

# 初期航空工学の安定性研究

— 科学と技術の仲介者としてのレオナード・ベアストウ —

橋 本 毅 彦

## 一、序 論

飛行機は二〇世紀の初頭に発明され、一世紀の間に長足の進歩を遂げた二〇世紀を代表する技術である。当初は発明家によって製作され改良が加えられていたが、第一次世界大戦の前夜にあって、飛行機の軍事的重要性が各国の政府で認識されるようになると、その改良と開発のために国内の科学者や技術者が政府の委員会や研究所に招かれて、協力してその改良と開発に関わっていくようになる。飛行機の開発は、そのような国家的な研究開発のあり方を先取りする事例でもあった。

イギリスにおいてもそのような飛行機並びに飛行船の改良と開発を目指す政府の委員会として「航空諮問委員会 (Advisory Committee)」が一九〇九年に設立され、関係する科学者、技術者、そしてユーザーとしての軍関係者が招かれて研究開発のための課題や方針を協議した。集まった科学者・技術者が専門とする分野はさまざまである。流体力学を専門とする物理学者、気象学者、機械工学や船舶工学に詳しい技術者、実際に飛行機の設計に携わる技術者など。それらの多様な分野的背景をもつ専門家たちが一同に会し、いかにして航空機の開発という一つのテ-

マをめぐり協力して検討することができたのか、それが航空工学の初期の歴史を見る際の一つの興味ある歴史的問題となる。

イギリスの政府委員会におけるさまざまな研究課題の中で、委員の関心を集めるようになったテーマが飛行機の安定性と操縦性に関する問題であった。イギリスの標準局に相当する国立物理研究所(NPL)に務めるレオナード・ベアストウは、この安定性の実験的研究を計画実行するにあたって中心的な役割を果たした。その際、応用数学者であるジョージ・ブライアンが提示した一般的な安定性理論に依拠しつつ、飛行機のモデルを利用した風洞実験をこなすことで、安定な飛行機の設計の要件を探りだすことに務めた。そしてこの実験研究は、実際に陸軍の飛行機を製作する工場の設計者たちにより、安定な飛行機を設計する際の指針として利用されていくことになる。

本稿は、このイギリスの航空諮問委員会の下での初期の航空工学の研究開発の歴史に注目し、さまざまな分野的背景をもつ科学者と技術者との間の協力がいかにして可能になったか、とりわけ安定性の研究開発において科学理論から技術実践への応用がいかにして進められたのか探ろうとするものである。事例分析を通じて、科学と技術の両者を介在する人物としてのベアストウという実験科学者の存在にスポットライトをあて、彼の役割と業績、そして彼の業績をめぐる同時代の科学者や技術者たちの認識を探っていくことにする<sup>(1)</sup>。

以下第二節ではブライアンが提唱した安定性の理論の要点を説明し、第三節ではその安定性理論に基づくベアストウの風洞実験研究の概要とその飛行機の設計への応用を説明する。第四節ではベアストウの研究成果を技術者たちがさらに理解しやすいようにグラフや立体モデルなどの視覚的表現が活用されたことに注目する。第五節ではその後のエピソードから理論家と技術者との論争の仲裁役をベアストウが引き受けたエピソードを取り上げて、そこでベアストウが同時代人によって「科学的仲介者」と呼ばれたことに目を向ける。続く第六、第七節ではドイツとアメリカにおける空気力学と航空工学の研究に目を向け、イギリスとアメリカの両国においてベアストウらの進め

た安定性の研究が航空工学の研究として非常に重視されていたことを確認する。

## 二、ブライアンの安定性理論

航空諮問委員会は一九〇九年五月に第一回の会合をもった。それ以降、同委員会は七月と八月の夏期休暇を除き、毎月定例の会合を開催した。科学者、技術者、軍人たちがロンドンの会議室に集まり、航空機を開発し改良していくための現在と将来の課題を検討した。各会合においては、送付されてきた書簡、また委員会外部の研究者や発明家から寄せられる論文が朗読紹介され、手短に議論された<sup>(2)</sup>。最初の数回の会合の重要な議題は、航空と飛行に關連するすべての問題に關して現状での知識を収集することであった。それらは、飛行機と飛行船の安定性と操縦性、飛行機のエンジン、プロペラ、航空気象、飛行船の材料と構造、他の研究機關の研究計画と成果などに及んだ。彼らはまた、委員会の管理下にあるNPLの風洞実験施設での実験課題について決定をしなければならなかった。

