

私，片柳亮二は 40 年以上，好きな飛行機設計の仕事に携わることができ感謝しています．そこで，その経験談の一部をご紹介します．これから飛行機関係の仕事に携わろうとしている若いエンジニアの方の参考になれば幸いです

(片柳亮二著：例題で学ぶ航空工学，成山堂書店，2014 より一部掲載)

第 1 章 飛行機設計の経験談

飛行機が好きな人は多いが，それは格好がよいだけでなく，安定に飛んでいる姿に優雅さを感じるからではないかと思われる．著者は，もう 40 年くらい飛行機を安定に飛ばすための仕事に携わっている．飛行機の運動力学の奥は深い．不具合事象に出会った際にトラブルシュートで悩んだ結果，やっとその現象を理解できたことがこれまで何度もある．前もって不具合原因を取り除ければよいのであるが，これはなかなか難しい．原因がわかってみれば，当たり前な事であってもそれを予知することの難しさは，飛行機に限らずエンジニアであれば誰しも経験するところであろう．

不具合が起こる前にその対策を立てておくことは重要であることは誰もがわかっている．しかし，どうしたらよいのであろうか．著者もこれまで，いろいろな不具合を経験したことを思い出してみると，1 つ言えることは，これまで当たり前に思ってあまり深く考えていなかった事が，いくつか重なって不具合に結びつくのではないかと思う．結局は，とことん考えていなかったである．どんな小さな事でも，なぜなのかと問い直して納得できれば，その周辺の事柄に関しては問題が発生しにくくなるように思う．そのような意味で，本書は飛行機について，これまで当たり前に思っていた事や，結果だけを受け入れている事などを，改めてなぜそのようになっているのかを思いつくままに考察した結果をまとめたものである．内容が雑多になるのをご容赦いただき，「飛行機はなぜそうなっているのかの疑問点」を一緒に考えていただければ幸いである．

本論に入る前に，まず本章では，飛行機を安定に飛ばすための仕事に長年携わってきた著者の経験談を少しお話してみたいと思う．40 年もの間好きな飛行機設計の仕事をやらせていただいた事はありがたいと思っており，とりとめのない話で恐縮であるが，これから飛行機設計エンジニアとして育っていく方に少しでも参考になれば幸いである．

1.1 航空機メーカーに入る前

子供の頃，私は模型飛行機を飛ばしてよく遊んでいた．近くの友人からいろいろと教わったが，なかなか友人のようにうまくいかなかった．当時の模型飛行機は，小さなエンジンでプロペラを回すことによって飛ぶ通称「Uコン」という飛行機であった．U字上のハンドルから2本の線が伸びて模型飛行機に接続されており，操縦者がハンドルを回転させると模型飛行機のエレベータが動く仕組みである．操縦者を中心として半径15mくらいの円を描きながら模型飛行機を飛ばすわけであるが，エンジンの大きな音でびっくりしてなかなかうまく操縦できなかった記憶がある．もう55年以上も前の話であるが，なんといまだにUコンの競技会が行われているようである．

著者が飛行機についてその関わりを強くしたのは，大学で流体力学の翼理論について学んでからである．翼に働く揚力やモーメントが数学的に計算できる理論のすばらしさに驚いたことを記憶している．もちろん粘性のない理想流体といわれるポテンシャル流れであるが，失速して後流が死水域といわれる剥離した流れも扱えるなど応用範囲は広い．その後，写像関数を用いてフラップ付き翼のまわりの流れの解析(図1.1-1)に没頭したが，その時には飛行機というよりは流れの解析そのものが楽しく，飛行機の運動にどのように使われるのかなどはあまり考えたことはなかった．その研究も一段落した頃には，卒業後には航空機メーカーで飛行機の設計の仕事をしたと考えていた．しかし，このままでは非常に狭い範囲の知識だけの偏った航空技術者になってしまう危機感も感じていた．

