

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500972

研究課題名（和文） 空気力学史における計測の問題

研究課題名（英文） Problems of Measurement in the History of Aerodynamics

研究代表者

橋本 毅彦（HASHIMOTO Takehiko）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：90237941

研究成果の概要（和文）： 空気力学研究の主要実験装置である風洞における計測の問題を歴史的に分析した。特に、1910年代における英独の科学者の風洞測定信頼性に関する分析、1920-30年代における風洞と飛行試験による境界層の振る舞いをめぐる研究を取り上げた。

研究成果の概要（英文）： Problems of measurement by the wind tunnels in the early history of aerodynamics have been investigated. In particular, I have analyzed the controversy over the reliability of wind tunnel measurement in England and Germany in the 1910s and the comparative studies of model and full-scale measurement of boundary layer in the 1930s.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学技術史

キーワード：科学史・技術史・空気力学史・航空工学史・計測技術史

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、博士研究として戦前の航空工学・空気力学の歴史を研究し、その後も日米欧の空気力学・航空工学の歴史をいくつかの側面で研究してきた。2006年秋にドイツの研究者たちによって組織されたシンポジウムに招待されたが、そこで戦前の航空工学・空気力学の理論と実験の歴史に関して、海外の科学史研究者が関心を集めていることを知った。そのシンポジウムで触発を得た課題が、風洞の信頼性に関する問題であり、研究代表者が研究していたイギリスの空気力学における風洞試験の信頼性、実機試験とのデ

ータの乖離からくる寸法効果の問題に関心をもつに至った。

2. 研究の目的

本研究は、初期の航空工学、とりわけ空気力学研究の歴史における各種の計測方法の発展の経緯を調査検討することによって、モデル実験の妥当性や安全基準の策定などの問題を扱うものである。具体的には以下のことを明らかにしようとする。

- (1) 第一次世界大戦前から大戦後にかけて、イギリスの航空工学者の間で風洞試験の計測データの整合性・信頼性に関して、

どのような検討が進められ、どのような決着がなされたのかについて可能な限り詳細で精密な分析を行う。

- (2) 風洞は、1920年代後半以降、変圧風洞、巨大風洞、高速風洞などの各種風洞が建設され、空気力学の計測に利用されるようになったが、これらの風洞の設計と利用の現状とその背後の思想についても検討する。

以上の研究を元にして、戦前の空気力学研究に関する著作を出版する。

3. 研究の方法

本研究は、基本的に文献歴史資料をたどることで調査を進めた。

イギリスにおける航空工学・空気力学の風洞ならびに飛行試験での計測の問題については、イギリスのキューに所在する国立公文書館に所蔵される技術報告と委員会議事録を調査した。寸法効果小委員会の議事録を参照しつつ、公刊・未公刊双方の技術報告書を分析した。

二次文献については、とりわけ Michael Eckert, *The Dawn of Fluid Dynamics* (Weihheim, 2006) を参考にして、空気力学の基礎理論としての境界層研究の系譜をたどった。

日本の空気力学に関しては、公刊された論文の多くはインターネット上でアクセス可能である。これらの航空研究所報告・彙報、航空学会誌論文・記事を参照した。現在東京大学先端科学技術研究センターに保存されている航空研究所所蔵の図書も活用した。また日本大学に所蔵されている谷一郎関係の文書などを利用した。

4. 研究成果

研究成果は、主として3つのトピックに分けることができる。それぞれが、出版予定の本の中の一章としてそれぞれまとまることになった。

〈第一次世界大戦の寸法効果論争〉

(1) 【風洞実験の再検討と論争の勃発】

第一次世界大戦中のイギリスにおいて、モデルを利用した風洞実験の計測結果と実機を利用したフルスケールでの計測結果との間に齟齬が見出され、その原因の分析のために寸法効果小委員会が組織され、調査が進められた。正式な寸法効果小委員会の発足に先立ち、暫定的な委員会が組織され原因追及にあたった。彼らの意見、データの解釈などは委員会の議事録とともに、彼らが頻りに提出した報告書に記されている。このケースでは、