安定性と操縦性の問題は、最初の会議から委員によって言及されていた。委員会の事務局長であるNPLの所長を務めていたリチャード・グレースブルックは、応用数学者ジョージ・ブライアンから受け取ったという書簡を紹介した。そこには飛行機の安定性の理論に關してある成果を得て、それらの情報を委員会に提供してもよいというものであった<sup>(3)</sup>。ブライアンは、ケンブリッジを数学卒業試験第五位で卒業した後、ウェールズのバンゴールのノースウェールズ・ユニヴァーシティカレッジで数学の教鞭をとっていた人物で、同大学で同僚と航空の安定性の数学的分析に取り組み、特に飛行機の縦方向の安定性に關して論文を出版していた<sup>(4)</sup>。ブライアンの申し出は委員によって好意的に受けとめられ、自動車と飛行機の技術に詳しいフレデリック・ランチェスターと王立砲兵学校の応用数学者ジョージ・グリーンヒルがブライアンと連絡をとり、この問題について協議をするように要請された。ブライアンの当初計画では、飛行機の安定性に関する論文を一九〇九年秋までに委員会に提出する予定であったが、

他の仕事に追われて論文の完成を延期せざるを得なくなった<sup>(5)</sup>。ブライアンはより速やかに完成させるために助手を雇うための資金援助を委員会に要請したが、委員会ではその要請は否決された<sup>(6)</sup>。それ以降、ブライアンからの音沙汰はなくなってしまう。委員会の議事録で彼の安定性の理論的研究についての言及は、その後しばらくはまったくなされなかった。

ブライアンは委員会へ報告書として提出する代わりに、自分の個人的な著作として二年後に安定性の理論についての論考を出版した。『飛行の安定性——飛行機の運動に応用される動力学的安定性への入門』と題されたその著作は、飛行機の縦方向の安定性ととも横方向の安定性も議論するものであった<sup>(7)</sup>。この論考において、ブライアンは彼の新しく提出する理論をそれまでの理論との差異について次のように述べている。彼の理論は「動力学的な」理論であって、それ以前の「静力学的な」理論、たとえばフランスの科学者マルセル・ブリルアンのものとは区別されるのだという。ブリルアンの理論では飛行機の各部分に働く力の間の安定な平衡の条件を論じるものであるが、ブライアンの理論は飛行機の固有な動的な安定性、すなわち飛行機が突風などによって擾乱を受けるときにも安定な姿勢を保つような条件を論じるとされる<sup>(8)</sup>。

動的安定性の問題については別のフランスの技術者、ロドルフ・ソローが基本的な方程式を提出している。しかしブライアンによれば、彼の方程式は二つの横方向の回転運動、すなわちヨーイング（偏揺れ）とローリング（横揺れ）と呼ばれる二種類の回転運動の相互関係を考慮しておらず欠陥をもっている。この「よくある過ち」のために、ソローの理論では垂直尾翼のない飛行機が設計されてしまうことになるが、それは固有に不安定な飛行機である。

ここで、飛行機が運動するときの回転運動の種類について説明しておこう。三次元空間の中を飛行する飛行機は、前後・左右・上下の三つの軸方向に運動することができる。それとともに飛行機はこれらの三軸のまわりで回転運

動も行うことができる。前後の軸のまわりの回転運動を「ローリング (rolling)」あるいは「横揺れ」といい、左右の軸のまわりの回転運動を「ピッチング (pitching)」あるいは「縦揺れ」といい、上下の軸のまわりの回転運動を「ヨーイング (yawing)」あるいは「偏揺れ (かたゆれ)」という。これらの回転運動は海上を走行する船の場合にも存在し、これらの用語が従来から使われている。飛行機の運動では、船にはない上下方向の運動が加わるわけであるが、三種類の直進運動と三種類の回転運動、計六種類の運動を飛行機はすることができ、別の言い方をすれば、飛行機の運動は直進運動と回転運動とを合わせて六次元の運動であるということが出来る。

