

零式艦上戦闘機の開発背景

— 超々ジュラルミン開発・量産から零式艦上戦闘機への繋がり —

梅原 博和

はじめに

零式艦上戦闘機（以下、「零戦」と略称）の開発は、1937 年 10 月に海軍より十二試艦上戦闘機の計画要求書が三菱重工と中島飛行機（後の富士重工）両社に公布されたことに始まる¹。これに示された性能は、当時の技術水準からみて「甚だ過酷」なものと言われ、中島は社内事情により試作を辞退している²。当時、日本の航空機工業は欧米諸国の有名な機体やエンジンの製作権を製造機械と共に購入し、また、外国人技術者を招聘して設計・製作法を教わるといった模倣時代から抜け出し、ようやく機体やエンジン設計の自立化が始まって僅か 5 年であった³。また、航空機開発に必要な重化学工業も 1930 年代に入り進展し、電力需要も急速に増大していった時代だった⁴。しかし、まだその多くは海外に依存しており⁵、日本の航空機工業含め重化学工業の水準は発展途上にあり、欧米諸国の水準と比較すると低かったと言える。こうした状況の中、零戦を開発したのが三菱重工名古屋航空機製作所の主任設計技師であった堀越二郎である。堀越は、零戦設計における課題としてエンジンの決定、プロペラの選択、重量軽減対策及び空力設計の 4 つを挙げており、最大の難関は重量軽減対策であったとしている⁶。当時の日本製エンジンは馬力不足という理由から、機体重量の軽減対策は必須であった。そのため、零戦開発において、軽くて頑丈な軽合金である超々ジュラルミン開発は必要不可欠であった。

この超々ジュラルミンは、1935 年 8 月から住友金属工業（以下、「住友金属」と略称）の研究部員であった五十嵐勇博士を中心に研究開発が進め

¹ 日本海軍航空史編纂委員会編『日本海軍航空史 第 3 制度・技術編』時事通信社、1969 年、416 頁。

² 同上、417 頁。

³ 林克也『日本軍事技術史』青木書店、1957 年、255-256 頁。

⁴ 梅本哲世『戦前日本資本主義と電力』八潮社、2000 年、218 頁。

⁵ 林『日本軍事技術史』256 頁。

⁶ 吉田英雄「超々ジュラルミンと零戦—超々ジュラルミン開発物語—(その 2)」『住友軽金属技報』第 54 巻第 1 号、2013 年、282 頁。

られたもので、1936 年 6 月には基礎研究を終えて特許を出願し、1938 年 12 月に海軍航空規格として採用されるまでに至っている⁷。そして、この超々ジュラルミンが零戦の主翼桁材に採用され、1940 年 7 月には零戦が海軍の制式機として採用されている⁸。それまで、技術後進国であった日本が、高度な技術を要する超々ジュラルミン開発から零戦開発に至るまで僅か 5 年という短期間で実施したのである。現代における戦闘機開発が約 15 年の歳月をかけて実施していることと比較すれば⁹、非常に短期間での実施である。何故、技術後進国であった日本が、この短期間で材料開発から戦闘機開発まで実施できたのか。これまでの先行研究では、超々ジュラルミン開発に関して、主に研究員による開発の発想や技術面に焦点をあてた記述がなされ、それが零戦開発に結び付いたと結論付けている。その上で、この超々ジュラルミンを採用した零戦は機体重量の軽減化が図られ、速度、上昇力、格闘戦性能、航続力等の総合性能において当時の世界水準を抜き、日華事変及び太平洋戦争では大戦果を挙げたとされている¹⁰。しかし、これらの先行研究では、研究開発を支える産業基盤についての視点が見落とされている。

近年、日本における研究開発は応用研究に主眼が向けられている。研究開発に関して村山裕三は、技術の発展においては、産官学が一体となったテクノシステムを形成し、技術は其中で育つと指摘する。その上で、順調な発展を遂げるには技術の発展方向、すなわち技術をどのような分野に発展させていくかといった「技術の流れ」に合致するようテクノシステムを転換させることが必要だと論じている¹¹。これは、技術発展や再生に主眼を置いたものである。基礎研究の成果が実らない場合があるのは知られているが、近年では、研究開発が事業化に至らない現象が生起している¹²。三菱総合研究所による研究論文では、このデスパレーと呼ばれる状況の要因

⁷ 住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属年表一平成元年版一』住友軽金属工業、1989 年、65 頁。

⁸ 日本海軍航空史編纂委員会編『日本海軍航空史 第 3 制度・技術編』421 頁。

⁹ 2030 年代半ばに退役する F-2 戦闘機の後継機開発への着手が挙げられている。防衛省『令和元年版 日本の防衛—防衛白書—』日経印刷株式会社、2019 年、234 頁参照。

¹⁰ 日本航空学術史編集委員会編『日本航空学術史 1910-1945』日本航空学術史編集委員会、1990 年、第 1 篇個人篇 5 頁。

¹¹ 村山裕三『テクノシステム転換の戦略—産官学連携への道筋—』日本放送出版協会、2000 年、9 頁。

¹² 魚住剛一郎「日本におけるデスパレーと技術戦略の再構築」『研究開発リーダー』第 4 巻 10 号、2008 年 1 月、7 頁。

として、ビジョンの描出や需要コンセプト化の問題、人材面の問題、部門及び組織間の連携問題、企業文化の問題、資金面の問題などを指摘している¹³。これらは、全て技術を支える基盤となる事項であり、研究開発は優れた技術のみならず、それを支える基盤がなければ成立しない。超々ジュラルミン開発当時は、この基盤そのものが十分に整備されていなかった。

以上を踏まえて本稿の目的は、何故、超々ジュラルミンの開発から量産まで、技術や産業水準が劣っていた日本で実現できたかを明らかにすることである。そのために、零戦の素材である超々ジュラルミン開発が短期間で成功したのは何故か、産業化の実現基盤がどう整えられたのか、以上を村山の提示する 21 世紀におけるテクノシステム・モデルを参考に検討する。よって本稿は次のように構成される。

第 1 節は、何故、超々ジュラルミン開発が可能だったのかを、開発に至る経緯、日本のジュラルミン技術の歩み、超々ジュラルミン開発について先行研究を踏まえつつ整理する。第 2 節は、開発及び量産を支える基盤となる工場の規模、アルミニウム及び電力の確保、軽金属産業に対する政策、研究員及び技術者の教育について明らかにする。第 3 節は、超々ジュラルミン開発という基礎研究が、何故これほどまで上手く零戦開発という応用研究に活かすことができたのかについて分析する。

1 超々ジュラルミンの開発

(1) 超々ジュラルミン開発に至る経緯

住友金属が超々ジュラルミン開発を開始した契機は、当時の海軍航空廠から住友金属に対し開発依頼があったことによる¹⁴。超々ジュラルミンの開発が開始された 1935 年当時、既に日本には超ジュラルミンという軽合金が実用化されていた。これは、米国のアルミニウム会社であるアルコア (Alcoa) 社で開発された 24S という軽合金を主目標に住友金属で材質改良の研究を進めて開発されたものであった¹⁵。当時、日本国外における軽合金の開発は、英独仏米で行われていたが、いずれの国でも軽合金の強度を向上させると、時期が経つにつれて割れが発生する時期割れ (応力腐食割れ) の課題があり実用化できていなかった。この課題は日本にとっても同様であり、

¹³ 井上隆一郎、二瓶正、石川健「デスパレー現象と産業再生—高い技術力を産業競争力へ転換する仕組み—」『三菱総合研究所所報』第 42 号、2003 年、12 頁。

¹⁴ 日本海軍航空史編纂委員会編『日本海軍航空史 第 3 制度・技術編』859 頁。

¹⁵ 住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属年表』60 頁。

当時、日本電工 (後の昭和電工) では、トム合金という 24S よりも高い強度の軽合金を開発していたが、時期割れの課題が解決できておらず実用化には至っていなかった¹⁶。このトム合金の強度に関しては海軍も相当気にしており、時期割れを解決し実用化できるよう住友金属に対して指令が出されていた¹⁷。

この当時、住友金属が開発した超ジュラルミンを採用し試作された九試単戦 (後の九六式艦上戦闘機) の社内飛行試験が三菱重工で行われていた。結果は、上昇力と速度において世界に類例のない驚異的性能を発揮し、実に日本の航空発祥以来 20 年にして、ようやく世界水準を抜く純国産機が出現したとされている¹⁸。しかし、九試単戦の開発において、「艦戦」ではなく「単戦」とした背景には、海軍航空本部が航続力、着艦といった艦上戦闘機としての要求を除外し、専ら速度と上昇力の優れた戦闘機を試作する狙いがあり、開発は多分に実験的な性格を帯びていた¹⁹。そのため、これより後に艦上戦闘機として実用化するために改修が加えられた²⁰。それでも、超ジュラルミンを採用した国産戦闘機が世界水準を抜く性能を示したことで、日本の航空産業における国産機開発の自信に繋がったと言える。

こうした九試単戦の開発実績から、海軍は更に高度な戦闘機開発には、超ジュラルミンよりも高強度の軽合金が必要であり、その開発の重要性を認識したと言える。このように、住友金属における超々ジュラルミン開発は、米国の 24S よりも高強度の軽合金開発という海軍の具体的な要望によって始まり、その目的が明確であった。こうした要望が住友金属の研究課における研究開発を後押ししたと考えると、明確な高強度の軽合金開発という目的の存在意義は極めて大きかったと言える。

(2) 日本のジュラルミン技術の歩み

以上の日本におけるジュラルミン技術の発展について、村山が主張するテクノシステムを援用し考察していく。村山によると、テクノシステムは、

¹⁶ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」272 頁。

¹⁷ 石田四郎「軽金属工業発達史 (其の一) 航空機用軽金属材料について・第 1 回軽金属座談会記録」『軽金属』第 6 号、1953 年 2 月、123 頁。

¹⁸ 日本海軍航空史編纂委員会編『日本海軍航空史 第 3 制度・技術編』416 頁。

¹⁹ 岡村純編『航空技術の全貌 (上) 一わが軍事科学技術の真相と反省 第 3-1』興洋社版、1953 年、114 頁。

²⁰ 実用化のためエンジンの換装、降着装置の強度向上などの改修がなされた。杉田親美『三菱海軍戦闘機設計の真実—曾根嘉年技師の秘蔵レポート—』国書刊行会、2019 年、63-64 頁参照。

国の文化や歴史などの特質が根強く存在することにより、その技術発展の型があるとしている²¹。その中で、日本型テクノシステムは、外国で生まれた基礎研究、応用研究の成果を利用し、この上に日本での開発、設計、生産を上乗せするパターンであると主張する²²。加えて、日本型は、有望と予想される技術に最大限コミットして研究開発を行うシステムであるため、技術の流れが判明している場合には強点となるが、判明していない場合は適応しにくく弱点になると指摘する²³。こうした日本型の特徴を踏まえ、独自のテクノシステム再生の条件として、開発現場における裁量の自由を重視した「個人の自由」、技術者の開発意欲を駆り立てる「求心力」、技術立国を目指すといったイデオロギーの時代に替わって、経済的な利害関係を重視した「インセンティブ」が必要であると指摘する²⁴。以上のことから、テクノシステムとは、技術発展のために産官学連携がどのように機能しているかに重点があると言える。また、村山はこのテクノシステムが上手く機能するためには、産官学それぞれが同等の役割を果たすのではなく、必ずシステムを牽引するセクターの存在を挙げている。戦後の日本型において牽引してきたのは、政府と民間大企業であり、これら官民が協力して研究開発体制を作り上げ、技術力の向上を目指してきている²⁵。その上で、21世紀時点で既存の大企業が牽引力を発揮してテクノシステム転換の糸口を提供し、これに政府と大学が追随することで形成される日本型テクノシステムというシナリオが最も現実的だと結論付けている²⁶。

以上をまとめると、日本における技術発展の型は、外国で生まれた基礎研究、応用研究の成果を利用し、既存の大企業が技術の発展方向を的確に読み取り産官学連携を牽引しつつ発展させるパターンである。加えて大企業には、システム再生のために個人の自由、求心力、インセンティブの要素が必要なのである。こうした視点でジュラルミン技術の発展について見た場合、どうであろうか。

日本における官民でのジュラルミン研究の起源は、1916年にドイツのツェッペリン飛行船の破片であるジュラルミンの標本が日本に持ち込まれ、この研究を海軍から住友金属に委託されたことにある²⁷。このような経緯と

21 村山『テクノシステム転換の戦略』13頁。

22 同上、113頁。

23 同上、218頁。

24 同上、249頁。

25 同上、232頁。

26 同上、244頁。

27 住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属年表』19頁。

なった理由は、当初、艦政本部で研究を始めようとしたものの、海軍工廠には研究施設がなかったからである²⁸。加えて、1913 年頃から住友金属の伸銅所では、ジュラルミン研究に励んでいた実績があり、試験係の杉浦稠三氏が「工場に研究が専属することによって、官立の試験所ではできないような工場規模の研究が行える」と発案し、時を同じくして 1916 年に研究課が設立されている²⁹。民間企業である住友金属では、海軍よりも先行的にジュラルミン研究を進めており、実際にこの分野の技術開発も民主導で行われた。また、研究課が設置された 1916 年頃、欧米諸国では既にジュラルミンが実用化されており、日本の技術は遅れていたことがうかがえる³⁰。住友金属の研究課では、持ち込まれたジュラルミン破片の材料分析が行われ、この分析結果や英国金属学会誌 JIM (Journal Institute of Metals) の文献をもとに工場における試作研究がなされた。1919 年には、日本初のジュラルミン工場試作が終了し、「住友軽銀(ジュラルミン)」と命名している³¹。1922 年 1 月には、ジュラルミン製造技術の指導を受けるため英人技師ペーガン (T. W. Pagan) を雇用了。ペーガンは、横須賀海軍工廠が前年から飛行艇建造のため英国のショート・ブラザーズ (Short Brothers) 社から招いた 21 名の技術者から、海軍の推薦によって選ばれた³²。また同年、第 1 次世界大戦の戦勝国として、ドイツから航空機等の戦利品を受け取る代わりに、金属機体製造技術やジュラルミン製造技術を習得する権利を得て、海軍、三菱重工、住友金属から技術者が渡独している³³。この背景には、当時艦政本部第二部部長である山内四郎少将が、将来の戦闘機は全金属製に進化するものと判断し、金属機を三菱重工に、ジュラルミンを住友金属に製造させる方針を決めていたことがある³⁴。住友金属は、1928 年にアルコア社と提携し、ジュラルミンの主原料となるアルミニウム地金を安定的に提供できる態勢を整え、1935 年にはアルコア社が開発した 24S と同程度の超ジュラルミンを工場試作している³⁵。超々ジュラルミン開発が始まった

²⁸ 同上。

²⁹ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」265 頁。

³⁰ ドイツでは既にジュラルミンが第 1 次世界大戦における空爆兵器であったツェッペリン飛行船の骨組み材料に使用されていた。牧野光雄『飛行船の歴史と技術』(財)交通研究協会、2010 年、42・48 頁参照。

³¹ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」265 頁。

³² 住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属年表』32 頁。

³³ 同上、33 頁。

³⁴ 日本海軍航空史編纂委員会編『日本海軍航空史 第 3 制度・技術編』859 頁。

³⁵ 永田公二「わが国アルミニウム産業の明るい未来を拓くために一温故知新 Back to the Future—(その 1)」『軽金属』第 60 巻第 4 号、2010 年、194 頁。

1935 年当時は、日本のジュラルミン技術が、ようやく欧米諸国と同程度の水準に至ったところであった。

こうした日本のジュラルミン技術の発展は、海外からの豊富な文献と技術導入があった他、海軍からの積極的な関わりがあった。この発展は、民間企業である住友金属が先行的にジュラルミン研究を開始し、そこに官が加わり民と官が連携して成し得たものである。これは、村山が主張する官民が牽引セクターとなり、ジュラルミン技術の発展という明確な「技術の流れ」が存在する中で、諸外国のジュラルミン技術を応用し、発展してきた日本型テクノシステムの典型例と言える。

次に、テクノシステム再生の条件である個人の自由、求心力、インセンティブは、超々ジュラルミン開発にどのように関わっていたのであろうか。

(3) 超々ジュラルミンの開発

超々ジュラルミン開発当時、日本も含め英独仏米のジュラルミン開発における課題は、時期割れの解決であった。この課題を研究し克服したのが、当時住友金属伸銅所の研究員であった五十嵐である。五十嵐は、この時期割れの課題について、それまでの研究成果である超ジュラルミンの他、イギリスの E 合金、ドイツの Sander 合金を基に次のような実験段階を経て克服する³⁶。まず、最も時期割れの甚だしいものを試作し割れの原因を探った。何度も実験を繰り返していく中で、割れる原因は水分による結晶粒界の局部腐食であることを突き止め、次に局部腐食が割れの原因ならば、全面腐食するようなものを試作し割れが発生しない金属の実験を繰り返し実施した。イギリスとドイツで開発された合金を対象に実験が進められ、このような独創的で逆説的な発想が、超々ジュラルミン開発の成功要因の一つとされている³⁷。この研究課の設立、五十嵐の逆説的な発想に基づく実験の繰り返しに村山の主張する個人の自由が存在している。すなわち、この開発の契機は海軍からの要望であったものの、その方法には開発現場の自由度が確保されていた。求心力では、当時の社会情勢は準戦時下であり、予想される戦争への備えが必要であったことに加えて、海軍からは超ジュラルミンよりも強度の高いジュラルミン開発という明確な目標が付与されていた³⁸。そのため、開発に携わる者は、欧米諸国の技術水準を超越しよう

³⁶ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」292 頁。

³⁷ 寺井士郎「ジュラルミンと ESD 開発における創造性」『住友軽金属技報』第 29 巻 1 号、1988 年 1 月、96-98 頁。

³⁸ 永田「わが国アルミニウム産業の明るい未来を拓くために」193-194 頁。

という意欲に駆り立てられ、十分な求心力があったと言える。インセンティブでは、当時の情勢は準戦時下であり、インセンティブよりもイデオロギーが優先された時代であった。

また、超々ジュラルミンの開発は、五十嵐の発想と幾度にも及ぶ実験という苦悩があって達成されたのは間違いない。しかし、これはイギリスの E 合金、ドイツの Sander 合金、超ジュラルミンを基にその組成を変化させたもので、何もないゼロからの開発ではなかった³⁹。つまり、西欧諸国の既存技術を応用し開発したものであり、そこには日本型テクノシステムが機能していた。このように日本におけるジュラルミン技術の発展、そして、超々ジュラルミン開発によってその技術が諸外国を超越するに至るまでのプロセスについて、先行研究を整理しつつ村山の主張するテクノシステムを援用し考察すると、そこには日本型テクノシステムの存在とシステム再生の条件が揃っていた。

超々ジュラルミンが開発できた要因について、先行研究で述べられているのは、超ジュラルミンよりも高強度の軽合金開発という開発目標が明確化されていたこと、開発者の独創的で逆説的な発想とこれに基づく系統的な実験の繰り返しが行われたこと、これら実験を含む研究を支える優秀な技術者や実験工場の存在、研究成果の記録化や理論化、製品化するために協力した製造部門の存在とされている⁴⁰。これらの視点は「人」と「技術」に位置づけたものと整理できる。しかし、研究開発に必要な要素はこれだけではない。個別要素それぞれのみならず、日本型テクノシステムが活かされ、システムとして上手く機能していたことが大きな要因である。その中で研究試作を製品化する生産力、研究課の設立などの研究開発を支えた産業基盤も同時に構築されていった。つまり、研究開発を支える産業基盤がなければ、どんなに優秀な人材や技術があっても成功は成し得ない。これらの産業基盤の概念は村山モデルにもない。そのため、研究開発及び量産を支える基盤となる工場施設、試作・量産に必要な原材料及び電力の確保、産業を支える国の政策、そして、研究員及び技術者を確保するための

³⁹ 超々ジュラルミンは、研究の基礎となった E 合金、Sander 合金、D 合金 (超ジュラルミン) の頭文字をとり ESD と命名され、これが偶然にも Extra Super Duralumin の頭文字ともなり超々ジュラルミンに通じたとされている。住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属工業年表』65 頁参照。

⁴⁰ 寺井「ジュラルミンと ESD 開発における創造性」96-97 頁；吉田「超々ジュラルミンと零戦」293-294 頁；永田「わが国アルミニウム産業の明るい未来を拓くために」197 頁。

教育を明らかにしつつ、これらに関しても村山が主張するテクノシステムを援用し第 2 節で述べていく。

2 超々ジュラルミンの産業基盤

(1) 工場の規模拡大

軽金属の加工技術には、金属を液体に溶かして型に流し込んで加工する鑄造技術、金属を叩くことによって成形加工する鍛造技術、複数のローラーに金属を過すことにより板、棒、管などの形状に加工する圧延技術、金属を耐圧性の型枠に入れ、押棒によって金属に圧力を加えて押し出すことで所定の断面形状に加工する押出技術がある。超々ジュラルミンを量産するためには、加工工程ごとに専用の機材が必要となるが、これらは需要増加に伴って導入されていったことが既に先行研究で述べられている⁴¹。ここでは、機材導入に際し工場の規模及び資金はどのように拡大されていったのかに着目していく。

住友金属は 1916 年に研究課を設立して以来、英人技師の雇用やドイツからの技術習得による技術の導入、米国のアルコア社との提携により原料であるアルミニウム地金の入手、超々ジュラルミン製造技術を導入することで、技術及び工場生産の基盤を確保してきた。1935 年 9 月には、それまで軽合金の製造を担ってきた住友伸銅鋼管株式会社と鉄鋼業と銅の製造を担ってきた株式会社住友製鋼所が、経営の合理化及び技術上の改善に役立てることをねらいに合併し、住友金属工業株式会社が設立された⁴²。当時の工場の規模は、桜島工場（伸銅所）、尼崎工場（鋼管製造所）、旧製鋼所（製鋼所）であり、資本金は 4000 万円であった。その後、工場の規模は、海軍に加え陸軍からの軽合金生産要求も高まり、1937 年 6 月から 1938 年 7 月の間に次々に軽合金増産を要求してくる陸海軍の需要に応えるべく、8 次に渡る軽合金増産・拡張計画を立案し実行している⁴³。

この僅か 1 年の間に 8 回もの増産・拡張計画が立案され実行されている状況からすると、軍は如何に身勝手な要求を住友金属に対して実施していたのかがうかがえる。そして、1937 年には工場拡張も限界を迎え、各工場とも拡張する余地がない程までに拡大した。そのため、1939 年には名古屋

⁴¹ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」284-289 頁。

⁴² 住友金属工業株式会社編『住友金属工業六十年小史』住友金属工業社史編纂委員会、1957 年、115 頁。

⁴³ 住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属年表』67-71 頁。

工場、神崎工場の新規建設に着手している⁴⁴。また、資本金は、零戦開発が完了する頃の 1940 年 9 月には、2 億円に達し僅か 5 年で 5 倍もの成長を遂げている⁴⁵。こうした工場の規模拡大には、軍需急増の他、軍からの直接的な関与があった。各工場は、1938 年 4 月の国家総動員法の公布により軍による管理が始まり、1940 年には、陸海軍共同管理とされ生産又は修理の業務に関し、陸海軍大臣の指揮監督を受けるまでになった⁴⁶。

こうした 1935 年から 1940 年にかけての工場拡大、資本金の増額、軍の関与からわかるとおり、日華事変が生起した 1937 年以降、軍需の増大によって資金が増えた他、政策によって急速に工場が拡張されていった。このような背景により、住友金属は超々ジュラルミン量産に必要な設備投資が可能となり、結果としてインセンティブも得たのである。こうして研究の基盤となる工場規模は拡大されたが、これでもジュラルミンを製造するための原材料が入手できなければ量産化はできない。この点についてはどうであったのだろうか。次に原材料であるアルミニウムの入手について述べていく。

(2) アルミニウムの入手

住友金属が開発した超々ジュラルミンの代表組成は、亜鉛が 8%、マグネシウムが 1.5%、銅が 2%、マンガンが 0.5%、クロムが 0.25%で、残りの約 90%がアルミニウムである⁴⁷。これにより製造には多量のアルミニウムが必要であることが分かる。アルミニウムを製錬するには、ボーキサイト又は礬土頁岩その他の原料からアルミナを生成、次にこれを電気分解してアルミニウムに還元する⁴⁸。なお、この電気分解にアルミニウムが電気の塊とも称される程に多量の電力を必要とする⁴⁹。このアルミナ生成において、礬土頁岩、明礬石、粘土等の原料から生成したアルミナは、ボーキサイトから生成したものに比べて不純物が多く、原価が高くなる欠点がある⁵⁰。したがって、より純度が高く生産性の良いアルミナ生成が可能なのはボーキサイトになるが、日本ではこれを採取できず、主に礬土頁岩、明礬

⁴⁴ 同上、72-73 頁。

⁴⁵ 同上、74 頁。

⁴⁶ 住友金属工業株式会社編『住友金属工業六十年小史』130 頁。

⁴⁷ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」278 頁。

⁴⁸ 東洋経済新報社編『昭和産業史第 I 巻』東洋経済新報社、1950 年、223 頁。

⁴⁹ 島村哲夫、下山佳雄 監修『日本産業構造の課題第 12 生産性篇』財団法人電力経済研究所、1958 年、37-38 頁。

⁵⁰ 東洋経済新報社編『昭和産業史第 I 巻』216 頁。

石、粘土等によるアルミナ生成に限定されていた。そのため、航空機製造に適用できる程の高い純度のアルミナ生成ができなかった。住友金属は 1920 年代後半にアルコア社と提携し、アルミニウム地金の提供を受けていた。つまり、ジュラルミン製造に必要な原材料は米国に依存していたのである。その後、1931 年 9 月に起きた満州事変以降、アルミニウム地金輸入に不安が募り国産熱が高まった⁵¹。こうした情勢から純度の高いアルミニウム地金生産に向けて、アルミニウム製錬各企業は、ボーキサイトによる製錬に転化していく。住友金属においても、1934 年に住友アルミニウム製錬を設立させたことで、ようやく国産品が市場にでるようになった⁵²。超々ジュラルミンの開発が始まった 1935 年時点では、アルミニウム製錬の国産化は、ジュラルミンの量産には不十分であったと言える。住友アルミニウム製錬も 1937 年には明礬石からボーキサイトによるアルミナ生成に転換するが、軌道にのるのは 1938 年 2 月頃からである⁵³。1930 年代における日本のアルミナ生産量と住友アルミニウムによるアルミナ及びアルミニウム地金生産量は、表 1 に示すとおりである。

表 1 日本のアルミナ生産量・住友の地金とアルミナ生産量 (単位 トン)

西暦	日本のアルミナ生産量			住友の地金とアルミナの生産量	
	ボーキサイト	その他	計	アルミナ	地金
1935	0	7,434	7,434	—	—
1936	0	13,167	13,167	627	601
1937	24,316	7,181	31,497	1,259	1,053
1938	38,656	9,618	48,274	2,334	2,034
1939	53,959	11,240	65,196	5,160	3,106
1940	81,873	15,650	97,487	11,162	5,480

出典：清水啓『戦争とアルミニウム』105、115 頁。

表 1 より、超々ジュラルミンの基礎研究が終了した以降の 1937 年から、アルミナ生産には、純度の高いボーキサイトが使用されるようになり、住友アルミニウムでもアルミニウム地金及びアルミナの生産量が急増していることが分かる。このボーキサイトは、先ほど述べたように、日本本土と

⁵¹ 清水啓『戦争とアルミニウム』カロス出版、2002 年、100 頁。

⁵² 住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属年表』60 頁。

⁵³ 清水『戦争とアルミニウム』115 頁。

各植民地、満州及び中国の占領地域である内部圏には大したものはないとされている⁵⁴。表 2 はボーキサイトの輸入高を示したもので、これによるとボーキサイトは南太平洋地域から輸入し、年々急増していることがうかがえる。

表 2 ボーキサイト輸入高 (単位 トン)

会計年度	パラオ	ビンタン	マライ	その他	計
1936	0	9,192	958	14,612	24,762
1937	0	46,663	27,984	26,502	101,149
1938	3,655	117,269	76,505	23,049	220,478
1939	13,987	202,081	104,692	31,698	352,458
1940	22,495	194,729	62,965	0	280,189

出典：アメリカ合衆国戦略爆撃調査団編『日本戦争経済の崩壊』197 頁。

このように零戦開発が終了する 1940 年までに、日本独自で純度の高いアルミニウム生産ができるよう態勢を整えた。この背景には、民間企業による努力に加えて、軍からの要求も働いていた。続いて、アルミニウム製錬に必要な多量の電力はどのように確保されたのかを検討する。

(3) 量産に必要な電力確保

アルミニウム製錬の国産化が軌道に乗り出した以降の 1939 年において、アルミニウム製錬の計画目標未達成となった原因の一つに電力不足が挙げられる⁵⁵。住友金属でも電力制限を受け、操業短縮・休業等を余儀なくされていた⁵⁶。ジュラルミン量産のため工場規模の拡大、アルミニウム生産増加によって電力が不足し、需要に応じるだけのジュラルミンを供給できていなかったことがうかがえる。日本政府は電力不足の打開策として、稼働時間帯を考慮したアルミニウムの製造や電力調整令を公布し、優先企業に対し電力を優先的に供給した。住友金属は、この優先企業として扱われ、ある程度優先的に電力供給を受けることができたが、1939 年 8 月から 1940 年 3 月における電力不足による生産への影響は約 12 日間の操業不能に該当したとされている⁵⁷。当時、日本の電力生産方式は、水力発電を主に火力

⁵⁴ アメリカ合衆国戦略爆撃調査団編『日本戦争経済の崩壊』正木千冬訳、日本評論社、1950 年、21 頁。

⁵⁵ 清水『戦争とアルミニウム』122 頁。

⁵⁶ 住友金属工業株式会社編『住友金属工業六十年小史』149 頁。

⁵⁷ 同上、149 頁。

発電を併用することで発電能力を維持する機構となっていた。1939 年の電力不足は、異常渇水と石炭入手難により水力、火力ともに発電出力が減少したことが主要因である⁵⁸。これを見ると自然災害による電力不足に思われるが、これとは別に電力事業の整備が不十分であったことにも原因があった。1920 年代後半は、不況や電力資本間の競争激化により電力は過剰供給の状態であった⁵⁹。ところが、1930 年代に入ると、日本の重化学工業化に伴い電力需要が増加した。特に金属工業における増加が顕著で、1931 年から 1937 年において総電力需要増加率が 1.8 倍であったのに対し、金属工業の増加率は 4.2 倍にも及んだ⁶⁰。そのため、逓信省は 1933 年までの電力需給実績を基に以後の需要を想定した電力需給計画を作成し、長期的に安定した電力供給を試みたが、民間団体である電気協会は、電力過剰の再発生を恐れ電力事業の整備には消極的であった⁶¹。この結果、1934 年から 1938 年における計画電力による増設では、逓信省が 71 万 KW の必要性を挙げているのに対し、電気協会は約 50 万 KW としている⁶²。この逓信省による見積もりは、電力需要の増加だけでなく渇水期における電力確保も含めたものであった⁶³。つまり、1939 年における電力不足の原因は、異常渇水のみならず、将来の需要に応じた電力事業の整備が十分に施されなかったことにも原因があった。

以上を踏まえると、電力事情に関しては、官である逓信省と民である電気協会での連携が上手く機能しておらず、軽金属産業の発展に影響を及ぼす結果となった。つまり、技術を支える基盤の一つである電力に関しては、村山が主張するテクノシステムが十分に機能を果たせていなかったと言える。次に産業を支える基盤において官が施行した政策を見ていく。

(4) 軽金属産業に対する政策

超々ジュラルミン開発から零戦開発が終了する 1935 年から 1940 年にかけて施行された軽金属に関連する政策等は、表 3 に示すとおりである。

⁵⁸ 安藤良雄『昭和経済史』日本経済新聞社、1976 年、168 頁。

⁵⁹ 梅本『戦前日本資本主義と電力』219-220 頁。

⁶⁰ 同上、218 頁。

⁶¹ 栗原東洋編『現代日本産業発達史第 3 電力』現代日本産業発達史研究会、1963 年、219-220 頁。

⁶² 電気新報社編『電気年報—昭和 10 年度—』電気新報社、1935 年、第 1 編 24-26 頁。

⁶³ 栗原『現代日本産業発達史第 3 電力』220 頁。

表 3 1935 年から 1940 年にかけて施行された政策等

西暦	生産力関連	その他
1935	—	—
1936	—	—
1937	<ul style="list-style-type: none"> ・産業五ヶ年計画 ・生産力拡充五ヶ年計画 ・日満軍需工業拡充計画 ・主要産業五ヶ年計画 	<p>【労働力関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・軍需工業動員法の適用に関する法律制定 (軍需工業を戦争目的のため全面的に動員) <p>【税収関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・特別税法 (直接及び間接税の新設、15～18%の増税) ・臨時資金調整法 (生産力拡充遂行のための経済統制) ・臨時軍事費特別会計法 (戦費を一般会計と区別して整理するもの)
1938	<ul style="list-style-type: none"> ・物資動員計画 ・国家総動員法 ・生産力拡充計画大綱 ・生産力拡充年次別拡充計画 ・生産力拡充四ヶ年計画 	
1939	<ul style="list-style-type: none"> ・物資動員計画 ・軽金属事業法 	<p>【電力】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電力調整令(電力使用の強制的な制限の実施)
1940	<ul style="list-style-type: none"> ・物資動員計画 	<ul style="list-style-type: none"> ・電力国策要項(配電統制の強化)

出典：以下の資料により著者作成、安藤『昭和経済史』149-170 頁；清水『戦争とアルミニウム』103 頁；東洋経済新報社編『昭和産業史第 I 巻』217 頁；住友金属工業株式会社編『住友金属工業六十年小史』126-127 頁。

表 3 の生産力関連について、1937 年から開始されている生産力拡充計画は、軍需資材必要量の確保、国民生活必需品の供給確保、国際収支の根本

的改善を目指したものである。また、1938年から物資動員計画が施行され、年間における重要物資(原則として原料)の供給力について見通しを立て、それらの配分を決めるようになった⁶⁴。アルミニウム製錬に必要なボーキサイトは重要物資にあたり、この年から毎年計画された。1938年に生産力拡張計画が何度も施行された背景には、物資動員計画において輸入計画が破綻したことに要因があった⁶⁵。また同年、国家総動員法が施行されたことで、国内の総力を動員できるような広範な権限が政府に付与され、労務、物資、資金、企業、施設の動員、統制等ができるようになった⁶⁶。つまり、政府が意図するままに政策として施行できる体制が整備されたのである。その中で 1939年には、軽金属事業法を施行しアルミニウム工業の発展を後押ししている⁶⁷。

超々ジュラルミンの基礎研究が終了した以降の 1937 年から、様々な対策を実施し生産力拡充に必死の努力がうかがえる反面、政策や計画の相次ぐ修正による民間企業への影響等、国が産業構造の理解不足と将来的なビジョンが不明確なまま政策を実施していたことが分かる。こうしたことから、ジュラルミンの量産基盤の構築においても、民主導による日本型テクノシステムを垣間見ることができる。

この他、1937年以降には労働力や電力確保も生産力拡充計画に合わせるように政策が施行された。資金面では、増税に次ぐ増税の他、国債券売り出しを実施した。なお、当時日本政府が発行した国債額は、1936年度までは 10 億円に達していなかったが、1941年には 87 億円までに急増している⁶⁸。1937年以降、ジュラルミンの量産、日華事変の勃発による準戦時状態であることを理由に人、物、金において、明確なビジョンを持たずに拡大していったことがうかがえる。最後に、これら産業を支えた研究員及び技術者に焦点を当て、人材はどのように教育され技術が備わっていったのかを見ていく。

(5) 研究員及び技術者の教育

本来、これまでの産官学連携の「学」について考察する場合、産業に結びつくための学、すなわち大学における基礎研究について言及していくべ

⁶⁴ 安藤『昭和経済史』149頁。

⁶⁵ 清水『戦争とアルミニウム』103頁。

⁶⁶ 安藤『昭和経済史』157頁。

⁶⁷ 東洋経済新報社編『昭和産業史 I 巻』217頁。

⁶⁸ 安藤『昭和経済史』154頁。

きであるが、ここでは、技術を支える産業基盤の考察であるため、これを支えた研究員及び技術者に対する教育について明らかにする。先行研究でも述べられているとおり、超々ジュラルミン開発では、五十嵐の逆説的な発想なくして成し得ることは不可能であった。この逆説的発想は村山が主張する個人の自由にあたる点であり、こうした個人の自由という新たな価値観を備えた学生がテクノシステム転換には必要であると指摘する⁶⁹。また、超々ジュラルミンの製造は非常に難しく、その組成は現在でも鑄造での鑄塊割れや押出での押出性など生産性で非常に問題が多く、「当時の技術でよくこれだけの生産ができたものだ」と評価されている程である⁷⁰。このような状況の中で生産力を維持するためには、高い技術力を備えた技術者なくして達成できない。そのため個人の自由という価値観をもった研究員と量産を支えた技術者は、どのようにして育成されたのだろうか。彼らに対する教育について述べていく。

超々ジュラルミンの開発において、五十嵐が住友金属の研究員に対しどのような教育を実施していたのか正式な記録は残されていない。しかし、終戦後、五十嵐は住友金属の研究所長を辞して東北大学において教授となり、当時の彼の研究手法について飯島嘉明は次のように論じている⁷¹。研究においては事実が大切であり、事実を直視し思った結果と矛盾した事実が示されたときのみ進歩があり、発展があるとし、夕方になると実験室に来て、ディスカッションをして今後の実験方向を指示していたとされている。こうした状況は、住友金属での超々ジュラルミン開発においても見られる。開発者である五十嵐を支えた研究員として、北原五郎の存在があった。北原の役割は、五十嵐の発想に対し実験をすることであり、この 2 人の名コンビがなければ超々ジュラルミン開発は成功しなかったとも言われている⁷²。こうした実験の繰り返しは、当時の住友金属の伸銅所副所長に、伸銅所が潰れてしまうと言わせる程のものであり、東北大学での教授時代の研究手法と変わらないと言える。つまり、超々ジュラルミン開発においても事実が大切ということを掲げ、繰り返し実験を行うことで理論化し、またディスカッションを通じて個人の自由が育まれていたことがうかがえる。そして、何より、住友金属がこうした伸銅所が潰れてしまうほどの実験を後押

⁶⁹ 村山裕三「アメリカのまねでは展望がない日本の技術力との融合が二一世紀を切り拓く」『エコノミスト』2001年1月9日号、2001年1月、65頁。

⁷⁰ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」290頁。

⁷¹ 飯島嘉明「超々ジュラルミンと五十嵐勇」『金属』第76巻10号、2006年10月、1136-1137頁。

⁷² 吉田「超々ジュラルミンと零戦」272頁。

ししつつ、研究課を潰さなかったことに企業として教育を支える基盤が存在していた。

次に量産に必要な技術者を育成するための教育について述べていく。労働者数は、超々ジュラルミンの基礎研究が終了した以降の 1937 年当時は 1 万人であったのが、その後の工場拡張に伴い 1939 年には、2 万 4 千人まで急増している⁷³。住友金属では、早くも 1905 年には、見習い工の教育を開始している。そして、1936 年 4 月には、工員の激増と青年学校の法制化に伴い、その充実を図り中堅工員の練成を目的に青年学校を開設している⁷⁴。こうしたことから、技術者の教育は、1930 年代における重化学工業化が急速に進んでから開始されたものではなく、それ以前からの基盤があつてこそその教育基盤の拡大であり、住友金属は、教育の重要性を早期から認識し実行していた。

3 基礎研究と零戦開発の関わり

(1) 超々ジュラルミン開発・量産が成功した要因

超々ジュラルミン開発にあたっては、2 節で述べたとおり 1916 年に住友金属に研究課が設立された以降、海軍と連携しながら技術を発展させてきた。この超々ジュラルミン開発が成功した理由は、村山が主張する日本型テクノシステムが上手く機能した他、システム再生に必要な条件が揃っていたことが挙げられる。

次に開発及び量産を支える基盤では、工場の設備投資、アルミニウムの入手、電力確保があつた。これらは、超々ジュラルミンの基礎研究が終了した以降の 1937 年頃から急速に規模が拡大され、超々ジュラルミン開発から量産に移行できる態勢が整備された。その中で、この技術基盤を整備するために、海軍との連携や国家総動員法などの政策が施行された。また、教育において、研究員に対しては、個人の自由が育まれるような教育がなされ、技術者に対しては、教育機関設立を早期から着手し技能教育がなされていた。以上を踏まえると、超々ジュラルミン開発・量産を支える基盤においても、村山がシステム再生の現実的なシナリオとして結論付けた住友金属という民間企業がシステムの牽引力を発揮し、これに官と学が追随することで形成される日本型テクノシステムが機能していたと言える。し

⁷³ 住友軽金属工業株式会社編『住友軽金属年表』73 頁。

⁷⁴ 同上、64 頁。

かし、このテクノシステムで産業基盤の構築を見た場合、電力に関しては官の政策が上手く機能することができず電力不足に陥った時期があった。仮にこれが成功していれば、海軍のジュラルミン需要に対し、より多く量産し供給できていたことは間違いない。この電力不足の事例は、多角的に見て産官学のいずれかの機能が低下することで、産業に影響を及ぼすことを明らかにし、技術発展のためには技術そのものだけではなく、その産業基盤の発展も考えなくてはならないことを端的に示している。超々ジュラルミン開発では工場の基盤のほか、原材料のアルミニウム入手、これの生成に伴う電力確保、技術者の確保がこれに該当した。つまり、ジュラルミン技術という一つの技術の発展のためには、これに関わる多くの産業基盤を発展させなければ成功は成し得なかったのである。

(2) 超々ジュラルミン開発が零戦開発に繋がった理由

零戦開発において機体重量の軽量化を実現させたのが超々ジュラルミンであった。この超々ジュラルミン開発を零戦開発における基礎研究と位置付けた場合、何故、超々ジュラルミン開発という基礎研究を零戦開発という応用研究に繋げることができたのかという論点が生まれよう。現代では、冒頭でも述べたとおりデスパレーと呼ばれる基礎研究が上手く応用研究に繋がらず消失してしまう現象が生起しており、日本における最大の要因は、ビジョンの描出や需要コンセプト化の問題であった。こうした問題は、超々ジュラルミン開発と零戦開発ではどのように対処されたのだろうか。これに関して、零戦開発における課題は何だったのか、そして、それに対する解決策としてどのような政策がなされたのか、最後に政策がどのように零戦開発に活かされたのかを分析していく。

零戦開発における最大の課題は、機体の軽量化であり、これを可能にしたのが超々ジュラルミンであった。これに対する政策として、これまで述べたとおり、ジュラルミン研究への早期着手が挙げられる。住友金属では、超々ジュラルミンを開発する約20年前には、研究課を設立し、海軍と連携しつつ欧米諸国からの技術導入により研究を重ねてきた。超々ジュラルミンがどのような経緯で零戦の素材に採用されたかについて、明確な資料は残されていないが、吉田英雄は次のように論じている⁷⁵。零戦開発当時、設計者である堀越が機体の軽量化に苦悩している中、住友金属によって超々ジュラルミンが開発され、試験的に生産に入れる段階にあるという話を三

⁷⁵ 吉田「超々ジュラルミンと零戦」283頁。

菱重工の材料購入の担当であった木村隆之助技師によって伝えられた。これに興味を示した堀越が五十嵐のいる住友金属の工場に出向き、超々ジュラルミンの実物を見て零戦に採用できると判断した。この当時、海軍航空本部もこの超々ジュラルミンに注目しており、航空機の新材料として許可する一歩手前であったことから、堀越によるこの新材料を零戦に採用する願い出が承諾され、採用されることになった。

こうした分析によると、超々ジュラルミン開発が成功し、零戦開発という応用研究に繋がったのは、当時実用化されていた超ジュラルミンよりも高強度のジュラルミン開発という明確な目標があったことが大きい。そして、それは海軍からの要請であり、将来戦闘機の開発を目指して行われたものであった。つまり、現代の日本におけるデスバレーの要因であるビジョンの描出や需要コンセプト化の問題は、そもそも存在しておらず、応用する用途が決まっている中で基礎研究が始まったのであり、応用研究に繋がったことは必然であったと言える。また、堀越に住友金属が開発した超々ジュラルミンの情報を伝えたのが、海軍ではなく三菱の材料購入を担当していた社員であった。このことから、零戦開発においても民主導による日本型テクノシステムが機能していたことがうかがえる。

また、官又は民のどちらが主導すべきかについて、村山は、的確な将来の技術予想が困難な現代において、官が主導を執ることは難しく、技術革新により技術の流れが変化しても対応できるのは既存の大企業であると結論付けている⁷⁶。官及び民それぞれの組織の性質上、技術の流れの変化に柔軟な対応が可能なのは民であることは間違いない。村山が主張する民主導は、システム転換の糸口を見出すための主導であり、ジュラルミン技術の発展でも民が軍に先行して研究を進めていたことから、民主導の方が上手く機能すると考える。

おわりに

本稿では、零戦開発を成功させるために必要不可欠であった超々ジュラルミン開発に着目して述べてきた。1930年代における日本の重化学工業の水準は、世界的にみて低水準である中、超々ジュラルミン開発という基礎研究から零戦開発に至るまで、実に約5年間という短期間で実現できている。この背景には、超々ジュラルミン開発が始まる約20年前から住友金属

⁷⁶ 村山『テクノシステム転換の戦略』238-244頁。

において研究課を設立させ研究を重ねてきたこと、研究を支える産業基盤の構築及びそのための政策があったことが挙げられる。また、これに関して、海軍をはじめ様々な政策が施行され日本型テクノシステムと言われる産官学連携が図られていたことが短期間で開発できた大きな要因であった。つまり、超々ジュラルミン開発から零戦開発まで成し得たのは、それまでの約 20 年間に及ぶジュラルミン技術の発展、これを支える産業基盤の構築があったからである。言い換えれば、零戦開発に要した期間は、超々ジュラルミン開発からの 5 年間ではなく、1916 年の研究課設立によるジュラルミンの研究から、実に 24 年の歳月をかけて成功に至っているのである。

また、超々ジュラルミン開発から零戦開発に至るまでを明らかにしたことで、日本における研究開発には、開発ビジョンの抽出や需要コンセプトを明確化すること、日本型テクノシステムと言われる民主導による産官学連携に加え、個人の自由、求心力、インセンティブの要素が必要であることを学んだ。インセンティブについて、超々ジュラルミン開発当時の情勢は準戦時下であったため、インセンティブよりもイデオロギーが優先されたが、軍需の増大により工場規模が拡大され、結果として民間企業にはインセンティブが付与されていた。このように技術を支える基盤が構築されたことで、開発現場における研究者が自由な発想のもと自由に研究できる態勢が整えられ、技術者の開発意欲の向上にも繋がったと考えられる。超々ジュラルミン開発では、正にシステム再生の 3 つの条件が良き循環となって作用した例であり、これらが備わっていることの重要性を示している。現代の防衛装備品開発及びそのための基礎研究でも、技術そのものに注目が集まるが、これを支えるシステム再生の条件を備えた産業基盤の構築は必須である。特に現代においては、イデオロギーよりもインセンティブが優先される時代であり、民が官の研究開発を担うにあたって、研究者の個人の自由や求心力を尊重できる程のインセンティブが望めるのだろうか。こうした課題を零戦開発における超々ジュラルミンの開発・量産から現代を生きる我々は学ばなくてはならない。