モデル実験の信頼性を疑問視する側 (RAF のファレンら) と逆にフルスケールの実験の信頼性を疑問視する側 (NPL のベアストウら) に分かれ論争的な議論の応酬がなされた。そのような二つの異なる立場に分かれたことは、ファレンの記録に実質的に委員長役割を果たしたピタヴェルが「審判」の役割を果たしたと言及されていることに明瞭に見て取ることができた。

(2) 【フルスケール実験の精査】

対立する利害関心を有する二つの派に分かれ調査活動が進められことは、調査の内容に影響を及ぼした。ファレンら王立航空機工場 (RAF) のスタッフが風洞のデータと実機の計測データとのずれを立証しようとしたのに対し、ベアストウは風洞試験のデータの信頼性をなるべく擁護しようとし、逆にフルスケールの実験結果の信頼性を批判しようとした。ベアストウの発言力の強さから、調査活動の力点は風洞試験結果の信頼性よりも、フルスケールの飛行実験における誤差発生の諸要因に向けられることになる。そのために、ベアストウはフルスケールの飛行実験に基づく飛行機の各性能の算定方法の成り立ちを分析し、誤差が生じる余地をもつ要因を並べ上げた。実機によって計測される飛行機主翼の揚力や抗力などは、直接に測定されるものではなく、エンジンの出力など他の計測データを差し引きすることで間接的に導出されたものである。ベアストウはフルスケールのデータがそれらの複数の測定データから算定された構成的性格をもつことを指摘し、そうであるが故に誤差が生じている確率が高いことを示そうとした。ミニチュアの飛行士を搭乗させた精巧なモデルが作られたりしたが、それは誤差の発生原因をフルスケールの飛行データから可能な限り取り除こうとした RAF 側の努力の表れである。

(3) 【寸法効果論争の結末】

両者の検討にもかかわらず乖離の原因は明らかにできなかった。調査の後半で翼面の風圧分布を測定する方法が G. I. テイラーによって提案され、測定の結果複葉機の上翼の下面に有意な差があることが明らかになっていった。しかしそのような知見が得られたのは調査活動の最終段階においてであり、それを出発点に圧力分布の比較をさらに深めていくことはなされなかった。寸法効果委員会は最終報告書を提出し、その提言に従ってこのような現象を含めてより基礎的、一般的な空気力学上の問題を検討する「空気力学小委員会」が設立されることになった。

- (4) 1920年代にドイツのプラントル理論がイギリスに導入されることによって、翼型の計測にあたっては風洞壁の効果を考慮する補正法が利用されるようになる。これによって風洞データと実機のデータとの乖離はある程度解消されることになった。また風洞間のデータの一致具合をより根本的に検討するために国際風洞比較試験のプロジェクトが企画され、実行されることになった。

<1930年代の境界層研究>

- (5) 1920年代末から1930年代にかけて、境界層や乱流の流体力学的研究が大きく進展したが、その際に乱流の計測や低乱流の風洞が開発されたりした。そのような1930年代の乱流の理論的実験的研究に関して、英国航空研究委員会内の流体運動パネルに着目して、その議論の推移と研究成果について調査した。その結果、ケンブリッジ大学の流体力学研究者G. I. テイラーが新しい乱流の統計理論を提出したが、その理論的知見に触発され、同じくケンブリッジ大学のB. M. ジョーンズが乱流がわずかながら存在する風洞での境界層測定と大気中に飛行して行く境界層測定との違いを推測し、そのような実機による測定を実行することになった。このアイデアと研究成果は、アメリカのE. ジェーコブスに伝えられ、彼の層流翼と呼ばれる翼型の開発につながった。
- (6) 流体運動パネルでの議論を追い、1930年代における乱流と境界層をめぐる理論的実験的研究の推移を見た。パネルの活動の一環である乱流と境界層に関する研究動向を概観する論集に、テイラーは乱流理論の報告を寄稿した。会議でテイラーの報告に対してジョーンズが重要なコメントを加えたことを見た。テイラーが新しく考案した乱流の統計理論の内容を会議で説明するとし、ジョーンズがそのそれが技術的に含意することを見抜いた。大気中と風洞内で渦のサイズが異なることから、大気中では風洞よりも乱流遷移が起こりにくい可能性がある、ジョーンズはその理論的推測が意味することを即座に理解したのである。ジョーンズにとってそれは一つの発見であり、自ら1920年代初頭から持ち続けてきた飛行機体の空気抵抗削減という研究関心への重要なヒントを会議の席上で掴んだ。
- (7) ここで注意をひくのは、テイラーもジョーンズもこの発見を公の場で公表しなかったていないことである。テイラーの技術報告は王立協会紀要として出版することが了承されたが、科学論文として出版