ブライアンの理論は二つの横方向の回転運動、ローリングとピッチングの相関関係を考慮することで、方程式の解はソローのものより複雑になっている。しかし彼の理論は、三つの回転運動すべての相互関連性を考慮するものではない。それは便宜的に飛行機の諸運動を二種類の運動に分別することによる。ブライアンの理論では、飛行機の直進と回転の諸運動は、一つは飛行機の前後軸と上下軸で形成される垂直平面内の運動、もう一つはこの垂直面外の運動の二種類に分割される。垂直面内の運動とは、前後方向の運動、上下方向の運動、そしてこの平面内で回転する左右軸のまわりのピッチング (縦揺れ) の運動の三つであり、それらによって合成される運動である。一方、垂直面外の運動とは、左右方向の運動、前後軸のまわりのローリング (横揺れ)、上下軸のまわりのヨーイング (偏揺れ) の各運動とそれらによって合成される運動である。左右方向の運動は、「横滑り (side slipping)」とも呼ばれる。ブライアンはこのように六次元の運動を垂直面内とそれ以外の運動とに分け、それらの間には相互関係はないと前提したのである。これらの垂直面内と外の二種類の運動に関する安定性を、縦方向 (longitudinal) の安定性と横方向 (lateral) の安定性として、それぞれ区別して論じることになった<sup>(9)</sup>。

ブライアンは彼の理論を構築するにあたって、ケンブリッジ大学の数学者エドワード・J・ルースの剛体の動力学理論を参考にして<sup>(10)</sup>。一九世紀の間にはジェームス・ワットが発明した蒸気機関の回転運動を一定の速度

に調節するための調速装置 (governor) が改良され、天文観測器具などにも応用されることで複雑な運動を伴うものも開発されていた。それら調速装置が安定に回転運動する条件については、ジェームス・クラーク・マックスウェルを始めとする一九世紀後半の数学者・物理学者がその分析に取り組んだ。マックスウェルは彼の主要業績である電磁気学理論を發展させるにあたって、電磁気現象を表現するような機械モデルを考察しており、そのような力学的モデルの考察にあたって調速装置の研究成果も参考にした。ルースはケンブリッジ大学の数学者の教育者であり、ブライアンも彼から剛体力学の数学的取り扱いを習い、彼の教科書をよく参考にしたことだろう。そしておそらく飛行機の運動の安定性の方程式を導出するにあたって、調速装置をめぐる力学理論は参考にされたことと思われる。

ブライアンはまず飛行する飛行機の動力学的特性を表現するために、飛行機の三次元の直進運動、三次元の回転運動、計六次元の運動に対応して、六つの運動方程式を書き表した。それらは六元連立の方程式となり、それを解くことによって運動を求めることができる。運動方程式には各次元の運動だけに由来するものばかりでなく、飛行機の力学的特性に応じて各次元の運動どうしの相互関係も反映されている。たとえば直進運動の速度が増せば、それは揚力の上昇によって上昇運動の速度を増すことになる。また上記で言及した横方向の運動は垂直尾翼を通じてヨーイングのモーメントを働かせることになり、そのようなモーメントがヨーイングの運動方程式の項として含まれる。彼はこのような六つの運動方程式を前提にして、小さな速度の変化が飛行機の全体の運動にいかなる影響を及ぼすかを分析する。

その際に、六次元の各速度の微小変化が  $\delta v$  に比例すると仮定することによって、連立運動方程式を解くことを、えに関する代数方程式を解くことに帰着させる。前述のとおり縦方向と横方向の安定性をそれぞれ独立に考えると、双方の連立運動方程式は、二つのえに関する四次方程式へと還元され、両者の安定性はそれぞれの方程式で解かれ

る入の性質によって判定されることになる。すなわち、四次方程式の四つの解の実数部分がすべて負である場合、飛行体の微小変動はいずれも時間とともに減衰し、それは安定して飛行するということが結論される。

このパラメータを求めめるにあたって、代数方程式が解かれなければならない。それらの方程式の係数は飛行機の動的特性を反映するもので、速度導関数、回転導関数などと呼ばれる。従って方程式を解くにあたって最初になすべきことは、各モデルの飛行機に特有なこれらの係数を決定していくことになる。ブライアンはそれらの係数を求めるにあたって、飛行機の形状をごく単純な構成をしているものと仮定することで導出している。また論考では、それらの係数を導出するためには、モデルを利用した測定実験によっても求めることができることを示唆している。たとえば片持ち棒を水平に回転させて風の抵抗を測定する「回転アーム (whirling arm)」と呼ばれる装置や、振り子を利用してそのような測定ができるだろうと述べている。NPLへの言及はないが、この示唆は航空諮問委員会委員に向けられたものであることが読みとれる。

### 三、NPLにおける安定性の実験研究

航空諮問委員会の一つの主要な機能はNPLにおける航空工学のための空気力学的研究を指導することと定められていた<sup>(11)</sup>。諮問委員会が設立した一九〇九年にNPLはその技術部の中に空気力学課を設け、新しく風洞、風塔 (wind tower)、回転アームを建設した<sup>(12)</sup>。いずれも空気力学上の測定実験をするために作られたものである<sup>(13)</sup>。新しい風洞は長さ二〇フィート、一辺四フィートの正方形の断面をもつもので、それ自体が一辺八フィートの長さをもつ部屋の中に置かれた<sup>(14)</sup>。この新しい風洞を用いて、技術部主任のトマス・スタントンと彼の助手であるレオナード・ベアストウは正方形の板に働く風圧の力を測定した。スタントンはこの問題を当初橋梁の受ける風圧という建築土木上の課題として着手し、以来数年間研究し続けているところであった。助手のベアストウは、インペ

リアル・カレッジ（帝国科学技術大学）の前身である王立科学学校の機械工学科の卒業生で、NPLには一九〇四年に着任し、スタントンの助手として働いた<sup>(15)</sup>。

一九一二年にNPLの空気力学課は、飛行機の安定性に関する新しい研究計画に着手することになる。ブライアンの飛行機の安定性に関する論考が出版されたのが一九一一年、NPLのスタッフはこのブライアンの著作に展開される安定性理論に依拠することで、この安定性の実験プログラムに乗り出したのである。ブライアンの著作への依存は全面的で、他の著作はほとんど参考にならなかったようである。飛行機の安定性に関しては、航空諮問委員会の委員を務めていた技術者ランチェスターも独特の表現を用いつつ、その課題を論じる著作を出版していたが、NPLの研究者たちによる引用はごくわずかである。アメリカからの来訪者は、そのことを最初は不思議に思ったというが、NPLの実験研究の意義を後に高く評価していくことになる<sup>(16)</sup>。NPLの実験研究においては、スタッフ自身によって実験装置や実験設定などがいくつも工夫された。それらを通じて、ブライアンの安定性理論における固有方程式を解くためのデータを得ることが目論まれた<sup>(17)</sup>。

実験にあたって最初に取り組まれたのは、新しい風洞の建設であった。一九〇九年に建設された風洞は、風洞自体を取り囲む部屋の中に収められていたものであるが、測定において風圧の細かな脈動が観測されることになる。この脈動を取り除くために、その原因が検討された。まず大きな原因として送風機による脈動の発生が確認され、そのような脈動を起ささない送風機の構造と送風機用のプロペラが設計された。また風洞を設置する屋内の空間や風洞の末端の吸気口と排気口の形状についても検討された<sup>(18)</sup>。これらの実験結果から新しい風洞が設計され、建設された。新型風洞は以前の風洞と同様に一辺四フィートの正方形の断面をもつタイプであるが、送風機には効率のよい翼型のプロペラが使われるなどの工夫が施され、広い部屋に設置された（図1）<sup>(19)</sup>。

実験のための測定器具の製作には特別の工夫が必要とされた。その一つに風洞内で飛行機のモデルに働く力とモー



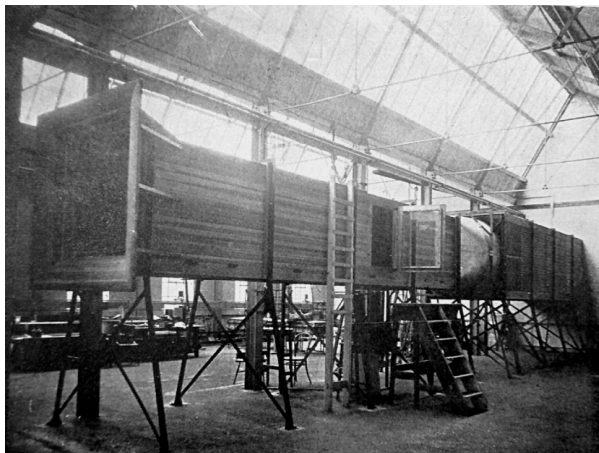


図1 安定性の実験研究のための風洞施設。窓の開いている箇所には、飛行機のモデルと測定装置が設置されて測定作業が進められた。

(出典：Bairstow et al., “The New Four-Foot Wind Channel,” R. & M. 68.)

