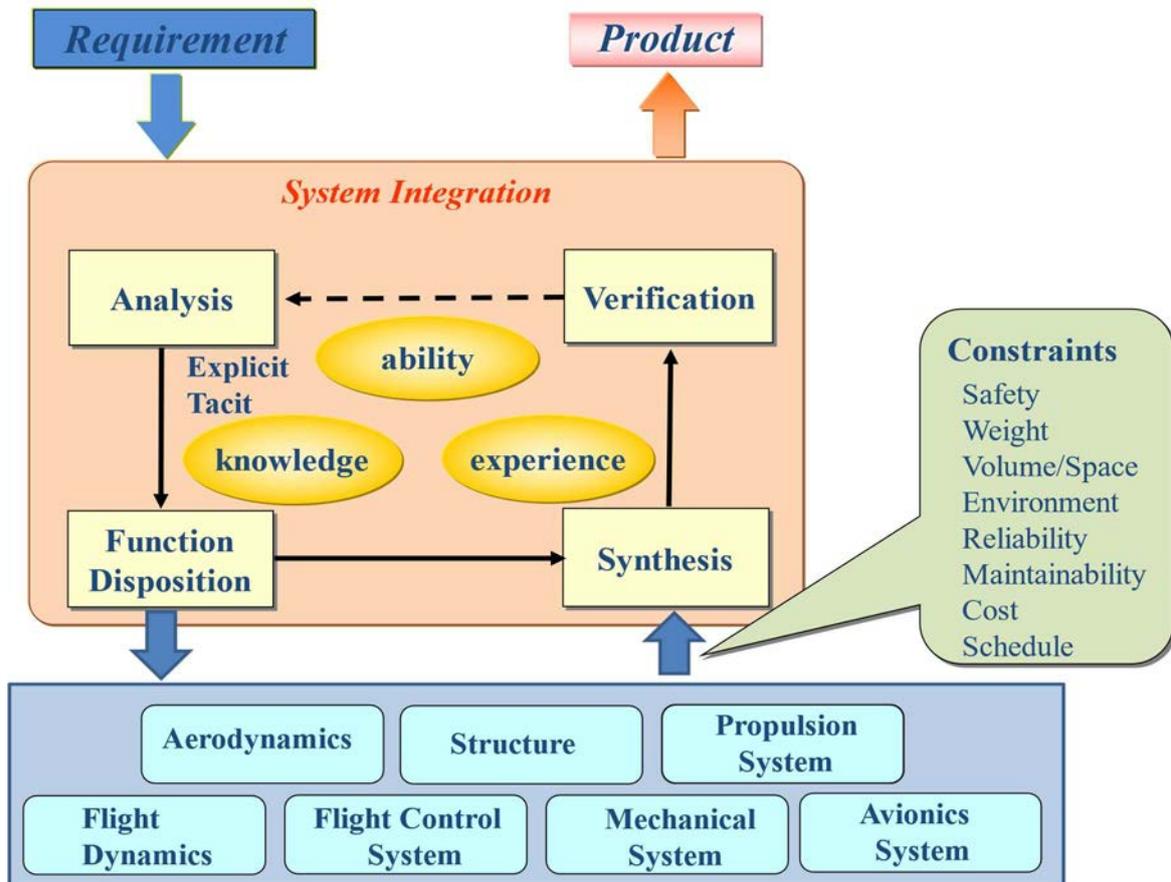
第3章 システムインテグレーションとその実現のための開発組織

本章では、旅客機の技術開発上の課題と対応の中で特徴的であり、航空機開発において極めて重要になるシステムインテグレーションの定義とその実現の方策として開発組織について述べる。従来の研究では、システムインテグレーションについてプロジェクトマネジメントの観点から説明しているものは見当たらない。また、(株)三菱航空機の航空機開発エンジニアによれば、日常は特段にシステムインテグレーションを意識せずに開発実務を行っているとのことである。一般論として、プロジェクトマネジメント、およびシステムズエンジニアリングについての関係性について述べられた文献として、[13,15,16]がある。しかしシステムインテグレーション、プロジェクトマネジメント、およびシステムズエンジニアリングの三者の関係を明示したものは見当たらない。

そこで、まず初めにプロジェクトマネジメント、およびシステムズエンジニアリングの観点からシステムインテグレーションについての考察を示す。次に、システムインテグレーション実現の方策として開発組織の設計について提案する。

3.1 システムインテグレーションとは何か？

システムインテグレーションは航空宇宙分野の関係者にはその概念、役割、重要性などが広く理解されているが、例えばプロジェクトマネジメントについて、システムズエンジニアリングの文献、図書などでは、明確にその定義や方法論を示したものは、著者が調べた範囲では見当たらない。そこで、あらためてシステムインテグレーションとは何かについて考察を進める。従来から言われているシステムインテグレーションとは、システムへの要求を満足するために、まず要求を分解して各要素に割り当て、次にその要素をシステムとして適切に統合化することである。この活動はシステムズエンジニアリング[13]の初期の段階から継続的に行われるという一般的な説明[17]がある。一方、著者の戦闘機、旅客機の開発経験に基づくシステムインテグレーションの実際の活動は以下の通りと考えている。第2図にシステムインテグレーションの概念を示す。システムインテグレーションとは、能力、形式知と暗黙知および経験を駆使しながら、顧客要求の分析、ハードウェアおよびソフトウェアの機能配分を含めたシステムの構成要素への機能配分を行い、以下に示す



第2図 システムインテグレーションの概念

種々の制約条件をクリアし、構成要素、すなわちコンポーネントや要素技術を有機的に統合して、小システムから大システムを構築し、段階的に検証を進め、システム全体として要求を満たす製品を創り上げるための、繰り返しの一連の擦り合わせ、分析と統合の活動である。

すなわち、従来システムインテグレーションの説明は簡略な概念を示すことに留まっていたが、本論文では、実開発で直面する制約条件の解消、システム全体として要求を満たす製品を創り上げることを強調し、システムインテグレーションのプロセスをより具現化したものと定義する。

ここで言う制約条件は、例えば、第2図の右に示した安全性、重量、容積/空間、環境、コスト、スケジュール、信頼性、整備性である。統合される構成要素は、第2図の下に示した空力、飛行力学、構造、飛行制御、推進、装備システム、アビオニクスシステム等から成る。簡単に言えば、システムインテグレーションは、各コンポーネントを「磨き、ブレンドし、適合させる」擦り合わせ作業である。擦り合わ

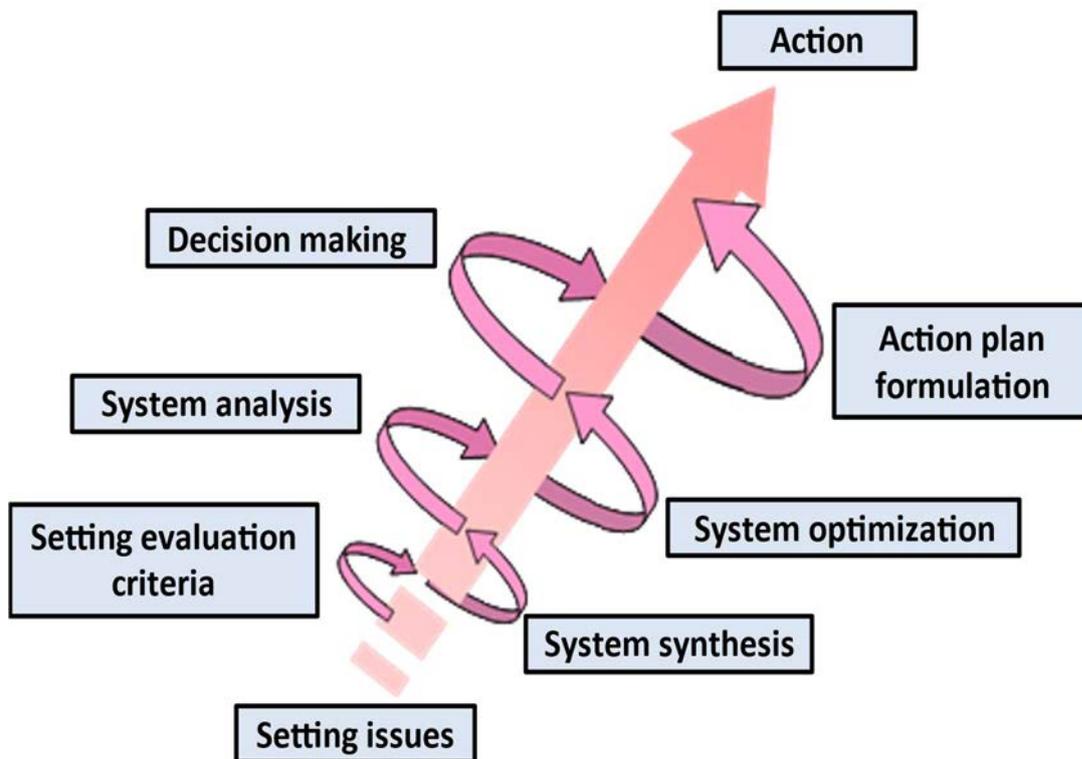
せは、サブシステム間や、組織間の質の高いコミュニケーションを通じた情報交換と情報共有、討論検討、意思決定により達成される。コミュニケーションの具体的な方策は、その目的に応じた各階層の垂直的、水平的な会議体系、すなわち、目的、日程、出席者を定め実行することである。航空機開発分野におけるシステムインテグレーションは多分野統合最適設計（Multidisciplinary Design Optimization）である。以下に、機体全体統合、システム統合、ソフトウェア、人間工学、安全性などに関する、システムインテグレーションのいくつかの例をあげる。

- ① 機体形状・機体内コンポーネント配置の最適化（Aircraft Shape & Inside Components Arrangement）
- ② 航空機とエンジンの適合性（Aircraft and Engine Compatibility）
- ③ エンジン性能の最適化（Engine Performance Optimization）
- ④ ソフトウェアの統合（Software Integration）
- ⑤ 飛行制御・アビオニクス統合システムの設計（Integrated Flight Control and Avionics System）
- ⑥ 動力供給システムの設計（Power Generation System）
- ⑦ 熱管理システムの設計（Thermal Management System）
- ⑧ ヒューマンファクターの設計（Human Factors）
- ⑨ 安全性の設計、検証（Safety Assessment）

3.1.1 システムインテグレーション実現のためにプロジェクトマネジメントとシステムズエンジニアリングをどう活用するか？

プロジェクトの目標が「民間航空機の開発を完了する」ことである場合、システムインテグレーションとは、開発プロセスそのものである。システムインテグレーションの実現とは、言い換えれば、目標達成のための組織設計、人材、各種業務プロセスの設定などを、プロジェクトマネジメントのさまざまな手法を用いて管理、統制することである。

第3図は、システムインテグレーション実現のための具体的なプロセスであり、課題設定、評価基準設定、システム合成、システム分析、システム最適化、意思決定、アクションプラン策定、アクションというスパイラル型のプロセスである。これは、まさにシステムズエンジニアリングにおける課題解決のためのプロセスである[18]。ここで改めてプログラムマネジメントとプロジェクトマネジメントを定義する。大

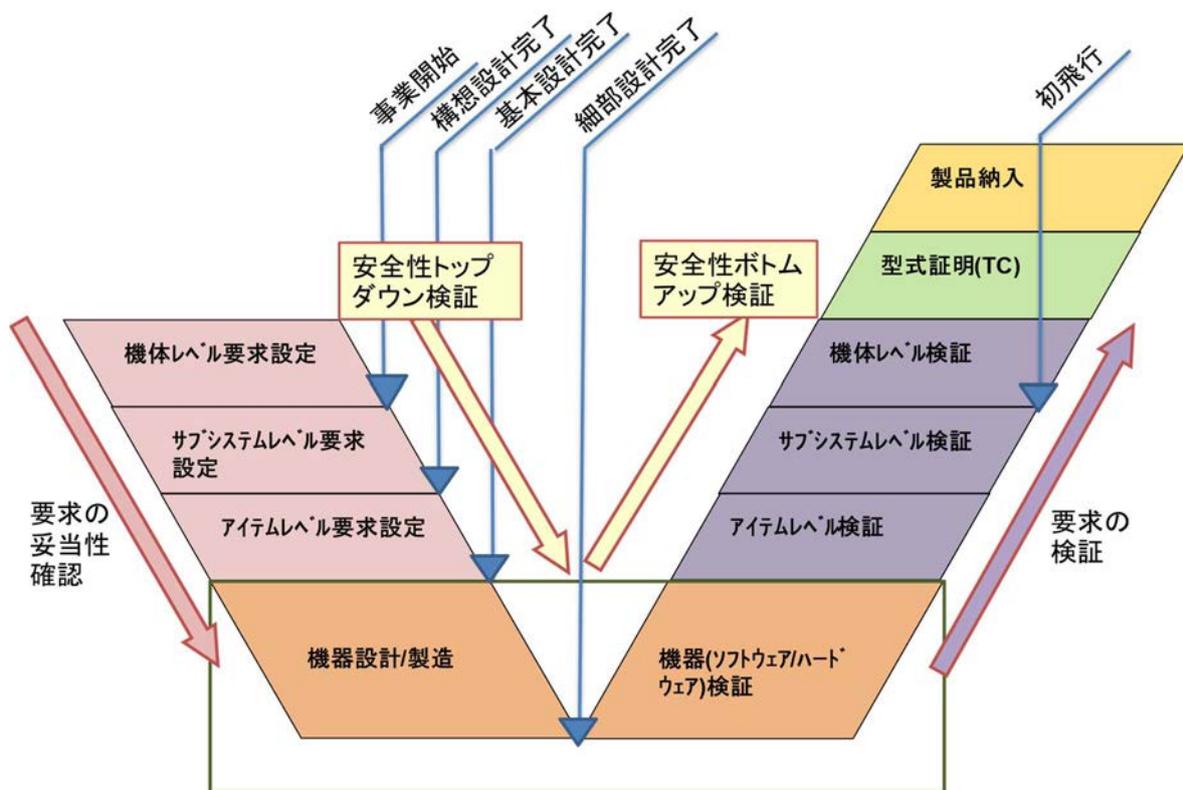


第3図 システムインテグレーションのスパイラルプロセス

規模で事業全体にかかわる、多層的なプロジェクトのインテグレーションは、「プログラムマネジメント」によって実現する。開発、製造、カスタマ・サポートなどの各分野のインテグレーションは「プロジェクトマネジメント」によって実現する。

3.1.2 なぜ航空宇宙分野ではシステムインテグレーションを殊更に最重要項目として扱うのか？

以下では前述の旅客機の技術開発上の課題の中で特徴的であり、また、航空宇宙工学分野で特に重要視されるシステムインテグレーションについて論を進めることとする。東京大学大学院航空宇宙工学専攻の航空宇宙工学の理念に「システム統合化技術の象徴としての航空宇宙工学」として、「航空宇宙の世界では、多分野の工学および理学を統合し、一つの目的を達成するシステムとして組み上げていく技術が特に強く要求されている」[8]とあり、これが一般的な理解であろう。著者の経験した戦



第4図 開発保証プロセスと安全性検証

闘機開発と旅客機開発の比較を念頭にすると、大規模高度複雑システムである旅客機の開発での際立った特徴としては、高い安全性基準（ 10^{-9} 件/飛行時間以下）の達成、型式証明の認証工程の困難さ複雑さへの対応、長期の開発期間/運用期間中の周辺環境の変化とそれらに対する対応といった不確実性への対処があげられる。

SAEのARP4754A[14]に示されるValidation & Verificationに沿った開発保証プロセスと安全性検証の概略を第4図に示す。設計と検証のスパイラルな繰返しの開発保証プロセスおよび、6.2節で際しく述べる安全性検証により、個々のサブシステムの機能、性能を組み合わせ、擦り合わせることでシステム全体として要求を満足させ、商品として旅客機を完成させることが求められる。ここで、これこそ旅客機開発といったシステムインテグレーションの必然性であり、最重要項目として取り扱われる理由である。これは単にサブシステム、モジュールを結合するだけでは完成機開発は達成不可能であることを意味している。

3.1.3 モジュール型開発におけるシステムインテグレーションをどう進めるか？

航空宇宙工学分野で最重要とされるシステムインテグレーションであるが、参考文献[5]によれば、狩猟社会，農耕社会，工業社会に続く，今後の情報社会はモジュール構造型の産業組織を前提とするネットワーク経済性を追求する．それではシステムインテグレーション型産業を標榜する航空宇宙産業はこの問題に対しどう対応すべきか，以下に検討する．

システムインテグレーション型産業とこれと対照的なモジュール型産業の違いについて多くの議論があるが，ここでは特に航空宇宙製品の開発に焦点を当てて議論する．基本的な理解は以下の通りである．モジュール型開発では，個々に最適化された要素（サブシステム）の集合が全体システムとなり，全体性能の要求を満足するが，全体性能は最適化されない．一方，インテグレーション型開発では，部分最適された要素を集合させたとしても全体として統合できず，また全体性能要求も満足させることはできないといったシステム，概して大規模，複雑，多階層システムに対し，全体システムの要求を満足させかつ，最適とするために，要素の統合化，調和の活動を実施するものである．

モジュール型開発のメリットとしては，以下の3点がある．1点目にモジュールごとに独立した開発が可能であり，モジュールごとの進化が製品の進化に直結する．そして製品完成後も，モジュールを改善することで全体システムの性能向上，機能拡張が可能である．2点目は，モジュールを組み合わせることで顧客ニーズに合わせた製品を実現でき，顧客要求の多様化に低コストで対応可能である．3点目はモジュールごとの分業による低コスト化が期待でき，インターフェイス調整の膨大かつ密接な擦り合わせが不要ということである．これに対し，モジュール型開発のデメリットとしては以下の3点がある．1点目は最適インターフェイスとならず，全体最適とならない，また冗長な部分が残る，全体最適とはならない．2点目としては既存のインターフェイスを変えにくく，インターフェイスを変更すると既存のモジュールの利用が不可となり，コスト，納期への影響が大きくなる．3点目としては，大規模複雑系システムでの安全性設計，検証が難しいことが挙げられる．旅客機開発ではこれが一番の問題である．インテグレーション型開発と比較して，モジュール内に未検証箇所が残る，安全性証明上の抜け穴ができることがあると考えられる．

次に，**Business to Business**の旅客機完成機事業はモジュール型開発へ移行できるのかという点で議論する．代表的な **Business to Customer** 製品である自動車，パソコン，スマートフォンおよび旅客機の納入出荷実績[19-22]の比較を第1表に示す．納入・

第1表 製品の納入・出荷実績

	自動車	パソコン	スマートフォン	旅客機
納入・出荷	約1億台 (2017年)	約3億台 (2017年)	約15億台 (2018年)	約2000機 (2018年)

出荷実績に圧倒的な差があることが分かる。

これからもわかる通り、旅客機は中量産品（量産品と受注品の中間）であり、エアライン毎の個別要求、安全性基準の高度化への対応が求められる。最終製品及びシステムレベルのモジュール化、標準化に限界があり、完全なモジュール型開発への移行ができない製品と考える。一方でモジュール開発型への完全移行は困難であるものの、自動車産業に見られるような、モジュール型開発を織込んだインテグレーション型開発へ移行していくことは必然と予想される。また開発プロセス、一部の装備品、部品単位でのモジュール化、標準化は志向されていく。開発プロセスのモジュール化とは、たとえば、システムインテグレーション、意思決定プロセスなどの暗黙知の形式知化、設計最適化ツール、安全性解析ツールなどの高度化、標準化を意図している。