されるときはジョーンズのが委員会の会議の場で指摘したことを隠すように気づいたことなるべく読者に気づかれぬように、いわばディスカバー（発見）されたことをカバー（隠蔽）するかのようにより、テイラーは節のタイトルを変更し、大気中の平均乱流のサイズの具体的数値を科学論文から削除したするのである。これは委員会の場で発見された回覧されたアイデアは知見は内部情報として温存され、科学知識として世界中の科学者によって公共的に共有される科学知識とは一線を画して扱われることになったたことを示している。このことは、政府委員会の議事録を読むことの重要性を改めて教えてくれる。ジェーコブスらの層流翼発明の一つのアイデアの源泉がジョーンズの飛行実験であることが語られている。しかしジョーンズの研究自体の源泉としてテイラーの乱流理論の研究があること、そのことは公にされた論文からだけでは知ることができない。委員会議事録と未公刊の技術報告を閲覧することによってのみ、それは知ることができるのである。またテイラーの理論が重要な貢献をしていることの歴史認識は、ケンブリッジを一時訪問したジェーコブスへの情報の提供と、テイラーの下に長期滞在していた友近への情報の非提供という外国人研究者に対する異なる対応も気づかせてくれた。

<谷一郎の境界層研究と層流翼発明>

- (8) イギリスのテイラーとジョーンズの研究との関連で、1930年代における日本の虚空工学者谷一郎の空気力学研究に注目し、その成果として、ジェーコブスとほぼ同時になされた層流翼の発明過程を調査した。調査と研究の過程で、谷家所蔵の史料、また谷から寄贈された日本大学所蔵の谷一郎関係資料を参照することができた。それにより、谷の層流翼発明のプロセスについてその輪郭をより精密に掴むことができるようになった。その成果は、2012年度の日本科学史学会年会で講演発表し、2012年出版予定の著作『空気力学と航空の時代』の中の1章で詳細に解説することになっている。
- (9) 層流翼は、ジョーンズの飛行機の流線形化による改良努力の次に段階として構想されたものであり、飛行機全体の中でも大きな抗力を発生する主翼の表面摩擦抗力を、境界層をコントロールすることによって低減させようとする高速機用の新型翼として開発された。上述のように、それはテイラーの理論的新知見、ジョーンズのその技術的効用の認識、そのアイ

デアを教示されたジェーコブスによって1939年に米国NACAで開発された。谷が層流翼の開発に取り組んだのは1939年であり1940年に具体的な設計案が提示された。米国における開発に約1年遅れてほぼ独立に日本において新型翼型が開発されたことになる。ほぼ独立にというのは、谷の回想から谷は層流翼の開発になかなか本腰を入れて取り組まなかったが、1939年にNACAで層流翼が開発されたという報を聞くに及び、そのための多大な労力を要する計算作業に取り組むことになったとしており、層流翼が実現したという情報が開発のための最後の一押しを与えたからである。だがそのための具体的な技術情報は雑誌記事にはまったく与えられておらず、谷は境界層に関する最新の理論的実験的知見を独力で身につけ、大学の同僚が考案した翼型から翼面上の圧力分布をより簡単に算出する新しい計算方法を利用することで、助手の卒業生とともに新翼型を設計したのである。谷がそのようにほぼ同時、ほぼ独立に国際的な研究成果を達成した背景には、それを支えたいくつかの要因があったことを指摘することができる。第一に谷が翼の揚力と抗力を計算する理論と技法を心得ているとともに、1930年代に急速に進展した境界層をめぐる理論的実験的研究をよくフォローしていたことをあげることができる。第二にそのような谷が海外の空気力学の研究動向をフォローすることを可能にしたのが、東京帝大航空研究所で購入される膨大な航空工学ならびに関連分野の学術雑誌だったことを指摘できよう。付け加えて、1934年に設立された航空学会において、海外の学術文献を網羅的にサーベイする抄録委員会の活動も、谷の海外研究動向の掌握に大きく貢献しただろう。また第三に谷の大学時代の同窓である菊原は、1936年の早い時点で将来に必要な飛行機の性能仕様を洞察し、谷にそのような技術の開発を強く促した。そのような将来を見越すことのできる優れた飛行機設計技術者の存在も、谷が国際的な研究成果に到達することに一役買ったように思われる。