メントを直接測定する装置がある。空気力学的天秤と呼ばれるこの装置は、風洞での測定実験において主役を果たすものであり、この安定性の実験研究においても重要なものである。NPLの実験で使われた空気力学天秤は、飛行機のモデルを支える垂直の長い棒と天秤、そして長い棒を誘導する四つのローラーなどからなっている。ローラーは支持棒を垂直な状態から倒れさせず、ねじらせず上下だけに動かす。風洞の中で強い風を受けながら、一方向だけの力を測定するためにはそのような工夫が不可欠であった。報告書によれば、回転の自由度は○・一以下であるのに対し、一万分の一ポンドの力で上下に動くように調整されており、そのために高い製作技術が必要とされたと記されている<sup>(20)</sup>。その製作は科学実験機器の製作を専門とするケンブリッジ科学器具会社が担当した<sup>(21)</sup>。また垂直方向の軸に対する回転(ヨーイング)に働く回転モーメントについても、軸上のワイヤのねじれが顕微鏡を利用しつつ測定された。また、測定精度を高めるために、測定によって生じたモデルと測定器具のねじれやずれも精密に測定され、補正を受けた。この空

気力学天秤は、このように垂直方向の力とヨーイング・モーメントを測定したが、他の力やモーメントは別のタイプの測定装置によって測定された<sup>22)</sup>。その後アメリカの航空工学者たちがNPLと同様の安定性の研究に着手する際に、彼らは実験に不可欠なこれらの測定装置をイギリスから輸入しなければならなかった。

他に、回転によって生じるモーメントを測定する方法も考案された。たとえば、ローリング（横揺れ）・モーメントはヨーイング（偏揺れ）によって生じる。なぜなら機体の左右についている主翼は上反角という上向き角度がついているために、横方向の運動によって異なる垂直方向の力を受け、その結果として機体を自軸のまわりに回転させようとするモーメントを引き起こすからである。この偏揺れによる横揺れモーメントなどの値を求めるために、風洞内で飛行機のモデルを振動させ、振動の様子を写真撮影するという方法がとられた。この方法を開発するにあたって、NPL空気力学課のスタッフは物理部の調和振動の解析のために開発した、振動検流計にもとづく高速度シャッターの手法を利用した<sup>23)</sup>。異なる回転運動による回転モーメントの測定は、大変困難であった。これらの値を決定するために、次のような方法が採用された。まずモデルに強制的に振動が与えられ、その後強制振動が止められると、モデルの振動は減衰していく。この振動の減衰を測定することによって誤差五パーセントの範囲内で他の回転モーメントを決定することができた。

このようなさまざまな工夫を施して、飛行機のモデルの空気力学的な特性について必要なデータをそろえることで、ベアストウは理論的な計算の作業に着手することができた。ブライアンの安定性理論によって、飛行機が直進運動をしているという条件下で、安定性は進行方向を含む垂直面内の縦方向の安定性とその垂直面外の横方向の安定性の二種類に分別することができるようになり、一般方程式は二つの四次方程式に分離することができるようになった。ベアストウはこれらの四次方程式を近似によって因数分解し、縦方向の安定性に関する方程式を二つの二次方程式に分解した。それぞれは飛行機の二種類の振動を表すことになる。このうちゆっくりとした振動の分析には

注意を要した。解としての固有値の値は、方程式の係数を構成するモーメントの係数などに依存することになるが、その関係を見ることによって上下方向の速度によるピッチング・モーメントの値が大きい方が、固有値の解の値がよいことが判明した。その条件を満たすためには、水平尾翼の大きさが十分に大きい必要があった。こうしてベアストウは飛行機設計上のアドバイスを提供することになった。どのような速度においても、十分大きい水平尾翼を用いることによって安定性を得ることができる<sup>(24)</sup>。ただし、操作性を損なわないためにその大きさもあまり大きくはしない方がいい、と。

