

2023年9月9日

H3ロケットと三菱スペースジェットの失敗

～ 性能発注方式の真髄を零戦開発に学び直すことが必要 ～

澤田雅之技術士事務所(電気電子部門)所長
元警察大学校警察情報通信研究センター所長

澤田 雅之

【 目 次 】

I H3ロケットの打上げ失敗

- I-1 H3ロケット開発への教訓として活かされなかった、X線天文衛星「ひとみ」の大失敗
- I-2 H3ロケットの開発に至るまで ～ H-II A/II B、アリアン5、ファルコン9の動向
- I-3 H3ロケットの開発経緯
- I-4 H-II B官民共同開発実績が活かされなかった、H3ロケット開発体制上の問題点

II 三菱スペースジェットの開発失敗

- II-1 商用運航に欠かせない「耐空証明」と「型式証明」
- II-2 民間航空機製造における三菱重工業の実績
- II-3 三菱スペースジェット、20年間の軌跡
- II-4 三菱スペースジェット失敗の根源 ～ 経済産業省、国土交通省、三菱重工業のいずれも、性能発注方式の取組み方ができなかったこと

III 【参考】零戦と烈風に学ぶ性能発注方式の真髄

- III-1 20世紀の世界地図を塗り替えた零戦は、見事な性能発注方式の賜物
- III-2 零戦が成功した秘訣は、発注側での「ニーズとシーズのベストマッチング」と、受注側での「トップダウンによる全体最適化」
- III-3 零戦の後継機「烈風」の開発計画は、受注者に委ねるべき設計に発注者が口出しして破綻

I

H3ロケットの打上げ失敗

ソフトウェアによる制御機能の信頼性を確保するには
性能発注方式の取組み方が必要

打上げに失敗したH3ロケット開発上の問題点

* 製造図面を審査する設計審査会ではソフトウェアが審査できない *



2023年2月17日に打上げ中止となったH3ロケット
(出典: JAXAのHP)

2023年3月7日の打上げに失敗したH3ロケットは、三菱重工業をプライムコントラクターとする民間企業に、その開発から製造までをJAXAが委託

➡ 欧米の常識からすれば、プライムコントラクターに委ねるべき設計には発注者は立ち入らない「真の性能発注方式」で委託するところ

しかし、



JAXAは、H3ロケットの製造に先立ち、東大宇宙航空研究所由来の設計審査会でメカニカルな詳細設計(製造図面)を審査

➡ 今日では、ロケットの信頼性に関わる制御機能をソフトウェアで実現しているが、ハードウェアに組み込まれたソフトウェアの動作や信号の流れを製造図面から確認することはできないので、ソフトウェアで実現している機能・性能やその信頼性を設計審査会で審査することは困難

その結果、


次のページへ


その結果、 前のページから

- 2023年2月17日、**H3の固体ロケットブースターに点火せず、打上げを中止**
 原因は、地上系制御回線をロケットから切り離す際に発生した電磁雑音により、エンジン制御ユニットが誤作動して電源断(ソフトウェアのエラー)
- 2023年3月7日、**H3の第2段ロケットエンジンに点火せず、打上げに失敗**
 第2段エンジンの制御もソフトウェア抜きでは考えられないため、ソフトウェアについての審査ができないJAXAの設計審査会では、今日のロケットの信頼性や安全性についての審査ができていない。

性能発注方式の取組み方が必要 

ソフトウェアが機能・性能や信頼性を大きく左右する場合には、「この製造図面どおりに作ってくれ」といった仕様発注方式の取組み方が適するはずもなく、「**このような機能・性能、信頼性を備えたものを作ってくれ**」といった**性能発注方式の取組み方**でなければ対処困難

 それゆえ、**設計審査会を要求要件審査会に変更**して、ロケットが備えるべき機能・性能や信頼性についての要求要件について、要求水準書の記載内容を審査する体制とすることが必要

 **JAXAが開発したX線天文衛星「ひとみ」の大失敗(2016年3月)が、H3の開発に向けた教訓として、ほとんど活かされていない。**

I - 1

H3ロケット開発への教訓として活かされなかった
X線天文衛星「ひとみ」の大失敗

国際協力ミッションだったX線天文衛星「ひとみ」の喪失



出典：X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」異常事象調査報告書

2016年3月、米国航空宇宙局や欧州宇宙機関等との国際協力ミッションだったX線天文衛星「ひとみ」は、打上げ成功の約40日後に、ソフトウェアのバグとデータの誤入力が原因となり、異常回転を生じてバラバラに分解

➡ 「ひとみ」の代替機は、衛星搭載機器に生じた原因不明事象により、打上げが大幅に遅延

事前審査に問題

「ひとみ」を打上げたJAXAの宇宙科学研究所は、前身の東大宇宙航空研究所の伝統を受け継ぎ、衛星の開発は仕様発注方式の取組み方のまま。つまり、JAXAの設計審査会で、メカニカルな設計の細部審査を行い、審査をパスした製造図面に基づき衛星を製造

➡ 東大宇宙航空研究所の時代は、衛星の機能・性能や信頼性がメカニカルな設計に左右されていたため、設計審査会での製造図面審査は大きな意味を持っていた。

しかし、

次のページへ

前のページから

しかし、



今日では、ソフトウェアが衛星の機能・性能や信頼性を大きく左右。ところが、設計審査会では、ハードウェアに組み込まれたソフトウェアの動作や信号の流れを製造図面から判断することはできないので、ソフトウェアで実現している機能・性能や信頼性について確認することは困難

➡ それゆえ、「ひとみ」は、設計審査会での詳細設計審査(製造図面の審査)で、**衛星本体の性能や信頼性が十分に確認できないままに製造され、打ち上げられてしまった。**

性能発注方式の取組み方が必要



ソフトウェアが機能・性能や信頼性を大きく左右する場合には、「この製造図面どおりに作ってくれ」といった仕様発注方式の取組み方が適するはずもなく、「**このような機能・性能を備えたものを作ってくれ**」といった**性能発注方式の取組み方**でなければ対処困難

➡ そこで、**設計審査会を要求要件審査会に変更**して、衛星に備えるべき機能・性能や信頼性についての要求要件(衛星の安全性や信頼性を確保すること、天体観測の精度と時間を確保すること、など)について、**要求水準書の記載内容を審査する体制**とすることが必要

I - 2

H3ロケットの開発に至るまで
H-II A/II B、アリアン5、ファルコン9の動向

H-II A 我が国の宇宙開発を支えてきた基幹ロケット

*** 信頼性は高いが、打上げ費用が欧米に比べて割高 ***

- NASDA(宇宙開発事業団、JAXAの前身)が開発して、三菱重工業が製造
- 開発費用は約1532億円で、1回の打上げに要する費用は85～120億円程
- 静止トランスファー軌道に、最大6tの衛星を打上げ可能



H-II Aロケット (出典はJAXAのHP)



- 2001年の初打上げから47回打上げられ、失敗は1回のみ
 - 13号機から、打上げ事業は三菱重工業に移管
 - 2024年度に運用停止の予定
- ➡ 1回の打上げに要する費用を50億円程に低減したH3ロケットにバトンタッチ