3.2 システムインテグレーション実現のための開発組織

本節ではシステムインテグレーションを実現するための開発組織について、プロジェクトマネジメントの視点から検討を行う。まず、組織の基本設計概念を提案する。次に、我が国の航空機開発組織の変遷とその概念を比較検証する。

3.2.1 開発組織の基本設計思想

組織設計のため、まず初めにシステムインテグレーションの対象である旅客機開発のための組織全体の規模を把握する。そこで、航空機開発の全体規模を以下と定義する。

- ① 機体規模×プログラム属性（多義性×拡張性×複雑性×不確実性）[17]
- ② 機体規模は空虚重量，最大速度など，航空機の代表的性能諸元データから決定
- ③ プログラム属性の各要素は旅客機の場合，以下を考慮

- 多義性：多数のステークホルダへの対応，プログラムの成功基準の多様化
- 拡張性：シリーズ機の連続開発，継続的な商品性向上
- 複雑性：機体開発と同時の型式証明活動，カスタマ・サポート体制の構築
- 確実性：運航期間が長く，大きな外部環境変化

(株) 三菱重工業の技術者によれば，機体規模が大きくなると，図面規模が大きくなり，図面作成の設計ファンクション組織，およびそれを管理するプロジェクト組織の規模が大きくなる。

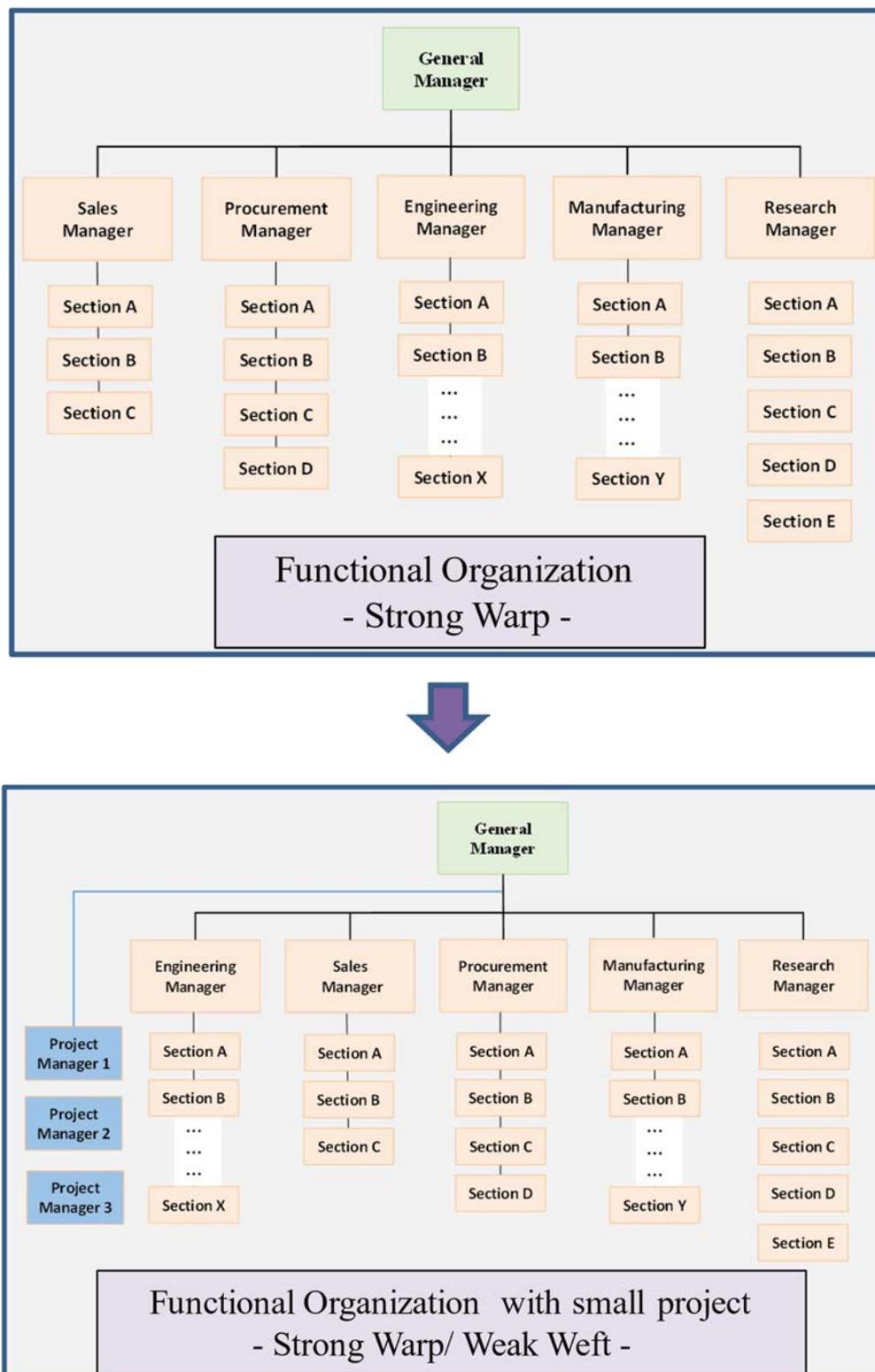
すでに述べたとおり，旅客機の場合，プログラム属性を構成する多義性，拡張性，複雑性，不確実性は，それぞれが大きい。これにより，ファンクション組織間，およびサブシステム間の，情報交換と情報共有の量の増大，情報レベルの高品質化により，システムインテグレーションの規模が大きくなる。全体システム（航空機全体）の開発組織は，機体規模と相関のあるファンクション組織（縦系組織）と，プロジェクト組織（横系組織），およびプログラム属性と相関のある擦り合わせ，統合化のためのシステムインテグレーション組織（横系組織）から構成される。全体システムの開発組織の規模が増大すると，システムインテグレーションを実現するための組織の規模は莫大となり，これをマネジメントするためには強い縦系横系マトリックス組織を導入する必要性が生ずる。なお，開発組織の人員の増加は開発コストの直接的な増加につながる。強い縦系横系マトリックス組織を導入にあたっては，目的を満たすよう人員の規模を適切に見積もる必要がある。

3.2.2 日本での航空機開発組織の変遷の実際

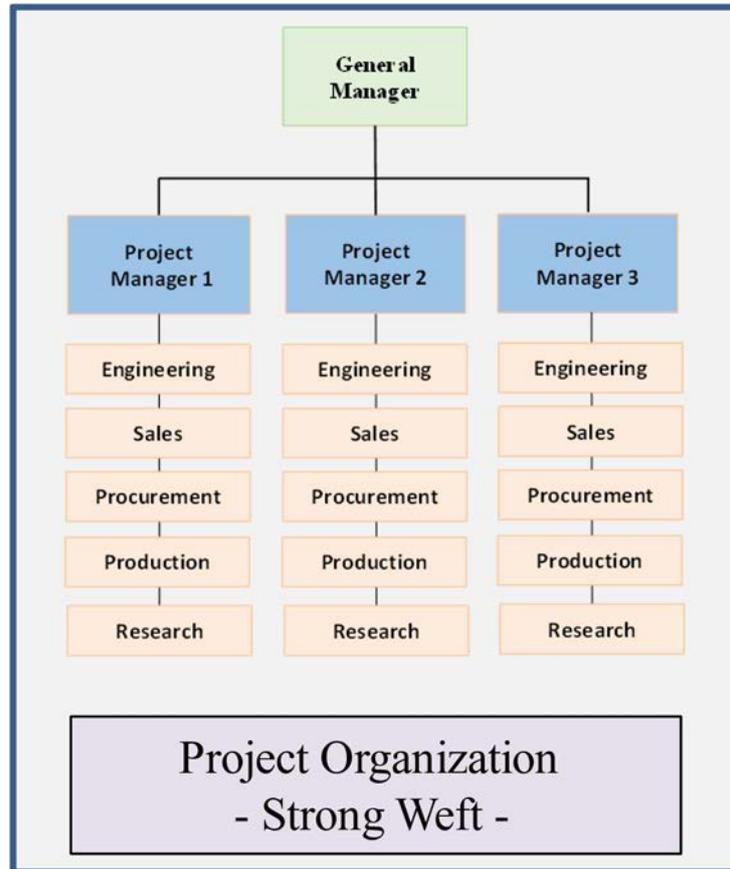
Hecker 他[23]が説明したプロジェクトマネジメント組織の変遷を元に，著者が作成した第5図は日本における航空機開発組織の典型的な変遷例を示している。開発組織はファンクション組織と，プロジェクト組織およびシステムインテグレーション組織の組み合わせと従来考えられてきた。赤枠の Integrated Product Team (IPT)マトリックス組織は旅客機開発のような大規模開発に適した組織である。

最初の組織図は部長の下での強い縦系のファンクション組織で，横系のプロジェクト組織がない。第2の組織は，強い縦系のファンクション組織でありながら，弱い横系のプロジェクト組織で，特定の業務を管理，促進する補完的な役割を担う組織である。第3の組織は強い横系のプロジェクト組織のみで，縦系のファンクション組織はない。最後の組織は強い縦系と強い横系のバランスがとれたIPTマトリックス組織である。青色の矢印はIPTリーダーが縦系の機能組織をマネージするイメージを示し

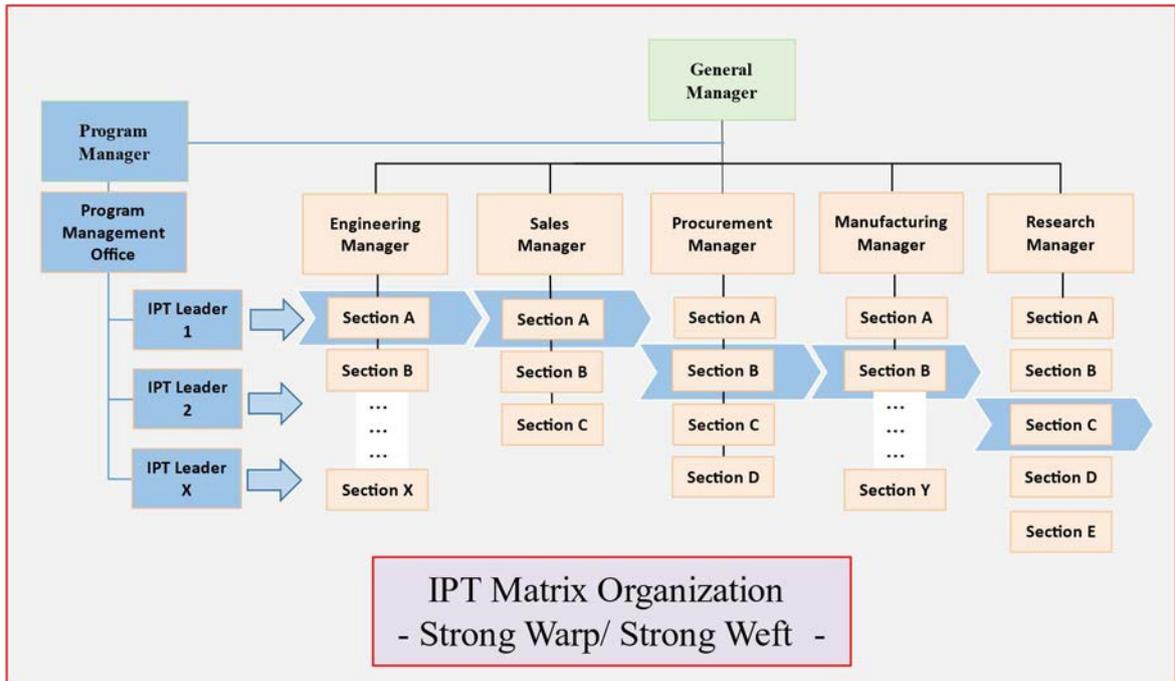
ている。これらの組織変遷は航空機開発の規模が年代とともに大きくなってきたことへの対応と考えられるが、開発の規模、状況に応じて、組織が選択されることもありうる。



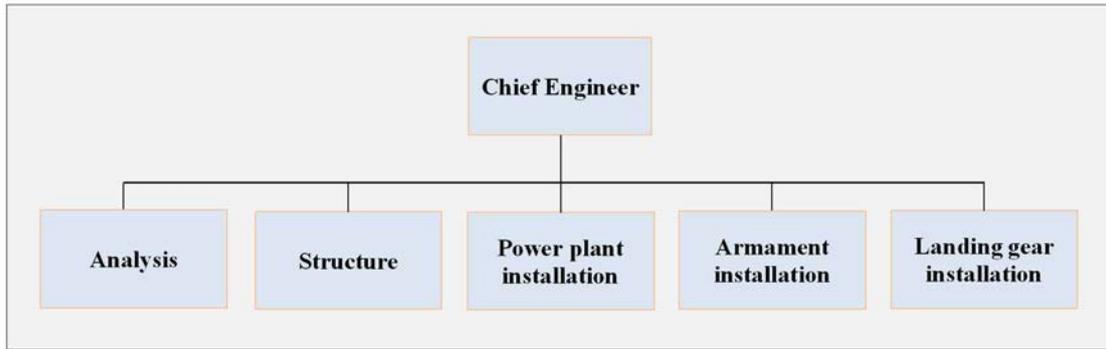
第 5 図 航空機開発組織の変遷(1/3)



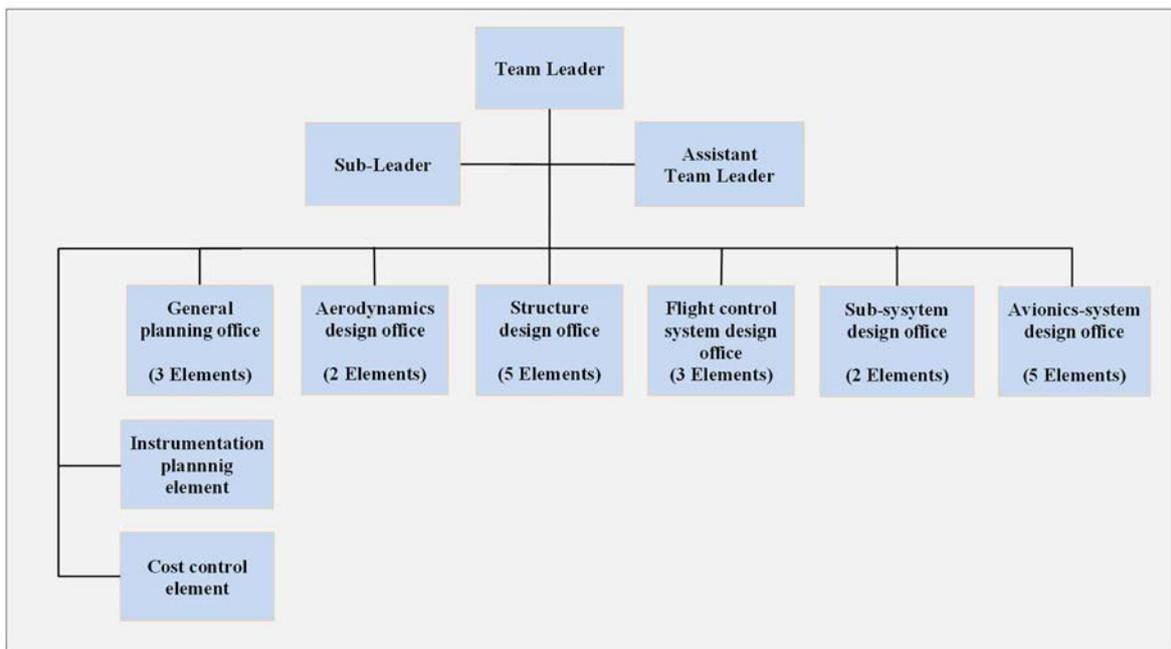
第 5 図 航空機開発組織の変遷(2/3)



第 5 図 航空機開発組織の変遷(3/3)



第 6 図 零式戦闘機の開発組織(1938 年 1 月当時)



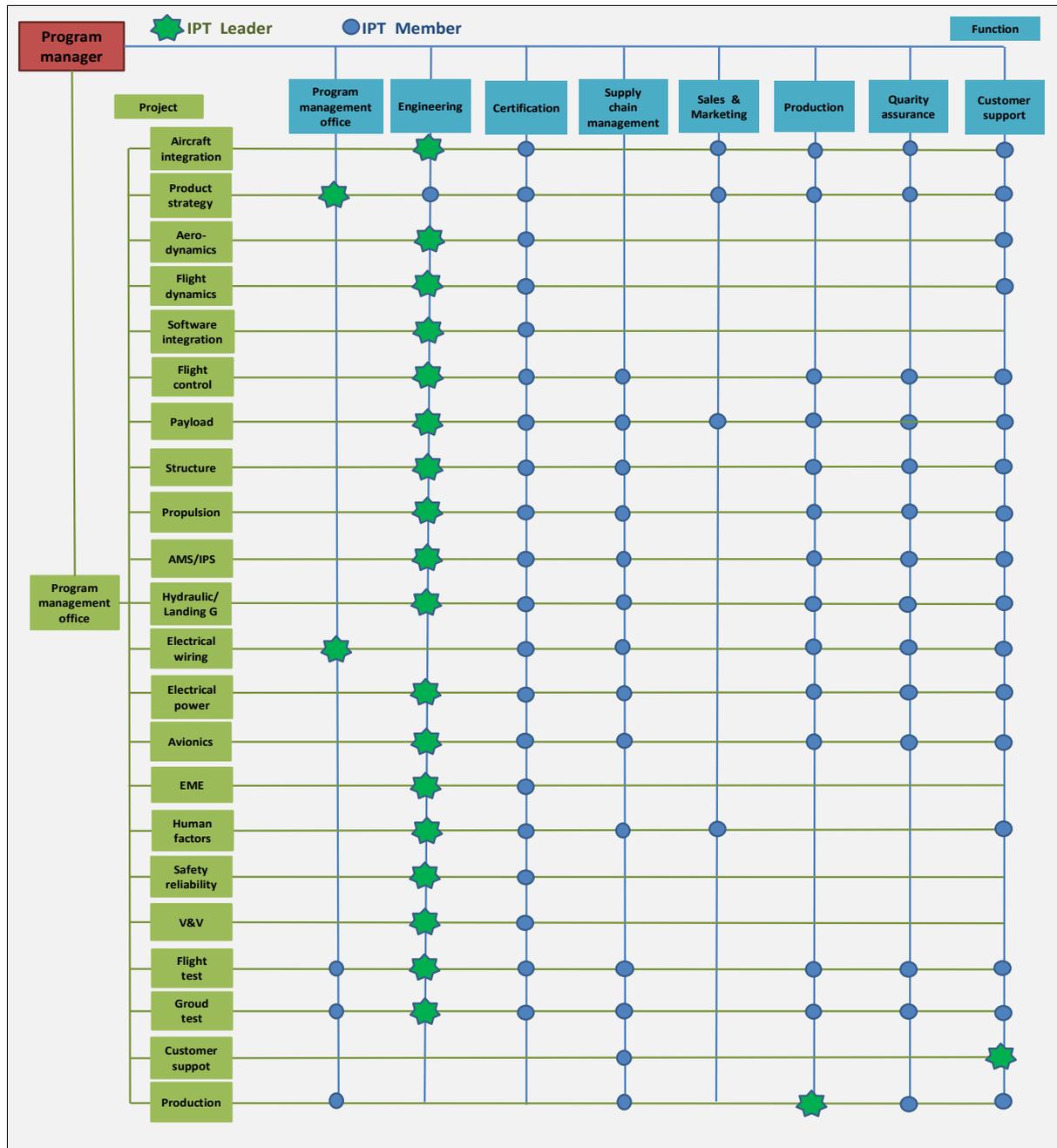
第 7 図 F-2 戦闘機の開発組織 (1992 年 6 月時点)