横方向の運動に関しては、NPLのスタッフは翌一九一三年に同様の報告書を提出した。ベアストウとジョン・ネイラーによるこの研究成果報告書においては、三次方程式が扱われ、係数が変化するときの解としての振動の固有値の変化の仕方がグラフを利用して論じられている。グラフ上に、そのような係数の変化による解の変化の関係を描くことによって、飛行機が横方向の安定性が得られるような条件を、グラフ上に曲線で囲まれる一定の領域で表現した。そして次のようなコメントを記した。

飛行機の設計は、安定性を考慮せずにほとんど最終段階まで進めることができる。……そして上反角と尾翼方向蛇を変化させることによって安定性が得られる。最適の結果を得るためには、これらの変数の変化は常にもう一つの変数の変化も伴う<sup>(25)</sup>。

王立航空機工場のエドワード・T・バスクは、一九一三年にBE12aというタイプの複葉機を設計する際に、このアドバイスを取り入れて同機を設計した。それは前年に陸軍飛行競技会でよい飛行性を実証したBE10型の飛行機を改良したものであった。バスクのBE12aはさらに改良を施され、BE12cとなり、それは第一次大戦中のイギリス軍の標準軍用機として大量生産されることになっていく<sup>(26)</sup>。

安定性理論の代数的な解法、精密に製作された実験器具を利用した風洞実験、飛行機の設計技術者たちへの実用

的な提言、これらの要素がNPLの実験研究プログラムを構成するものとなった。また、これらの研究成果を定量的なデータとして設計家たちに提示をする場合に、ベアストウらはグラフ的な表現方法を活用した<sup>27)</sup>。グラフという表現方法によって定量的なデータとその相関関係を提示されることは、設計者たちの設計活動にとって大きな便宜を与えることになった。ベアストウは、理論、実験、設計への助言という要素をもつこの研究で成果をあげたことにより、一九一七年に王立協会の会員に選ばれ、戦時期以降イギリスの航空工学者の中でも発言力をもつ存在になっていく<sup>28)</sup>。

#### 四、グラフ的表現法と技術者の思考法

ベアストウは基本的な研究成果を載せた諸論文を発表した翌年に、データをグラフ的に表現した論文を提出した<sup>29)</sup>。ここではモデルの空気力学的な特性を示すために、いくつかのグラフが提示されている。その中の一つのグラフでは、モデルが安定になるような変数の変動範囲をグラフ上の小さな楕円で囲まれた領域で表示している。ベアストウらの論文が航空諮問委員会に提出されると、それは王立航空機工場の飛行機の設計家たちによく利用されることとなった。モデルの安定性をチェックするために、グラフは大いに活用されたようである。

戦時中の一九一六年には、同工場の技術者ロバート・ハリスによって独自のグラフ的表現方法が開発されている<sup>30)</sup>。それはベアストウのグラフをより詳細に、洗練させたものであり、現場の技術者がいかに抽象的な関数的関係を視覚的に理解し、視覚的に思考しようとしていたかを示すものである。ベアストウの方法が横方向の安定性に関して導出される三次方程式だけを扱っていたのに対して、ハリスの方法では縦方向と横方向の安定性を双方取り扱うことができた。それに加えてハリスの方法ではこれらの二種の安定性に関して「性質」だけでなく「度合い」についても決定することができた。

ハリスが扱う二種類の安定性のうち、ベアストウでは取り扱われていなかったより複雑な方程式は、縦方向の安定性にかかわる四次方程式である。この四次方程式に関して、解を適当に変換することによって四次と三次の項の係数を1と仮定し、以下のように一般的な四次方程式を書き表すことができる。二次、一次、定数の項の係数をそれぞれ  $x$ 、 $y$ 、 $z$  で表している。

$$\phi^4 + \phi^3 + x\phi^2 + y\phi + z = 0$$

$x$ 、 $y$ 、 $z$  のそれぞれの値が変化するにつれて、解の値も変化することになる。ハリスはまず  $y$  が一定な場合に、 $x$  と  $z$  が変化するときに、解がどのような値をとるか、逆に言えば、安定な解を得るためには、 $x$  と  $z$  がどのような値をとらなければならいかをグラフ上に示す。方程式の解は、実解と複素解がある。