アリアン5 欧州の宇宙開発を支えてきた基幹ロケット

* ファルコン9が登場するまで、商業衛星打上げ市場でトップシェア *



アリアン5
(出典は欧州宇宙機関のHP)

- ESA(欧州宇宙機関)が開発し、エアバス社の子会社が製造して、アリアンスペース社が打上げ事業を担っている。
- 高度約300kmの円軌道に最大20.7tの衛星、静止トランスファー軌道に最大10.5tの衛星を打上げ可能
- 大型のロケットで、1度に2基の静止衛星を打上げ可能 → このため、約200億円のロケット打上げ費用は、静止衛星1基あたりでは約100億円となり、H-IIAよりも割安
- 1997年の初打上げ成功以来、高い成功率と多くの衛星打上げ実績を有している。 → しかし、近年では、アリアン5よりも割安な米国のファルコン9に商業衛星打上げ市場のトップシェアを奪われている。

そこで、

アリアン5と比べて、打上げ費用が安価で打上げ能力(静止トランスファー軌道に最大12tの衛星を打上げ可能)も大きいアリアン6を開発中であり、2023年中に初打上げの予定

ファルコン9 米国スペースX社が開発したロケット

**** 今日の商業衛星打上げ市場でトップシェア ****

- **スペースX社がNASAの支援のもとで開発して、打上げも実施**
- 低周回軌道に最大22.8tの衛星、静止トランスファー軌道に最大8.3tの衛星を打上げ可能
- 2010年に初打上げに成功して、これまでに200回近く打上げられた(失敗は2回)。
- 国際宇宙ステーションへの物資補給にも使用。低価格で民間通信衛星打上げ市場でシェア拡大

第1段ロケットを再利用



ファルコン9の打上げと第1段ロケットの軟着陸
(出典は米国スペースX社のLinkedIn投稿画像)

- 第1段ロケットの製造費用は、打上げ費用の約6割を占めるため、**第1段ロケットを緻密な姿勢制御と逆噴射により軟着陸させて再利用**している。(2017年に再利用を開始し、これまでに同一ロケットを最大10回再利用した実績がある。)
- 打上げ能力はH-IIAよりも大きいですが、打上げ費用はH-IIAよりも安価(第1段ロケットを再利用しない場合で90億円程度、再利用した場合には大幅に低減)

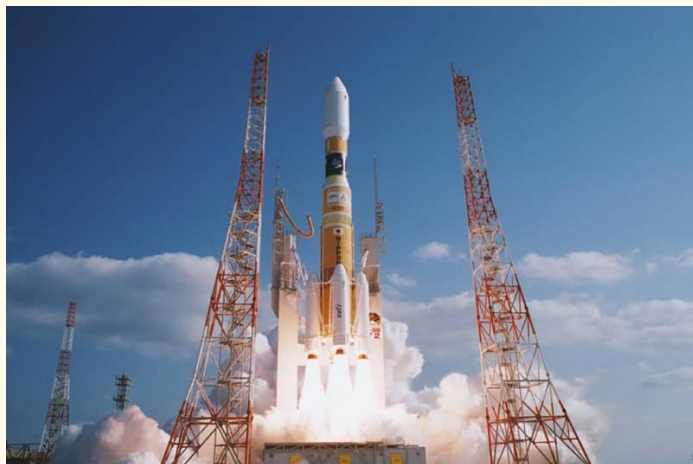
H-II B JAXAと三菱重工業が共同開発したロケット

*** 三菱重工業が、詳細設計と試験機製造を請負契約により実施 ***

国際宇宙ステーションに物資補給機「こうのとり」(重量16t)を打上げるために、**H-II Aをもとにして、JAXAと三菱重工業が名実共に官民共同開発したロケット**

➡ 基本設計までの開発はJAXAが実施し、**詳細設計と試験機製造は、JAXAとの請負契約に基づき三菱重工業が実施** (このような官民共同開発の取組みは、我が国初)

開発は大成功



H-II Bロケット (出典はJAXAのHP)

- 高度約300kmの円軌道に最大16.5tの衛星、静止トランスファ軌道に最大8tの衛星を打上げ可能
- **2009年の初打上げから9回打上げられ、全て成功したが、2020年に運用停止**
- 開発費用は約270億円で、打上げ費用は120～150億円程

官民共同開発の経緯と詳細

次のページへ

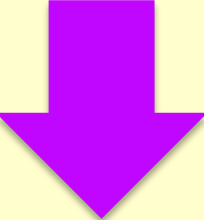
前のページから

官民共同開発の経緯と詳細



2002年、文部科学省の宇宙開発委員会において、H-II A以上のロケットを開発する場合には、H-II Aを基本として民間に主体性をもたせた官民共同開発を行うこととされた。

これを受けて、



【 H-II B官民共同開発の枠組みを定めた基本協定を締結 】

2005年、民間の主体性と責任を重視した官民共同開発の枠組みについて、JAXAと三菱重工業との間で、以下を要点とする基本協定を締結

- 詳細設計を含めたロケット全般のシステムインテグレーションを三菱重工業が担当し、それらを請負契約で実施することにより、三菱重工業の主体性と責任を重視する。
- ロケットの基本設計やエンジンの燃焼試験等のリスクが大きいところはJAXAが担当し、これに三菱重工業が主体的に関与する。

H-II Bの実際の開発体制



次のページへ

H-II Bの実際の開発体制



- 基本設計まではJAXAが主体となって、三菱重工業からの提案を取り入れる形で実施
- 詳細設計と試験機の製造は、JAXAと三菱重工業との間で締結した請負契約に基づき、三菱重工業が責任をもって実施