本項の残りの部分では、航空機開発の全体的な組織の変遷と、日本での事例を紹介する。零式戦闘機の開発チームは、柳田[24]を元に著者が作成した第6図に示す通り、29人からなるファンクション組織を一人の設計主務者が束ねていた。プロジェクトおよびシステムインテグレーションの組織はない。次期支援戦闘機F-2の開発チームは、神田[9]を参考に著者が作成した第7図に示す通り、チームリーダー、サブリーダー、チームリーダー補佐の下、強い縦糸に相当する各ファンクション組織と、それを管理する弱い横糸に相当するプロジェクト組織「全般計画室」の約330人で構成されていた。システムインテグレーションはチームリーダーおよび補佐、および各ファンクションでの活動で行われていたと考えられる。実際上はプロジェクト運営を容易にするために、機能組織のメンバが、プロジェクト組織の一部を兼業し、プロジェクト業務を実施したと推測される。

最近の航空宇宙産業、防衛産業での開発チームではプログラマネージャの下、ファンクション組織とプロジェクトおよびシステムインテグレーションの組織から構成される強い縦糸横糸マトリックス組織として、IPTが採用されている[25-26]。プログラムレベルのシステムインテグレーションはプログラマネージャが、プロジェクトレベルのシステムインテグレーションは各IPTリーダーが担っている。プログラマネージャおよびIPTリーダーは、組織内のキーパーソンである。IPTマトリックス組織では航空機のインテグレーション、システム設計、試験・評価、生産、カスタマ・サポートなどのWBS (Work Breakdown Structure) 要件に基づいて定義されたプロジェクトにIPTリーダーが割り当てられるのが特徴である。言い換えれば第5図のプロジェクトマネージャは、WBSに対応する明確に定義される業務範囲、権限範囲、成果責任 (Responsibility Authority Accountability : RAA) で業務を実行するIPTリーダーということになる。プログラムとプロジェクトのWBSが明確に定義されて、プログラマネージャとIPTリーダーのRAAを明確にすることが不可欠である。IPTマトリックス組織では、情報交換と情報共有、討論、検討、および意思決定のための垂直的および水平的会議体系が整備されている。垂直的会議体系はプログラマネージャと各組織のリーダーから構成される。水平的会議体系は各組織間、および組織内各階層のメンバから構成される。

我が国の国産ジェット旅客機の開発チームも2018年1月の機構改革から、IPTが採用されている[27]。これら情報から推察したIPTマトリックス組織を第8図に示す。これから、プロジェクトおよびシステムインテグレーション要員を見積ると、約200名となる。ここではIPT組織の例から仮定したマトリックス組織の交差数を人数と定義する。新しいタイプの航空機については、プログラムとプロジェクトWBS、およびIPT組織を設計するための各セクションのRAAが、プログラムの初期段階で明確

に定義されていることが非常に重要かつ不可欠である。



第8図 旅客機の開発組織の例

3.2.3 開発組織の実例と組織設計の考え方の検証

開発組織の実例を用いて前節で述べた組織設計の考え方の検証を行うこととする。第2表はこれまでに議論した、航空機システム開発組織全体の規模（開発チームの人員数）、図面数、プログラムとプロジェクトおよびシステムインテグレーション組織の規模（人員数）を比較したものである。ここで図面数は機体規模に相当すると考えられる。第2表から、航空機システム開発組織全体の規模が大きくなるにつれて、その規模比をはるかに越えて、プログラムとプロジェクトおよびシステムインテグレーションの規模比が増加することが分かる。すなわち航空機システム全体の規模は零式戦闘機を1とすると、F-2戦闘機では11、旅客機では50となるが、プログラムとプロジェクトおよびシステムインテグレーション組織の規模は、零式戦闘機を1とした時、F-2戦闘機では20、旅客機では200となる。これは、サブシステムと機能組織間のコミュニケーション量の増加に対応した、組織や人員の増加であると考えられる。

第2表 航空機システム開発組織全体とシステムインテグレーション組織の規模比較

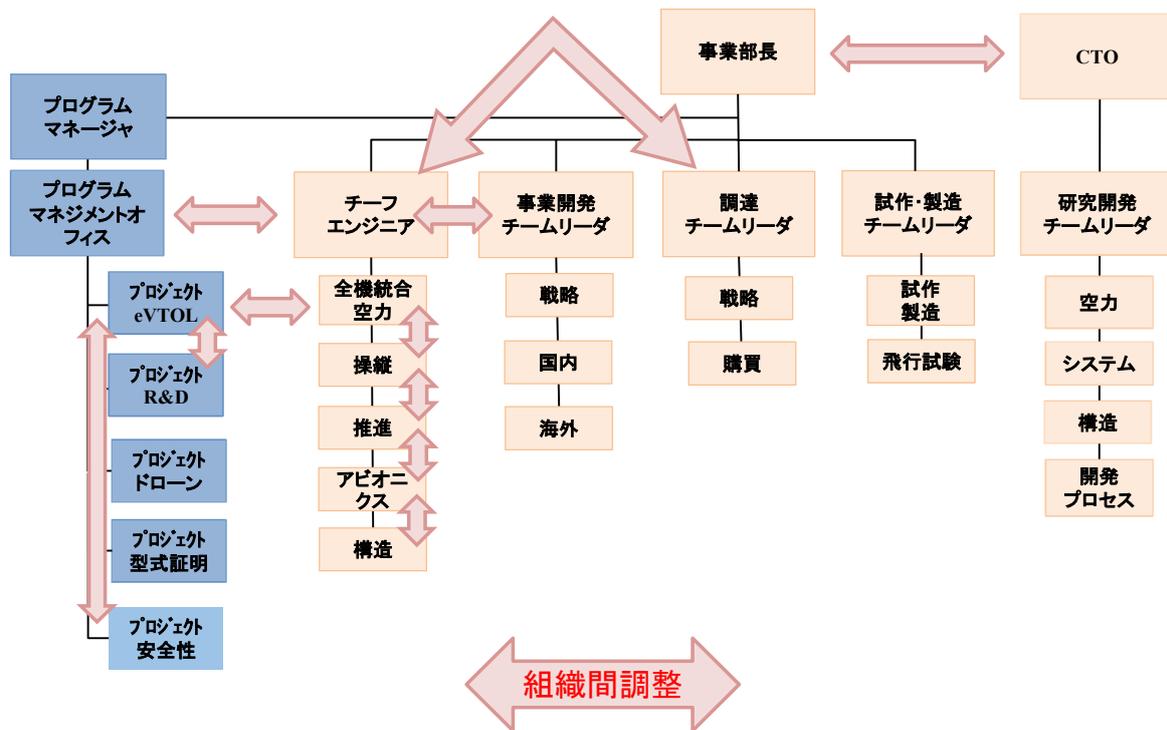
	Zero-Fighter	F-2 Fighter	Commercial Aircraft
Size of overall aircraft system development organization (no. of personnel)	29	Approx. 330	Approx. 1400 90% of approximately 1600 ²⁸⁾ MITAC employees
	1	: 11	: 50
Number of Drawings	10000 SHTs (estimation)	100000 SHTs (estimation)	400000 SHTs (estimation)
	1	: 10	: 40
Size of program & project System Integration organization (no. of personnel)	1 Chief Engineer	Approx. 20	Approx. 200 (number of matrix organization intersections assumed based on IPT organization example)
	1	: 20	: 200

増大するコミュニケーション量に対応するため組織の一つの典型例として強い縦系横系IPTマトリクス組織が多くの企業に導入されてきた。これは先のシステムインテグレーションを実現する組織設計の考え方に沿ったものと言える。IPTマトリクス組織は旅客機開発のような大規模開発に適した組織である。一方、従来の研究に見られる通り、組織設計を行う際の前提は明確なWBSとRAAが定義されることであるが、プログラム属性（多義性×拡張性×複雑性×不確実性）によっては、WBS、RAAの変更がかなりの頻度で発生し、多くの組織変更が起こりえることが予想される。また、IPTマトリクス組織の巨大化は人員増をもたらし、開発経費の増加につながるため、費用対効果が高く、パフォーマンスとコストにバランスの取れた強力なマトリクス組織についての研究が今後期待される。

一つの解決策として、サブプロジェクト、これは従来の日本国内の戦闘機開発他で採用された方式であるが、機能組織に属するメンバをIPTリーダ相当のプロジェクトメンバとしてもアサインし、両者を兼務させ、ファシリテータとしてプロジェクト管理を柔軟に対応する方策もある。次項でこれについて検討する。

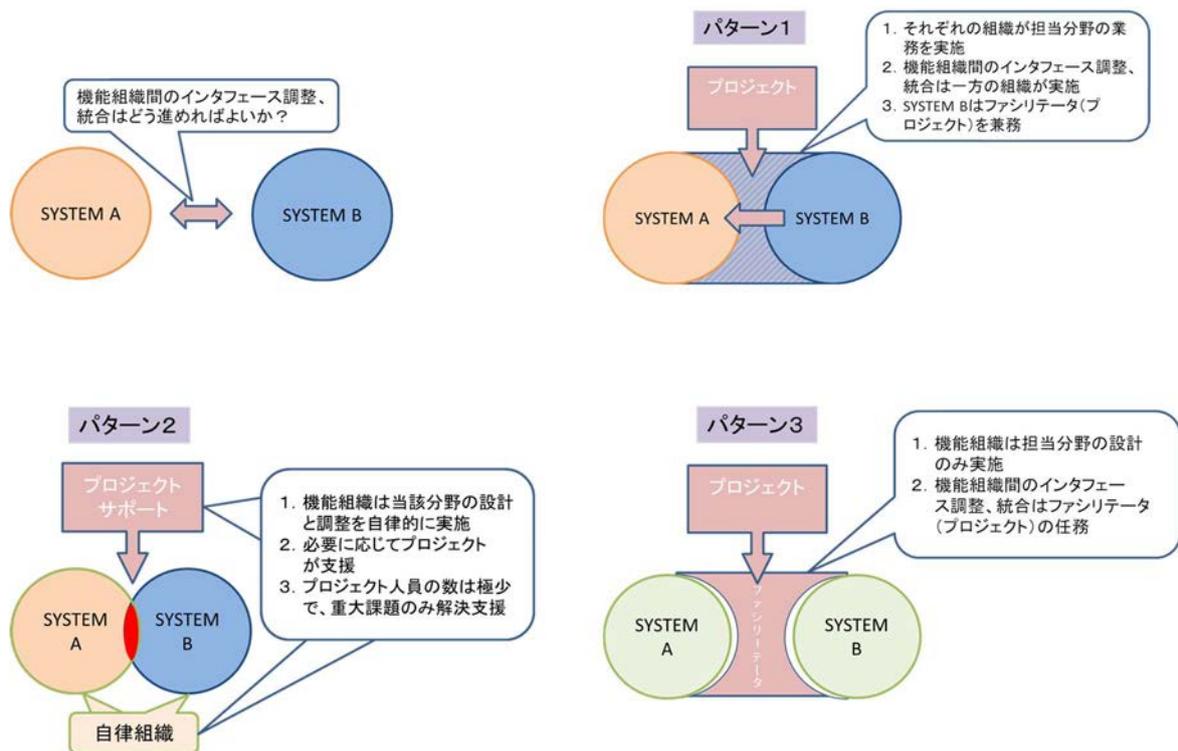
3.2.4 サブプロジェクト方式を取り入れた開発組織

IPT マトリクス組織は旅客機開発のような大規模開発に適した組織である。一方、IPT マトリクス組織は開発組織の巨大化，人員増をもたらし，開発経費の増加につながるため，eVTOL 開発のような短期間低コスト開発では，パフォーマンスとコストバランスの取れた強力なマトリクス組織が求められると考える。第9図は，著者が考える自律型機能組織・少数精鋭プロジェクトからなる強力なマトリクス組織の例である。



第9図 自律型機能組織・少数精鋭プロジェクトのマトリクス組織

ここで注目するのは、各組織間の、高品質の情報交換と情報共有、調整をどのように効率的に行うかである。第 10 図にその具体例を示す。パターン 1 は一方の組織 (SYSTEM B) が他方 (SYSTEM A) との調整を実施する場合で、SYSTEM B のメンバーをプロジェクトメンバーとしてもアサインし、両者を兼務させ、ファシリテータとしても対応する場合である。これは従来の日本国内の戦闘機開発等で採用された方式であり、サブプロジェクト方式とも呼ばれる。パターン 2 は両組織が自律的に機能し、必要な場合のみプロジェクトがサポートする場合である。これは個々のメンバーの能力が高く、豊富な経験を有する場合に採用できる。パターン 3 は両組織とも自組織の機能を果たし、組織間の調整はファシリテータとしてプロジェクト要員が任命される場合である。IPT マトリクス組織はこれにあたる。自律型機能組織 + 少数精鋭プロジェクト (約 100 人想定) はパフォーマンスとコストバランスの取れた強力なマトリクス組織としてパターン 1 で実現することが有効と考えられる。



第 10 図 組織間の調整のパターン

3.3 まとめ

まず初めに従来明確ではなかったシステムインテグレーションについてプロジェクトマネジメント、およびシステムズエンジニアリングの観点からの考察を示し、定義した。プロジェクトマネジメントとシステムズエンジニアリングはそれぞれ、教育と研究が進化してきた。またこれらの相互関係について述べた論文もあるが、本論文ではこれらを統合的にしてシステムインテグレーションを実現するといった観点で整理した。これは暗黙知の形式知化の試みである。航空宇宙工学分野で最重要とされるシステムインテグレーションであるが、今後の情報社会のモジュール構造型の産業組織への移行に際し、モジュール型開発におけるインテグレーションについて述べた。最後にシステムインテグレーションを実現する組織について、基本設計思想、日本における開発組織の変遷の実例、および実例を用いた設計思想の検証、最後にサブプロジェクト方式を取り入れた開発組織について検討を行った。大規模複雑組織における組織内外とのコミュニケーションの増加に対応する開発組織の典型的な例として、強いファンクション組織（縦糸）とプロジェクトマネジメントおよびシステムインテグレーション組織（横糸）で構成されたIPTマトリックス組織が航空宇宙・防衛産業に導入されている。これは、前述のシステム統合を実現するための組織設計思想に沿ったものだと言える。IPTマトリックス組織は、民間航空機開発のような大規模開発に適している。しかしIPTマトリックス組織の規模は通常、非常に大きく、開発コストの増加につながる。さらに、プログラムの多様性、拡張性、複雑性、不確実性などに応じて組織やWBS、RAAが頻繁に変更される可能性がある。費用対効果が高く、パフォーマンスとコストを両立させる強力なマトリックス組織について今後、さらに研究が進むことが期待される。最後にeVTOL開発のような短期間低コスト開発に適用されると予想される「自律型機能組織＋少数精鋭プロジェクト」の例としてサブプロジェクト方式を取り入れた開発組織を示した。

第4章 システムインテグレーションの達成度指標の提案と評価

航空宇宙分野，特に大規模高度複雑システムである旅客機のシステムインテグレーションにおいて，全体システム（航空機全体）として要求を満たすためには，SAEのARP4754A[14]に基づき，設計要求の妥当性確認と検証（V&V）のスパイラルな開発保証プロセスおよび安全性検証により，個々のサブシステムの機能，性能を組み合わせ，擦り合わせを行う必要がある．これら開発保証プロセスおよび安全性検証では，プロセス内の各段階で，それぞれの達成度を評価し，次の段階に進む必要がある．技術達成度の評価はTRL(Technology Readiness Level)[13]，インテグレーションの達成度の評価はIRL(Integration Readiness Level)[29]，システム成熟度の評価はSRL(System Readiness Level)[30]が提唱されている．しかし，著者の知る限り，実開発業務では，開発におけるシステムインテグレーションを表す指標として，TRL，IRL，SRLといった指標が有効に活用された実績はなく，システムインテグレーションの達成度を定量的に評価し，タイムリーに対処するというプロセスの標準化に関して知見がなく，標準化はされていない．

識者へのインタビューでは，開発を経験したエンジニアは直感的にシステムインテグレーションを理解できるという意見が大多数であった．この意味ではシステムインテグレーションは暗黙知として会得されてきたものと考えられる．これから開発に従事する経験の浅いエンジニアへの伝承や開発実務の中で，システムインテグレーションを標準プロセスとして設定するためには，暗黙知の形式知化が必要である．このための一助としてインテグレーション達成度の指標化，標準プロセス化が求められる．ここでは従来提唱されてきたTRL，IRL，SRLなどの有効性を評価するとともに，システムインテグレーション達成度の新しい評価手法を提案する．この達成度の評価指標は，開発実務を進めていく中で，開発の各段階で，その達成度を把握し，適切な対策をすることは開発を計画通り進めることにも寄与できると考える．なお，以下で全体システムは航空機全体，サブシステムは装備品システムを指している．

4.1 システムインテグレーション達成度の評価

従来の研究では、大きく分けると以下の3つのカテゴリーで達成度の評価指標が提

第3表 TRL, IRL, および SRL の比較

レベル	TRL	IRL	SRL
1	基本原理の観察、報告	技術間の関係を詳細に特徴づけるインターフェイスの特定	【コンセプトの洗練化】 システム/技術開発戦略の初期 コンセプト概念の洗練化
2	技術のコンセプトやアプリケーションの明文化	インターフェイスを通じた技術間の相互作用を特徴づける特異性の識別	【技術の開発】 技術のリスクの低減、全体システムに統合する適切な技術の決定
3	解析および実験による技術概念のクリティカル機能や特徴の立証	整然と効率的に統合、相互作用するための技術間の適合	【全体システム開発とデモンストレーション】 全体システムの開発または能力の増強・インテグレーションと製造のリスクの低減、運航のサポート性の確保、物流拠点の削減、人間系のインテグレーションの実行、生産性のための設計、クリティカルな事業情報の取得と保護、システムインテグレーション、相互運航性、安全性、ユーティリティのデモンストレーション
4	実験室環境での構成品や一部の部品の検証	技術間の統合についての詳細な品質保証	【生産と開発】 ミッション要求を満たす運用能力の実現
5	想定する使用環境での構成品や一部の部品の検証	インテグレーションの確立、管理、終結に必要な技術間の十分な統制	【運用とサポート】 運用サポートのパフォーマンス要件を満たし、全体システムをそのライフサイクル全体で最も費用対効果の高い方法で維持するサポートプログラムの実行
6	想定する使用環境でのシステム/サブシステムモデルのデモンストレーション	意図したアプリケーションに関する情報の、統合する技術による受容、解釈、構造化	
7	想定する使用環境での試作全体システムのデモンストレーション	実装するために詳細に検証（V&V）された技術のインテグレーション	
8	試験およびデモンストレーションによる実装全体システムの完成、認定	全体システムの使用環境での試験とデモンストレーションによるインテグレーション完了とミッションの認定	
9	実運用ミッションを通しての実装全体システムの証明	実運用ミッションを通しての全体システムインテグレーションの証明	

唱されてきた。それはシステムを構成する個々の技術の達成度評価としてのTRL，インテグレーションの達成度評価としてのIRL，およびプログラムの初期段階から運航・使用段階までを想定したライフサイクル，すなわち企画，設計，製造，試験・検証，運航に関するシステムの成熟度評価としてのSRLであり，これらを第3表で比較する。以下に，我が国の航空機の開発事例を参考に，その要点を述べる。

TRLはレベル1～レベル9で定義される。レベル1の基本原理の確認から段階的にレベル5まで検証が進められ，レベル6では，使用環境を模擬したシステムの確認試験，機体全体の地上での確認試験がおこなわれる。さらに，レベル7での初飛行から社内での飛行試験と型式検査承認（Type Inspection Authorization: TIA）の取得は，規定された設計要件を満たし，国土交通省航空局のパイロットが搭乗して，型式証明(Type Certification: TC) の取得に向けた最終的な認定飛行試験を行うことが承認されたことを意味する。レベル8での国土交通省航空局による飛行試験と型式証明の取得，レベル9での耐空性審査の完了と実運用のフィードバックによる全体システム（航空機全体）の完成に至る。

IRLは技術間のインターフェイス確定度をそれらの深度に応じてレベル1～レベル9で定義する。レベル1での技術間のインターフェイスの特定，レベル2での技術間の相互作用の特異性の識別，レベル3での統合，相互作用するための技術間の適合，レベル4での技術統合の確定と品質保証，レベル5でのインテグレーションの確立，管理，終結のための技術間の十分な統制，レベル6でのアプリケーション情報の統合技術による受容，解釈，構造化，レベル7でのインテグレーションのV&V検証，レベル8での実使用環境での試験とデモンストレーションによるインテグレーション完了とミッション認定，レベル9での実運用でインテグレーション証明に至る。

SRLはレベル1～レベル5で定義され，製品の開発の各段階，すなわちコンセプト設定から，要素技術の開発，システムの開発とデモンストレーション，生産と開発の完了，そして運用の開始とサポートをその基準としている。各レベルとも，その定義が定性的であり指標として開発現場で実際に使用するのには難しい。

TRLについては1980年代に導入されて以来，NASA，DOD (Department of Defense) をはじめとして技術達成度評価の代表的概念として利用され，また多くの有効性の議論がなされてきた[30]。しかし，多分野の技術間インターフェイスの確定度や統合度の評価はできないとの見解が一般的である[29]。例えば，既に運用に供されている航空機に搭載されたシステムAと，別の航空機に搭載されたシステムBは，TRLの定義では，それぞれレベル9となるが，新たに航空機を開発する際には，それらシステムの要件定義とシステム間のインテグレーション達成度の新たな評価が必要である。

IRLに関しては、参考文献[29]で、インテグレーションをV&VプロセスのVerification, すなわち右上がりのスロープを上げる工程に注目し、インテグレーション達成度指標の提案と検証を行っている例がある。これによれば、IRLはインテグレーション成熟度の決定には完全な解ではないこと、例えば、開発上の出来事の重大さや研究開発の努力の評価ができないこと、複雑なネットワーク中心のシステムの評価には、複合的インテグレーションから単純な評価が可能となるような定量的アルゴリズムが必要となること、更にはコストやスケジュールを評価できないことが挙げられている。参考文献[31]の中で、SRL[30]の他、いくつかの指標、例えば、MRL(Manufacture Readiness Level), IMM (Integration Maturity Metrix), CRLs (Capability Readiness Levels) などが比較して提案されているが、TRLのように実開発業務に使われている例は知見されない。また、これ以降、著者の知る限り、システムの成熟度を評価する指標に関して新たな提案は見られない。

現在までに提案されたTRL以外の各種の達成度評価の指標は、以下の点で開発実務での適用は困難であると考えられる。以下に各指標の有効性と問題点をまとめる。

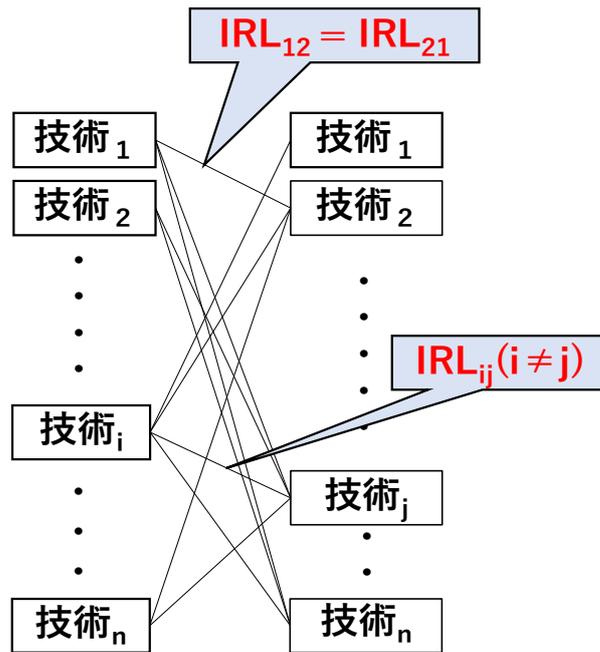
① TRL (Technology Readiness Level)

TRL は全体システム/サブシステム/アイテム (コンポーネント) のレベル毎に個々の技術の成熟度を評価するので、評価対象の技術の定義と選択が必要である。旅客機ではアイテムレベルまでを評価対象とした場合、その数は数千を超えるため、計画的評価が必要である。

② IRL(Integration Readiness Level)

IRL は、全体システム/サブシステム/アイテム (コンポーネント) の上位レベルから下位レベルのレベル毎の個々の技術間のインターフェイス/インテグレーション成熟度を評価する。IRLの概念を第11図に示す。

次に例示する通り、IRLは評価数が膨大となるので、実務上は全体システムおよびサブシステムレベルの評価にとどまらざるを得ないと考えられる。例えば、技術数を n とするとインターフェイス数は $1/2 \times n(n-1)$ となり、システムレベルの技術数を100とした時、IRL は4950の評価が必要となる。アイテム (サブシステム, コンポーネント) レベルの技術数を1000とすると、IRLの評価は499500となって非現実的である。また、先に述べた通り、各レベルの定義が定性的であるため、具体的評価にあたってはより詳細な評価基準が必要と考えられる。さらに、IRLはレベルごとの評価にとどまり、下位レベルから上位レベルへの統合度、成熟度の評価はできない。



第 11 図 IRL の概念

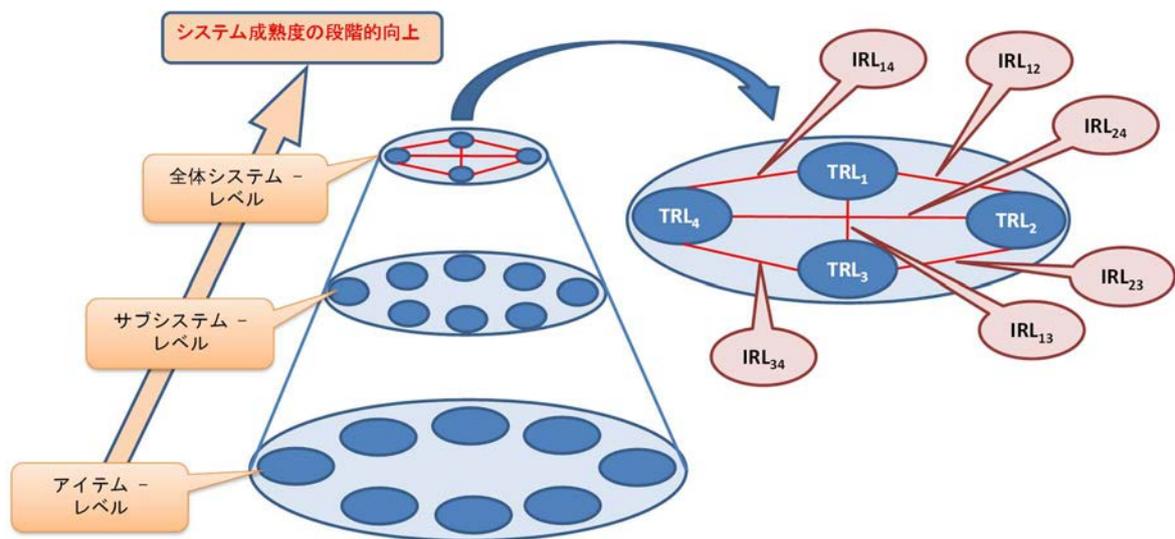
③ SRL(System Readiness Level)

SRLは全体システムのライフサイクル，すなわち企画，設計，製造，検証，試験，運航のフェーズごとに全体システムおよびサブシステム階層構造を考慮し，階層が上位へ上がると，システムの成熟度があがると考える．SRL概念を第12図に示す．

一階層でのTRLとIRLの関係は，参考文献[30]を参考に，全体システムレベルを例に説明している．図からわかるように，SRLはTRL評価とIRL評価のいわば関数のような総合的評価指標となる．SRLを指標として使うためにはTRL/IRL/SRLのシステム階層構造，個々の依存性の整理，各指標のより明確な定義が必要である．

4.2 評価指数の新たな提案

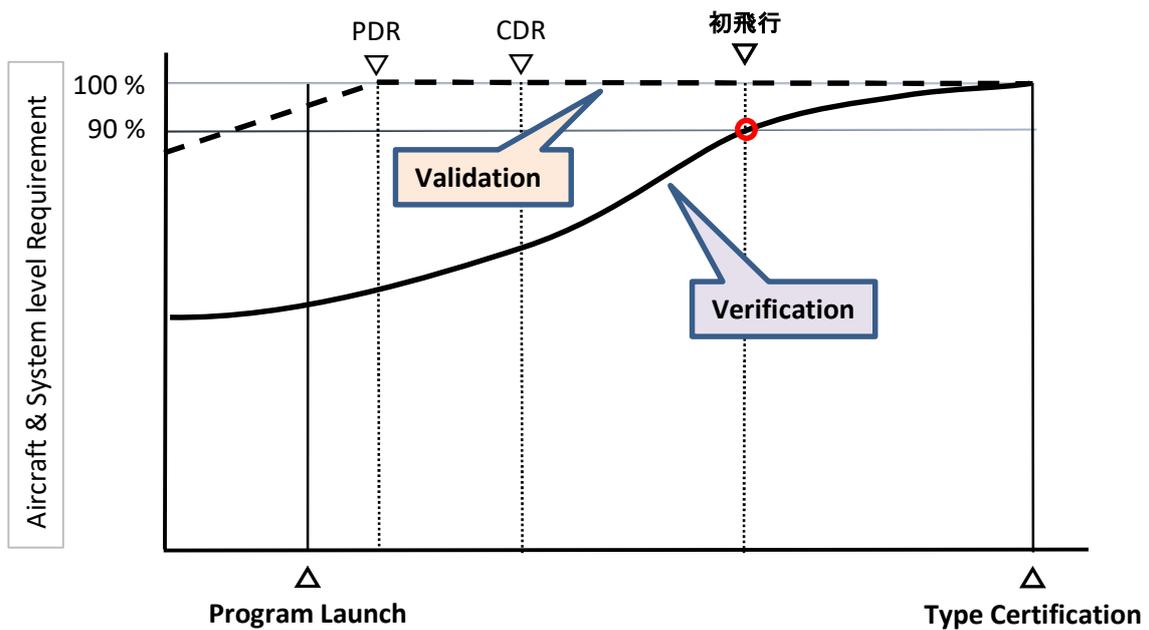
従来提唱されてきたTRL，IRL，SRLなどの各種達成度評価の指標はTRLがNASA，DOD，我が国の防衛事業，各種研究開発取得計画などで実用に供されていることを除き，前述した理由により有効でないと考えられる．最近の9つの主要な米国政府の宇宙プログラム，SBIRS(Space-Based Infrared System)，GPSF，GPS，GPS



第12図 全体システムレベルに適用した SRL モデル

OCX(Operational Control System), MUOS(Mobile User Objective System), JMS(JSpOC Mission System), SBSS(Space Based Space Surveillance), AEHF(Advanced Extremely High Frequency), NPOESS(The National Polar Orbiting Operational Environmental Satellite System) の遅延は開発の各段階での要求の未確定, 要求不安定(変更)が主な原因であるとの報告がある[32]. したがって, 適切な時期の要求設定が極めて重要である. ボーイング787プログラムでは当初2004年4月の事業開始, 2008年5月の納入の計画であったが, 納入形態の決定が2005年9月, 主要なサブシステムの設計が2006年6月に開始され, 初飛行は2009年12月となり, 納入形態の決定の遅れとこれに伴う要求設定, 設計, 初飛行の遅れが生じたことが明らかである[33].

そこで, 旅客機の開発を経験した技術者にシステムインテグレーション成熟度についてヒアリングを行った. これによると旅客機の実開発では多くの場合, 開発上の最も重大な出来事である初飛行時点で, 設計要求の90%の検証(Verification)が完了している(90%の数字は主要な要求の検証が完了していることを意味しているとのことである)とのコメントがあった. そこで, 全体システム(航空機全体)とサブシステムレベルの要求の妥当性確認(Validation)と検証(Verification)の進捗度の典型例を第13図にまとめた. 構想設計完了時点(Preliminary Design Review: PDR)で, 全体システム(航空機全体)とサブシステムレベルの要求の妥当性確認が完了していて,

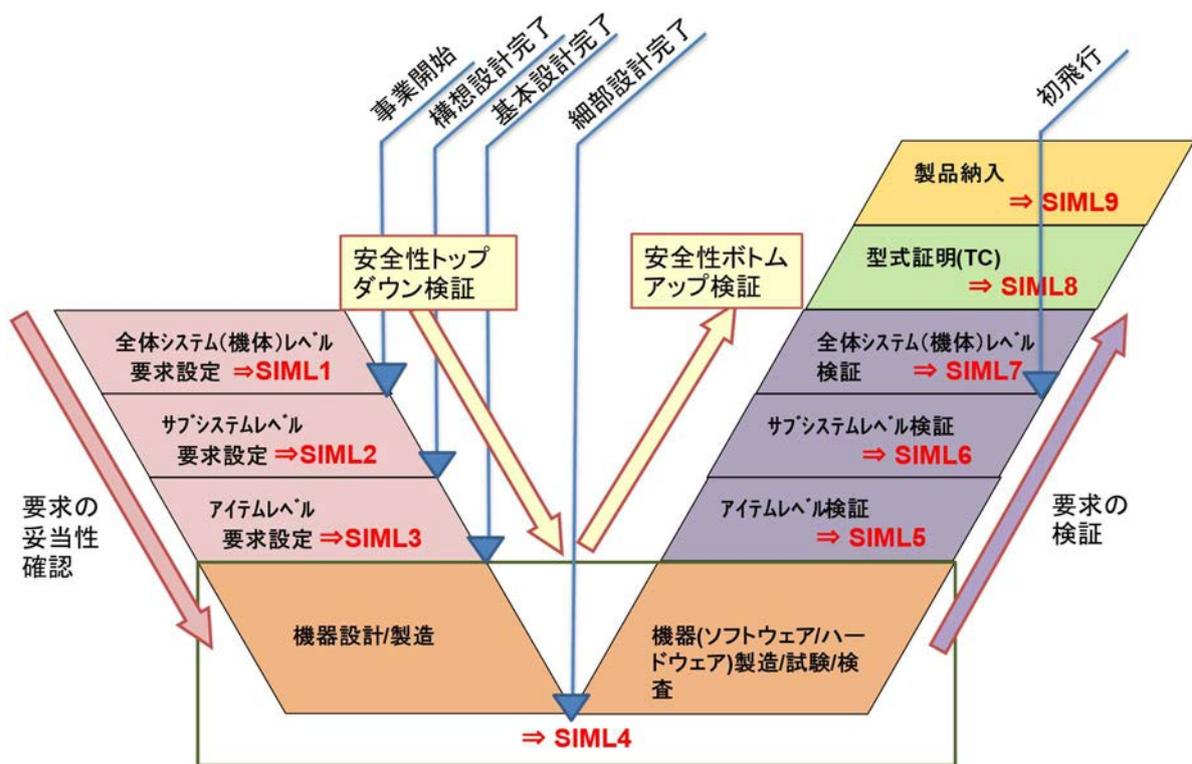


第 13 図 旅客機の V&V の実例

初飛行以降の飛行試験と一部の地上試験は検証全体の高々10%ということになる。

これらの事例から、旅客機開発の各段階の重大な出来事と、要求の妥当性確認および検証完了の時期をV&Vプロセスの7つのフェーズと整合を取り、整理した。結果を第14図に示す。旅客機（全体システム）レベルの要求は事業開始時点で、サブシステムレベルの要求は構想設計完了時点（PDR）で、アイテムレベルの要求は基本設計完了時点（Critical Design Review: CDR）で確定する。検証は次のレベルの検証を開始する前に完了する必要がある。以上を踏まえ、「開発上の重大な事項と要求の妥当性確認（Validation）および検証（Verification）の完了」を旅客機（全体システム）のシステムインテグレーション達成度を評価する指標として用いることが一つの案として考えられる。

第14図を9段階に指標化したものを第4表に示す。これは、従来提唱されたIRLとSRLを統合化したもので、これを新たにSIML(System Integration Maturity Level)と定義し、提案する。このことは、システムインテグレーション達成度の評価指標に設計プロセスと重要イベントのタイミングを組み入れることを意味する。SIMLを用いると開発の重要なイベントごとに段階的にシステムインテグレーション達成度を評価することとなり、これまで暗黙知と捉えられていたシステムインテグレーションを形式知化できることとなる。IRLは各レベルの指標の定量化が不十分であること、開



第 14 図 旅客機開発の各段階の重大な出来事と V&V プロセス

発上の重要なイベント、スケジュールとの対応がっていないことなど、また、SRLでは製品のライフサイクル上のフェーズごとの達成度を評価するが、設計、製造、試験・検証といった開発の要である分野のインテグレーションの評価を行っていない。このことが、従来の開発でシステムインテグレーションの達成度評価にIRLやSRLがほとんど用いられてこなかった理由と考えられる。

SIMLのレベル1は事業開始時点での製品（全体システム）レベルの要求の確定と事業を構成する各分野のインターフェイスの確定、レベル2は構想設計完了時点でのサブシステムレベルの要求とインターフェイスの確定、レベル3は基本設計完了時点でのアイテムレベルの要求とインターフェイスの確定、レベル4はアイテム出荷時点でのアイテムレベルのハードウェア/ソフトウェアの設計、製造、試験、検査の完了、レベル5はシステム検証開始時点でのアイテムレベルの検証の完了、レベル6は全体システム検証開始時点でのサブシステムレベルの検証の完了、レベル7は認定試験開始時点での全体システムの検証の完了、レベル8は認定取得までの試験、解析、デモンストレーション、ミッションの認定、レベル9は運用使用許可を得て、実運用環境での確認、運用支援体制の確立、全体システムの納入と定義した。このSIMLが、「暗黙知の形式知化」に有効である。

第4表 提案するシステムインテグレーション達成度指標

レベル	Proposed System Integration Maturity Level (SIML)
1	事業開始時点で確定 ・製品（全体システム）レベルの要求 ・事業を構成する各分野間のインターフェイス
2	構想完了時点 (PDR)で確定 ・サブシステムレベルの要求 ・サブシステム間のインターフェイス
3	基本設計完了時点 (CDR)で確定 ・アイテム（構成品）レベルの要求 ・アイテム（構成品）間のインターフェイス
4	アイテム出荷までに完了 ・アイテムのハードウェア/ソフトウェアの設計, 製造, 試験, 検査
5	システム検査開始までに完了 ・アイテムレベルの検証 (Verification)
6	製品レベルの検査開始までに完了 ・サブシステムレベルの検証 (Verification)
7	認定試験開始（型式検査承認 TIA: Type Inspection Authorization）までに完了 ・製品（全体システム）レベルの検証 (Verification)
8	認定（型式証明 TC）取得までに完了 ・試験, 解析, デモンストレーション ・ミッション認定
9	製品納入までに完了 ・運用使用許可（耐空証明 Airworthiness） ・運用支援体制の確立

4.3 SIMLの簡易評価と考察

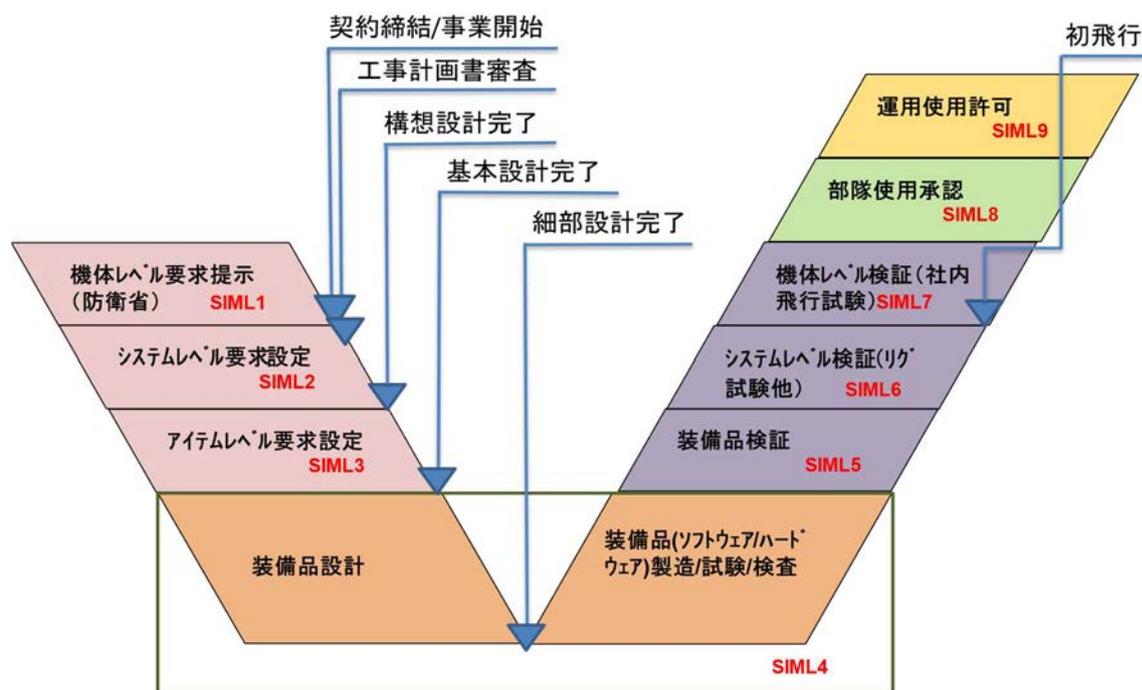
以下に簡易的にSIMLの有効性の検証を試みる。F-2 戦闘機の開発[9] を念頭におき、防衛省事業について検証する。第15図は、旅客機開発の各段階の重大な出来事とV&Vプロセスである第13図を、F-2戦闘機開発に拡張し、その具体的な出来事と要

求の妥当性確認および検証完了(V&V)の時期を記載したものである。

防衛装備品の製品レベルの要求は防衛省によりまとめられ、企業との契約の段階で要求が提示されて、事業が開始された（レベル1）。次に、契約後速やかに技術審査会が開催されて、工事計画書が審議され、開発の全体スケジュール、開発の各段階での設計の妥当性確認、検証の計画が決められた構想設計完了（システム要求設定）段階（レベル2）、基本設計完了（アイテムレベル要求設定）段階（レベル3）、アイテム（サブシステム、装備品など）の設計、製造、試験、検査を終えた、出荷段階（レベル4）、アイテム検証段階（レベル5）、システム検証（リグ試験、アビオニクス統合試験など）段階（レベル6）、製品レベル（機体全体）の地上検証段階、初飛行、社内飛行試験段階（レベル7）、認定取得（部隊使用承認）までの防衛省による飛行試験、全機構造試験などの技術実用試験の段階（レベル8）、運用使用許可取得（必要な機数の配備を完了し部隊運用の開始が許可される）（レベル9）のように進捗した。

このように、開発初期段階で、その達成内容と時期が設定され、この計画に沿って開発が進められて、各段階で技術審査会が開催され、内容が審議されたため、ここで定義したSIMLの各レベルとの整合評価が可能であることが確かめられる。

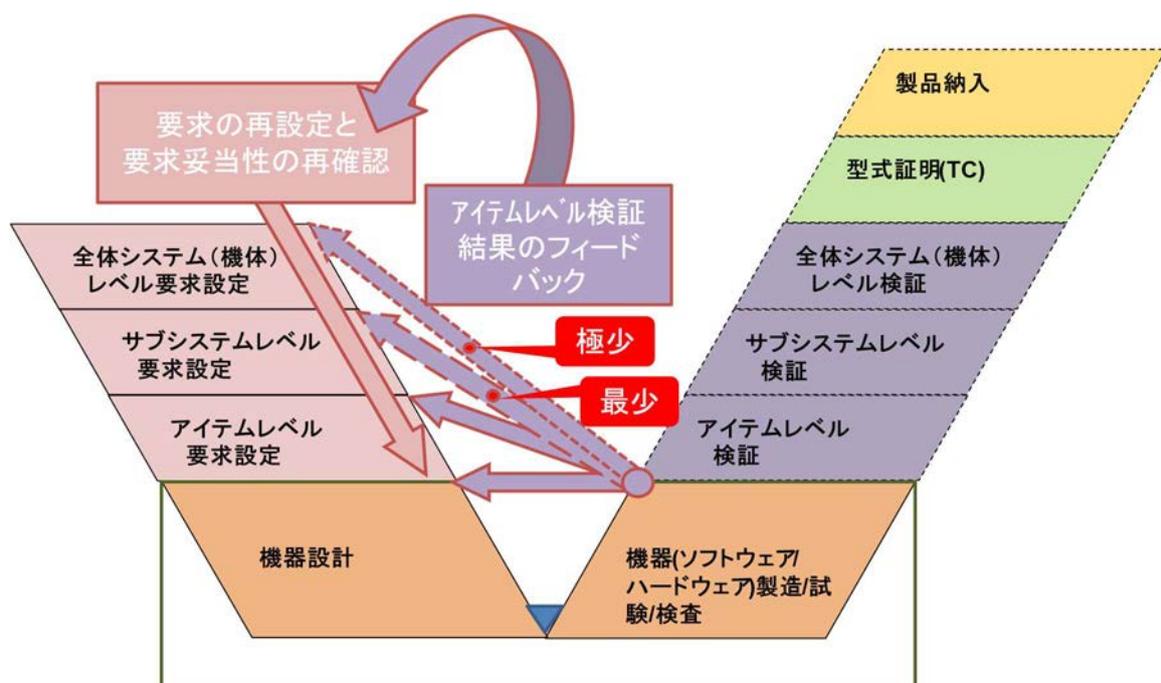
次に国産旅客機に関してSIMLの有効性について検証を試みる。国産ジェット旅客機SPACEJET M90（旧MRJ90）は、2021年以降の初納入を目指し、今も開発努力を



第 15 図 F-2 戦闘機開発の各段階の重大な出来事と V&V プロセス

続けているが、初飛行以降も数回にわたる納入スケジュールの見直しがあり、型式証明の取得のために2016年の段階で900件以上の設計変更が行われ[34]、設計の妥当性確認、検証が行われている。すなわち、SIMLのレベル1~7が繰り返されていることが想像できる。これはSIML設定の基本的な考え方とした第13図に示した初飛行段階で設計の検証の90%を完了することが成功した多くの事業で見られたことと反している。このことは、SPACEJET M90の開発では、初期段階で、開発の各段階での達成内容と時期の設定、すなわち、各段階でのインテグレーション達成度の評価が十分でなかったことが想定される。よって、ここで定義したシステムインテグレーション評価指標、SIMLを実開発へ活用できる可能性が十分ある。

なお、実際のシステムインテグレーションにおいて、SIMLレベル4以降の検証(Verification)段階の試験、解析、デモンストレーションなどで判明した不適合や改善事項は適切に設計へフィードバックし、設計変更を実施することが必要となり、設計の妥当性(Validation)の再評価、再検証が必要となる。したがって、SIMLレベル1から3については、これら再評価、再検証を考慮したシステムインテグレーション達成度の適宜再評価が必要である。第16図に設計検証結果のフィードバックの例を示す。アイテムレベル検証の結果、機体/サブシステム/アイテムの設計各レベルへのフィードバック、設計要求の変更が生じた例である。機体レベルの設計変更があると事業開始時点の設計要求、システムレベルの設計変更があると構想設計、アイテム



第 16 図 設計検証結果のフィードバックの例

レベルの設計変更があると基本設計へ立ち返る必要がある。各設計変更の、機体/サブシステム/アイテムレベルへの反映の混乱を避けるため、設計の妥当性の再評価、再検証は、個々の設計変更の都度行うより、レベル毎、あるいは関連する機能毎にまとめて、あらかじめ計画に織り込んでおくなどの配慮が必要である。

4.4 まとめ

システムインテグレーション達成度の評価指標として、従来提唱されてきた技術達成度の評価指標(TRL)、インテグレーション達成度の評価指標(IRL)、システム成熟度の評価指標(SRL)の有効性と問題点を評価し、その限界を明確にした。すなわち、TRLは技術そのものの実現性レベルに対する指標、IRLは統合するための技術レベルの指標、SRLはシステム成熟度をライフサイクル全体にわたり評価する指標と理解できる。

本論文では、それら指標を参考に、システムインテグレーション達成度の評価指標に設計プロセスと重要イベントのタイミングを組み入れることを試み、旅客機の開発保証プロセスのガイドラインとして広く認識されているV&Vプロセスをベースとした新たなシステム成熟度の達成度評価SIMLを提案した。最後に、過去のプロジェクトについて、簡易的に評価し、提案したSIMLが有効であることを示した。

今後、実現が期待され開発中のeVTOLに対し詳細評価することを計画している。また、SIMLレベル4以降の検証段階の試験、解析、デモンストレーションなどで判明した不適合や改善事項は適切に設計へフィードバックし、設計変更を実施することが必要となり、設計の妥当性確認再評価、再検証が必要となる。したがって、これら再評価、再検証を考慮したシステムインテグレーション達成度評価について検討が必要である。

またウォーターフォール型開発、すなわち、製品のコンセプト策定からサブシステム、アイテムまでの設計、試作、検証という工程を順に実行していく開発から、アジャイル型開発、すなわち、ソフトウェア開発などに適用される製品より小さい単位のサブシステム、アイテム毎で、設計、試作、検証を同時並行、かつ反復する開発に対応したシステムインテグレーション、これらに対応するシステムインテグレーション達成度評価についても研究する必要がある。

例えば、航空機分野のアジャイル型開発としてはSaab社グリペンにおける各種ソフトウェア開発[35]が知られている。今後、航空機分野でもアジャイル型開発が進むと思われる。なお、SIMLはシステム開発時のシステムインテグレーションの達成度の指標であり、レベル9を達成し、全体システムを納入した後の、実運用フィード

バックによるシステムの改善，改良による全体システムの成熟度の評価は，ここで提案したSIMLに新たなレベルやフィードバックのプロセスを考慮した達成度レベルの再定義をすることも研究の一つの方向性とする。その一例を第5章で検討する。

第5章 アジャイル開発に適応する開発プロセス，およびシステムインテグレーション達成度の評価指標

これまで，航空機の大規模高度複雑システムである旅客機を研究対象として，システムインテグレーションを実現するために必要な組織を明らかにするとともにシステムインテグレーション達成度を評価する指標 SIML(System Integration Maturity Level)を提案した。

一方，昨今新たな航空機，eVTOL [36-39] が注目されている．eVTOL の開発は旅客機の開発と比べると比較的小規模，簡素システムである一方，新たな輸送手段故に発生する固有の課題，例えば，要求設定，開発方式などがあり，開発の様々な面で大きく異なる点がある．本章ではその特徴，差異を明らかにするとともに，eVTOL に適した開発プロセスについて検討する。

5.1 旅客機とeVTOLの開発プログラムの比較

大規模複雑システムの旅客機と小規模簡素システムの eVTOL ではそれぞれの事業の規模，運航構想，機体の仕様など，事業の特性が大きく異なるため，開発にかかわる様々な面での差異がある．戦闘機の例も含め，旅客機と eVTOL の要求仕様，認証，開発方式，開発組織などを第 5 表で比較する．第 17 図に戦闘機，旅客機および eVTOL の実機例を示す。

旅客機はエアライン要求を下に，製造会社で運航要求，技術要求を設定する．航空法施行規則付属書第一「航空機および装備品の安全性を確保するための技術上の基準」およびそれに基づき定められた耐空性審査要領[40] (FAR Part25) を設計の基準として，段階的インテグレーション手法であるウォーターフォール型[41]で開発される．全体システム，サブシステム，アイテムは原則，要求を満足するように専用品として開発されるが，一部のアイテムは既存品の改造により取得されることがある．その場合でも要求への適合は開発品と同様に精査される．システムインテグレーション達成度の評価は著者が提案した SIML 指標が適用できる．開発組織は IPT(Integrated Product Team)マトリクス組織で，その規模はSPACEJET M90(旧MRJ90)の場合は約 1400 人であった。

第5表 開発プログラムの比較

	戦闘機	旅客機	eVTOL
要求設定	防衛省提示の要求を下に、会社で細部要求を設定	エアライン要求を下に、会社で運航要求、技術要求を設定	会社で設定するCONOPSを下に、運航要求、技術要求を設定
認証	MIL-SPEC 防衛省基準	耐空性審査要領 (Part 25)	耐空性審査要領 (新基準)
開発方式	ウォーターフォール型	ウォーターフォール型	ハイブリッド型
調達	専用品の開発	主に専用品の開発	既存品活用/改造, 専用品の短期開発
SIML	提案中のSIML	提案中のSIML	提案中のSIMLへの追加指標
開発組織	機能組織+ 小規模プロジェクト (F-2戦闘機 約330人)	IPT マトリクス組織 (SPACEJET M90 約1400人)	自律型機能組織+ 少数精鋭プロジェクト (約100人想定)



F2戦闘機—航空自衛隊 HPから引用
https://www.mod.go.jp/asdf/equipment/all_equipment/F-2/images/photo20.jpg



MSJ(MRJ)旅客機—JAXA HPから引用
<https://www.aero.jaxa.jp/exair-report/image/20151111103.jpg>



eVTOL—(株)SkyDrive提供
<https://skydrive2020.com/>

第17図 戦闘機，旅客機およびeVTOLの実機例

戦闘機は防衛省から提示された要求を下に、製造会社で細部要求を設定し、MIL-SPEC、防衛省基準等を設計基準として、ウォーターフォール型で開発される。全体システム、サブシステム、アイテムは原則、それぞれの要求を満足するように専用品として開発される。戦闘機開発についてもシステムインテグレーション達成度は前章で提案した SIML 指標が適用できる。開発組織は機能組織と小規模プロジェクトから成る。その規模は F-2 戦闘機の場合は約 330 人であった。

eVTOL は製造会社毎にユースケース（使用者側に立った運航事例）について、新規の輸送手段としての様々な観点からの検討が進められているが、開発途上の段階で、まだ実運航事例がない。したがって、規定の路線、空域、空港での運航をベースとする旅客機などと異なり、eVTOL は製造会社毎に、そのユースケースとその運航構想（CONOPS：CONcept of OPerationS）が立案される。CONOPS を事業の出発点として、機体開発製造だけでなく、運航、管制方式、整備計画、パイロット資格・訓練などのライフサイクルに渡った運用計画の策定が行われるため、CONOPS の立案は大変重要である。製造会社は CONOPS を元に、運航要求、技術要求を設定する。株式会社 SkyDrive の関係者へのヒアリングの結果、新たに設定される耐空性審査要領を設計基準に、開発方式は短期間低コストを狙った、ウォーターフォール型とアジャイル型[41]を組み合わせたハイブリッド方式[42]により開発される計画とのことである。その詳細は 5.4 節に述べる。

eVTOL におけるサブシステム、アイテムは多くの場合、要求に基づき既存品から選択、またはその改造品が調達されるが、既存品で要求を満足しない場合は短期間開発の専用品が選定されることもある。新たに開発していく航空機ゆえに安全性要求などの周辺状況変化による CONOPS の再設定、多くの要求の変更が予想される。そのため、システムインテグレーションの達成度の評価は著者が提案した SIML の変更が必要となると考える。また、短期間低コスト開発が強く求められるため、開発組織は各組織が自律的に機能し、必要な場合のみプロジェクトがサポートする自律型機能組織と少数精鋭プロジェクトからなる約 100 人想定構成となると予想される。

5.2 旅客機とeVTOLの開発プロセスの違い

eVTOLの開発プロセスは、様々な面で従来の旅客機の開発と大きく異なる。ここではその特徴、差異、開発プロセスを検討する際の考慮事項を再確認する。

① 旅客機について

- 航空機を安全に開発する仕組みとして、第4図の開発保証プロセスと安全性検証が採用されている。開発保証プロセスは要求の妥当性確認および検証（V&V）[43]から成る。
- V&Vはウォーターフォール型開発を前提とする。

② eVTOLについて

- 開発保証プロセスと安全性検証は航空機に適用されるプロセスを基本とするが、第4図のような標準的なプロセスは2021年5月現在未設定で、CONOPS、機体仕様、システム複雑度に見合った簡素なものが各社ごとに作成され、適用されている。
- 従来にない新規の輸送手段である製品開発を短期間で行うため、周辺環境の変化、全体システム、サブシステム、アイテムレベルでの検証結果のフィードバックによる要求変更が多く予想される。その結果、要求、設計、製造、検証の短期間/繰り返しプロセスによるアジャイル手法の導入が望まれる。これにはモデルベース開発、シミュレーションの積極的な利用が期待される。

③ 既存アイテムの多くは、航空機用のものではなく、ドローン（無人航空機）用コンポーネントをスケールアップしたものが多い。アイテム要求に近い既存品を選定し、調達、試験、検証することにより、要求達成度を確認する必要がある。要求未達成項目に対し、必要な設計変更、製造、検査、検証を行う。このプロセスはトライアンドエラーで反復して行うことが多い。

このように、旅客機の開発では開発着手時に全体システムの要求が確定し、その後納入まで段階的に開発が進められるが、eVTOLの開発では開発着手時に要求やインターフェイスが決まらず、後から多くの調整、繰り返しの要求変更が必要になることが大きく異なる。

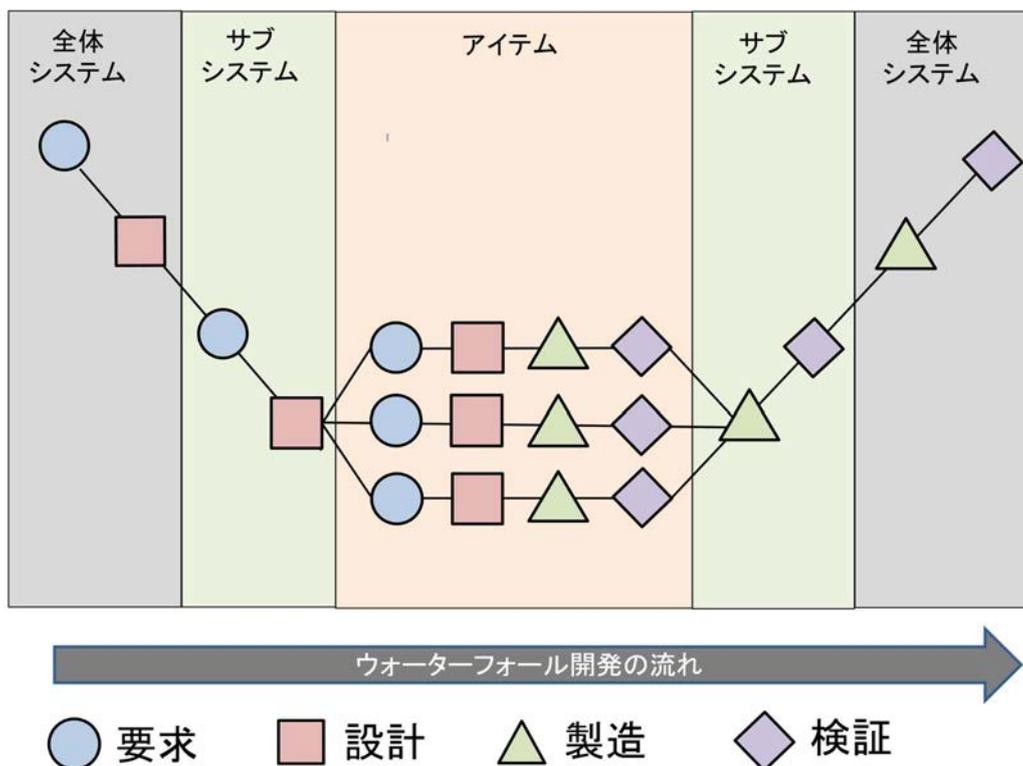
5.3 ウォーターフォール型開発とアジャイル型開発

eVTOL の開発に適用されるウォーターフォール型開発とアジャイル型開発とのハイブリッド型開発について検討する前に、まずウォーターフォール型開発とアジャイル型開発の特徴について説明する。

5.3.1 ウォーターフォール型開発について

第 18 図にウォーターフォール型開発の概念を示す。

- 要求は全体システムからアイテムレベルへ階層的に確定する。要求確定後の変更は最少とする。
- 全機レベル要求からのブレークダウン、設計、製造、試験、納入の工程を一回だけ実施する段階的インテグレーション開発である。
- 大規模複雑システム、ハードウェア開発に適する。
- 秩序を重視する組織文化に適する。

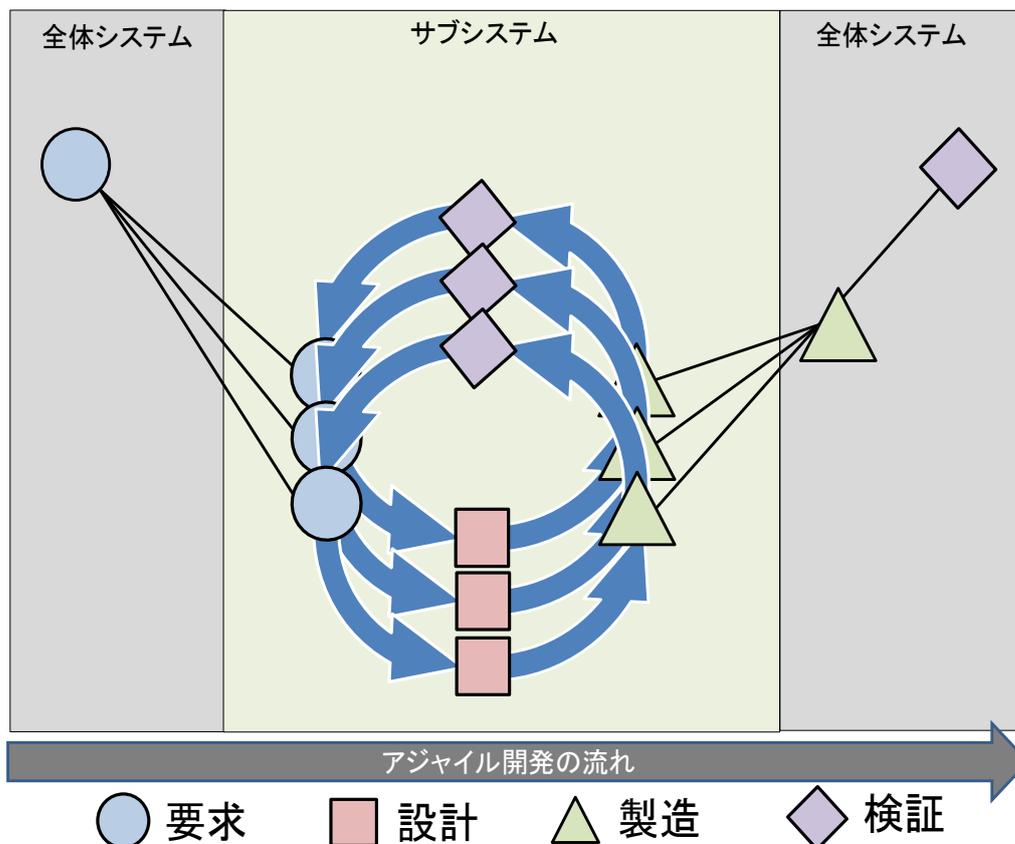


第 18 図 ウォーターフォール型開発の概念

5.3.2 アジャイル型開発について

参考文献[41]に航空宇宙製品へのアジャイル適用の考察が述べられているが，ここではより実務的観点でアジャイル開発をまとめる．第 19 図にアジャイル型開発の著者が考える概念を示す．

- ソフトウェアの開発に数多く用いられてきた手法である．
- 全体システムをサブシステムに小分割でき，その単位で要求，設計，製造，検証を短期間で繰り返し，仕様を確定していくプロセスである．
- 小分割されたサブシステム単位を結合して，製品として納入できる．
- 開発前に要求を確定できない，要求変更が頻繁に発生するシステムで，検証による要求確定などが想定される開発に有効である．
- 混沌とした状況に寛容で，意欲的に取り組める組織文化に適する．
- アジャイル型開発では頻度の高い情報共有，判断が重要である[44]．



第 19 図 アジャイル型開発の概念

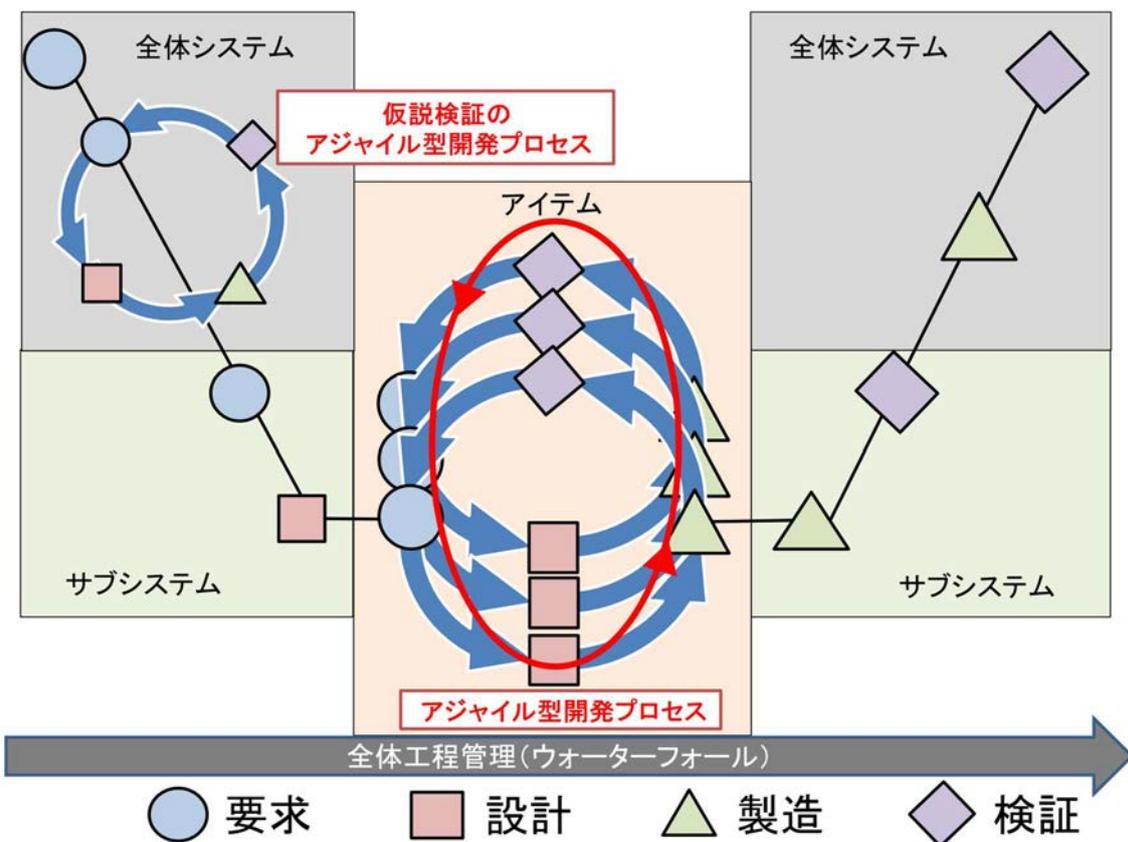
5.4 ハイブリッド型開発

大規模/複雑システムの代表であり、かつ高い安全性が求められる旅客機の開発には従来からウォーターフォール型開発が用いられ、短期間低コストで比較的小規模なシステムであるソフトウェアの開発にはアジャイル型開発が用いられてきた。航空機分野でのアジャイル型開発としては、Saab 社グリペンにおいて各種ソフトウェア開発に用いられ、短期間低コスト開発の成果が知られている[35]。参考文献[45,46]に述べられているように今後、航空機分野でもアジャイル型開発の適用が進むと考えられるが、安全性基準への対応が強く求められる全体システムでは全体工程の管理にはウォーターフォール型、ソフトウェアや新規の開発で、開発着手前に要求を確定できない、要求変更が頻繁に発生する、あるいは検証により要求を確定するサブシステムではアジャイル型というように両者を組み合わせたハイブリッド型開発を適用することが有効と考えられる。以下に著者が提案するハイブリッド型開発について、ウォーターフォール型開発と対比しながら要点をまとめる。

- 航空機の安全性基準を達成するため十分な実績がある開発保証プロセスと安全性検証を踏襲し、全体システムの要求確定から納入までの全体工程管理はウォーターフォール型を採用する。
- eVTOL のような前例のない新規の開発では、要求確定が難しい。そのために、サブシステムレベル要求を仮定して設計検討を行い、その仮説検証を行いながら開発を進めるアジャイル開発プロセスが必要である。
- eVTOL に適用する際の課題は、仮説検証をいかに素早く回せるかであり、サブシステムの境界設定とサブシステム間の相互作用を早い段階で見極めることが重要である。
- アイテムレベル検証結果によって、サブシステムレベル要求および全体システム（機体）レベル要求に遡って変更・追加する手戻り過程が最小となるよう、アイテムレベル開発前段までの要求トレース、すなわち全体システム要求からサブシステム要求への割り付け、要求の妥当性検証が極めて重要である。
- 短期間低コストでのアイテムレベルのソフトウェアの開発やハードウェア製造に対しては、アイテムの要求、設計、製造、検証の繰り返しプロセスとしてのアジャイル開発プロセスが有効である。

- 既存のアイテム（コンポーネント）を活用する場合は、安全性検証のため、および使用環境における実際の性能、機能、特性、インターフェイスを把握するため、試験による検証が重要であり、試験結果によるアイテムレベル要求を確定するプロセスが必須となる。

以上を踏まえ、第20図にeVTOLの開発に適用するハイブリッド開発の概要をまとめた。全体システムの要求設定から、検証までの全体工程管理はウォーターフォール型で、全体システム要求の確定までの仮説検証のアジャイル開発プロセスと、アイテムの要求設定、設計、製造、試験・検証を短期間で行うアイテム製造のアジャイル開発プロセスを織り込んだものである。アイテム製造でのアジャイル開発ではアイテムの繰り返しプロセスと、必要に応じた他のアイテムとのインターフェイス調整（第20図の赤線で示す）が行われる。このアイテム間のインターフェイス調整が頻度高くおこなわれることも提案するハイブリッド開発の特徴である。

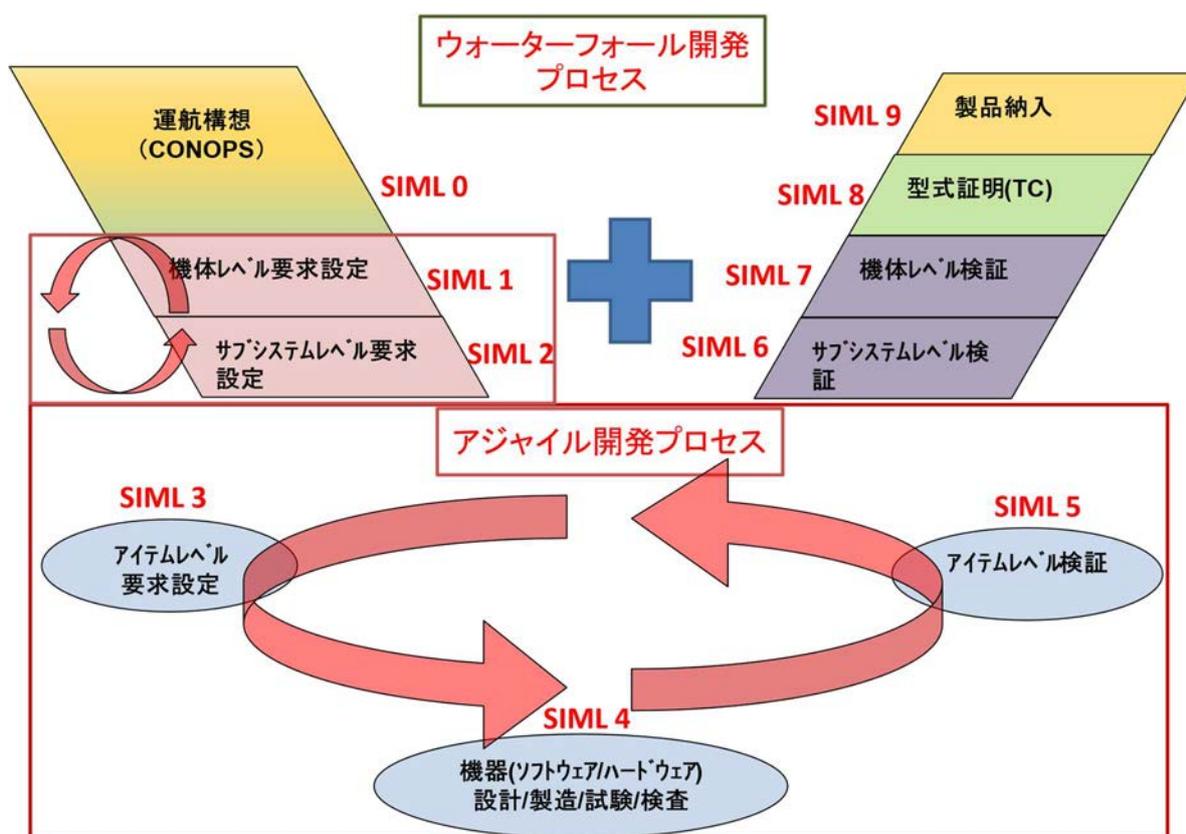


第20図 ハイブリッド型開発の概念

5.5 ハイブリッド型開発のシステムインテグレーション達成度について

旅客機のウォーターフォール型開発については4.2節でSIMLを提案した。5.1節でeVTOL開発においてCONOPSの立案は大変重要であることを述べた。ここでは先に提案したSIMLをeVTOLのハイブリッド開発に適用できるように、CONOPSの完了を追加した。概念図を第21図に示す。またSIMLを改めて定義した結果を第6表にまとめる。

新たに追加したレベル0は事業企画完了時点でのCONOPS策定完了，レベル1は事業開始時点での製品（全体システム）レベルの要求の確定と事業を構成する各分野のインターフェイスの確定，レベル2は構想設計完了時点でのサブシステムレベルの要求とインターフェイスの確定，レベル3は基本設計完了時点でのアイテムレベルの要求とインターフェイスの確定，レベル4はアイテム出荷時点でのアイテムレ



第21図 ハイブリッド型開発とシステムインテグレーション達成度指標 (SIML)

第6表 eVTOL のシステムインテグレーション達成度指標

レベル	Proposed System Integration Maturity Level (SIML)
0	事業企画完了時点で確定 ・ 運航構想 (CONOPS; CONcept of OPerationS)
1	事業開始時点で確定 ・ 製品 (全体システム) レベルの要求 ・ 事業を構成する各分野間のインターフェイス
2	構想完了時点 (PDR) で確定 ・ サブシステムレベルの要求 ・ サブシステム間のインターフェイス
3	基本設計完了時点 (CDR) で確定 ・ アイテム (構成品) レベルの要求 ・ アイテム (構成品) 間のインターフェイス
4	アイテム出荷までに完了 ・ アイテムのハードウェア/ソフトウェアの設計, 製造, 試験, 検査
5	サブシステム検証開始までに完了 ・ アイテムレベルの検証 (Verification)
6	製品 (全体システム) レベルの検査開始までに完了 ・ サブシステムレベルの検証 (Verification)
7	認定試験開始 (型式検査承認 TIA: Type Inspection Authorization) までに完了 ・ 製品 (全体システム) レベルの検証 (Verification)
8	認定 (型式証明 TC) 取得までに完了 ・ 試験, 解析, デモンストレーション ・ 運用方法認定
9	製品納入までに完了 ・ 運用使用許可 (耐空証明 Airworthiness) ・ 運用支援体制の確立

レベルのハードウェア/ソフトウェアの設計, 製造, 試験, 検査の完了, レベル 5 はシステム検証開始時点でのアイテムレベルの検証の完了, レベル 6 は全体システム検証開始時点でのサブシステムレベルの検証の完了, レベル 7 は認定試験開始時点での全体システムの検証の完了, レベル 8 は認定取得までの試験, 解析, デモンストレーション, ミッションの認定, レベル 9 は運用使用許可を得て, 実運用環境での確認, 運用支援体制の確立, 全体システムの納入と定義した。

ここでレベル 1~2 は仮説検証のアジャイル開発プロセス, レベル 3~5 はアイテム

レベル製造のアジャイル開発プロセスで、要求、設計、製造、試験・検証の反復繰り返しプロセスの収束した時にそれぞれレベルは確定することとする。この点が4.2節でのウォーターフォール型開発でのSIMLとの違いである。また、アジャイルプロセスの中では反復繰り返しプロセスが進むにつれ、要求の確定度が高まっていく。中間段階での進捗評価は、頻繁な情報交換と情報共有、調整、判断が必要であり、また、全体工程の中で、当該作業の残作業の予想期間などを確認する必要がある。

5.6 まとめ

本論文では前章まで、大規模高度複雑システムの代表としての旅客機開発を対象にシステムインテグレーションの実現の方策についての検討を重点的に進めてきた。この成果は2023年度に事業化が期待されている小規模簡素システムのeVTOLの開発にはそのまま適用することはできない。

そこで、本章では、小規模簡素システムを短期間低コストで開発することに適した開発プロセスを提案するため、まず初めに、要求設定、認証、開発方式、調達、システム成熟度指標、開発組織の観点で、大規模複雑システムの旅客機と小規模簡素システムのeVTOLの開発プロセスの差異の検討を行った。次に、今後の新たな航空機開発で適用が期待されるハイブリッド型開発プロセスについて検討を進めた。ハイブリッド型開発では、CONOPSの設定から製品納入までの全体工程の管理にはウォーターフォール型、ソフトウェアや新規の開発で、要求を確定できない、要求変更が頻繁に発生する、あるいは全体システム要求を決定するプロセスにアジャイル型を組み入れるというように両者を組み合わせた開発プロセスを提案した。eVTOL開発では高い安全性基準を満足する航空機を短期間低コストで開発する必要から、以下に示す特徴を取り入れたハイブリッド開発がふさわしい。

- ① eVTOLでは開発着手時に要求やインターフェイスが決まらず、後からの調整が必要になることを避けるための方策として、全体システム要求の決定プロセスに仮説検証アジャイルプロセスを取り入れること
- ② アイテム開発に関しては、要求とインターフェイスの調整を、時間をかけて行い、それに見合ったアイテムを開発するのではなく、要求、設計、試作、試験・検証を繰り返して開発していく短期間低コストのアジャイルプロセスがふさわしいこと
- ③ 安全性検証のためには旅客機開発で実績のある段階的インテグレーション手法のウォーターフォールプロセスでの開発が必要なこと

最後にハイブリッド開発プロセスを適用した場合のシステムインテグレーション達成度の評価について、従来提案した SIML をハイブリッド開発に適用できるよう達成度レベルを追加、レベルを再定義した。

今後はここで提案したハイブリッド開発プロセスの実開発での有効性検証、ハイブリッド開発プロセスに対するシステムインテグレーションの達成度の指標 SIML の適用要領について更に研究を進める必要がある。

第6章 システムインテグレーション能力を取得するための教育，および研究アプローチ

ここまで，旅客機完成機事業の特徴，事業の創出および持続的発展，ならびに技術開発上の特徴，課題および対処について工学領域からの研究について成果を述べてきた．大規模高度複雑システムである旅客機の開発での際立った特徴を再度述べると，

- ① 高い安全性基準（ 10^{-9} 件/飛行時間以下）の達成
- ② 型式証明の認証工程の困難さ・複雑さへの対応
- ③ 長期の開発期間/運用期間中の周辺環境の変化とそれらに対する対応

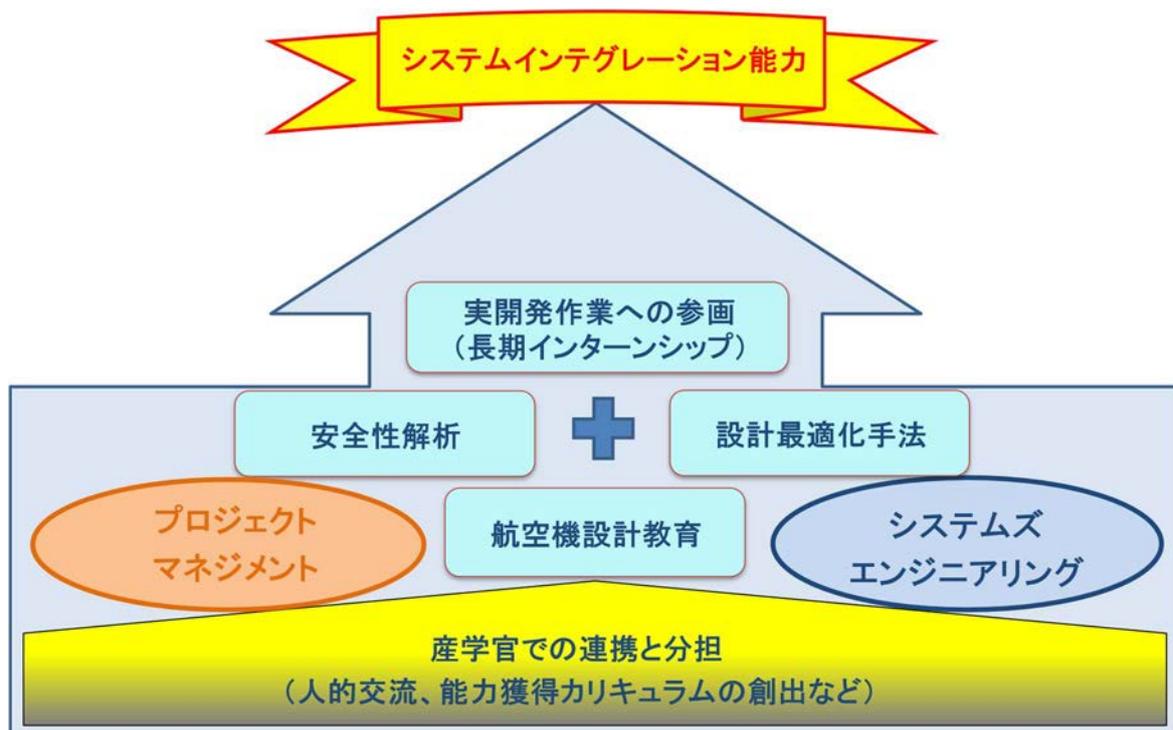
といった不確実性への対処が挙げられる．これらへの対処としては，第4図に示すV&Vに沿った，設計と検証のスパイラルな繰返しの開発保証プロセスおよび安全性検証プロセスにより，個々のサブシステムの機能，性能を組み合わせ，擦り合わせることでシステム全体として要求を満足させ，商品として旅客機を完成させるプロセス，すなわちシステムインテグレーションが必須である．一方，従来システムインテグレーションは暗黙知として会得されてきたものと考えられる．これから開発に従事する経験の浅いエンジニアへの伝承や開発実務の中で，システムインテグレーションを標準プロセスとして設定するためには，暗黙知の形式知化が必要である．本章ではこの形式知化の一つとしてシステムインテグレーション能力を取得するための工学教育，およびあらたな教育・研究の工学的アプローチを提案する．

6.1 システムインテグレーション能力を取得するための工学教育

従来，システムインテグレーションは開発を経験した技術者に暗黙知として継承されてきた．著者が提案するシステムインテグレーション達成度評価 SIML は形式知化の一つの試みであり，経験の浅い技術者への伝承を含め，多国籍，異文化の人員からなる開発組織で，システムインテグレーションを実現するために SIML を適切に運用することが航空機等の開発には極めて重要である．また 3.1 節で述べた通りシステムインテグレーション実現のためには，プロジェクトマネジメントの様々な手法や，システムズエンジニアリングにおける課題解決のためのプロセスを活用することが重要である．ここでは，システムインテグレーション能力を取得するための工学教育の必要性について述べる．これまでの教育は大学をはじめとする教育機関，および企業で，個々に行われてきたが，その能力獲得の具体的方策をまとめる．

- ① プロジェクトマネジメント
- ② システムズエンジニアリング
- ③ 航空機設計教育
- ④ 設計最適化手法 (Multidisciplinary Design Optimization (MDO))
- ⑤ 安全性解析手法
- ⑥ 実開発作業への学生の参画 (長期インターンシップ)

個々のアプローチはすでに多くの研究，文献がある．①のプロジェクトマネジメントについては参考文献[10]の **PMBOK Guide** が国際的に標準的なガイドとして広く認められている．日本プロジェクトマネジメント協会が発行する標準ガイドブック[17]は，プログラムマネジメントとプロジェクトマネジメントを区分し，それぞれの管理手法を説明しており，本論文はこれを採用している．②のシステムズエンジニアリングは参考文献[13]に詳しく述べられている．プロジェクトマネジメント，およびシステムズエンジニアリングのあらたな統合教育については参考文献[15]で述べられている．参考文献[47]によれば，航空宇宙工学ではシステムズエンジニアリングの研究と教育を実践でき，システム思考の考え方とその構築を身に着けられるものとして，大学での更なる教育・研究の充実の必要性が述べられているが，未だ十分には実践されていないと思われる．本学の航空宇宙工学のシステムインテグレーション教育・研究の充実が強く望まれる．



第 22 図 システムインテグレーション能力を取得するための工学教育

③の航空機設計教育は欧米の大学では充実しているが、著者の調査の限り、日本では東京大学でシステム統合化能力を教育するという目的で実施されているのみである[8,48]。特に、文献[48]では東京大学で実践されている航空機設計教育の例として、小型ジェット機やハイブリッド電動航空機などの概念設計が紹介されている。④の設計最適化手法は国産旅客機への実際の適用例が参考文献[49]で解説されている。多分野の設計、要素技術のシステムインテグレーションの有効なツールである。⑤については参考文献[50,51]に新たな安全性解析手法が紹介されている。これは最近の事故調査に参画した実績にもとづく、航空宇宙分野への適用が大いに期待される手法である。⑥の実開発作業への学生の参画は上記①～⑤の実践教育の場となるが、ようやく国産旅客機 SPACEJET M90 の開発チームでの長期インターンシップが開始された[52]。新たな試みである⑤については 6.2 節、⑥については 6.3 節で詳しく述べる。これら①～⑥については、現在までのところ全体として体系的に統制が取れた活動となっていない。今後、官界、学界、および産業界の連携と適切な分担が必要であり、第 22 図に示す体系的な教育・研究が必要と考える。

6.2 新たな教育・研究の工学的アプローチ - 安全性解析手法

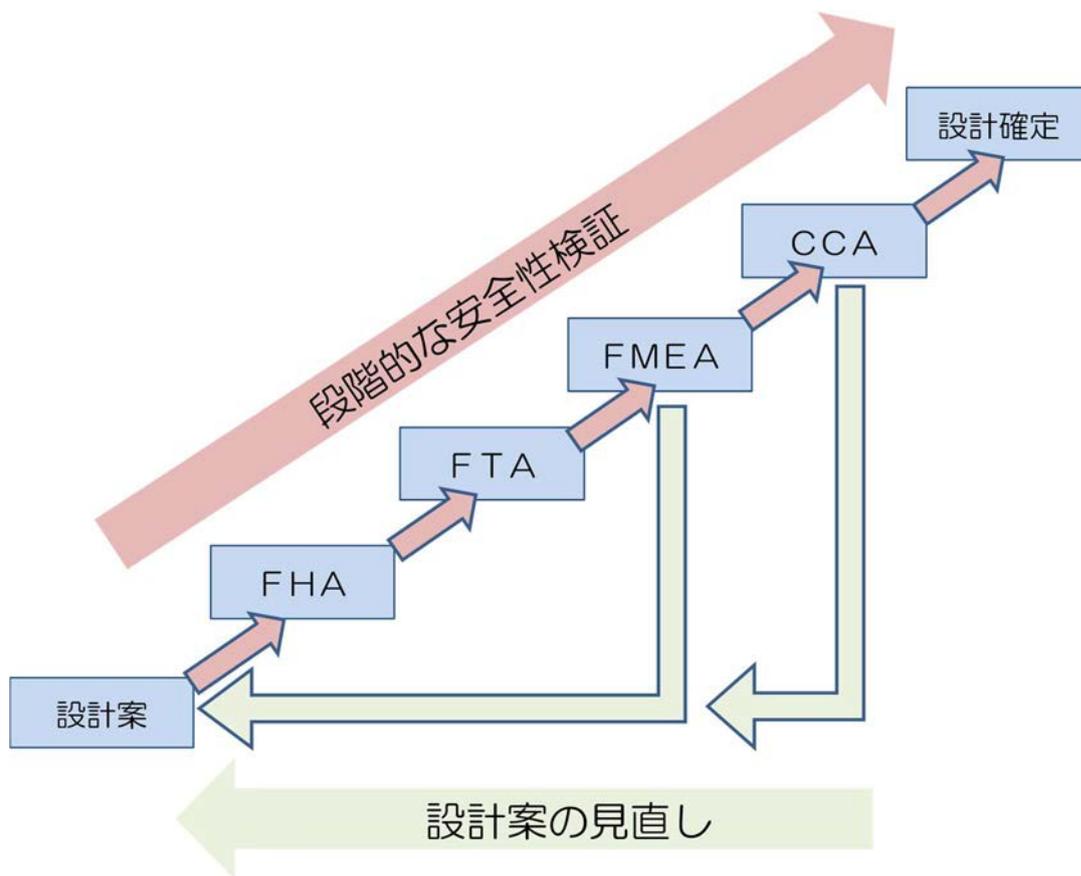
高い安全性を求められる航空機の開発で特に重要な、設計の妥当性確認の一つの手段である安全性解析についての新たなアプローチについて述べる。現在採用されている主な解析手法は第23図に示す通りである。

これらは検証対象のハードウェアを中心としたシステム構成要素の故障が事故を引き起こすと考え、その故障を最小化する信頼性工学的手法である。ここで、安全性検証の各プロセスの簡潔な説明を付記する。FHA (Functional Hazard Analysis)は機能上の異常事象を抽出して、機体に及ぼす影響と致命度を評価し、信頼度要求を設定する手法、FTA(Fault Tree Analysis)はFHAで抽出された異常事象のうち、機体への影響度がHazardous以上の深刻度のアイテムに対し、Fault Treeを作成し、発生確率を算出するトップダウン手法、FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)は構成要素の故障モードを抽出し、機体に及ぼす影響を評価するボトムアップ手法、CCA(Common Code Analysis)は共通要因により複数の機能が同時に喪失しないことを確認する手法である。民間航空機の安全性検証プロセス、開発保証プロセスについては参考文献[53]に詳しく述べられている。

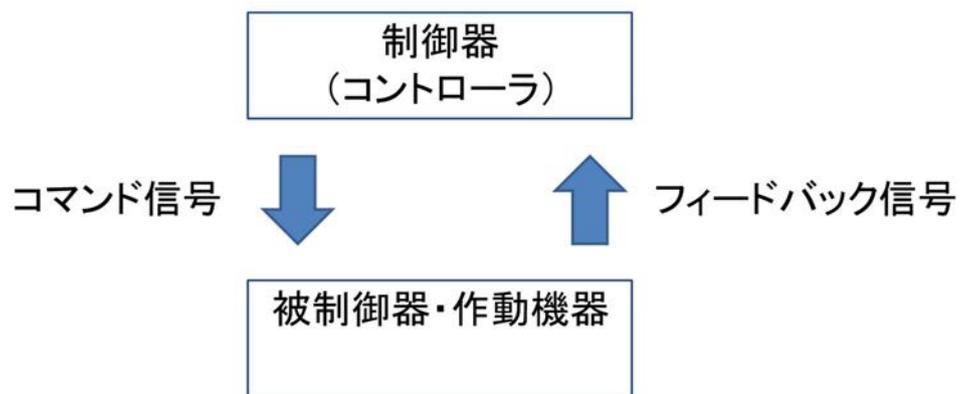
近年、旅客機などの複雑システムについても性能・機能要求をソフトウェアにより実現することが多くなっている。また、eVTOLなどのこれからの新たな開発では従来以上にソフトウェアによる性能・機能実現がますます期待される。そのため、ハードウェアに故障が生じていなくても、ハードウェア間の信号インターフェイス（ソフトウェアで実現することが多い）に問題が生じて、システムの故障につながる事例が発生している[51]。そこで、先に示した従来の手法に加えて、ソフトウェアを含めたシステムの安全性検証の新手法の確立が必須である。

その一例として、第24図に示すように、現代のシステムのアクシデントの多くは、システムの中で安全のための制御を行う要素（コントローラ）と制御される要素（被制御器・作動機器）の相互作用が働かないことによって起きるというアクシデントが多いと考えられる。

このモデルを用いた手法がSystems Theoretic Accident Model and Processes (STAMP)とSystem Theoretic Process Analysis (STPA)である[50]。STAMPはシステム理論に基づく新しい安全性分析方法論であり、解析モデル・手法の理論である。STPAはシステムのハザード要因を分析する新しい安全性解析手法である。これらは、従来以上にソフトウェアによる性能・機能実現がますます期待される、全電気航空機、eVTOLなどのこれからの開発の新たな安全性解析のガイドラインとなり得る。今後、多くの研究と実用化の取り組みが必要である。



第 23 図 安全性検証のプロセス



第 24 図 STAMP における相互作用のモデル

6.3 新たな教育・研究の工学的アプローチ - 実開発作業への学生の参画（長期インターンシップ）

システムズエンジニアリング思考とシステムインテグレーション能力を取得するための有効な手段と考える，航空宇宙システムの実開発作業への学生の参画について述べる．長期インターンシップとして実開発作業への学生の参画は現在まで，我が国の航空宇宙関連企業では行われてこなかった．このような教育は企業内で蓄積されてきた経験，知識などの暗黙知がOJT(On the Job Training)の形で実施され，システムズエンジニアリング思考とシステムインテグレーション能力は継承されてきた．この状況に対し，ようやく 2018 年から(株)三菱航空機で長期インターンシップが開始された[52]．この長期インターンシップは学生自身の教育育成のみならず，大学，企業の双方の付加価値として以下の点が期待される．それは大学から見て，学生の教育育成と，実開発業務から得た知見の大学の研究，教育へのフィードバックである．一方，企業から見て，最先端研究情報の入手と将来の R&D 計画の検討，共同研究候補の洗い出しが期待される．繰り返しになるが，システムインテグレーション能力を取得するためには，第22図に示す長期インターンシップを含めた体系的な教育による人材育成が必要である．

6.4 まとめ

結論を以下に簡潔にまとめる．大規模高度複雑システムである旅客機の開発での際立った技術上の特徴は，高い安全性基準の達成，型式証明の認証工程の困難さ・複雑さへの対応，周辺環境，要求の変化といった不確実性が挙げられるが，これらへの対処として，システムインテグレーションが必須となる．本章ではこのシステムインテグレーション実現のための工学的アプローチの必要性を示した．具体的方策としてはプロジェクトマネジメント，システムズエンジニアリング，航空機設計教育，設計最適化手法，安全性解析手法，実開発作業への学生の参画（長期インターンシップ）である．これまでのアプローチは個々に行われてきたが，全体として統制が取れた活動となっていない．今後，個々の教育・研究の充実，進化とともに官界，学界，および産業界の連携と適切な分担が必要となる．新たな教育・研究の工学的アプローチとして，従来以上にソフトウェアによる性能・機能実現がますます期待される，全電気航空機，eVTOLなどのこれからの開発の新たな安全性解析のガイドラインとなり得るものとして，STAMP，STPAによる新しい安全性解析手法を

示した。今後，多くの研究と実用化の取組みが必要である。最後にシステムズエンジニアリング思考とシステムインテグレーション能力を取得するための有効な手段と考える，航空宇宙システムの実開発作業への学生の参画について述べた。この長期インターンシップは学生自身の教育育成のみならず，大学，企業の双方の付加価値を生み出すものと期待される。更なる発展が望まれる。

第7章 結 論

本論文では航空機の技術開発に必須の極めて重要な役割を果たすシステムインテグレーション実現のための方策について提言した。これは航空機開発の包括的な開発プロセスの設定の資となる。

第1章では、本論文の導入として、旅客機完成機事業および技術開発の特徴と、本論文の目的について述べた。

第2章では、航空機の技術開発、事業企画、営業、契約、リース、ファイナンス、量産製造、サプライチェーン・マネジメント、カスタマ・サポート、等の各分野を鳥瞰した完成機事業の特徴についてまとめた。次に旅客機の開発プログラムの特徴、課題について、プロジェクトマネジメント、大規模高度複雑システムのシステムインテグレーション、要素技術の発掘と新規開発、大規模開発試験設備インフラの建設と有効活用、および高い安全性基準を満足させるための型式証明、安全性検証、開発保証、耐空性に関して検討を行い、航空機開発上の課題と対策について述べた。これらへの対応が極めて重要である。旅客機の開発プログラムの課題と対応の中で特徴的であり、航空機開発において関連するすべての技術活動を統合化するために、航空機開発において極めて重要になるのは大規模高度複雑システムのインテグレーションの実践である。

第3章ではまず初めに従来明確にされてなかったシステムインテグレーションについてプロジェクトマネジメント、およびシステムズエンジニアリングの観点からの考察を示し、定義した。プロジェクトマネジメントとシステムズエンジニアリングはそれぞれ、教育と研究が進化してきた。またこれらの相互関係について述べた論文もあるが、本論文ではこれらを統合的にシステムインテグレーションを実現するといった観点で整理した。これは暗黙知の形式知化の試みである。航空宇宙工学分野で最重要とされるシステムインテグレーションであるが、今後の情報社会のモジュール構造型の産業組織への移行に際し、モジュール型開発におけるインテグレーションについて述べた。

次にシステムインテグレーションを実現する開発組織について、基本設計思想、日本における開発組織の変遷の実例、および実例を用いた設計思想の検証、サブプロジェクト方式を取り入れた開発組織について検討を行った。大規模組織における組織内外とのコミュニケーション量の増加に対応する開発組織の典型的な例として、強いファンクション組織（縦糸）とプロジェクトマネジメントおよびシステム

インテグレーション組織（横糸）で構成されたIPTマトリックス組織が航空宇宙・防衛産業に導入されている。IPTマトリックス組織は、民間航空機開発のような大規模開発に適している。しかしIPTマトリックス組織の規模は通常、非常に大きく、開発コストの増加につながる。さらに、プログラムの多様性、拡張性、複雑性、不確実性などに応じて組織やWBS、RAAが頻繁に変更される可能性がある。費用対効果が高く、パフォーマンスとコストを両立させる強力なマトリックス組織が今後、さらに研究が進むことが期待される。最後にeVTOL開発のような短期間低コスト開発に適用されると予想される自律型機能組織+少数精鋭プロジェクトの例としてサブプロジェクト方式を取り入れた開発組織を示した。

第4章では日本における航空機開発の実績、経験を踏まえたシステムインテグレーション達成度の評価指標として、従来提唱されてきた技術達成度の評価指標（TRL）、インテグレーション達成度の評価指標（IRL）、システム成熟度の評価指標（SRL）の有効性と問題点を評価し、その限界を明確にした。それら指標を参考に、システムインテグレーション達成度の評価指標に設計プロセスと重要イベントのタイミングを組み入れることを試み、旅客機の開発保証プロセスのガイドラインとして広く認識されているV&Vプロセスをベースとした新たなシステム成熟度の達成度評価指標としてSIMLを提案した。最後に、過去のプロジェクトについて、簡易的に評価し、提案したSIMLが有効であることを示した。

SIMLの有効性を検証するため、今後実現が期待されるeVTOLに対し詳細評価することが必要である。また、SIMLレベル4以降の検証段階の試験、解析、デモンストレーションなどで判明した不適合や改善事項は適切に設計へフィードバックし、設計変更を実施することが必要となり、設計の妥当性確認再評価、再検証が必要となる。したがって、これら再評価、再検証を考慮したシステムインテグレーション達成度評価について検討が必要である。またウォーターフォール型開発、すなわち、製品のコンセプト策定からサブシステム、アイテムまでの設計、試作、検証という工程を順に実行していく開発から、アジャイル型開発、すなわち、ソフトウェア開発などに適用される製品より小さい単位のサブシステム、アイテム毎で、設計、試作、試験・検証を同時並行、かつ反復する開発に対応したシステムインテグレーション、これらに対応するシステムインテグレーション達成度評価についても研究する必要がある。なお、SIMLはシステム開発時のシステムインテグレーションの達成度の指標であり、レベル9を達成し、全体システムを納入した後の、実運用フィードバックによるシステムの改善、改良による全体システムの成熟度の評価は、ここで提案したSIMLに新たなレベルやフィードバックのプロセスを考慮した達成度レベルの再定義をすることも研究の一つの方向性と考える。

第5章では今後の新たな航空機開発、たとえば、eVTOLの開発に活用されることが大いに期待される開発方式について、それに適応する開発プロセスとしてハイブリッド型開発方式を提案し、更にハイブリッド型開発方式に適用可能なシステムインテグレーション達成度の評価指標を提案した。小規模簡素システムを短期間低コストで開発することに適した開発プロセスを提案するため、まず初めに、要求設定、認証、開発方式、調達、システム成熟度指標、開発組織の観点で、大規模複雑システムの旅客機と小規模簡素システムのeVTOLの開発プロセスの差異の検討を行い、今後の新たな航空機開発で適用が期待されるハイブリッド型開発プロセスについて検討を進めた。ハイブリッド型開発では、CONOPSの設定から製品納入までの全体工程の管理にはウォーターフォール型、ソフトウェアや新規の開発で、要求を確定できない、要求変更が頻繁に発生する、あるいは検証により要求を確定するシステムではアジャイル型というように両者を組み合わせた開発プロセスを提案した。eVTOL開発では高い安全性基準を満足する航空機を短期間低コストで開発する必要から、以下に示す特徴を取り入れたハイブリッド開発がふさわしい。

- ① eVTOLでは開発着手時に要求やインターフェイスが決まらず、後からの調整が必要になることを避けるための方策として、仮説検証アジャイルプロセスを取り入れること
- ② アイテム開発に関しては、要求とインターフェイスの調整を、時間をかけて行い、それに見合ったアイテムを開発するのではなく、要求、設計、試作、試験・検証を繰り返して開発していく短期間低コストのアジャイルプロセスがふさわしいこと
- ③ 安全性検証のためには旅客機開発で実績のある段階的インテグレーション手法のウォーターフォールプロセスでの開発が必要なこと

ハイブリッド開発プロセスを適用した場合のシステムインテグレーション達成度の評価について、従来提案したSIMLをハイブリッド開発に適用できるよう達成度レベルを追加、レベルを再定義した。

今後は論文で提案したハイブリッド開発プロセスの実開発での有効性検証、ハイブリッド開発プロセスに対するシステムインテグレーションの達成度の指標SIMLの適用要領について更に研究を進める。

第6章ではシステムインテグレーション能力を取得するための教育、および研究アプローチをまとめた。これまでの教育個々に行われてきたが、全体として統制が取れた活動となっていない。今後、官界、学界、および産業界の連携と適切な分担が

必要となる。また、従来以上にソフトウェアによる性能・機能実現がますます期待される、全電気航空機、eVTOLなどのこれからの開発の新たな安全性解析のガイドラインとなり得るものとして、STAMP、STPAによる新しい安全性解析手法を示した。今後、多くの研究と実用化の取り組みが必要である。最後にシステムズエンジニアリング思考とシステムインテグレーション能力を取得するための有効な手段と考える、航空宇宙システムの実開発作業への学生の参画について述べた。この長期インターンシップは学生自身の教育育成のみならず、大学、企業の双方の付加価値を生み出すものと期待される。更なる発展が望まれる。

最後に、第7章では本論文の結論および航空機開発におけるシステムインテグレーションをさらに充実させるための課題を述べた。

参 考 文 献

- [1] 伊藤一彦, 佐倉潔, 田浦伸一郎, 小林真一: 次世代産業としての航空機産業, MRJの取り組み, 一橋ビジネスレビュー, 65 (4),2018SPR., 東洋経済新聞社, pp. 60–80, 2018.
- [2] <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20200206/k10012274921000.html> (accessed on February 6, 2020).
- [3] <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20201216/k10012766271000.html> (accessed on April 9, 2021).
- [4] Altfeld, H-H.: Commercial Aircraft Projects, Managing the Development of Highly Complex Products, Ashgate Publishing, 2010.
- [5] 篠崎彰彦: イノベーションの奔流とグローバル経済の発展: 過去四半世紀の軌跡と今後予想される変容 (研究・イノベーション学会バージョン), 研究技術計画. 32 (1), pp.21-38, 2017.
- [6] 鈴木真二: 次世代産業としての航空機産業, 航空機産業を俯瞰する, 一橋ビジネスレビュー, 65巻4号, 2018年SPR., 東洋経済新聞社, pp. 8–21, 2018.
- [7] 渋谷 容: 次世代産業としての航空機産業, 航空機産業をめぐるビジネス, 一橋ビジネスレビュー, 65 (4),2018SPR., 東洋経済新聞社, pp. 22–43, 2018.
- [8] 東京大学大学院航空宇宙工学専攻 HP, <https://aerospace.t.u-tokyo.ac.jp> (accessed on March 1, 2019).
- [9] 神田國一: 主任設計者が明かす F-2戦闘機開発, 並木書房, 2018.
- [10] Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) Sixth Edition, 2017.
- [11] Hecker, M. L.: Setting Up and Managing Integrated Product Teams, Proceedings of the Project Management Institute Annual Seminars and Symposium September 7-16, 2000.
- [12] Guarro, S. B., Yau, M. K., Ozguner, U. O., Aldemir, T., Kurt, A. Hejase, M. and Knudson, M. D.: Formal Framework and Models for Validation and Verification of Software-Intensive Aerospace Systems, AIAA SciTech, 2017.
- [13] NASA, NASA Systems Engineering Handbook, NASA/Sp-2007-6105 Rev.1, 2007.
- [14] SAE, Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems ARP4754 A, 2010.
- [15] 井上雅裕, 長谷川浩志: 発展型プロジェクト演習と連携したシステム工学教育, 工学研究, Journal of JSEE, 58, 1,pp1_89-1_94, 2010.

- [16] 梅田富雄：プロジェクトに関わるシステムエンジニアリング方法論の展開，
Journal of the International Association of Project&Program Management
Vol.3No.2, pp.125 -134, 2009.
- [17] プログラム&プロジェクトマネジメント，標準ガイドブック改訂3版，日本プロジェクトマネジメント協会，2014.
- [18] 室津 義定，大場 史憲，米澤 政昭，藤井 進，小木曾 望：システム工学(第2版)，森北出版株式会社，2006.
- [19] 日本自動車工業会，“2017年 世界各国/地域の四輪車生産台数”，
(http://www.jama.or.jp/world/world/world_t2.html)
- [20] 日本経済新聞記事，“パソコン世界出荷台数2017年，2018年1月12日，
(<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO25597460S8A110C1000000/>)
- [21] IDC記事，“スマートフォン出荷台数2018年”，2019年1月30日，
(<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS44826119>)
- [22] 日本航空機開発協会，“主要民間輸送機の受注納入状況”，YGR-9001-1906, 2019.
- [23] Hecker, M. L.: Setting Up and Managing Integrated Product Teams, Proceedings of the Project Management Institute Annual Seminars and Symposium September 7-16, Houston, Texas, USA, 2000.
- [24] 柳田 邦男：零式戦闘機，文春文庫，1977.
- [25] Meister, D.P.L.: Integrated product team implementation and leadership at the program level”, Master’s Thesis of Naval Postgraduate School, 1996
- [26] Rowels, C. M.: System Integration Analysis of a large commercial Aircraft Engine”, Master’s Thesis of MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999.
- [27] 三菱航空機ニュースNo.70:機構改革 1st Jan. 2018, dated Dec. 27,2017.
<https://www.mhi.com/jp/group/mitac/news/2017/20171227.html>
- [28] 帝国データバンク，第9回 東海3県の航空機産業動向調査，2018.
https://www.tdb.co.jp/report/watching/press/s181102_40.html
- [29] Sauser, B., Gove, R., Forbes, E., and Ramirez-Marquez, J. E.: Integration maturity metrics: Development of an integration readiness level, Information Knowledge Systems Management, 9, pp. 17-46, 2010.
- [30] Sauser, B., Verma, D., Ramirez-Marquez, J., and Gove, R.: From TRL to SRL: The concept of Systems Readiness Levels, Conference on Systems Engineering Research (CSER), 2006.
- [31] Tetlay, A. and John, P.: Determining the lines of system Maturity, System Readiness and Capability Readiness in the System Development Lifecycle, 7th Annual

- Conference on Systems Engineering Research, 2009.
- [32] Hsu, J. and Curran, R. eds.: *Advances in Systems Engineering, Progress in Astronautics and Aeronautics*, 256, AIAA, 2016.
- [33] Shenhar, A., Holzmann, V., Melamed, B., and Zjao, Y.: *The Challenge of Innovation in Highly Complex Projects: What Can We Learn from Boeing's Dreamliner Experience?* *Project Management Journal*, 47, 2, pp. 62-78, 2016.
- [34] <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/nmc/18/00011/00059/>(accessed on July 18, 2020).
- [35] Rigby, D. K., Sutherland, J., and Noble, A.: *アジャイル 全社展開の実践法, ハーバードビジネスレビュー*, 2018年10月号, pp. 88-96, 2018.
- [36] SkyDrive, <https://skydrive2020.com/> (accessed on May 8, 2021).
- [37] Liliun GmbH, <https://liliun.com/investors> (accessed on May 8, 2021).
- [38] Joby Aviation, <https://www.jobyaviation.com/investor-relations/> (accessed on May 8, 2021).
- [39] Archer, <https://www.archer.com/> (accessed on May 8, 2021).
- [40] 運輸省航空局, 耐空性審査要領, https://www.asims.mlit.go.jp/fsdb/a_taikushinsa.nsf (accessed on May,8, 2021).
- [41] VanderLeest, S. H. and Buter, A.: *Escape the waterfall: agile for aero-space*, *IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference*, pp. 6.D.3-1 - 6.D.3-16, 2009.
- [42] 荒井 俊晴, 竹内 弘範, 朝岡 勝, 磯村 大誠, 神原 俊一郎: *大規模システム開発における改良版Agile開発プロセスの効果について : Water-FallとAgile開発を組み合わせたハイブリッドプロセスの提案*, *プロジェクトマネジメント学会研究発表大会予稿集*, Autumn(0), pp.238-242, 2011.
- [43] Guarro, S. B., Yau, M. K., Ozguner, U. O., Aldemir, T., Kurt, A. Hejase, M. and Knudson, M. D.: *Formal Framework and Models for Validation and Verification of Software-Intensive Aerospace Systems*, *AIAA SciTech*, AIAA, 2017.
- [44] Ullman, D. G. and Tarbutton, J.: *Scrum for Hardware and Systems Development*, 2019, <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21837829/scrum-for-hardware-and-systems-development> (accessed on May 8, 2021).
- [45] Lindlöf, L. and Furuhjelm, J.: *Agile Beyond Software –A Study of a Large-Scale Agile Initiative*, *International Design Conference*, pp. 2055-2062,2018.
- [46] Cooper, R. G.: *Agile-Stage-Gate Hybrids: The Next Stage for Product Development* *Blending Agile and Stage-Gate methods and can provide flexibility, speed, and improved communication in new-product development*, *Research-Technology*

Management, 59, pp. 21-29, 2016.

- [47] 棚次亘弘：大学におけるシステムズエンジニアリング教育・研究の必要性和効果，JSASS-2018-S4008，第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集，2018.
- [48] 李家賢一：航空機設計法 実践編，小型ジェット機からハイブリッド電動航空機の概念設計まで，コロナ社，2020.
- [49] 畑中圭太，森野裕行，竹中啓三，大林茂，鄭信圭，熊野孝保：自己組織化マツプの国産旅客機多分野統合最適設計への適用事例紹介，可視化情報学会誌，pp. 167-170，27 (Suppl. 2)，2007.
- [50] Leveson, Nancy G.: A New Accident Model for Engineering Safer Systems, Safety Science, 42 (4), pp. 237-270, 2004.
- [51] はじめての STAMP/STPA～システム思考に基づく新しい安全性解析手法～，独立行政法人情報処理推進機構，2016.
- [52] 第 50 回航空宇宙学会年会パネルディスカッション，「航空における実務専門高等教育の体制構築に向けて～長期インターンシップを核とした産学連携の推進」，2019.
- [53] 篠田和秀：民間航空機の安全・開発保証プロセスについて-MRJ開発における取組みー（公開用抜粋版），NAM06739NC，第11回クリティカルソフトウェアワークショップ，January 16，2014.

謝 辞

本研究の遂行および本論文をまとめるにあたり，我が国での航空宇宙分野の研究において従来取り組まれて来なかった，航空機開発におけるシステムインテグレーションの実現の方策に対する研究に対し，新たな研究分野の創出の機会を作っただけ，また辛抱強い高視座，高視野からのご指導とご鞭撻，貴重なご意見とアドバイスを賜り，さらには社会人特別選抜の私の研究が可能となるよう研究環境を整えていただきました大阪府立大学大学院工学研究科新井隆景名誉教授に深く感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

本論文をまとめるにあたり，主査を務めて頂くとともに，航空機の設計，システムズエンジニアリングなどの観点からの有益なご指導とご助言およびご検討を賜りました大阪府立大学大学院工学研究科小木曾望教授に心から感謝の意を表します。

また，同研究科千葉正克教授，下村卓教授，辻井利昭教授，森澤和子教授には，本研究および論文について有益なご助言ならびにご検討を賜りました。ここに感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり，航空機の開発を一緒に進め，また研究および論文の作成に際し，貴重なアドバイスを頂きました（株）三菱重工業，（株）三菱航空機，（株）SkyDriveの諸氏にお礼申し上げます。

最後に私の全くの我儘にもかかわらず，会社員を続けながら大学院への進学を許し，研究を進めることにあたり，日々の生活をサポートし，我儘を受入れ，不規則になりがちな生活を支えてくれた妻と，大学院への進学を後押ししてくれた娘，息子，最後に，これまで様々な面でサポートして下さった数多くの方々に，心から感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

論文の基礎となる発表論文

No.	論文題目	著者名	発表誌名	本論文との対応
1	Methodology and organizational design to realize the system integration necessary for the development of commercial aircraft	Kishi, N. Kogiso, N. Morizawa, K. Shimomura, T. Tsuji, T. Chiba, M. Arai, T.	Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2019), pp. 866-877, (Gold Coast, Australia, 2019).	第2章 第3章
2	Methodology and organizational design to realize the system integration necessary for the development of commercial aircraft	Kishi, N. Kogiso, N. Morizawa, K. Shimomura, T. Tsuji, T. Chiba, M. Arai, T.	Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 19, No. 1, pp.1-8, 2021.	第2章 第3章
3	システムインテグレーション達成度の新しい評価手法の提案	岸 信夫 小木曾 望 新井 隆景	航空宇宙技術, 日本航空宇宙学会 Vol. 20. pp. 69-72, 2021.	第4章
4	eVTOL Vehicle に適したハイブリッド開発プロセスの提案	岸 信夫 小木曾 望 新井 隆景	航空宇宙技術, 日本航空宇宙学会 accepted for publication, 2021.	第5章 第6章