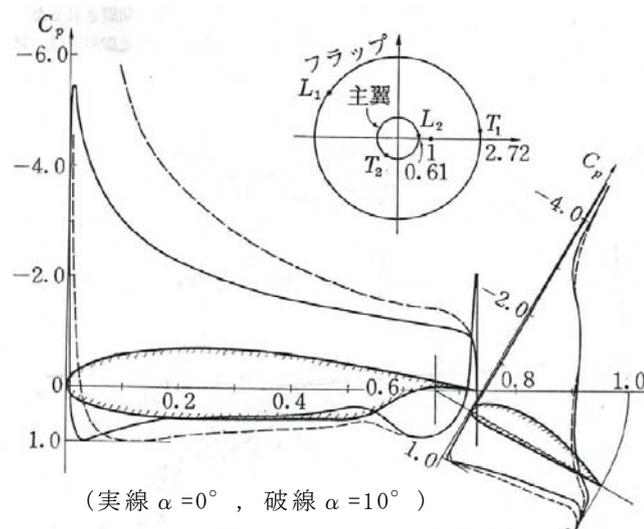


図 1.1-1 フラップ付き翼のまわりの流れの解析²⁷⁾

27) 片柳亮二：スロットド・フラップつき翼のまわりのポテンシャル流，日本航空宇宙学会誌，第20巻 第226号，1972年11月．

1.2 航空機メーカーでの新人時代

会社に入ってから、これを機会に空力解析という狭い分野は卒業して、より広く飛行機の事を学ぼうと考えていた。このように考えた事は、後になって非常に役に立ったと思っている。会社にはいろいろな分野の勉強をした人が入ってくるが、優秀な人ほど大学で行ってきた専門分野には興味があるが他の事には興味を示さない技術者が多いのも事実である。飛行機がどのように飛ぶのかなどにも興味を示さない飛行機設計者もいる。特に設計チームで仕事する場合には、そのような技術者は機体に不具合があったときのトラブルシュート作業には向かないようである。結局トラブルシュートの苦手な技術者は、その後の開発プロジェクトチームには呼ばれないことになる。最初はわからなくても、とにかく首を突っ込んで皆で解決していく姿勢が重要である。

さて、3ヶ月ほどの集合教育が終了すると、著者は航空機技術部の XT-2 設計課に配属された。当時(1972年)は、日本初の超音速機 XT-2 の試作 4 号機が初飛行した頃であり、まさにその開発現場であった。XT-2 設計課は、次のようなグループに分かれていた。構造、一般装備、操縦、エンジンの各グループである。その中で著者は、操縦グループに配属された。ここは、操縦装置のメカ、リンク機構、舵面アクチュエータ、油圧系統などのいわゆる機械装置設計を担当する部署である。それから約 1 年間は、課内の電話番号と量産設計の製造図面作成の補助作業に明け暮れる生活であった。

当時の航空機技術部の方針として、1 年間は他の部署で見習いとして経験した後正式な課に配属されることが行われており、著者は 1 年後に航空機基礎設計課に正式配属された。ここでは、航空機(ヘリコプターも含む)のあらゆる機種について、基礎計画、空力、飛行性能、**安定性・操縦性**解析などが行われていた。開発中の XT-2 についてもこの課で実施されており、著者は XT-2 グループの中で安定性・操縦性の解析を担当することになった。安定性・操縦性の作業とは、飛行機を空中でいかに安定に飛行させるかを検討することである。当時、社内飛行試験のまっただ中にあった XT-2 の検討作業は、待ったなしの厳しい作業であった。しかし、入社当時から考えていた飛行機について広く知りたいという願望がかなったこともあり、特に苦にはならなかった。

最初に私に与えられた仕事は、XT-2 の**ロール運動**のシミュレーション計算であった。低速から超音速までのあらゆる飛行状態において、ロール運動能力を計算し、飛行試験結果と異なっていれば、空力データを修正して解析の精度を上げていった。その結果、XT-2 の非常に精度のよい空力データベースが完成することになった。これが、著者が飛行機の運動計算を専門とするきっかけになった仕事である。

1.3 スピン飛行試験

XT-2 の社内飛行試験が無事終了し、防衛省(当時は防衛庁)に納入された。その後、航空自衛隊岐阜基地において、XT-2 の技術実用飛行試験が始まり、その飛行試験の最終段階において最も危険であるスピン飛行試験が行われた。XT-2 はトレーナー機、すなわち練習機であるので、パイロット養成の中で、誤操作によるスピン状態からの回復手順を会得させる際にも利用される機体である。XT-2 がスピンに入れることが可能で、また確実に回復できる練習機になっているかをテストパイロットが確認するのがこのスピン飛行試験である。スピンから回復できない場合を想定して、胴体の後部に小さなやぐらを組んで、スピンシュートといわれる落下傘を装備して実施された。いざという場合は、このシュートを開いて機体を真下に向けて迎角を下げ、ロール回転を止めてからシュートを切り離せば、確実に回復できる装置である。この飛行試験において、スピンシュートは使われることはなかったのは幸いである。

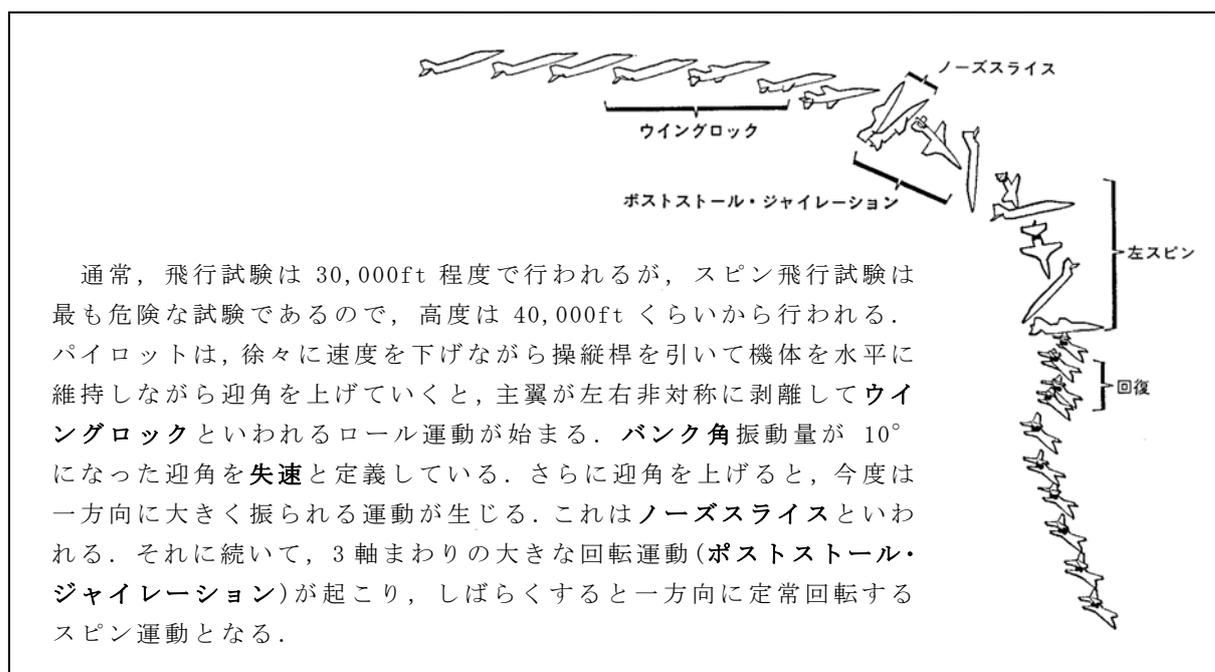


図 1.3-1 スピン飛行試験

スピン飛行試験の中での著者の役割は、これから実施される飛行試験の内容が安全であるかどうかをシミュレーション計算で確かめることであつた。失速後の複雑なスピン状態を計算で予測して、安全であると言わなければならない。計算が間違っていれば、危険な事象を見逃して、パイロットの身を危険にさらすことになる。しかし、まだ飛んでいない飛行特性を予測するのはどうしたらよいのだろうか。結局は、飛行試験が徐々に難しい試験にステップアップしていくのと同様に、計算も徐々に精度をあげていくしかないのである。まずは失速付近の飛行試験データを用いて、シミュレーション計算を行い、納得いくまで空力データを

精度アップした。その結果，失速付近で発生するロール運動が飛行試験結果とほとんど一致するシミュレーション結果が得られた。この結果を基に，いよいよ失速を越えた（ポストストール）領域の特性を推算していった。図 1.3-1 にスピン飛行試験の概略説明を示す。

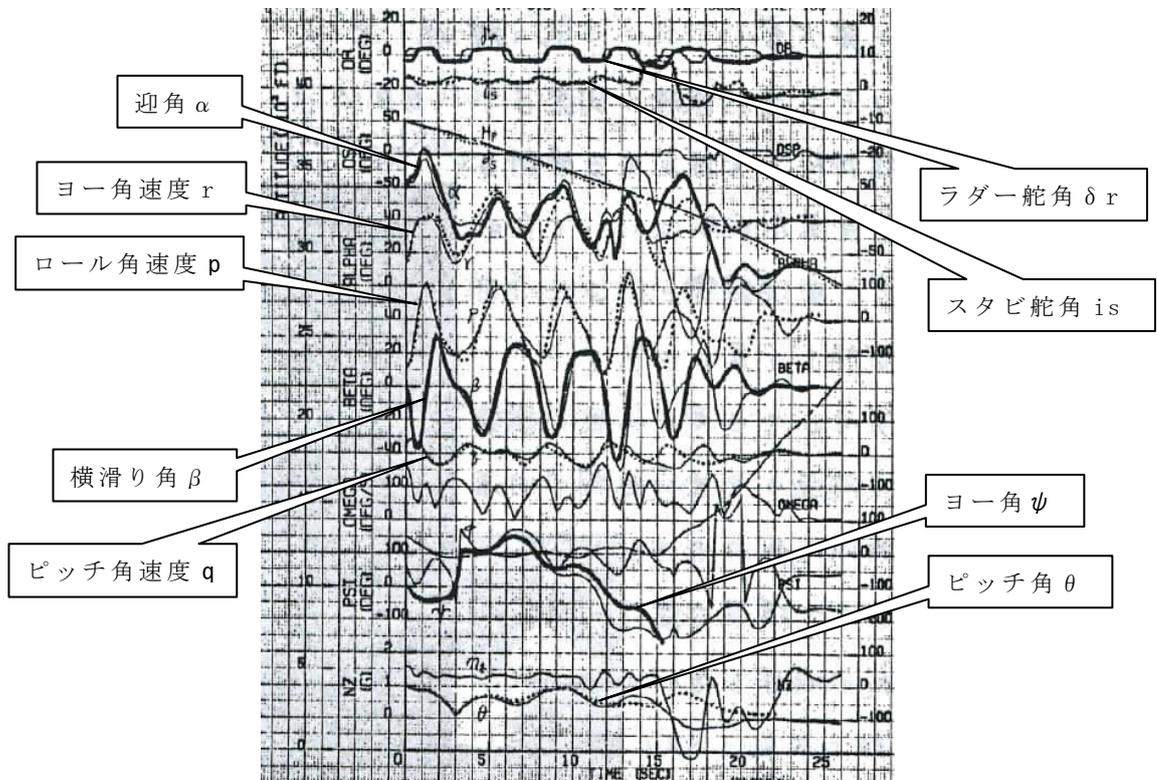


図 1.3-2 スピン飛行試験とシミュレーション比較²⁸⁾

図 1.3-2 は，スピン飛行試験とシミュレーション計算結果との比較の一例である。飛行試験結果の実線に対して，破線で示したシミュレーション結果が非常に精度よく合っていることがわかる。迎角が $30^\circ \sim 60^\circ$ ，横滑り角が $\pm 30^\circ$ の範囲の複雑な運動が計算でこれほど合うとは予想していなかったため驚きでもあった。結果的にスピン飛行試験は無事に終了し，パイロットからも感謝された。このときの経験から飛行機のあらゆる運動は，シミュレーション計算によって十分解析可能であることが実感できた。

28) 増田逸郎，亀山忠史，片柳亮二：超音速高等練習機(T-2)のスピン試験；(その2)シミュレーション計算，日本航空宇宙学会，第15回飛行機シンポジウム，1977年11月。

1.4 T-2CCV 研究機

入社してから5年が過ぎた(1977年)ある日、上司から突然「本社に制御の勉強にいてくれ」と言われた。来年からT-2を改造した研究機が始まる予定で、それは制御技術がキーテクノロジーとなるとの理由であった。当時の飛行機は、簡単なダンパーといわれる安定増加装置が付いているのみで、基本的には従来型のメカニカル操縦装置であった。これをデジタルコンピュータによって機体を制御するいわゆるフライ・バイ・ワイヤ方式(電気式)の操縦装置の研究計画が、防衛庁(当時)のプロジェクトとして立ち上がろうとしていた。航空機基礎設計課には、制御を本格的に勉強してきた技術者がいなかったため、著者は本社の技術本部にあった制御技術課で約3ヶ月間制御の勉強に明け暮れることになった。



図 1.4-1 飛行試験中の T-2CCV²⁹⁾

翌年には、T-2CCV の設計準備チームが立ち上がった。このプロジェクトの立ち上げには大変な技術的決断があった。当時の日本のフライ・バイ・ワイヤ飛行制御技術は、米国から10年以上遅れており、まさに手探りで開発せざるを得なかった。米国ではこの技術開発には手順を踏んで徐々に技術を蓄積してきているが、遅れていた日本ではそのような時間的余裕はなかった。本来ならば、まず1軸(例えばラダー)のみをアナログコンピュータで行い、問題なければ3軸をアナログコンピュータで実現した後、本格的なデジタル式の3軸フライ・バイ・ワイヤ操縦装置へと進むのがよい。しかし、日本はこの技術の遅れを一気に取り戻すために、いきなりデジタル式の3軸フライ・バイ・ワイヤ操縦装置によってT-2CCVの開発を進めることを決断した。約10年もかかるプロジェクトであるが、まだ技術的蓄積のない開発リスクの多いT-2CCVを小牧の住宅密集地の上で初飛行させることを決断したことは、結果的にその後のF-2機の開発において飛行制御装置の日本独自開発につながっていくことになる。

29) 菅野秀樹，片柳亮二：T-2CCVのPilot-Induced Oscillation (PIO)特性とその改善，日本航空宇宙学会誌，第43巻，第498号，1995年7月。

1978年、T-2CCV研究機のプロジェクトが正式に発足した。このプロジェクトの開発目標の主なものは次の3つである。

- ・日本で初めての、デジタルコンピュータ制御の
フライ・バイ・ワイヤ操縦装置の開発
- ・不安定な機体を制御で安定化する技術
- ・カナード翼により、新しい飛行運動を実現
(姿勢を変えないで上下左右に移動など)

著者は、このプロジェクトでは飛行制御則の設計を担当した。既に述べたように、著者は会社に入るまで制御の専門家ではなかった。大学で制御工学の授業を受けた程度である。しかし、後になってわかったことであるが、飛行機の制御装置を設計するには、制御の知識はもちろんであるが、それにも増して飛行機の運動の知識が必要であるということである。制御則の設計手法や解析手法はいずれも線形解析であり、設計の出発点にすぎない。あらゆる飛行条件、パイロットの操縦方法に応じて、機体の空気力が非線形に作用するため、それらの全ての事象に適切な飛行特性を実現するには、飛行機の運動の知識が必要になってくるわけである。

余談であるが、これまでの航空機の設計チームには、

- ・空力班：空気力学的に機体の形状を決める
- ・構造班：空気力の荷重に耐える機体構造を設計
- ・装備班：機械装備品、電気装備品を設計

の3つのグループに分かれていた。操縦装置にフライ・バイ・ワイヤが採用されるようになった1970年代後半以降は、飛行機の設計チームには、新に飛行制御班(コンピュータを用いて飛行操縦装置を設計し、飛行特性も検討も行う)が追加されて、4つのグループによって設計が行われるようになった。制御を利用すると不安定な機体も安定に飛行できるようになるため、もはや空力グループだけでは機体の形状は決まらなくなった。安定性と操縦性に関する事項をバランス良く設計し、パイロットからのコメントに基づいて飛行特性上の問題点を解決するのは飛行制御班の仕事であり、航空機開発の最初から最後まで面倒をみることになる。まさに自分の子供を育てるような長いつきあいとなる。

さて、T-2CCVの開発において、著者の関係したトラブルを2つ紹介しておく。その1つは、**Pilot-Induced Oscillation (PIO)**といわれるパイロット操縦中の自励振動である^{29), 30)}。1983年10月、始めてカナードという前翼を付けた形態で飛行した際、離陸直後に周波数約0.5Hzの横PIOが発生した。幸いパイロットの冷静な判断でメカニカル・バックアップに切り替えて回復した。パイロットが急激かつ大きく横操縦したときに機体応答が遅れて反応したため、フライ・バイ・ワイヤシステム

を切り離すまで振動が収まらなかったのである。このとき、横操縦用のフラップロン舵角は速度制限にかかり三角波形になっており、想定していた以上のパイロット入力にフライ・バイ・ワイヤシステムが対応できなかったのが原因である。

このPIO現象はパイロットが誘起した振動と表現するが、パイロットが悪いわけではなく、機体側の問題である。結局、パイロット入力から機体応答までの遅れを減少させた対策を飛行制御則に盛り込み、2ヶ月後の12月に飛行を再開した。このPIO現象の難しいところは、地上のフライトシミュレータでいくら検証しても現象の見極めが難しいことである。その後、フライトシミュレータは表示視界が広くなり非常に充実してきているが、いまだにPIO傾向を地上試験で完全に取り除くことはできていない。T-2CCVがPIOになった1983年以降も、スウェーデンのJAS39、米国のYF-22、C-17、B777、欧州のA320など飛行中にPIOに陥っている。JAS39では、試作機と量産期でそれぞれ1回ずつPIOに遭遇して機体を大破させている。いまだにPIOは確たる設計基準が確立していない未解決問題となっている。

フライ・バイ・ワイヤ操縦装置は、高ゲインのフィードバック制御、フルオーソリィティ(舵面の作動範囲一杯まで使うこと)、デジタルコンピュータの演算遅れ等、飛行制御系が高性能化するにつれて、全体のシステム遅れが増しアクチュエータの舵面速度制限にかかることでPIO発生のかっかけになるようになった。機体の運動制御性能は大幅に向上した反面、制御能力を超えた領域では操縦性が極端に悪化するという、従来になかった問題に悩まされるようになったのは皮肉である。いずれにしても、フライ・バイ・ワイヤという高性能飛行制御装置を採用する場合には、想定外の最悪の状態でも安全を保てるように考えておくことの重要性を教えられたトラブルであった。T-2CCVのPIOで得た教訓は、その後開発されたF-2機に十分活かされている。

著者の関係したトラブル紹介の2つ目は、**制御・構造連成振動**といわれる操縦装置と構造とが連成して振動する現象である。フライ・バイ・ワイヤ操縦装置は、フィードバック制御を行うシステムであるため、機体運動センサーが胴体内に配置される。フィードバック制御によって舵面が動かされると舵面には空気力が発生するが、それと同時に回転ヒンジラインから離れた位置にある舵面の重心から慣性力が作用する。これらによって弾性体の機体構造に弾性振動が誘起される。機体に取り付けられたセンサーを通して、この構造振動がコンピュータに入力される。コンピュータ内では、入力されたセンサー情報を基に機体運動を抑制するためのフィードバック制御用の舵面作動指令がアクチュエータに出力されるが、センサーに入り込んだ構造振動成分もフィードバックとして舵面アクチュエータに出力され、これがさらに構造振動を助長すること

になる。コックピットの計器が読めなくなったり、ひどい場合には構造を破壊してしまう可能性もある(図 1.4-2)。

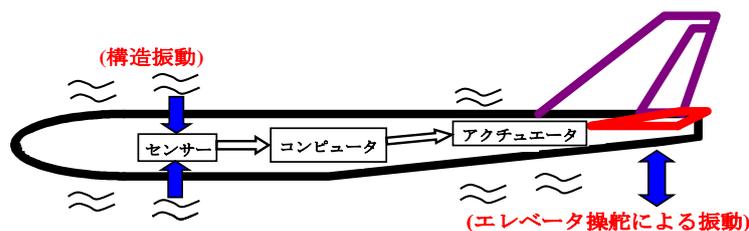


図 1.4-2 制御・構造連成振動

対策としては、センサーを構造振動を受けにくい位置に取り付ける方法、制御則内のフィルタ演算処理で構造振動部分をカットする方法などがある。ただし、フィルタ演算による方法は頼りすぎると応答に遅れを生じて P I O 発生要因にもなるので注意が必要である。T-2CCV では、ラダー系統で構造連成振動が発生した。結局、P I O への影響を最小限に抑えながら、構造振動カットフィルタ(ノッチフィルタ)を制御則に盛り込むことで解決した。本現象はフィードバック制御を積極的に用いるフライ・バイ・ワイヤ機の開発にとって難しい問題の 1 つである。

ここで紹介したトラブルは飛行試験で生じたものであるが、開発過程においても当初の予想通り多くの困難の伴う開発であった。まさに技術を 1 つ 1 つ積み上げていく手探りの開発であったが、設計チームの士気は高く一致団結して困難に立ち向かっていった。T-2CCV プロジェクトの成功は日本のフライ・バイ・ワイヤ飛行制御技術を飛躍的に向上させたが、その一番の成果は多くの技術者が自信を得たことであった。

このほか、以下の経験談については、「例題で学ぶ航空工学」をご参照ください。

1.5 QF-104 無人機

1.6 XF-2 の開発

以上