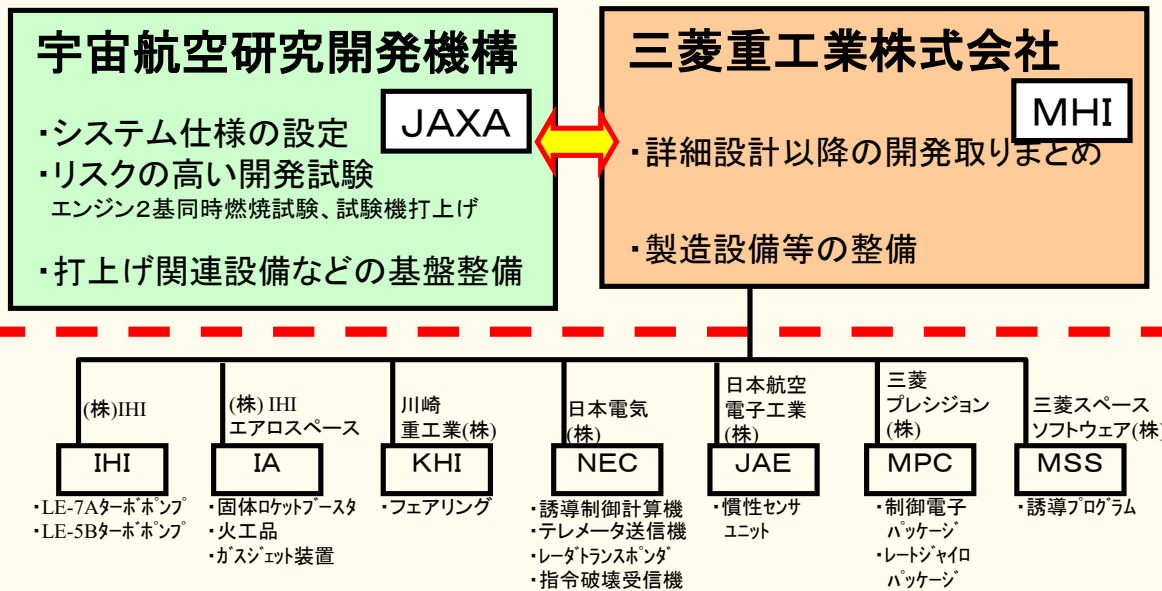


民間側の開発体制は、プライムコントラクタ(元請け)としての三菱重工業のもとに、関係各社がサブコントラクタとして結集する一元的な体制

【開発体制】

出典は、H-II Bロケット試験機プロジェクトに係る事後評価について
(2010年9月21日付のJAXAと三菱重工業との連名資料)

合同チームによる開発計画・
システム仕様の策定



第39回(2010年)日本産業技術大賞において、「H-II Bロケットの開発」が文部科学大臣賞を団体受賞(JAXA、三菱重工業、開発に携わった企業10社)

I - 3

H3ロケットの開発経緯

【 2012年 】

- JAXAで、H-II A/II Bの後継となる新型基幹ロケットの検討を開始

【 2013年 】

- 内閣府宇宙政策委員会の宇宙輸送システム部会で、**2014年度から新型基幹ロケットの開発に着手し、この開発は民間企業を中心に進めることを決定** ← **民間のコスト削減手法を開発段階から活かして国際競争力を高めるため**

【 2014年 】

- JAXAで、ミッション定義審査を実施
- **JAXAは、プライムコントラクターとして三菱重工業を選定して、新型基幹ロケットの開発に関する基本的な役割分担等を定めた基本協定を締結**
- **JAXAは、新型基幹ロケットのキー技術の開発を担う事業者として、三菱重工業の他に、日本航空電子工業、三菱スペース・ソフトウェア、IHI、IHIエアロスペースを選定して、キー技術の開発に関する基本的な役割分担等を定めた協定を締結**

【 2015年 】

- JAXAは、新型基幹ロケットの名称をH3ロケットに決定
- JAXAでシステム定義審査を実施して、概念設計フェーズから基本設計フェーズに移行

【 2016年 】

- JAXAで基本設計審査を実施して、基本設計フェーズから詳細設計(製造図面の作成)フェーズに移行
- 角田宇宙センターで、第1段エンジンターボポンプの単体試験を実施

【 2017年 】

- 種子島宇宙センターで、第1段エンジンの燃焼試験を実施
- **JAXAで詳細設計審査(製造図面の審査)を実施して、詳細設計フェーズから製作・試験フェーズに移行**

【 2018年 】

- 角田宇宙センターで、第1段エンジンターボポンプの単体試験を実施
- 種子島宇宙センターで、第1段エンジンの燃焼試験を実施
- 種子島宇宙センターで、固体ロケットブースターの燃焼試験を実施

【 2019年 】

- 三菱重工業で、第1段エンジンクラスター(2基、3基)構成による燃焼試験を実施
- IHIエアロスペースで、固体ロケットブースターの分離試験を実施

【 2020年 】

- 種子島宇宙センターで、固体ロケットブースターの燃焼試験を実施
- 角田宇宙センターで、第1段エンジンターボポンプの単体試験を実施
- 種子島宇宙センターで第1段エンジンの燃焼試験を実施し、技術的な課題が見つかったため、JAXAは、試験機1号機の**2020年度内打上げ予定を、2021年度内打上げ予定に延期(初回の延期)**

【 2021年 】

- 種子島宇宙センターで、第1段エンジンの燃焼試験を実施
- 角田宇宙センターで、第1段エンジンターボポンプの単体試験を実施

【 2022年 】

- JAXAは、第1段エンジンの技術的課題が未解決のため、試験機1号機の**2021年度内(2022年3月末まで)の打上げ予定を延期(2回目の延期)**
- 種子島宇宙センターで、第1段エンジンの燃焼試験を実施
- 角田宇宙センターで、第1段エンジンターボポンプの単体試験を実施

【 2023年 】

- 試験機1号機の**固体ロケットブースターに点火せず、打上げを中止(2月17日)**
- 試験機1号機の**第2段エンジンに点火せず、打上げに失敗(3月7日)**

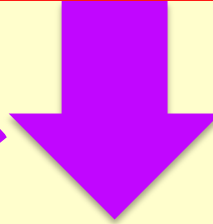
I - 4

H-II B官民共同開発実績が活かされなかった
H3ロケット開発体制上の問題点

H3ロケットの官民共同開発の枠組み

2013年、内閣府宇宙政策委員会の宇宙輸送システム部会で、2014年度から新型基幹ロケットの開発に着手し、民間のコスト削減手法を開発段階から活かすことにより打上げ費用を低減して国際競争力を高めるため、設計・開発段階から三菱重工などの民間企業を中心に進めることを決定

これを受けて、



【 官民共同開発の枠組みを定める基本協定を締結 】

2014年、JAXAと関係民間企業との間で、官民共同開発の枠組みを定める以下の基本協定を締結して、H3プロジェクトがスタートした。

- JAXAは、プライムコントラクターとして三菱重工を選定して、新型基幹ロケットの開発に関する基本的な役割分担等を定めた基本協定を締結
- JAXAは、新型基幹ロケットのキー技術の開発を担う事業者(キー技術関連事業者)として、三菱重工の他に、日本航空電子工業、三菱スペース・ソフトウェア、IHI、IHIエアロスペースを選定して、キー技術の開発に関する基本的な役割分担等を定めた基本協定を締結

H3ロケットの実際の開発体制



次のページへ

H3ロケットの実際の開発体制

JAXAは、プライムコントラクタ及びキー技術関連事業者との間で、「**開発に関する契約**」を準委任契約として締結した。(準委任契約と請負契約の違いは、次のページを参照)

➡ その結果、**H3ロケット開発の全体最適化を担うプロジェクトマネジメントは、JAXAのH3プロジェクトチームが実施する体制**となり、プライムコントラクタ及びキー技術関連事業者は、JAXAから委託されたそれぞれのキー技術開発における部分最適化の域に留まることとなった。

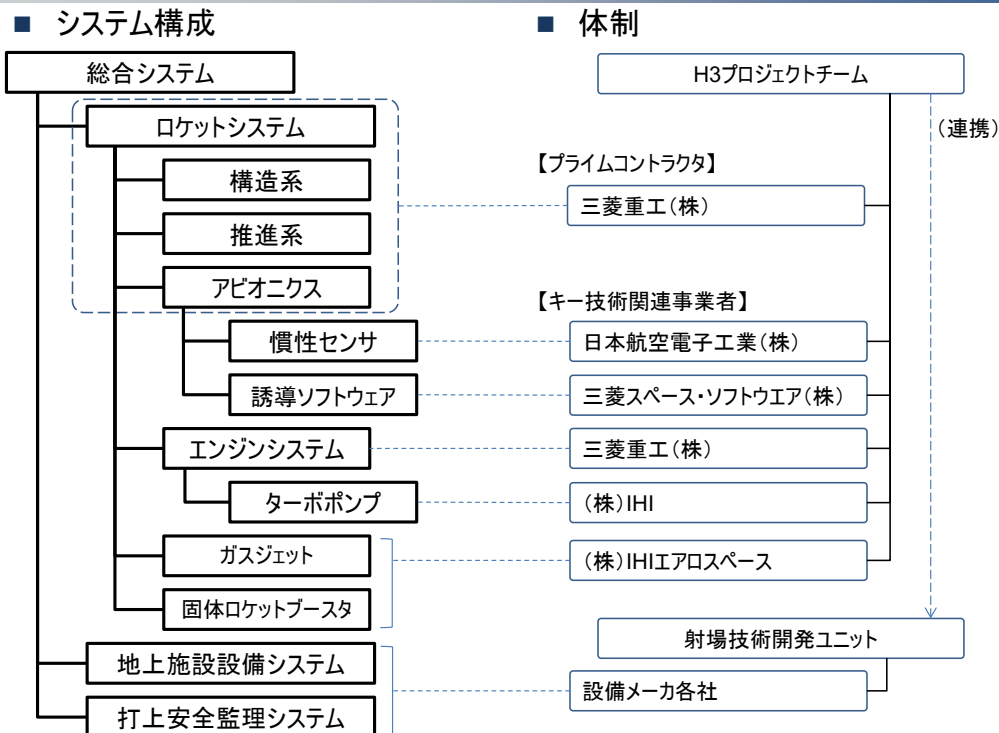
つまり、

民間側の開発体制は、H-II Bロケット開発時の体制とは異なり、**プライムコントラクタ(元請け)としての三菱重工業のもとに、関係各社がサブコントラクタとして結集する一元的な体制ではなかった。**

結果として、

ソフトウェアで実現する機能・性能や信頼性の確保を含めた全体最適化に支障


開発体制 出典は、「H3ロケット 基本設計結果について」(2016年6月14日付のJAXAから文部科学省の科学技術・学術審議会宇宙開発利用部会への報告資料)




【参考】 請負契約と準委任契約

*** ロケット等の開発業務委託に用いられる2つの契約形態 ***


【 請負契約 】 H-II B開発で用いられた契約形態

- 受注者がロケット等の完成を約し、発注者が完成した結果に対して報酬を支払う契約
  契約内容は、ロケット等を完成させること（完成に向けたプロジェクトマネジメントは、受注者が実施）
- 受注者は、発注者に対して、**契約不適合責任（旧：瑕疵担保責任）を負う。**


【 準委任契約 】 H3開発で用いられた契約形態

- 受注者がロケット等の開発の事実行為（法律行為であれば委任契約）を行うことを、発注者が委任する契約
  契約内容は、ロケット等の完成ではなく、ロケット等の開発を行うこと（完成に向けたプロジェクトマネジメントは、発注者が実施）
- 受注者は、発注者に対して、**善管注意義務（善良な管理者の注意をもって、委任事務を処理する義務）を負う。**

H3ロケットの官民共同開発体制の問題点

H-II Bで成功した名実共に官民共同開発の体制(開発責任はJAXAと、請負契約によるシングルベンダーとしての三菱重工業で分担)が受け継がれず、H3の官民共同開発は名目化(開発責任はJAXAにあり、三菱重工業等は準委任契約によるマルチベンダーとしてJAXAの開発を支える立場)している。  実質的には、H-II A以前のJAXAによる開発体制(開発責任はJAXAにあり、三菱重工業等は契約に依らずにJAXAの開発を支える立場)に戻ってしまっている。

その結果、 

JAXAの設計審査会が、H-II A以前と同様に、製造図面の審査によりロケットの信頼性等を確認する最終的な役割を担うことになった。  しかし、2016年3月のX線天文衛星「ひとみ」の失敗(ソフトウェアのバグとデータ誤入力の原因)や、2023年2月のH3試験機1号機の打上げ中止(ソフトウェアのエラーが原因)に見られるとおり、製造図面の審査では、ハードウェアに組み込まれたソフトウェアで実現している機能・性能やその信頼性を確認することは困難である。

そこで、望まれるのは  性能発注方式による取組み方

これからの官民共同開発は、請負契約によるシングルベンダーと発注者で、開発責任を明確に分担できる体制とすることが望まれる。また、信頼性等を確認する最終的な役割を果たせるよう、発注者側の設計審査会は要求要件審査会に衣替えして、ソフトウェアで実現する機能・性能や信頼性を含めた「全体最適化」の観点から性能発注方式の取組み方で審査する体制とすることが望まれる。

II

三菱スペースジェットの開発失敗

今日の型式証明取得には性能発注方式の取組み方が必須

約1兆円を投じた三菱スペースジェットの開発失敗

* 初飛行後、7年経っても型式証明取得の目処が立たなかったことが原因 *



試験飛行中の三菱スペースジェット(出典:三菱重工業のHP)

三菱スペースジェット(MSJ)は、2003年度に経済産業省のプロジェクトとして研究開発がスタートし、2011年度までに約500億円の国費も投入されて開発が進められ、**2015年には初飛行に成功**

しかし、

2023年2月7日、三菱重工業は、約1兆円を投じたMSJの開発を中止すると発表

➡ 中止の理由は、**商用運航に欠かせない国土交通大臣の型式証明を取得できる目処が立たなくなったため**

型式証明とは

次のページへ

型式証明とは

前のページから

【 型式証明取得に向けたプロセス 】

型式証明の申請者と航空当局との間で、申請された機体の安全性を確保するための要件（つまり、性能要件）を確定した上で、その要件への適合性を証明するための手法について合意し、その手法に従って適合性の審査を設計過程と製造過程にわたって進める。これには、性能発注方式の取組み方（つまり、トレードオフ関係にある性能要件間の全体最適化をトップダウンで図る取組み方）で設計を行いつつ審査を受ける必要がある。

ところが、

MSJでは、このようなプロセスを経ないままに設計され1号機が製造されてしまった。このことが、後に数千時間に及ぶ試験飛行を重ねても挽回できない禍根を残した。

➡ 半世紀以上前のYS-11の型式証明は、詳細設計図面の審査結果と実機の飛行試験結果に基づき取得できていたので、MSJでも同様の取得プロセスを前提としてしまったと推察される。

問題はソフトウェア

次のページへ

問題はソフトウェア



- YS-11では、ソフトウェアによる制御機能は皆無。このため、機体の安全性はメカニカルな詳細設計図面の審査結果と実機の飛行試験結果から判定できた。
- MSJでは、フライバイワイヤーなど、多くの制御機能がソフトウェアで実現している。ソフトウェアは直接目にする事ができないので、メカニカルな詳細設計図面を徹底的に審査してみても、ソフトウェアで実現している機能・性能やその信頼性は判定できない。

➡ このことが、MSJの型式証明取得の目処が立たなくなった最大の原因

要するに、



ハードウェアは、詳細設計を示す仕様発注方式の取組み方(つまり、「この通りに作ってくれ」といった取組み方)で出来るが、ソフトウェアは、性能要件を示す性能発注方式の取組み方(つまり、「このようなものを作ってくれ」といった取組み方)でなければ対処できない。

➡ それゆえ、半世紀以上前のYS-11の頃とは違い、今日の型式証明取得には性能発注方式の取組み方が必須


Ⅱ-1

商用運航に欠かせない
「耐空証明」と「型式証明」

民間航空機の「耐空証明」と「型式証明」


* 民間航空機の商用運航には、国土交通大臣の耐空証明が必要 *

【 耐空証明 】

国土交通大臣の「耐空証明」とは、民間航空機が下記の基準に適合するかどうかを設計、製造過程、現状について1機ごとに検査し、適合が認められた機体であることの証し  「耐空証明」を受けていない民間航空機は、航行させることができない。(航空法第11条)

- 航空機の安全性を確保するための強度、構造及び性能についての基準（安全基準）
- 航空機の騒音の基準（環境基準）
- 航空機の発動機の排出物の基準（環境基準）

【 型式証明 】

国土交通大臣の「型式証明」とは、航空機の設計が前記の基準に適合するかどうかを設計と製造過程について検査し、適合が認められた設計であることの証し  「型式証明」を受けた機体については、「耐空証明」における設計と製造過程の検査の一部が省略される。

我が国で型式証明を取得するには、



次のページへ

我が国で製造しようとする航空機の型式証明の取得

国土交通省航空局への申請

航空法施行規則に規定された「型式証明申請書」を、以下の添付書類と共に国土交通大臣に提出

- 設計の初期段階に提出する書類：**設計計画書**
- 製造に着手する前に提出する書類：**設計書、図面目録、設計図面、部品表、製造計画書**

国土交通省航空局による検査の基本

型式証明に向けた検査の基本は、航空機の設計が以下の基準(具体的には、航空法施行規則の附属書第1～第4で規定)に適合するかどうかを、設計と製造過程について検査すること

- 航空機の安全性を確保するための**強度、構造及び性能についての基準**(安全基準)
- 航空機の**騒音の基準**(環境基準)
- 航空機の**発動機の排出物の基準**(環境基準)

➡ 上記の2つの環境基準については、基準となる数値が示されているため、試作機を製造して検査することにより適合性の判別は可能。しかし、上記の**安全基準については、基準となる数値ではなく、項目ごとの概要的な基準が文言で示されている**にすぎない。 ➡ このため、**具体的な設計条件(数百項目)については、「耐空性審査要領」に示されている。**

耐空性審査要領に基づく検査

次のページへ

耐空性審査要領に基づく検査

【耐空性審査要領とは】

耐空性審査要領は、国土交通省航空局が「強度、構造及び性能についての基準」に従って実施する設計検査における技術的要件を詳細に定めたもの。それゆえ、型式証明を取得するには、耐空性審査要領に記載された技術的要件を全て満たす必要がある。

→ 我が国の耐空性審査要領は、FAA（米連邦航空局）のFAR（Federal Aviation Regulation：米連邦航空規則）に準拠している。このため、FARの改訂に伴い、耐空性審査要領は改訂を繰り返している。

← 1979年に米国製のDC-10がシカゴで墜落した事故を受けて、FAAはFARに基づく審査基準を厳格化。これに伴い、FAR準拠の耐空性審査要領も厳格化された。

我が国で問題となるのは、

我が国では、耐空性審査要領に基づいて型式証明を交付した実績が、YS-11（1964年）とMU-2（1965年）以来途絶えている。1960年代の耐空性審査要領では、ソフトウェアによる制御機能が未だ実用化されていないため、技術的要件はハードウェアに関することが中心。

→ しかし、今日の耐空性審査要領では、自動操縦装置、自動推力調整装置、飛行誘導装置などのソフトウェアによる制御機能についても記載されている。

→ ところが、製造に着手する前に提出する書類（設計書、図面目録、設計図面、部品表、製造計画書）の審査ではハードウェアが中心となり、ソフトウェアで実現している機能・性能や信頼性を審査することは困難

米国での型式証明

【 米国での型式証明のプロセス 】

型式証明の申請者と航空当局 (FAA) との間で、申請された機体の安全性を確保するための要件 (機能要件と性能要件) を確定した上で、その要件への適合性を証明するための手法 (Means of Compliance: MoC) について合意し、MoCに従って適合性の審査を進める。

➡ 機体の安全性を確保するための要件を確定する上で、FAR (米連邦航空規則) では想定外の新技術等を設計に活かせるようにするため、FARの例外を認める以下の制度がある。

- **特別要件** : FARでカバーされない新技術等に対して、特別な要件を一時的に設定
- **同等の安全性** : FARとは別の方法で同等レベルの安全性を確保する要件を一時的に設定
- **適用除外** : FARを厳格に適用できず、かつ、適用しなくても安全性が確保できる場合に設定

トップダウンによる全体最適化が必須

米国での型式証明のプロセスでは、型式証明の申請者と航空当局 (FAA) のいずれも、トップダウンにより全体最適化を図る取組み (欧米では常識である性能発注方式の基本的な取組み方) が大前提となっている。それゆえ、ソフトウェアによる制御の信頼性の確保や、特別要件の設定による新技術の活用も難しくはない。 ➡ 他方、我が国では、ボトムアップにより部分最適化を図る取組み (我が国独自のガラパゴスである仕様発注方式の基本的な取組み方) が大前提となりがちであり、その結果として、ソフトウェアによる制御の信頼性などを証明することは容易ではない。

Ⅱ-2

民間航空機製造における 三菱重工業の実績

MU-2：双発ターボプロップエンジンを搭載したビジネス用プロペラ機

* 「零戦を作った三菱のビジネス機」として、世界27ヶ国に販売されたベストセラー機 *



MU-2(出典は<https://ja.wikipedia.org/wiki/MU-2>)

【 MU-2 】

製造者：三菱重工業

特徴：ビジネス用プロペラ機、乗員2名、乗客7～9名

初飛行：1963年9月

生産数：762機(日本：59機、その他：703機)



MU-2の歴史

1960年代初頭、研究開発開始

1963年、試作機の初飛行(9月)

1965年、運輸省航空局から型式証明を取得(2月)、FAA(米連邦航空局)から型式証明を取得(11月)

1966年、販売開始

1987年、MU-300の販売に集中するためにMU-2の生産を終了

MU-300 : 双発ターボファンエンジンを搭載したビジネス用ジェット機

* MU-2の後継機として三菱重工業が開発し、製造販売権売却後にベストセラー *



MU-300 (出典は<https://ja.wikipedia.org/wiki/MU-300>)

【 MU-300 】

製造者 : 三菱重工業、後に米ホーカー・ビーチクラフト社に製造販売権を売却

特徴 : ビジネス用ジェット機、乗員2名、乗客7~9名

初飛行 : 1978年8月

生産数 : MU-300として101機、ホーカー400等として700機以上

MU-300の歴史

1969年、MU-2の後継機としての開発に向けて、市場調査を開始

1975年、「MU将来機開発計画書」が完成

1976年、MU-300の設計開始(11月)

1977年、試作機の製造開始(7月)。FAA(米連邦航空局)への型式証明申請(8月)

1978年、試作機の国内での初飛行(8月)

1979年、試作機の米国での飛行開始(8月)。**シカゴでのDC-10墜落事故を受けて、FAAは型式証明審査基準を大幅に厳格化**

1980年、FAAはTIA(飛行試験開始確認書)を発行(5月)して、FAAによる飛行試験を開始(6月)

1981年、FAAから型式証明を取得(11月)

1988年、バイアメリカン法の規制等により米国での販売が難しくなったため、**ホーカー・ビーチクラフト社にMU-300の製造販売権を売却して、三菱重工業はビジネス用航空機から撤退**

ボーイング社等の民間航空機製造に係る三菱重工の実績



【三菱重工(株) 航空機・飛昇体事業部】

民間航空機開発段階からのリスク・シェアリング・パートナー(製造段階での下請けではなく、開発費を分担して設計段階から参画)として、あるいは、民間航空機製造段階でのTier1(一次下請け)として、**ボーイング社(米国)やボンバルディア社(カナダ)が製造する航空機の主翼や胴体などを製造**

【三菱重工航空エンジン(株)】

プラット・アンド・ホイットニー社(米国)やロールス・ロイス社(英国)の航空機用エンジン開発段階からのリスク・シェアリング・パートナーとして、あるいは、航空機用エンジンの国際共同開発への参画により、**航空機用エンジンの主要部品であるコンプレッサーやタービン、燃焼器モジュールなどを製造**

Ⅱ－3

三菱スペースジェット 20年間の軌跡


【 2003年 】

- 経済産業省は、「環境適応型高性能小型航空機」(炭素繊維複合材を多用した30～50席クラスの小型ジェット旅客機を、2003年度からの5年間で開発して2007年度に初飛行。開発費は半額国費補助による約500億円を予定)のプロジェクトについて、複数社に提案を募集したところ、三菱重工業だけが応募して主契約企業となった。

【 2004年 】

- 経済産業省は、約30億円の予算を確保して開発を支援
- 国土交通省は、新たに開発する小型ジェット旅客機の型式証明の実務を担う航空機技術審査センターを、所長以下6名体制(後に、航空機の専門知識を有する人材の中途採用や、防衛省・JAXAからの出向により、73名の体制に拡充)で県営名古屋空港内に設立

【 2005年 】

- 経済産業省は、約41億円の予算を確保して開発を支援
- 三菱重工業は、市場調査結果に基づき、座席数を30～50席クラスから70～90席クラスに変更
 プロジェクト全体の見直しが必要となり、初飛行が2007年度から2011年度に延期


【 2006年 】

- 経済産業省は、約5億円の予算を確保して開発を支援
- 当初約500億円とされた開発費が、約1200億円に膨らむ見込みとなった。


【 2007年 】

- 三菱重工業は、名称を**三菱リージョナルジェット(MRJ)**として、本格的な販売活動を開始
- 経済産業省は、約20億円の予算を確保して開発を支援。また、経済産業省は、2008年度から2011年度の4年間にわたって、約400億円の予算を確保して開発を支援する旨を公表

【 2008年 】

- 全日空は、25機のMRJの発注を発表 (MRJの初受注)
- 三菱重工業はMRJの事業化を発表し、子会社の三菱航空機を設立  **開発費は約1500億円の見込みで、試験機の初飛行は2011年、全日空への量産初号機納入は2013年の予定**

【 2009年 】

- 機体の主材料を炭素繊維複合材からアルミニウム合金に変更して、主翼と胴体を大幅に設計変更  これに伴い、初飛行は2012年、初号機納入は2014年に延期 (初回の納期延期)

【 2010年 】

- MRJの試験機が製造段階に移行

【 2012年 】

- 国土交通省の航空機技術審査センター所長が交代
- 三菱航空機のチーフエンジニアが交代
- 試験機製造の遅れにより、初飛行は2013年、初号機納入は2015年に延期 (2回目の納期延期)


【 2013年 】

- 型式証明に向けた安全性確保のプロセス構築に時間を要するとして、**初飛行は2015年、初号機納入は2017年に延期（3回目の納期延期）**


【 2014年 】

- 試験機初号機が完成して公開

【 2015年 】

- 米国ワシントン州の国際空港内に飛行試験センターを開設
- 全日空に納入する量産初号機の組み立てを開始
- **試験機初号機が県営名古屋空港で初飛行**  **しかし、主翼の強度不足が判明したため、量産初号機納入は2018年に延期（4回目の納期延期）**

【 2016年 】

- **開発費が約3300億円に膨らむ見通し**を朝日新聞が報道  **この時点までの通算受注機数は427機（内、確定受注は233機）**
- 試験機の2号機、3号機、4号機が初飛行

【 2017年 】

- 型式証明の取得に向けて機体制御用電子機器の配置見直しなどの設計変更を行ったことに伴い、**量産初号機納入は2020年に延期（5回目の納期延期）**



【 2018年 】

- 三菱航空機のチーフエンジニアが交代 (2回目)
- 国土交通省航空局から、MRJの飛行試験開始確認書(航空局のテストパイロットによる型式証明飛行試験実施の許可証)を受領

【 2019年 】

- 名称をMRJ(三菱リージョナルジェット)から**MSJ(三菱スペースジェット)**に変更
- FAA(米連邦航空局)から、LOA(Letter of Authorization : FAAのテストパイロットによる型式証明飛行試験実施の許可証であり、我が国の飛行試験開始確認書に相当)を取得

【 2020年 】

- 三菱航空機のチーフエンジニアが交代 (3回目)
- 飛行試験の遅れにより、**全日空への量産初号機納入は2021年以降に延期 (6回目の納期延期)**
- これまでの**開発費総額は約8000億円、事業化総額は1兆円超となる見込み**が報道された。
 - 必要  この時点での受注機数は307機にすぎず、採算を取るためには約1500機を販売する
 -  **三菱重工業は、MSJの開発計画を凍結**することを発表

【 2023年 】

- **三菱重工業は、MSJの採算が全く取れないと判断して、MSJの開発中止を発表 (2月7日)**

Ⅱ-4

三菱スペースジェット失敗の根源

経済産業省、国土交通省、三菱重工業のいずれも、
性能発注方式の取組み方ができなかったこと

性能発注方式の取組み方ができなかったことが 三菱スペースジェット失敗の根源（1／3）

【 経済産業省 】



経済産業省は、2003年に「環境適応型高性能小型航空機」の開発プロジェクト（2003年度から2007年度までの5カ年計画であり、この間に約100億円の国費が投入された。）を立ち上げた際に、**性能発注方式の取組み方**であれば基本中の基本である「**ニーズとシーズのベストマッチングを図ること**」を、なおざりにしてしまった。つまり、小型航空機の市場動向と最先端の技術動向の調査を真摯に行わないまま、「（シーズとしての）炭素繊維複合材を多用した、（ニーズとしての）30～50席クラスの小型ジェット旅客機」を、プロジェクトの開発目標として設定してしまった。


➡ 結果として、**プロジェクトの開発目標は、ニーズとシーズのいずれも、プロジェクトの進展につれて大きく揺らぐこととなった。**つまり、2005年には、ニーズとしての座席数が30～50席クラスから70～90席クラスへと大幅に変更され、2009年には、シーズとしての機体の主材料が炭素繊維複合材からアルミニウム合金へと抜本的に変更された。

➡ このように、基礎設計の前提となる条件が2度にわたって大きく修正されたことから、**三菱スペースジェットは、その生い立ちから迷走気味だった**と言える。


性能発注方式の取組み方ができなかったことが 三菱スペースジェット失敗の根源（2／3）

【 国土交通省 】

○ 国土交通省は、経済産業省のプロジェクトで新たに開発する小型ジェット旅客機の**型式証明の実務を担う航空機技術審査センター**を、県営名古屋空港内に2004年に設立  設立当初は、所長以下6名の体制であったが、後に、航空機の専門知識を有する人材の中途採用や防衛省・JAXAからの出向により、73名の体制にまで拡充  しかし、1960年代にYS-11やMU-2の型式証明の実務を担った人材は皆無。加えて、FAA（米連邦航空局）における型式証明の実務の理解者も皆無。さらに、2012年には所長が交代している。

 これでは、「トップダウンにより全体最適化を図る」といった米国流の審査は望むべくもなく、「**組織対応**」と称して**専門分野ごとのボトムアップによる部分最適化を図るような審査**に終始する結果となる。

○ 国土交通省は、型式証明プロセスのスタートを規定する「**安全性を確保するための強度、構造及び性能についての基準**」と「**型式証明申請書**」（いずれも航空法施行規則に規定）について、1960年代の記載内容からほとんど変えていない。

 これでは、型式証明の申請者（三菱重工業）が、**1960年代と同様にハードウェアの設計図書の審査と飛行試験が中心になると捉えてしまった**としても無理はない。

性能発注方式の取組み方ができなかったことが 三菱スペースジェット失敗の根源（3／3）

【三菱重工業】

三菱重工業は、2008年にMRJ(三菱リージョナルジェット)の事業化を決定して、2023年にMSJ(三菱スペースジェット)の開発中止を決定するまでの15年間に、**開発の中心となる三菱航空機のチーフエンジニアを3回(2012年、2018年、2020年)も交代**させている。

➡ これでは、チーフエンジニアによるトップダウンで全体最適化を図る開発体制など望むべくもなく、チーフエンジニアの主たる役割は、**専門分野ごとのボトムアップによる部分最適化を旨とする「組織対応」のコーディネーター**に過ぎなくなる。

➡ しかし、このような「組織対応」では、**耐空性審査要領**に記載された個々の技術的要件に個々の設計を合致させていくアプローチに終始してしまうため、**耐空性審査要領では想定外の新技術を開発して設計に取り入れることは極めて困難**である。また、今日の航空機で多用されているソフトウェアによる制御機能の信頼性を証明することも**困難**である。 ← **三菱スペースジェットの型式証明取得が困難を極めた要因**

Ⅲ

【参考】

零戦と烈風に学ぶ性能発注方式の真髓

- ☆ 発注者は「ニーズとシーズをベストマッチング」 ☆
- ☆ 受注者は「トップダウンによる全体最適化」 ☆
- ☆ 発注者は、受注者に委ねるべき設計に口出ししない ☆

Ⅲ-1

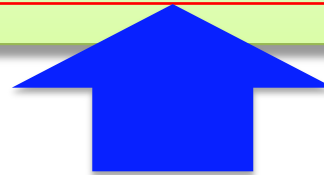
20世紀の世界地図を塗り替えた零戦は、
見事な性能発注方式の賜物

「零戦」は、20世紀の世界地図を 塗り替えた、純国産の工業製品



大石一空曹撮影

発注者【旧日本海軍】が、
受注者【三菱重工業】に求めたのは、
実現が容易ではないが不可能ではない高性能



＊ ＊ たった1枚の「要求水準書」で海軍は注文！ ＊ ＊

【旧日本海軍の性能発注方式】

計画要求書(1枚)に基づき、航空機メーカーに設計と製造を委託

1. 用途: 掩護戦闘機として敵軽戦闘機より優秀な空戦性能を備え、要撃戦闘機として敵の攻撃機を捕捉撃滅しうるもの
2. 最大速力: 高度4000mで270ノット以上
3. 上昇力: 高度3000mまで3分30秒以内
4. 航続力: 正規状態、公称馬力で1.2乃至1.5時間(高度3000m) / 過荷重状態、落下増槽をつけて高度3000mを公称馬力で1.5時間乃至2.0時間、巡航速力で6時間以上
5. 離陸滑走距離: 風速12m/秒で70m以下
6. 着陸速度: 58ノット以下
7. 滑走降下率: 3.5m/秒乃至4m/秒
8. 空戦性能: 九六式二号艦戦一型に劣らぬこと
9. 銃装: 20mm機銃2挺、7.7mm機銃2挺、九八式射爆照準器
10. 爆装: 60kg爆弾又は30kg2発
11. 無線機: 九六式空一号無線電話機、ク式三号無線帰投装置
12. その他の装置: 酸素吸入装置、消化装置など
13. 引き起こし強度: 荷重倍数7、安全率1.8

**零戦の計画要求書
(要求水準書)**

出典: 戦史叢書95海軍航空概史

【旧日本海軍の性能発注方式】

計画要求書(1枚)に基づき、航空機メーカーに設計と製造を委託

具体的には、



- 計画要求書に示された「機能と性能の要求要件」を達成する責任は、設計を行う受注メーカーが負った。 → 受注メーカーは、研究開発・設計・製造のどの段階でも、創意工夫(イノベーションの源)を存分に凝らすことができた。
- 旧日本海軍は、**軍用機に関する最先端の技術動向**を調べ上げて、**現場が抱える課題**も並行して調べ上げて、**性能要件間に生ずるトレードオフ関係**についてよく勘案した上で、実現を求める「機能と性能の要求要件」を計画要求書にリストアップした。

それゆえ、



【今日のオープンイノベーションと同じ「性能発注方式」】

委託先の選定時には価格面に加えて**技術面の力量が重視**され、また、受注メーカーは、**最先端技術の活用と創意工夫が存分**にできたので、**イノベーションに繋がった。**

Ⅲ-2

零戦が成功した秘訣は、
発注側での「ニーズとシーズのベストマッチング」と
受注側での「トップダウンによる全体最適化」

零戦が成功した秘訣は、次の二点



発注者である旧日本海軍が、部内の開発会議で検討を重ねて、ニーズとシーズをベストマッチングした「理想的な計画要求書」を作成したこと

受注者である三菱重工業が、数十人の設計陣を率いた設計主務によるトップダウンで全体最適化に成功したこと



*** 「性能発注方式」で成功するための秘訣そのもの！ ***

零戦の計画要求書は、 ニーズとシーズをベストマッチングした結晶



旧日本海軍は、部内の開発会議（航空隊等の実戦部隊メンバーや航空技術廠の技術部隊メンバーが参加）での議論を通じて、最先端の技術動向（シーズ）と現場が抱える課題（ニーズ）を踏まえ、性能要件間に生ずるトレードオフ関係（空戦性能・最高速度・航続距離）を十分に勘案（ニーズとシーズをベストマッチング）することにより、極めてハイレベルな「機能と性能の要求要件」を計画要求書（1枚）にまとめ上げた。



零戦の計画要求書には、その作成過程を含めて、学ぶべき点が多い。



次のページへ

零戦の計画要求書に学ぶべき点

ニーズとシーズをベストマッチングした結晶とも言える「理想的な計画要求書」が無ければ、欧米の新鋭戦闘機をも圧倒した零戦は出現しなかったと推察される。

➡ このような零戦の計画要求書に学ぶべき点として、次の五点が特に重要

- ① 受注メーカーが詳細設計を行う上で必要十分となる性能要件が、具体的な数値目標として掲げられている。
- ② 発動機出力、翼面積、機体重量、機体寸法など、受注メーカーに委ねるべき詳細設計の範疇については一切言及していない。
- ③ 計画要求書の作成時点では実現が極めて困難と思われるほどの、世界最高水準の性能を求めている。
- ④ 「最大速力」、「航続力」及び「空戦性能」については、三つ巴のトレードオフ関係にあることを踏まえて、実現が不可能ではないぎりぎりの性能要件を掲げている。
- ⑤ 数値目標を掲げることが困難な「空戦性能」については、計画要求書を作成した時点で空戦性能に最も優れていた国産機の例示により、性能要件を具体的に示している。


零戦の計画要求書は、 ニーズとシーズをベストマッチングした結晶

1. 用途：掩護戦闘機として敵軽戦闘機より優秀な空戦性能を備え、要撃戦闘機として敵の攻撃機を捕捉撃滅しうるもの
2. 最大速力：高度4000mで270ノット以上
3. 上昇力：高度3000mまで3分30秒以内
4. 航続力：正規状態、公称馬力で1.2乃至1.5時間（高度3000m）／過荷重状態、落下増槽をつけて高度3000mを公称馬力で1.5時間乃至2.0時間、巡航速力で6時間以上
5. 離陸滑走距離：風速12m/秒で70m以下
6. 着陸速度：58ノット以下
7. 滑走降下率：3.5m/秒乃至4m/秒
8. 空戦性能：九六式二号艦戦一型に劣らぬこと
9. 銃装：20mm機銃2挺、7.7mm機銃2挺、九八式射爆照準器
10. 爆装：60kg爆弾又は30kg2発
11. 無線機：九六式空一号無線電話機、ク式三号無線帰投装置
12. その他の装置：酸素吸入装置、消化装置など
13. 引き起こし強度：荷重倍数7、安全率1.8

零戦の計画要求書 (要求水準書)


出典：戦史叢書95海軍航空概史

零戦の計画要求書を目標とした、 トップダウンによる全体最適化に成功

受注者である三菱重工業は、計画要求書に示された極めてハイレベルな「機能と性能の要求要件」の全てを満たす（つまり、全体最適化する）ために、数十名の設計陣を率いた**設計主務によるトップダウンで全体最適化**を図る体制を整えた。その結果、研究開発・設計・製造を一貫して実施する中で、**全体最適化に向けて創意工夫を存分に凝らす**ことができた。  **創意工夫こそ、イノベーション（技術革新）の源！**

それゆえ、

出来上がった零戦には、**世界初の革新的技術が随所に盛り込まれていた**。また、このような革新的技術により、**極めてハイレベルな「機能と性能の要求要件」の全てを満たす（つまり、全体最適化する）**ことができた。

 つまり、零戦は、旧日本海軍が作成した「理想的な計画要求書」があったからこそ、トップダウンによる全体最適化に向けて、三菱重工業が創意工夫を存分に凝らすことができた賜物と言える。

III-3

零戦の後継機「烈風」の開発計画は、
受注者に委ねるべき設計に発注者が口出しして破綻

零戦の後継機「烈風」の開発に旧日本海軍は大失敗

旧日本海軍は、零戦の弱点を解消するとともに零戦を上回る性能を備えた後継機「烈風」の設計と製造を、**零戦と同様の計画要求書で三菱重工業に委託**

ところが、

空戦性能を重視した旧日本海軍は、エンジン馬力と翼面荷重について、**設計数値を三菱重工業に指示** ← **旧日本海軍は、烈風の設計に立ち入った！**

このため、

三菱重工業では、**計画要求書の要求内容を全て満たす設計が難しくなり(つまり、全体最適化が困難となり)、開発が長期化** → **三菱重工業が試作した烈風は、零戦の性能を下回ってしまったため、旧日本海軍は開発計画を破棄してしまった。**

→ **つまり、空戦性能についての旧日本海軍からの部分最適化の要求が、三菱重工業による全体最適化を破綻させたと言える。**

零戦の成功と後継機「烈風」の開発失敗が残した教訓

零戦と烈風の開発は、旧日本海軍が三菱重工業に、同様の計画要求書で委託



開発のスキーム(枠組み)は、零戦と烈風は全く同じ

しかし、



零戦の開発には大成功したが、烈風の開発には大失敗し、旧日本海軍は烈風の開発計画を破棄 → 大成功と大失敗を分けた要因は、受注者(三菱重工業)に委ねるべき設計内容に、発注者(旧日本海軍)が口出ししたか否かである。

具体的には、



- 零戦は、旧日本海軍が設計に口出ししなかったため、計画要求書の要求内容全ての達成(全体最適化)に向けて、三菱重工業は創意工夫を存分に凝らすことができた。
- 烈風は、空戦性能の部分最適化に係る設計に旧日本海軍が口出ししたため、三菱重工業は設計上の制約を受けて全体最適化が困難となり、開発が長期化した上に計画要求書の要求内容を達成できなかった。 → **開発計画が破棄された。**

開発計画破棄の後、



次のページへ

前のページから

開発計画破棄の後、

三菱重工業は、烈風の独自開発を継続した。



旧日本海軍からの設計

への口出しが無くなったため、三菱重工業では、創意工夫を存分に凝らすことができた結果、短期間で試作した烈風は、**海軍の計画要求書の要求内容を全て達成！**

このため、

旧日本海軍が烈風の設計に口出ししなかったならば、烈風は零戦の後継機として、**終戦の直前ではなく終戦の前年に制式化できていたと推察される。**

つまり、

【 烈風が残した教訓 】

性能発注を成功させるには、
受注者に委ねるべき設計に、
発注者は立ち入ってはならない！



「烈風」(出典: Public Domain)

2023年9月9日

終

H3ロケットと三菱スペースジェットの失敗

～ 性能発注方式の真髓を零戦開発に学び直すことが必要 ～

澤田雅之技術士事務所(電気電子部門)所長
元警察大学校警察情報通信研究センター所長

澤田 雅之