- (10) 層流翼の開発にあたっては、設計された層流翼を風洞で実験するとともに、実際に製作して実機に装備して性能を確認していく作業が進められた。層流翼の性能の確認にあたっては、もともとのテイラーとジョーンズの研究から乱流を極限的に減少させる必要があった。そのような低乱流風洞の設計の建設が、世界各国で進められたが、谷の下でも低乱流風

洞の設計と建設が試みられた。そのような試みは、航空研究所集報に紹介されているとともに、最近東京大学先端科学技術研究センターで見出された資料の中にも低乱流になるように心がけられたことが記されている。

- (11) 実際に層流翼を製作するにあたっては、翼面の粗さの許容範囲（許容粗度）を理論的・実験的に確認する必要があった。そのために異なる直径の針金が翼面に貼り付けられ、乱流の生じ方が計測された。谷の著した一般向けの記事の中には、許容粗度に関して1/10~1/20mmという数値が紹介されている。このような許容粗度を導出したものの、当時の日本の工作技術では、このような平滑さを備えた翼面を大量生産することは非常に困難だったことが認識されることになる。日本大学に所蔵される谷一郎文書の中の陸軍の機密報告には、層流翼を備えた米軍機（ムスタングP-51）がドイツで捕獲され、調査された結果が紹介されているが、そこには同機が驚くほどの平滑な翼面を達成していることが記されている。今後、このような日米における工作技術の落差を探ることも興味深い研究課題となろう。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

- ① Takehiko HASHIMOTO、‘How Far Do Experiments on Models Represent Experiments on Full Sized Machines?’ The Examination and Dispute on the Reliability of the Wind Tunnels in Britain, 1909-1917、Historia Scientiarum, 査読あり、Vol. 20、2010-11、pp. 96-122.
- ② 橋本毅彦、読書する技術者：戦前航空工学の洋雑誌と文献渉猟、科哲、査読なし、12号、2010、2-7.

〔学会発表〕（計6件）

- ① 橋本毅彦、谷一郎の層流翼発明、日本科学史学会年会、三重大学、2012年5月27日.
- ② 橋本毅彦、抵抗削減の追求：戦前日英の空気力学研究と層流翼発明、「乱流の遷移と制御」研究会、電気通信大学、2012年3月29日.
- ③ 橋本毅彦、渦、乱流の研究と翼型の開発—とくに層流翼の発明をめぐる—、招待講演、RIMS共同研究「オイラー方程式の数理：カルマン渦列と非定常渦運動 100

年」、京都大学数理解析研究所、2011年7月22日。

- ④ 橋本毅彦、戦前航空工学者の海外学術文献の講読—谷一郎の場合—、日本科学史学会年会、東京海洋大学、2010年5月29日。
- ⑤ Takehiko HASHIMOTO、Controversy over the Reliability of Wind Tunnels in Early Aeronautical Research in Britain、International Congress of History of Science and Technology, 30 July 2009, Budapest, Hungary.
- ⑥ 橋本毅彦、計測装置としての風洞と寸法効果論争、日本科学史学会年会、九州大学、2009年5月23日。

〔図書〕（計1件）

- ① 橋本毅彦、空気力学と航空の時代：国家的研究開発体制の創始と内実、東京大学出版会、2012年出版予定。

〔産業財産権〕

- 出願状況（計0件）
- 取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本毅彦 (HASHIMOTO Takehiko)
東京大学大学院・総合文化研究科・教授
研究者番号：90237941

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし