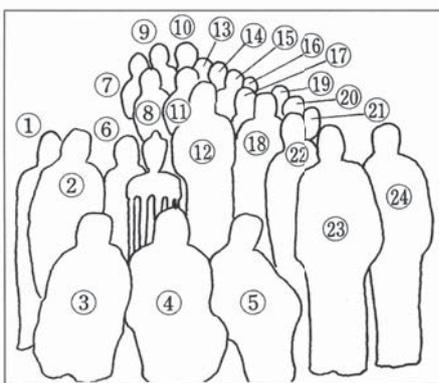




昭和55年12月6日，第13回鉄研1号ガスタービン思い出の会（於東芝高輪クラブ）



- | | | |
|-------|-------|-------|
| 本間友博 | 須之部量寛 | 不破廣行 |
| 永野治 | 佐藤昭二郎 | 牧浦隆太郎 |
| 飯田平八郎 | 河崎俊夫 | 重見孝 |
| 土光敏夫 | 渡辺秀行 | 梶山泰男 |
| 中田金市 | 今井兼一郎 | 山内正男 |
| 山崎恵造 | 岡野有佐 | 円城寺一 |
| 大和佳助 | 井口泉 | 甘利昂一 |
| 森糾明 | 中村素 | 石田一夫 |

渡辺秀行 編集，1号ガスタービンの思い出集，(1989)より
J. G. コーポレーション社の許可を得て転載

日本機械学会 内燃機関部門主催
 第1回ガスタービンに関する座談會
 1949 (S24) 年11月19日, 於: 上野精養軒
 日本機械学会論文集, 17巻, 58号, (1951) より

出席者

赤羽久雄君	(經濟安定本部)	土光敏夫君	(石川島芝浦タービン會社)
甘利昂一君	(船舶局長)	中田金市君	(鐵道技術研究所)
粟野誠一君	(日本大學)	中西不二夫君	(東京大學)
井上宗一君	(石川島重工業會社)	永野治君	(小松製作所)
伊藤淳一君	(通産省電力局)	長尾不二夫君	(京都大學)
飯田平八郎君	(鐵道技術研究所)	鍋谷正利君	(日産自動車會社)
池村清君	(運輸省船舶局)	繩野武夫君	(石川島重工業會社)
磯貝誠君	(三菱重工業會社)	丹羽周夫君	(三菱重工業會社)
稻生光吉君	(")	西沢弘君	(三菱川崎機器製作所)
内山忠夫君	(船舶試験所)	西脇仁一君	(東京大學)
小川清二君	(日本大學)	沼知福三郎君	(東北大學)
大江卓二君	(船舶試験所)	橋本義敏君	(石川島芝浦タービン會社)
大塚誠之君	(鐵道技術研究所)	八田桂三君	(東京大學)
大塚芳郎君	(京都大學)	浜部一三君	(京都大學)
大塚新太郎君	(東京大學理工學研究所)	林貞助君	(川崎重工業會社)
大山節夫君	(石川島重工業會社)	疋田徹郎君	(三菱重工業會社)
大和佳助君	(運輸省船舶局)	疋田遼太郎君	(鐵道技術研究所)
岡崎卓郎君	(東京大學)	久野五十男君	(三菱重工業會社)
片倉昇作君	(川崎重工業會社)	平山九郎君	(日立造船會社)
梶山泰男君	(石川島芝浦タービン會社)	不破廣行君	(鐵道技術研究所)
河崎俊夫君	(鐵道技術研究所)	福山勉君	(日本製鐵會社)
河田三治君	(東京大學理工學研究所)	藤井澄二君	(東京大學)
葛野恒次郎君	(いすゞ自動車會社)	堀浩平君	(日産自動車會社)
小犬丸胤男君	(鐵道技術研究所)	堀越博君	(三菱重工業會社)
後藤清太郎君	(三菱重工業會社)	松岡秀夫君	(")
近藤市郎君	(國際船舶工務所)	松永陽之助君	(日本冶金工業會社)
佐賀篤君	(石川島芝浦タービン會社)	松本嘉雄君	(日立製作所日立工場)
佐藤豪君	(慶應義塾大學)	三好一慶君	(日立造船會社)
佐藤忠雄君	(鐵道技術研究所)	宗像元介君	(鐵道技術研究所)
重見孝君	(鐵道技術研究所)	村井等君	(東北大學)
柴田万壽太郎君	(日立製作所)	森糾明君	(石川島重工業會社)
栖原豊太郎君	(慶應義塾大學)	森島國男君	(日立製作所日立工場)
須之部量寛君	(鐵道技術研究所)	入島信雄君	(三井造船會社)
鈴木崇君	(東京大學)	矢木栄君	(東京大學)
鈴木武次君	(新潟鐵工所)	安井澄夫君	(石川島芝浦タービン會社)
鈴木徳藏君	(早稻田大學)	山内正男君	(鐵道技術研究所)
棚沢泰君	(東北大學)	山口照二君	(新潟鐵工所)
谷井毅夫君	(石川島芝浦タービン會社)	吉田正一君	(鐵道技術研究所)
種子島時休君	(日産自動車會社)	吉水直一君	(三菱重工業會社)
玉木福宜君	(佐世保船舶工業會社)	渡部一郎君	(慶應義塾大學)
垂水二郎君	(日本製鐵會社)		

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

特集「わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者」に寄せて
Preface to “Japanese Pioneers in Research and Development
of Gas Turbine”



吉田 英生^{*1}
YOSHIDA Hideo

現代はインターネットで何でも情報が容易に入手できるように言われますが、実はそうではありません。確かに最近のことなら、たとえ個人がつぶやいたたわいないことでも一瞬で世界に拡散する一方で、インターネット普及以前の 大雑把に言えば昭和時代の記録はインターネット上にはほとんど存在しないといっても過言ではありません。たとえば昭和時代に学校教育を受けた現在50歳以上の方々は、ご自身の恩師の情報を探そうとしてもよほど著名な一部の方をのぞいては不可能でしょう。

わが国におけるガスタービン（以下GT）研究・開発の先駆者についても、その例外ではないと思います。GTの生みの親であるホイットルやオハインは今後も繰り返し語られ次世代に引き継がれていくものの、わが国の先駆者は？と問われると回答に窮する方が、本学会員といえども少なくないのではないのでしょうか。筆者自身、わが国のGT黎明期のことをほとんど知らないことを反省して勉強しようとしたのですが、限られた著作や学会誌のバックナンバーに断片的に記述がある程度ということに気付いたのが、今回の特集企画のきっかけとなりました。

とはいっても、GTの“先駆者”と呼ぶうる世代は、ご存命の場合はおおよそ120～100歳となり、ほとんどの方が鬼籍に入っておられます^{*2}。また、それらの先駆者をよく知る方々も相当に限られかつ高齢でいらっやいます。このため、本特集を現時点で企画しても、どこまで新たな情報を集められるかという不安がありました。そのような不安はありつつも、今なんとか踏ん張ってやっておかないと、日本のGT史から黎明期のまとまった記録が永遠に消えてしまうのではないかという危機感が本特集関係者の背中を押しました。

申すまでもなく過去ではなく未来こそが大切ですが、その未来は過去からの膨大な積み上げの上に成り立っています。ニュートンの言葉（正確にはオリジナルはシャルトルのベルナルだそうです）“If I have seen

further it is by standing on the shoulders of Giants.”にあるように、想像を絶するような先人の苦労とその結果もたらされた恩恵や知見を十分に理解せずには、輝く未来もないと思います。また、単にGTに関する技術進展やその結果としてもたらされた国際的GTマーケットにおける存在感にとどまらず、後述するような極めて困難な時期にあってなお今日に続く有為の人材そのものを数多く育成された面でも、見識と信念に満ちた先駆者から学ぶ点は多々あると思います。

◆◆◆

GTの研究・開発が、わが国でも始まったのは第二次世界大戦中でしたが、1945（S20）年の敗戦により航空機生産・開発・実験が禁止され、それが1952（S27）年のサンフランシスコ講和条約により解禁されるまでの7年間、（航空）GT関係者は塗炭の苦しみを経験されました。その解禁の少し前、1949（S24）年11月と1950（S25）年4月に2回開催されたGTに関する座談会の記録（日本機械学会論文集、17巻、58号、1951年、全53ページ）を読むと、主だった関係者の方々80人以上が一堂に会し熱く議論しておられるただならぬ雰囲気は圧倒されます。

本特集で導入部をご執筆いただいた前間孝則氏の記事や、先駆者別に個々にご執筆いただいた記事からも、同様の雰囲気が十分にご理解いただけるものと思います^{*3}。そして、国産初のネ20^{*4}を作るとともに5カ国国際共同開発のV2500も軌道に乗せて“日本のジェットエンジンの生みの親/日本のジェットエンジン工業の育ての親”と呼ばれる永野治氏が、前間氏のインタビュー記事^{*5}に関してわずかに希望を述べた「単に昔はこうであったとかいうのではなく、今後に生きてくるような客観性のあるまとめ方であってほしいね」という趣旨に、本特集がやはり沿っていることを願う次第です。

◆◆◆

最後に、分野は異なりますがやはりわが国の先駆者の一人として、半導体開発に大きな足跡を残した菊池誠氏（1925～2012）の「エレクトロニクスからの発想」（講談社ブルーバックス 1982年）から、本特集に関連して思い出される文章を引用させていただきます。

原稿受付 2017年11月30日

*1 京都大学工学研究科航空宇宙工学専攻
〒615-8540 京都市西京区京都大学桂
E-mail: sakura@hideoyoshida.com

やがて、少しずつ文献がとどき始める。図書室に行つて、アメリカの学術雑誌をしらべると、

「.....semiconductors.....」

と、「半導体」の文字を目次の中に発見すると、カーッと血が頬に上るのが常であった。本当にうれしい。「これでまた、何か少しわかる」という期待から手がふるえたものである。

そのころ、もちろん、ゼロックスの複写機のようなものは無い。

わたしは文献を借りてきて、古めかしいタイプライターで、カーボン紙を七、八枚もはさんで、自分でコピーをうつのである。

今、わたしがタイプライターをうつと、多くの方がびっくりする。専門のタイピストほどにはいなくても、玄人のスピードでたたけるので、わたしにそんな特殊技能があったのかと思うらしい。そうではなくて、昔の苦勞の結果に過ぎないのだ。コピーを作る必要があった。

先輩や友達に配って、いっしょに勉強するのである。

何がうれしいとって、先輩と後輩が、新しい学問、新しい技術でいっしょに勉強して討論できるくらい、はげみになることはない。

おそらく、GTの先駆者の方々もこのような雰囲気の中で仕事をされたのだろうと想像する次第です。ホイットルがGTのコンセプトを提案した1928年から今年で90

年、見事な姿に成長した現在のGTですが、新しい技術展開は無限にあるはずで、とりわけ次世代を築く若いみなさまに熱心に読んでいただき、今後に生かしていただけることを願っております。

◆◆◆

謝辞とお願い

著者のみなさまには、ご多用中にもかかわらず貴重な記事をご執筆いただきましたこと、心よりお礼申し上げます。また、(株)IHIの柏木武氏と藤貴泰成氏をはじめとする先駆者ゆかりの企業・機関のたくさんの方々にも、情報提供などで多々お世話になりました結果、この特集を進めることができましたことを感謝申し上げます。

さらに、(株)J.G.コーポレーションの渡辺秀一郎氏と島野公男氏からは、同社創業者 故渡辺秀行氏編集の「1号ガスタービンの思い出集」(1989年)からの写真や文章の転載に際し、全面的なご協力をいただきました。心よりお礼申し上げます。また、生没年月日の手がかりさえ全くなかった近藤俊雄氏につきましては、(株)パイロットコーポレーションの辻豊氏と高橋利枝氏の調査により判明しましたことを付記して、お礼申し上げます。

最後に読者のみなさまへのお願いを申し上げます。もし、本特集に追加し得る/すべき貴重な情報をお持ちの場合、ご一報いただければ、ありがたく存じます。また、今後のために、忌憚ないコメントもいただければ幸いです。

* 2 先駆者として、どの方を取り上げるかということは議論のあるところだとは思いますが、ひとまず100年前の1918年以前にお生まれの以下のような方々を候補とさせていただきます。

土光 敏夫	1896 (M29)	年9月15日	1988 (S63)	年8月4日
中西 不二夫	1897 (M30)	年1月19日	1964 (S39)	年6月11日
沼知 福三郎	1898 (M31)	年5月4日	1982 (S57)	年9月14日
中田 金市	1900 (M33)	年7月25日	1998 (H10)	年4月12日
種子島 時休	1902 (M35)	年7月20日	1987 (S62)	年8月7日
近藤 俊雄	1902 (M35)	年10月6日	1996 (H8)	年3月6日
林 貞助	1904 (M37)	年9月30日	1999 (H11)	年10月29日
棚澤 泰	1906 (M39)	年10月23日	1992 (H4)	年7月27日
渡部 一郎	1908 (M41)	年4月13日	1996 (H8)	年1月4日
粟野 誠一	1910 (M43)	年12月10日	2007 (H19)	年9月4日
小泉 磐夫	1911 (M44)	年10月1日	1991 (H3)	年4月8日
永野 治	1911 (M44)	年10月9日	1998 (H10)	年2月22日
山内 正男	1912 (T1)	年11月5日	2010 (H22)	年11月4日
岡村 健二	1912 (T1)	年12月8日	1989 (H1)	年1月15日
井口 泉	1913 (T2)	年9月1日	2004 (H16)	年10月20日
円城寺 一	1914 (T3)	年1月1日	1995 (H7)	年1月11日
八田 桂三	1915 (T4)	年3月30日	1995 (H7)	年6月13日
入江 正彦	1915 (T4)	年10月30日	2003 (H15)	年12月24日
須之部 量寛	1915 (T4)	年12月10日	1995 (H7)	年11月17日
水町 長生	1916 (T5)	年7月31日	2006 (H18)	年12月15日
今井 兼一郎	1917 (T6)	年4月16日		
岡崎 卓郎	1918 (T7)	年3月12日	1998 (H10)	年10月23日

* 3 先駆者個人別の記事(略伝)につきましては、まず編集委員会および関係機関で、先駆者ゆかりの方々を調査しました。幸いにも先駆者の訃報に接した方が見つかった場合は、委員がご自

宅にインタビューに伺ったケースを含めて、生き生きした情報を入力することができましたが、一方で何のツテもない場合も多数ありました。そのような場合は、既存の文献にある以上のことをお伝えできませんが、それらの文献から厳選した情報を編集し、特集として一覧できることに大いなる価値があるということで、先駆者ご本人にゆかりのない筆者も複数担当させていただきました。

1月号に間に合わなかった方々は5月号以降にも引き続き掲載します。なお、現時点では執筆あるいは文献情報を見つけるのが困難な方、さらにもし脚注*2の候補から漏れていることをご指摘いただいた場合、執筆可能でしたら随時追加させていただく予定です。

なお、本文中では先駆者や関係者につき「敬称なし」を基本としましたが、師弟関係から「先生」を外すことができない場合もあることをご理解願います。

* 4 太平洋戦争中に設計されたGT名称として、たとえば「ネ20」と「ネ-20」の二つの表記がありますが、前者のハイフンなしが海軍式、後者のハイフンありが陸軍式の呼び名であるようです。本特集では、その選択は各著者におまかせしました。また、読み方については、「ねのふたまる」と呼ばれることが多いのですが、NHK番組スポットライト「ジェットエンジン ネ-20」(1976年9月16日放送)では、生みの親である永野治氏と種子島時休氏が、それぞれ「ネ20」/「ネ10」のことを、「ねのにいまる」/「ねのいちまる」と呼んでおられるので、2/1の数字を「ふた」/「ひと」と呼ぶと必ずしも定まっているわけではないようです。ただ「にじゅう」/「じゅう」とは呼ばないようです。

* 5 前問孝則、日本の名機をつくったサムライたち 零戦、紫電改からホンダジェットまで、(2013) p. 368, さくら舎。

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者たち

先駆者たちが織りなすガスタービン開発の歴史ドラマ Historical Drama Acted Out by Pioneers of Gas Turbine



前間 孝則^{*1}
MAEMA Takahiro

1. はじめに

いまから30年ほど前、「日本のジェットエンジンの生みの親」あるいは「育ての親」と呼ばれるIHIの顧問・永野治元海軍技術士官にロングインタビューを数回ほど行った際、ガスタービン史を見ていく上での示唆に富む話をされた。

「ガスタービンの歴史は面白いのだが、使用・環境条件が最も厳しくて技術的にも高度な航空（軍用機）用が真っ先に実用化されて、その後、これらの条件が緩やかな（民生用）陸船用が続いた。これは、一般の動力機械の発展史とは逆というわけだ」

航空用のガスタービンであるジェットエンジンの実用化の時期については諸説が流布されている。一般的には、ドイツのハンス・フォン・オハインが開発したエンジン「HeS3B」を搭載するハインケル社製He178が初飛行に成功したときから始まる。その構造は、遠心式単段と軸流式単段を合わせた圧縮機と、遠心式タービンとを組み合わせた方式である。折しも、ドイツ軍によるポーランド進撃に始まる第二次大戦が勃発した数日前の、1939年8月27日のことである。ヨーロッパ情勢は極度に緊迫しており、しかも、高度な軍事機密だっただけに、この事実は、外部に発表されることはなかった。

これに続くイギリスは、1930年にジェットエンジンの特許を出願していたフランク・ホイットルが、その5年後、「ホイットル・ユニット」と呼ぶ地上試験を目的とするジェットエンジンの設計を開始した。その翌年には、共同経営会社のパワー・ジェット社を設立して試作を進めた。あらゆるトラブルや破損、資金難といった辛酸をなめつつも、改良を重ねた上で、航空機用の遠心式両側吸い込みの単段圧縮機と、軸流タービンとを組み合わせた「W1」を完成させた。

すでにドイツではジェット機が飛行しているとの情報を得ていた英空軍がホイットルの支援に乗り出していて、大戦下の1941年5月、W1を搭載した英グロスター・ホイットルE28 / 39が初飛行に成功した。

真っ向から航空戦を演じていた両国だけに、既存のプロペラ機を上回る性能を実現するジェットエンジン（ジェット機）の開発は、その後、急進展し、数年後に

は両軍ともに実戦投入を果たすのである。

では、航空機大国のアメリカはどうしていたのか。独、英などの評価と違って、航空用のガスタービンは重くなるし嵩張ると見て不向きであると結論づけ、実用化には否定的だった。その代わりに、B17やB29などに装備するGE製などの排気タービン過給機を発展させていて、レシプロエンジンのパワーアップも高高度での性能の維持も可能であるとし、開発を後回しにしていたため、大きく後れを取るのである。

イギリスでのジェット機初飛行で気づかされたアメリカ陸軍は、1941年12月、急遽、W1とともにパワー・ジェット社の技術陣を招聘して、発電用蒸気タービン、排気タービン過給機などで実績豊富なGEで製作させることとし、その後は開発に力を入れるのである。GEは既存のレシプロエンジンは生産していないために余力があり、しかも、タービンについては経験豊富だったことから、その総合的な潜在能力を生かして、戦後は世界のメーカーへとの上がっていくことになる。

永野の言葉にもあるように、ガスタービン開発の初期段階は、ちょうど世界の軍事情勢が緊迫化しつつある時期と重なっていたため、兵器の特質である経済性（燃費）や対環境性（騒音）を無視した性能第一主義の軍事的要請を最優先し、航空（軍用機）用が真っ先に実用化されたのである。そのあと、第二次大戦が激しさを増す中で、さらに開発は加速し、さながら、歴史ドラマのような展開となって、またたく間に世界の先進国へと波及していくのである。

2. 先駆者たちの軌跡

何事においても論理的、体系的に物事を進める傾向が強いドイツは、ハインケル社の動きと並行して、ドイツ空軍のハンス・マウホやヘルムート・シェルブをリーダーとする技術陣もジェットエンジンに関する組織的な研究を進めていた。早くも、さまざまなタイプのジェットエンジンを構想して実験し、まず最初に、構造原理からして実現させやすいターボジェットの実用化を優先させるのである。これを、ユンカーズやプラモ（ブランドンブルク発動機社、少ししてBMWと合併）、バイエリッシュ・モーターレン・ベルケの民間3社に発注して、開発が進められるのである。ラムジェット、ターボプロッ

原稿受付 2017年11月21日

* 1 〒357-0212 飯能市井上660-3

プ、ターボファンなどの開発も後に続くことになる。

一方、陸に設置するガスタービンの考案は早く、1872年にはドイツのシュトルツェが、初めて、軸流多段で現在のターボジェット・エンジンに近いものを製作して回したが、圧縮機もタービンも効率が極めて低くて成功には至らず、この後に続く者はいなかった。

その30年ほど後の20世紀に入ると、蒸気タービンの成功に刺激されて、高い効率性が得られるとの期待からガスタービン熱が高まってきた。1897年にガスタービンの特許を出願していたシュトルツェは、その7年後、50馬力の試験用ガスタービンを完成させるとともに、シュトルツェ・ガスタービン社を設立した。

だが、先行する船や発電用の蒸気タービンに比べると、蒸気と高温の燃焼ガスとの違いや、耐熱材、ブレード、翼列の技術も伴わず、高圧を発生させるための回転体としての圧縮機の効率は依然として上がらなかった。加えて、第一次大戦の勃発でそれどころではなくなり、開発の中断を余儀なくされて、成功には至らなかったと伝えられた。

こうした海外の情報を受けて、後発国日本の関係者らは速断し、「すっかり盛り上がりの氣勢を殺いでしまった。当時、日本では、『ガスタービン不有望論』という声も上がる始末で、われわれ学生たちも、それを耳にして落胆したことを覚えている。日本では、識者は誰も、この不有望論に傾き、自ら試作に乗り出すことも、試算してみることもまったくなかった」（『動力の歴史』）と、航空発動機が専門の元東京帝国大学航空研究所員で教授の富塚清は、当時の状況を振り返っている。

ところが、スイスのブラウン・ボベリ社やフランスのラトー社は速断には走っておらず、その後も地道に改良を重ねていたのだった。1920年代頃には、主にフランスやスイスにおいて、さまざまなガスタービンの考案を基に試作を試みる動きが盛んになってきた。

これらの研究・開発の過程で修得した技術や、それまでに航空分野で発展を遂げてきた高速流体力学の成果も加わり、副産物として、構造が比較的簡単で効率性が高いターボ圧縮機や排気タービン過給機を実用化することになった。航空用や船用のディーゼル機関、鉄道車両、自動車などの主動力（内燃機関）の馬力向上や高高度性能を高めることができるからだ。

この頃、日本海軍の花島孝一大尉がフランスを訪れていた。後に“海軍発動機技術の父”とも呼ばれ、横須賀海軍航空技術廠^{しんぼう}の発動機部長で、海軍中將となる花島は、この時、ラトー社が開発したイスパノ・スイザ原動機用のターボ過給機10台を手土産に帰国し、この分野の研究に着手する。だがこの時代の日本では、航空機に搭載するレシプロエンジンは輸入かライセンス生産がほとんどだった。まともな自主開発エンジンが実用化されるのは十数年後だったため、付属装置である過給機にまでは手がまわらず、熱も入らなかった。それに、高温・高速回転だったことから燃焼ガスの扱い方や耐熱材、軸受などの技術が手に余ったのである。

花島は海軍の選科学生時代に、博識多才で知られる物

理学者の寺田寅彦に学び、プロテスタントの無教会主義を唱える内村鑑三の門下でもあった。第一次大戦時には、ドイツの要塞となっていた中国の山東省青島の攻略に、数少ない臨時航空隊の一員として出兵し、稚拙ながらも、ドイツ軍に対して日本初の空爆を行って降伏させたのだった

永野にいわせれば、花島は「軍人とはかけ離れた学者肌」の人物で、親交の厚かった山本五十六と同様に、海軍内では傍流の航空重視を強力に主張する高官で、海軍内での人材の育成や航空機研究の体制づくりに才能が発揮された。産官学による中央航空研究所の初代所長にも就任する根っからの物理屋で、本特集で取り上げた先駆者たちの何人もが花島の部下であり教え子でもある。

それから約15年後、海軍機関学校卒の種子島時休は、やはり海軍の選科学生として東大航空学科を経て航空本部造兵監監督官となり、1935年4月、フランスに2年間駐在して、英、独、伊の航空研究機関やメーカーを視察した。機関学校時代には、大型戦艦「陸奥」に乗り込んで、蒸気タービンやボイラと取り組んでいたが、航空学科時代には研究対象を艦艇から航空機に移して、ガスタービンの研究を目指した。そんな種子島だけに、期待していた欧州各国で、その方面の工場を見学したが、総じて「たいしたことはない」と思われた。

この時代は、1931年9月の満州事変、そして翌年の「満州国」建国、さらには国際連盟を脱退した日本は、欧米諸国から警戒の目で見られるようになっており、種子島の視察はもっぱら民間メーカーが主体となっていた。彼の重要な任務として、戦闘機に搭載するスイスのエリコン社が開発した20ミリ機銃の調査・買い付けがあった。それは後に日本に導入され、零戦に装備されて、一時は向うところ敵なしの強力な火器となる。

エリコン社に滞在した際、種子島は時間をつくってバーデン市にある蒸気タービンや過給機を生産するブラウン・ボベリ社を訪れた。その際、技師長から優れたガスタービンの図面や生産している排気タービン過給機の現物を見せられ、大いに啓発されたのだった。

スイスはタービン研究のメッカで、他にも有力なズルザー社、エッシャー・ウイス社などが、1万から2万キロワットもの船用および発電用の高出力蒸気タービンなどを製作していた。エッシャー・ウイス社を訪れた際に面会したケラ博士からは思わぬ言葉を耳にした。「学位論文の参考に、東北大の沼知福三郎教授の軸流理論を大いに活用した」（『種子島時休追悼録付遺稿抜粋』）

種子島は、日本にも世界的に通用するタービン研究者がいたことを知らされ、驚きまた誇りに思ったのだった。

3. 日本のガスタービン研究のスタート

1937年4月、種子島はブラウン・ボベリ社で航空機用の排気タービン過給機を2台つくってもらい、日本でのガスタービン研究を夢見ながら帰国した。

一方、沼知は独ゲッチンゲン大学に留学して、帰国後は東北大に、日本初の高速力学研究所（現流体科学研究所）を設立することになり、この分野の先駆的研究者で

あった。種子島は帰国後、彼にガスタービンの圧縮機の研究を依頼し、その後も引き続き協力を願うのである。

帰国した種子島は横須賀海軍航空技術廠発動機部の第一工場就任を命じられ、レシプロエンジン各社の指導やアドバイス、審査、トラブル対策に日々追われながらも、研究室の片隅で一人、あるいは部下の永野などを使って、日本で初ともいえるガスタービンの研究を進めていった。それは、買ってきた排気タービン過給機を改造したり、「学生の卒業製作のような」ミニチュアモデルをつくりたりしての細々としたものだった。

ちなみに、永野は東大機械工学科3学年のとき、海軍依託学生となっていたので、広島県の広海軍廠航空機部に実習に来ていた際、発動機部班長の種子島が指導教官として担当したことから両者は出会っていた。その4年後、永野は、フランスから帰国した種子島の下で主にレシプロエンジンや過給機に取り組むのである。この頃の種子島の胸の内には、「レシプロエンジンはもう古い、これからの時代はガスタービンだ」との思いが秘められていた。永野の意味深長な言葉を借りれば、種子島は「夢見型の人」であり、典型的な研究者タイプであって、発動機部では浮き上がっていたのが現実だった。

このとき、種子島の研究の指針となり、手掛かりとなった資料はといえば、彼が常に手元に置いていたストドラ博士の大著で、「タービン研究のバイブル」といわれる『スチーム・アンド・ガスタービン』（1927年刊、後に英語版を出版）しかなかった。だが、約1300ページ余のうち、ガスタービンについての記述はたった100ページほどで、しかも、その内容のほとんどは陸軍用の記述に費やされていた。

日中戦争そして太平洋戦争へと突入していく時代、それまでは入手できた欧米からの情報が遮断されただけに、最先端技術としての未知なるガスタービン（ジェットエンジン）を手掛ける数少ない日本の技術者、研究者のほとんどは、主にこの書を頼りにするしかなかった。

ストドラの書の発刊から16年後となる1943年12月の大戦中に発刊された、主に東大航空研究所員のエンジン関係者である東大教授および助教授らを総動員してまとめた富塚清編『航空発動機』もまた1380ページもの大著である。この書も、ガスタービン（ジェットエンジン）および排気タービン過給機に関する著述は、最後の25章のわずか40ページでしかなかった。この章の表題は、当時呼ばれていた「加熱噴流推進」となっており、執筆者の中には、本特集で取り上げた、当時の若い東大助教授クラスの渡部一郎、栗野誠一、八田桂三の3人が名を連ねている。

この頃、日本では「ジェットエンジン」の名称はまだ馴染みがなく、ほとんど使われて（定着して）おらず、「噴進ロケット」「タービンロケット」「燃焼ロケット」「推進ロケット」「タービンジェット」などと呼ばれていて、時代性を感じさせる。

この25章の冒頭では、「結局飛行機の発動機 プロペラ推進装置の代わりとしては大気を燃焼に用いるものが有利と考えられる。（中略）大気の燃焼を利用するロ

ケット（ジェットエンジン）、即ち加熱空気噴流推進に就いて簡単に述べることにする。斯かる方法の理論は殆んど我が国に於いて中西不二夫博士（同氏の論文『飛行機のロケット推進に就いて』『航空学会誌』1938年7月号）によって発展せしめられたもの」というのが、当時のガスタービン研究の現状だったのである。もちろん、戦時中ゆえに、軍事機密からあえてオープンにしなかった可能性はあるにしても。

この章を締めくくる言葉として八田桂三が、今後取り組むべき研究課題を挙げている。「内燃タービン・ロケットは内燃タービンの重量が軽くなればよい。（中略）材料その他で解決がつけば（中略）最も実用性のあるロケットとなろう。（中略）耐熱材料や構造の進歩も必要である。（中略）要するに今まで熱と機構を主として取扱って来た航空発動機の技術者と、流体力学を取扱って来た飛行機の技術者との今までよりはより一層の協力がこの発達のための最も必要な条件である」

沼知が留学したゲッチンゲン大はノーベル賞受賞者を何人も輩出する名門大学であり、同校で博士号を取得した先のオハインは、1935年にローマで開催された第五回ボルタ会議に出席した際、世界から集まった空気力学などの権威たちが論じた、「超音速飛行」についての討論に強い刺激を受けていた。

それは、全盛のレシプロエンジンでプロペラを回して飛ぶ現在の動力原理では、超音速飛行に近づくと、プロペラの先端等で音速を超える部分が生じて衝撃波や振動を発生させたり、効率も著しく落ちて飛行そのものが危険になる。加えて、大馬力化したエンジンの重量も前面積も過大となって実用性がなくなってしまう。いわゆる、レシプロエンジンによるプロペラ機は近い将来、限界がくるとの結論だった。やがては、この限界を突破できる切り札が、ジェットエンジンではないかとの見方が広がり、特にヨーロッパでは強く期待されて研究熱が高まるのである。

種子島は、持ち帰った排気タービン過給機の調査研究を進めるため、海軍、日立製作所、石川島芝浦タービン、三菱重工、荏原製作所の各社による軍民合同のターボ過給機研究会を発足させて、試作が進められるのである。やがて、これらのメーカーで開発された排気タービン過給機が空技廠に納入され、種子島や永野らによる各種試験を経て、後の第二次大戦の半ばから末期にかけて、一連の高高度（局地）戦闘機や高速偵察機などに装備される。だが、この時点でも、高温の排気ガスの扱い方が難しく、艤装面でコンパクトな構造配置ができず、いずれも実用化に至らなかった。

実用化したのは、イギリスやアメリカのメーカーが実用化した形式を技術導入して自社開発した機械駆動の歯車式（二段）過給機が主流で、高空性能はいまひとつだった。このため、日本の戦闘機はいずれも高空ではエンジンの性能が落ち、高高度から侵入してくるB29を迎え撃つことができず、縦横無尽の本土爆撃を許すことになる。

ところで、エッシャー・ウイス社には、種子島が訪れ

た15年ほど前に、石川島造船の若き土光敏夫が、「ツェリー式（蒸気タービン）の実際の製造技術を学んで来い」と命じられて2年半ほど留学する。「(同社は)この分野での最先端企業であった。また、有名なチューリッヒ大学教授（この分野の世界的権威）ストドラ博士の門下生が多数勤務して、ヨーロッパ各国からも設計師が勉強に来ていた」（『私の履歴書』）と土光は語っている。

でも現実には、「東洋のあんな国から来てるというんで、設計室に入ってやっていただけで、もう野蛮人扱いですよ」（『日本機械学会誌』86巻780号）とも振り返っている。

当時、ヨーロッパの先進国を視察したり留学した後進国日本の技術者・研究者は、夏目漱石の例にもあるように、多かれ少なかれ、土光のような視線や偏見、見下す屈辱的な扱いを受けていた。だがそれが、彼らの大きなバネとなって「西洋に一日も早く追いつけ」と自らを駆り立たせたことも確かだった。

ところで石川島造船は、やはり蒸気タービンを製作していた芝浦製作所（現東芝）と共同出資でタービン専門の「石川島芝浦タービン」を1936年に設立する。やがて、日中戦争そして太平洋戦争の時代ともなると、土光は種子島との接触も増え、後述するように、陸海軍からの数種のガスタービン試作を委託され、この時代のタービンメーカーの中では実物の設計・製作においてもっとも成果を挙げることになる。

以上、これまでに登場してきた先駆者たちが、日本のガスタービン（ジェットエンジン）史の初期段階において大いに貢献した主役級の技術者（経営者）であり研究者である。

4. ネ20が唯一初飛行に成功

軍用機の最先端技術であるジェットエンジンは兵器であるだけに、日米開戦の直前頃までは、海外から取り寄せていた外国誌に断片的な情報がぼつぼつと紹介されていた程度で、本格的な文献はほとんど見当たらなかった。主動力としてのガスタービンに関心を示し始めていたのは軍であり大学の研究者であった。民間の航空機（エンジン）あるいはタービンメーカーは既存製品の開発・生産に追われていて、戦時下ともなるとなおさらで、成功する見通しが得られないガスタービンの自主開発に乗り出す資金も人手もなかった。このため、陸海軍から命じられた試作プロジェクトに対する各社の熱意の入れ方についてはかなりの温度差があった。

1940年9月、連合国から孤立する、日、独、伊が結束して三国同盟を締結し、それが基軸となって、日独間において技術交換協定が結ばれたが、ドイツ側は日本の技術は低水準でしかないと決めつけていて期待はしていなかった。このため、日本側がめぼしい独側の軍事技術の提供を要請しても、ジェットエンジンなどの先端技術の情報は拒否された。

1941年春、4年間のドイツ駐在勤務を終えて空技廠に帰任した熊沢俊一中佐が、ドイツは「盛んに排気タービン過給器の研究を行っているが、ドイツでは排気タービ

ン過給器そのものに対しては余り熱意は無く、もっと素晴らしい計画を考えている」（『航空技術の全貌』上巻）と伝えた。ドイツをはじめヨーロッパでのガスタービン研究が本格化していることをはっきりと知らされた空技廠や航空本部の関係者らは、「大いに興味をそそられ、思いもつかない新しい航空機の出現を、いろいろと憶測を交えながら論じ合った」と永野は語っている。少しして、海軍航空本部の情報担当部員から、「イギリスでプロペラのないジェット機が初飛行した」ことも知らされた。

さらに、翌年の初めには、駐日ドイツ武官から、He178ジェット機がかなり以前に初飛行に成功していたことも知らされた。この年の『航空朝日』10月号には、なぜか、軍事機密であるはずのイタリアのカプロニ・カンピーニ・ロケット機が飛行する（初飛行は1940年8月）写真が掲載された。その「プロペラのない飛行機」（レシプロエンジンでダクトファン圧縮機を回す方式）の姿態は、航空技術者たちにも異様に映り、それまで半信半疑でしかかった陸海軍関係者らに少なからず衝撃を与えたのだった。

こうした一連の情報を受け、海軍はジェットエンジン開発に本格的に乗り出すことになった。1942年1月、空技廠発動機部内にジェット推進機開発に関する専門の研究グループ二科が新設され、種子島が主任となった。部下には、北海道帝国大学でガスタービンの講義をしていた大賀篤二教授の教え子である清水三郎、加藤茂夫の両大尉も加わった。

陸軍でも第二陸軍航空技術研究所が、東大の粟野誠一助教授の主導の下でグループを発足させ、ジェットエンジンの研究・開発に乗り出した。1942年秋、プロペラを回すターボプロップ式の軸流19段のガスタービンを石川島芝浦（井口泉が主導）に、遠心式および軸流式の4種類のターボジェット等（主に過給機的な補助ジェット）を川崎航空機（林貞助が主導）に、それぞれ研究・試作を命じ、軍・産・学の共同で開発を進めることになった。

海軍（種子島）はさらに、1942年に、定置式500馬力のガスタービン・セットの試作を荏原に、1943年10月には、魚雷艇用の軸流式ターボプロップエンジン（GTPR）3000馬力の試作を石川島芝浦に命じた。

これらの試作と併行して種子島が進めていたTR10およびその改造型の試作機はいずれもトラブル続きで、しかも推力は依然として低く、寿命も極端に短くて破損を繰り返していた。そんな1944年8月、足かけ5年のドイツ駐在を終えた空技廠飛行機部員の巖谷英一技術中佐が「伊号29」潜水艦で帰国した。

帰国直前には、海軍からの命令を受け、ドイツ側の了承も得て、各メーカーや公的研究機関で開発されている各種ジェットエンジンの見学・調査が許された。ノートにメモをし、重要材料や部品、図面などを潜水艦に積んで日本に向かったのだが、寄港したシンガポールで巖谷だけが先に軍用機で帰国して、ドイツでのジェットエンジン開発の状況を報告した。しかし、後に到着する予定となっていた潜水艦は、連合軍の爆雷攻撃を受けて

沈められ、図面や資料、部品は届かなかった。このため、参考にできる資料は、巖谷が持参していたターボジェット機のMe262およびロケット戦闘機Me163の取扱説明書、ターボジェットのCoMo004およびBMW003Aの5分の1ほどに縮写されたキャピネ版の断面図、ワルター式推進ロケットの組立図、そして、これらに関する1冊のノートだけだった。

これらの資料をもとに海軍は、局地戦闘機（特攻機）搭載予定の、いずれも軸流式ターボジェットの、7段のネ330（最も大型で推力1・2トン、回転数7600rpmを目標）を三菱に、ネ230を日立（中島飛行機も協力）に試作を命じた。

一方、陸軍も、軸流7段のネ130を、東大の中西不二夫、栗野誠一、八田桂三、および陸軍第二航空技術研究所の岡崎卓郎大尉、中村良夫大尉らが参画する体制で石川島芝浦に試作を命じた。各社とも試作1号機は翌年春頃に完成させたが、これらの試作機の性能の程度はまばらであり、いずれも試運転中に終戦を迎えることになって、実機搭載までには至らなかった。

種子島が責任者となって進めてきたTR10の一連のシリーズは、相変わらずトラブル、失敗が続いて展望が見出せない中で、先のようにドイツから資料が到着したため、方針転換をはかることになった。種子島の構想原理は排気タービン過給機の域を脱ししきれておらず、現行方式に固執する種子島に対して、部下からは不満が噴出した。もはや、部下たちは「癖々であった」からだ。

代わって、航空本部および軍需省（兼任）に転出していた永野が8月末に復帰して、前任部員となってこの開発を主導することになった。BMW003Aの考え方を一部取り入れて、従来からのTR10の遠心式圧縮機の前に4段の軸流式圧縮機を取り付けた折衷的な構造のネ12Bを設計・製作して運転すると性能は著しく向上した。これにより、見通しを得たとして、10月末、BMW003Aの組立断面図に基づく構造形式を全面的に取り入れ、これまでの要素技術や、蓄積していたさまざまな試運転データも踏まえつつ、軸流式8段の圧縮機と軸流式単段のタービン（1万1000rpm）の組み合わせによるターボジェットネ20の設計試作を開始した。このときになって、チーム内には機械設計の経験豊富な技術者たちも加わることになり、ようやく本格的な開発体制となった。「ドイツ形の構造をとれば回転を下げて圧縮機とタービンの計画が楽になるのみならず、燃焼室の形も良くなり、全体が細長い形にまとまって重量もむしろ軽くなる見込みがついた」（永野著『ガスタービンの研究』）からだった。

ただし、このときの唯一の資料だったBMW003Aの組立断面図の鮮明度は、「キャピネ版に引き伸ばされた図面の線などはボンヤリとしていて、細部までは判別できず、ただただ想像するしかなかった」とネ130を担当した陸軍第二研の中村は語った。

この間、研究体制の強化のため、かねてから種子島がアドバイスを受けていた研究者諸氏、理化学研究所の仁科芳雄所長をはじめとする廠長顧問団の“7博士”、東大の中西不二夫、兼重寛九郎、八田桂三、東北大の沼

知福三郎、棚沢泰などの教授陣がアドバイザーとして加わった。不眠不休の24時間体制による作業によって早くも、1945年3月末に一号機を完成させて試運転を開始、さまざまなトラブルに見舞われながらも5時間の全力運転に漕ぎつけた。

終戦8日前の1945年8月7日、中島飛行機が、先のドイツから持ち帰った資料のMe262を参考にして製作した双発の局地戦闘機（特攻機）「橘花」に搭載して12分間の初飛行に成功した。戦前における日本で唯一となるジェット機の初飛行であった。

永野は後に、この時の感動を『日本航空学術史』に綴っている。「この研究に従事した1年間は自分の全能力を傾注して文字通り寝食を忘れて努力した。試飛行成功の日には生死を忘れて熱狂した。全生涯の感激をこの一瞬に集中した感があり、思い残すなにもものない」と記しているが、そのあと、締めくくりとして、激しい言葉で上層部を批判している。元海軍の技術士官においては極めて希有な言動である。

「しかし、技術的労作に対し『ピント』の外れた『進歩を命ずる』式の当路指導者やとりまき連中に対し、労作中ではもとより、今尚抑えがたき敵愾心を覚える。技術は育つもので、単に案ずることは有害無益なことを体験した」

この時のエピソードは同僚たちの間で後々まで伝えられることになる。ネ20の運転中に訪れた「当路指導者」である上官の中将に対して少佐である永野が食ってかかって喧嘩となったのである。特攻機の開発という現実を突き抜け、新たな技術の地平を切り拓く自らの作品を完成させることに存在をかけてきた技術者の「勇気」といえるであろう。また、当時の海軍の開発技術行政や体制がいかなる実態であり、いかに現場と乖離していたかを物語っている。永野のこの記述は、昭和20年代に綴られたものと想像される。

5. 反省と教訓から再出発へ

筆者がインタビューした際に、永野がオフレコと前置きして語った次のような言葉があったが、拙著『ジェットエンジンに取り憑かれた男』（1989年刊）には記載しなかった。

「学者先生の7博士による理論や具体的な提案が提示されて、一部は取り入れたりもしたが、その多くは、混乱を招く要因になっていた。あの頃はそんな高尚な次元じゃなかったんだよ、すべてが、また誰もがジェットエンジンについては理解しておらず、手探りの状態だったからね」

後の『日本機械学会誌』（1988年2月号）でも赤裸々に記している。「行きづまりと見えた技術的困難も盲滅法に実験して品物に教わることによって、何とか打開の道を見付けることが出来た。戦時中の我々のグループの技術水準は、おおむね未開発状態にあり、依存すべき技術情報も、誠に限られており、いやおうなしに自らを灯とし、法を灯とせざるを得ないすがたであった」

こうした言葉から想像するに、一見、永野は経験重視

の直観（勘）でものごとを進めていくタイプのように思われるかもしれない。だが、彼は徹底した理詰めでもって物事を進めていく技術者であって、日本で初ともいえる理論的な学術書の『ガスタービンの研究』（1953年刊）も発刊している。

どの技術分野でもそうだが、後の時代から草創期を振り返って、まことしやかに、理路整然と後付けをして、そこには確かに理論的な道筋や見通しがあったとする結論を見出しがちで、ともすれば自画自賛や虚栄に陥りがちでもある。ネ20もその例に洩れない。

だが、永野は晩年においても、自身の手柄話を持ち出すのではなく、未知なる原理のネ20の開発では、上述のような現実でしかなかったことを、あえて指摘しておきたかったのであろう。それが、戦前のガスタービンの歴史の真の姿だったからだ。

「ネ20についても、いろいろな人が語り継ぎ、記されていく間に、かなりデビエートしつつある。でも歴史とはそういうものであって、たいして気にしないんだよ」と永野は語った。

それと併せて、TR10タイプからネ20（BMW003タイプ）への転換時にも見受けられたが、研究者らの手による研究・実験段階から、技術者らの手による実用化に向けての（製品）開発へと移行（バトンタッチ）するタイミングの難しさであった。それは現代においても付き纏う大きな問題である。ものづくりの現場に疎くて理論や理屈、机上のプランが先行しがちな研究者（学者）と、実際のものづくりには長けているが経験重視で従来の手法に囚われがち（設計）技術者との間の齟齬であり乖離であり、対立である。これは、この頃、各社が手掛けたガスタービン試作プロジェクトにおいても同様であった。

種子島は「もっと早い段階で設計技術者に任せる体制をとっていれば、ネ20は一年早く完成していた」との反省の弁を述べている。果たして、実際にそうなる可能性があったか否かは別としても。彼は日本のガスタービン史における先駆者で大きな貢献を果たしたことは間違いない事実である。だが、1937年にフランスから帰国して1944年の夏までの間の研究および一連の試作エンジンの構造を、醒めた目で検証すると、それは当初からの排気タービン過給機の原理に最後まで囚われていて、その次元から飛躍できていなかったといえそうだ。

永野が語った興味深い一連の話の中の一例だけを紹介しておこう。TR10からネ20までの開発過程で最も悩まされ、最後まで解決できなかったトラブルは、タービン翼の付け根の固定（装着）方法だった。物理屋であるフランク・ホイットルは、早々と（クリスマスツリー形の）埋め込み式を考案してさして問題を起こさなかった。ところが、蒸気タービンそして排気タービン過給機を経てジェットエンジン開発を手掛けた、「われわれ（永野ら）機械屋は、従来からの方式に囚われて、溶接でがっちり固定した。これがいけなかった。このため、運転を繰り返すと、温度変化から、この付け根が割れて手がつけられず、寿命は極端に短かった。ホイットルの著

『ジェット』には、『専門家（機械屋）というものは先祖が犯した間違いをそのまま踏襲する人種である』と書かれている、実に興味深い指摘だ。

永野が指摘するのは、先入観を排し、また従来からの考え方に固執することなく、現象やモノそのものを直視して、そこに内在する本質（自然法則や理）を見抜く力を養うことの重要性を強調する姿勢である。それは、やや泥臭い面を併せもつ経験科学をないがしろにすべきではないと説いており、それはまた、ガスタービン開発などでの生きた歴史的体験から会得した教訓であり、自らの技術哲学でもあるのだろう。

スーパーコンピュータに基づくCFD（コンピュータによる数値流体解析）などのシミュレーション技術が高度に発展した現代の研究・開発環境では、やや異なりとの見解があるかもしれないが。

後述する1949年11月に開かれた、ガスタービン関係者が一堂に会しての「第一回ガスタービンに関する座談会」の席においても永野は提起している。「理論的な問題は山登りで言えば地図を作るようなもので（中略）納得のいくような地図のないときわれわれ機械屋は地図なしでも、どんどん実際に山に登って行けばよいのではないかと思う。（中略）どんどん早く経験をつむ必要があるのではないか」（『日本機械学会論文集』Vol.17 No.58）。それだけでなく、工学以外の分野にも造詣が深くて博識で知られる永野は、技術者や研究者が自身の狭い専門領域に閉じこもることなく、広い視野をもった歴史的洞察の重要性も説いている。

このように、日本のガスタービン史からは、さまざまな次元での学ぶべき教訓や反省を数多く見出すことができる。それにしても、戦時中の未曾有の混乱期に、既存のエンジンや機体の大増産命令が出され、多数の新機種開発や改良、トラブル対策に追われ、現場はおおわらわの状態であった。にもかかわらず、軍上層部はさらに、多種類のガスタービン試作を強行した。計画性が欠如して、数撃ち当たる式に各メーカーに試作を命じたのである。それは、人材も物量も生産力も豊富なアメリカが選択した重点主義とは逆だったのである。その結果、日本は、ただでさえ少ない優秀な人材（開発・設計技術者）の分散と消耗を招いた陸海軍の技術開発行政のお粗末さ、また戦略志向の欠如は、プロペラ機全体（空軍力）も含めて目に余るものがあった。敗戦直後に来日して、ただちに調査した米国戦略爆撃調査団も呆れ返っていたことを指摘しておく必要がある。

それはグローバル競争が激化する中での焦りからか、最近の有力大手メーカーにおいて、技術的あるいは品質管理面での不祥事が相次いで発覚して、上層部のガバナンスの問題性が指摘されているが、二次大戦下での開発・生産行政の失敗と相通じる面が少なくない。

余談ではあるが、同じ、動力の技術革新やエネルギーの転換という意味では似た事例として、現在、ドラステックに進行中の自動車分野のEV（電気自動車）がある。世界の大国がさまざまな戦略と思惑を秘めながら、EVへと大転換を進めようとしているわけだが、今後を

見据えようとするとき、マクロ（大局的）とミクロからの、まさしく、永野の指摘する「歴史的洞察」が必要であり、その意味では、ガスタービン史は大いに参考になる実例ではなからうか。

1945年8月15日、日本は敗戦によって陸海軍の解体、そしてGHQ（連合国総司令部）が交付した全面的な「航空禁止令」によって、戦前の航空（ガスタービン）技術者たちは虚脱状態となって無力感に陥り、しばらくの間は空白の時間が流れることになる。

最先端の技術開発に従事してきた海軍空技廠の優秀な技術者たちも廃業となり、四散するが、その一部（約数100名ともいわれる）が、運輸省鉄道技術研究所（鉄研）の計らいによって同所に職を得ることになった。

1940年代後半のこの時期、欧米では、航空機用として急発展したガスタービンを、船舶や発電、鉄道車両、自動車などに主動力として搭載する研究開発が活発化して有望視されていた。東大の八田桂三や三菱が分割されて発足した東日本重工などが呼びかけて、民生技術としてのガスタービン研究を盛んにしようと、ガスタービン研究の組織的取り組みを進める動きもあった。

でも、具体的な研究を早々とスタートさせていたのは鉄研と石川島芝浦であった。このとき、元空技廠でレシプロエンジンの実験などを担当していた近藤俊雄、燃焼を専門としていた中田金市、材料が専門の川村宏矣、空気力学が専門の山内正男、元中央航研で花島所長の下で海外のガスタービンについて調査・研究をしていた須之部量寛ら、本特集の先駆者たちが中核となった。

極度の研究資金難の時代ゆえ、聞きつけて、石川島芝浦の工場敷地内に埋められていた先の魚雷艇用の軸流式ガスタービンGTPRに着目し、土光の賛意と積極的協力を得て、これを同社の技術者である円城寺一らの尽力によって再生・改造し、戦後のガスタービン研究の具体的な第一歩がスタートする。

ガスタービンに関する情報は、東京・日比谷にあった米占領軍情報教育局（CIE）の図書館に揃っていた海外の雑誌や学術誌によって参照することができた。後に日本の各技術分野で大きな業績を挙げることになる技術者や研究者たちは、みなここに通り詰めたのだった。永野もその一人だった。「CIEに行くとき、欧米の科学技術分野のいい本や雑誌などがズラリ揃っていて、あそこはオアシスだった。だから入り浸っていたよ」

そこで、欧米と日本の航空機やガスタービンの開発過程を対照し、検証して、「なぜ日本は、あの戦争であれほどまで無様な姿をさらし、敗戦となったのか」との反省と教訓を学び取ろうとしていた。「日本の浅い技術の歴史であれだけの実績を残したことは一つの驚異であり、関係者の努力は賞賛されるべきものであろう。（中略）物の面では我々は量に敗れたと云うが、努力の面に於ては我々は量ではなく質に敗れたのである。（中略）日本の航空工業は未熟のまま無理やりふくらませられてしまった。それが所詮アメリカに対抗できなかったのは当

然である」（『航空技術の全貌』上巻）と結論付けていた。永野があえて「質に敗れた」と指摘するのだが、その点において、他の大勢の識者の見方や認識とは異なっている。

1949年11月19日、上野の精養軒に国内の重機械（造船）工業および重電機、自動車などの各社、各大学、公的研究機関のガスタービン研究者ら81名が出席して、日本機械学会内燃機関部門の主催による第1回「ガスタービンに関する座談会」が開かれた。本特集で取り上げた先駆者諸氏の多くもこの会に出席し、その一人である中西不二夫会長の挨拶を皮切りに、報告や熱い議論が交された。翌年4月には第二回目の座談会も開かれ、ガスタービン研究が一気に盛んになっていった。

だがこのころは、GHQの厳しい統制下にある「航空禁止」の時代だったため、議論は陸船用に限定されていた。同時に、レシプロエンジンのプロペラ機からジェット機時代へと急激に移行しつつある技術革新の時代であることは誰もが強く意識していた。それだけに、参加した元航空技術者たちの胸の内には、「いつかは航空用のガスタービンを」との思いが秘められていた。その日が訪れて、おおっぴらに胎動し出すのは、占領時代が終わりを告げる1952年3月の「航空解禁」の時まで待つことになる。

参考文献

- 岡村純編著、巖谷英一、永野治ほか、航空技術の全貌（上）、（1976）、原書房。
 富塚清、動力の歴史、（1979）、岩波書店、（1998）、三樹書房（再刊）
 富塚清編、航空発動機、（1943）、共立出版社
 永野治、ガスタービンの研究、（1953）鳳文書林。
 種子島千代子編、種子島時休追悼録付遺稿抜粹、（1989）、新教出版社。
 土光敏夫、私の履歴書、（1982）、日本経済新聞社。
 近藤俊雄、中田金市、永野治ほか、一号ガスタービンの思い出集、（1989）、L. G. コーポレーション。
 前間孝則、ジェットエンジンに取り憑かれた男、（1989）、講談社。
 ビル・ガンストン、見森昭・川村忠男訳、世界の航空エンジン レシプロ編、（1996）、グランプリ出版。
 ビル・ガンストン、見森昭訳、世界の航空エンジン ガスタービン編、（1996）、グランプリ出版。
 Stodola, A., Steam and Gas Turbines The Prospects of the Thermal Prime Mover, (1927) McGraw-Hill Book Co.
 Boyne, W. J., Donald, S. L., and Anselm F., The Jet Age: Forty Years of Jet Aviation, (1979) National Air and Space Museum, Washington.
 Whittle, F., Jet The Story of a Pioneer, (1953) Frederick Muller Ltd.
 （注）多数の各種学会誌および雑誌等の論文はすべて省略した

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

土光 敏夫

DOKO Toshiwo

1896 (M29) 年9月15日 - 1988 (S63) 年8月4日



土光敏夫は岡山県御野郡大野村（現在の岡山市北区）出身。関西中学（現・関西高等学校）を卒業後、母校大野尋常小学校の代用教員をしながら1浪して1917（T6）年に東京高等工業学校（通称 蔵前：現 東京工業大学）機械科にトップで入学（茅誠司、武井武は同期生）。

蔵前3年生（最終学年）の夏休みに、神田で『スチーム・タービン』*1という訳本をみつけたことが土光とタービンとの運命的な出会いになり、1920（T9）年に卒業後、東京石川島造船所に入社した。このときのエピソードを、黒柳は「徹子の部屋：1984（S59）年9月4日」で土光本人から聞き出そうとたまたまかけている。黒柳 蒸気タービン、ガスタービン、水力タービンという、タービンのご専門の方なんですね。それでそのタービンの方へお進みになるのも、ずいぶん偶然で、何か神田ブラブラしてらしたんですか？

土光 うん。これは北海道の五十年記念祭がありましてね。安い切符を割引で売ってたんです。十三円とか十二円でね。それを買って行ってきたんだけど、金が余ったもんだから、それで帰ってきて神田をブラブラするうちに買ったという……。（中略）

黒柳 それがタービンの本だった。

土光 そうそう。

黒柳 それがやはり、土光さんがタービンにお進みになるきっかけ。

土光 きっかけですね。

1922（T11）年にスイスのEscher Wyss社（後にSulzer AGに合併）に派遣され1924（T13）年に帰国。蒸気タービンの主任技師になった土光が1929（S4）年に秩父セメントに納めた純国産の7500kW発電機用蒸気タービンは、「思い出のタービン」と語っている。

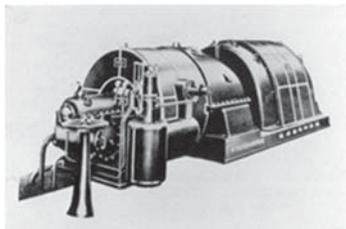


図1 思い出の7500kW発電機用蒸気タービン

*1 国会図書館の所蔵書を調査したが、1919年以前発行の関連する訳書は見当たらない。時期的にはAurel Stodola著 Die Dampfturbine (the steam turbine) (1903) は候補の一つではないかと推察される。

1936（S11）年に東京石川島造船所と芝浦製作所の共同出資で石川島芝浦タービンが設立され、翌1937（S12）年に41歳で取締役（技術部長）になる。

「石川島芝浦タービンの、戦時中の功績として、ジェットエンジンの開発が挙げられる。（中略）石川島芝浦タービンでは、1942（S17）年ごろから具体的計画に着手し、目標をプロペラ併用タービン噴進機（ターボプロップ）に置いた。陸軍を動かして研究にとりかかったが、これはのちに海軍の種子島大佐（のち石川島顧問）の指導を得、技術院も加わり、GTPRと称していちばん注目をひいた歴史的なものになった」。

戦後1946（S21）年に石川島芝浦タービンの社長を経て、1950（S25）年に本社の石川島重工業の社長になる。「社長に迎えられた私は、ジェットエンジンの開発を一つの柱にして、その研究を行った。（中略）1952（S27）年、航空工業許可制再開となり、同28年、関係社共同で『日本ジェットエンジン株式会社』を設立 純国産ジェットエンジンの開発にのり出したわけである。この会社は、のちに解散したが、技術や職員は、石川島が引き取り、今日に至っている。石川島を中心としたジェットエンジン開発には、ネ-20の設計者、永野治元海軍技術中佐（後に石川島副社長、相談役）、森糾明氏（後に石川島汎用機械社長）らが当たった」*2。

1960（S35）年に石川島重工業と播磨造船所を合併して石川島播磨重工業の生みの親となり、1965（S40）年には東京芝浦電気社長に。晩年の1974（S49）年 - 1980（S55）年に経団連会長、1981（S56）年 - 1983（S58）年に第二次臨時行政調査会会長、1983（S58）年 - 1986（S61）年に臨時行政改革推進審議会会長として、日本のために尽くしたことは現在50歳以上の日本国民なら知らない人はいないだろう。もし土光がいなければ、IHI社やわが国のジェットエンジンはいうまでもなく、わが国全体が今とは大きく異なるものになっていたであろう。

最後に、1949（S24）年11月19日に開催された日本機械学会内燃機部門主催「第1回ガスタービンに関する座談会」での土光（当時53歳で石川島芝浦タービン

*2 土光の長男の陽一郎（現93歳）は次のように語っている：航空機エンジンの設計を担当したとき、親父が集めてきた元海軍の技術者たちと一緒に働いたことがあります。その職場は失敗を恐れない雰囲気満ちていて、重要な仕事をほとんど若手に任せていました。それが「重荷主義で育てよ」という親父の経営理念だったことは、あとで知りました。

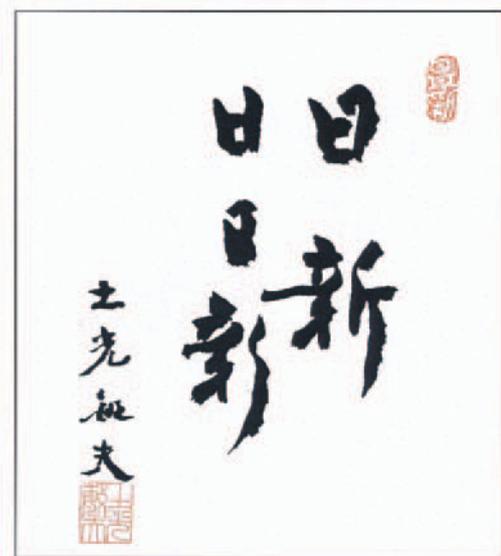
社長)の発言(傍点は筆者)を以下に引用するとともに、1989(H1)年に発行された「1号ガスタービンの思い出集」のまえがき執筆を約束しつつも発行前に他界したため代稿とされた土光の名訓の額を図2に示す。

「新しいものを実用にして行くには常に困難を伴なう。しかし私達は難点をあげるに止まらずその実現に適進したい。それにはまず有利な面からだんだんに置きかえるのがよい。化学工場用のもので私達のいままでに作ったものは低温のもの3台ぐらい、650, 700を10台ぐらい作ったことがある、その他有利なところにまず利用すべきで、印度あたりから引合に山奥の電源開発工事用として運搬に便利なパッケージタイプの発電所が要求されるが、こう云うときには軽量なこのガスタービンが有利である。また船用としても将来発展性があると思う。大塚さんも云つておられたが、内地では運転距離が短かくて機関車用として不利ではあるが海外を見ればそうではない。その他発電、製鉄等の需要に備えて国内において経験をもつ必要がある。鉄道においても今後とも面倒を見て内地では多少不利な点があっても採用して将来に備えてほしい。

前大戦直後ディーゼルが大変船用に使われたが当時英国ではディーゼルか蒸気機関かが論ぜられロンドンタイムスも論説を掲げていた。もとより英国での炭鉱業の重要性と関連しておりはするが、いかに英国が工業の進路に熱心であつたかを記憶している。ガスタービンについて日本も真剣に検討してもらいたい。幸いにいち早くこの研究を鉄道技術研究所および船舶局で探り上げたことは感謝にたえない。もちろんガスタービンの今後の発展過程においてはさらに今後完成すべき面は多いが、先ほど甘利さんの提案のように今後いつそう研究してほしい。また各原動機にそれぞれの特徴や欠点があり、ガスタービンでは材料の困難な点もあるが、これを必要性に応じて解決することと思う。蒸気タービンでも大正2, 3年ごろはわが国には高速にたえる材料がなく、12, 3年にやつと1% Ni鋼が出来、それから数年でNi Mo鋼の30トンのインゴットが出来、20年近くすでに使われている。このように材料は解決出来ると思うが、残念ながら実用と時間的におくれ、特に量的におくれでなかなか出来ない。ガスタービンはどうしても高級材料を要するので、この点材料製造家の援助と奮発をお願いする。

蒸気タービン発電所も稲生さんのお話のように効率も最近はよくなつて来ており、材料的にも1050 Kのものが戦後米國にどんどん出ている。しかし蒸気タービンの発電所ではボイラのパイプ、バルブおよびタービンの高温部分に耐熱材料が大量に必要である。ガスタービンは温度はさらに高いが量は非常に少ないという利点がある。またいままでのものより大変複雑な自動制御が楽になるという利点もあるし、耐久年数が短かくてもスペアを用意しておいて取り換えても大したことはないと思う。ともかく一日も早く実現することを願うと共に斯界の皆様と論議する機会を得たことに感謝する。」

(文: 吉田 英生*3)



ガスタービン技術の
発展を祈る

図2 土光の名訓の額

参考文献

Wikipedia <<https://ja.wikipedia.org/wiki/土光敏夫>> (参照日 2017年11月30日)。

土光敏夫, 私の履歴書(日経新聞連載1982年1月), <http://bizacademy.nikkei.co.jp/management/resume4/> (参照日 2017年11月30日)(本文引用部分は年の表記だけ本特集の西暦・和暦並記に統一修正)。

前間孝則, 日本の名機をつくったサムライたち 零戦, 紫電改からホンダジェットまで, (2013) pp. 285-329, さくら舎。

伊丹敬之, 難題が飛び込む男 土光敏夫, (2017) 日本経済新聞社。

土光敏夫は語る リーダーよ自ら火の粉をかぶれ, (1985), 講談社インターナショナル。

石川島重工業株式会社108年史(1961)。

土光陽一郎, 土光敏夫, 文藝春秋, 2018年1月号, (2018), pp. 194-196, 文藝春秋。

(動画) NHK あの人に会いたい http://www.nhk.or.jp/archives/people/detail.html?id=D0016010032_00000 (参照日 2017年11月30日)

第1回ガスタービンに関する座談会, 日本機械学会論文集, Vol. 17, No. 58(1951) pp. 151-174。

渡辺秀行編集, 1号ガスタービンの思い出集, (1989) J. G. コーポレーション。

原稿受付 2017年12月16日

* 3 京都大学工学研究科航空宇宙工学専攻
〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3
E-mail: sakura@hideoyoshida.com

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

沼知 福三郎

NUMACHI Fukusaburo

1898 (M31) 年5月4日 - 1982 (S57) 年9月14日



沼知福三郎先生は1898 (M31) 年5月4日茨城県常陸太田市に生まれ、県立太田中学校から東京高等工業学校 (東京工業大学の前身) に進み、1922 (T11) 年3月に東北帝国大学工学部機械工学科を第1回生として卒業した。その後ただちに、東北帝国大学講師、1925 (T14) 年3月に助教になり、1930 (S5) 年12月に工学博士を取得した。1931 (S6) 年5月から、水力機械学の研究でドイツ留学を命ぜられ、さらにイタリアと米国も追加して、1934 (S9) 年2月に帰国した。同年3月に東北帝国大学教授に昇任し、1962 (S37) 年3月に定年で退官した後、1965 (S40) 年4月に東北大学名誉教授の称号を授与された。この間、1943 (S18) 年10月に沼知先生自ら創設した同大学高速力学研究所の発足とともに、定年退官するまでの間、同研究所の所長を併任した。1949 (S24) 年1月には日本学会会議会員に選出され、翌年1950 (S25) 年5月に「翼型の空洞現象に関する研究」に対して、日本学士院賞を授与された。また、1959 (S34) 年4月に高落差カプラン水車の設計に関して、第1回日本機械学会賞を授与された。定年退官後も引き続き、学界において活躍され、1962 (S37) 年10月には、IAHRキャビテーション及び水力機械国際会議を日本で初めて主催した。1965 (S40) 年11月に日本学士院会員に選定され、1968 (S43) 年11月に勲二等旭日章を授与され、1976 (S51) 年11月に文化功労者として表彰された。その後、1982 (S57) 年9月14日に逝去された。

今回、私の恩師 (大宮司久明東北大学名誉教授) の恩師にあたる沼知先生に関する記事の執筆は、孫世代である若輩者の私には甚だ恐れ多いことであり、沼知先生の弟子にあたる諸先輩先生方にはたいへん僭越ではあるが、弟子の一人である千田一郎先生が編纂された「沼知福三郎先生研究業績目録」を引用しながら紹介したい。

沼知先生の最大の功績は、キャビテーションに関する先駆的な研究である。それまで「空所発生」と訳されていたCavitationをカタカナ表記したのも沼知先生である。本研究の原点は、戦前の1931 (S6) 年に34歳の若さで留学したドイツやスイス、スウェーデンなどの研究所や水力機械の工場などでの見聞にあり、特にゲッチンゲン大学のプラントル教授との出会いは沼知先生のその後の研究人生に大きく影響した。留学当初は苦勞したドイツ

語も、ドイツ語学校で、初級、中級に続き上級コースも習得して、研究者とドイツ語で討論できるまでに上達した。在外研究も終わりの頃、ハンブルグの船舶試験所で船舶用プロペラの新しいキャビテーション試験装置を見学した際、実験装置ののぞき窓から見えた水流中に細かなあわが雨あられのように一面に流れているのを見て、キャビテーションの初生は流れの圧力が蒸気圧以下になると発生すると考えられていたが、水に溶解している空気が影響して蒸気圧よりも高い圧力で発生するのではないかと、ひらめいた。ただ、留学中は秘密にしておいた。帰国した後、そのひらめきをもとに、キャビテーションの発生機構や翼列のキャビテーションに展開した研究の成果を、ドイツの学術誌、Ingenieur-Archiv, V.D.I.-Forschung, Werft-Reederei-Hafenなどに発表したところ大きな反響を得て、プラントルの著書を初め、多くの著書や論文に引用されることになり、Numachiの名前は世界に知れ渡ることになる。沼知先生は、「ちょっとした思いつきを実験したのであり、評価されたことは幸運であった」と回顧した。沼知先生は「初めて」が好きなようで、これらドイツ学術誌に論文を発表した最初の日本人である。

沼知先生は、キャビテーションのみならず、ポンプ、水車、風車、そしてガスタービンなど広範囲の流体機械を研究した。すべては紹介できないが、以下には、本題であるガスタービンについて紹介する。

沼知先生が初めて発表した論文は、翼型理論に基づき翼周りのキャビテーション発生機構を解明する研究で、日本機械学会論文集に英文で掲載された。のちに内力及弾性学講座を担当した樋口盛一教授との「駄弁」(本人曰く)や、恩師の宮城音五郎教授 (退官後、1952 (S27) 年に宮城県知事) からの英文執筆の勧めが論文作成を大きく後押ししてくれたと、最終講義をまとめた「研究挿話」に記している。つまらない論文だったと本人は回顧しているが、その後の研究はこの時知った翼型理論に密接に関連しており、その一つの応用にガスタービンがあった。

現在、IHIの史料館に展示されている日本初のジェットエンジン「ネ-20」(図1)に関する詳細は他にゆずるとして、ネ-20と沼知先生との関係は、太田照和教授 (現東北大学名誉教授) が工学部誌編纂室通信にまとめた

資料があり、これを引用して紹介する。翼列の研究ですでに世界的に知られていた沼知先生は、1941（S16）年3月から、海軍航空技術廠の研究嘱託を委託された。同年12月8日に日本はハワイの真珠湾を攻撃して、英米との戦争に突入した。同技術廠の中心であった種子島時休大佐（のちに石川島顧問）は、1942（S17）年1月ジェットエンジン推進法の研究主任を命ぜられて、石川島重工業の技師や海軍技術将校とともにジェットエンジン開発を本格化させた。参加した将校の中には、東北帝国大学工学部を卒業し、のちに樋口教授の後任として教授になった玉手統技術中尉も含まれていた。まず、遠心圧縮機1段、タービン1段、燃焼器は折り返し式の特種な構造をもったネ-10が設計されたが、タービン翼、軸受、燃焼室の故障が続出した。沼知先生は、効率や容積の点で優れている軸流圧縮機を勧めていたこともあり、1943（S18）年10月、流体機械の小型高速高性能化に寄与するため、関連企業などからも寄附を募り、東北帝国大学に高速力学研究所を設置して初代所長になった。同じく、同大学航空学科の棚沢泰教授は、ガスタービン用燃料噴射弁の試験について研究協力依頼を受けた。1944（S19）年半ばに入り戦況が悪化の一途をたどっていたころ、日独技術交換協定により、巖谷英一技術中佐はメッサシュミットMe262AのBMW-003AジェットエンジンとロケットエンジンMe163Bの大量の詳細図面を入手して、潜水艦「松」で3ヶ月におよぶ潜航を経てシンガポールに入港した。ジェットエンジンの断面図1枚と、ロケットエンジンの図面一式は先行して空輸され、1944（S19）年7月19日に羽田に到着した。しかしながら、残りの図面を積んだ潜水艦「松」はルソン島近郊で撃沈され、同じ資料を運んだ潜水艦「皐月」も爆雷攻撃で沈んだとされる。同じ頃、ネ-10を改良した双発単座機「橘花」に搭載するネ-12Bを設計していた。BMW-003Aの図面を見た種子島大佐は、これまでの開発の方向は間違っていないとむしろ自信を持ったが、技術的に不安の残るネ-12Bの開発を断念して、1944（S19）年10月に入り、1枚の図面を参考に8段軸流圧縮機を採用し小型化・高性能化したネ-20の開発を始めた。海軍は、12月25日からネ-20の設計作業を開始して、1945（S20）年1月から部品を作成し、3月26日にネ-20の試作1号機を組み立てた。試験は空爆を避けるため、神奈川県秦野町で4月末から開始したが、圧縮機圧力不足、燃焼室の振動燃焼、タービン軸受損傷など問題が発生した。軸流圧縮機の圧力不足については、沼知先生が設計し荏原製作所が製作したクラークY字型の50%反動翼による軸流圧縮機により解決した。また、燃焼器とタービン軸受の問題は、棚沢教授と永野治技術中佐（のちに石川島播磨重工業副社長、相談役）により解決された。最終的に1945（S20）年6月におよそ半年という驚異的な早さでネ-20が完成した。のちに沼知先生は、ネ-20は決して模倣ではなく、それまで積み重ねてきた日本独自の先駆的な研究と官民

一体となって強力に計画を推進した結果、自然発生的に実現したものであると述べている。海軍は新たなジェットエンジンの試作を沼知先生に依頼していたが、1945（S20）年8月15日に終戦をむかえた。残念ながら、ネ-20の図面は焼却された。ただ、「大丈夫だから発表しまえ」（本人曰く）と、速研報告にネ-20に関する7編の論文をまとめて掲載している。また、海軍に協力したため戦争犯罪人になるから、「仙台にはいないほうがいいぞ」と大学本部の「親切な人」から忠告されたが、幸いそうはならなかった。

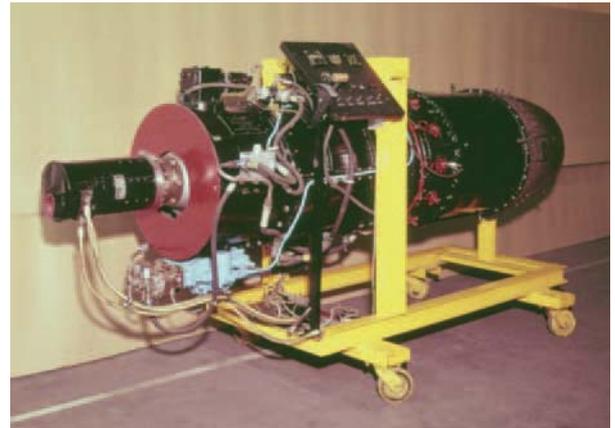


図1 IHIの史料館が所蔵するネ-20

戦後、沼知先生はたくさんの弟子に恵まれて、キャビテーション研究をさらに探究された。また、先見の明があった沼知先生は、伊藤英覚教授（元東北大学名誉教授）を研究所員として招聘され、その後、伊藤先生も沼知先生に引き続き、日本学士院賞が授与され日本学士院会員になり、文化功労者として表彰された。

沼知先生の趣味は、釣り、盆栽、南画であったが、人柄が知れる記事が、日本機械学会誌の1950（S25）年10月号の「鯉釣の話」にあった。2、3年前に釣りを始めたばかりの先生が、15年来釣りの経験がある釣り仲間の技官たちでさえ釣ったことのない、その年仙台で一番大きな1尺9寸（曲尺で約58cm）の鯉を釣り上げた自慢話が、A教授（たぶん樋口先生）との「駄弁」（会話形式）で綴られていた。一見すると機械学会誌とは何の関係もなさそうだがよく読むと、鯉釣りが上達するために釣りの文献をたくさん集め、釣り方の研究をしたと記されている。また、その釣り方が力学的に説明されていた。盆栽の趣味も、まずはたくさんの古本を集め、盆栽業者からいろいろ教えてもらうことから始め、盆栽雑誌の表紙を飾るまで盆栽道を究めた。「研究挿話」の最後に7つの教えが記されていた。その中のひとつに、「最初は多少好きでなくても、努力していればいずれ好きになり、そして着想は自ずと出てくる」とあり、これはまさに沼知先生の研究人生を表現されたのだらうと思った。奇しくも本執筆を通して、探究心に溢れ、ユーモアのセンス

があり、良き助力者と弟子に恵まれた沼知先生の研究人生を改めて知った次第である。

最後に、本原稿を執筆するに際して沼知先生の写真を提供いただいた東北大学機械系同窓会、ならびに関連資料を提供いただいた東北大学流体科学研究所西山秀哉教授に心から感謝申し上げます。流体科学研究所（旧高速力学研究所）では2018年度創立75周年を迎え、「沼知文庫」を創設する予定である。

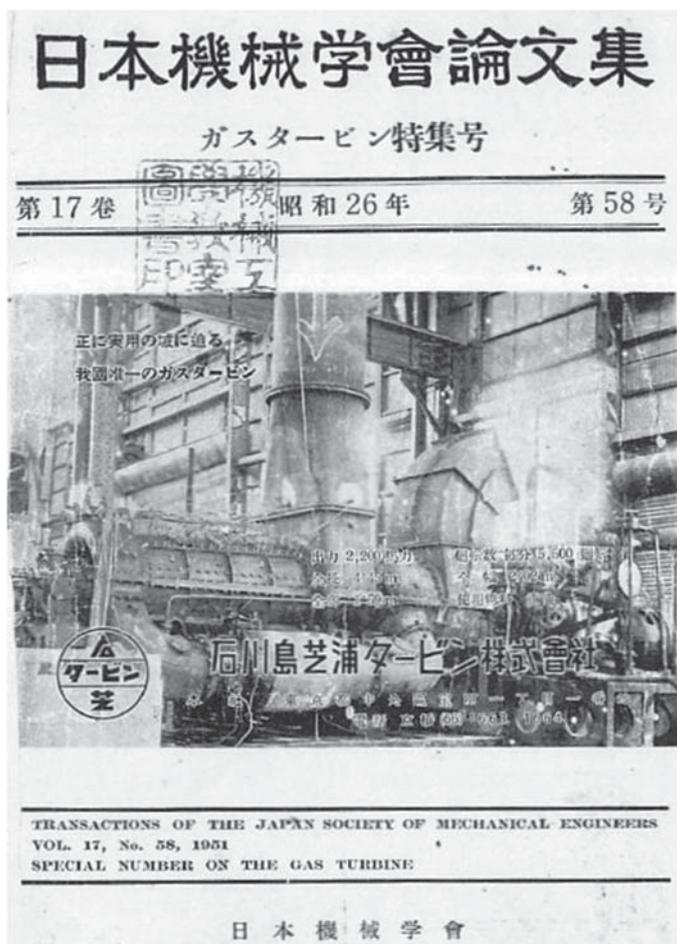
（文：山本 悟*1）

参考文献

- 沼知福三郎先生研究業績目録，東北大学図書館所蔵，（1983）
 F. Numachi, Ingenieur-Archive, VII (1936) 396; X-4 (1938-4) 86.
 F. Numachi, V.D.I.-Forschung, 11 (1940) 303.
 F. Numachi, Werft-Reederei-Hafen, XXII (1941) 295.
 F. Numachi, 日本機械学会論文集, 31-136 (1928) 530.
 東北大学工学部 工学部史編纂室通信, 8 (2002) 6.
 沼知福三郎, 速研報告, 9-84から9-90 (1953) の7編.
 沼知福三郎, 日本機械学会誌, 53-381 (1950) 389.

原稿受付 2017年10月25日

- * 1 東北大学大学院情報科学研究科
 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01
 E-mail: yamamoto@caero.mech.tohoku.ac.jp



ガスタービン特集が組まれた日本機械学会論文集の表紙（写真は1号ガスタービン）

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

中田 金市

NAKATA Kin-ichi

1900 (M33) 年7月25日 - 1998 (H10) 年4月12日



中田金市を語るには、寺田寅彦の存在を欠かせない。中田は熊本第五高等学校の先輩でもあった寺田に憧れて東京帝大物理学科に進んだ。大学2年生の1923 (T12) 年に起こった関東大震災では火災の調査に参加し、1925 (T14) 年に卒業。寺田研究室で海軍の飛行船爆発事故の調査に加わったとがきっかけで寺田から発動機の燃焼の研究を勧められたものの、中田は化学系と考えられた燃焼の研究には気が向かず、卒業後は旧制中学校の教師となった。しかしながら、物理化学ともいえる燃焼研究の面白さを寺田に説得され、1年後に海軍省嘱託となった。1936 (S11) 年に海軍技師、海軍航空 廠 発動機部部員、1942 (S17) 年に内閣技術院中央航空研究所研究官兼任、1944 (S19) 年に海軍技術中佐、第一海軍技術廠推進部部員となり終戦を迎えた。

本誌巻頭の前間の解説で「1940年代後半……具体的な研究を早々とスタートさせていたのは鉄研と石川島芝浦であった」と記されているのが、いわゆる「1号ガスタービン」であり、その中心になったのが中田である。これは、ネ20とともに、わが国におけるガスタービンの先駆者としてとりわけ重要であり多くの関係者に共通する事項でもあるので、「1号ガスタービンの思い出集 (渡辺秀行編集：J. G. コーポレーション社による貴重な限定出版本)」の巻頭にある中田の記事から、一般読者の目に触れにくいこともあり、長くはなるが抜粋引用させていただく。

1号ガスタービンの思い出 (中田 金市)

(前略) 敗戦の結果、日本では、空を飛ぶ事も、航空関係の研究をすることも禁じられた。パイロットだった人達は、脾肉の嘆に堪えかねて、「この空はわがものならず秋の空」と嘆いたものだった。

陸海軍の航空研究は勿論のこと、東大附属の航空研究所も、理工学研究所と看板を塗り変えた。通信省所管だった中央研究所も当然解体されざるを得なかった。ここは昭和20年12月末日をもって鉄道技術研究所に吸収された。大多数の研究者は鉄道技術研究所に残って、引き続き研究生活をやる事になった。これ等の人達は従来からあった部に編入される事なく、第1理学部 (主として機械工学関係の人々)、第2理学部 (数学、天文、物理、化学、生物学関係の人々)、第3理学部 (主として材料学関係の人々) という新しい部に編入され、近藤俊雄、

中田金市、川村宏矣という元海軍航空技術廠の職員が夫々の部の部長に任命され、これらの人達の面倒を見る事になったのであった。部長就任の際、鉄研所長だった中原寿一郎氏の言われた言葉を私は終生忘れないだろう。「日本は今航空の研究は禁じられているが、いつか必ず再開される日が来る。その日の為に、この人達は大切に育ててほしい。決してダダウサに使ってはならない」と。それからの私はこの言葉を守る努力をして来たのであった。

私の部の中には非常に多様な研究者が居た。例えば、農科出身の人の中には「豆類の中には、脂肪を蓄積しないで蛋白質を生産する種類のものがあるので、食料問題解決の一助としてこの研究がしたい」というのである。これは航空とは直接関係はないが、食料難の時ではあったし、それもよからうと思った。中央航空研究所 (中研と略称) に航空とは直接関係の無さそうなこの様な人達を採用して居られたのは、中研所長花島孝一氏の深いお考えがあつての事と思ったからである。

色々苦労していた時、近藤第1理学部長から「今度ガスタービン機関車の研究をすることにしたので、第2理学部も協力してほしい」という申し入れがあった。(中略) この研究をやれば、航空に関連のある諸現象の研究が出来るので、協力することにした。昭和23年ごろの事であったと思う。(中略)

ガスタービンの研究を、石川島芝浦タービン株式会社と手を組んでやる事になった経緯について (中略) 簡単に述べると、若い研究者の間で、実験用のガスタービンが欲しいという要望が出た。コンプレッサとか燃焼器とか部分の研究も大切だが、総合された形のものがあれば、研究推進上極めて有利であるからである。新しい実験用ガスタービンを作るには、費用と時間がかかり過ぎる。石川島芝浦タービンでは戦時中、飛行機用としてジェットエンジンを試作し、終戦前に完成していたが、終戦時にいろいろ問題になるものを焼き棄て、又は破壊してしまうという風潮の中で、このエンジンも、工場の一隅に埋められた。これを掘り出して、若しあまり傷んでいなければ、之を実験用のガスタービンにしたらどうかという話が出た。掘って見たら、殆んど傷んでいない。(中略)

丁度この頃、公職追放の嵐が吹き荒れて、元技術大佐、機関大佐の近藤、川村両君は、或いはGHQから追放命令が出るかもしれないとの判断の下に、先手を打ってや

めていただいた方が傷が少なくすむという中原所長のお考えで両氏は退職された。従って私が第1理学部長を兼ねる事になり、ガスタービンの研究の重荷が一身にかかることになった。そこで、私自身何かやるよりは、若い人達に研究し易い環境づくりをする事に徹しようと、決心した。

掘り出したジェットエンジンは、一度は捨てたものだったので、只で貰い度かつたが、そうも行かず買う事にした。修理代も含めて200万円（記憶違いでなければ）だったと思う。之等の交渉の相手は石川島芝浦タービン株式会社の営業に居た渡辺秀行君だった。（中略）

石川島芝浦タービン製のジェットエンジンを実験用ガスタービンとして購入し度い旨を中原所長に申し出たところ、「いいだろう。買おうじゃないか」と言われる。私としては本来の鉄研所員が、僅かな研究費を分け合っているのに、いわば新参者がこんなトテツもない研究費を要求するなんて、気がひけたが、新しく研究用のガスタービンを作るより安上りだという事を考えて踏み切った。「でも鉄研にこんな大金があるんでしょうか」と聞いては悪い質問をしたところ、「なあに本省に行って貰って来るよ」と事も無げに言われたばかりか、「ガスタービンの研究費には盲印を押すから、遠慮しないで持って来なさい」とまで言われ、感激した事であった。航空技術の研究者を温存する為には己むを得ないと思われたのかも知れない。1号ガスタービンを実験機として研究に励んだ人達が、後年航空宇宙技術に大いに貢献された事で、いくらか御恩返しが出来た様な気がする。

こんな事で、土光敏夫石川島芝浦タービンの社長とも親しくなった。ある時こんな述懐をされた事があった。「敗戦で当分の間タービンの注文は無いし、工員の間では、工場をキャバレーにしたらどうかという声もあった

が、こうしてガスタービンの研究を始めることによって、工場本来の仕事が出来てよかった」と。

三鷹の元中研の機械器具類は賠償物資に指定されており、我々所員は之等の機械の手入れを怠らず、いつ何時でも提供できるようにしておく様にといいことで、ガスタービンの実験を三鷹の施設の中でするなんてとんでも無いというのである。石川島芝浦タービン会社は工場の一部を貸して下さり、そこにガスタービンを据付けて実験する事を許可して下さい。修理の出来たガスタービンはわが国最初の動力用ガスタービンであったので1号ガスタービンと命名し、ガスタービン機関車への研究の第一歩を踏み出したのである。（中略）

さて、研究の陣容であるが、空力関係は、山内、重見、河崎の面々、熱力関係は、須之部、三輪、熊谷の面々、燃焼関係は、飯田、根矢の面々、運転関係は不破が主になり、夫々何人かの若い人達がついて研究に励んだのであった。

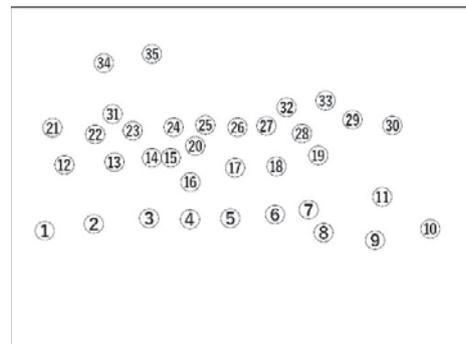
ガスタービンの性能向上の為にはいろいろ為すべき点があげられるが、タービン材料の耐熱性を高めることは必要欠くべからざる要素であった。このため新に学卒者の関本房幸君を採用し、材料研究を担当して貰った。彼は後で鈴木益宏氏のところへ養子に行き鈴木姓を名乗った。（中略）

（中略）1号ガスタービンの熱効率は意外に低いものであった。石炭を焚く蒸気機関車の熱効率は5%程度であった。電気機関車の熱効率は国鉄の電気局長だった関四郎君の言うところでは17%だという。之に打ち勝ってガスタービン機関車が生存する為には、少なくとも熱効率は20%以上無ければならぬだろう。その上に運転時の物凄い音を何とかしなければ実用不可能である。では1号ガスタービンの実験は無駄だったのだろうか。私は



図1 公開試験後の記念撮影（昭和24年6月1日）

本稿において一点だけ筆者の推測を加えることをお許し願いたい。この記念すべき写真に中田の姿はないが、この場に中田が居合わせなかったとは考えがたい。中田が「いや、私はいいから、みなさんこそ揃って写りなさい」と言って、中田自身がシャッターを押したのではなからうか。また、道半ばで退職した近藤・川村両元部長への思いもあったのではなからうか。中田による文面や関連記録からそのような中田像が浮かぶのである。



最前列中央

④山内正男 ⑥須之部量寛

（他にも10名程度の方々のお名前がほぼ判明しているものの、読者のみなさまからの情報も加えて確実となった時点で追加報告予定。）

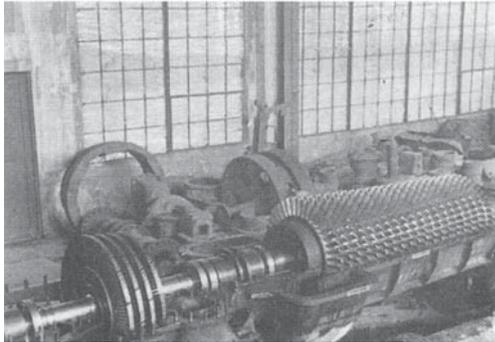


図2 鉄研の1号ガスタービン(石川島芝浦タービン 現在の東芝鶴見工場)と現在の展示(東京電力「電気の史料館」ガイドブックより) 中田の文集 における結びの言葉「1号ガスタービンは今、三鷹の船舶技術研究所の一室に静かに横たわっている。日本でもエンジン博物館ができて由緒あるエンジン類が、安らかに憩うことができれば1号ガスタービンもそこで大切に保存されるであろう。」のとおりになっていることは幸いである(拙稿 参照)。

そうは思わない。戦争に負けて虚脱状態だった会社を研究の仲間に入れて活気を取り戻させた功績は高く評価されてもいいだろう。(後略：以上で引用おわり)

中田が87歳の1987(S62)年、本会の名誉会員に推挙された。清廉な中田は、そのときの挨拶で、「ガスタービンの研究に着手した近藤俊雄君^{*1}こそ、この栄誉に相応しい人と思う」と述べている。なお、中田自身は参考文献^{*}にあるように内燃機関の燃焼に関する基礎研究を行った。

中田はその後1956(S31)年に運輸技術研究所所長を経て、1963(S38)年に消防庁消防研究所所長となる。日本火災学会誌「火災」にある中田の追悼文中には次のような一節がある：昭和45年6月の或日、実験中の職

^{*1} 近藤俊雄は文集 で以下のように述べている。

23年12月末の御用収めの日に浜松町の鉄研本部で中原所長にお会いして、過去25年間の御指導にお礼を申し上げて、辞任をお願いした。理由はお判りと思って敢て申し上げなかった。所長は言われた。「いや、もっと続けてやってもらいたいね。何か不満のことでもあるのか」と。私は大人の会話と言うものは、斯くあるべきものかと、感銘を深くした。

私は申し上げた。「ガスタービンの種子を地に播く私の農夫としての作業は、ここらで一応終わった様に思います。私がお暇するには、今が一番よい区切りの時だと考えます」と。そうして、短くはあったが、思い出の深い鉄研とお別れした。

しばらくして私は、中田さんから鶴見(?)の工場に招かれて、嘗ての亀とあばら骨が再び生命を授(さづか)って、火を吹き、音をたてて動いている光景を見た。多分、摺り合せ運転を兼ねたパーシャルロードの時であったろう。皆が、中田さんを中心にして、楽しく希望に満ちて働いているのを見た。又、ここに至るまでに、石川島当局から戴いた御協力がどんなに大きなものであったかを、その時改めて識った。この二つがうれしくて、私の胸はつまった。

省りみれば、私の鉄研時代は、その前の20年間に及ぶ海軍時代と、後のこれ又20年に渉る会社勤め(パイロット万年筆)の間に挟まれた、たった25年間の短いものであった。丁度その時、鉄研に於てガスタービンの研究が始まる時だったので、その受胎と誕生の一部に、産婆の一人として働かせていただいたのだった。日本が極度に貧しかったその時に、私は大根おろしを食いながら、俊才揃いの若い研究者と交わり、高貴なる研究の未来を輝かしく語り、そしてルイ14世の寝台で豊かな夢を結んだ。あの昔の、あの思い出を、私はいつ迄も忘れないであろう。

員が、破損した回転板の小片を心臓に受ける事故に遭った。居合わせた職員の通報で駆け付けた先生は、鮮血の中に倒れている彼を膝のうゑに抱き上げ、啞然と立ちすくむ職員に、血を浴びながら応急の指示をされたとのことである。(中略)事故現場でとられた先生の行動、葬儀での先生の弔辞に、強い感動を覚えた。そして上に立つ者の心得を改めて教えられた気がしたものである。

(文：吉田 英生^{*2})

参考文献

- 前間孝則, ジェットエンジンに取り憑かれた男, (1992) pp. 200-204, 講談社.
 関根孝, 中田先生の思い出, 火災, Vol. 48, No. 4, (1998) p. 12.
 前間孝則, 先駆者たちが織りなすガスタービン開発の歴史ドラマ, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 1, (2018) pp. 3-9.
 中田金市, 鐵道技術研究所におけるガス・タービン研究の現状, 日本機械学会誌, Vol. 52, No. 370, (1949) pp. 349-353.
 中田金市, 1号ガスタービンの思い出, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 3, No. 11 (1975) pp. 1-2.
 渡辺秀行編集, 1号ガスタービンの思い出集, (1989) pp. 1-8, J. G. コーポレーション.
 吉田英生, 須之部量寛, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 1, (2018) pp. 33-34.
 中田金市, 点火栓の汚損に関する研究, 日本機械学会論文誌, Vol. 15, No. 52 (1949) pp. 24-30.
 中田金市, 点火栓の過熱について, 日本機械学会論文誌, Vol. 15, No. 52 (1949) pp. 30-34.
 中田金市, 牧浦隆太郎, スペクトル線反転法によるシリンダ内の火炎温度の測定, 日本機械学会論文誌, Vol. 15, No. 52, (1949) pp. 35-40.
 今津博, 中田金市先生を偲んで, 火災, Vol. 48, No. 4, (1998) pp. 12-13.

原稿受付 2017年11月30日

- ^{*2} 京都大学工学研究科航空宇宙工学専攻
 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3
 E-mail: sakura@hideoyoshida.com

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

種子島 時休

TANEGASHIMA Tokiyasu

1902 (M35) 年7月20日 - 1987 (S62) 年8月7日

種子島時休は1902 (M35) 年に神奈川県横須賀市で生まれた。1921 (T10) 年に海軍機関学校を卒業し、翌1922 (T11) 年、戦艦「陸奥」の機関少尉に着任する。戦艦「陸奥」では4基のタービンを21基のボイラーで回していた。三万五千トンの戦艦を動かす巨大な蒸気タービンを見つめながら過ごした二年間で、内燃機関のようにボイラーなしでタービンを回せないかという、当時少し夢のような話に取りつかれ、研究をしたいと考え出したのが、日本におけるジェットエンジン構想のきっかけとなる。その後、軍艦勤務から航空隊勤務となり、1930 (S5) 年に東京帝国大学航空学科に派遣され、三年間、同校にて航空発動機の基礎を学ぶ。学修後、広海軍工廠航空機部発動機課長を拝命し、発動機の製作に従事する。1936 (S11) 年よりさらに技術駐在武官として駐在し、ガスタービンに関する動向調査を行い、任務終了をもって1938 (S13) 年に帰国。帰国後、航空技術廠発動機部にて第一工場主任 (サービスエンジニアの長) を命じられ、直ちに研究を開始することはできなかったが、ガスタービンやジェット推進法の調査を怠ることは無かった。「ガソリンを途切れ途切れに吸い込んで燃やし、プロペラを回すなんてもう古いんだよ。」

1940 (S15) 年、第一工場主任の他に、研究一科を兼務することになった種子島は、念願のジェットエンジン (当時はタービンロケットと呼ばれていた) の開発に取り掛かった。Stodola著 [Steam and Gas Turbine] を読破し、ジェットエンジンについては相当な知識を得ていた種子島は、永野治らと遠心圧縮式ガスタービンを完成させた。しかし遠心圧縮機、アニュラー型燃焼器、軸流単段タービンの形態では、目標とする推力には及ばなかった。課題とする推力向上に加え、寿命確保、小型軽量化、前面空気抵抗の最小化を同時に達成するという難題に直面していた。

当時の状況を種子島はNHKスポットライトの中でこう語っている。「一万六千の回転でビューンと金属音を上げて回ったのです。本当の意味で日本のジェットエンジンのヒヨコが生まれた最初の喜びだと思ったのです。」、実用化に至らなかったことについては、「設計が少し無理だったのです。初めの間は喜んでぶん回しておったのですが、羽根 (動翼) がすっ飛んだり、遠心プロペラが三つに分かれて飛んでトタン屋根をぶち抜いた



のです。」自らを「実験研究屋」と称する種子島らしく、嬉々とした口調で淡々と事実を述べる様子を、技術者としての真摯な姿勢、苦境をものともしないバイタリティが表れていた。実用化に至らない状況が続く、開発続行が危ぶまれるようになったが、ドイツでのジェット戦闘機の飛行成功が伝えられたことにより事態は一変、日本のジェット戦闘機開発に拍車がかかる。

1944 (S19) 年7月末、ドイツで技術駐在武官業務を終えた巖谷英一海軍中佐が、ドイツが開発したBMW003Aの断面図 (図1) の写真1枚 (10cm x 15cmのキャビネ判) を持ち帰る。それを見た途端に種子島は安心したという。「ああ、これならまったく同じだ、ただプロペラが初めからこういうふうには軸流を使っている。それからタービンの設計は非常に楽にしている。そして回転も遅い。これならタービンブレードももつだろうと思った。」種子島は軸流圧縮方式が問題解決につながると確信する。それから約2ヵ月後、種子島はこれまで奮闘していたネ-10系統の開発をすっぱりと捨て、多段軸流圧縮機、アニュラー型燃焼器、単段軸流タービンという現代のジェットエンジン構造に近いネ-20 (図2) の開発に方針転換することを進言し、即座に了承される。

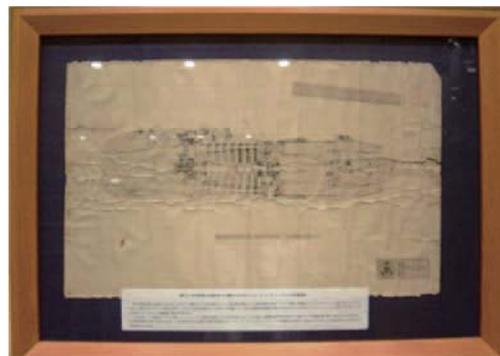
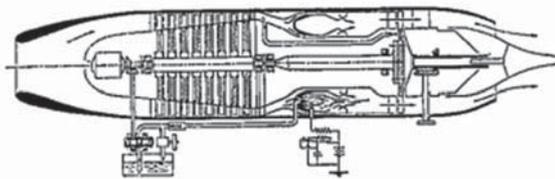


図1 ジェットエンジンBMW003Aの断面図

そして、およそ6ヶ月という驚異的な早さで燃焼噴射推進機「ネ-20」が完成。1945 (S20) 年8月7日、ネ-20は日本初のジェット戦闘機「橘花」に搭載され、12分間、高度600mの初飛行に成功。一週間後に終戦となった。終戦の日、種子島は開発に携わった人々を前にこう



Principal Items of Kikka	
1. Application	Short distance high speed interceptor to ships
2. Seat	Single
3. Engine	Two "Ne 20" Turbo-Jets
4. Total Weight	3.5 tons (over load 4.0 tons)
5. Total Wing Area	13.5 m. square
6. Bomb	One 500 kg
7. Max. Speed	365 knots
8. Range	300 NM
Remarks:	
At take-off, two booster Rockets are used which continue 9 seconds.	

図2 ネ-20断面図および技術諸元

挨拶をしている。「我々の開発した橘花は一回だけの飛行で消えていく。だが近い将来ジェット機の時代は必ずやってくる。日本で最初にジェット機を飛ばしたのは我々であるという誇りをもって、それを生涯の思い出にしよう。」種子島の予言どおり、今日無数のジェット機が世界中を飛び回っている。

< 終戦後の種子島 >

戦後は1947 (S22) 年から1955 (S30) 年にかけて日産自動車に勤務。1957 (S32) 年には石川島重工業技術研究所顧問となる。1959 (S34) 年から1970 (S45) 年には防衛大学の教授となり、同時期には東海大学教授として教鞭を執った。ジェットエンジン開発から離れていた間にも「実験研究屋」として様々な技術開発に寄与し、四輪油圧駆動車、フライホイール車、制動エネルギー回収システム等のコンセプトを確立し、数多くの特許を出願しており、その後次々と実現・実用化されている。何事にも実証しなくては気がすまない性分から、独自に研究実験を重ね技術的な知見を蓄えると同時に、常にその技術の将来性・展望を見据え実用化に結びつける姿勢は、今日の様々な技術基板の礎となっており、改めて種子島の物事の本質を見抜く判断力と技術的先見性の高さを示すものである。

「実験研究屋」としての一面は、私生活にも現れており、氏の自宅庭に住み着いたモグラを駆除した話も面白い。庭の芝生にモグラが住み着き、ポッコリと土盛りができるようになった。非常に難儀していた種子島はお嬢様のご学友まで動員して、穴という穴にホースで水を入れ、水攻めを行うもまったく効果が出ない。そこで種子島は一考し、尋常一様なことではダメだということで、新宿紀伊国屋書店でモグラの習性に関する本を購入し、調査を行う。そこでモグラは目が見えないが、嗅覚が非常に発達していることに着目し、ナフタリンを多量に購入する。これを細かく砕いて、これまた一家総出でモグラの穴に埋めていったところ、効果がきめん、モグラは出なくなった。しばらくすると隣の奥様が「このごろモ

グラが出ませんか？」とおっしゃるようになり、モグラはみんな隣に疎開したと大笑いしたそうな。

< 終戦後のネ-20 >

終戦後、GHQが派遣したIAU (Intelligent Air Unit) によりネ-20、橘花などは接收され、米国に持ち帰られた。米海軍は戦後初の戦闘機にジェットエンジンを搭載するとして、接收したネ-20をクライスラー社に渡し、ジェットエンジン開発を特命した。クライスラー社は、ネ-20を分解し、写真撮影、再組立て、エンジン運転をしたところで、エンジン開発は難しいと判断し、製造を辞退している。ネ-20はここで用途廃棄される予定だったが、たまたまクライスラー社を訪問していたノースロップ航空機製造会社社長Jack Northropの目に留まり、氏が経営するNorthrop Institute of Technology (NIT / カリフォルニア州) の学生向け教材として購入されることになる。国内外より多くの学生が集まるNITでは、最新のジェットエンジンの基礎教育と、実機ネ-20による始動からアイドルまでの実務なども行われていた。当時NITで教育を受けていた運輸省航空局の舟津良之氏が日本製のエンジンが米国に存在することを本国に伝え、それがネ-20であることが判明する。これに非常に興味を持たれた舟津氏や関係者の粘り強い交渉の末、1973 (S48) 年に開催された入間基地での第四回国際航空宇宙ショーへの出展が決まり、初めて日本人に日本初のジェットエンジン「ネ-20」が公開された。このとき開発に携わった種子島グループも28年ぶりの再会を喜んだ。その後NITの好意により「永久無償貸与、返還請求なし」の条件で石川島播磨重工業 (現IHI) に永久貸出されることになり、史料館に保存されている。

日本のジェットエンジンのルーツは種子島のジェットエンジン開発に始まり、特命を受けた東京石川島造船所でうぶ声を上げ、そのエンジンが米国に渡り、多くの海外留学生も含めた新しい時代のエンジニア達の基礎教育に貢献するに至った。GE、P&WあるいはRRの若きエンジニア達が、種子島時休が開発した日本の「ネ-20」を通して、ジェットエンジンの基礎を学んでいたかもしれない。(文：原田 實，馬場 勝*1)

参考文献

Wikipedia < <https://ja.wikipedia.org/wiki/種子島時休> > (参照日 2018年1月3日) .

前間孝則，日本の名機をつくったサムライたち 零戦，紫電改からホンダジェットまで ，(2013) pp. 330-372, さくら舎.

種子島千代子，種子島時休追想録付遺稿抜粋，(1989) 新教出版社 .

NHK番組スポットライト「ジェットエンジン ネ-20」(1976年9月16日放送)

原稿受付 2018年1月10日

* 1 (株)IHI

E-mail: masaru_baba@ihi.co.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

林 貞助

HAYASHI Teisuke

1904 (M37) 年9月30日 - 1999 (H11) 年10月29日

林貞助は神戸市東灘区本山北町出身。航空学科を志望していたが、飛行機を危険視する周囲の人から阻まれ、エンジンに転向した。京都大学工学部機械科を卒業直前の病気などから予定より5年遅れて1930年に卒業後、1933 (S8) 年4月に川崎造船所飛行機工場(後の川崎航空機工業)エンジン設計部門に入社した。1935 (S10) 年8月から1938 (S13) 年11月まで、航空エンジン研究の為パリに駐在して、頻りにイギリス、ドイツ、フランスの工場見学や各種の技術交渉などで繁忙の明け暮れであった。ただし、当時イギリス、ドイツにおいて噴流エンジンの開発、研究が行なわれていたが知る由もなかった。

1937 (S12) 年頃から、ジェットエンジンの先駆者であるイギリスのホイットルやドイツのオハインらのジェットエンジン開発に関する記事が、内外技術雑誌上に割合頻りに散見するようになった。そして我が国では、これらの外国における開発に刺激されて、海軍側では林と同時期パリに駐在していた種子島時休中佐を主唱者として、1942 (S17) 年春から秋にかけて海軍空技廠(発動機部第二科)、それを追って陸軍側では陸軍二航研(第四研究室)および東大航研に噴流推進エンジン研究専門部門が新設された。そして川崎航空機工業は既に陸軍側の専管工場であり、林以下9名と共に1942 (S17) 年11月中旬に立川の二航研に着任して一室を与えられ、厳しく緊迫した戦局下に陸軍試作ジェットエンジンの主任設計者としてその開発を担当した。1943 (S18) 年3月の職制の中には、東大の岡崎卓郎、富士重工の秋山義雄、三菱長崎の矢野達夫があった。林はジェットエンジンの試作開発に当たるとともに、永田大典とともに1942年末頃の東大航研の提案によるカンピニー方式のエンジンジェットのネ-101およびターボプロップのネ-201の開発への協力者となっていたが、二人とも、この両エンジンに実際に関与する余裕は殆ど無かった。川航派遣グループの二航研入りは、二航研自らがメーカー的な設計・製図の力を持った最初の例と思う。

世上、ジェットエンジン開発は、海軍側のみで行われた如き印象を与えているようであるが、これは陸軍側のジェットエンジン開発経過についての林の詳細発表が遅れたためである。ちなみに本文記載の各エンジンの「ネ」の記号は、「燃焼ロケット」の燃焼の「ネ」を採った秘匿記号であり、後に陸海軍統一記号となった。戦局は日本軍のニューギニア撤退、ガダルカナル島で苦戦中



であり、陸軍航空本部から二航研宛ての指令は「噴流推進エンジンを昭和18年までに実用化せよ」という極めて過酷のものであった。航空本部からのこの急速完成指令と、当時の耐熱鋼材ではタービン入口温度を上げられず、熱効率をあげることは不可能と判断して、林は意を決して、補助ターボジェットを開発して、必要緊急時にのみこのエンジンを稼働して、機速を挙げることを優先して、その後本格的なエンジンを開発することにした。以上の陸軍側の補助エンジン構想は、最初から主機としてのエンジン完成を狙った海軍側の方針とは全く対蹠的で、海軍側の方は運転継続時間が長いことなども加え、開発には困難が多かった。これは工場技術者と研究技術者との考え方の相違であった。

開発した補助エンジンは図1に示す5型式である。ターボジェット型式(ネ-3)、(ネ-4)、カンピニー型式(ネ-1)、(ネ-2)を同時に並行試作し、それに、基礎研究用のラムジェット(ネ-0)を加えた。各々の1号機の完成目標をネ-0を1943 (S18) 年3月末、ネ-3を6月末、ネ-4を7月末、ネ-1を8月末、ネ-2を未定として、1942 (S17) 年11月末から大急ぎで昼夜兼行で製図に着手した。基礎研究用のネ-0を最優先製作とし、それ以外は、機体装着の自由度の多いネ-3、ネ-4を他の型式より優先した。一同の夜昼なき異常な頑張りにより、ネ-0の燃焼器、ネ-3、ネ-4続いてネ-1の機械加工部品の順に製図を急ぎ、ネ-1の図面のみはやや遅れたが、1943 (S18) 年4月末には、ネ-0燃焼器各種およびネ-3、ネ-4の主要部品の製図、また、6月中旬には、機械加工部品全部の製図を終えたが、試作計画スタート後、約半年で4種のエンジン図面の大部分を終わったことになる。しかし、各エンジンの完成時期目標は関係者一同の超人的な努力にも拘わらず、戦時下における各面での障害の為、おしな

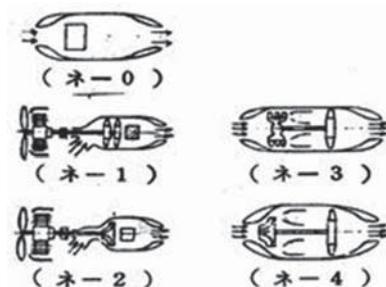


図1 補助ジェットエンジン



図2 ネ-0装着 キ-48 爆撃機初飛行成功

べて、約8カ月の遅れが生じた。

補助ジェットエンジンの燃焼継続時間が短いので、高めの800（大戦末期に発表されたドイツBMW-003、ユモ-004はいずれも空冷タービン翼を使用しており、750であった）としたが、燃焼問題が最大の問題となり、ネ-0を中心に種々の燃焼器を並行実験して、膨大な貴重な資料を得た。これらをネ-3、ネ-4燃焼器に採用した。

これらの経験を積む内、1943（S18）年12月23日にネ-0装着 キ-48 双発爆撃機が初飛行に成功した。操縦士は、ネ-0点火時に約15km/h機速が増したようだと語っていた。低速機でラムジェットの装備ではあるが、日本で最初の噴流推進実験飛行であった。

副流圧縮機付のネ-4は過敏と思われるほどの瞬時加速性を示し、その前途を楽しみながら地上運転実験を続けていた。

ところが、遡って1943（S18）年ごろから、軍用機用ピストンエンジンの質および生産量の低下が次第に重大問題化し、新しい試作開発よりも先ず現用第一戦機の増産並びに整備充実を求める声が次第に強くなり、また、海軍側が1944（S19）年3月頃から交渉していたドイツのジェットエンジンの資料入手が可能の見込みとなり、それまでの進捗が思わしくなかった国内各噴流推進エンジンの試作を中止する命令が出た。陸軍側の補助エンジンの試作中止命令を1944（S19）年7月に受けた時、ネ-0は飛行実験数回、ネ-3、ネ-4は地上運転継続中、ネ-1は部品半成、ネ-2は製図未着手であった。

図3、図4に、ネ-3、ネ-4の断面図を示すが、今日のターボジェットエンジンと全く同じ構想であり、何ら手本もなく、しかも多忙を極めた時期によくぞ考えられた、と感慨が非常に深い。

巖谷英一海軍技術中佐が持ち帰ったBMW-003を参考にした海軍航空技術廠製作のネ-20を装着した「橘花」が1945（S20）年8月7日に初飛行した。開発中止が無ければ1944（S19）年8～9月頃には、ネ-4による日本最初の純ターボジェット推進飛行を実現し得たろうと林は誠に痛恨であったと述懐されていた。

また、この大戦中、海軍と陸軍とが、連携が必ずしもうまく取れていない、と聞いていたが、海軍と陸軍とは仲が悪く、ネ-3、ネ-4のタービン、ネ-3、ネ-1の軸流圧縮機の製作を、川航の親会社川崎造船所の蒸気タービン部門に頼んだが、同所が海軍専管工場で、陸軍側試作品は受注できぬと海軍監督菅に拒否された。また、海軍側

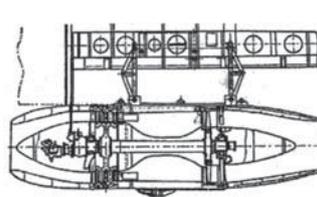


図3 ネ-3断面図

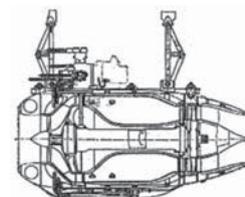


図4 ネ-4断面図

のジェットエンジンの開発状況を、陸軍側で勤務していた林は、戦後に初めて知ったとのことで、当時、陸、海軍間の協調があったならと誠に惜しまれると林は述懐していた。

戦後、林は、技術顧問として伊藤忠商事に2年余勤め、1965（S40）年4月に山梨大学工学部機械工学科教授、1970（S45）年4月に名城大学理工学部交通機械工学科教授を経て1999（H11）10月29日享年95歳にて死去した。

第二次世界大戦中のジェットエンジンの開発経緯を知ると、空調施設もなく食糧事情の悪い厳しい環境の中で、僅か3年足らずの短期間に、よくぞこれほどの膨大な研究開発を実行された、とつくづく痛感する。製品開発に携わる技術者は、陸軍側の林のみならず、海軍側の種子島、永野中佐ら先輩の不撓不屈の開発魂を鑑として、世界市場で誇るに足る製品をどしどし開発して、国家の繁栄に貢献する心構えを忘れてはならない。

筆者（大槻）が1955（S30）年に川崎航空機明石工場航機部設計課に入社した際の上司は永田大典課長であり、戦時中に林の部下でジェットエンジンの開発を担当された方で、「林さんは設計の神様で見習ってしっかり勉強せよ」と教えてもらった。二度ほどお会いして薫陶を受けたが、確かに極めて論理的で、技術的に筋を通される方で、技術資料は将来どんな利用価値があるか分からなくても、こまめに記録し集めて残しておくことと教えられた。怖い技術屋堅気の存在だった。姪の平尾由美子さんによると、戦前にドイツからピアノを買ってきて、日本家屋に洋館を建て増してピアノをひき、サボテンの収集と手入れを趣味とする一面ハイカラな文化人で、無口で怖い叔父さんだったそうである。

（文：大槻 幸雄*1、阪井 直人*1）

参考文献

林貞助、あるエンジン設計技術者の回想、日本機械学会誌、Vol. 86, No. 776(1983), pp. 80-85.

林貞助、旧陸軍試作の補助ジェットエンジンの全貌（その1）、日本ガスタービン学会誌、Vol. 4, No. 16(1977), pp. 22-30.

林貞助、旧陸軍試作の補助ジェットエンジンの全貌（その2）、日本ガスタービン学会誌、Vol. 5, No. 17(1977), pp. 25-33.

原稿受付 2017年10月15日

* 1 川崎重工(株)

〒673-8666 明石市川崎町1-1

E-mail: (大槻) yopferdstaarkeaachen_092506@ybb.ne.jp

(阪井) sakai_na@khi.co.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

棚澤 泰

TANASAWA Yasusi

1906 (M39) 年10月23日 - 1992 (H4) 年7月27日



棚澤泰は東京で生誕。第一高等学校理科甲類を卒業し、東京帝国大学工学部に入学。1929 (S4) 年同機械工学科を卒業と同時に東北帝国大学工学部機械工学科講師として仙台に赴任。抜山四郎研究室に所属し熱工学を担当。1936 (S11) 年工学博士を取得し、1941 (S16) 年航空学科教授。終戦後、連合軍司令部により航空学科は廃止。これを継承した工業力学科が設立され、さらに精密工学科と改称された中で教授を続け、熱工学・流体工学を担当。研究と後進の指導にあたった。1965 (S40) 年～1967 (S42) 年工学部長を経て、1970 (S45) 年退官。東北大学名誉教授。退官後、株式会社豊田中央研究所に移り、名誉所長 (代表取締役)、常勤監査役を歴任し、1985 (S60) 年退任。

日本初のジェットエンジン「ネ-20」へ関わるようになった経緯を次のように記している。

「忘れもしない昭和19年の夏。海軍航空技術廠^{しょう}から玉手統大尉が来学され、当時、開発中の燃焼ロケット「ネ-10」についての概略を述べ、同機用の燃料噴射弁と燃焼について研究協力を求められた。私は取るものも取りあえず、空技廠に赴き、同機の発明者であり、開発主任である種子島時休大佐に伴われて、始めて「ネの10」に会見した。」

仙台に戻った後、当時の棚澤研究室メンバーであった宮阪芳喜、梅原正彦、山田四男の各助手、小林清志大学院特別研究生 (後、静岡大学教授、豊田工業大学学長) らとともに、小型モデルを多数作って研究を進め、すでに経験のあった燃料噴射弁については最良のものを見出した。

「この結果を携えて空技廠を訪ねたところ、廠内は殺気立っていた。すなわち 昭和19年7月19日、駐独監査官であった巖谷英一中佐がBayerische Motoren Werke製のターボ・ジェット・エンジンの1枚の断面図を、すでに航空本部に手渡しておられたからである。(中略) 「ネ-10」の推力が小さいことを苦慮していた空技廠ではBMW-003エンジンの採用を考えておられ、私も和田操廠長に呼ばれ、一葉の小さい断面図の構成とその原理の調査を依頼された。とんぼ帰りで帰仙した私は、小形なモデルで燃焼実験をするため、燃料の粒径が細かく、諸特性が良く分かっている気流噴射弁や、気体燃料を使って、環状燃焼器の形状、流れの渦による保炎作用、旋回流の効果、燃焼限界や、燃焼室の形状と等圧および等容燃焼の関係を研究した。また原理については、熱工

ネルギーが圧力や速度と推力に変る理論を明らかにし、燃焼室の最適の形状を追求した。」

空技廠でのBMW-003の採用に関して、元横須賀海軍航空隊附であった角信郎は自身のホームページの中で、「昭和19年10月頃に、種子島大佐はネ-12Bの不良個所対策会議の席上で『ネ-12Bの設計と実験でかなりの経験を積みあげることが出来た。しかし、ネ-12Bエンジンは中途半端であり、この際過去のことは一切ご破算にして、BMW製のジェットエンジンの写真図面を参考に、出直す方が賢明である。』と主張された。皆もこれに賛成し、直ちに設計が開始され、急遽鋳造や鍛造がはじまり、発動機部機械工場は全力を上げて加工にかかった。僅か四ヶ月と少して、「ネ-20」と名づけられた第一号機が運転台に据えられたという。」と、記している。

このように、当初、日本の独自技術で開発が進められたジェットエンジンはBMW製エンジンの断面図を参考にすることになったため、「日本のジェットエンジンは模倣である」と記している文献を見た記憶がある。しかし、「一葉の小さな断面図 (キャビネ大と言われている)」を参考にしただけで、はたして航空機に搭載できるジェットエンジンの図面が描けるだろうか。さらに、4ヶ月という短期間で試作機をつくれるものであろうか。そこには相当多くの独自技術があったものと考えられる。この検証を棚澤や関係者から聞いた話をもとに書き加えたい。

最初に棚澤が見たジェットエンジン「ネ-10」の断面図を、図1に示す。棚澤は空技廠でこのエンジンの燃焼実験を見た時の様子を以下のように記している。

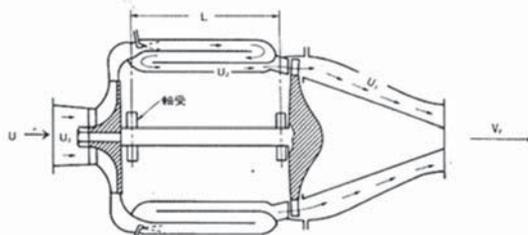


図1 「ネ-10」の断面図

「試運転中の同機に近づくにしがって、低温、青色、不完全燃焼を告げる臭気が鼻をついた。牧浦隆太郎大尉がアルデヒド量を検出するためSchi の溶液を用意し始めた。私も「ネ-10」の図面を見た瞬間、燃焼室の高さ

が低過ぎること、室内の流れに欠陥があること、に気がついた。燃料はガソリンであった。」

その後、空技廠では前述の角の記述にある「ネ-12B」へと改良がなされた。角のホームページには「独力で研究開発されたネ12B」と記して断面図が掲載されているが、棚澤が保管し、後に工業力学科時代の門下生である鈴木孝（後、日野自動車工業株式会社副社長）が引き継いだ図2に示す「TR30」と記された図面と酷似しており、この図面は「ネ-12B」の断面図であると考えられる。図中には棚澤のコメントが記されている。

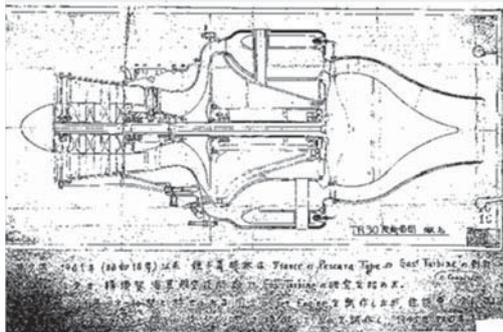


図2 棚澤が保管していた「ネ-12B」と思われる図面

この図を見ると、「ネ-10」に使われた遠心式空気圧縮機の前に軸流式圧縮機が付加され、また、燃焼器は高さの低い曲がりくねった形状から高さを確保したシンプルな形状になっている。軸流圧縮機的设计に関しては東北帝国大学の沼知福三郎が多くの知見をもっていたとのことなので、もう少し時間があれば、エンジンの直径を大きくせざるを得ない遠心圧縮機を取り除いて軸流圧縮機だけにし、その段数を増やして空気圧をあげる方向に進んだことは想像に難くない。そうなれば、BMW-003（「ネ-20」）とほぼ同様の形状になる。さらに言えば、当時、棚澤研究室でジェットエンジンの開発支援に携わった前出の小林清志は燃焼室について、「BMW-003の断面図を見た瞬間、苦心していた保炎器を示す線が描かれているのを見つけ、自信を深めた」と述べていた。BMW-003の断面図入手前に、燃焼室の細部まで独自の研究がなされていたものと考えられる。また、燃焼器の要である燃料噴射弁はBMW-003のキャピネ大断面図の中に描かれていたのかどうか、まして細部構造が描かれているはずはない。燃料噴射弁は棚澤らが独自に開発を行ったものと考えられる。「ネ-20」の燃料噴射弁には渦巻噴射弁が使われたが、これと同型のものが木箱に収められて東北大学の棚澤研究室で保管されていた（図3）。この木箱は棚澤が豊田中央研究所に移った際に持参し、その後、筆者が管理していた。棚澤が亡くなり、豊田中央研究所にあった棚澤の遺品を遺族の棚澤正澄が引き取りに来られた際、この木箱の管理は引き続き筆者に託された。しばらくは豊田中央研究所に置いていたが、「ネ-20」本体の傍に置いてもらうのが良いと考え、2000（H12）年に石川島播磨重工業株式会社に貸与した。現在は東京・



図3 「ネ-20」に使われた燃料噴射弁

昭島市の「IHIそらの未来館」に、本体とともに展示されている。

「ネ-20」は中島飛行機製作所で試作された機体に搭載され1945（S20）年8月7日に初飛行。12分間の飛行に成功した。しかし、続く4日後の公開飛行では離陸できなかった。この原因はエンジン不調ではなく、いくつかの要因が重なったためとされている。そして、8月15日、終戦。日本初のジェットエンジン開発は幕を閉じた。

本稿は棚澤が執筆した文献からの引用に依った。筆者が拝受したこの文献の抜刷りの最後に、以下の自筆の句が書かれている。

「散る花や戦時は遠くをにけり」 1945

脱稿した後の桜散る季節の中で、「極限状態」での開発の末12分間の飛行で終わった「ネ-20」や、戦禍に散った多くの命を思い浮かべていたものと推察される。

棚澤は東北大学や豊田中央研究所で、燃料噴射弁や燃焼器、さらに自動車エンジンの排気対策などの研究を続け、燃料噴射弁のみならず塗装、造粒などの基礎となる「液体微粒化研究」の礎を築いた。多くの後進が輩出され、国内では「日本液体微粒化学会」が組織されている。米国・欧州・アジアでも同様の組織が設立され、3年毎に「国際液体微粒化会議（ICLASS）」が開催されている。また、棚澤の業績を記念して、1982（S57）年に「TANASAWA Award」が創設された。この賞については文献を参照されたい。（文中敬称略）

（文：斎藤 昭則*1）

参考文献

棚澤泰，極限状態での「ネ-20」，日本ガスタービン学会誌，Vol. 10，No. 40（1983）pp. 1-4.

角信郎，特攻機『橘花』--日本で初めて翔んだジェット機--，<http://www.b-b.ne.jp/kaigun/kikka/kikka.html>

鈴木孝，棚澤泰先生と「ネ-20」，棚澤泰先生ご生誕100周年記念会，2006年12月2日，講演スライド。

Hiroyuki HIROYASU, Proc. ICLASS-2006, ICLASS06-KEYNOTE-010, (2006)

原稿受付 2017年11月2日

* 1 元 榊豊田中央研究所

E-mail: akita-saito@nifty.com

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

永野 治

NAGANO Osamu

1911 (M44) 年10月9日 - 1998 (H10) 年2月22日



はじめに

永野治氏は私の尊敬する技術者であり、会社の大先輩である。私がIHIに所属しているという理由で原稿を依頼されたが、氏とは一度も話したことはない。私が入社した時は、氏は本社に顧問として居られたと記憶している。氏は後進の育成に熱心で、私が入社する少し前まで勉強会をやっておられたと聞いていた。話をしたことも無く、とても自分の言葉で氏を語ることは出来ない。そこで、この企画者である吉田英生氏と相談し、関連著作を持つ前間孝則氏の許可を取った上で、前間氏著書「日本の名機をつくったサムライたち」(さくら舎, 2013)の永野治氏に関する記述のある第9章の要約を作成することで合意した。前間氏著書は、永野治氏を直接インタビューした内容に基づいている。永野氏はまとめ方について唯一、「単に昔はこうであったとかいうのではなく、今後に生きてくるような客観性のあるまとめ方であってほしいね。それと、戦前の日本が、迷惑をかけた周辺諸国(韓国や中国など)から見ての視点も考慮に入れておく必要があるのではないだろうか」と語ったとされる。それを受け、私も要約するにあたり、永野氏の人柄と業績には当然触れるが、氏の技術開発に対する哲学を重視することとした。原著とは異なり、時間軸で4期に分けた。

日本初のジェットエンジン「ネ20」が開発されるまで

永野は瀬戸内海に浮かぶ小さな下蒲刈島に末っ子として生まれた。父は裁判官だった。子供の頃から非合理的な事柄に対して疑問を持ち続け、それが氏の「科学的精神が、技術のもつ合理性が、これからの時代を切り拓いていくのだ」との信念を形づくることになった。「特に飛行機と言わず、元来私はモノを作ることが好きでした。役に立つものを作る、そして動かすのが最大の満足だった」という理由から東京帝大機械工学科しょうに入学した。

大学卒業後、海軍に入省し、空技廠発動機部に配属された。入省時の面接官は航空本部長の山本五十六少将だった。「三菱や中島飛行機などは海軍の統制下にあったので、それらのメーカーで開発・生産していたほとんどの(航空用)レシプロエンジンは僕が担当した。審査や技術的な指導・アドバイス、それにトラブル対策に従事していた」と永野は語る。中島飛行機を代表する傑作エンジンで知られ、零戦に搭載された「栄」や、三菱が

誇る「金星」なども担当し、永野は戦前の航空用レシプロエンジンの権威者となった。物事の理に沿ってはっきりとものを言い、それに反する場合には、正面から反論するのを常としていた。

日米開戦前後の頃ともなると、「欧州で航空用のジェットエンジン(ガスタービン)の試作に成功した」というニュースがちらほら飛び込んで来るようになった。ジェットエンジン情報に対する関心の急な高まりには理由があった。時代の趨勢として、航空機の高速度または大型化は必至の見通しである。ただし、それに必要な「レシプロエンジンの大馬力化」はプロペラ先端の周速がマッハ領域に近づいたことで起こる(プロペラの)振動現象しんどうなどから限界に近づきつつあることを日々の開発を通して予感していたからだ。

1944 (S19) 年に入ってまもなく、駐独武官の巖谷英一技術大佐がドイツから潜水艦と航空機を乗り継いで帰国した。大佐は、ドイツで開発・実用化されたジェット機メッサーシュミットMe262戦闘爆撃機と、ターボジェットエンジンBMW003Aの断面図を模写したキャビネ版の写真などを持ち帰った。これらの情報などを手掛かりにして、陸海軍は協同で何種類ものジェットエンジンや推進ロケットの試作、量産を空技廠と関連企業に命じた。

1944 (S19) 年8月末、永野は古巣の空技廠発動機部に戻り、種子島グループの主席部員に着任した。永野は部員らを集め、種子島を中心として向かうべき方向について大いに議論した。この頃、種子島グループは何種類ものエンジン開発を進めていたからだ。最終的には、BMW003Aを参考にしたジェットエンジンに集中することになった。これがネ20である。基本設計および詳細設計、部品図は、わずか1カ月余という信じられないほど短い時間で、1945 (S20) 年2月末に完成した。ただちに、部品が製作されて、3月11日には組立が完了して運転試験へとこぎつけた。通常であれば、少なくとも2年は要する作業がわずか2カ月ほどで完成したのだから、まさしく「火事場の馬鹿力」だった。圧縮機の性能がさっぱり出ず、設計をやり直したが、試作部品をつくり直す時間はない。永野は自らペンチを握って数多くある圧縮機のジュラルミン製の動翼のピッチ角をやや大きくしたりして調整した。運転をすると、性能はかなり改善したが、十分ではないため、今度は静翼側にも手を加え

た。またも永野は自らハンマーを握った。技術少佐が油にまみれて、自らペンチやハンマーを握って徹夜で改造する、そのような見慣れない荒っぽい仕事ぶりに、「職人たちが呆れ顔で見守っていた」と永野は語る。この他、軸受の焼付きや損傷、燃焼器のトラブル、タービン翼の焼損やクラックなどが発生したが、何とか全力運転をできるまでになったため耐久試験も行い、飛行試験に供試できる所まで辿り着いた。

トラブルが発生したとはいえ、なぜ、これほど早く完成し運転できたのか。その大きな理由の一つとして、開発リーダーの資質が挙げられる。それは、どんな工業製品の開発においても当てはまる場合が多い。永野は自身の開発姿勢についてこう述べている。「モノに則して、理にかなった自然の理法に則って物事を進めていく実験科学の方法を重視する」。

ネ20を2基搭載した中島飛行機製の特攻機「橘花」は地上での運転試験や滑走試験を経て、戦局も押し迫った8月7日、初飛行のときを迎えた。ベテランの高岡迪中佐が操縦する「橘花」は、ジェットエンジン特有の爆音を響かせながら、一直線に飛び立ち、見る間に大空へと浮かび上がった。日本航空史上、記念すべき瞬間であった。

敗戦後、石川島重工に入社するまで

敗戦後、GHQ（連合軍総司令部）の命令によって「航空禁止」の命令が下された。彼らは翼を奪われて、職を失う場合が多かった。永野も職が定まることがなかった。1944（S19）年には、幼い長男を失っていた。敗戦から間もなく妻も病（乾酪性肺結核）で失った。その痛手と傷心の中で、病気がちな幼い子供2人を抱え、勤めにも出られず、一時は一家心中を思い立つほど追いつめられていた。

1952（S27）年、永野は小松製作所に移り、石炭削岩機の開発に専念していた。そこに、かつて航空技術廠時代に永野の下でネ20の開発に従事していた牧浦隆太郎元海軍技術大佐が訪ねてきた。「石川島では将来、航空用ジェットエンジンの開発を念頭に置いているが、まずは船用のガス・タービンの研究から手掛けている。自分は今、石川島でガスタービンの開発を担当しているが、社長の土光さんも、ぜひあなたに石川島（現IHI）に来て欲しいといっているのだが、どうですか」。

この時のことを振り返って永野は語った。「土光さんに会うチャンスができて、ガスタービンのディスカッションをいろいろとやっているうちに、何となしに石川島に行くことになっちゃった」。一度捨てたはずのジェットエンジンに対する夢を「土光さんなら汲み取ってくれるかもしれない」と思ったという。

国際共同開発の開始まで

1953（S28）年7月、新三菱重工業、石川島重工業、富士重工業、富士精密の4社、が共同出資する日本ジェットエンジン株式会社（NJE）が設立。少し遅れて川崎航

空機も加わった。この前年4月に、対日平和条約が発効して「航空解禁」となり、NJEは、推力1.2トン級のジェットエンジンJ3を開発することになった。これは防衛庁が開発を計画していた戦後初の初等（中間）ジェット練習機T1向けのエンジンだった。永野はネ20の経験と実績からNJEの研究部長に就任した。しかし、開発が進められたJ3は、NJEの期待と奮闘も空しく、ネ20に勝るとも劣らないほどトラブルが続出。やっと1959（S34）年になってほぼ完成にこぎつけたが、完成スケジュールが遅れたため、予定していた台数の内のかなりの数が外国製エンジンに取って代わられた。

この結果、三菱、川崎、富士重、富士精密の4社がジェットエンジン事業から手を引くことになった。この時、土光は覚悟してジェットエンジンの生産を引き受ける決断をした。この経営的決断が、その後の日本のジェットエンジン生産のシェアを決定づけた。現在、IHIが日本のジェットエンジン生産の七割弱を占める。J3の例は、航空機（エンジン）事業を巡る、経営判断の難しさを教えている。

1964（S39）年末、永野は副社長に就任。航空エンジン事業部を離れて、本社に移った。それは喜ぶべきことだったが、現場重視の信念を持つ永野にすれば複雑な思いも感じていた。「技術屋は本質的には自然を見なくちゃ駄目なんだ。新しい技術は常に現場から出るものなんだ。紙やコンピュータから出てくるものではない。ただ、現代は全体の技術水準が高くなっているんで、個人的な実験と知恵だけでなく、かなり体系的に大勢の知恵を統合しなければ、役に立たなくなっている」。ネ20をつくり上げた戦前・戦中の世代の技術者たちが第一線で活躍する時代が終わりを告げ、新たな時代に入ろうとしていた。

1971（S46）年にスタートしたFJR710は、世界の主流となりつつある低燃費、低騒音のファンジェットエンジンである。通産省工業技術院の「大型プロジェクト制度」に基づき、日本が初めて取り組む民間機用のジェットエンジン（推力5トン）開発だった。FJR710の開発では、日本に高空性能試験の運転設備がないため、英国立ガスタービン研究所（NGTE）に委託した。この研究所は実質的には国策会社でもあるロールス・ロイス（RR）の運転試験場でもあった。当然、各種データはNGTEやRRにも筒抜けとなる。それがかえって幸いした。世界3大航空エンジンメーカーの一つであるRRが、FJR710の性能の良さに着目したのである。ある日、RRの元経営者で会長付き顧問のスタンレー・フッカーから永野のもとに呼びかけがあった。彼と永野は旧知の間柄であった。「ロールス・ロイスと日本との共同で、民間機用のターボファンエンジンを開発しないか」。

当時、日本（IHI）の技術水準やその規模からしても、GEやP&Wと並ぶ世界3大メーカーの一つであるRRと国際共同開発など、望むべくもないと思われていただけに、永野（日本）にとっては青天のへきれきだった。その発端について永野はうれしそうに語った。「FJR710の

図面をどこから入手して、細かく調べたらしい。その結果、日本のFJRが一人前のエンジンであることを確認した。それで、ロールス・ロイスの相棒に日本をと、僕のところに言ってきたんだよ」。

一見、唐突とも思えるこの呼びかけだが、それには以前からの個人的なつながりもあった。そのことについて、永野の次男、進氏が語ってくれた。「戦前（戦中）のほぼ同時期に、ジェットエンジンを開発して実際に飛ばしたと言われているのは、英国のフランク・ホイットル、ドイツのハンス・フォン・オハイン、そして彼ら2人ほどじゃないが、父の3人ということになっていて（彼らは）戦後も生き延びた。この3人は以前から親交があって、『リアクショナルーズ』（噴出する燃焼ガスの反動で飛ばすジェットエンジンの「反動」力の意味）という会をつくっていて、いつか3人で何かをやろうじゃないかと話をしていたらしい」。フッカーはフランク・ホイットルと親しかったことから、この会の世話役を買って出ていたらしい。

ただし、日本にとってはまったく未経験で初となるジェットエンジンの国際共同開発であり、詰めなければならぬ課題は山ほどあった。ジェットエンジンの世界でRRは、米GE社、米P&Wに並ぶ世界3強の一つであったが、数年前に一度倒産していたため、凋落の時期にあったことは言うまでもない。倒産により資金繰りが厳しいRRは、経済大国化してきた日本を抱き込んで新エンジンを開発することで、引き離された2強のGEとP&Wと再び一肩を並べたい。日英開発で巻き返しを図ろうとしたのだった。

IHIとしても、リスクがかなり高く巨額の資金も必要となるジェットエンジンの開発プロジェクトだけに、一社だけでは負担しきれない。国の支援が不可欠である。ところが、政府としては補助金制度の性格からして、一民間企業のIHI一社だけに資金援助をすることは出来ない。このため、エンジン生産を手掛ける川崎重工業、三菱重工業も含めた国内3社を支援する形を取ることになった。

その後、GEからも類似の国際共同開発提案があった。それはCFM56の改造だった。永野の基本認識は「たとえリスクが大きくて困難でも、最優先すべきことは、自分たちのジェットエンジン開発の技術を引き上げること」にあった。そうすると、やはりRRとの共同開発の方がメリットは大きいと永野は判断した。

この後、市場の変化で計画は変更され、150席クラスのエンジンを開発することになった。開発資金は膨らみ、資金的また技術的にも3強級の会社を引き込む必要が出てきた。結果としてP&Wが参画することとなり、規模を大きくして日、英、米（P&W社）、独、伊の5カ国による国際共同開発の体制へと発展し、エンジンはV2500と命名された。

V2500の開発では、日本が主に低压ファンを担当したが、RRが担当する圧縮機のトラブルが長引き、先行きが案じられる局面もあった。それを乗り越え、1988

（S63）年9月、ロンドン郊外のファンボロー空軍基地で開催された航空ショーで、V2500を搭載したエアバス製A320が初飛行した。その後、事業は大成功を収めた。V2500は日本のジェットエンジン工業を一気に国際舞台に押し上げたのである。

第一線を退いてから

66歳になっていた永野は副社長を退いて相談役になると、待ち望んでいたかのように自身の現場である航空宇宙事業本部で、若手の技術者たちを集めての勉強会をつくった。「ジェットエンジンでは、優秀なテクノロジー集団をいかにつくり出すかが、もっとも重要なんだ。僕はテクノロジーに力を入れる。ほかのことは欲の深い人がやればいい」。永野は日本機械学会会長も務めたことがあり、学会誌には何度か寄稿している。その中で、永野は技術者に対して「技術者の自覚」とか「技術開発精神について」といったタイトルで厳しい言葉を記している。ネ20の開発やJ3などの技術開発を通して学んだ知見であろう。

永野は「事実そのものを自分の目で世界を直視し、自然の理法にのっとって物事を進めていく」あるいは「情緒的な見方や行動様式を排して、システムティックな思考で」といった姿勢を強調する。これに加えて、次のようにも語っている。「本来、自由な発想のもとに生まれてくる、もろもろの技術が、やがて職業の世界に組み込まれると、支配と競争の中に埋没する技術者の識見は、素朴な人間性はから遠ざかっていくように早える。（中略）技術者は技術自体のもつ論理性だけでなく、文明の担い手としての正負の効果についての識見をもたなければならない」。巨大化した科学技術下における組織内で、技術者が専門性に思没し、狭い自分の般に閉じこもることへの危険性を警世的に指摘する。

その永野が自らの専門としてきたジェットエンジン工業の将来に向けて発言した言葉を最後に紹介しておこう。「ジェットエンジンを、航空機を今後つくり上げていけば、もう19世紀的な富国強兵、競争と獲得のセンスではダメなんだ。そんな地平を超えて、人類史を切り拓く参加と協調の時代でなくちゃなんのだよ。そして、21世紀は最適化と集積の時代だと予想する。航空機そのものがそう教えているんだよ」。

むすび

以上で永野治氏に関する前問氏著者の要約を終える。永野治氏は1998年に永眠した。私はこの偉大な先輩のご冥福を祈るべく葬儀の末端に参列させていただいた。少しでもその存在に近づきたいと祈念しながら。

（文：今成 邦之*1）

原稿受付 2017年12月22日

* 1 (株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター
〒196-8686 昭島市拝島町3975-18
E-mail: kuniyuki_imanari@ihi.co.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

山内 正男

YAMANOUCHI Masao

1912 (T1) 年11月5日 - 2010 (H22) 年11月4日



山内正男は東京市麻布（現東京都港区）の生れ。1938 (S13) 年3月に東京帝国大学航空学科を卒業，同年4月に通信省航空局に入り，中央航空研究機関設立準備部を経て，1940 (S15) 年に同省中央航空研究所研究官に任命された。空気力学を専攻し，高速風洞用軸流送風機の空力設計や高速空気力学の研究に従事した。

1945 (S20) 年終戦により航空研究が禁止され中央航空研究所が廃止となったため，同年12月より運輸省鉄道技術研究所に移籍し，その2年後には中田金市，須之部量寛らといわゆる1号ガスタービンの研究を始めた。この辺の事情を山内は次のように述べている。

「私がガスタービンの研究をするようになったきっかけは第2次大戦における敗戦である。それまで私は空気力学を専攻し，高速空気力学の研究に専念して，どうやって音速の壁を突破するかに腐心していた。ところが敗戦と共に航空に関しては研究を含めて一切が禁止され，私が勤めていた中央航空研究所は廃止され，土地建物と共に一部の職員は鉄道技術研究所に引き取られた。私もその中の一人となったが，研究所は米軍に接收され，総ての研究設備は封印されてしまう始末で，半年位の間は全くのお手上げ状態であった。この間，流体力学の知識を利用して，今後どのような方向に向かって研究を進めようかと四苦八苦していたが，たまたま研究所の残党の一人である須之部量寛君から，ガスタービンの研究に一口乗らないかという誘いを受けた。これ迄エンジンのことは殆んど知らなかったが，話を聞いてみるとガスタービンには軸流圧縮機をはじめとして流体力学屋が頭を突込むべき部分が極めて多い事を知り，今迄の迷いは一気に解消して，ガスタービンの研究に仲間入りすることを決心した。そして1号ガスタービンを完成する片棒をかついだ。これについては本誌の前号に中田金市氏が書かれた通りである。」

この1号ガスタービンは，戦時中高速魚雷艇用のエンジンとして石川島芝浦タービン(株)が製作し，終戦時に土中に埋められていたものを掘り出し，これを研究用の実機とするため全面的に修理して運転試験を始めたもので，目標出力1620 kW，圧力比3，ガス温度650℃，20段軸流圧縮機，4段タービン，熱効率14%という高い目標で始められた。そして耐熱材料，燃料，燃焼問題などの制約を受けながらも，1000 kWの電力を工場電力として供給する実績を上げた。これに刺激されて全国的にガスタービンの研究開発が始まり，戦後のわが国ガスタービン技術の発展の第一歩となった。

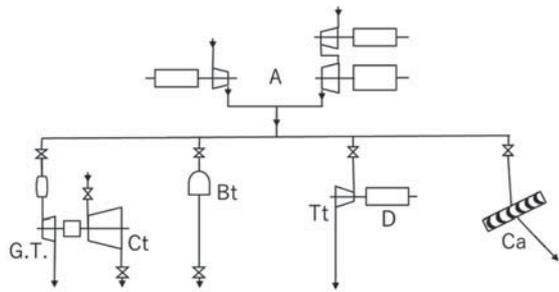
この研究で山内は軸流圧縮機の空力設計を担当することになり，多段軸流圧縮機の性能計算に取り組んだ。1949 (S24) 年11月に開催された第1回ガスタービンに関する座談会で，山内は多段軸流圧縮機の設計に翼列理論を適用する上での課題やタービン翼への適用について研究の方向性を述べている。1号ガスタービン研究の経緯やエピソードはいろいろ報告されているが，研究環境について山内は次のように回想している。

「1号ガスタービンの実験に取り組んでいた頃は終戦後の混乱期でもあり，物資も乏しく，研究環境としては最悪の状態にあった。実験場としては石川島芝浦タービンの工場の片隅を使わせてもらい，研究室は同工場の物置の2階を借り受け，部長以下全員が机を並べて研究を進めていた。人の出入りも多く，今から考えると，あのような雑踏の中とでもいうような環境の中で，よくも色々な構想を練ったり，理論計算や実験データの解析が出来たものと思う。然し，むしろこの頃が一番研究意欲も盛んであり成果も挙がっていたように思う。」，「それにつけても研究は環境に支配されるよりも研究意欲に支えられる事の方が遥かに大きいものだとつくづく思う。」

1950 (S25) 年4月からは新設の運輸技術研究所原動機部所属となり，1952 (S27) 年11月同所原動機部長に就任した。この間，軸流圧縮機の性能や内部流れ等に関する研究論文を発表，1953 (S28) 年12月には工学博士の学位を東京大学より授与されている。

1952 (S27) 年の航空再開後は，航空機の研究開発方策を策定するための海外研究施設調査団に参加し，10年後に世界のレベルに追いつくために所有すべき施設設備を選定して航空研究機関の設立に貢献した。1955 (S30) 年10月には総理府に出向，新設の航空技術研究所の原動機部長に就任，原動機関係の第1期研究計画として推力5トン程度のジェットエンジンを開発するために必要なエンジン要素試験設備の整備を目標に定めた。具体的には大量の高圧空気の供給源すなわち空気源設備によって作り出された高圧空気を作動流体として圧縮機，燃焼器，タービン等の試験を行う研究設備を立案した(図1)。

そして1956 (S31) 年からの6ヶ年計画で，3,700 kW空気源設備(圧力比3，流量25 kg/s)，4,600 kW圧縮機試験設備(ガスタービン駆動，高圧状態模擬閉回路試験可能)，3,700 kWタービン試験設備(水冷渦電流式動力計)，円環型燃焼器試験設備等を整備した。これらは当時民間で開発途上であったJ3ターボジェットエンジン用軸流圧縮機の高圧性能の向上や高空着火性能の向上に



A 空気源, G.T. 供試圧縮機駆動用ガスタービン
Ct 供試圧縮機 (高空状態模擬閉回路試験可能)
Bt 供試燃焼器, Tt 供試タービン, D 動力計
Ca 翼列試験設備

図1 ジェットエンジン要素試験設備系統図

貢献した。また船用ガスタービンの軸流圧縮機に発生した旋回失速の試験を行い大きな成果を上げた。

1957 (S32) 年3月からは空気力学部長を併任し、遷音速風洞の建設を推進した。この風洞は、測定部断面積 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、風速マッハ数1.4で、22.5 MWの大型送風機と12 MWの抽気用圧縮機を使用するもので、これはわが国での記録品であり、山内らは多くの困難を解決しながら1960 (S35) 年に完成、所期の性能を得ることができた。以降今日まで機体設計に多用されている。

1961 (S36) 年6月からは原動機部長専任となり、翌年度からの第2期計画では、10.5 MWの空気源設備 (圧力比5.2, 流量50 kg/s) を用いた15 MWの大型圧縮機試験設備 (ガスタービン駆動) を整備しフロントファンの研究に備えるとともに、エンジン要素研究のみならず軽量化を追求したエンジンの製作と運転に伴う諸問題の研究のため実機エンジンの試作研究を行うこととした。そして1963 (S38) 年から後輩の松木正勝、鳥崎忠雄らと共に垂直離着陸機 (VTOL) の揚力発生用超軽量ジェットエンジンJR100 (推力1.5トン, 推力重量比10) の研究試作を推進した。これには東京大学の八田桂三、岡崎卓郎、田中英穂、高田浩之ら教授陣、石川島播磨重工業の永野治、今井兼一郎を始めとする技術陣、また金属材料技術研究所の研究者の絶大な協力を得た。このエンジンはVTOL実験機 (FTB) に搭載され1970 (S45) 年12月に自由飛行に成功した。

1968 (S43) 年11月には航空宇宙技術研究所 (現JAXA) 所長に就任し、1976 (S51) 年7月に退職するまで所長として航空宇宙技術の研究開発を推進した。エンジン関係では1971 (S46) 年から始まった通商産業省工業技術院の大型プロジェクト制度による航空機用ジェットエンジンの研究開発に全面的に協力し、民間企業 (石川島播磨重工業、川崎重工業、三菱重工業) とともに高バイパスターボファンエンジンFJR710 (推力5トン, タービン入口温度1250) の完成に貢献した。それまでの先行研究の成果を活用するとともに、同エンジンの全ての要素試験 (フロントファン, 高圧圧縮機, 高圧環状燃焼器, 高温・高圧タービン, 低圧タービン) を同所のエンジン要素試験設備を利用して実施した。このエンジンは同所のSTOL実験機「飛鳥」に搭載され1985 (S60) 年10月に初飛行し、その後2年間にわたる飛行実験に用

いられた。一方で、この研究開発の成功がその後の民間エンジンV2500の国際共同開発につながった。

山内は退官後も、新技術開発事業団監事、宇宙開発委員、宇宙開発事業団理事長等を歴任し、わが国の航空および宇宙技術の発展に尽くした。また、日本航空宇宙学会会長 (1969年)、日本ガスタービン学会会長 (1979年) として学界の発展に貢献した。

このように山内は戦後の空白期から航空再開・発展期を通じて国立研究機関の立場から航空機および航空用ガスタービンエンジンの研究を先導し技術の発展を支えた先駆者であった。所長時代の山内は新入研究員に対して、国立研究所は一定の方針の下に研究を行っている所であることを自覚するよう訓示するのが常であった。温厚な人柄で職員に親しまれ、休日にはバラ作りや溪流釣りを楽しんだ。1984 (S59) 年度の航空宇宙技術研究所年報 (30年特集) へ山内は次のように寄稿している。

「世間一般には、研究所が床の間の飾り物扱いにされていた時代もあったし、また、近視眼的な見方から、研究所は道楽をやっているといった批判を受ける事もあったと思う。30年経って研究所が歩いて来た道を振り返ってみると、全体としては、床の間の飾り物でもなく、道楽をやった来たのでもない事が次々と実証されている。技術革新が叫ばれ、自主技術の確立こそが今後日本の活きる道だという認識が高まっている昨今でもあり、研究所の全員がその責任を果すべく一層の努力を続けられることを期待している。」

(文: 佐々木 誠^{*1})

参考文献

- 山内正男, ガスタービンの動きとともに, 日本ガスタービン会議会報, Vol. 1, No. 3 (1973), pp. 3-6.
- 中田金市, 1号ガスタービンの生れるまで, 日本ガスタービン会議会報, Vol. 1, No. 2 (1973), pp. 1-2.
- 松木正勝, 山内正男氏を偲んで, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 39, No. 1 (2011).
- 日本機械学会, 第1回ガスタービンに関する座談会記録, (1949), pp. 151-174.
- 中田金市, 1号ガスタービンの思い出, 日本ガスタービン会議会報, Vol. 3, No. 11 (1975), pp. 1-2.
- 山内正男, 私の歩んだ道 - 軸流機械の思い出の数々 -, ターボ機械, Vol. 9, No. 9 (1981) pp. 7-9.
- 渡辺秀行編, 1号ガスタービンの思い出集, J. G. コーポレーション, (1989).
- 山内正男, 航空技術研究所の原動機研究設備について, 航空学会誌, Vol. 7, No. 63 (1959), pp. 112-117.
- 航空宇宙技術研究所, 航空宇宙技術研究所20年史, (1975).
- 航空宇宙技術研究所航空推進研究センター, 航空エンジン研究50年の歩み, (2003).
- 航空宇宙技術研究所年報 - 30年特集 -, (1985), pp. 175-176.

原稿受付 2017年11月29日

* 1 元航空宇宙技術研究所
E-mail: sasakima@aol.com

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

岡村 健二

OKAMURA Kenji

1912 (T1) 年12月8日 - 1989 (H1) 年1月15日



新潟県長岡市にて出生。1934 (S9) 年、東京帝国大学工学部機械工学科を卒業後、三菱航空機(株) (同年に三菱重工業へ社名改称) へ入社、ディーゼル部門へ配属。

最初に担当した小型4気筒エンジンでは、新型の燃料噴射ポンプを発明し燃焼性を大幅に改善させた。この発明により、後に自動車技術協会表彰、技術院賞、帝国発明協会表彰、都知事表彰および紫綬褒章の各賞を授けられている。

1940 (S15) 年には同社東京機器製作所において海軍魚雷艇用ディーゼル機関の開発を担当し、当時類例のないZC707型ディーゼル機関を完成させた。このZC707は2サイクルユニフローV型20気筒ディーゼル機関で、出力は2,000ps/1,600rpm、ユニットインジェクタ直接噴射式およびルーツブロア過給方式を採用している。終戦後にアメリカ軍がこのエンジンを接收し調査、試験した結果、「当時のアメリカの技術を遥かに凌駕したものであり、この技術は広くアメリカの工業に取り入れ活用すべきものである」と高く評価された。ZC707を原型として開発された一連のZC型エンジンは別名「岡村エンジン」とも呼ばれ、1954 (S29) 年に運輸大臣表彰、1955 (S30) 年に発明協会賞を受賞している。

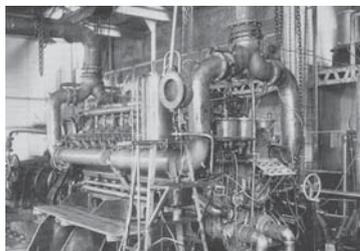


図1 岡村設計のZC707型ディーゼル機関

1958 (S33) 年、戦後の財閥解体により三菱重工業から分割されていた三菱日本重工業は、海上自衛隊の魚雷艇用エンジンとしてWZ型ディーゼル機関の開発に着手した。岡村はすでに同社東京自動車製作所発動機技術部長の要職にあったが、前例のないW型シリンダ配置としたWZ型の開発に寄せる熱意は強く、新型機関の設計に必要な重要特許を次々と出願した。このWZ型エンジンは軽量高出力機関としてまとめたことが高く評価され、1962 (S37) 年毎日工業技術賞、1963 (S38) 年日本機械学会製品賞を受賞した。

1959 (S34) 年6月、分割されていた三菱造船、三菱重工業、三菱日本重工の3社が合併し三菱重工が発足、岡村は初代の技術本部技術管理部長となる。三重工の合併後、技術部門の統合や調整の問題が山積するなか、社の技術開発、技術研究の基本体制を打ち立てたほか、人材育成にも心を砕き、同社の技術基礎を確立させた。

技術開発への貢献と同様に社会的功績も大きく、特にCIMAC (国際燃焼機関会議) の日本代表としての活躍

は顕著であった。自ら開発したディーゼル機関に関する複数の論文発表に留まらず、常任理事および1971 (S46) 年からは副会長の重責を果たした。このような功績を讃えて1987 (S62) 年に名誉あるCIMACゴールドメダルが贈られた。国内では1971 (S46) 年に日本機械学会副会長、1973 (S48) 年より日本内燃機関連合会会長などの重責を務めた。

国の内外で交流の広がった岡村であるが、その中の一人にASMEガスタービン部会の創立者である R. トムソーヤがいた。ソーヤの申し入れにより、ASMEガスタービン部会と日本機械学会の共催で東京国際ガスタービン会議が開催されることとなったが、準備を開始するにあたり岡村は関係者の合意取り付け、運営の構想作り、ASMEとの分担取り決めなどの難題を俊敏な行動力でこなし、開催準備へのスタートを切ったことは大きな功績であった。第1回国際ガスタービン会議は1971 (S46) 年に科学技術館で開催され、岡村はここでも会議のオーガナイズ、海外要人との折衝、パネルディスカッションの司会者などとして大活躍した。

第1回国際ガスタービン会議が成功裏に終了したのを機会に、わが国のガスタービン技術者、研究者の間にガスタービンに関する技術的情報を交換できる場をもうけるべきという声が高まり、会議余剰金を基金として「日本ガスタービン会議」が誕生し、1973 (S48) 年に岡村は第2代会長となる。この時任意団体であった「日本ガスタービン会議」を確固としたガスタービン技術の団体にするためには法人格にする必要があり、会員の増員、財政基盤の確立等が求められた。岡村は会長在任中これらの問題解決に腐心したが、その後の関係者の努力もあり、日本ガスタービン会議は1976 (S51) 年に社団法人「日本ガスタービン学会」となった。翌1977 (S52) 年には日本ガスタービン学会主催の下、第2回国際ガスタービン会議東京大会が開催された。

このように、岡村はディーゼル機関研究への貢献と共に、日本の若手技術者が日本のみならず世界で活躍することを願い、国際会議などでの活躍を通して日本ガスタービン学会の今日に至る発展の大きな礎を築いた。

(文：原 浩之*1)

参考文献

- 岡村健二氏追悼記念集出版会、岡村健二追悼集、(1989)、岡村健二氏追悼記念集出版会。
沼田明、コラム「情熱と執念の賜物」、JSAEエンジンレビュー、Vol. 3, No. 4 (2013), pp. 1-2。
日本内燃機関連合会、記事「当連合会 前会長岡村健二氏の急逝を悼む」、日内連情報、No. 47 (1989), pp. 1-5。

原稿受付 2017年10月31日

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)

〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

井口 泉

IGUCHI Izumi

1913 (T2) 9月1日 - 2004 (H16) 10月20日



井口 泉は広島県に生まれ、独逸学協会中学校、成城高等学校を経て東京高等工業学校（通称 蔵前：現 東京工業大学）に進み、1936 (S11) 年3月卒業、石川島芝浦タービン株式会社に入社した。石川島芝浦タービンでは、設計技術者として蒸気タービン設計に携わるが、入社後3年目の1939 (S14) 年2月に姉妹会社石川島航空工業に出向し、排気タービン過給機の開発に従事することになった。この開発は排気タービン過給機を圧縮機とし燃焼器、タービンを配置して軸出力あるいはジェット推進力を取り出すものであったが、これが井口のガスタービン人生の始まりとなった。このとき先行するドイツではユンカースがターボジェットの開発を決断し、ジェットエンジン開発の流れが本格化した時期であった。

一方欧州ではドイツのポーランド侵攻と英仏の対独宣戦布告（1939.9）により第2次大戦が始まる。アジアでも我が国がノモンハン事件（1939.5）、北部仏印進駐と対米戦争への道を進み始めていた。そのような中約2年をかけ排気タービン過給機は1941 (S16) 年2月に完成。回転数も設計通りの18,000rpmを達成し、初期の目的を達した。

この完成を受けて陸軍燃料^{しょう}廠が石油クラッキング装置に使用する甲7号ガスタービンの開発を計画、井口はここで我が国初の軸流圧縮機開発を担当した。この甲7号は1942 (S17) 年に実用運転に入ったとある。またその後、ネ201、ネ101の開発 や仮称1号、ネ130などの開発 に従事するが、戦況悪化の中、ネ101は1944 (S19) 年6月に開発中止。ネ201は1943 (S18) 年2月圧縮機事故で中断後、1945 (S20) 年4月に再開されたものの空白期間が長く十分な成果を見ることなく敗戦を迎えている。その中であって仮称1号（魚雷艇用エンジン）とネ130（BMW003Aを下敷きにした推力900kgエンジン）は敗戦まで開発が継続された。中でも仮称1号は1949 (S24) 年鉄道技研に引き継がれ、国産第1号ガスタービン として蘇った。

後年防衛大学校理工学研究科の学生達を前に、井口は戦況芳しからぬ中追浜の空技廠種子島大佐の下に足繁く通ったことや敗戦時に開発中のエンジンを地下に埋めたことなどの思い出を折に触れ語った（因みに種子島時休大佐は防衛大学校に教授として1959～1970 (S34-45) 年の間勤務）。

敗戦後は石川島芝浦タービンにあって1948 (S24) 年

4月設計部課長になり、戦後の復興が進む中、日本機械学会誌、同論文集、東芝レビューなどにガスタービン、送風機などの論文を発表している。GHQの研究禁止が解かれた1955 (S30) 年以降はガスタービンの仕事が増加し、1958 (S33) 年にスイスのブラウンボベリ社へのガスタービン調査を皮切りに、毎年海外調査と国際学会に出かけた。1961 (S36) 年、石川島芝浦タービン株式会社は東京芝浦電気株式会社と合併。その3年後、設計部長、タービン技師長となる。1970 (S45) 年7月には理事、翌1971 (S46) 年1月東京芝浦電気株式会社を退社、東芝エンジニアリング株式会社を経て、1972 (S47) 年5月、防衛大学校機械工学教室に新たに開設された理工学研究科原動機系列担当教授として着任した。

防衛大学校理工学研究科は修士課程相当の教育機関で、学生は大学卒業数年を経た若手幹部自衛官である。原動機系列は主としてガスタービンを中心とした原動機の教育と研究指導を行ったが、井口が育てた第1期卒業生（海上自衛官）は折から始まったガスタービン艦導入において、エンジンの選定（ロールスロイス）と第1号ガスタービン艦（はつゆき）の艦装と機関長を務めた。彼に続く卒業生も機関技術職務につき、引き続き建造されたガスタービン艦の機関技術の中核として働いた。

井口 泉の防衛大学校勤務は7年間と長くはなかったが、その間機械工学教室主任（2年）、機械工学実習工場長（3年）など学務運営も担い、温厚・誠実な人柄により教職員・学生から信頼され、慕われた。また多忙な職務の中、日本ガスタービン学会の創立や学会役員、ISO対策委員として学会及び工業会発展に尽力した。

防衛大学校退官後は福井工業大学に移り、人材の育成、日本ガスタービン学会会長はじめ各種学会役員を務め我が国ガスタービン発展のために尽くされた。

（文：鶴野 省三*1）

参考文献

八田佳三、日本航空宇宙学会誌、第40巻、第459号（1992.4）、pp. 188-191.

鶴野省三、防衛大学校理工学研究報告、第17巻、第3・4号（1979.12）、pp. 133-135.

原稿受付 2017年11月14日

* 1 防衛大学校名誉教授
E-mail: s_tsuruno@ybb.ne.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

入江 正彦

IRIE Masahiko

1915 (T4) 年10月30日 - 2003 (H15) 年12月24日



入江正彦は岡山県岡山市出身。第6高等学校に進んだ入江は、ここでドイツ語を徹底して学ぶこととなり、その後の人生においてドイツ語の読み書きはもとより、話すことにも長じていた。1939 (S14) 年3月に東京帝国大学工学部機械工学科を卒業後、同年4月に三井造船株式会社 (当時の社名(株)玉造船所) に入社した。

1955 (S30) 年頃、入江は玉野造船所造機設計部に所属し、船用主機であるディーゼル機関の周辺にある広範多岐に渡る補機類の設計を統括する立場にあった。このことは、三井造船技報に入江が投稿したディーゼル機関の主潤滑油ポンプである豎型ネジポンプや、ディーゼル機関の燃費向上のために独自に開発したターボ過給機の報文からも伺える。この頃には、船用主機としてはディーゼル機関が燃費効率の高さでボイラ・蒸気タービンを凌駕し、不動の地位を確立するに至っていた。

入江とガスタービンとの出会いは、当時の造機部部長であった山下勇 (後の1970 (S45) 年に社長就任) の影響が大きい。山下勇は、三井造船においていち早くガスタービンに関心を持ち、船用ガスタービンの将来の可能性について研究をする必要性があると感じていた。当時、既に慶応義塾大学の栖原教授にガスタービンの指導を依頼し、自社技術によるガスタービンの開発を目指していた。この流れで、三井造船では2つのガスタービンの開発が進められた。1つは研究部の初代部長であった小泉磐夫が自社技術を用いて開発を主導した1500kWオープンサイクル2軸再生再熱型船用ガスタービンであり、もう1つはスイスのエッシャーウイス社 (EW社) から技術導入した1万馬力クローズドサイクル船用ガスタービンの開発である。このEW社との技術提携の交渉に当たったのが入江であり、1953 (S28) 年1月にEW社と技術締結を行い、船用クローズドサイクルガスタービンの製作販売に関するライセンスを取得するに至った。入江はドイツ語のみならず英語も堪能であり、EW社との交渉においては英語を駆使して当たったとのことであるが、交渉においては相手を怒らせず、契約締結に影響しないように配慮しながらも自社に不利なことに対しては「No」をはっきり言える人物であったとの証言がある。

ここで、読者の誤解を招かないために、小泉磐夫について簡単に補足しておく。小泉磐夫は入江より4歳年長であり、1935 (S10) 年3月に東京帝国大学工学部機械工学科を卒業後、同年4月に三井造船の前身であった三

井物産(株)造船部に入社、その後造機部において入江と共に仕事を行った時期がある。小泉磐夫は1952 (S27) 年から玉野に創設された研究部に異動し、研究部部長としてオープンサイクル船用ガスタービンの開発を推進したことは前述の通りである。設計部の入江と研究部の小泉磐夫の両名が、三井造船のガスタービン開発の先駆的な役割を果たしたと言える。小泉磐夫は、その後の1962 (S37) 年に三井造船を退職し、東京大学工学部教授の道を進むことになった。

入江が主導した三井エッシャーウイス型1万馬力クローズドサイクル船用ガスタービンの開発は、当時の防衛庁技術研究所の委託により行われたものであり、1961 (S36) 年4月に工場運転が開始された。クローズドサイクルの特長として、定格負荷のみならず部分負荷においても熱効率が高く、燃料として低質燃料も使用可能、更にはサイクル空気圧力の調整によって護衛艦等の急速発進も容易に行えるなどが挙げられる。本ガスタービンを船用主機として実用化するための一番大きなハードルは空気加熱器の小型化であった。そのため、入江は1,000馬力相当の空気加熱器を試作して種々の試験を行い、その特性を明らかにするとともに設計に必要なデータ取も完了させた。さらに、クローズドサイクルガスタービン全体の制御技術も確立させた。なお、本機は残念ながら実艦搭載の機会を得ることはなかった。

当時の試運転におけるエピソードとして、開発を担当した誰もがガスタービンの起動、運転のみに気が取られており、停止方法を誰も検討していなかった。よって、首尾よく運転できたのは良いが、誰も停止方法が分からず困り果て、最後は非常停止でガスタービンを停止したという、実に笑い話のようなことがあったそうである。以降は、空気加熱器の開発を担当した真鍋善暢等の主導により、陸・船用蒸気タービンの技術導入および発電プラントや事業用大型ボイラの開発へと勢力が向けられた。一方で、小泉磐夫が主導したオープンサイクルガスタービンの開発においても、開発初期にローテティングストール (失速) によって圧縮機動翼をバラバラに破損したことがあり、当時のかん口令によって一切口外禁止となったそうであるが、これが契機となって三井造船の本格的な軸流圧縮機の開発が開始されることになった。後に、軸流圧縮機は三井造船の単体商品として製鉄所の高炉用大容量プロアなどに採用され、回転機製品の一翼を

担うまでに成長したと同時に、自社開発ガスタービンの軸流圧縮機設計の高度化に貢献した。当時のかん口令はとくに時効になっているであろうことから、当時のエピソードとして紹介する。

入江はその後本社（東京）勤務となり、1968（S43）年10月に技術本部長に就任、1976（S51）年6月に常務取締役役に就任するまで、三井造船の技術開発全体を統括した。入江が造機設計部タービン設計課長のときに、入江からガスタービンを学び薫陶を受けた愛弟子の表義則（故人）が、この後に実質的なガスタービン開発の中心者となり三井SBシリーズ産業用ガスタービンを自社開発、国内外に納入し三井産業用ガスタービンの事業化へと結実していったのである。

入江は1972（S47）年の日本ガスタービン会議（GTCJ）設立当時から本会に参加し、本会の発展に尽くした。1974（S49）年のGTCJ第3期副会長を経て、1975（S50）年にGTCJ第4期会長に就任。さらに、1976（S51）年5月31日に文部省から社団法人としての本学会の設立が許可され、会の名称を社団法人日本ガスタービン学会（GTSJ）と改めるとともに、手続き上の経過措置としてGTCJ第4期役員全員が留任となり、入江はGTSJ第1期会長に継続して就任した。会長就任の挨拶において入江は次のように述べている。それは「日本ガスタービン学会」になっても「日本ガスタービン会議」設立時からの「会員中心主義」という理念の継承を表明するとともに、本学会の独自性の重要さを主張し「（前略）論文につきましても、学位論文や学位を得るための論文に偏らないで寧ろもっと泥臭いと申しますか、より実際の技術・経験等を含んだものを多く取り上げることによって、会員各位に馴染み易く且つ又有効にそれを役立てていただけるようになるのではないかと思います。学会と云う名称が、学問的権威を表徴するようなことになりますと、日本ガスタービン会議発足当時の精神にもとることになるのではないのでしょうか。」と、本会の進むべき方向性を再度確認している。その後、入江は1986（S61）年に本会の名誉会員となった。

1978（S53）年、工業技術院のムーンライト計画において「高効率ガスタービン技術研究組合」が発足し、その発会記念パーティに招待された入江は次のように挨拶した。それは「このガスタービンこそ私共ガスタービン関係者が多年にわたって抱き続けた夢そのものであります。『ガスタービンの高効率化』と言う私共が努力を重ねても達成できなかった夢を皆様の力を結集してぜひ現実のものにしていただきたいと、後継の若い世代に期待を寄せバトンを渡したのである。

入江の人物像としては、入江と係わった方々から以下の感想や記憶が寄せられているので紹介する。

背が高く細身のスポーツマンであり、課長でありながら野球のピッチャーもこなすほどの運動好き、ヒットも良く打った。また、当時では珍しいテニスも楽しんでいた。

1964年の東京オリンピックのとき、聖火ランナーとして玉野造船所の近くを走った。

口数は少なかったが酒には強く、酒席を盛り上げる頼もしい存在であった。酒席ではアカペラで「八百屋お七」を滔々と5分くらい歌われたとか。

普段は大声で話すようなことはなく、人の話を最後まで良く聞き、短い言葉で適格なご意見をおっしゃって下さる方であった。

博識で何でも良く知っていたが、控え目で穏やかな性格であり、小さな声でお話になられていた。

研究心旺盛な学者肌であり、優しい教授のようにも見えるが、度量が大きく豪放磊落を内に秘めたいかにも三井マンらしい紳士であった。

謝辞

本稿を書くに当たって、入江正彦の大学の後輩であり、会社でも上司と部下の関係で長年に渡り公私ともに親交の厚かった真鍋善暢氏（元取締役）には、快くインタビューに応じていただき、当時の貴重な話を聞かせていただいた。本稿の大方は、真鍋氏のインタビュー内容を基に構成したものである。また、入社時に真鍋氏の部下であった村山忠男氏を始め、三井造船のガスタービン設計に携わったOB諸兄、さらに入江氏と真鍋氏のご家族からも多くの支援をいただいた。ここに感謝の意を表します。なお、本文中ではすべての方々の敬称を略させていただきます。（文：杉本 富男*1）

参考文献

- 入江正彦、浜田太一、大塚静雄、三井型ネジポンプ、三井造船技報、第3号（1953）、pp. 29-32。
 入江正彦、土屋玄夫、三井型ターボ過給機、三井造船技報、第14号（1956）、pp. 6-9。
 小泉磐夫、廣瀬可康、試作ガスタービン第1番機、三井造船技報、第3号（1953）、pp. 33-38。
 小泉磐夫、阪田正信、ガスタービンの研究 試作1番機の陸上運転について、三井造船技報、第5号（1953）、pp. 2-6。
 入江正彦、三井エッシャウイス型クローズドサイクル船用ガスタービンの制御装置、三井造船技報、第21号（1958）、pp. 9-15。
 入江正彦、梶上秀郎、田中彬、真鍋善暢、空気加熱器の試験（特に燃焼室特性の掴み方について）、三井造船技報、第16号（1956）、pp. 2-20。
 入江正彦、社団法人日本ガスタービン学会の発足にあたって、日本ガスタービン学会誌、第4巻第13号（1976）、pp. 1。
 入江正彦、名誉会員に推挙されて、日本ガスタービン学会誌、第14巻第55号（1986）、pp. 1。

原稿受付 2017年11月10日

* 1 三井造船(株) 玉野事業所 機械・システム事業本部
 機械工場 産業機械設計部 ガスタービン設計
 〒706-8651 玉野市玉3丁目1番1号
 E-mail: sugimoto@mes.co.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

須之部 量寛

SUNOBE Kazuhiro

1915 (T4) 年12月10日 - 1995 (H7) 年11月17日



須之部量寛は1941 (S16) 年に東京帝国大学工学部機械工学科卒業，ただちに逓信省中央航空研究所に入所した。敗戦後は，中田金市の下で1号ガスタービンに関わることになるので，本誌の中田に関する拙稿をまずご覧いただきたい。以下，やはり「1号ガスタービンの思い出集 (渡辺秀行編集：J. G. コーポレーション社による貴重な限定出版本)」にある須之部の記事から，一般読者の目に触れにくいこともあり，長くはなるが抜粋引用させていただく。

1号ガスタービンについて (須之部 量寛)

(前略) 私は昭和16年3月に大学を出て三鷹にある中央航空研究所 (現航技研の前身) に勤務することになった。所長は海軍中将の花島さんであったがおよそ軍人とはかけ離れた学者肌の人であった。度々所長室によび出されて航空発動機はじめ蒸気タービン，ディーゼルエンジン等々のお話を伺った。所長が新入所員をつかまえて直々に相手をして下さるのであるから大変有難いことであるが，経験も知識も段違いで御返事するどころではなく只々お話を承るばかりであった。所長としては若輩に何とか方向付けをしてやろうとのお考えから心掛けて時間を割いておられたのだらうと思う。そのお話の中にペロックスボイラーに関することがよくあった。これは排気タービン過給機をもつ加圧ボイラーで，ガスタービンと通ずるものがあった。そのうちB.B.*1社の4000kW発電用ガスタービンや小型ガスタービン (ブタペスト大学のジエンドラシック教授の開発と記憶するが確かでない) などの記事が雑誌に現れ，所長に調べておくように言われてガスタービンに関心をもつようになった。当時私が担当していたのは航空発動機の過給機の性能向上で，これは今でも小型ガスタービンの圧縮機として使われているのだからその頃からガスタービンに関係があったといえよう。花島さんが所長をしておられたためと思うが，横須賀の空技廠とは連絡がよく，ロールスロイス社の過給機を貸して貰って性能試験をしたり，T-R.*2の開発を見たりしてガスタービンについて予備知識はかなり持っていた。

昭和20年8月15日の終戦を境として世の中は一変し，我々の中央航研は運輸省の鉄道技術研究所に移管された。

* 1 Brown, Boveri

* 2 ジェットエンジンの当時の呼び名であるタービン・ロケットの頭文字

所長の中原さんは土木系の人であったが，極めて識見の広い方で鉄道のためというより日本全体のために物を考えると言う方が適切なタイプの方であった。新しく傘下に入った中央航研の研究員に対して「日本は敗れたがこれを復興するには科学技術をおいてほかにない。科学技術をもって人類に貢献し，世界の人々が日本を抹殺してしまわないで良かったと思うような日本に立直ろうではないか」と心からの熱意をもって話しかけられたのには大いに感激し，是非そうありたいと思った。中央航研のほかにも陸海軍の技術者をどんどん鉄研に入れておられたが，徳田球一が労働者をアジって三鷹事件がおきたりイロハかるたの“つ”が「つよくてやさしいマッカーサー」になったり現在では理解できないような世相のもとでおじゃま虫扱いの航空関係者や軍関係技術者を収容して，技術の温存に努められたことは特筆に値することであると考えている。

空技廠から移って来られた方々のうち中田，近藤，足田，川村さん等がおられ，旧中央航研のグループを指導されることになった。どなたもガスタービンのことは熟知しておられ，機械屋，空力屋，構造強度屋，材料屋など様々な分野の専門家が混在する中研の残党 (当時はそう言われていた) が纏まって研究する格好の対象としてガスタービンが選ばれたことはまことに幸いであった。若しガスタービンに認識の薄い方が指導者となられたら別の途を進んだことと思う。

こうしてガスタービンの研究を始めてみると実験機が必要となった。ガスタービンの現品があるとも思わなかったがせめて図面でも保存している会社はないものかと近藤さんと心当りの会社を回っているうち石川島芝浦タービン会社に高速艇用として試作したタービンがあることを知った。これを修理して実験機にしたのが1号ガスタービンであると言ってしまえば大変簡単のようであるが，修理費の捻出は相当難しいことであった。現品はタービン翼もコンプレッサ翼も曲って全数交換の必要があったし，ベアリングも交換，歯車は新製となると殆んど新製に近い修理なので修理費は高額となった。当時の鉄道にしてみればガスタービンなぞ全く縁なき代物であり，それにそんな高額の支出をすることについて鉄研内でも意見があったようであるが中原所長の強い支持により契約することができた。受ける側の石川島芝浦タービンも土光さんが社長をしておられ大変協力的に動いて下さったことも大きな力となった。それから約1年をかけ

て工事を行い、試運転にこぎつけてガスタービン開発の一步を踏出すことが出来たのは何とも幸いなことであった。

以上のようにして1号ガスタービンは生き返ったのであるが、その経過をみると花島さんのもとでエンジニアが育っていたこと、その連中が四散せずに鉄研に移り、中原所長の強力な支持が得られたこと、石川島芝浦タービンでは土光社長が活躍しておられた時で開発に強い意向を持って居られたこと等々いくつかの幸運が重なっていたと言えよう。しかしよくよく見れば運の問題というより指導者層の一貫した見識によるところが極めて大きかったと言わねばならない。敗戦で打ちひしがれた中から何とかして技術をもって立直ろうとした識者の熱意が原動力となってエンジニアを導いて行ったのであり、1号ガスタービンはその流れのうちの一つの現れであったと考えている。(以上で引用おわり)

図1は須之部らによる論文の冒頭部である。なお投稿少し前の1950(S25)年4月に、同研究所は国鉄が運輸省から独立したことに伴い運輸技術研究所となっていた。

1号ガスタービンは、1,000kWの発電用として鶴見工場内の電力不足を補ったが、その後は運輸技術研究所に移設、研究に供された。その後、1997年に鶴見工場に里帰りした後、展示用に化粧直しして、中田に関する拙稿の図3のように現在は東京電力「電気の史料館」(休館中)に保存されている。

須之部は1962(S37)年に日立中央研究所に移籍し、機械研究所所長を経て、1975(S50)年に東京理科大学

教授となった。そして1983(S58)年には本会第8期会長。1987(S62)年、須之部は本誌に以下のような記事を寄せている。

西独に行く人がよく立寄る町にローテンブルグがある。市庁舎前の広場に面しておもちゃ屋があるので入ってみたら4本のローソクに火をつけて上方の羽根車を回し下方の人形を動かす玩具があった。日本の回り灯籠にくらべてはるかにガスタービンに近い形をしているので早速買いこんで試してみた。ローソクがつくる上昇気流で面白いようによく回りタービンエンジンの原理を示す模型としてまことに適切であるが、そのうち薄い木片を組合せたタービン翼が焦げはじめた。“タービン翼の耐熱性は極めて大切である”ということまで教えてくれる。売場の中央には高さ数メートルの大きなのが飾ってあったから昔は暖炉の火でも使って多少の仕事をさせていたのだろう。火から連続的に回転動力を得たい願望は以前からあった。我国では昭和25年頃から数社で開発が始まり500馬力位の試作機がつくられた。途上で外国から教えて貰った点も多々あるにせよ今日ではコンパインドサイクルとして単機15万kWの発電装置がつくられ、信頼性も電力のベースロードを負うまでに高まっている。30年もすると大変な進歩をするものである。

わが国で初めて陸用ガスタービンの運転にこぎつけた須之部ならではの感慨であろう。なお、須之部には日立時代の部下の藤江邦男との共著で「ガスタービン」がある。(文：吉田 英生^{*3})

参考文献

- 沢井実，技術者の軍民転換と鉄道技術研究所，大阪大学経済学，Vol. 59, No. 1(2009) pp. 1-19.
 <<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/25132/>>
 (参照日 2017年11月30日)
 前間孝則，ジェットエンジンに取り憑かれた男，(1992) pp. 200-204, 講談社。
 吉田英生，中田金市，日本ガスタービン学会誌，Vol. 46, No. 1(2018) pp. 15-17。
 渡辺秀行編集，1号ガスタービンの思い出集，(1989) pp. 74-77, J. G. コーポレーション。
 須之部量寛，不破廣行，三輪光砂，試験用ガスタービンの運転実験(第1報)，日本機械学会論文集，Vol. 17, No. 58(1951) pp. 5-11。
 伊東正雄，本間友博，佐藤岩太郎，東芝ガスタービン開発の歴史，日本ガスタービン学会誌，Vol. 36, No. 3(2008) pp. 193-198。
 須之部量寛，技術の進歩，日本ガスタービン学会誌，Vol. 14, No. 56(1987) p. 1。
 須之部量寛，藤江邦男，ガスタービン，(1967)，共立出版。

試験用ガスタービンの運転実験 (第1報)⁽¹⁾

須之部量寛⁽²⁾ 不破 廣行⁽³⁾ 三輪 光砂⁽⁴⁾

1. はしがき

運輸技術研究所原動機部は昭和24年6月以來試験用ガスタービン(以下1号タービンと略称す)の運転実験を行つた。この実験は同年10月タービン翼に故障を生じたために中断されたが、故障部分を新製して昭和25年5月より、再び実験を開始している。

こゝに述べるのは主として昭和24年6月より10月に至る第1期の実験結果を取りまとめたもので、負荷は3500回転における無負荷から5000回転の1610に至る範囲である。この実験運転は1号タービンが完成して最初の試運転をも兼ねているので燃料系統、燃焼器、水制動機等に故障が頻発して測定に十分な時間をとることが出来なかつた。従つて十分信頼するに足る結果は今後の実験にまたなければならぬ。

注：—

(1) 昭和24年4月13日第501回講演会において講演，原稿受付昭和25年8月15日。

(2)(3)(4) 正員，運輸技術研究所原動機部。

図1 日本機械学会論文集 より

原稿受付 2017年11月30日

* 3 京都大学工学研究科航空宇宙工学専攻
 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3
 E-mail: sakura@hideoyoshida.com

特集：第45回定期講演会（松山）報告

第45回日本ガスタービン学会定期講演会 全体報告

松沼 孝幸^{*1}
MATSUNUMA Takayuki

姫野 武洋^{*2}
HIMENO Takehiro

1. 市民フォーラム

定期講演会の前日10月17日、愛媛大学城北キャンパスの南加記念ホールにおいて、ガスタービン市民フォーラムを開催した。このフォーラムは、当学会の活動対象であるガスタービンおよびエネルギー関連技術について、学生や一般の方々に広く知っていただくことを目的としており、愛媛大学の吉岡洋明先生、岩本幸治先生、松浦一雄先生の全面的なご協力のもとで実施された。

今回の市民フォーラムの講演は、石田克彦氏（川崎重工）による「ガスタービンのお話 - 空を飛ぶ、電気をつくる、機械を動かす -」であった。愛媛大学で機械工学を学ぶ学生の熱心な参加もあり、136名という大人数の参加者を得た。

ガスタービンとは何かから始まり、作動原理、開発の歴史から未来への動向まで、盛りだくさんの内容を、学生向けに分かりやすい説明での講演が行われ、将来を担う学生にガスタービンの基礎から最先端まで触れる新鮮な機会になったと思われる。



Fig. 1 Open forum

2. 定期講演会

市民フォーラムに続き、10月18日および19日に、愛媛県松山市の松山市総合コミュニティセンターにて、「第45回日本ガスタービン学会定期講演会」を開催した。2階と3階の全フロアが貸し切りであったため、3室の講演会場に加えて、休憩室や会議室なども利用でき、たいへん便利な会場であった。講演会には194名と、過去最

高規模の参加者を得ることができた。

一般講演は53件の発表件数を集めた。その内訳は、空力：20件、伝熱/タービン：9件、材料：9件、燃焼：6件、システム・サイクル：5件、運用/耐久性：4件であり、例年通り空力分野の発表が多い傾向であった。各セッションとも多くの参加者を得て、熱心な議論が交わされていた。

今回も、学生登壇者からのエントリーがあった23件の講演を対象として学生優秀講演賞の審査が実施された。厳正な審査の結果、村田遼さん（東京大学大学院）と中西仁さん（東京工業大学大学院）が受賞され、講演会2日目午後には船崎健一会長より賞状が授与された。詳細は本誌に別記の通りである。



Fig. 2 Organized session

講演会1日目の午後には、日本溶射学会との共同企画である「ガスタービンへの溶射技術」のオーガナイズド・セッションが開催された。岡田満利氏（電中研）および鈴木雅人氏（産総研）を座長として、まず講演会形式で、鈴木雅人氏から「最新セラミックスコーティング技術」、深沼博隆氏（プラズマ技研）から「最新のコールドスプレー技術」、山崎泰広氏（千葉大）から「コーティングの密着性評価法の検討」、小川和洋氏（東北大）から「高温酸化を利用した遮熱コーティングの耐はく離性改善」が発表された。その後の全体討論では、ガスタービンへの溶射技術と今後の展望についての議論が行われた。

講演会1日目夕方には、愛媛大学法文学部教授で附属四国遍路・世界の巡礼研究センターのセンター長である寺内浩先生による特別講演「四国遍路の歴史と文化」が一般にも公開される形で行われた。四国遍路について、距離と所要日数・巡り方・遍路のスタイルなどの概要、奈良時代から始まる歴史、国際化などによる現代の様子、そして世界遺産登録に向けた取り組みが説明され、時代

原稿受付 2017年12月5日

* 1 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門
〒305-8564 つくば市並木1-2-1

* 2 東京大学大学院 工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

とともに変遷する四国遍路について全体を知ることができる興味深い講演であった。



Fig. 3 Special lecture

講演会2日目の午後には、「航空エンジン技術開発プロジェクトの展望」と題して、パネルセッションが開催された。

初めの講演会形式では、渡邊裕章氏（九大）を座長として、まず渡辺紀徳氏（東大）より「航空エンジン研究開発プロジェクトの検討状況」が紹介された。その後、今成邦之氏（IHI）から「航空エンジン技術開発プロジェクトへの期待」、西澤敏雄氏（JAXA）から「JAXAのプロジェクト活動を通じた考察」、高原雄児氏（航装研）から「防衛装備庁における航空エンジン研究開発について」、菟川宏樹氏（JALエンジニアリング）から「エアラインにおけるビッグデータ活用事例」が紹介された。

続く総合討論では、渡辺紀徳氏を座長として、「航空エンジン技術開発プロジェクトの展望」について議論され、活発な意見交換が行われて盛り上がった。

その他、2年前の定期講演会からの取り組みとして、会場内のロビーを利用した展示会も実施された。事前の公募により関連企業5社（キグチテクニクス、日本キスラー、オリンパス、パルステック工業、新東工業）の出展が行われ、休憩時間や昼休みを利用し、展示パネルや展示物の説明が参加者に対して行われた。

3. 懇親会

懇親会は、講演会会場から徒歩1分の松山モノリスにて講演会1日目の夜に開催された。船崎健一会長の挨拶、大田英輔元会長による乾杯で始まり、会員同士の交流が図られた。愛媛県出身の参加者による挨拶、学術講演会委員長から次回は鹿児島市で開催する旨の発表などがあり、今成邦之理事による中締め挨拶で散会となった。

4. 見学会

見学会は講演会翌日の10月20日に実施され、38名の参加者があった。松山市の北部に位置する三浦工業株式会社に始まり、太山寺（四国遍路の第52番札所）、株式会社井関松山製造所などを巡るコースであった。

三浦工業株式会社は日本のボイラのトップメーカーであり、熱・水・環境分野の多彩な製品やシステムを開発・製造している。本社工場にて概要説明の後、ボイラのメンテナンス事業を担うオンラインセンターと、船用ボイラ・特殊ボイラ・圧力容器などの特機製品を製造している三浦マシン工場を見学した。その後、車で15分ほどの北条工場に移動し、小型貫流ボイラ組立ラインのある三浦マニファクチャリング第一工場を見学した。

株式会社井関松山製造所は、農業機械の総合専門メーカーである井関農機の松山工場を2001年に分社して設立された会社であり、最新設備を活用してトラクタ・乾燥機・ディーゼルエンジン・油圧機器などを生産している。今回の見学会では、モデル植物工場、テクニカル・トレーニングセンター、トラクタ組立ラインなどを見学した。モデル植物工場では、業界初の植物生育診断装置などを活用していた。トレーニングセンターでは、溶接・旋盤・塗装・組立など様々な実習場で、人材育成と技能伝承のための研修が行われていた。トラクタ組立ラインは、全く異なる機種が同時に組み立てられるという特徴を持っていた。最後に案内されたドリーム・ギャラリーには、クラシックな農機からロボット技術を活用した最先端の農機までが展示され、乗車体験もできた。

どちらの企業でも、見学後の全体質疑では、活発な質疑応答が行われ、両企業の技術への参加者の関心の高さが伺えた。



Fig. 4 Technical tour
(at Iseki Matsuyama Mfg. Co., Ltd.)

5. 謝辞

定期講演会の準備全般に多大なご協力をいただいた愛媛大学の吉岡洋明先生、市民フォーラムの開催に多大なご協力をいただいた松浦一雄先生、岩本幸治先生、学生の皆様、定期講演会の講演者・参加者の方々、オーガナイズド・セッションの座長・講演者の皆様および日本溶射学会の桑嶋孝幸様、パネルセッションの座長・講演者の皆様、見学会の開催にご協力をいただいた三浦工業株式会社と株式会社井関松山製造所の関係各位、会場選定時から多岐に渡りご協力をいただいた松山観光コンベンション協会様に、心より御礼申し上げます。

特集：第45回定期講演会（松山）報告

オーガナイズドセッション「ガスタービンへの溶射技術」

Organized Session

“Application of Thermal Spray to Gas Turbine”



岡田 満利^{*1}
OKADA Mitsutoshi

キーワード：溶射，サスペンションプラズマスプレー，コールドスプレー，密着性評価，耐はく離性

Key Words：Thermal spray, Suspension plasma spray, Cold spray, Adhesion evaluation, Delamination resistance

1. はじめに

今回の定期講演会では、「ガスタービンへの溶射技術」と題したオーガナイズドセッションが行われた。ガスタービンにおいて、溶射は、燃焼器や動静翼といった高温部品の表面に施されている遮熱コーティング（TBC）や耐食コーティングの施工プロセスとして知られている。

今回、溶射という要素技術のセッションが、そのアプリケーションである本学会の定期講演会において開催されたのは、一般社団法人 日本溶射学会（以下、溶射学会と称す）と本学会のコラボレーションの結果である。以下にこの経緯を簡単に記す。前回酒田で行われた本学会の定期講演会に、溶射の専門家である産業技術総合研究所の鈴木雅人氏が初めて参加した。鈴木氏には、ガスタービンの研究者や技術者との交流が有意義であったとのことである。そして、本学会の定期講演会について溶射学会で話したところ、学会レベルの交流に発展し、今回の定期講演会において、溶射学会が協賛団体に加わった。

本セッションでは、溶射学会から4件の発表者を迎えることできた。そして、よい機会であるので、要素技術側とアプリケーション側の研究者、技術者間で議論する場として、全体討論の時間を設けることになった。

本稿では、本セッションで発表された講演および全体討論の概要を報告する。なお、鈴木氏には、報告者とともに、本セッションの共同座長を務めていただいた。

2. 講演発表

2.1 最新セラミックコーティング技術（産業技術総合研究所 鈴木雅人氏）

通常のプラズマ溶射では、溶射粉末の粒径が20-60 μm程度であるが、サスペンションプラズマ溶射（SPS）法では、アルコールや水などにより微細なセラミック粉

末を分散したサスペンション（懸濁液）を直接プラズマジェットに投入して溶射する手法である。SPS法によって、「羽毛状」、「柱状」、「カリフラワー状」と称される特徴的な微視組織を有するコーティングを形成することができる。これらのコーティングのうち、ジルコニア系を中心としたものは、ガスタービンおよびジェットエンジンの次世代TBCの有力候補として注目を集めており、欧米では精力的に研究が進められている。

講演後の質疑では、SPSで溶射されたセラミックコーティングの熱伝導率の変化や焼結などの特性の変化についての質問が寄せられた。これらの課題については、微視組織との関係がまだ未解明な点があり、分析手法についても今後の発展が期待されるとのことであった。

2.2 最新のコールドスプレー技術（プラズマ技研工業株式会社 深沼博隆氏）

コールドスプレーとは、超音速ガス流に粉末材料を投入し、粒子が相手材に衝突、変形することにより、コーティングを形成する手法である。コールドスプレーは、北米では、航空機部品のメンテナンスに広く利用されているとのことである。その他、電気伝導改善のためのCuコーティングやインダクションヒーティングのための低炭素鋼のコーティングに用途が広がっているとのことである。

コールドスプレー技術では、粒子が相手材に衝突する際の速度が重要な因子の一つである。講演では、粒子速度に影響を及ぼす因子である温度、圧力、粉末材料の供給量などについて詳細に解説された。

2.3 コーティングの密着性評価法の検討（千葉大学 山崎泰広先生）

コーティングの密着性は、評価すべき重要な特性の一つであり、山崎先生らのグループは、圧子押し込み法によるコーティングの界面強度評価法に関する標準化研究を行い、TBCの界面破壊靱性試験法であるISO20267の策定に参画した。本講演では、ISO20267より小さな局所領域の界面強度を評価できるよう計装化した押し込み試験機による界面破壊靱性評価法について解説した。ま

原稿受付 2017年11月21日

* 1 （一財）電力中央研究所

〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

E-mail: mitutosi@criepi.denken.or.jp

た、ガスタービン動静翼の冷却孔におけるTBC界面端では、特異応力場が形成され、界面き裂が発生しやすい。このような部位におけるTBCの界面破壊靱性値を評価するため開発した、その場観察せん断圧縮試験法についても解説した。

会場からは、コーティングの特性評価法の標準化への課題について質問があった。山崎先生からは、評価標準化においては、厳密さはもちろんであるが、幅広く使用され、実施してもらおう方法を提案することも重要であるとのコメントがあった。

2.4 高温酸化を利用した遮熱コーティングの耐はく離性改善（東北大学 小川和洋先生）

TBCでは、トップコート/ボンドコート界面に成長するTGOが、TBCのはく離の要因と考えられている。小川先生のグループでは、ボンドコート材料を見直し、高温酸化を積極的に進行させることで、TBCの界面強度改善に取り組んできた。これまで、CeO₂を添加したボンドコート材料を用いると、内方酸化が助長され、耐はく離性が改善することを明らかにしてきた。講演では、減圧プラズマ溶射（LPPS）あるいは高速フラーム溶射（HVOF）といった異なる施工プロセスを用いてTBC試験片を試作し、四点曲げ試験により、耐はく離性に及ぼす影響を評価した結果について解説された。また、添加するセラミック種を換えて、CeO₂あるいはZrO₂とし、その影響についても解説された。

会場からは、他の評価試験の結果について、質問が寄せられたが、セラミック添加したボンドコートを用いたTBC試験片については、概ね良好な結果が得られているとのコメントがあった。

3. 全体討論「ガスタービンへの溶射技術と今後の展望」

講演発表の後には、「ガスタービンへの溶射技術と今後の展望」と題して討論会を開催した。まず、講演者がテーマについてコメントした。鈴木氏は、要素技術である溶射技術と適用先であるガスタービン技術の両者の研究者・技術者の情報交換が重要であり、どのような点に注力して開発を進めればよいかの方向性を得ることが大切であると述べた。

深沼氏は、欧米のジェットエンジンメーカーでは、コールドスプレーがメンテナンスに用いられており、今後国内でも適用が広がることへの期待を述べた。

山崎先生は、基礎的な試験によって、コーティングの物性を把握することの重要性についてコメントした。コーティングは、溶射粉末がスプラットになり、それが堆積して成り立っており、これが性状に大きく影響する。例えば、コーティング中での微視的な強度分布を把握できれば、溶射技術の発展に寄与できるだろうと期待を述べた。

小川先生は、例えば、コールドスプレーは、積層造形法など3Dプリンティングによる加工技術に比べて、加工速度が速いのが魅力であり、溶射技術は、今後も大い

に発展する可能性があることを強調した。

続いて会場から、講演者に対する質問やコメントが寄せられた。TBCの最近の動向である、低熱伝導率化および厚膜化に対する取り組みについて、会場から質問があった。講演者からは、CeO₂などの添加セラミックスをうまく使えば、TBCの耐酸化性をうまく改善して、機能傾斜材料（FGM）のような構造を作製することができ、厚膜化が可能ではないかとの展望が述べられた。

また、いわゆるチャンピオンデータだけでなく、バラツキも考慮したコーティングの特性評価をどのようにしていけばよいかという課題が会場から示された。講演者からは、溶射やコーティングには、まだ未解明な現象があり、これをまず理解し、その理解に基づいた評価方法が重要であるとのコメントが出された。

全体討論の最後には、鈴木氏が、今回のオーガナイズドセッションをきっかけにして、日本溶射学会と日本ガスタービン学会の研究者、技術者の交流が一層盛んになり、技術が発展することへの期待を述べ、本セッションは盛況のまま終了した。

4. おわりに

溶射技術は、ガスタービン高温部品にとって今や不可欠なTBCを施工するための重要な要素技術である。今回のセッションでは、溶射技術の最近の動向や課題が示され、ガスタービンの研究者、技術者にとって有意義なものになったと考える。鈴木氏が期待しているように、溶射技術のシーズとガスタービン技術のニーズがうまくかみ合い、両者にとって新たな展開が始まることを願いたい。

謝辞

今回のオーガナイズドセッション開催にあたり、多大なご協力をいただいた溶射学会の皆様、特に担当理事として調整いただいた岩手県工業技術センターの桑嶋孝幸氏に謝意を表します。

参考文献

- 鈴木雅人, 最新セラミックコーティング技術, 第45回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2017) pp. 53-55.
- 鈴木雅人, 最新セラミックコーティング技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 6 (2017) pp. 465-469.
- 深沼博隆, 最新のコールドスプレー技術 最新のコールドスプレーシステムを中心として - , 第45回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2017) pp. 57-62.
- 山崎泰広, コーティングの密着性評価法の検討, 第45回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2017) pp. 63-66.
- 小川和洋, 片柳豪太, 市川裕士, 山崎裕之, 菅原由貴, 田附匡, 高温酸化を利用した遮熱コーティングの耐はく離性改善, 日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2017) pp. 67-71.

特集：第45回定期講演会（松山）報告

パネルセッション「航空エンジン技術開発プロジェクトの展望」

Panel Session “Perspective of Aeroengine R&D Projects”



渡辺 紀徳^{*1}

WATANABE Toshinori

キーワード：航空推進，ジェットエンジン，研究開発プロジェクト

Key Words：Aero-Propulsion, Jet Engine, R&D Project

1．はじめに

松山で開催された第45回定期講演会で、標題のようなパネル討論のセッションを実施した。座長を学術講演会委員の渡邊裕章准教授（九州大学）と筆者が務めた。このセッションは、当学会の「ガスタービンを考える会」（以下「考える会」）におけるプロジェクト案の検討と連動し、また、東京大学の将来航空推進システム技術創成社会連携講座と共同して企画した。今年度の考える会では航空エンジンの研究開発プロジェクトを立案する議論を集中的に進めており、このセッションでは関係者に広く意見を伺い、有効なプロジェクト案の検討に向けて議論を盛り上げることを目的とした。研究開発および運用に携わる機関からパネリストに登壇いただき、エンジン技術の状況と今後の展望を伺った上で、今後の航空エンジン共同研究開発プロジェクトの方向性や、意義ある技術項目と体制などについて議論できれが有益であろうと意図した。ここではセッションの背景となる航空エンジン研究開発の現状を概観し、考える会での検討内容を紹介した後、パネルセッションの概要を報告する。

2．セッション企画の背景

日本の航空エンジン開発は活況を呈している。民間エンジンは国際共同開発への参画が継続的に行われており、最新のエンジンとしてはギアード・ターボファンPW1100G-JMがA320neoに搭載され、2016年から商用運転に入っている。また、従来のA320に搭載されているV2500は出荷台数が7,000台を超え、ベストセラーエンジンとして製造が続いている。IHI、川崎重工、三菱重工航空エンジンの3社はそれぞれ787用GEnx、777後継機用GE 9 Xやリージョナル機用のPassport20、787用のTrent1000、A350用のTrent XWBなどの開発製造に着

実に携わり、参画度合いを高めて事業展開している。更に将来に向けて、次世代旅客機用ギアード・ターボファンの2030年頃の市場投入を目指し、要素技術の研究開発が本年度開始された。他方、本田技術研究所は小型エンジンHF120を独自に開発し、ホンダジェットに搭載して量産化を実現している。また、防衛エンジンでは、対潜哨戒機P-1のエンジンとして高バイパス比ターボファンF7が純国産で開発され、順調に飛行しているほか、ヘリコプター用エンジンおよび次期超音速機用エンジンも精力的な開発が実施されている。

ジェットエンジンの研究開発には政府の支援が不可欠であり、従来から経済産業省はじめ関連省庁との連携がとられてきた。2015年に開催された「基幹産業化に向けた航空ビジネス戦略に関する関係省庁会議」が「航空産業ビジョン」を打ち出し、完成機開発までを視野に、産官学連携のもと、関係省庁が共通の認識をもって、航空産業の発展に向けて統合的に取り組むとの方針が示された。その後の一つの成果として、F7エンジンをJAXAのテストセルに設置し、共同利用技術実証エンジンとすることが決定し、2019年度の運用開始に向けて現在整備が進められている。産業界での活発な活動と、政府の指導・支援、そして学术界の基盤研究がうまくかみ合うことにより、研究開発が大きく進展することが期待される。

ただ、現状では日本のエンジン産業技術が国際的にリーダーシップを発揮する段階までには至っておらず、今後の展開には戦略的な研究開発が必要である。平成28年度の民間エンジン売上高の国別内訳を見ると、全体の売上高約8兆6千億円のうち、米英2か国が約73%のシェアを占めている。日本はIHI、川崎重工、三菱重工航空エンジンの3社合わせて5～6%程度のシェアで、これを高めて行くためのシナリオを産官学で検討して行かなければならない。国産大型民間エンジンの実現には多くのハードルがあり、容易には展望が見出されないが、国際共同開発を進めて行く中でも従来の活動の継続だけ

原稿受付 2017年11月27日

* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

では展開が望めないであろう。国際共同開発では開発費やリスクの分担という意義のほか、参加する各パートナーがそれぞれの得意とする技術を持ち寄ることにより、より高い性能を実現できるという期待が持たれる。したがって参加するパートナー社としては、独自性と有用性のある高度な技術を常に開発し、保有し続けていく必要がある。

3. ガスタービン学会における活動

当学会の産官学連携委員会、およびガスタービンを考える会というワーキンググループでは、航空エンジンの技術ロードマップを策定し、これに基づく「将来航空エンジン基盤技術創成プロジェクトPhase」をまとめている。

ロードマップでは、日本の航空エンジン技術の第一目標を「エンジンの完成機開発と市場の獲得」へと踏み込んだ。そして技術の方向を「環境適合への道」を土台とする「低燃費化・低CO₂化への道」と「高速化への道」に整理し、「新しい推進システム」や「機体全体のエネルギーマネージメント」も取り入れたものとなっている。

また、ロードマップに基づくプロジェクトPhaseの案では、産官学の共通的な認識のもとで以下の重点技術5項目を抽出した。

- 革新材料・ものづくり技術
- 革新エンジン用小型高効率ターボ系空力技術
- 電気化対応およびエネルギーマネージメント技術
- 革新エンジン用小型超軽量熱交換器技術
- 燃焼・連成を含むシミュレーションの高度化

これら5項目の研究開発を産官学連携により遂行することで、日本のエンジン技術の優位性と独自性を飛躍的に高めることがPhaseの到達目標である。項目により違いはあるが、TRL (Technology Readiness Level) で5~6の実証レベルまでを目指している。Phaseの後には、開発した要素技術を統合することにより実証エンジンを開発するPhaseにつなげる計画である。

今年度の考える会は、上記プロジェクト案を踏まえ、現実的に関連機関が連携して実施できる共同研究開発プロジェクトの具体案を作成することを目指し、話し合いを続けている。これまでのところ、実施可能なテーマとして以下の3項目が俎上に載せられている。

国内共同利用が可能な材料データベースの構築

基盤共通的な範囲でガスタービン用材料物性データをプロジェクト参加各機関にて取得し、それらを集約して国内のデータベースを整備する。参加機関はデータベースを共有する。物質材料研究機構(物材研)に中心になってもらい、関連各社が参加してプロジェクト案を取り纏める。現在のところ、物材研が開発した耐熱材料を中心に検討を行っており、将来的には認証取得も可能なレベルのデータベースを国内で整備することを意図している。議論には従来の考える会メンバーの他、材料メー

カーや航空関係研究機関の材料関係者にも加わってもらい、今年度内の一次案策定を目指して活発な意見交換がなされている。

基礎的な実験データベースの構築および共同利用実験施設の整備

流体、伝熱、燃焼、構造などの各専門分野、およびそれらの複合分野の様々な物理現象に関する実験データを取得・集約する。昨今は数値シミュレーションに従来よりも非常に高いレベルの定量性や、極めて複雑な現象、実機環境における現象などのシミュレーションが求められる状況にあるが、解析手法を検証するための実験データが大幅に不足しているというのが、どの分野でも問題視されている。そこで、共同プロジェクトにより、実機に近い環境で、点だけでなく面、あるいは三次元の詳細実験データを取得・集約するプロジェクトを立案する。そのために必要な共同利用試験施設の設置も視野に入れる。また、新しい計測法の開発も対象となる。現在は各社・各機関のニーズを調査し、また、国内で利用可能な実験設備・データベースにどのようなものがあるかを洗い出している。今後、どのような分野、テーマを取り上げると最も有効かについて議論し、方向性を絞り込む計画である。

電動推進システムの広範な概念検討

航空推進システムの将来の電動化について、世界で様々な形態が提案されているが、それぞれの性能を定量的に検討し、比較するというような研究は、少なくとも公表されている範囲ではほとんど見られない。そこで、基礎的な性能検討を広範に行い、適切なシステム案を構築する調査研究を実施する。性能評価の方法論も研究対象となる。

4. パネルセッションの概要

4.1 セッションの進め方

セッションは2部構成で、はじめにパネリスト各位からそれぞれ15分のプレゼンテーションをしていただき、全ての講演が終わった後、約40分間の総合討論を行った。講演は司会を九大の渡邊准教授が務め、総合討論は筆者が司会を担当した。

パネリストは以下の4人の皆さんにお願いした。

- 今成邦之氏 (IHI),
- 西澤敏雄氏 (JAXA),
- 高原雄児氏 (航空装備研究所),
- 稜川宏樹氏 (JALエンジニアリング)

エンジンメーカー、研究機関(防・民)、エアラインの方々に登壇いただき、それぞれの立場からエンジン研究開発の将来の発展に向けて様々なご見解が伺えるものと期待した。また、総合討論では考える会の関係者から、川岸京子氏(物材研)、輪嶋善彦氏(本田技術研究所)、貴志公博氏(三菱重工航空エンジン)、東部泰昌氏(川崎重工)に事前をお願いしておき、ご意見をいただいた。

4.2 パネリスト講演

まず筆者が「航空エンジン研究開発プロジェクトの検討状況」という題目でセッションの導入を行った。エンジン研究開発と国のプロジェクトの現状を説明した後、考える会の検討内容を紹介し、今回のパネルセッションの意義を述べた。

続いてIHIの今成氏から「航空エンジン技術プロジェクトへの期待」というタイトルで講演をいただいた。まずエンジン産業の動向と技術ニーズが説明され、運用ライフサイクルコストと環境負荷の低減が重要とのお話があった。その中で、燃料消費量の低減と製造コストの削減を取り上げ、IHIの活動例を紹介された。今後の技術開発プログラムについては、クローズ領域とオープン領域があり、学会を中心とする共同プロジェクトとしてオープン領域での活動が適しており、内容には例えば共通で使用できる技術情報基盤あるいは技術実証インフラの増強、新材料・新製造技術、将来的な潜在性はあるが産業化が見えないPre-competitiveな技術などが挙げられた。Pre-competitiveな技術として電動化ハイブリッド推進が重要検討課題であり、学会中心のプロジェクト立ち上げに期待するとのことだった。

次にJAXAの西澤氏が「JAXAのプロジェクト活動を通じた考察」と題して講演された。文科省の研究開発ビジョンに基づいて実施されているaFJRプロジェクト、グリーンエンジン技術研究開発の活動が紹介され、現在の産業技術課題が整理された後、これまでのプロジェクトの系譜を概観し、今後は国内の様々な技術開発の成果を技術実証エンジンに順次搭載し、システムレベルの実証を継続的に進めて行くような研究開発プログラムが必要であると指摘された。

航空装備研究所の高原氏は、「防衛装備庁における航空エンジン研究開発について」という題目で、まず同庁の研究開発体制や試験設備などを紹介された後、これまでの航空エンジン研究開発の歩みを初期のJ3から最新のP-1用F7エンジンや観測ヘリOH-1用XTS2エンジンまでまとめて解説された。今後のエンジンとして、ハイパワースリムエンジンの概念の紹介があり、プロトタイプエンジンXF-9や無人機用推進システムの技術について説明された。

パネリストの最後にJALエンジニアリングの稜川氏が登壇され、「エアラインにおけるビッグデータ活用事例」というタイトルで講演された。定時運航に向けた取り組みとして、機材故障による遅延・欠航をいかに減らすかの努力が紹介され、予防整備に基づくProactiveな対応で故障発生前に予兆を見極め未然に防止することの重要性が強調された。続いてデータモニタリングの発達状況とビッグデータ分析による故障予測の技術開発が紹介された。エンジンのモニタリングデータを運転中の全ての時間にわたり連続的に取得・蓄積し、これを解析することによって不具合の予兆や、その発生個所まで特定でき

るシステムの有用性が示され、実現に向けて研究開発が進んでいることが紹介された。ユーザーとメーカーの共同が非常に重要とのことだった。

4.3 総合討論

総合討論ではまず考える会の航空エンジン研究開発プロジェクト案の検討内容について、パネリスト各位からコメントをいただいた。

今成氏は、電動化にどの程度ポテンシャルがあるか現時点では不明確で、今後の技術として位置付けて良いか分からない状況なので、是非取り組んでもらいたいとの希望を表明された。また、基礎的な実験データベースについて、必要な内容は時代とともに変化するので、今後の技術動向と対応させ、優先順位をつけて共同で整備するのが良いとのことだった。

西澤氏からは、プロジェクト案3テーマの中で、JAXAの役割は基礎的な実験データベースの整備にあると考えられ、近年は要素試験設備を徐々に整備しているので、ようやく実用に供し得るデータの取得が可能になりつつあるのではないかと認識が示された。将来に向けて、新しい計測法の開発や、同じ設備でもより詳細で高度な実験データの取得などを目指し、JAXAだけでは難しい面もあるので、共同で研究を進めていきたいとのことだった。

高原氏からは、共同プロジェクトで整備される予定のデータベースを是非利用したいとのコメントがあった。また、航空装備研究所の無人機を使えばかなりチャレンジなこともやりやすいかも知れないので、貢献できる可能性があるとのことだった。

稜川氏は、航空会社は大量の実運用データを持っているので、これを技術的なデータベースにリンクできると良いかも知れないとの意見を述べられた。また、センシングについて、日本的な細やかさを活用すれば、欧米の技術で手が届かない領域が明らかにできる可能性があるとの指摘された。

続いて参加者の中で事前に依頼していた方々からコメ



講演会場の様子

ントをいただいた。

物材研の川岸氏からは、材料を研究開発している立場から、是非国産エンジンを作ってもらいたいとの要望が表明され、それに向けた材料データベースのプロジェクト立案に際し、より価値の高いデータベースとするためには、こういった点に注意すれば良いかご意見をいただきたいとの依頼があった。

三菱重工航空エンジンの貴志氏は、エンジン開発に際し、設計段階から携わらないと、修理などでデータを集めてフィードバックをかけるという流れができない、また、自分たちの基準に落とし込んだ材料データベースがないと海外の会社と戦えない、そのような観点で地に着けた検討を学会内で進めて欲しい、との要望が出された。特に若い世代が中心になって話し合う取り組みが欲しいとのことだった。一方、電動化については、従来のエンジン関連技術だけでなく、異業種の技術も統合できるようなコンソーシアムを立ち上げるなどの取り組みも考えるべきであると指摘された。

川崎重工の東部氏からは、前のめりでアグレッシブに過ぎるロードマップを作ることにならないよう、学会のこのような取り組みの中で地に足つけた案を出して実行して行って欲しいとのコメントがあった。

本田技術研究所の輪嶋氏は、小型エンジンHF118を独自で開発した経験を通して、1社単独で事業をやるのはかなりリスクが高いと感じるとのことだった。GEと共同開発を行った一つの理由としては、認定に関する諸手続きのノウハウが自社にはほとんどなかった点が大きく、もし単独で認証手続きを進めていたらまだ飛んでいなかったかもしれない、自社で保有しているデータベースだけでは足りない箇所をGEの経験を背景に補完してFAAに説明することで期間を短縮できたものもある、との経験談を披露された。本当は自社で全部やり切ったけれど、早く商品を世に出すことができたという点では、GEと組んだことは結果的に正しかったと思う、しかし次はなるべくGEに力を借りずに、自力でやれる領域を増やしていきたいとの希望を表明された。他方、材料と実験のデータベース構築を1社でやっていくのは大変で、やはり日本国内で共同活動としてできると良いとのことだった。ホンダジェットは開発に30年かかったが、今後はもっと短期間で開発しなければならないし、基盤技術や新技術の開発に関しても1社でやれる範囲は限られるので、協力してやっていきたい、今回提案されているもの以外のテーマでも考えて行きたいとコメントされた。

その後、フロアを含めて自由討論を行った。

帝京大学の田沼教授からは、半導体技術を例に取り上げ、以前は日本が世界的に圧倒的なシェアだったのに、今ではそんなことはない、航空に関しても戦前は日本も強かった事情がある、エンジンでは先行するビッグ3（GE、Pratt & Whitney、Rolls-Royce）が圧倒的な

で大きなビジョンを持ちにくくなっているが、半導体の例などを見ると、ひっくり返すことはあり得ないことではないのではないか、とのコメントがあった。外国メーカーの航空エンジン技術者と話しても、持っている悩み・危機感などは日本の技術者と同じであり、日本でも設計のポテンシャルは蓄積しているはずなので、自信をもってビジョンを抱いてほしいとのことだった。

物材研の原田氏は、エンジンの研究開発を40年ぐらい見てきて感じたこととして、国内の技術はFJRが開発された頃が一番世界に肉薄していたのではないかと、その後は海外のビッグ3の戦略に巻き込まれてしまっているのではないかと懸念を表明された。世界に追いつこうというのに国内の複数の会社個別では弱く、一本化して取り組むべきとの意見だった。今回のプロジェクト案に関しては、材料データベースの構築に協力するので、良いものがあれば使ってほしい、とのことだった。

これに対して今成氏から、エンジン開発を前向きにやって行きたいが、国内メーカーの統合については分からない、とのコメントがあった。

東北発電工業の松崎氏は、過去の事業用ガスタービンの開発で重要だったのは、ユーザーがメーカーと一緒に開発することだったとの経験を話された。ユーザーがいないとメーカーも製品を作れないので、日本全体としてエンジン技術を開発し、国内のユーザーがそれを積極的に使って行くことにより、世界と戦って行ける姿が初めて実現するのではないかと、ユーザーを見つけるのは大変だと思うが、ひとつの考え方として欲しい、とのことだった。

これに対して筆者から、航空機産業は市場を作るところから考えないといけないのが難しい点で、市場開拓まで考えると国の関与が必要な領分となるので、政府関係の機関も含めてどう市場を作っていくかを考えないといけない、そこまで含めて技術ではないかと申し上げた。

更に西澤氏から、関連省庁との連携はさまざまに行っているが、十分とは言えない状況である、F7の技術実



総合討論の様子

証エンジンとしての運用については、いろいろな省庁の協力で実現しており、今後はこういうことを増やして行きたい、とのコメントがあった。

稜川氏にユーザーからの意見を求めたところ、ユーザーとしては高い信頼性とコストの低減、整備コストのライフサイクルまで考えたエンジン開発を期待しているとのことだった。より早く、より遠くへ、より安くという航空機への要望は現在エンジンにしわ寄せがきており、ビッグ3はそのあたりを的確にとらえて対応している。その中で日本のエンジンメーカーはうまく取り入れられているので、今後は日本国内でタグを組んで品質とコストを両立したサービスを考えて行くことを期待する、とのことだった。

最後に筆者から出席者各位に、これから立案する研究開発プロジェクトへの協力をお願いし、総合討論を締め括った。

5. おわりに

パネルセッションは定期講演会のプログラムの最後であったが、多くの皆さんが参加して下さり、大変活発な意見交換ができた。パネリスト各位と、企画を実現していただいた学術講演会委員会をはじめとする関係者の方々、および当日ご参加いただいた皆さんに深く感謝申し上げます。

発電用ガスタービンの分野では、当学会が中心となってまとめた負荷変動対応ガスタービンのNEDO先導研究プロジェクトが立ち上がり、2014～2015年度と今年度

の2度にわたり調査研究を実施している。今後はこのテーマの大型プロジェクト実施を目指し、検討を進めているところである。航空エンジンについても当面ここで述べた3テーマについてプロジェクト案の策定を進め、民間エンジン開発の契機となるような先導的研究開発を実現したいと心より願っている。

謝辞

総合討論の内容については、東京大学の佐久間康典助教に記録を取ってもらい、本稿の参考にした。ここに記して謝意を表する。

参考文献

内閣府ホームページ

http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/koku_business/ (参照日2017年8月31日)

社団法人日本航空宇宙工業会、航空宇宙産業データベース、

http://www.sjac.or.jp/common/pdf/toukei/7_database_H29.7.pdf (参照日2017年8月31日)

渡辺紀徳、「ガスタービン これまでの40年、これからの40年：総論」、日本ガスタービン学会誌、Vol. 41, No. 1, (2013) pp. 14-19.

調査研究委員会、「調査研究委員会報告 NEDOプロジェクト『再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発』について」、日本ガスタービン学会誌、Vol. 44, No. 6, (2016) pp. 506-526.

特集：第45回定期講演会（松山）報告

三浦工業株式会社におけるオンラインメンテナンス[®]の紹介 Introduction of MIURA CO.,LTD Online Maintenance



三浦 正敏^{*1}
MIURA Masatoshi

キーワード：三浦工業株式会社，オンラインメンテナンス[®]，IoT
Key Words：MIURA CO.,LTD, online msintenance, IoT

1. はじめに

愛媛県松山市の地で1959年に設立された三浦工業株式会社本社工場では、2017年10月に日本タービン学会（約40名）の訪問を受けた。限られた時間ではあったが、大型ボイラの製造工場、「新入社員基礎作業訓練・力量アップ訓練・多能化訓練」を行う組み立て道場、全長70mのコンベア上で行う小型貫流ボイラの組立て・試運転の状況、ZISオンラインセンター等の見学が行われた。



Fig. 1 ZIS online center tour

三浦工業株式会社は主にボイラ及び関連機器等の製造販売，メンテナンスを手がけており，その特徴の一つに，今回見学ルートであったZISオンラインセンターを中核として，「オンラインメンテナンス[®]」を展開している。三浦工業株式会社は経営理念「世界のお客様に，省エネルギーと環境保全でお役に立つ」を実現するために，主力の貫流ボイラとボイラ技術を基盤とする水処理

原稿受付 2017年11月22日

* 1 三浦工業(株)

〒799-2696 松山市堀江町7

E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

機器，食品機器，メディカル機器，排ガスボイラ，エアコンプレッサなどの機器を組み合わせた工場のトータルソリューションをグローバルに提供し，メーカー独自のワンストップメンテナンス（図2）を展開しており，その実現のために，三浦工業株式会社は「オンラインメンテナンス[®]」を活用している。以下に概要を説明する。



Fig. 2 One stop service product group

三浦工業株式会社のメンテナンスに関しては，1972年に3年間Zボイラ有償保守管理プログラム「ZMP[®]」制度を業界に先駆けて導入したことが転換期として挙げられる。この「ZMP[®]」は，創業者の三浦保が「故障の連絡を受けてから現場に駆けつけるのでは遅い。ボイラは生産に直結する。生産を止めると顧客が多大な損害を被る。未然に損害を防ぐため保守点検する。」との強い思いから推進された。事前料金にて保守点検を行うことは，当時としては画期的な取組みであった。三浦工業株式会社メンテナンスの基本である「お客様本位」の点検サービスは，故障リスク・検査・整備・補修管理コストを低

減し、性能・機能の維持、機器寿命の伸長など、現場のニーズに合致し広く受け入れられた。

こうして「ZMP®」制度によって得られた膨大なメンテナンスデータ・ノウハウを基に、「IoT」や「ICT」という言葉が生まれる遙か前、1988年に各種センサと通信機能を搭載した小型貫流ボイラAI型を発売し、1989年から「オンラインメンテナンス®」と称される通信を活用したサービスを実施、この制度で長年培った顧客第一のピフォアメンテナンスがより充実したものとなった。このサービスにより、今では国内1,000名以上のサービスエンジニアが、オンラインによって55,000台以上の機器とつながり、24時間365日安心安全のメンテナンスサービスを提供している。

2. 三浦工業株式会社の「オンラインメンテナンス®」

三浦工業株式会社の「オンラインメンテナンス®」について、ボイラ機能・提供サービスの内容とそのメリットについて、述べることにする。

2.1 ボイラの多重制御とお知らせ予知機能

ボイラなど三浦工業株式会社の機器には、顧客に安全にご使用頂くために、各種センサが装備されており、自社開発のマイコンボードによるAI多重制御を行っている。一例として、ボイラの水位をコントロールするセンサが故障した場合、他の水位検出手段を併用し安全を確保しながら、ボイラの運転を継続させる事が可能となっている。このように、万一のトラブル時には、機器が自ら状況を判断して、安全優先の上、バックアップ制御に切替え運転を継続させる事で、安定した蒸気供給を行う事ができる機能を有している。

また「お知らせ予知データ」と呼ばれる機械自らが自己診断を行い、運転状況・データを基に、重故障になる前の段階で、部品の交換や点検を促す為の機器データ等の情報を通信回線にて、三浦工業株式会社メンテナンス拠点へ機器データを通報する事が可能となっている。

「お知らせ予知データ」を受信した場合には、サービスエンジニアがデータを解析後に顧客と打合せの上、計画的にピフォアメンテナンスを行う事で、将来起こりうる重故障を未然に防止する事が可能となる。また運転停止を伴う状況が発生した場合でも、メンテナンス拠点から、機器の詳細情報を通信で確認しながら、顧客への連絡が可能のため、電話対応のみで解決に繋がるなど、より早い復旧へ向けてのサポートが可能となっている。サービスエンジニアの現場出向が必要な故障内容の場合にも、三浦工業株式会社が培ったノウハウを基に、データから原因を推測し、短期間で対応や事前に交換が予想される部品を準備する事で、現場でのメンテナンス作業も円滑に行えることとなる。

この「オンラインメンテナンス®」は24時間対応となっており、平日昼間は担当拠点・夜間休日は本社ZISオンラインセンターにて対応を行う事とし、緊急出向が

必要な場合には、待機当番をしているサービスエンジニアが対応する仕組みとなっている。

2.2 点検サービス

サービスエンジニアが、定期点検サービスの際は、事前に機器のデータを収集し通信点検レポートの作成を行う事となっている。このレポートには、機器の経歴データ、熱管理データ、メンテナンス管理用データ、異常やお知らせ予知の発生履歴が、前回の点検時情報と比較して表示されており、点検時に交換すべき消耗部品や、重点的にチェックすべき部位が分かるようになっている。これにより、勘に頼らない最適な作業が可能となるため、例えば、過度な頻度のバーナ整備など、無用な作業による機器の停止時間を削減する事もできる。このようにデータを基に、的確な点検を実施する事で、ピフォアメンテナンスに努めている。また、バーナの着火回数やボイラ缶水のブロー量データなどを定期的に解析して、省エネ運転に向けての適正化を提案、実施する事も行っている。

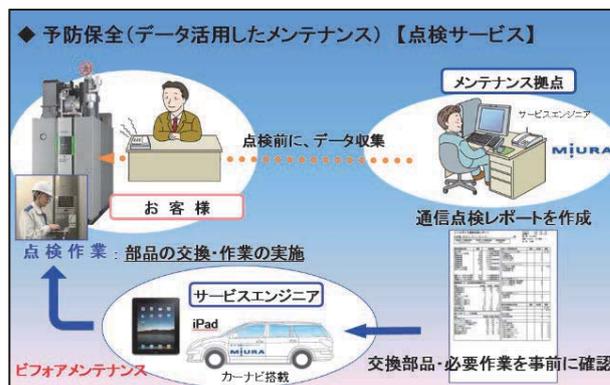


Fig. 3 Flow of inspection service

2.3 月報サービス

月間の蒸発量、燃料使用量の概算データを毎月郵送するサービスを行っている。また、ボイラ水管へのスケール付着の傾向管理の情報も確認できる。過去1年間の蒸発量、燃料使用量の推移も分かるので、ボイラの稼動状況の変化なども把握している。このような情報を毎月ご

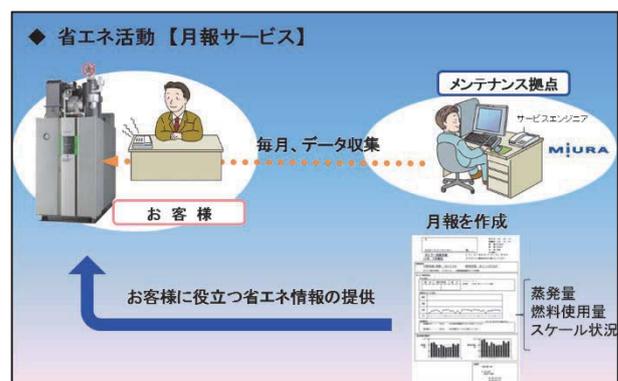


Fig. 4 Flow of monthly report service

提供し、ボイラ効率の維持や向上に役立てている。

2.4 メリットについて

「オンラインメンテナンス®」では、今まで述べてきたように、数々の項目を提供できる仕組みとしている。このサービスにより、「安定的に質の高い設備運転を維持する事で、顧客に安全と安心を提供」する事を念頭としている。

具体的なメリットとしては、以下のとおり。

- ビフォアメンテナンスにより予期せぬ故障を防止
- 設備の長寿命化をはかる
- 省エネ、省CO₂に貢献
- 最適な燃焼（季節変動に応じた調整、バーナ着火回数低減）、熱損失の削減などや、省エネの提案
- ビックデータの活用
- メンテナンスの品質向上・商品の品質向上などに活用

3. ビックデータ

28年前からスタートした、このシステムには、現場からの膨大なデータが集まっており、現在このデータを、メンテナンスの品質向上や商品設計の品質向上にも活用している状態である。

機器のトラブル発生頻度、解決まで費やした時間が長い現場の分析・サービスエンジニアチームの行動効率の傾向把握など、メンテナンスの管理指標用データとして加工し、様々な角度からサービスの品質向上に役立てている。

また、商品開発時には見つからなかった想定外のトラブルの原因追求、対処後の効果把握などにも、これらのビックデータは有効である。例として、冬場に原因不明の燃焼関連お知らせが多発した際にも、データ解析により、ある外部要因による誤判定だという事が判明し、お知らせ判定ロジックの見直しを行った事や、異常発生率の高い部品を抽出し、より信頼性の高い部品への変更などに活用している。

その他、新商品開発時のデータとしても活用する事で、顧客に長期間、安全かつ省エネを提供する商品作りに役立てている。

4. メンテナンスのBCP対応（事業継続計画）

三浦工業株式会社では、顧客のビジネスを継続するため、安全・安心を守るサービスの提供が使命であると考

え、適切かつ迅速に実行できる災害対策を実施している。

愛媛県にある本社機能が罹災し不全に陥った場合にも、この三浦工業株式会社の「オンラインメンテナンス®」のサービスが停止する事が無い様、バックアップシステムとなる第2 ZISオンラインセンターを栃木支店に設置し、定期的に訓練も実施している。また、バックアップサーバーの構築や在庫管理のほか、GIS（地理情報システム）を活用した災害支援ツールを自社開発し、視覚的な被害状況の把握や復旧支援の進捗管理など、迅速な人員確保と初動体制のスピードアップを図っている。

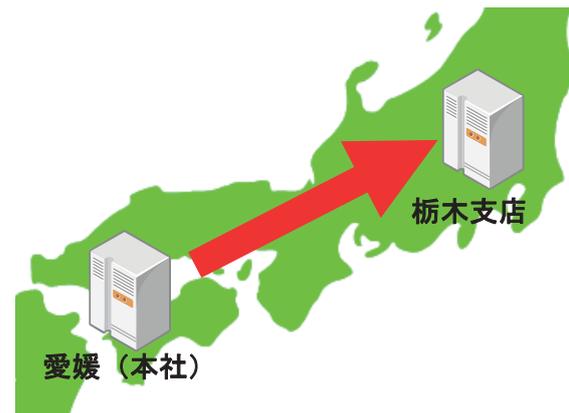


Fig. 5 BCP compatible image

5. これからの方向性

これからの方向性として、機器単体ではなく、工場トータルソリューションビジネスモデルの構築や進化を目指し、ボイラなど顧客のエネルギー管理システムを提供するクラウドサービスを検討している。また次世代型電源として期待されるSOFC（固体酸化物形燃料電池ユニット）の商品開発では、ボイラ事業によって培ったメンテナンスサービスと、通信・センシング技術のノウハウを活かした次世代システムの開発を行っている。また他の分野へも広げていく予定である。

更にグローバル対応という面では、現在、世界10カ国でこの三浦工業株式会社の「オンラインメンテナンス®」を展開しているが、現地の事情にあったサービス体制を構築し、販売提携する地元企業と連携しながら日本で蓄積してきたノウハウを世界に広げ、お客様に安全・安心のサービスを提供していきたいと考えている。

特集：第45回定期講演会（松山）報告

市民フォーラム「ガスタービンのお話 - 空を飛ぶ，電気をつくる，機械を動かす - 」

石田 克彦^{*1}
ISHIDA Katsuhiko

今年度の定期講演会に合わせて前日の10月17日 夕刻に市民フォーラムが開催された。この催しは、会員以外の方にも当学会の活動対象であるガスタービンという機械と学会の活動について理解をいただくために開催される。会場は、愛媛大学城北キャンパス内の南加記念ホールをお借りして、愛媛大学の工学部の学生さんを中心に100名以上の方に集まっていた。

今回はテーマを「ガスタービンのお話」として、ジェットエンジンなどの航空原動機、発電機械駆動などの産業用原動機の両分野にまたがってガスタービン全般を説明することにした。構成は「身近なガスタービン」、
「構造と原理」、「歴史と未来」の3部構成とした。

まず、講演冒頭で「学会会員以外の方で、ガスタービンという機械を直接見たことがある方は？」と尋ねてみたところ、手を挙げていただいたのは数名であった。筆者も就職してガスタービン関連の職についたときに、初めてガスタービンエンジンというものを目にしたのであるが、普段の生活では触れる機会のないものであることを改めて認識させられた。

第1部は「身近なガスタービン」として、ジェット機とジェットエンジンから始めて、プロペラ旅客機、ヘリコプタなど航空機の大部分が、ガスタービンエンジンで動いていることを説明した。次に、地上ではガスタービンは発電用、機械駆動用の動力源として広く用いられ、商用電源、非常用電源などの多くがガスタービンで産み出されていることを紹介した。直接目に触れることの少ない機械であるが、電力などを通して身近なところで社会に関わっていることを理解いただけるとよいと思う。

第2部の「構造と原理」では、熱機関サイクルの基礎的な説明とガスタービンの内部構造などを説明した。熱機関の基礎的なサイクルについては、4サイクルのレシプロエンジンとガスタービンを並べて、両者の比較からガスタービンの特徴を説明した。このレシプロエンジンとの対比という方法はガスタービンエンジンの説明としてよく使われる方法である。かつては中学の技術家庭科の授業にレシプロエンジンの説明があり、筆者のような昭和育ちの世代にとっては男の子の常識であった。しかし、2000年頃を境に教科書からエンジンの説明はなく

なっているそうなので、レシプロエンジンの部分についても、初学者向けの説明を心掛けたつもりであるが、説明に乱暴なところがなかったか、心配である。

ガスタービンの高性能化に関する三大要素である、高温化、高圧化、空力性能改善の必要性について理解いただくには、これらの要素の熱効率、比出力への寄与について説明しなければならない。煩雑な式の誘導と説明は省略して、熱効率、比出力のグラフを数枚用意した。熱力学の教科書には必ず載っている熱効率、比出力の式とグラフであるが、断熱比、最高温度比などの無次元量では実感のわからない方もおられるかと思ったので、圧力比、最高（タービン入口）温度でプロットしたグラフを用いて説明した。続いて、高性能化を実現するための、冷却、燃焼、空力、材料などの要素技術について説明を行ったが、各々の技術に割り当てる時間が短く物足りなかった方もおられるかもしれない。

ガスタービン本体の高性能化に加えて、航空用ガスタービンの課題である「推進効率、バイパス比」についても解説しなければならない。推進効率については、ターボジェット、ターボファン、ターボプロップと並べて排気速度と効率の関係を説明したが、超音速飛行のための、アフターバーナ、ノズルなどの説明は割愛してしまったのが心残りである。バイパス比増加の傾向について説明するために、既存エンジンのバイパス比と平均排気速度の相関図を作成した。「排気速度はおおむね音速に等しい」、「ファンでゆっくりと空気を押し出す」では、専門家でない方は実感がわかないかと思い、実機の排気流速を列挙しようとしたのであるが、バイパス比、空気流量、静止推力の三つのデータの揃っているエンジンが意外に少なく、作成に苦労した。「ターボファンの排気速度は毎秒約300m」というところまでは説明したが、プロペラ、オープンロータではどの位ということまでは説明できなかった。プロペラとターボファン、その間にオープンロータを並べると、形はなにやらどれも似ているような、違うような、すっきりと理解できないという印象をもたれた方もおられたのではないかと思う。

出力軸を持つガスタービンエンジンとそれを持たないターボジェットエンジンについて説明した後に「ジェットエンジンとガスタービンエンジンどちらが先（原型）でしょうか？」と会場のみなさんに尋ねてみたところ、ガスタービンが先と手を挙げた方は数名であった。もち

原稿受付 2017年11月15日

* 1 川崎重工業㈱ ガスタービンビジネスセンター
〒676-8666 明石市川崎町 1-1

ろん、正解はガスタービンエンジンからジェットエンジンが派生したのであるが、工学部の学生さんでもご存じの方は少ないようである。ジェット機の出現は航空機の歴史の中でエポックメーキングな出来事であり、一般の航空機の解説書ではジェットエンジンの登場について必ずといってよいほど記述があるが、産業用のガスタービンの出現はそれ以前の静かな出来事であったので、こういう印象をもたれるのかと思う。ガスタービンエンジンとジェットエンジンの出現に関する前後関係は、次のセクションで改めて説明した。

構造と作動原理を一通り説明した後に、翌日から松山市内で開催されるガスタービン学会定期講演会について紹介を行った。ガスタービンを構成する各技術要素について、100名を超える各分野の専門家が集い研究成果を発表し、議論を行うことを説明した。ガスタービンエンジンが、多方面の専門家の協力によって支えられていることを知っていただけると良いと思う。

第3部では歴史と未来について説明した。まず、19世紀までの実物のエンジンのない時代を「思いつき」あるいは「理論が先」の時代として紹介した。いささか冗長になるが、18世紀の熱機関の発明、その後続く熱力学、流体力学の発達など、20世紀初頭のガスタービンの登場に先立つ工学上の背景から説明を開始した。

次に「つくってみる」の時代として20世紀初頭のStolze, Ellingなどの試作機から1937年のBBC社のガスタービン発電所までを紹介した。ジェットエンジンについては、1920年代の百花繚乱の特許出願から第二次大戦までを「空を飛んでみる」として独、英での試作と実用化までを説明した。その中で陸海軍による日本のジェットエンジン開発についても触れた。海軍の初期型TR-10エンジンの断面図は本邦初公開と思うのだが、どなたか気づいていただけたであろうか。

第二次大戦終了からの約20-30年を「空の主役になる、陸の脇役になる」時代として、航空機では、旅客機、軍用機ジェット化、ヘリコプターのタービン化など、産業用ではピークカット、非常用等の分野での実用化について説明した。

最後に、「陸でも主役になる」時代として、陸上ではコンバインドサイクル、コージェネレーションの隆盛、航空用では高バイパスエンジンの発達について述べた。

蒸気機関は熱力学の概念の確立以前に着想され、低効率ながらも実際の機関が製作され、実用を開始できたのに対し、ガスタービンは最初の18世紀末のBarberの特許出願以来、20世紀初頭の自立運転の成功までに100年以上、その後の実用化、航空機への適用には更に多くの時間を要している。ガスタービンは最初の運転が試みられた時点で、熱力学等の理論が成立しており、当時の材料の耐熱温度、空力機械レベルではきわめて低い性能しか実現できないことを予測することができた。実際、初期のガスタービンの熱効率はわずか数%であり、当時の

蒸気タービンに大きく劣っていた。蒸気機関は常にその時代で最高の効率を得られる原動機として順次改良され発展してきたが、20世紀初頭にガスタービン機関が成立して以来、熱効率の面では、蒸気タービン、ディーゼルエンジンなどの後塵を拝している時代が長く続いていた。

聴衆の大部分を占める若い学生の方々にとっては、航空機のほとんどがガスタービンによって推進され、ガスタービンコンバインドサイクルが最高の効率をもつ発電型式として電力界に君臨していることは当たり前の光景であるが、ガスタービンがこのような隆盛を迎える前に長い夜明け前の時代があったこと、その中で改良、開発に取り組み、道を拓いてくれた先人たちがいたことを知っていただければと思う。

現在までの技術的な発展過程を説明した後、最後に航空用産業用の両方のガスタービンについて、将来技術として開発、構想されている諸テーマについて説明した。航空用においては、更に燃料消費低減を求めてのバイパス比増大(ギアードファン, オープンロータ), 電動, ハイブリッド化と電動化に伴って可能になる推進系と機体空力設計の融合などについて述べた。産業用については、再生エネルギーとの融合, 高温化, 燃料電池, 石炭ガス化などコンバインドサイクルなどを題材とした。航空用, 産業用ともにガスタービンには, まだ多くの解決すべき課題と新たな適用分野があることを示した。会場の中から, 自分でこれらの課題に取り組もうという方がでてくれば大変うれしいことである。

講演の後の質疑応答では, 学生の方から大変レベルの高い質問をいただいた。「ガスタービン, ジェットエンジンの初期において, 機関としての成立性が危ぶまれるほどの低い熱効率について, 当時の技術者はどう認識していたのか?」というものである。ジェットエンジンの出現直前にあった, その実現性に関する議論については, あまり面白くないかと思ひ, 説明を省略していたのであるが, 講演の内容からこのような質問を構築できることに非常に感激した。回答として, 1920年代の米国, 英国政府の行った航空用ジェットエンジン, ガスタービンエンジンの実現性に関する検討結果と, 両国におけるその後の研究開発の展開について補足の説明をさせていただいた。推進機関の成立性については, 両国とも理論的に検討し, 即時の成立, 実用性はないと結論付けたが, 米国は研究のペンディング, 英国は10年以上にわたる遠大な軸流圧縮機の開発計画に着手するという対照的な対応を採った。ホイットルの開発プロジェクトは政府に冷遇されたという簡単な記述がなされることもあるようだが, その理由や背景について知ることもあると思う。

最後に, 講演を準備いただいた学術講演会委員会の皆様, 内容についてアドバイスをいただいた学術講演会委員会, 技術普及委員会の皆様に感謝いたします。

遷音速ファンのフラッター境界予測における ミスチューニング効果の統計的感度解析

Statistical Sensitivity Study of Mistuning Effect on Transonic Fan Flutter

立石 敦^{*1}
TATEISHI Atsushi

渡辺 紀徳^{*1}
WATANABE Toshinori

姫野 武洋^{*1}
HIMENO Takehiro

青塚 瑞穂^{*2}
AOTSUKA Mizuho

室岡 武^{*2}
MUROOKA Takeshi

ABSTRACT

This paper presents a detailed investigation of the effect of mistuning on transonic fan flutter, which is conducted as part of comprehensive efforts to find reasons for the mismatch in the flutter boundary in our past numerical prediction. The flutter boundary of a full-annulus fan assembly with different mistuning levels is statistically evaluated based on eigenvalue analysis and Monte-Carlo simulation. Nominal levels of mistuning due to manufacturing tolerance have little effect to the flutter boundary because the decline in aerodynamic damping is very steep. Therefore, the accuracy associated with the computational fluid dynamics is likely to have caused the mismatch in the flutter boundary. Detailed observations of modal properties show that the mode shape in flutter modes can be highly deviated from pure traveling wave mode, even if the level of mistuning is nominal. For largely mistuned cases, highly-localized, single-blade dominant modes appear due to the escape from aerodynamic coupling.

Key words : Fan, Aeroelasticity, Stall flutter, Mistuning, Monte-Carlo simulation

1. はじめに

航空用エンジンファン動翼に生じる失速フラッターは、空力的な不安定であるサージと並び、安定作動域を制限する代表的な翼振動現象として知られている。特に設計回転数以下の部分回転数時に生じるものは、発生領域がサージ線から安定作動域に張り出すように存在し作動域に接近しやすいため、設計時の予測手法や、発生を抑制する指針を確立することが重要である。

これまで著者らは、流体構造連成解析に基づくフラッター解析手法を構築・検証し、遷音速ファンに生じるフラッター境界の予測を試みてきた。フラッターが生じる回転数の範囲では、予測されたフラッター境界は試験結果と定性的に一致したが、一方で本来フラッターが生じないはずの低回転数側の作動点でも数値解析ではフラッターが生じた。この差の原因を明らかにし、精度のよい予測指針を確立するためには、空力・構造双方の面

から包括的な調査が必要である。

フラッター発生点への影響因子は空力的・構造的要因双方が存在し、これまで報告されてきた実験的な観測や数値解析による研究より、次のようにまとめられる。

励振力に寄与する衝撃波のある不始動流れ場
翼列入口・出口ダクト内の音響的特性
翼振動モード形状（並進・ねじり運動の割合）
翼構造の機械的特性のばらつき

の機械的特性のばらつきはミスチューニングと呼ばれ、製造時のばらつきや計測器の取り付けに起因して生じる。最小減衰率をとるフラッターモードに対しては、主に減衰率を増し不安定性を抑制する効果があるが、その程度はばらつきのパターンや強度に依存し、振動特性に個体差が生じる。しかし、CFDを用いた流体・構造非連成のフラッター解析ではこの効果を含めることができないため、別途影響度の評価が必要になる。

経験された試験・解析間の差を考える際、設計に依存するは別にして、は流体解析における乱流モデルや計算領域の影響が疑われる。そのため、現時点でミスチューニングの感度を定量的に知ることは、試験・解析間の差がばらつき由来の偶発的なものか、流体解析に由

原稿受付 2016年8月30日

査読完了 2017年12月20日

* 1 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

* 2 IHI

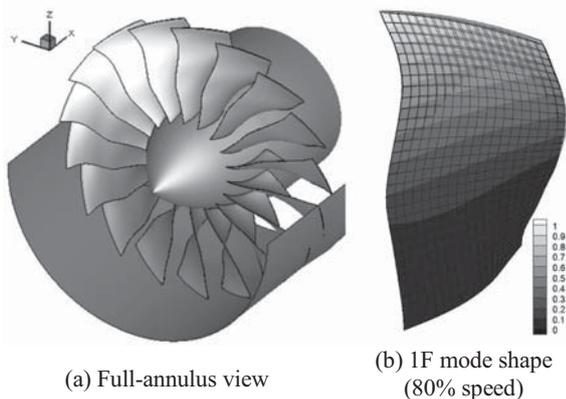


Fig. 1 CEFS1 fan

Table 1 Specifications of CEFS1 fan rotor

Number of blades	18
Aspect ratio	1.6
Relative Mach number at tip	1.4
Blade material	Ti-6Al-4V
Range of flutter region and structural mode shape	80%N, 82.5%N (1F mode)

来するかを切り分けるうえで重要な知見となる。

本研究では、前述したフラッター境界のミスマッチの原因を検討する一環として、低回転数側でフラッターが構造側の偶発的な要因で抑制されていた可能性を考察するため、ミスチューニングがフラッター境界に及ぼす影響を定量化し評価する。また、現実にもみられるミスチューン時の振動特性についても詳細に調査する。

2. 解析手法

2.1 解析対象と解析指針

本研究における解析対象はIHI社において高効率・高比流量を実現すべく研究開発されたCEFS1ファンである。ファンの外観と動翼一次たわみ(1F)モードのモード形状を図1に、仕様を表1に示す。ファンは18枚の動翼をもち、Ti-6Al-4V合金のブリスクで作成されている。CEFS1はリグ試験において設計回転数比80%N, 82.5%N(Nは回転数を表す)の失速側作動点で1Fモードのフラッターが発生した。

図2に、著者らの数値解析で予測されたフラッター境界と試験でのフラッター発生位置の比較をファン特性マップ上で示す。フラッターの生じない低回転数側(75%, 77.5%回転数)でもサージ線よりかなり高流量側にフラッター境界が算出された。本解析は一切の構造減衰およびミスチューニングを含まずに行われたが、構造減衰はブリスク構造のため小さく、影響を無視できる。本研究では、実際の空力的な条件に即した感度解析により、ミスチューニングの影響を抽出することを目的とする。解析範囲は、図2中FSI Pointと示された、フラッター境界を囲む広い作動範囲にわたる点である。

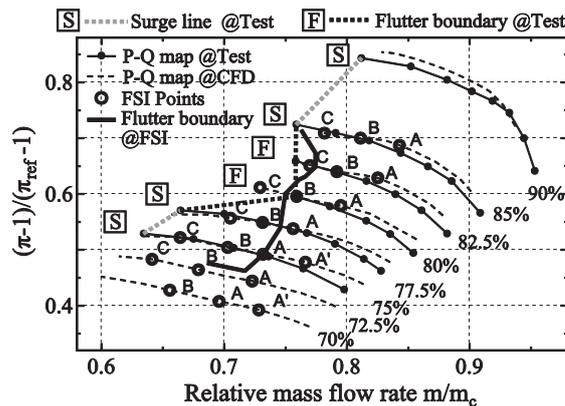


Fig. 2 Mismatch of flutter boundary on low shaft speeds in our past numerical prediction

2.2 ミスチューニングを含む構造モデル

翼構造の振動パラメタは一般に減衰比のほかモード質量, モード剛性, モード形状から成り, 固有振動数はこれらより算出できる。ミスチューニング効果の本質はばらつきによる系の回転対称性の崩れであるため, 本研究では解析を単純化するために以下の仮定をする。

各翼は空力的にのみ連成し, ディスクを介した翼間の連成, 翼振動モード間の空力的な連成は無視する。

構造振動モード形状はチューン系のものに等しい。

自励空気力の影響係数もチューン系のものに等しい。

CEFS1ファンは実験機であり, ディスクの剛性が高く設計されている。したがって, ディスクモードと翼振動モードの連成は小さく, ディスクの影響を排除しても大きな問題はないと判断し, 仮定を採用する。

なお, ディスクがある場合, 構造の節直径モード同士の連成が弱まるため, ミスチューニングへの感度が鈍化する。本研究では仮定によりミスチューニングへの感度は最大化されている。また, 解析上重要な点は, 仮定で空気力の項を凍結することである。これによりミスチューンパターンを変えても新たな流体解析の必要はなく, 膨大なサンプル数を扱うモンテカルロ法と統計評価が可能になる。

以上の仮定に加え, 現実の翼構造に内在する振動特性の「ばらつき」を固有振動数, モード質量に導入する。翼番号 j 番に対する, 固有振動数とモード質量のチューン系からの相対的な変化をそれぞれ μ_j, M_j とし, それぞれ標準偏差 σ_j, σ_M の正規分布に従う確率変数であるとモデル化する。

2.3 翼振動の解析手法

以上の仮定のもと, 1Fモードに対する自励空気力を含んだ動翼列全体の運動方程式は次のように書ける。

$$\ddot{\mathbf{q}} + (A + \Delta A)\mathbf{q} = M^{-1}(A\mathbf{q} + B\dot{\mathbf{q}})$$

$$\mathbf{q} = [q_1 \ \dots \ q_{N_b}]^T, \quad A = \omega_0^2 I, \\ \Delta A = \omega_0^2 \begin{bmatrix} 2\delta_1 + \delta_1^2 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 2\delta_{N_b} + \delta_{N_b}^2 & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}, \\ M = \begin{bmatrix} 1 + \delta_{M,1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 + \delta_{M,N_b} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}, \\ A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{N_b} \\ a_{N_b} & a_1 & \dots & a_{N_b-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_2 & \dots & a_{N_b} & a_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_{N_b} \\ b_{N_b} & b_1 & \dots & b_{N_b-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_2 & \dots & b_{N_b} & b_1 \end{bmatrix}$$

ここで、Eq. 左辺は構造振動の項、右辺括弧中は翼振動で誘起される自励空気力項を表す。また $N_b=18$ は翼枚数、 A, B はチューン系のモード剛性行列（角固有振動数 ω_0 ）、自励空気力係数行列の変位・速度比例成分である。ミスチューニングの効果は、付加的な剛性行列と質量行列 M でまとめて表わされる。なお、ここには現れないが、翼固有モード形状ベクトルはチューン系のモード質量が1となるよう規格化されており、ミスチューン時にもチューン時と同じものが用いられている。このとき、ミスチューン時において空気力係数行列 A, B に対するモード質量のスケールリングが不要になる。

以上の各項を定めれば、ミスチューン系の自由振動に対する安定性解析（フラッター解析）が、 λ を固有値、固有ベクトルとして複素固有値問題を解くことで行える。

$$\lambda \begin{bmatrix} \psi \\ \lambda \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -A - \Delta A + M^{-1}A & M^{-1}B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \lambda \psi \end{bmatrix}$$

の実部、虚部からは空力弾性モードの減衰率 μ_{AE} 、振動数 f_{AE} がEq. より、また、 ψ からはモード形状である、各翼の振幅比と位相差がそれぞれ求まる。

$$\mu_{AE} = -\text{Re}(\lambda), \quad f_{AE} = |\text{Im}(\lambda)|/2\pi$$

翼振動の安定性は減衰率の正負で判定され、 $\mu_{AE} > 0$ ならば翼振動は安定、一方 $\mu_{AE} < 0$ ならば不安定であり、その空力弾性モードでフラッターが発生する。

空力弾性系を振動モデルに縮約した係数行列について、

には各回転数の構造解析結果を、また、 A, B には各作動点で実施した流体構造連成解析による翼の自由振動応答からシステム同定手法によって算出したものをそれぞれ用いる。

2.4 モンテカルロ法と統計データ処理

ミスチューニングは現実の構造では様々なパターンで存在すると考えられる。そのため、モンテカルロ法（MC）により多数の異なるミスチューンパターンについてEq. に基づく安定性解析を実施し、その統計を取ることによってフラッター境界への影響を評価する。MCのサンプル数を $N_{\text{fan}}=10000$ とし、フラッターモードの減衰率、振動数に対して統計量やヒストグラムを算出する。

ミスチューニングの減衰率に対する感度は、Eq. のように、それぞれのファンに対する1Fモード群の最小減衰率の、全てのサンプルにわたる平均として定義された、平均最小減衰率 $\overline{\mu_{\min}}$ によって評価する。

$$\overline{\mu_{\min}} = \frac{1}{N_{\text{fan}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{fan}}} \min(\mu_{AE,1}, \dots, \mu_{AE,N_b})_i$$

$\overline{\mu_{\min}}$ は、あるミスチューン量の条件に対する振動安定性を代表する値であると考えられる。そのためミスチューニング条件における平均的なフラッター境界を $\overline{\mu_{\min}}=0$ となる点と定め、ファン特性マップ上の圧力比と流量を $\overline{\mu_{\min}}$ のゼロ点周囲の値から求める。

Table 2 Standard deviation of blade-alone frequency in past studies (1F mode)

Author	Model	STDEV [%]
May	UHBR Fan	0.47 (all) 0.17 (clean)
Beirow	HPC blisk (1st stage)	0.13
Schnell	Counter-rotating fan	0.25

Table 3 Test cases for frequency mistuning

No.	STDEV [%]	Assumed situation
1	=0.2%	Nominal level
2	=0.5%	Nominal level
3	=1.0%	Large mistuning
4	=1.5%	Very large mistuning

Table 4 Test cases for mass mistuning

No.	STDEV [%]	Assumed situation
1	$m=15\%$	Nominal level
2	$m=30\%$	Large deviation

2.5 標準的なミスチューン量とテストケース

過去の研究例では固有振動数のみのばらつきを考慮する“frequency mistuning”を扱うものが多く、ミスチューニングに対する重要なパラメータであると考えられる。しかしもう一つの係数である「モード質量」を扱うものは少なく、その振動特性への定性的な影響や、減衰率への感度の大きさは定かではない。そのため本研究では、ミスチューン量に対する安定性への感度を系統的に調査するため、固有振動数、モード質量のばらつき量に対する標準偏差をパラメータとする。

対象とするミスチューン量を設定するために、過去の研究におけるファンに似た種々のリグに対する計測結果を調査した。May, Beirow, Schnell はそれぞれ遷音速ファン、航空用エンジン高圧圧縮機初段、二重反転ファンのリグに対する計測を行っている。表2に、最近の三つの文献における1Fモードの固有振動数のばらつき量の計測値を標準偏差で示す。Mayのモデルは22枚中5枚がピエゾ素子製の加振装置を有し、それらを含めた場

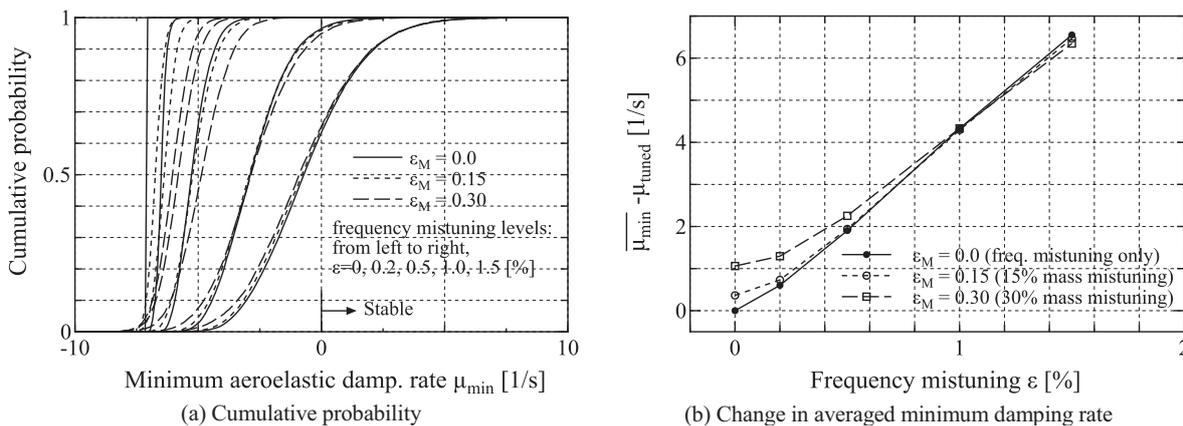


Fig. 3 Effects of mass and frequency mistuning on the statistics of damping rate in the flutter mode (80%N, OP: C)

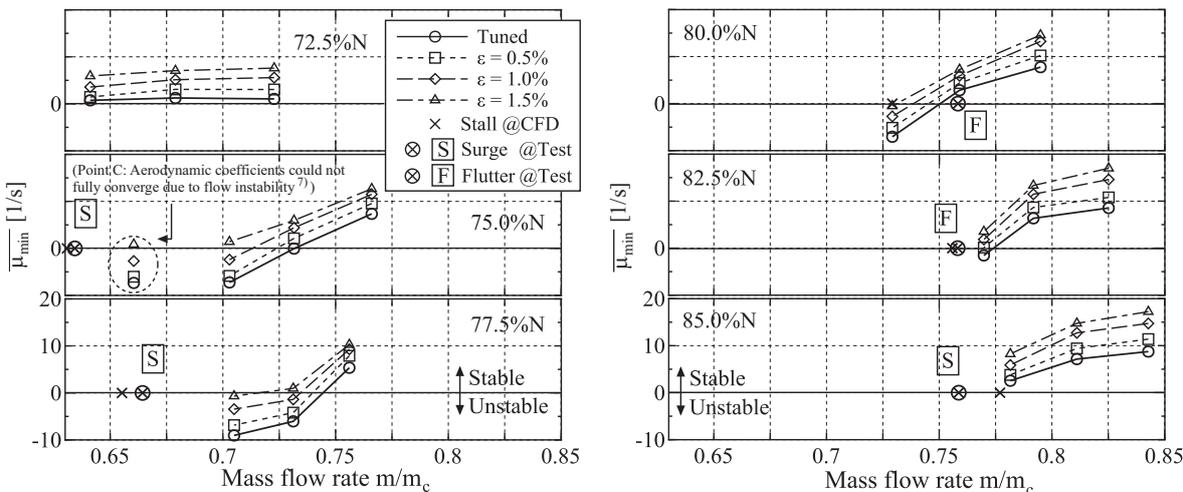


Fig. 4 Change in averaged minimum damping rate due to frequency mistuning on each rotational speed

合、除いた場合でそれぞれ0.47%, 0.17%であった。他の二者でもおおよそ0.2%程度であった。

一方、モード質量に関するばらつきの情報が公開されているものは少ないが、これもMayの計測によると標準偏差で約17%であった。ばらつきのオーダーが固有振動数と大きく異なっているのはおそらく計測手法に起因するものであろう。一般にモード質量、モード剛性は周波数応答関数のピーク近辺の値と減衰率から算出するため、構造減衰の非常に小さいリスクでは計測の不確かさが非常に大きくなると考えられる。また、翼固有振動数とモード質量のばらつき同士の相関係数は

$$\text{Cov}(\delta, \delta_M) / \sqrt{V(\delta)V(\delta_M)} = -0.25$$

と小さいことがわかった。

以上の調査より、本研究では固有振動数、モード質量のばらつきを独立な確率変数(つまり、共分散なし)として扱っても差し支えないと判断し、遷音速ファンのようなリグで標準的であると考えられる値から非常に大きな値までを感度解析の対象とした。表3、表4に、本研究のテストケースを1Fモードの固有振動数、モード質量に対する標準偏差としてそれぞれ示す。固有振動数に対しては $\epsilon = 0.2, 0.5\%$ を標準的な値の範囲と考え、そ

れから離れた値である $\epsilon = 1.0, 1.5\%$ を大きなミスチューン量として設定する。モード質量についてはMayの計測と同レベルの $\epsilon_M = 15\%$ 、その倍の $\epsilon_M = 30\%$ を設定する。モード質量の標準偏差の大きさは非現実的かもしれないが、Mayの計測結果を尊重し、本研究での感度調査範囲に設定した。なお、ここに示している値は正規乱数の標準偏差であるので、この値のおよそ3倍近くのずれをもつ翼まで生じうることに注意されたい。

3. 減衰率とフラッター境界への影響

3.1 確率密度分布と振動数、モード質量の影響

まず、翼構造特性の確率的なばらつきを導入した場合に、フラッターモードの減衰率がどのような確率分布を示すかを評価し、翼固有振動数およびモード質量それぞれの影響について考察する。

図3に、異なるモード質量、翼固有振動数のミスチューン量 ϵ_M に対する1Fモード群最小減衰率の累積確率分布と、平均値 $\overline{\mu_{\min}}$ のチューン系からの変化を、80%回転数作動点Cについて代表として示す。図3の累積確率分布において、どの ϵ_M に対しても μ_{\min} が大きくなると分布は全体的に右寄りにシフトしていることから、異なるファン間の個体差が大きくなるとともに、系が全

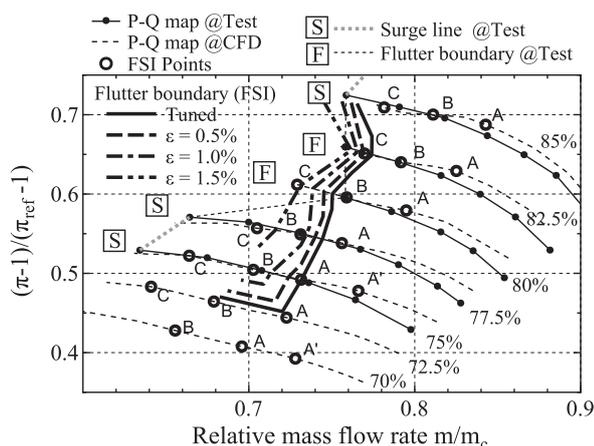


Fig. 5 Flutter boundary obtained from averaged minimum damping rate

体的に安定化することがわかる。また、モード質量の影響は主に振動数のばらつきが低い場合に限られている。このことは、図3に示すと $\bar{\mu}_{\min}$ の関係からも確認できる。以上より、モード質量のばらつきが大きい場合でもその影響は限定的であり、固有振動数のばらつきでほぼ系の安定化挙動が把握できると考えて差し支えないといえる。そのため、以降の議論では翼固有振動数のばらつきのみを考慮し、モード質量は $m=0$ とした結果を用いる。

3.2 作動点ごとの減衰率への影響

図4に、各回転数におけるミスチューニング量が平均最小減衰率に及ぼす影響をファン流量に対して示す。なお、ここでは $\epsilon=0.2\%$ のケースはほとんどチューン系と同じ値であったため除外している。まずチューン系のケースでは、フラッターが生じない72.5%回転数では失速側でも減衰率は横ばいで翼振動は安定である。また、75.0% ~ 82.5%回転数では流量に対して急激に減衰率が低下するようになり、その近辺で正減衰から負減衰に転じることでフラッターが発生する。ミスチューニング量を大きくしていくと、どの回転数でも全体的に減衰率が大きくなっていく。しかし、標準的な量であると考えられる $\epsilon=0.5\%$ とその倍の大きさである $\epsilon=1.0\%$ までは mismatchesが見られた75%回転数で依然としてフラッターが生じる結果となっている。これより、標準またはその倍程度のミスチューニング量による安定化効果は、本対象におけるフラッター境界付近の急激な空力減衰低下を打ち消すほどの効果はないといえる。

3.3 フラッター境界の変化

図5に、図4中の減衰率と流量の関係に基づき、それぞれのミスチューニング量に対してフラッター境界の位置を算出し、ファン特性マップ上に描いたものを示す。ミスチューニングを増すと、高流量側から低流量側にむけて、平均的なフラッター境界は移動していく。しかし、 $\epsilon=1.0\%$ までは依然としてフラッター境界が高流量側に位置している。

さらに、比較的ばらつきの大きい $\epsilon=1.0\%$ の場合について、フラッター境界の mismatchesが見られた75.0%、77.5%回転数作動点Bにおける「フラッターが発生する確率」(累積確率分布における $\mu_{\min}=0$ 切片)は、それぞれ0.925、0.862であり、非常に高くなっていることが確認できた。

以上のことより、フラッター境界の位置は、ミスチューニング量が製造公差や計測器の取り付けで生じる程度であればほとんど影響を受けないといえる。さらに、ディスクは十分剛でありモード解析への影響が小さいこと、構造減衰が小さく影響を無視できることから、翼構造の数値的取扱いは妥当であると考えられる。

フラッターの予測において構造モデル以外の要因は、運動方程式Eq. 中で空気力の項のみである。改めて図4に示した通り、75.0%、77.5%回転数では空力減衰がフラッター境界前後で急激に低下し、負に転じている。しかし、この挙動は75.0%、77.5%回転数でフラッターが発生しなかったこととは矛盾する。したがって、チューン系の解析でフラッター境界が75.0%、77.5%回転数でも検出された原因は、構造特性の不確かさに起因した偶発的なものではなく、自励空気を算出する際に用いた流体解析に起因したものである可能性が高い。

4. 固有値分布とモード形状の変化

ここまでは、減衰率やフラッターの発生に着目してミスチューニングの影響を評価してきた。本章からは、ばらつきを含む場合における系の固有値構造や振動形態の変化について着目し、実際に発生しうるフラッターの特徴を、理想的な場合と対比して結果を分析する。ここで得られる知見は、翼振動の計測に関わるとき、即ち実際のリグ試験におけるフラッターの計測計画を立てる際、取得されたデータを評価する際に重要となる。なお、本章では80%回転数作動点Cを代表として取り上げる。

4.1 固有値分布の定性的な変化

図6に、各ミスチューニング量のケースについて、モンテカルロ法で用いた全サンプルに対する固有値分布を、振動数と減衰率を用いた二次元ヒストグラムに可視化して示す。なおチューン系の場合には、各固有値成分はたった一点のみで値を持ち、それらは翼枚数によって定まる隣接翼間位相差一定のTraveling Wave Mode (TWM) のいずれかに対応する。

ミスチューニング量が最も小さい $\epsilon=0.2\%$ の場合には、各固有値成分はほとんど良好に分離しており、固有値分布は限りなくチューン系に近いものとなっている。ここからばらつきが大きくなっていくと、徐々に分布に定性的な変化が現れてくる。 $\epsilon=0.5\%$ のケースでは、不安定なモードについて、各ピークの間部分に位置する固有値をもつモードが現れるようになる。

さらにばらつきを $\epsilon=1.0\%$ 、 1.5% と大きくしていくと、固有値分布が縦方向に全体的に縮小していくとともに、

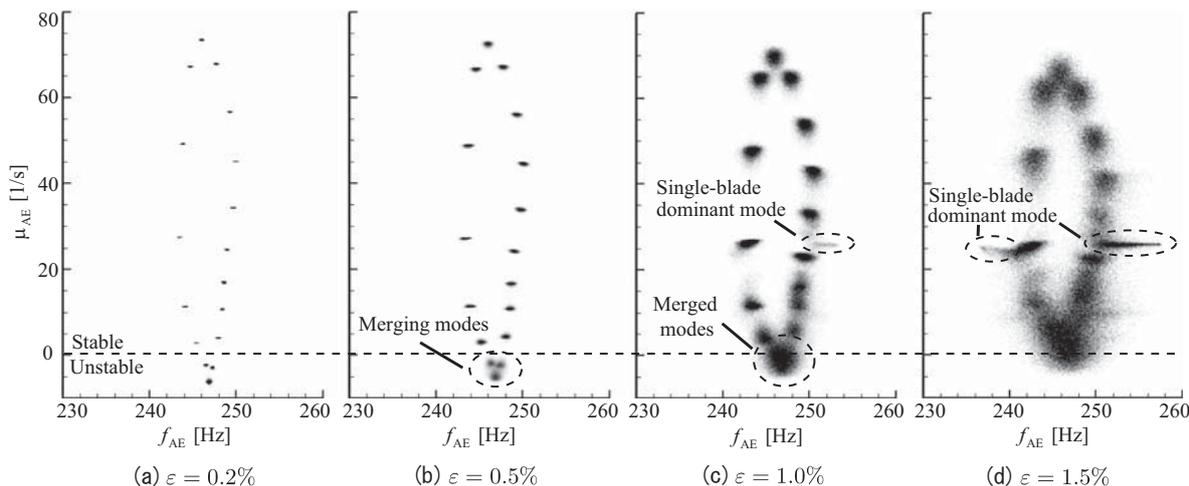


Fig. 6 Histogram of aeroelastic eigenvalues in the 1F mode family (80%N, OP: C)

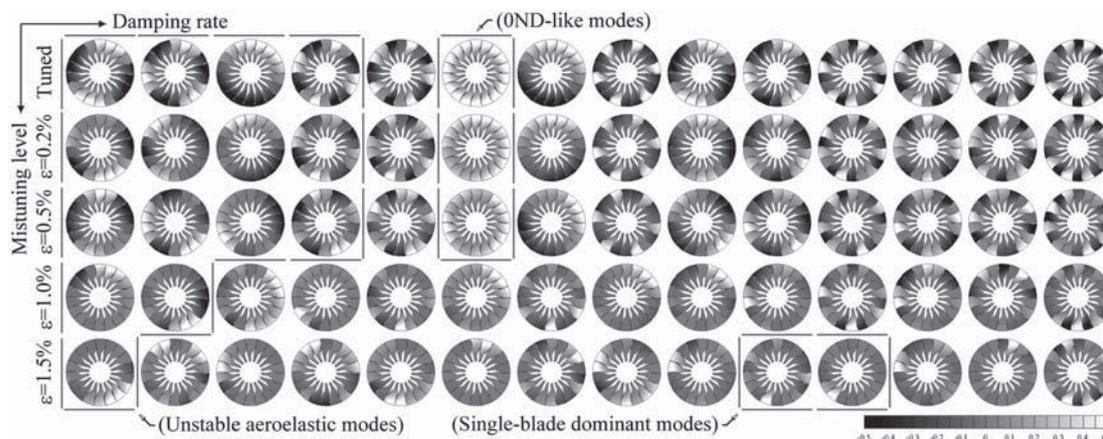


Fig. 7 Examples of aeroelastic modeshapes in the 1F mode family with different mistuning levels (14 modes from the lowest damping, real part, only aeroelastic modes for $\text{Im}(\lambda) > 0$ are shown)

分布に定性的な変化が現れる。これらでは、元々不安定であった固有値成分は完全に融合し、大きなスポット領域を形成している。さらに、 $\mu_{AE} = 2\pi [1/s]$ 付近にばらつきの小さい場合には存在しない新たな集合が形成されるようになる。この減衰率は、翼列中の1枚の翼が他の翼と全く独立に振動する（例えば、Eq. で q_1 以外を0とおく場合）の減衰率に相当するため、単一の翼の運動が支配的なモード（Single-Blade Dominant Mode, SBDM）と呼ぶことにする。

4.2 特定の個体中のモード形状の俯瞰

このように空力弾性モード固有値分布に見られた定性的変化が、どのようにモード形状と対応しているかを、特定の個体に着目してモード形状を俯瞰する形で示す。図7は、チューン系と各ばらつきケースでのモード形状を、減衰率の低い順に左から並べたものである。ここでは視認性の都合上、 $\text{Im}(\lambda) > 0$ であるもののうち、減衰率の下位14個を、最大振幅の翼変位の実部が1となるように示している。

左側に位置するのは不安定なモードであり、ばらつきを大きくするとその数は減少していく。また、チューン系では節直径2であったフラッターモード形状が変化し、

振幅の高い領域に周方向の偏りが生じる。この傾向は他のモード、例えば節直径0に近いモード形状にも共通してみられる。さらに、固有値同士の確率的な融合が激しい $\epsilon = 1.0, 1.5\%$ のケースでは、ほとんどのモードで周方向に振幅の高い位置が偏在しており、ミスチューン系に特徴的な“mode localization”が顕著にみられる。

$\epsilon = 1.5\%$ のケースでは、2つのSBDMが生じている。これらのモードはmode localizationのかなり終局的な場合で、空気力による翼間の連成からほとんど外れた翼が該当しているのだと考えられる。

4.3 標準的なばらつき量の場合のモード形状

以上のように全体のモード形状を俯瞰したので、個別の重要なモード形状をより詳細に見ていく。モード形状を分析するうえで重要な視点は、そのモード形状がどれだけチューン系の特性を引き継いでいるかであると考えられる。ミスチューン時のモード形状がどのようなTWMから構成されるかは、各TWMに対する変位ベクトル s と、TWMを縦に並べた複素モード形状行列 W を用い、以下の関係を用いて算出できる。ここで H は共役転置行列を表す。

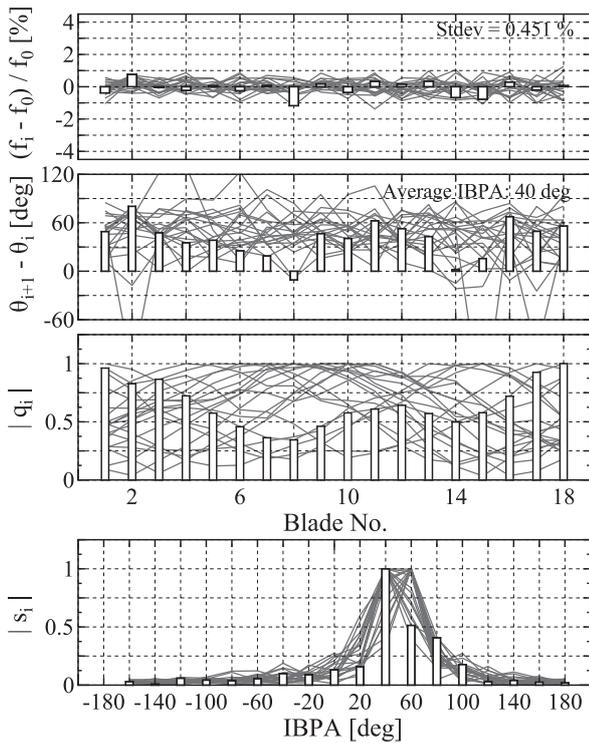


Fig. 8 Typical aeroelastic modeshape of the flutter mode (80%N, OP: C, =0.5%)
Solid bars: fan No. 57, thin lines: other 20 fans

$$q = Ws, \quad s = [s_1 \quad \dots \quad s_{N_b}]^T,$$

$$W_{jk} = \exp \left\{ \frac{2\pi i(j-1)(k-1)}{N_b} \right\}, \quad W_{jk}^{-1} = W_{jk}^H / N_b$$

図8に、=0.5%のフラッターモードについて各翼のミスチューンパターン、隣接した2枚の翼から算出した局所的な翼間位相差 $\theta_{i+1} - \theta_i$ 、各翼の振幅 $|q_i|$ 、そして各TWMの振幅 $|s_i|$ を示す。議論は棒で示したデータについて行うが、他の20サンプルの結果も個体間のばらつき度合いを示すため示してある。

図8では、局所的な翼間位相差は-10 ~ 80 [deg]の範囲で大きくばらついてしまっており、標準的なミスチューン量でも大きく影響を受けることがわかる。しかし、TWMの振幅 $|s_i|$ を見ると翼間位相差40 [deg]のものが支配的であり、これはチューン系でのフラッターモードに対応する。また、変位をTWMに変換すると翼間位相差や振幅に見られていたサンプル間のばらつきが減り、どの個体も翼間位相差40または60 [deg]が支配的であることがわかる。ここからいえるのは、標準的なミスチューニング量であっても特定の2枚の翼のみから算出された翼間位相差にはミスチューニングの影響が大きく現れるため、フラッターに支配的なTWMを正確に知るには全ての翼の振幅と位相 (q の複素数表現) を求めたのち、TWMに変換することが望ましいということである。

4.4 非常に大きなばらつきに対するモード形状

図9に、=1.5%のケースに対するフラッターモードを示す。この個体は図7で示したものと同一である。翼振幅の分布を見ると翼4 ~ 10までの翼の振幅が大きく、

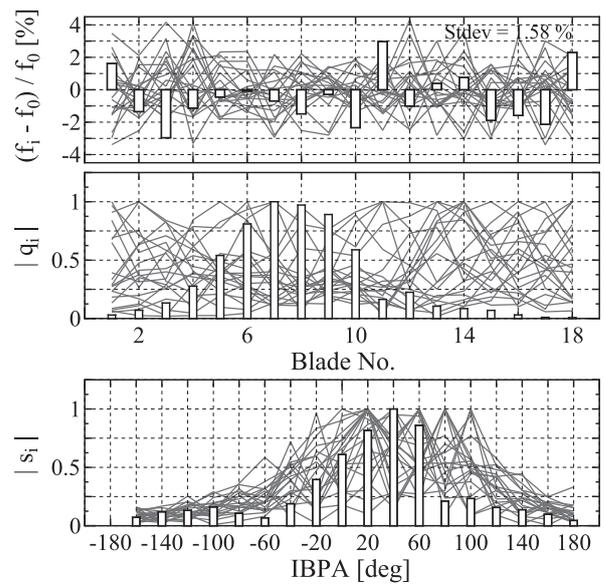


Fig. 9 Typical aeroelastic modeshape of the flutter mode (80%N, OP: C, =1.5%),
solid bars: fan No. 720, thin lines: other 20 fans

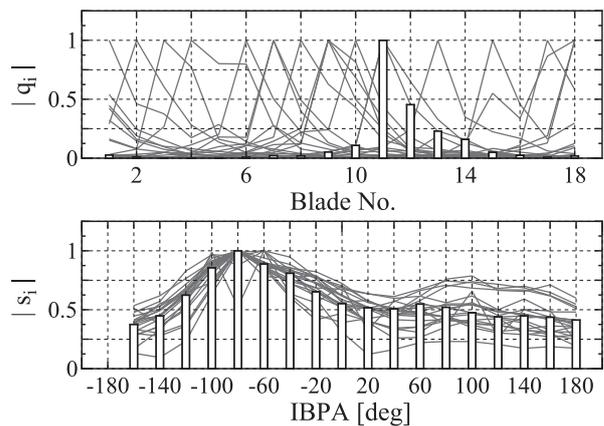


Fig. 10 Typical aeroelastic modeshape of the single-blade dominant mode (80%N, OP: C, =1.5%),
solid bars: fan No. 720, thin lines: other 20 fans

ほかは殆どモードに参加していない。ミスチューンパターンを見ると、翼1 ~ 3, 10 ~ 11の間で翼の振動数が急激に変化している。この周方向の急激な振動数変化が隣接翼間の空力的連成を弱めることで、翼4 ~ 10が部分系のように振舞っているのではないかと考えられる。このようにモード形状が部分的に非常に高い振幅をもつことは、全周の翼が均一に励振されるチューン系のフラッターとは全く様子が異なっている。いっぽう各TWMの寄与を見ると40 [deg]を中心に幅広い成分が関わっており、最も寄与の大きなTWMについては=0.5%のものに比べ個体差が大きくなっている。

最後に、チューン系では見られないSBDMのモード形状を図10に示す。このモードでは翼11の振幅が突出して高く、他の翼はほとんどモードに参加していないことが改めて確認できる。他の個体に対しても振幅最大以外の翼では振幅が小さくなるという、同様の傾向が見いだせ

る。このような場合には、 $|s_i|$ の分布から見て取れるように、ほとんど全てのTWMが空力弾性モードの形成に寄与している。

5. 結論

遷音速失速フラッター解析における試験結果と解析結果の mismatches の原因を模索する取り組みの一環として、ミスチューニングがフラッター特性に与える影響を統計的に定量化し、フラッター境界の変化と空力弾性モードの特徴について議論した。得られた知見を以下にまとめる。

ミスチューニングによる振動特性の変化について、モード質量の感度は小さく、翼固有振動数のばらつきが支配的な影響を及ぼす。

製造公差や計測器の取り付けで生じる程度のミスチューン量では、フラッター境界はほとんど変化せず、低回転数側の mismatches も依然として残っていた。そのため、この mismatches は現実の構造特性の不確かさに起因した偶発的なものではなく、自励空気を算出する際に用いた流体解析に起因したものである可能性が高い。

ミスチューン量を増加させた際の系の固有モード構造の変化として、まずフラッターモードを含む低減衰のモードの融合が生じたのち、他翼との空気力による連成が小さい、単翼の振動が支配的なモードが現れる。

ミスチューン量が標準的な場合にもフラッターモード形状はチューン系のものとは大きく異なる。特に隣接翼間の位相差は翼ごとに大きくばらついてしまうため、精度の良い計測には全ての翼を観測することが望ましい。

謝辞

本研究はJSPS科研費14J10312の助成を受けた。また、IHIIはCEFS1の開発に際し、経済産業省の航空機・宇宙産業イノベーションプログラム基本計画による「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構からの助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- Platzer, M. F. and Carta, F. O. E., AGARD Manual on Aeroelasticity in Axial-Flow Turbomachines Volume 1: Unsteady Turbomachinery Aerodynamics, AGARDograph No. 298, Vol. 1, (1988)
- Jeers, J. D. and Meece, C. E., F100 Fan Stall Flutter Problem Review and Solution, Journal of Aircraft Vol. 12, No. 4 (1975) pp. 350-357.
- Stargardter, H., Subsonic/Transonic Stall Flutter Study Final Report, NASA-CR-165256, Pratt and Whitney Aircraft Group, (1979)
- Isomura, K. and Giles, M. B., A Numerical Study of Flutter in a Transonic Fan, Journal of Turbomachinery, No. 120(3) (1998) pp.500-507.

Kontos, K., Weir, D., and Ross, D., Quiet High Speed Fan II (QHSF II): Final Report, NASA CR-2012-217451, (2012)

立石敦, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 流体構造連成とシステム同定による複合モード翼列フラッター解析手法, 日本ガスタービン学会誌 Vol. 44, No. 4 (2016) pp. 282-291.

立石敦, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 青塚瑞穂, 室岡武, 遷音速ファンの部分回転数時に失速点近傍で生じるフラッターのFSI解析, 日本ガスタービン学会誌 Vol. 44, No. 4 (2016) pp. 292-301.

Vahdati, M., Smith, N. H. S., and Zhao, F., Influence of Intake on Fan Blade Flutter, Journal of Turbomachinery, No. 137(8) (2015) 081002.

Vahdati, M. and Cumpsty, N., Aeroelastic Instability in Transonic Fans, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 138(2) (2015) 022604.

Pierre, C., and Murthy, D. V., Aeroelastic Modal Characteristic of Mistuned Blade Assemblies: Mode Localization and Loss of Eigenstructure, AIAA Journal, Vol. 30, No. 10 (1992) pp. 2483-2496.

Srinivasan, A. V., Flutter and Resonant Vibration Characteristics of Engine Blades, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 119(4) (1997) pp. 742-775.

Castanier, M. P. and Pierre, C., Modeling and Analysis of Mistuned Bladed Disk Vibration: Status and Emerging Directions, Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 2 (2006) pp. 384-396.

Salles, L. and Vahdati, M., Comparison of Two Numerical Algorithms for Computing the Effects of Mistuning of Fan Flutter, ASME Paper GT2016-57324, (2016)

Murooka, T., Goto, S., Mizuta, I., and Kodama, H. New Concept Design and Development of an Advanced Transonic Fan Rotor, IGTC2007 Tokyo, TS-053, (2007)

Kielb, R. E., Feiner, D. M., Griffin, J. H., and Miyakozawa, T., Flutter of Mistuned Bladed Disks and Blisks with Aerodynamic and FMM Structural Coupling, ASME Paper GT2004-54315, (2004)

Kielb, R. E., Hall, K. C., Hong, E., and Pai, S. S., Probabilistic Flutter Analysis of a Mistuned Bladed Disk, ASME Paper GT2006-90847, (2006)

May, M., Model Updating for the Aeroelastic ROM of a Modern Blisk, Proceedings of the 13th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, I13-S13-7, (2012)

Beirow, B., Giersch, T., Kuhlhorn, A., and Nipkau, J., Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 136(6) (2014) 062507.

Schnell, R., Lengyel-Kampmann, T., and Nicke, E., On the Impact of Geometric Variability on Fan Aerodynamic Performance, Unsteady Blade Row Interaction, and Its Mechanical Characteristics, Journal of Turbomachinery, Vol. 136(9) (2014) 091005.

Siボンドコート層の融解・凝固現象に基づく Siを含むセラミックス基材上の耐環境コーティング組織の変化

Change of Microstructure in Environmental Barrier Coating on Si-contained Ceramic Substrate After Melting and Solidification of Si bond Coat Layer

新井 優太郎^{*1}
ARAI Yutaro

香川 豊^{*2}
KAGAWA Yutaka

キーワード：耐環境コーティング (EBCs), セラミックス, 熱曝露, Siボンドコート, SiC/SiC
Key words: Environmental Barrier coatings (EBCs), Ceramics, Heat exposure, Si bond coat, SiC/SiC

1. 緒言

近年, 軽量で耐熱性を兼ね備えた連続SiC繊維強化SiCマトリックス複合材料(以後, SiC/SiCと記述する)の航空機用ガスタービンエンジンへの適用が実用化の段階に達した。SiC/SiCをガスタービンエンジン部材として利用する際には, 高温燃焼環境の水蒸気流や火山灰の主成分であるCMAS (Calcium-Magnesium-Almino-Silicate) など外部からの飛来物からSiC/SiCを守る耐環境コーティング (EBCs: Environmental barrier coatings) と呼ばれるコーティングを施すことが不可欠である。一般的なEBCsはトップコート層及び基材であるSiC/SiCとトップコート層の間にコーティングされるボンドコート層から構成される。EBCsのトップコート層には酸化物系セラミックスが適用され, ムライトやBSAS (Barium-Strontium-Almino-Silicate) 及びYb硅酸化物などが有力な候補として考えられている。

このような熱膨張係数が $5.5 \sim 8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ である酸化物系セラミックスと熱膨張係数が $4.5 \sim 5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ であるSiC/SiC基材の熱膨張係数のミスマッチにより酸化物トップコート層内には面内に引張の熱応力が冷却時に発生する。これを小さくし, トップコート層中でのクラックの発生を防止し, コーティング層の基材からの剥離防止のために熱膨張係数が $\sim 4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ であるSiのボンドコート層がSiC/SiCと酸化物セラミックス層の間に設けられることが普通である。

Siボンドコート層の熱曝露による変化に関しては, トップコート層のクラック発生やトップコート層を通じた酸素の拡散によるSiO₂の生成とクリストバ

ライトへの相変態, ムライト層の分解とSiとの反応などの化学的反応に焦点が当てられている。実使用環境下で, EBCsの一部が剥離すると, Siボンドコート層がSiの融点以上の温度に曝される危険性がある。Siボンドコート層自体に関しては耐熱性向上のためにHfO₂等の添加も考えられているが, 本質的にSiの融解は防ぐことができない。この場合, Siが使用時に熔融状態になり, その後凝固するという現象が発生すると予想される。すでに, Siを含まないSiC/SiCを基材としたときにはSiの熔融・凝固に起因した損傷が発生することが明らかになっている。

SiC/SiCの製造プロセスはポリマー含浸焼成法 (PIP: Polymer Impregnation and Pyrolysis), 化学気相蒸着法 (CVI: Chemical Vapor Infiltration) 及びSi溶融含浸法 (MI: Melt Infiltration) の3種類の異なる方法に大別され, Siの溶融含浸法で作製した場合にはSiC/SiCのマトリックス中にSiを含む材料になる。この場合, ボンドコート層のSiがSiの融点の1414以上になると, ボンドコートのSi及びSiC/SiC中のSiともに熔融状態となる。

しかし, このような場合にSiボンドコート層中に生じる現象についての報告は行われていない。本研究では, 基材として10 ~ 20vol%のSiを含むSi溶融含浸法により作製されたSiC/SiCを模擬した材料である反応焼結SiC (以後, RB-SiCと記述する) を用いた。EBCsとしては, ムライトトップコート層, Siボンドコート層からなる典型的な系を用い, Siの融点以上の温度の短時間熱曝露により, Siボンドコート層の組織変化を調べた。

2. コーティング材料及び実験方法

直径12.7 mm, 厚さ2 mmのRB-SiC基材上にSiのボンドコート層を平均厚さ60 μm, ムライトトップコート層を平均厚さ240 μm減圧プラズマ溶射法によりコーティングした。これらのコーティング層は溶射法で作製されたものに特有なスプラット構造を持つものである。RB-

原稿受付 2017年1月4日

査読完了 2017年12月20日

*1 東京大学大学院工学系研究科大学院学生

*2 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学科

現 *1 東京工科大学片柳研究所, 特別研究員

現 *2 東京工科大学片柳研究所,
セラミックス複合材料センター

SiCはコバレントマテリアル(株)(現:クアーズテック(株))により製造され、コーティングされた材料は(株)超高温材料研究所から入手した。コーティング後のムライトトップコート層にはマッドクラックの生成が観察された。この現象は、ムライトの相変態に依存することが知られている。本実験では、予備的な実験において、マッドクラックの存在は、以後の熱曝露に影響を与えないことを確認してある。本研究においては、Siボンドコート層の組織変化に着目しているため、以下の文章中ではトップコート層の現象には触れないことにする。

コーティング後の材料のRB-SiC基材側を純度が99.96 at%の多結晶 Al_2O_3 板上に置き、電気炉を用いて大気中で熱曝露を行った。熱曝露時には炉内温度が1320 または1435 まで、20 /minで昇温し、1320 (Siの融点以下) または1435 (Siの融点以上) で2h保持した。その後、電気炉中で材料を室温まで冷却(炉冷)した。冷却速度は最大で1435 または1320 から1000 までの間の-20 /minであり、室温までの冷却には全体で4~6hを要した。また、一部の実験では保持時間を最大50hまで変化させた。熱曝露後の縦断面の観察及び分析には材料の縦断面を機械的に切断後、 $0.5\mu m$ のダイヤモンドスラリーによる最終研磨後、洗浄したものを走査型電子顕微鏡(SEM)観察に用いた。SEM観察用と同じ試験片を用い、Siボンドコート層に対しては走査間隔 $0.5\mu m$ で電子線後方散乱回折(EBSD)を加速電圧20kV、エミッション電流 $10\mu A$ の条件で行い、結晶方位の同定を行った。熱曝露後のRB-SiCの表面に対して電界放出型走査型電子顕微鏡を用いてエネルギー分散分光分析(EDS)による組成分析を行った。

3. 実験結果及び考察

図1は1435 で熱曝露した後のRB-SiC基材側面及び底面のSEM写真である。RB-SiC表面には異なる寸法の粒子状のものが付着していることがわかる。この部分を詳しく観察したものが図1 (c) である。実験に用いたRB-SiCは -SiC粒子がSiで結合されている微細構造を持つものである(図2参照)。表面に観察される数 μm の粒子が分布している部分をつないでみたときに囲まれるところは -SiC粒子の大きさ(直径10~100 μm)程度になる。このことから、数 μm の粒子状の付着物はRB-SiC中のSiの部分に優先的に生成していると考えられる。数は少ないが数 μm の粒子の中に、直径が数10 μm 程度の粒子状のものも観察される。さらに、RB-SiC表面に直径が50~100 μm (平均~100 μm)程度の粒子状のものが数個付着していた。底面の方が側面よりも直径が大きな粒子がより多く観察される傾向にあった。本研究の温度範囲で液相になるものは大気中、一気圧下で融点が1414 のSiに限定される。従って、表面に観察される流出物はボンドコート層に用いたSiあるいはRB-SiC基材中のSiが溶融し、RB-SiCの表面に流出し、

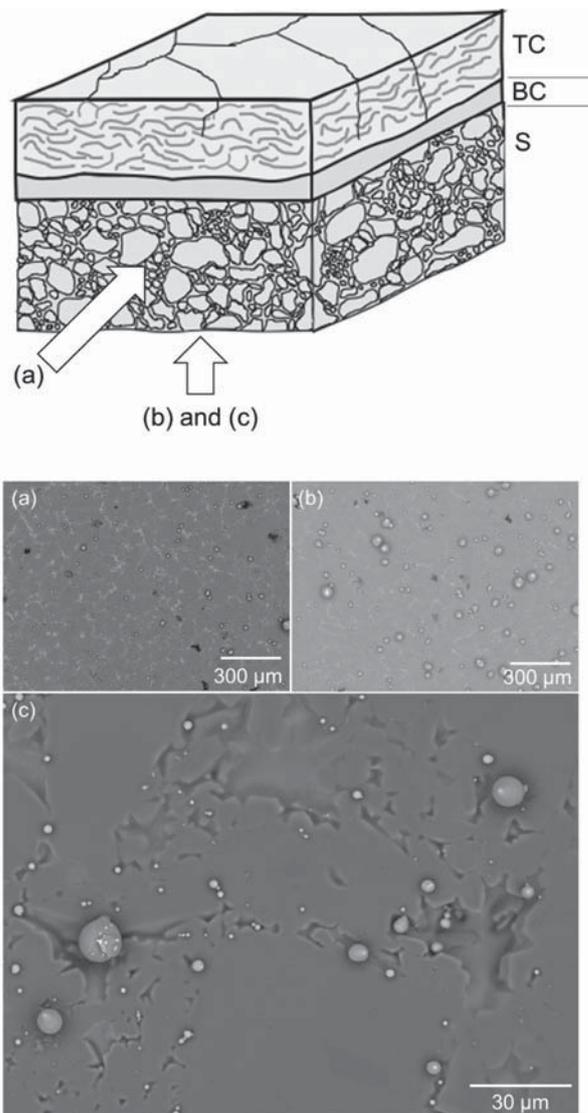


Fig. 1 SEM images of RB-SiC substrate surface after heat exposure at 1435 (backscattered electron image): side surface, bottom surface, and distribution of particles on Si phase in RB-SiC (an enlarged view of (c)) (TC: Mullite topcoat layer, BC: Si bond coat layer, S: RB-SiC substrate)

粒子状となり表面に付着しているものと考えられる。

熱曝露前後のEBCsと基材の断面組織を示したものが図2 (a) ~ (c) である。Siの融点以上の温度である1435 で熱曝露を行った場合には、溶射時に生じたSiボンドコート層のスプラット構造が消滅し、バルク状の緻密なSiとなっている(図2 (a) ~ (c), Fig. 4 (a-1) 及び (b-1) を参照)。さらに、Siボンドコート層自体の厚さが薄くなるとともに、厚さが大きくばらついていく。Siボンドコート層の厚さの分布を調べるために、 $1280\text{ pixel} \times 1040\text{ pixel}$ である倍率が500倍のSEM写真を用い、コーティング層の面内に垂直な方向に5 μm 間隔で均一な平行線を引き、RB-SiC基材面とムライトトップコート層の距離を測定した。図3は熱曝露前後のSiボンドコート層の厚さの分布を示したものである。

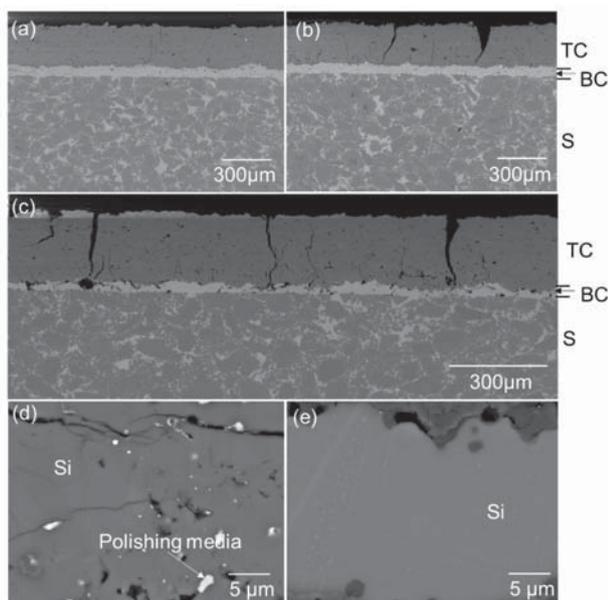


Fig. 2 Cross-section of EBCs coated RB-SiC (backscattered electron image): as-coated, after heat exposure at 1320 and after heat exposure at 1435. (TC: Mullite topcoat layer, BC: Si bond coat layer, S: RB-SiC substrate) and show enlarged view of Si bond coat layer after heat exposure at 1320 and 1435, respectively.

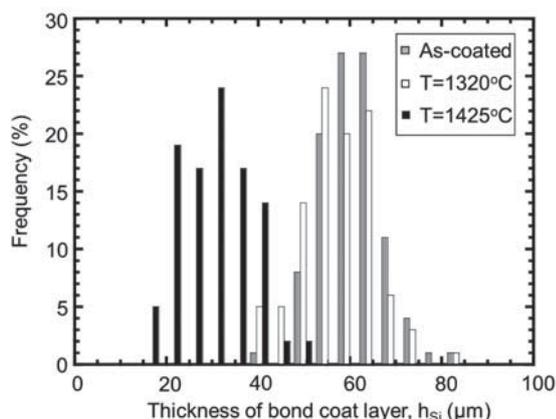


Fig. 3 Thickness distribution of Si bond coat layer before and after heat exposure (T: heat exposure temperature)

1435 で熱曝露を行った場合には、溶射後のSiボンドコート層の厚さ（平均60 μm）が明らかに減少し、平均で30 μmになっている。これに対して、1320 の熱曝露では、平均厚さが55 μmとわずかに減少しているのみである。熱曝露後のSiボンドコート層の組織（(a-1) (b-1)）及びEBSDの結果（(a-2) (b-2)）を示したものが図4である。Siの融点以下の1320 の熱曝露では、Siの組織は微細な結晶粒が大多数を占め、いくつかの結晶粒のみが大きく成長している。また、Siボンドコート層とRB-SiC中のSiの境界が結晶方位の差として明瞭に観察される。一方、1435 で熱曝露した場合にはボンドコート層中のSiとRB-SiC中のSi結晶の境界がなくなり、熱曝露前に両者の界面であった部分とは無関係に界面であった位置を含んだ大きなSiの結晶粒が生成している。このと

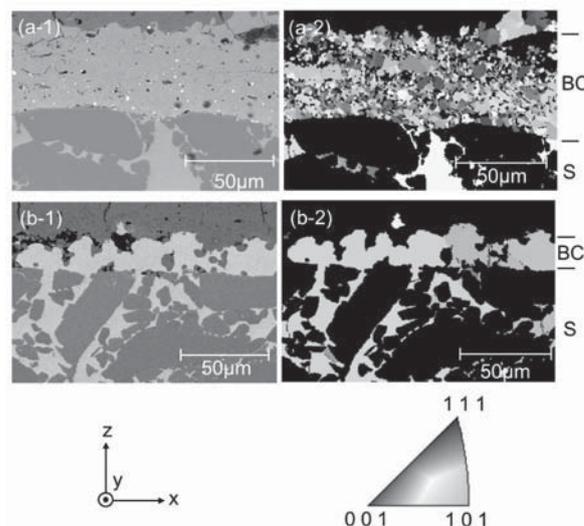


Fig. 4 SEM microstructure (left, backscattered electron image) and inverse pole figure maps (right) in Si bond coat layer after heat exposure at 1320 (a-1) (a-2) and 1435 (b-1) (b-2) (BC: Si bond coat layer, S: RB-SiC substrate)

き、EBSDの結果より、生成したSi結晶粒の方位はランダムであることがわかる。この結果よりSiの融点以上の温度の熱曝露後にはRB-SiC中のSiとボンドコート層中のSiが融解・凝固したために合体し大きな結晶粒を形成したことがわかる。

特に、本実験では1435 の熱曝露温度から室温までの冷却過程は急冷状態ではないために、Siの結晶粒は凝固過程で大きく成長することができたと考えられる。熱曝露前後の付着物周囲のEDXの結果から、付着物の部分からSiとOが検出され、RB-SiC基材の表面からはSi, C, Oが検出された。この事実は、熱曝露時にはRB-SiC表面のSi及びSiCともに酸化膜で覆われていたことを示している。実験条件である1435 では、大気中ではSi及びSiCは大気中の酸素と反応してSi () + O₂ (g) SiO₂ () (G₀ = -609 kJ/mol) 及びSiC (s) + 3/2O₂ (g) SiO₂ () + CO (g) (G₀ = -551 kJ/mol) の反応を生じ、Si及びSiC表面ともにSiO₂膜が形成されると考えて良い¹⁾。大気中での熱曝露を行ったため、SiO₂が分解する酸素分圧P_{O₂}であるP_{O₂} ~ 10⁻¹²Pa¹⁾を下回ることが出来る²⁾。SiCの大気中における1300 , ~ 13hの熱曝露によりSiCの表面にCOの発生に伴うSiO₂の気泡の発生が確認されている³⁾。しかし、本研究においては球状のSiが基材表面に存在するのみであり、同様のSiO₂膜中の気泡の発生は確認されなかった。

Siは温度変化による熱膨張に加えて、融解・凝固に伴い大きな体積変化を生じることが知られている。本実験では、RB-SiC上のSi及びSiC表面には酸化により生じたSiO₂が生成しており、Siは酸化膜のSiO₂が破られない限り表面に流出することはない。RB-SiCのSiあるいはSiC上に生成したSiO₂は1414 以上（例えば、1435 近傍）

では粘度 $\sim 3.05 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の粘性体²⁵であると報告されている。SiO₂膜で覆われたSi中に大きな体積膨張が発生すれば、SiO₂の弱い部分あるいは厚さが薄い部分からSiが流出することが考えられる。この理由から、実験で観察された数 μm のSi粒子はRB-SiC中のSiの部分に沿って生成したと考えられる。SiO₂の破壊が大きく生じた部分ではSiがSiO₂表面に流出し、大きく成長したものであると推測される。濡れ性の悪い面の表面に液体が存在するときには球状粒子になる²⁶。RB-SiC表面のSiとSiCがともにSiO₂膜で覆われている場合、SiとSiO₂の気中での1430における濡れ角度は ~ 90 度であり²⁷、濡れ角が大きくなり、表面に粒子状として存在したものと考えることができる。ここで、SiがSiO₂膜を破壊する条件について考えると、熱曝露試験中の昇温過程時にSiの融点に達してSiが溶融する時、Siの融点以上における保持中及び降温時にSiが凝固する時、の3つの場合が考えられる。この場合、固体であるSiの密度は室温付近(25)で 2.33 g/cm^3 であるのに対し、液体の密度は1414で 2.57 g/cm^3 である。従って、Siが融解する時にはSiに10%の体積収縮が発生し、RB-SiC中のSiがRB-SiC表面から流失するとは考えにくい。また、EDXの結果からRB-SiCの表面はSiO₂で覆われているのでRB-SiC側からSiO₂膜を破壊しSiが表面に流出することは出来ないと考えることが妥当である。さらに、SiO₂膜は1414では粘度が $\sim 3.05 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の粘性体²⁵なのでSiの収縮に伴っても変形に追従しSi中での空洞形成が妨げられると考えることができる。

このSiの10%の体積収縮時にRB-SiC中のSiが体積収縮するために、溶融状態となったボンドコート層のSiの一部はRB-SiC中のSiC粒子間のSiに発生するキャピラリー力²⁸によりRB-SiC中のSiの方向に移動する。この結果として、Siボンドコート層の厚さが変化したと考えることができる。このとき、ムライトトップコート層とSiボンドコート層自体の重量も溶融SiをRB-SiC側に移動させるために寄与するはずである。これが、底面のほうが側面よりも大きな粒子が見られる原因であると考えられる。

のSiの融点以上における保持中に関しては熱曝露の保持時間を2hから50hまで増加させてもRB-SiCの表面で観察されるSiの流出挙動に変化が見られなかったことから、熱曝露の保持中にSiが流出するとは考えにくい。これに対して、のSiが凝固する場合には10%の体積膨張が発生する。このときの温度は ~ 1414 ²⁹であり、RB-SiCのSiの部分に覆っているSiO₂膜に対してRB-SiC中の溶融状態になったSiが体積膨張により膜面を押し破る力が発生すれば、変形し一部が破損すると考えられる。この破損した部分から体積膨張時にSiがRB-SiC上に生成したSiO₂を通りその表面に流出するものと考えられる。また、高温での保持時間を変化させてもSiの流出現象が変化しなかった実験結果を定性的に説明することが出来る。

4. 結言

基材にSiを含むRB-SiC上にSiボンドコート、ムライトトップコート層を設け、Siの融点以上の温度である1435と融点以下の1320における熱曝露前後の表面状態や断面組織を観察した。その結果、Siの融解・凝固に伴う特有の現象として、SiのRB-SiC基材表面への流出、Siボンドコート層の厚さの変化、基材中のSiとの一体化が見られた。従って、RB-SiCと同様に材料中にSiを含むSi溶融含浸法で作製した連続SiC繊維強化SiCマトリックス複合材料の基材に、EBCsとしてSiボンドコート層を用いる際には、ボンドコート層及び基材に含まれるSiの融解に起因した組織の変化に注意が必要である。

5. 引用文献

1. Spitsberg, J. Steibel, Thermal and environmental barrier coatings for SiC/SiC CMCs in aircraft engine applications, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, Vol. 1, No. 4 (2004) pp. 291-301.
2. B. T. Richards, H. N. G. Wadley, Plasma spray deposition of tri-layer environmental barrier coatings, *J. Eur. Ceram. Soc.* Vol. 34, No. 12 (2014) pp. 3069-3083.
3. K. N. Lee, Environmental barrier coatings for SiCF/SiC, in: N. P. Bansal, J. Lamon, Ceramic matrix composites, Wiley, The U. K. (2015) pp. 430-463.
4. H. E. Eaton, G. D. Linsey, Accelerated oxidation of SiC CMC's by water vapor and protection via environmental barrier coating approach, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 22, No. 14-15 (2002) pp. 2741-2747.
5. K. M. Grant, S. Krämer, J. P. A. Löfvander, C. G. Levi, CMAS degradation of environmental barrier coatings, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 202, No. 4-7 (2007) pp. 653-657.
6. R.T. Bhatt, S.R. Choi, L.M. Cosgri, D.S. Fox, K.N. Lee, Impact resistance of uncoated SiC/SiC composites, *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 476, No. 1-2 (2008) pp. 20-28.
7. K. N. Lee, D. S. Fox, J. I. Eldridge, D. Zhu, Upper temperature limit of environmental barrier coatings based on mullite and BSAS, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 86, No. 8 (2003) pp. 1299-1306.
8. C. V. Cojocar, S. E. Kruger, C. Moreau, R. S. Lima, Elastic modulus evolution and behavior of Si/mullite/BSAS-based environmental barrier coatings exposed to high temperature in water vapor environment, *J. Therm. Spray Technol.* Vol. 20, No. 1 (2010) pp. 92-99.
9. B. T. Richards, M. R. Begley, H. N. G. Wadley, Mechanisms of ytterbium monosilicate/mullite/silicon coating failure during thermal cycling in water vapor, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 98, No. 12 (2015) pp. 4066-4075.
10. B. T. Richards, S. Sehr, F. de Franqueville, M. R. Begley, H. N. G. Wadley, Fracture mechanisms of ytterbium monosilicate environmental barrier coatings during cyclic thermal exposure, *Acta Mater.* Vol. 103 (2016) pp. 448-460.

- K. N. Lee, R. A. Miller, N. S. Jacobson, New generation of plasma-sprayed mullite coatings on silicon carbide, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 78, No. 3 (1995) pp. 705-710.
- S. Kitaoka, T. Matsudaira, M. Wada, T. Saito, M. Tanaka, Y. Kagawa, Control of oxygen permeability in alumina under oxygen potential gradients at high temperature by dopant configurations, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 97, No. 7 (2014) pp. 2314-2322.
- M. J. Wagner, N. H. Forster, K. W. Van Treuren, D. T. Gerardi, Vapor phase lubrication for expendable gas turbine engines, *J. Eng. Gas Turbines Power.* Vol. 122, No. 2 (2000) p. 185-190.
- W. A. Sirignano, F. Liu, Performance increases for gas-turbine engines through combustion inside the turbine, *J. Prop. Power.* Vol. 15, No. 1 (1999) pp. 111-118.
- D. Zhu, Advanced environmental barrier coatings for SiC/SiC ceramic matrix composite turbine components, in: T. Ohji, M. Singh, Engineered ceramics current status and future prospects, Willy, The U. K., (2016) p.185.
- 栗原隆帆, 修士論文, (2014) 東京大学.
- 香川豊, 八田博志, セラミックス基複合材料, (1990) , pp. 42-68, アグネ承風社.
- F. Caradarelli, *Materials handbook*, Springer, The U. K., (2000) p. 339.
- J. N. Ness, T. F. Page, Microstructural evolution in reaction-bonded silicon carbide, *J. Mater. Sci.* Vol. 21, No. 4 (1986) pp. 1377-1397.
- G. Ervin, Oxidation behavior of silicon carbide, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 41, No. 9 (1958) pp. 347-352.
- 菱 J. E. Antill, J. B. Warburton, Active to passive transition in the oxidation of SiC, *Corros. Sci.* Vol. 11, No. 6 (1971) pp. 337-342.
- 夏 J. A. Costello, R. E. Tressler, Oxidation kinetics of silicon carbide crystals and ceramics: I, in dry oxygen, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 69, No. 9 (1986) pp. 674-681.
- 眞 A. H. Heuer, V. L. K. Lou, Volatility diagrams for silica, silicon nitride, and silicon carbide and their application to high-temperature decomposition and oxidation, *J. Am Ceram. Soc.*, Vol. 73, No. 10 (1990) pp. 2785-3128.
- 變 D. M. Mieskowski, T. E. Mitchell, A. H. Heuer, Bubble formation in oxide scales on SiC, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 67, No. 1 (1984) pp. C17-C18.
- 夔 G. Urbain, Y. Bottinga, P. Richet, Viscosity of liquid silica, silicates and alumino-silicates, *Geochimica Et Cosmochimica Acta.*, Vol. 46, No. 6 (1982) pp. 1061-1072.
- 變 D. Myers, *Surfaces, interfaces, and colloids*, VCH, Germany, (1991) pp. 87-110.
- 變 R. Sangiorgi, M. L. Muolo, D. CHATAIN, Wettability and work of adhesion of nonreactive liquid metals on silica, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 71, No. 9 (1988) pp. 742-748.
- 夕 W. -K. Rhim, K. Ohsaka, Thermophysical properties measurement of molten silicon by high-temperature electrostatic levitator: density, volume expansion, specific heat capacity, emissivity, surface tension and viscosity, *J. Cryst. Growth* Vol. 208, No. 1-4 (2000) pp. 313-321.

護衛艦搭載主発電機駆動用ガスタービン開発から学んだ教訓

Lesson from Development of Gas Turbine
for Main Power Generation on Defense Destroyer大槻 幸雄^{*1}
OTSUKI Yukio

キーワード：ガスタービン，開発研究，教訓

Key Words : Gas Turbine, Research & Development, Lesson

1. まえがき

海上自衛隊の防衛装備は本質的に純国産であり，かつ性能は世界一でなければならない。

海上自衛隊では52DD艦「はつゆき」の主機に初めてガスタービンを採用するのみならず，主発電機駆動用にも初めてガスタービンを採用することに決定した。そして主発電機駆動用ガスタービンとして性能，耐久性など種々検討した結果，1980（昭和55）年2月に川崎重工製の1,000kW純国産ガスタービンM1A-01を採用した。

ところが，1982（昭和57）年3月に晴れて就役して僅か4ヶ月で第3タービンブレードが折損した。その後引き続いて53DD「しらゆき」，54DD「みねゆき」などが，主として経験不足による初歩的故障も含めて故障を多発して，海上自衛隊を運用不能の危機に落とし入れた。しかし，海幕機関班長を始めとした技官の方々が，国産製品を育成してやろうと言う厳しい中にも温かい気持ちで叱咤激励され，改善に次ぐ改善を加えて信頼性を向上することが出来，M1A-01ガスタービンの出力を向上した派生機種などが，今や世界に誇る護衛艦搭載主発電機駆動用ガスタービンとして，大いに活躍するまでに至った。

以下この開発の経緯などについて述べる。

2. 1965（昭和40）年以降のガスタービン業界の状況

1965（昭和40）年の初頭からガスタービンは航空機用以外にも脚光を浴び始め，艦艇の主機，戦車用として，またコンバインドサイクル発電用としても採用され始め，さらに自動車用も活発な開発研究が行われた。

コンバインドサイクル発電用は大形で，東芝，日立がGE，そして三菱がウエスチングハウスのライセンスで生産を始めた。

川崎航空機（後に川崎重工となる）は，1968（昭和43）年からライセンス生産していたアプコ・ライカミング製

の陸上自衛隊HU-1Bヘリコプター用ガスタービンT-53を用いて，戦車，鉄道車両，発電用そしてボーイング502型2軸式ガスタービンをういて自動車用の応用研究を果敢に行った。しかし，ライセンスでは，ライセンサーの言いなりであり，最終製品を開発することは不可能であると痛感した。

3. 技術導入による開発技術力向上の限度

自動車，自動二輪車，弱電製品，工作機械，光学機械などは，国内需要だけでも大きな市場があり，ガスタービンに比べると研究開発費が少ないことにもよると思うが，これらを扱う企業は研究開発に意欲的に取り組み，日本人の勤勉さと手先の器用さにも助けられ，日本人独自の技術により優れた性能，品質を誇る製品の開発に成功して，世界市場を席卷するほどまでに成功した。

一方，ガスタービンに関係する企業では，高額な開発費を要すること，敗戦によりこの分野の航空エンジンの研究が禁止され，日本人独自の技術力に自信がなかったことから技術導入によって習得せざるをえない，また，技術導入すればよいと言った安易な気持ちがあったのではないかと思う。そして日本人独自の技術で開発した性能，品質ともに優れた世界一の製品を有さなければ，世界市場で競争できないと言う認識の欠如が大きかったのではないかと思う。当時は今日ほど国境を越えて企業間の競争が厳しい時代ではなく，ひたすら先進国に追いつくことのみを考えていたと思う。

このようなことから川崎重工では技術導入から脱却し，自らの力で出来るだけ少ない研究費により，市場性があると考えられる非常用ガスタービン発電装置用の小形ガスタービンを開発し，商品化して細々と事業を行いながらガスタービン開発の技術を蓄積し，大形化への技術の習得を図ることに決定した。そして1972（昭和47）年に300馬力の小形の純国産ガスタービンの研究開発を開始した。

原稿受付 2017年11月15日

* 1 〒651-2124 神戸市西区伊川谷町潤和1306-4

E-mail: yopferdstaarkeaachen_092506@ybb.ne.jp

4. M1A-01ガスタービンの防衛庁への受注活動から採用まで

入社後1~2年を主力とする担当者各位の、純国産ガスタービン開発に対する並々ならぬ情熱と努力によって、180kWの非常用発電機用ガスタービンS1A-01が1975(昭和50)年に開発が成功した。そして、このガスタービンを用いて、国内で最初の非常用ガスタービン発電装置PU200(Power Unit 200)を製造し、1977(昭和52)年11月に公開運転を行ってガスタービン事業を開始した。引き続き製品系列を揃えるために、1,000kWのM1A-01ガスタービンを開発した。

護衛艦の主発電機駆動用に採用されれば、純国産であり防衛庁の為に貢献できる。さらに防衛需要の期待もさることながら民需拡販の強力な武器にもなると考え、開発途上の製品で実用実績が無く、耐久性などで不安だけであったが、敢えて冒険承知で、1975(昭和50)年から受注活動を開始した。今から思えば、誠に無責任極まりない暴挙であったと忸怩たる思いである。以下受注活動から採用に至るまでの経緯を述べる。

1975年春、M1A-01ガスタービンは未だ初号機を製作中の段階であったが、S1A-01ガスタービンの開発成功に自信を持ち、採用の決定は2~2.5年後、更に製品の納入となるとその2年後(1979秋~1980春)であるので、それまでには何とかなると考え、M1A-01ガスタービンを用いた主発電装置の売り込みを開始した。

競合機種は外国製ガスタービン(神鋼-Kongsberg, IHI-GE, 神鋼造機-Garrett)に比べて、使用実績が無いことおよびTBO(Time Between Overhaul)が短いことを指摘されていたので、1977年7月の最終提案として、「TBO 12,000時間, HSI(Hot Section Inspection) 6,000時間毎」を提案せざるを得なかった。

護衛艦採用の条件として、塩分雰囲気下(0.02ppm)で1,250サイクルの耐久試験(起動 全負荷投入 全負荷遮断 停止)及び米軍規格MIL-L-17341に基づく認定試験(1,000Hr, 1,000Cycles)を実施するのみならず、川崎汽船のパシフィックハイウェイ丸に乗せて、1,009時間、164回の起動・停止の塩分を含む海上テストを行った。

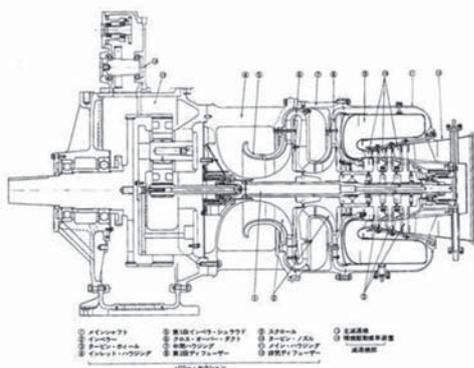


Fig. 1 M1A-02ガスタービン縦断面図

このようにして、営業部門のなみなみならぬ努力、担当技術員の情熱および純国産であることも評価されたのであろうが、1979(昭和54)年10月に52DD用主発電装置にM1A-01採用の内示を受け翌年2月に晴れて正式に採用された。とにかく商戦としては大成功に終わった。しかし、このような背伸びがたたって、以後、約5年間、言語に絶する苦難、死闘の時代が始まった。

M1A型ガスタービンの市販を開始してから民間用をM1A-01ガスタービンと呼称していたが、メインハウジングを鋳鋼製とし、ブレードなどに海水対策を施した護衛艦用を“M1A-02ガスタービン”と呼称した。

Table 1にM1A-02ガスタービンの仕様と性能を示す。またFig. 1にその縦断面図を示す。Fig. 2はM1A-02ガスタービン主発電機と搭載護衛艦の外観写真である。

Table 1 M1A-02 ガスタービンの仕様と性能

仕 様			
形 式	単純開放サイクル 軸式		
圧 縮 機	二段遠心式		
燃 焼 器	単筒缶型		
タ ー ビ ン	三段軸流式		
減 速 機	遊星歯車列		
使 用 燃 料	灯油 軽油 A重油		
性 能			
要 目	設 計	実 績	
出力(最大) (Ps)	1,650	1,750	
出力(連続) (Ps)	1,450	1,600	
*燃料消費率 (g/Ps・h)	290	275	
*タービン入り口温度 ()	900	900	
主軸回転数 (rpm)	22,000	22,000	
空気流量 (kg/s)	7.2	7.7	
圧力比	8	8	
圧縮機断熱効率 (%)	77	77	
機械効率 (%)	98	98	
タービン断熱効率 (%)	88	90	
燃焼器圧力損失 (%)	3	3	
排気圧力損失 (%)	5	5	
漏れ空気量(対空気流量) (%)	3	3	



Fig. 2 M1A-02ガスタービン主発電機と搭載護衛艦

5. 年間使用時間

度重なる故障の原因の一つとして、ガスタービンの開発経験、運転実績が少ないにもかかわらず無謀な受注をしたことが最大の原因であるが、使用時間について甘く

見ていたことも一因である。

「はつゆき」の主発電機は1,600kWのディーゼル2機と1,000kWのガスタービン1機の駆動であり、最初の話では、ガスタービンの燃費は悪いが軽量・小形で振動が少ないので、戦闘時などで必要電力が増大した場合とか、敵のソナーに感知されて困るよう場合に使用するので、年間使用時間は多くなく、500時間程度であるが、ディーゼルの故障を考慮して一応年間2,000～2,500時間とすると言うことであった。しかし、後にはガスタービンは振動・騒音が少なく、かつ運転、メンテナンスが容易であるから、乗組員は停泊中、低負荷運転にも好んでガスタービンを使用するようになり、年間3,000～4,000時間使用するようになった。これが更に頻繁に故障を起こす要因の一つとなった。使用時間を勝手に少ないと判断して甘く考えていたことが大いに反省される。半面、ガスタービン・メーカーにとって喜ばしいことだが、ガスタービンが発電用としていかに優れているかを実証することができた。

6. M1A-02ガスタービン搬出用ハッチの廃棄

1977年7月提出の提案書で、M1の特徴としてパワーセクション部のみが容易に着脱、換装できるので、オーバーホールやHSIを行う際に、パワーセクションをパッケージから取り出し、HSIが行える艦内作業場(2mL×2mW×3mHのスペースと1トンクレーン装着)へ搬出し、オーバーホールの際は艦外へ搬出することが楽にできることを要求した。しかし、建造所側から船体の強度上の点から、第1甲板にボルト止めハッチは設けられないが、開口スペースを設けるから、搬出入の都度、溶断開口するように要望された。海幕と技本はTBOと使用時間を考慮して、この要望を了承した。その時点では第2甲板だけがボルト止めハッチとなっていたが、その後の話の進展から第2甲板もあっさり溶断開口となってしまった。そして、故障時を含め必要な時は、その都度甲板に溶断で穴をあけて搬出入口とし、用済み後溶接で塞ぐことが決定された。

その結果、川崎重工が提案したTBO 12,000時間がその通り保障されていれば、約5年間は開口の必要はなかったのだが、以下に述べるように、故障が短期間に頻発し、その都度エンジン換装のため甲板を溶断して開口せざるを得ず、修復には想像を絶する労力と費用を要することになった。

7. 初号ガスタービン護衛艦「はつゆき」に始まり連続して起こった初期の故障

1982(昭和57)年3月に、初号ガスタービン護衛艦52DD「はつゆき」が住友重工浦賀にて艦内試験を終え、晴れて就役してから僅か4カ月の7月25日に、累積運転1,820時間、起動回数370回にて第3段タービンブレードが折損した。さらに翌1983年8月2日に累積運転

4,014時間、起動回数590回にて第1段タービンブレードがホットコロ・ジョンにて破損した。53DD「しらゆき」は1983年2月に就役して間もなく7月15日に累積運転1,602時間、起動611回にて海水ポンプ歯車破損、54DD「みねゆき」は1983年9月7日に累積運転198時間、起動51回にて海水ポンプ歯車破損、54DD「さわゆき」は1983年9月9日に累積運転195時間、起動177回にて海水ポンプ歯車破損、さらに翌1984年3月12日に累積運転398時間、起動265回にて第3タービンブレードが折損した。そして、54DD「はまゆき」は1983年8月26日に累積運転1,465時間、起動464回にてガスタービンのNo.2軸受が破損した。

このように、1982年に初号ガスタービン護衛艦「はつゆき」が就航してから、立て続けに、次から次へと故障が続発した。そしてその都度、甲板を溶断してガスタービンを換装することになり、技術員、作業員ともに各建造所へ出張して、休日勤務昼夜を分かたぬ作業を行う死闘の日々が続いた。特に「はつゆき」、「さわゆき」は就航してから短期間に立て続けに故障が発生して、修復換装したと思ったらまた故障するなど、まさしくパニック状態に陥った。しかし、技術員、技術研究所員らの献身的な支援によって、故障の原因調査と対策を可及的速やかに行い、対策したガスタービンを組み立て、故障したガスタービンの換装は勿論、建造所にあるガスタービンも日夜を分かたず改修交換した。また、製造課作業員は護衛艦の甲板を溶断開口して故障ガスタービンを艦外へ搬出、工場への移送、そして対策ガスタービンへの換装などの激務を昼夜兼行で遂行した。まさに事業部は修羅場の状況であった。

就役後初期に発生した主要な故障をTable 2に示す。

Table 2 就航初期に発生した主要事故

No	件名	発生年月	艦名	原因
1	第3段タービン・ブレード折損	57.07	はつゆき	铸造欠陥
2	海水ポンプ駆動歯車折損	58.07 58.08	しらゆき はまゆき	面圧強度不足及び片当たり
3	第1段タービンブレード破損	58.08	はつゆき	高温腐食
4	第3段タービン・ブレード折損	59.03	さわゆき	疲労破損
5	排気消音器吸音材消失	59.03 59.03	さわゆき はつゆき	吸音材バインダの耐熱性不足
6	排気エルボのコーナーベーン及び底部指示金具のクラック	59.03	はまゆき 他全艦	熱応力
7	No.2軸受け保持器破損	59.04	はまゆき	スミアリング
8	オイルポンプ・アイドラーギヤ軸受破損	60.08	はまゆき	製品不良 Hsg内径真円度不良
9	減速機太陽歯車破損	60.08	はまゆき	応力集中
10	海水ポンプ・シャフト折損	60.11	さわゆき	ポンプ軸受け損傷の影響
11	補機駆動歯車装置の軸受け損傷	60.11	しらゆき	軸受け製品不良と組込み不良
12	第2段圧縮機インペラー破損	62.09	はるゆき	最大応力域に微小铸造欠陥存在

8. 故障の技術的対応

海幕から故障の報告を受けてから、どのような技術的対応をしたかその状況について以下に述べる。

1) 技術担当者が直ちに現場へ出張し、故障の状況を観

察するとともに、甲板を溶断して、故障ガスタービンを艦から取出し、直ちに工場へ輸送する。

- 2) 工場では故障ガスタービンを直ちに全分解して故障状況を調査し、破損部品の材料分析、破面検査、強度チェックなどにより破損原因を調査する。また主要部品の非破壊検査を実施し、再使用の可否、改修の有無を検討する。
- 3) 技術部はこれらの調査資料をもとに破損原因を推定して対策案を作成する。これに基づき対策部品を直ちに製作する。
- 4) 技術部は故障の調査報告書をまとめ、今後の対策を含めて、海幕機関班へ報告のため出頭する。
- 5) 品質保証部は体制の見直しを行う。

この他、事業部を挙げて事故が発生しないように種々検討が行われた。

9. 故障例とその対策・処置

誠に恥ずかしく、海幕に大変ご迷惑を掛けたこれらのトラブルについて詳細を述べるのは差し控えるべきかもしれないが、以来30数年が経過し、今は無事役目を果たすようになったので、今後国産の防衛装備を開発して製品化する技術者の参考になればと、敢えてこの故障に対してどのような処置を取ったかを述べる。代表的な事故例とその対策・処置について概略を一括してTable 3に示す。

以下に代表的な故障部品の故障状況を示す写真を記載する。

Fig. 3は「しらゆき」の海水ポンプ駆動系歯車の損傷状況、Fig. 4は「しらゆき」の第1タービン動翼の高温腐食による破損状況、Fig. 5は「しらゆき」の第1タービン動翼の破断面、Fig. 6は「さわゆき」の第3タービン動翼の破損状況、そしてFig. 7は「はまゆき」のNo.2軸受の破損状況を示す。

Table 3 代表的事故例と対策処置

故障例	海水ポンプ駆動系発車の損傷	第一段タービン動翼の損傷	第三段タービン動翼の損傷	No.2 軸受の損傷																					
1. 故障発生状況 故障年月日 実運転時間 起動回数	S.58.7.15 1,602時間 611回 「しらゆき」艦内にて運転中 加速度トリップにより停止	S.58.8.2 4,104時間 590回 「はつゆき」艦内にて運転中、 異音および振動発生し排気気 温高トリップにより停止。	S.59.3.12 398時間 265回 「さわゆき」艦内にて起動完了 直前に異音および振動を発生 し、過振動トリップにより停止。	S.59.4.13 1,465時間 464回 「はまゆき」艦内にて運転中、 潤滑油吐出側フィルタの首直 が異常に高くなったため緊急 停止させた。																					
2. 故障の状況	海水ポンプ歯車およびこれとかみ あう海水ポンプ中間歯車、中間歯車 (), 中間歯車 () の歯車の歯が 折損または摩耗していた。	第一段タービン動翼が激しい 高温腐食を起こし、翼断面 積が著しく減少し応力が高く なりついに折損破壊した。	第三段タービン動翼の翼付 根後縁部にクラックが発生し、 ついに折損破壊した。	No. 2軸受の内輪軌道面およ び1個のコロに剥離が生じ、保 持器の損傷ひいては軸受の破 損を惹起した。																					
3. 故障の原因	歯車強度の不足によりピッチング を生じ、それが進行し遂に歯が折損。	吸気中の塩分と燃料中の硫 黄分とが燃焼過程で腐食性物 質Na ₂ SO ₄ を生成し、これが高 温(700 ~ 900)の第一 タービン動翼に付着し、防食 コーティング層を侵食して遂 には母材をも腐食させるに至 り折損。	疲労強度マージン不足によ る疲労破損であるが、これは 第三段タービン動翼の起動 停止時の4Nとの共振に起因した 疲労破損と考えられる。	未だ確認できる段階には達 していないが、異物のかみ込み または潤滑油の不良によりス ミアリングが発生し、これが進 行して内輪軌道面およびコロ により剥離が生じ、揺動運動を 誘発することにより、保持器の 変形破損、内外輪の変形破損を 惹起したと推定される。																					
4. 対策	歯車の材質、熱処理、硬度、精度、 仕上を向上し、歯面強度を強めた。 <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>対策前</td> <td>対策後</td> </tr> <tr> <td>材質</td> <td>SCM 435</td> <td>SCM 415</td> </tr> <tr> <td>熱処理</td> <td>調質</td> <td>浸炭焼入</td> </tr> <tr> <td>硬度</td> <td>H_{RC}269</td> <td>H_{RC}58 82</td> </tr> <tr> <td>歯車等級</td> <td>JIS 5級</td> <td>JIS 3級</td> </tr> <tr> <td>仕上</td> <td>ホブ切</td> <td>歯研磨</td> </tr> <tr> <td>安全係数</td> <td>1.8</td> <td>3.9</td> </tr> </table>		対策前	対策後	材質	SCM 435	SCM 415	熱処理	調質	浸炭焼入	硬度	H _{RC} 269	H _{RC} 58 82	歯車等級	JIS 5級	JIS 3級	仕上	ホブ切	歯研磨	安全係数	1.8	3.9	暫定対策 1) 水洗浄周期短縮 3,000時間 100時間 2) ポアスコープ点検周期短 縮 3,000時間 1,000時間 恒久対策 1) 材質変更 MM007 IN792K 2) 改良コーティング Al-Pack 改良Al-Pack	対策(改良翼) 翼付根部の厚味を増し、応 力を下げるにより疲労強 度を改善 定格回転時遠心応力 57.8kg/mm ² 18.8kg/mm ²	対策(提案) 1) 潤滑油フィルタの点検 100時間毎 2) 〃〃の交換 500時間毎 3) 潤滑油サンプリング分析 1ヶ月毎 4) 〃の交換 1000時間毎 > 1,000ppm(水分)
	対策前	対策後																							
材質	SCM 435	SCM 415																							
熱処理	調質	浸炭焼入																							
硬度	H _{RC} 269	H _{RC} 58 82																							
歯車等級	JIS 5級	JIS 3級																							
仕上	ホブ切	歯研磨																							
安全係数	1.8	3.9																							
5. 実施時間	全艦換装完了	暫定対策 全艦実施中 恒久対策 昭和59年7月15日以降	対策 全艦対策済み 恒久対策 昭和59年7月15日以降	対策 即時 ただし3) 4) 検討中																					
6. その他	本歯車は護衛艦向けにのみ装備	防衛庁要求による下記の試 験を無事終了し、且つ、川汽 の船に搭載して実機運転を終 了したが、艦艇の厳しい使用 条件に対する試験が甘かった。 ・塩分雰囲気下(0.02ppm) における起動 負荷投入・遮 断 停止の1250サイクルテス ト ・米軍規格MIL-E-17341に基 づく認定試験(1,000時期,1,000 サイクル)	社内実験の結果等から、よ り安全を期すため、S57.11.8防 衛庁に改良翼を提案し、56DD 艦より実施することにした。 しかしボルト取付ハッチでは なく、ガスタービン換装が大 変なため適及適用まで行う必 要なしと判断し、今回の故障 に至らしめた。 注: H. S. I (Hot Section Inspection) 6,000時間、及びガ スタービン搬出用のボルト取 付ハッチを設ける提案を行っ たが、共に採用されなかった。																						

10. 問題克服後の展開

1979（昭和54）年10月に52DD「はつゆき」の主発電機駆動用として、1,000kWのM1A型ガスタービンが採用されてから、上述の如く多くの故障を出して海幕に大変ご迷惑を掛けましたが、温かく採用を続けて頂き、その都度改良に改良を加えながら要求出力の増加に応じて、

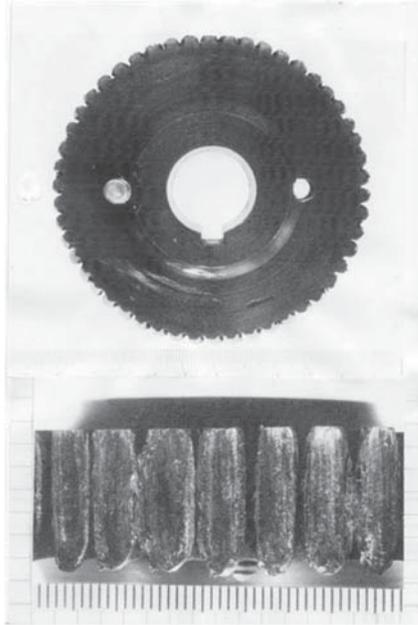


Fig. 3 海水ポンプ駆動系歯車の損傷状況



Fig. 4 第1タービン動翼の高温腐食による破損状況

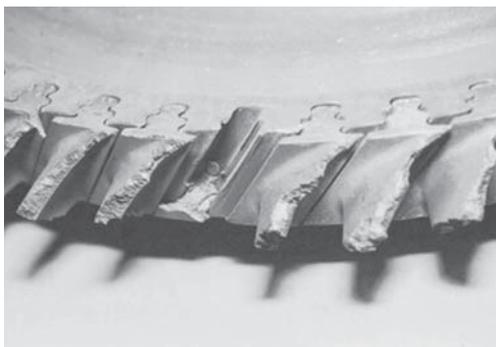


Fig. 5 第1タービン動翼の破断面

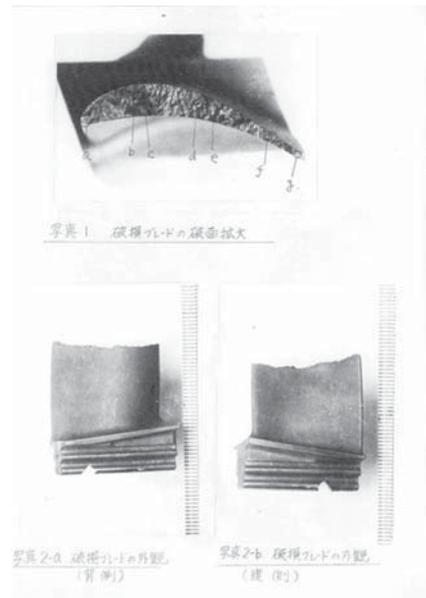


Fig. 6 第3段タービン動翼の破損状況

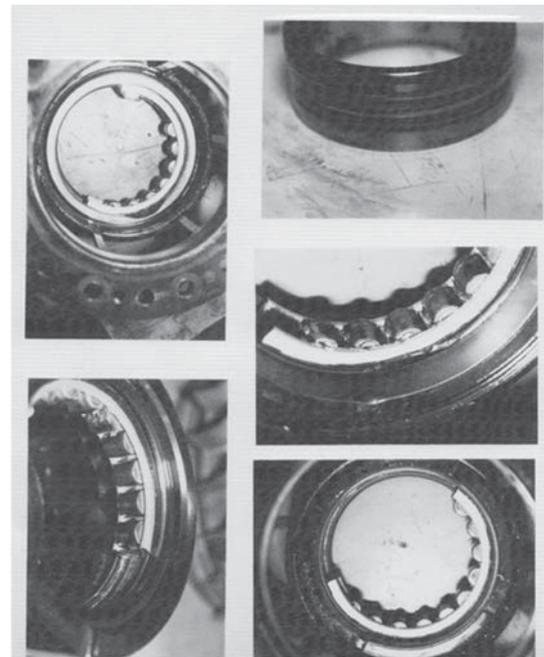


Fig. 7 No. 2軸受の破損状況

1,250kW、1,500kWと出力を向上し、遂にはこの型式のガスタービンとして世界最大出力2,400kWのM1A-35ガスタービンを開発して「ひゅうが」および「あきづき」に採用された。

しかも防衛装備品に関連した自主的な研究開発や生産技術等の向上に貢献した製品に与えられる栄えある“防衛調達基盤整備協会賞”を2011（平成23）年11月に受賞した。誠に光栄の至りであり、感謝の念で一杯である。

M1A-35ガスタービンの主要要素は初期のM1A-02と同様であるが、主な性能は、初期のM1A-02に比して大幅に向上しており、最大出力3,778馬力、燃料消費率257 g/Ps・h、空気流量12.8 kg/s、圧力比10.7である。

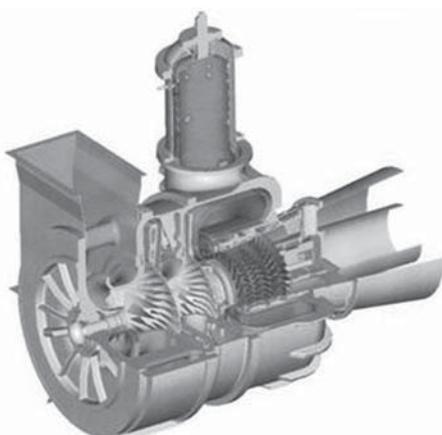


Fig. 8 M1A-35ガスタービンカット写真



Fig. 9 艦艇用ガスタービン主発電機の内部写真

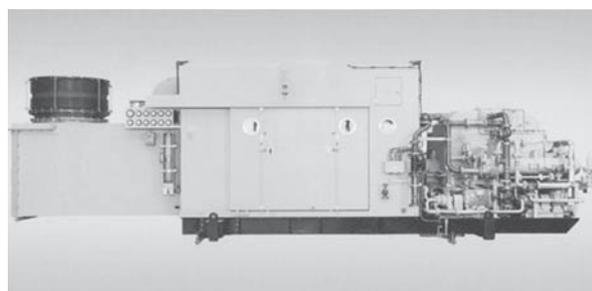


Fig. 10 艦艇用ガスタービン主発電機の外観写真

Fig. 8はM1A-35ガスタービンのカット写真，Fig. 9は艦艇用ガスタービン主発電機（M1A-35）の内部写真そしてFig.10は艦艇用ガスタービン主発電機（M1A-35）の外観写真である。

上述したような護衛艦における頻りに起こった事故や，その他民間における発電装置の多くの事故のために，事業中止の決意をせざるを得ない苦い経験をしたが，海幕の方や，多くの方々の支援を得ることによって勇気付けられ，改良，研究開発に努力し，今や川崎重工の中・小形ガスタービン事業は大きく飛躍発展することが出来た。そして，新しく開発した30,000kWのL30Aガスタービン（単純開放サイクル2軸式）は，世界一の熱効率41.3%を発揮して，日本産業技術大賞・審査委員会特別賞を2013（平成25）年4月に受賞した。

Fig.11はL30Aガスタービンの外観カット写真である。

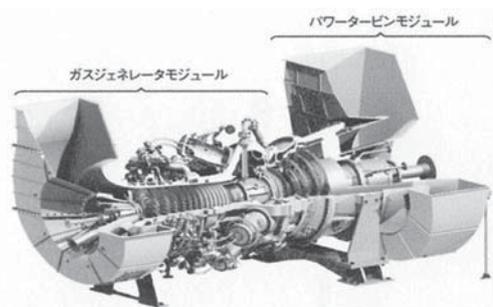


Fig. 11 L30A ガスタービン外観カット写真

11. おわりに - 故障を通しての教訓

新しく開発した製品では，必ずと言ってよいと思うが，何らかのトラブルが起こるものである。当時，護衛艦に何としても純国産ガスタービンを採用してもらい国家の為に尽くしたい，との強い気持ちが先走り，高々300馬力の純国産ガスタービンの開発が成功したと言う，ガスタービンの本質的なことすら分からない状況の中で，しかも海上で使用する厳しさや，過酷な戦闘状況の中でどんな影響が与えられるのかも知らなかった。

採用後どのような深刻な事態が生ずるかもわきまえず，よくもこんな無謀なことを実行したものと大いに反省させられる。

クレーム対策の嵐の中では社内外から批判が渦巻くが，これを耐え忍んで冷静に，かつ早急に対処し解決と言った点で，人間形成にも大いに役立つ。失敗，挫折の経験を多く持てば持つほど，技術者は育つものである。途中，責任を取って放棄すべきかと観念したこともあったが，よくぞここまで来た感慨無量である。

途中で自ら放棄することなく，必ず改修して顧客に報いるとの執念と情熱を以って誠実に当たれば，きっと顧客も納得してくれ，最後には解決できるものだった。勿論多くのよき理解者にご支援を頂いた幸運があったからと感謝している。

“禍を転じて福となす”という諺があるが，この大きなトラブルのお蔭で防衛庁関係によき先輩，友人が出来，かえって信頼を得ることが出来た，またあれほどに苦しかったことが楽しみであったとさえ感ずるこの頃である。

参考文献

- 大槻幸雄，純国産ガスタービンの開発 川崎重工が挑んだ産業用ガスタービン事業の軌跡（新訂版），（2015），三樹書房。
- 川重ガスタービン推進装置歴史編纂委員会，艦艇用ガスタービン推進装置 30年の歩み，（2002）（非売品）
- 大槻幸雄，乃村春雄，井上俊彦，中安稔，西谷理，社会に貢献する中・小形ガスタービン発電装置，（2012），日本工業出版。

純国産ガスタービンの開発 川崎重工が挑んだ産業用ガスタービン事業の軌跡 大槻幸雄
Development of Gas Turbines Purely Made in Japan - Challenging History of Industrial Gas Turbines in Kawasaki Heavy Industries - OTSUKI Yukio

吉田 英生^{*1}
 YOSHIDA Hideo

本書は全631ページの大著である。大槻幸雄氏が1955 (S30)年に川崎航空機工業(株)に入社してから、1969 (S44)年に川崎重工業、川崎航空機、川崎車輛の3社が合併して新生の川崎重工業(株) (以下、KHI社と略)となった後、1997 (H9)年にKHI社を退職し、その後も常勤顧問として2005 (H17)年までの50年間、KHI社で関わったガスタービン事業に関する詳細な記録であるとともに、成功あるいは失敗から学んだ教訓の集大成でもあり、さらに個人的には人間ドラマともいえるものである。初版は2005年に発行されたが、出版社の倒産もあり、今回、2011年の東日本大震災時の非常用発電設備稼働状況調査表を4ページ追加するとともに、グラビアの充実、まえがきとあとがきの微修正、さらに本文最後の「参考にすべき格言」に故土光敏夫氏の行動指針が加わった点が新しい。

大槻氏には、本号で、「林貞助」と前ページまでの「護衛艦」の記事を執筆いただいたが、とりわけ後者は本書からの要約に近いこともあり、この機会に初版から



(三樹書房 2015, 本体価格2800円)

は12年あまり経っているものの、書評として紹介させていただくものである。まず、本書巻頭には、故松木正勝氏の含蓄に富んだ推薦文があるので左下側の四角枠内に引用する。

まさに全体を見事に評したものであるので、以下ではいくぶん具体的な紹介を追加させていただく。内容は
 第1部 開発編 (350ページ)
 第2部 故障編 (87ページ)
 第3部 ガスタービン事業の誕生編 (122ページ)
 第4部 終編 (35ページ)

で構成されていることから分かるように、量的には第1部に重心があり、KHI社のすべてのガスタービンの開発が克明に記録されている。しかもガスタービンだけでなく、関係者の固有名詞も多数出てくる。50年にわたり多忙な業務に従事しながらよくこれだけの記録を残せたものだと、読者は驚くにちがいない。さらに、正負両側面すなわち、支援・勇気づけと、逆に叱責や誹謗中傷など、直接話法でストレートに語られる場面も少なく、KHI社のガスタービン開発における奮闘・格闘の歴史が手に取るようにわかるのである。

ただ、ここまで詳細な記述は、KHI社員や専門を同じくする読者には有益であるが、本会会員の大多数の読者がフォローするには困難でもあり、ポイントだけを理解して読み飛ばしたくなるころでもあると思われる。評者は、正直なところ、大槻氏が尊敬を込めて語る故四本潔氏や故吉田俊夫氏などの数々の英断、また責任感の強い部下を事故で失った話など、どちらかという人間ドラマのような側面に強く心を動かされた。

第4部 終編は大槻氏のKHI社50年間の貴重な学びを集約したものといえる。まずこの章から珠玉の文言を頭にたたき込み、その起源となっている実体験のページに戻る読み方も許されるのではないだろうか。

本書は、著者が純国産ガスタービンの開発にたずさわった経緯と経過について、詳細な資料をもとに記述したものであり、今までに類書のない内容である。

熱機関の最先端であるガスタービンを産業用原動機として開発するに当たり、自力を養いながら、小から大へ、簡から高級へと、開発費を稼ぎながら新機種を実現化するという手法は、理にかなっており見事である。企業が新技術の新製品を開発するにあたり、手法や意志決定がされる経緯についても、色々の場合について興味深い記述があり、後進の読者に現場の実情を良く伝えている。

ガスタービンエンジン開発中に起きた各種不具合、また実用運転中に発生した故障に対して採った技術的対策を具体的に述べると共に、関係者間の意思疎通とエンジン熟成への熱意が問題解決にいかに重要であるかを実例をもって示しており、新技術、新製品の開発において、人間関係、共通認識がどのように作用したかなど興味深い。更にガスタービンを世の中に有用な熱機関に発展させる為、事業部を設立したり、保守・メンテナンス体制を整えたり、海外発展を図ったり、広い視野で活動した経緯を述べている。

このように、本書は著者が技術者、開発者として生きて来た経緯を述べたもので、内容的に深く考えさせられる物のある一書である。

日本工業大学名誉教授

元航空宇宙技術研究所科学研究官(原動機部長) 松木正勝

原稿受付 2017年11月20日

* 1 京都大学工学研究科航空宇宙工学専攻
 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3
 E-mail: sakura@hideoyoshida.com



若きガスタービン研究者のイギリス Young Gas Turbine Researcher's UK



酒井 英司^{*1}
SAKAI Eiji

1. はじめに

著者の所属する(一財)電力中央研究所では、タービン動・静翼等のガスタービン高温部品の寿命評価を目的に、数値シミュレーションを用いた翼の温度推定手法の開発に取り組んでいる。通常、ガスタービン内部の流動状態を計測することは困難であるため、タービン翼の数値シミュレーションを行う際には、境界条件に何らかの仮定をおくことになる。このため、数値シミュレーション結果には、不確かさが含まれることになる。

著者は、数値シミュレーションにおける不確かさの定量的な評価と、より簡便にタービン翼の温度を推定する手法の開発研究の一環として、2017年4月より1年間の予定で、イギリスのロンドンにあるインペリアルカレッジ航空工学科のUQ(Uncertainty Quantification, 不確かさ評価)研究室に客員研究員として滞在している。

5月号から始まった「東西南北地水火風」も4回目となり、今回、イギリスでの研究と生活について紹介する機会を頂いた。

2. 滞在先について

2.1 インペリアルカレッジ航空工学科

インペリアルカレッジは1907年にロンドン大学の1つのカレッジとして開校し、2007年に創立100周年を迎えたのを期に独立した。医学、工学、理学に力を入れるイギリス屈指の名門大学である。2004年にはインペリアルカレッジビジネススクールが開校している。これまでに15名のノーベル賞受賞者と、3名のフィールズ賞受賞者を輩出している。世界大学ランキングでも常に上位に位置付けられている。学生数は約1万8千人で、学部生が約1万人、修士および博士課程の学生が約8千人である。

メインキャンパスは高級住宅地であるサウスケンジントン地区にあり、航空工学科もこのキャンパス内にある。

原稿受付 2017年11月1日

*1 (一財)電力中央研究所

〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

E-mail: e-sakai@criepi.denken.or.jp

*2 インペリアルカレッジロンドン航空工学科

South Kensington Campus London SW7 2AZ, UK

E-mail: e.sakai@imperial.ac.uk

南側に科学博物館や自然史博物館、ヴィクトリア&アルバート博物館、北側にはロイヤル・アルバートホールやロンドン市民の憩いの場であるハイパークがあって、イギリス中で最も立地に恵まれた大学の一つである。大学の周りは常に観光客で賑わっている。

航空工学科には、学部生約300名、修士課程の学生約70名、博士課程の学生約100名が在籍している。大きく分けて、流体力学と構造力学に関する教育と研究が行われている。



Fig. 1 インペリアルカレッジ

2.2 経緯と研究内容

数値シミュレーションにおける不確かさ評価は、近年盛んに研究が行われている分野で、2017年6月にシャーロットで開催されたASME Turbo Expo 2017においても、関係するワークショップやセッションが設けられている。

数理的な手法を用いることにより、従来のモンテカルロ法に比べて極めて少ない計算コストで、境界条件(入力条件)の不確かさに起因した数値シミュレーション結果の不確かさを定量的に評価することが可能になってきている。部品の製造誤差や経年劣化、運転条件の変動に起因したレアイベント(稀に発生する重大な不具合)の発生予測や影響最小化も可能になりつつある。同研究室を率いるFrancesco Montomoli先生(当時はケンブリッジ大)が2012年に発表された論文を読んで興味を持ったことから、同研究室に滞在して研究を行う機会を得た。

不確かさ評価研究室（不確かさ評価に特化した研究室は世界的にも珍しいのではないと思う）では、フィレンチェ大学やオックスフォード大学、NASA等の研究機関とコラボレーション体制を構築している。また、UQUANTというベンチャー企業を立ち上げ、不確かさ評価やロバスト最適化に関するコンサルタント業務を行っている。そのため、先生および博士課程の学生は極めて多忙で、大学で見かけることはあまり無い。

現在は、タービン翼の伝熱問題を対象に、同研究室で開発された不確かさ評価ソフトウェアUQUANTと、インペリアルカレッジで開発された数値シミュレーションコードOpenFoamを用いて、形状の寸法誤差や冷却条件のばらつきに起因した数値シミュレーション結果の不確かさ評価に関する研究を行っている。OpenFoamの使用経験がなかったため、当初は計算がうまくいかずに苦しんだが、チュートリアルを見たり、研究室の学生に教えてもらったりして、ようやく計算が安定して行えるようになったときにはほっとした。不確かさ評価手法については、博士課程の学生とのディスカッションや論文、UQUANTのソースコード等により勉強しているが、2012年当時に比べて高度な数学が用いられるようになっており、難解な数式にやはり苦しんでいる。「orthogonal（直交性）」、「eigen value（固有値）」、「kurtosis（尖度）」等、日本語でも難しい事柄について、英語で勉強する大変さを感じている。研究室メンバーのサポートのお陰で、少しずつ成果が出るようになって、現在、次のTurboExpoで発表すべく論文をまとめている。

2.3 研究環境について

研究室と言っても、日本の大学のように専用の部屋があるわけではなく、他研究室との共有の部屋の中に博士課程の学生や著者のような客員研究員は机を与えられている。修士課程の学生は自分の机を持たないが、これは、日本と異なり修士課程が1年間で、研究を行う期間が、試験の終わる5月初めから卒業する9月までと短いと思われる。一緒に研究を行っていた修士課程の学生に付き合っ、私もしばらく学科共有のコンピュータールームで研究を行っていた。

計算機環境としては、コンピュータールーム内のPCや大学内の大型計算機を利用することができるので、恵まれているように思う。インペリアルカレッジにはコンピュータ関連の相談窓口（ICTデスク、HPCサポート）があり、PCのセッティングやソフトウェアのインストール、大型計算機の使用に関してサポートを受けることができ、Linuxに不慣れな私にとっては大変ありがたかった。ICT関係で言えば、Creo ParametricやMatlab等が誰でも使えるソフトウェアとして用意されており、日本の大学に比べて研究に対するサポート体制がしっかりしているように感じている。研究不正防止対策もしっかりしていて、学生は研究ノートの提出と、専用ソフトを用いた論文の類似度チェックが義務付けられている。

イギリスでは学生が常にディスカッションをしているように思っていたが、私のいる部屋ではそれほどディスカッションが盛んな様子もなく、むしろ学生は皆ヘッドフォンかイヤフォンをして、自分の世界に没頭して研究を行っている。



Fig. 2 Francesco Montomoli先生と



Fig. 3 シークレット英会話クラス（真中がSu先生）

2.4 英語能力向上に向けて

インペリアルカレッジの特徴の一つとして、留学生比率が約半数と高いことが挙げられる。英語を母国語としない留学生を対象として、英会話クラス等の英語サポートプログラムが用意されている。公式な英会話クラスの申し込み時期と赴任時期が合わなかったため、私は知人の紹介で運良く入ることのできた非公式クラスに参加している。この非公式クラスは、公式クラスの先生がボランティアで行っているクラスで、公式クラスが基本的に博士課程の学生を対象としているのに対し、非公式クラスは基本的にポスドク以上を対象にしている。

メンバーは10名程度であり、イタリア、アルゼンチン、ベトナム、ロシア、イラン、中国、韓国、ブラジル、スペインから年齢も研究分野も異なる生徒が集まっている。公式クラスを終了した生徒の中から先生が気に入った生徒を勧誘（先生はkidnapと表現する）しているようだ。新聞記事を題材に、政治、宗教、文化から、隣人の騒音問題に至るまで色々な事柄について会話がなされる。BBCのドキュメンタリー番組を用いたリスニングの勉

強や、先生の用意したテキストを用いた前置詞、句動詞 (phrasal verbs)、慣用句等の勉強も行っている。私以外のメンバーは、私からすれば十分に流暢で、自分だけレベルが低いことに時折引け目を感じながらも、毎週楽しく参加している。日本人の生真面目さもあって、出席率だけは一番高い。

毎週楽しく参加できるのは、英語が勉強できることに加えて、色々な雑学を教えてもらえるからかも知れない。エリザベス女王の一人称が「We」であることや、1ポンド硬貨の裏に描かれる四つの花(バラ、西洋ネギ、アザミ、シャムロック)がそれぞれイングランド、ウェールズ、スコットランド、アイルランドの国花であることも英会話クラスで知った。

正確な表現は忘れてしまったが、藤原正彦の「遥かなるケンブリッジ」に「イギリス人は謙虚な国民性」と書かれていたように思う。イギリス人である英会話クラスの先生は、日本人の謙虚で礼儀正しい(とされる)国民性を好意的に思っているようだ。私が入会できたのは、紹介があったことに加えて日本人であることが幸いした様に思う。

先日のクラスで、英語の中で最も大切な言葉は「murky (=not clear, はっきりしない)」と「It depends (場合による)」であると教えられた。様々な場面で驚くほど使われているのだと言う。こうした点からも、イギリス人は白黒をはっきりつけたがらない日本人と似ているのかも知れないと感じている。

なお、先述した知人というのはユニバーシティカレッジロンドン(UCL)で講師をされている鳥井亮先生のこと、学術講演会委員会でお世話になったMHPSの堀内康広さんが、「研究室の先輩がロンドンの大学で講師をしている」ということで紹介して下さった。真面目に委員会活動をしていて良かった。

3. ロンドンの生活

3.1 気候と食生活について

ロンドンの人口は約800万人であり、EU内の市域人口では最大で、イギリス国内の全人口の約13%を占める。移民が多いことからロンドンの文化は多様で、300以上の言語が話されている。日本人も多く、平成22年とやや古い資料であるが、外務省の海外在留邦人数調査によると、約3万5千人がロンドンに住んでいる。

地理的にはロンドンは北海道よりも北に位置しており、緯度はサハリン北部とほぼ同じであるが、メキシコ湾からの暖流の影響でヨーロッパの他都市に比べて温暖な気候である。とは言っても延べ10年近く横須賀で生活していた私にとってロンドンの気候は肌寒く、航空便が到着してすぐダウンを引っ張り出した。6月後半から7月にかけて気温が20℃を超えた日が3週間程度続いたのが短い夏だったようで、8月上旬には上着を着ていた。小学2年生の長女がイギリスでの昆虫採集を楽しみにしてい

たが、ハエよりも大きい昆虫を見かけることはほとんど無かった。9月上旬には吐く息が白くなり始め、コートを着る人を見かけるようになった。春には夜9時過ぎまで明るく楽しい気分であったが、段々と日が短くなってきて、何となく寂しい気分になる。冬には3時過ぎに暗くなるとのことで、心配しても仕方ないのに心配している。

渡英前、ロンドンの食生活を心配していたが、意外にも食生活は豊かである。移民が多いことから、中国やインド、韓国、イタリアを始めとして、ベトナム、ブルガリア、レバノン、カリブ、エチオピア等、日本ではあまり馴染みの無い地域や国の料理を、口に合うかどうかは別にして、食べることができる。スーパーにはブドウや桃、メロン、西瓜、ザクロ等色々な果物が並び、日本よりも品揃えに富むが、これらの大体はスペインやブラジル等からの輸入品である。

日本食材も手に入るものの、日本に比べて2~3倍と高いため、あまり買わないようにしている。

3.2 苦労した銀行口座開設

今のところ一番苦労したのは銀行口座開設で、各銀行の各支店にトライしては異なる理由で断られた。先生にもレターを3回書き直してもらい、トライ10回目にして何とか開設することができた。参考のために紹介すると、レターの必要条件は、氏名や住所、所属先が記載されていることに加えて、先生の手書きのサインがあること、収入がポンド(イギリスの場合)で記載されていること、月収および年収の記載があることであった。不備があるのであれば一度に指摘してくれれば良いのにと腹が立ったが、担当者の機嫌を損ねるのは良くないと思い、我慢した。先生も正直面倒臭かったに違いない。

10回目のときも、口座開設のやり取りの中で、「クレジットカードは必要か?」との質問に「ノー」と答えたのが担当者の気に入らなかったようで(クレジットカードを作れば担当者のポイントになるものと思われる)、グーグル翻訳を駆使して、クレジットカードの必要性をしつこく説かれた。

3.3 パブとニュートンとプリンキピア

イギリスといえば何と言ってもパブが有名で、インペリアルカレッジ学内にあるパブも学生や職員でいつも賑わっている。ロンドンの中心部であるホルボーン駅やテンプル駅の周辺には特に多くのパブが営業していて、店の入口では皆楽しそうにビールを立ち飲みしている。

先述の鳥井先生に、「ホルボーン駅の近くにニュートンがプリンキピアを執筆することを決意したパブがある」と教えていただいた。デブルー(The Devereux)というパブで、ニュートンやハレー(ハレー彗星の発見者)、フック(ばねのフックの法則の発見者)をはじめ、当時のロイヤルソサエティの面々が常連にしていたコーヒーハウス(Grecian Coffee House)の跡地に建つ。鳥井先生のその後の調査で、実際にニュートンが

Grecian Coffee Houseでプリンキピアの執筆を決意したかについては、残念ながら英語文献が見つけれず確証が得られなかったものの、かつてこの場所で偉大な科学者達がコーヒーを飲み、会話を交わしたのは事実のようである。

さらに残念なことに、デブルーは2016年11月に、すなわち私が渡英の準備を始めた頃には、既に閉業してしまっていた。ただし、周囲には素晴らしいパブが幾つもあり、例えばCittie of Yorkeでは趣のある古い雰囲気の中で美味しいビールを楽しむことができる。



Fig. 4 閉業していたデブルー（看板も外されている）

3.4 現地のひととの文化交流

大学の外でも現地のひとと交流したいと思い、毎月第2土曜日に開催されるBritish Origami Society (BOS)の例会に、家族とともに参加することにしている。実は、イギリスにおいて折り紙は古くから親しまれていて、2017年はBOSの創立50周年にあたる年であった。9月にシェイクスピアの生誕の地であるストラットフォード・アポン・エイボンにおいて、記念コンベンションが開催され、300名以上が参加し、世界的に有名な折り紙作家で物理学者でもあるRobert Lang氏がゲストとして招待されていた。Lang氏はカリフォルニア工科大学で博士号を取得した後、NASAのジェット推進研究所で研究を行っていたが、折り紙の創作活動に専念するためにNASAを辞めた経歴を持つ。憧れのLang氏に会いサインをもらえたことが、これまでのイギリス生活の中で一番の思い出となっている。

折り紙に関しては、その折り畳み・展開可能な特徴が注目され、近年、宇宙船のソーラーパネルや医療器具のステント、仮設住宅等、幅広い分野において工学的応用を目指した研究が多く行われるようになってきている。インペリアルカレッジ航空工学科でも、ミウラ折りを応用したソーラーパネルの研究が行われていて、学生が折り紙を片手にPCを見ながら展開図を考えていた。興味を持って話しかけると、試行錯誤を重ねた展開図と、その展開図に従ってソーラーパネルの試作モデルがスムーズに畳まれて行く過程を見せてくれた。お礼として私



Fig. 5 BOS記念コンベンションにて（左がRobert Lang博士）

拙作を折って紹介した。イギリスにおいても折り紙が文化的に親しまれ、工学的にも注目されていることを、折り紙好きの日本人として嬉しく思っている。

4. 最後に

初めての海外生活で、英語に関する苦労は多い。特に役所関係の手続きのため電話をかけるときはいつもドキドキしている。外国語大学を卒業した妻もすっかり自信を失って、小学校で英語を習い始めた長女に期待している。言葉の壁に悩みながらもホームシックにならないのは、Francesco Montomoli先生をはじめとした研究室のメンバーや日本にいる同僚の暖かいサポートがあることと、世界最先端の研究室に所属して研究を行っているという喜びがあることに因るが、これに加えて、ロンドンに住む人が多様で自分達も周りとは違うことをあまり気にしないで済むからなのかも知れない。

渡英後、マンチェスターのコンサートホールにおける爆弾テロ、ロンドン橋における車両テロ、高層住宅における火災、地下鉄での爆弾テロ等、物騒な事件・事故が起こったが、安全と健康に十分気を付けながら、残りの赴任生活を楽しまたい。

この原稿のタイトルは、不遜と思いながらも、また、あまり若くないと自覚しながらも、藤原正彦の「若き数学者のアメリカ」を真似して付けてしまった。これから海外赴任あるいは留学の予定のある会員の皆様、特に若手ガスタービン技術者の皆様には、海外生活における心構えを得る上で、「若き数学者のアメリカ」と本文中で触れた「遥かなるケンブリッジ」の両書を御一読されることをお勧めします。

最後に、留学を認め快く送り出して下さった電力中央研究所エネルギー技術研究所の藤井智晴リーダー、高橋俊彦・岡田満利両上席研究員をはじめグループの皆様には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 小阪 剛, “酒場天国イギリス”, 中公新書ラクレ.
第23回折り紙探偵団コンベンション折図集, 日本折紙学会.



学校で習わない英語 (15)

English Which Is Not Taught in School (15)

吉中 司*1
YOSHINAKA Tsukasa

- S - 章 (つづき)

{ 英語 }: smoke and mirrors

{ 意味 }: 「信用出来ないもの」、「まやかし」

{ 説明 }: 煙は本物の姿をぼやかし、鏡は本物の姿は映すものの、本物そのものではありません。そういうところから、この言葉は、「信用できないもの」とか「まやかし」という意味で使われます。

例えば、にせの保険勧誘員が来て、色々良い条件を出して保険を勧誘し、保険金を騙し取ろうとした、としましょう。それを見破った奥さんが、「何よ、この男。まやかしばかり言って」と感じた場合、英語では“ This guy is offering nothing but smoke and mirrors. ” となるでしょう。

{ 英語 }: get up to speed

{ 意味 }: 「追いつく」

{ 説明 }: これは、誰かが何かの理由で、皆より遅れた場合、「追いつく」という意味で使われます。

例えば、社員のAさんが、病気のために一週間ばかり会社を休んでいた間に、プロジェクトが進行したとしましょう。そのAさんが入社してきた朝、上司が幾つかのレポートのコピーを彼に渡しながらか、「先ずは、これらを読んで、皆に追いついてくれよ」と言いました。これは英語にすると、“ Read these reports, at first, to get yourself up to speed. ” でしょう。

- T - 章

{ 英語 }: Now, you are talking!

{ 意味 }: 「やっと同調してくれた」、「歩み寄りの姿勢を示した」

{ 説明 }: これ、色々違った状況の中で使われます。例えば、売り手と買い手が、或る商品の値段について交渉をしている、という状況です。両者とも夫々の立場を固守し、交渉は中々はかどりません。しかし、長時間の交渉

の後、やっと一方が妥協の意を示しました。そのお陰で、交渉が解決に一步近づきました。この際に、他方が“ Now, you are talking! ” と言えるのです。未だ妥協点に至ったわけではなくとも、妥協の方向に進み出した際に、この言葉を使えます。

{ 英語 }: touch and go

{ 意味 }: 「辛うじて」、「良くなったり悪くなったり」

{ 説明 }: この言葉を直訳すると、「触れたり、前進したり」です。この由来は、自動車の未だ発明されていなかった昔の馬車、或いは船から来ています(参考資料4)。馬車の場合、狭い道を馬車がすれ違う度に触れ合い、事故を起こすか起こさないか、すれすれの場合が、結構あったようです。また、船の場合は、浅瀬の散在する場所を通過する際、あちこちで船底が触れながら行くために、事故が起こり易かったのでしょう。

今日、この言葉は、その由来に沿って、「何か悪い事が起こるか起こらないかの境界にある」という意味で使われます。例えば、会社の業績が余り良くなく、小さな黒字と小さな赤字が四半期毎に繰り返される場合とか、慢性の病気で良くなったり悪くなったりする場合などです。前者の例では、英語で、“ My company's business is in a touch and go situation. ” となります。

ここで覚えておきたいのは、「touch」も「go」も動詞でありながら、これらを連結した言葉では、名詞または形容詞として扱われる、という事です。ですから後者の例で、「君のお爺さんの容態はどう」という質問に対して、「良くなったり、悪くなったりだよ」と答える場合、簡単に“ His condition is touch and go. ” と言えます。

参考資料(参考資料は本連載を通した番号で示しています)

4. "Oxford Dictionary of English Idioms, Third Edition"

Edited by John Ayto, Oxford University Press, 2009

原稿受付 2017年11月16日

* 1 独立コンサルタント

E-mail: tsuyoshi@videotron.ca

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞選考結果について

表彰委員会
学術講演会委員会

2017年10月18日、19日に愛媛県松山市総合コミュニティセンターで開催されました第45回日本ガスタービン学会定期講演会で実施いたしました「日本ガスタービン学会学生優秀講演賞」の選考結果についてご報告いたします。

本年この学生優秀講演賞の対象となった講演は、伝熱関係：4件、燃焼関係：3件、空力関係：5件、材料関係：11件の合計23件でした。発表内容・発表態度等について、複数の審査員により厳正な評価を行い、全ての審査対象講演の終了後に審査会を開催し、以下のとおり授賞が決定されました。

- ・東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 修士2年 村田 遼君
講演題目：「噴霧流れ中の圧縮機翼面周りの液挙動に関する研究 翼面の濡れ性の影響」
- ・東京工業大学 工学院 機械系 修士2年 中西 仁君
講演題目：「逆熱伝導解析による翼型熱交換器の伝熱性能評価」

授賞式は講演会第2日の午後に行われ、船崎健一会長より賞状及び副賞が授与されました。

今回、学生優秀講演賞の対象講演23編の発表はいずれも素晴らしく、積極にご参加頂いた学生の皆様に感謝申し上げますと共に、審査をお願いした方々には、全ての審査対象講演の聴講や審査会の開催など貴重なお時間を頂戴いたしましたことを、この場を借りて御礼申し上げます。

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞

噴霧流れ中の圧縮機翼面周りの液挙動に関する研究 -翼面の濡れ性の影響-

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻修士2年
村田 遼



この度、第45回ガスタービン学会定期講演会にて学生優秀講演賞をいただきましたこと、大変光栄に思います。

今回の講演では、圧縮機入口案内翼を対象に噴霧流れ中における可視化実験を中心に行い、翼周りの液挙動について翼面の濡れ性が与える影響の調査結果を報告させていただきました。今回の受賞を励みに、今後の研究活動も邁進していきたいと思っております。

最後に、今回の研究をすすめるにあたりご指導をいただいた渡辺紀徳教授をはじめ、日々の研究活動でお世話になっている方々に厚く御礼申し上げます。

逆熱伝導解析による翼型熱交換器の伝熱性能評価

東京工業大学 工学院 機械系 修士2年
中西 仁



この度は日本ガスタービン学会学生優秀講演賞をいただけたこと、大変光栄に思います。このような賞をいただけたのも、常日頃から熱心に指導して下さる伊藤先生、長崎先生のおかげです。心から感謝申し上げます。また、苦楽を共にした研究室の仲間にも感謝しています。研究室生活では多くの困難に直面しましたが、諦めることなく研究を続けてきたことが優秀講演賞につながったと思います。この賞に恥じないよう、今後も研究に励んでいきたいと思っております。

学術講演会発表助成について

表彰委員会

2017年10月18日、19日に愛媛県松山市総合コミュニティセンターで開催されました第45回日本ガスタービン学会定期講演会に参加して講演を行った学生に対して、本人からの申請に基づき、交通費の助成を実施した結果についてご報告いたします。

本助成制度は、定期講演会で講演する学生に対して、往復交通費の半額相当を助成することで、ガスタービン関連分野の若手人材の育成や技術の発展を奨励することを目的として設置されたもので、自ら講演する学生であることに加え、日本ガスタービン学会または関連学協会の会員であり、会費の滞納がないことなどが助成の条件になっております。今回の講演会では、9月1日を期限として応募者の募集を行ったところ、17名の募集がありました。表彰委員会内で慎重審議を行い、「学術講演会発表助成に関する内規」に則り、以下のような助成を行うことを決定いたしました。

東京地区からの参加者8名（東京大学1名、早稲田大学2名、首都大学東京3名、法政大学2名）に対しては各1万1千円、金沢地区からの参加者3名（金沢工業大学）に対しては1万4千円、岩手地区からの参加者3名（岩手大学）に対しては3万8千円、仙台地区（東北大学）からの参加者2名に対しては2万1千円、新潟地区からの参加者1名（新潟大学）に対しては1万5千円。

本助成制度が学生諸君の研究発表を奨励する契機になるとともに、ガスタービンの将来を支える若手人材の育成に寄与することを期待しております。来年度の定期講演会（鹿児島）でも同様の助成を検討しておりますので、学生諸君の積極的な参加をお待ちしております。

2017年度第2回見学会報告

泰中 一樹

TAINAKA Kazuki

2017年11月11日に、JFEスチール株式会社東日本製鉄所千葉地区において、本会主催の見学会が開催された。当日は素晴らしい秋晴れとなり、大学、研究所、電力会社、および重工メーカー等から17名が集まった。

初めに、見学センターにおいて、エネルギー部室長の荻野哲氏よりご挨拶を頂き、東日本製鉄千葉地区の概要をご紹介頂いた。千葉地区は、戦後初めての銑鋼一貫の製鉄所として建設され、その敷地面積は約766万m²（東京ドームおよそ170個分）に上っている。近隣には、商業施設やスポーツ施設があり、地域や環境との共生を目指した都市型の製鉄所である。

エネルギー部の河野隆志氏より千葉地区の紹介ビデオを上映頂き、企業の概要、銑鋼プロセスの基礎、見学スケジュールの詳細についてご説明頂いた。今回は、西発電所4号機、第3熱間圧延工場、およびJFE千葉クリーンパワーステーション発電所の見学を順に行った。

西発電所4号機は、2015年7月から営業運転を開始した定格出力166 MWの多軸型コンバインドサイクル方式の発電機である。GE製9Eガスタービンを採用しており、製鉄プロセスで発生する副生ガスを燃料として利用している。比較的発熱量の低い製鉄所の副生ガスと都市ガスを同時に燃焼できる国内初のガスタービンコンバインドサイクル発電方式であり、発電効率は従来の1・2号機より約3割向上している。実際に稼働しているプレフィルタ、燃焼器、および排煙処理装置等を見ながら、水噴霧や翼洗浄といった運用や保守に関する興味深い話を聞くことができた。

第3熱間圧延工場は、加熱炉で加熱された厚さ20 cm以上ある鋼の板（スラブ）をローラの間を通すことで厚さ0.8～25 mmの薄い鋼板に成形する工場である。加熱

炉から出てくるスラブからのふく射は強く、見学通路でもその熱を感じ取ることができ、迫力のある光景を見ることができた。ローラやスラブの冷却等で用いられている水は、93%以上が再利用されており、環境に対する意識の高さを感じることができた。

JFE千葉クリーンパワーステーション発電所は、独立系発電事業者発電所（IPP発電所；Independent Power Producer）として建設され、2002年6月から営業運転を開始した。その発電した電気は電力小売事業者を通じて供給されている。川崎重工業株式会社およびALSTOM製の定格出力390.8 MWの1軸型コンバインドサイクルを採用しており、2017年4月に改造工事を終え、定格出力を466.1 MWまで増加させた。燃料には都市ガスを使用している。NOx排出量を低減するために、2段燃焼方式としている。見学時には、ガスタービンを間近に見ることのできる場所まで、案内頂いた。また、出力増加の改造について、変圧器更新といった工事のお話等も聞くことができた。

見学センターに戻り、エネルギー部の土田貴道氏より、発電所の使用についてより詳細にご紹介頂いた。

全体の質疑応答においては、緊急時の対策から、材料、翼寿命の評価、保守点検に至るまで、幅広い活発な質問が続き、とても充実した質疑応答となった。

最後に、本見学会を開催するあたり、ご多忙中、見学会の準備から当日の案内まで多岐に渡ってご尽力・ご協力を頂いたエネルギー部室長の荻野哲氏をはじめ、JFEスチール株式会社の関係各位に厚く御礼を申し上げます。

(集会行事委員会委員)



設備紹介風景



参加者集合写真(見学センター)

2019年国際ガスタービン会議IGTC2019開催のご案内

IGTC2019実行委員会
委員長 西澤 敏雄

1971年に開始された国際ガスタービン会議 (International Gas Turbine Congress, IGTC) は第12回を迎え、2019年に東京で開催することになりました。

過去11回にわたり、IGTCは日本のガスタービン技術の発展に寄与してきました。2011年度には日本ガスタービン学会が公益法人化され、カバーする技術分野を「ガスタービンおよびエネルギー関連技術」に広げました。本国際会議を通じて、日本のガスタービンおよびエネルギー関連技術の発展に資する国際的な情報交換と発信、および人的交流を促進することを主たる目的とし、昨今のエネルギー情勢やガスタービン・航空エンジンの技術状況を反映させて、最新の学術・技術情報を交換するとともに、将来の技術展望や国際協力、また人材育成などを視野に入れた有益な討議を行う場をご提供したいと思います。

この度、準備運営のための実行委員会を発足し、開催場所および開催期間などを決定しましたので、下記の通り概要をお知らせ致します。会員の皆様には是非積極的なご参加とご協力をいただきますよう、宜しくお願い致します。

記

会議名称： International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo
(2019年国際ガスタービン会議東京大会)

開催場所： 虎ノ門ヒルズフォーラム (東京都港区虎ノ門1-23-3 虎ノ門ヒルズ森タワー4~5F)
<http://forum.academyhills.com/toranomon/index.html>

会 期： 2019年11月17日 ~ 22日
11月17日 参加登録, 歓迎レセプション
11月18日 ~ 21日 学術講演会, 展示
11月22日 見学会
会期中に懇親会を予定

日 程： アブストラクト締切り 2019年1月
ドラフト論文締切り 2019年4月
最終論文締切り 2019年7月 (いずれも予定)

そ の 他： 学会ホームページにアナウンスメントを掲載しております。また、今後詳細な情報をホームページに随時掲載してまいりますので、ご参照下さい。

2018年度会費納入のお願い

2018年度会費（2018年3月1日～2019年2月末日）の納入をお願い申し上げます。会費は、下記の通りとなっておりますので、2018年4月30日までにお納め下さいますようお願い致します。

なお、口座自動振替をご利用の方は、2018年3月23日にご指定の口座よりお引き落としさせていただきます。

<2018年度会費（不課税）>

正会員	8,000円
正会員（65歳以上*）	5,000円
学生会員	2,500円
賛助会員 1口	70,000円

（*2018年3月1日現在）

【納入方法】

郵便振替： 00170-9-179578
銀行振込： みずほ銀行 新宿西口支店
普通預金口座 1703707

いずれも口座名は、
シャ)ニホンガスタービンガッカイ です。
振込手数料は貴方にてご負担願います。

会費の納入には、簡単・便利な口座自動振替をお勧め致します。自動振替をご利用されますと、振込手数料は学会負担となります。ご希望の方は巻末の「預金口座振替依頼書」にご記入の上、学会事務局までお送りください。

次号予告 日本ガスタービン学会誌2018年3月号（Vol.46 No.2）

特集 ボイラ，熱交換器

巻頭言 小澤 守（関西大学）

論説・解説

ボイラー（熱交換器）の概要と基礎 刑部 真弘（東京海洋大学）

HRSG（排熱回収ボイラ）について（仮） 島田 秀顕，木村 賢一，中村 啓一（東芝）

大容量，高効率GTCCプラント向け排熱回収ボイラ 竹井 康裕，斎藤 直仁（三菱日立パワーシステムズ）

石炭ガス化技術とIGCCプロジェクトの最新状況 橋本 貴雄，坂本 康一，天本 幹夫，藤井 貴（三菱日立パワーシステムズ）

石炭焼きボイラの概要と最新動向 大熊 喜朋（IHI）

ボイラ配管の高クロム鋼についてのクリープ寿命評価 屋口 正次（電力中央研究所）

コンパクト熱交換器 藤田 泰広（住友精密機械工業）

GTCCにおけるボトムリングサイクルの熱交換器 奥山 知視（東芝）

廃熱利用機器 吸収式冷凍機の技術動向 牧田 和志（川重冷熱工業）

排熱回収ボイラの保守・運用 安藤 均（東北発電工業）

タイトル，執筆者は変更する可能性があります。

2017年度役員名簿

会長 船崎 健一(岩手大)
 副会長 油谷 好浩(東芝)
 法人管理担当執行理事 今成 邦之(IHI), 太田 有(早大)(兼務),
 渋川 直紀(東芝), 福泉 靖史(三菱重工), 渡辺 紀徳(東大)
 公益目的事業担当執行理事 太田 有(早大), 谷村 聡(MHPS),
 辻田 星歩(法政大), 福山 佳孝(JAXA), 松岡 右典(川崎重
 工), 松沼 孝幸(産総研), 山根 秀公(防衛装備庁), 山本 悟
 (東北大), 輪嶋 善彦(本田), 渡辺 紀徳(東大)(兼務)
 理事 川岸 京子(物材研), 高橋 俊彦(電中研), 田尻 敬次(荏
 原エリオット), 菟川 宏樹(JALエンジニアリング), 松崎 裕之
 (東北発電工業)
 監事 田沼 唯士(帝京大), 佃 嘉章(三菱重工)

2017年度委員名簿(順不同)

2017年12月15日現在
 は委員長

倫理規定委員会 福泉 靖史(三菱重工), 今成 邦之(IHI), 太
 田 有(早大), 渋川 直紀(東芝), 松沼 孝幸(産総研)
 自己点検委員会 福泉 靖史(三菱重工), 今成 邦之(IHI), 太
 田 有(早大), 渋川 直紀(東芝), 松沼 孝幸(産総研)
 運営委員会 今成 邦之(IHI), 太田 有(早大), 酒井 義明
 (東芝), 渋川 直紀(東芝), 塚原 章友(MHPS), 辻田 星歩
 (法政大), 福泉 靖史(三菱重工), 松沼 孝幸(産総研), 森岡
 典子(IHI), 渡辺 紀徳(東大)
 企画委員会 太田 有(早大), 今成 邦之(IHI), 塚原 章友
 (MHPS), 辻田 星歩(法政大), 福泉 靖史(三菱重工), 松沼
 孝幸(産総研), 安田 聡(MHPS), 輪嶋 善彦(本田), 渡辺
 紀徳(東大)
 国際委員会 渡辺 紀徳(東大), 井上 智博(東大), 太田 有
 (早大), 岡井 敬一(JAXA), 小森 豊明(MHPS), 谷 直樹
 (IHI), 都留 智子(川崎重工), 福田 雅文(高効率発電システ
 ム研究所), 三好 市朗(MHPS), 山根 敬(JAXA), 山本 誠
 (東京理科大)
 学術講演会委員会 松沼 孝幸(産総研), 阿部 一幾(MHPS),
 小熊 英隆(三菱重工), 尾関 高行(電中研), 武田 淳一郎(富
 士電機), 富永 純一(JFEエンジニアリング), 中山 健太郎(川
 崎重工), 浜辺 正昭(IHI), 姫野 武洋(東大), 平野 孝典(拓
 殖大), 藤原 仁志(JAXA), 渡邊 裕章(九大)
 集会行事委員会 輪嶋 善彦(本田), 金澤 直毅(川崎重工), 佐
 久間 康典(東大), 澤 徹(東芝), 泰中 一樹(電中研), 谷
 村 聡(MHPS), 手塚 津奈生(IHI), 長野 啓明(本田), 西江
 俊介(三井造船), 西村 英彦(MHPS), 菟川 宏樹(JALエンジ
 ニアリング), 藤井 達(日立), 山形 通史(富士電機), 山田
 誠一(防衛装備庁), 吉田 征二(JAXA)
 ガスタービン技術普及委員会 福山 佳孝(JAXA), 石田 克彦
 (川崎重工), 岡田 満利(電中研), 賀澤 順一(JAXA), 齋藤
 大蔵(東芝), 中村 恵子(IHI), 長谷川 晃(JALエンジニアリ

ング), 檜山 貴志(三菱重工), 村田 章(東京農工大), 山本
 誠(東京理科大), 横山 喬(MHPS), 渡辺 紀徳(東大)
 学会誌編集委員会 辻田 星歩(法政大), 荒木 秀文(MHPS),
 壹岐 典彦(産総研), 加藤 千幸(東大), 金子 雅直(東京電
 機大), 川岸 京子(物材研), 阪井 直人(川崎重工), 佐藤 哲
 也(早大), 渋川 直紀(東芝), 杉本 富男(三井造船), 高橋
 俊彦(電中研), 田尻 敬次(荏原エリオット), 多田 暁(JALエ
 ンジニアリング), 寺澤 秀彰(東京ガス), 寺本 進(東大), 中
 野 賢治(IHI), 新関 良樹(東芝), 野原 弘康(ダイハツディー
 ゼル), 馬場 勝(IHI), 原 浩之(MHPS), 北條 正弘(JAXA),
 松崎 裕之(東北発電工業), 森澤 優一(東芝), 山下 一憲(荏
 原製作所), 山根 喜三郎(防衛装備庁), 吉田 英生(京大)
 論文委員会 山根 敬(JAXA), 青塚 瑞穂(IHI), 壹岐 典彦
 (産総研), 小田 剛生(川崎重工), 柴田 貴範(MHPS), 田頭
 剛(JAXA), 寺本 進(東大), 中谷 辰爾(東大), 姫野 武洋
 (東大), 山本 悟(東北大), 山本 武(JAXA), 山本 誠(東京
 理科大), 吉岡 洋明(愛媛大)
 ガスタービン統計作成委員会 松岡 右典(川崎重工), 荒井
 慎吾(ターボシステムズユナイテッド), 恵比寿 幹(三菱重工),
 澤 徹(東芝), 原田 純(川崎重工), 村上 麻里子(川崎重工),
 山上 展由(MHPS), 山上 舞(IHI), 吉田 知彦(MHPS),
 米田 幸人(ヤンマー)
 産官学連携委員会 渡辺 紀徳(東大), 赤城 正弘(防衛装備
 庁), 壹岐 典彦(産総研), 岡崎 正和(長岡技科大), 金津 和
 徳(IHI), 岸部 忠晴(MHPS), 幸田 栄一(電中研), 佐々木
 隆(東芝), 武 浩司(川崎重工), 藤岡 順三(物材研), 二村
 尚夫(JAXA), 古川 雅人(九大), 松崎 裕之(東北発電工業),
 吉田 英生(京大)
 広報委員会 山根 秀公(防衛装備庁), 壹岐 典彦(産総研),
 酒井 義明(東芝), 姫野 武洋(東大), 村田 章(東京農工大),
 山根 敬(JAXA), 吉田 征二(JAXA)
 表彰委員会 油谷 好浩(東芝), 太田 有(早大), 辻田 星歩
 (法政大), 福泉 靖史(三菱重工), 松沼 孝幸(産総研), 山根
 敬(JAXA)
 将来ビジョン検討委員会 寺本 進(東大), 小田 豊(関西大),
 賀澤 順一(JAXA), 柴田 貴範(MHPS), 柴田 良輔(本田),
 高橋 徹(電中研), 仲俣 千由紀(IHI), 姫野 武洋(東大),
 森澤 優一(東芝), 山崎 裕之(東北電力)
 女性参画推進委員会 仲俣 千由紀(IHI), 猪亦 麻子(東
 芝), 川岸 京子(物材研), 都留 智子(川崎重工), 森川 朋子
 (MHPS)
 ACGT2018実行委員会 山根 敬(JAXA), 井上 智博(東大),
 谷 直樹(IHI), 都留 智子(川崎重工), 三好 市朗(MHPS)
 IGTC2019実行委員会 西澤 敏雄(JAXA), 太田 有(早大),
 斎藤 大蔵(東芝), 渋川 直紀(東芝), 鈴木 正也(JAXA),
 塚原 章友(MHPS), 寺本 進(東大), 仲俣 千由紀(IHI), 中
 村 恵子(IHI), 牧田 光正(JAXA), 安田 聡(MHPS), 山根
 敬(JAXA), 吉田 征二(JAXA)

編集 後記

会員各位におかれましては、恙なく新年をお迎えのことと存じます。旧年中より当学会誌をご愛読いただき、まことにありがとうございます。本年もよろしく願い申し上げます。

さて、ご覧いただきました通り、2018年を飾る本1月号の特集は、いつもと違います。特集「わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者」では、“歴史”からガスタービン技術をみてみました。先駆的に研究・開発を進められた偉人の意図や成果が、どのように活かされ、産業に実を結んでいるのかを考えることは、将来を計る上で重要なプロセスの一つであると思います。本特集が、特に、これからを担う若い方の参考になれば幸いです。

と書くことができ、今は安堵しています。昨年、この企画が当学会誌編集委員会で挙げられたときには、これはたいへんだ、と思いました。いつもなら、特定の技術トピックスを、直接ご担当の方に解説して頂くのですが、今回は、直にお話を伺うことも、ましてや原稿を戴くことなど叶わない大先輩方（敢えて、そう呼ばせていただきます）の偉人伝をつくらうというのです。大先輩方にゆかりのある方々の調査からはじまり、少しずつ情報を頂きながら、ご執筆をお願いできる方にたどり着いていきました。幸いなことに、前間様をはじめ、大先輩方の関係者ならびに関係機関の皆様には、快くご執筆、ご協力を頂きました。まことにありがとうございます。

また、この企画が、こうしてかたちになりましたのは、手前味噌ですが、当学会誌編集委員会 アソシエイトエディター吉田委員はじめ担当委員の大いなる熱意による

ところも大きいと感じています。その“熱意”を本1月号だけに収めることはできず、5月号に引き継ぎ、「わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者（その2）」を予定しております。ご期待を頂ければと存じます。

もう一つの小特集は、この数年恒例になっております、定期講演会のご報告です。昨年10月に松山で開催されました第45回定期講演会の様子を、企画行事を中心に、改めて会員の皆様にお知らせしました。“いま”の研究・開発を記録するため、お忙しいなかを、同講演会でのご講演・ご対応に加えて、原稿作成にまで時間を割いて下さいました、ご執筆者の皆様にご心より感謝申し上げます。

本年も当学会誌編集委員会では、会員の皆様に有用な情報を提供できるよう、鋭意活動して参ります。引き続きご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

（高橋 俊彦）

1月号アソシエイトエディター
吉田 英生（京都大学）
高橋 俊彦（電力中央研究所）
1月号担当委員
杉本 富男（三井造船）
野原 弘康（ダイハツディーゼル）
山下 一憲（荏原製作所）

（表紙写真）

表紙写真は、(株)J. G. コーポレーションの故渡辺秀行氏による編集「1号ガスタービンの思い出集」(1989)から転載させていただきました。

だより

✪事務局 ✪

新年明けましておめでとうございます。本年もよろしく願い申し上げます。

最近、事務局は目の前の業務に追われっぱなしですが、そんな中、昨年末に会議用机と椅子を譲り受け、20～30年ぶり（正確な数字はわかりません）に会議室の机と椅子を取り替えました。今までの茶色の会議机と折りたたみ椅子から一転、(中古とはいえ)真っ白なテーブルときれいなブルーの椅子で、会議室も少し近代的な雰囲気になりました。椅子の座り心地も格段によくなったように感じます。移転する事務所の不用品をいただいたのですが、机椅子といっしょに電子レンジもいただき、以前よりもかなり新しいレンジで温めるお弁当はなんだ

かおいしく感じます。我ながら、案外単純、と思ってしまう。

また、学会ウェブページも何箇所か更新いたしました。ひとつは、広報委員会からの報告にもありますようにFacebookの立ち上げです。行事の案内のほか、事務局からも折を見て（頻繁にアップできるかわかりませんが）事務局の周辺のことなど発信できれば、と考えております。また、ウェブページでは英文論文（JGPP）同様、学会誌掲載の和文論文（技術論文）も閲覧できるようになりました。アーカイブとして、学会誌のほか、定期講演会論文集やセミナー資料集（こちらはまだ準備中）も掲載されます。みなさまにはぜひご活用いただければと思います。

（中村 優美）

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2017年2月8日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems)による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	技術論文投稿要領による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、技術論文投稿要領に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。なお、非会員の第一著者には掲載号学会誌1部も贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める著作権規程による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブプロ(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 TEL：03-5733-5158
 FAX：03-5733-5164
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2017年8月25日改定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 学会誌原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日本語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - 特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - 他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円(税別)の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円(税別)を負担する場合には、カラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、学会誌原稿執筆要領に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、技術論文原稿表紙とともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文委員会が論文査読に関する内規に従って査読を行い、掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および発行要領（抜粋）9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
 Vol.46 No.1 2018.1

発行日 2018年1月19日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 辻田 星歩
 発行者 船崎 健一
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
 第3工新ビル402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
 (簡) 1703707
 印刷所 ニッセイエブプロ(株)
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164

2018, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会
 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
 FAX：03-3457-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、学術著作権協会に委託致しておりません。直接、本学会へお問い合わせください。