図2において平面を右上から左下に二分する直線  $MLKGH$  は、平面内の座標に相当する  $x$  と  $z$  の値に対して、実解が負になる領域と正になる領域との境界となる線である。線の左側の領域では実解は正になり、右側では負になる。すなわち左側では揺れの大きさは発散しモデルは不安定、右側では揺れの大きさは減衰しモデルは安定になる。鋭い角度で折れ曲がる二つの線  $ABCD$  と  $EFGH$  は、「エンベロープ」曲線と呼ばれ、平面を三つの領域に分割する。三つの領域はそれぞれ、すべて実解（振動しない）、二つの実解と二つの複素解（二つの振動）、すべて複素解（二つの振動）という三つの場合に対応している。（ただし右側の折れ線が囲む狭い領域  $NSRQP$  ではすべて実解である。）これらの線と  $x$  軸  $z$  軸によって分割される領域が、それぞれモデルの振動と減衰の性質を区分けすることになる。

$xz$  平面上のこれら三つの直線・折れ線は、 $y$  が変化するにつれて当然のことながら変化をしていく。ではどのように変化するであろうか。どのようにすれば変化をグラフのように視覚的に表現できるであろう。異なる  $y$ （

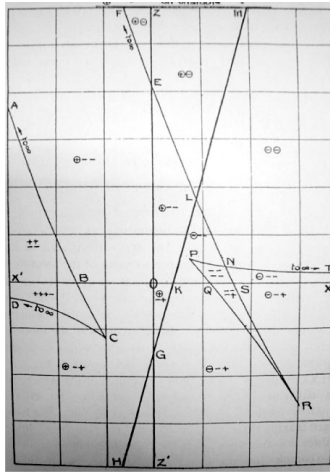


図2 安定性の方程式の解と係数の関係を領域によって説明する図  
 (出典：Robert G. Harris, "Graphical Solution of Stability Biquadratic," R. & M. 262)

とに別々の  $xz$  平面を作成しグラフを描くこともできるだろう。ハリスはそれを表現するために、多数の二次元のグラフを用意するのではなく、あるいは二次元の平面に多数のグラフを重ね合わせるのでもなく、三次元のモデルを製作し、それでもって変数  $x$ 、 $y$ 、 $z$  それぞれが変わるとき、これらの境界線ならぬ境界面を表現させた(図3)。

彼はこの立体モデルの製作の目的を、読者である飛行機的设计に携わる技術者たちに「エンベロープ」曲面の「形についてのアイデアを伝える」ためだと述べている。このような立体モデル自体は解を精密に求めるために役立つわけではない。だが変数の変化にともない解がいかに変化するか、逆に解を変化させるために変数をいかに変化させればよいか、その関係性を二次元的なモデルを通じて視覚的に、あるいは身体的に理解してもらうことができる。

ハリスは報告を要約しつつ、グラフ的な表現方法の利点を次のように述べている。

「グラフ的」方法は実際の活動において、まず安定性の方程式を速やかに解くために有用であり、それとともに設計のさまざまな変更に伴う安定性の変化の性質

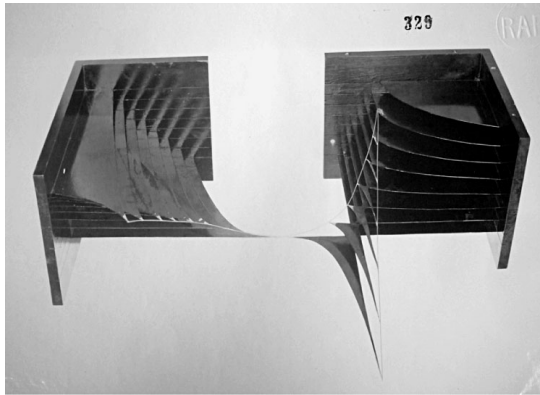


図3 安定性方程式の解の性質を理解するために二次元のグラフを三次元化したモデル

(出典：Robert G. Harris, “Graphical Solution of Stability Biquadratic,” T. 817, DSIR 23/831, NA.)

と大きさを示すために有効である。それはまた通常の近似的解法が適用できない事例においても利用することができる<sup>(31)</sup>。

グラフは方程式を解く計算の方法として、また方程式の解の性質を把握するための表現の方法として役立つというのである。そして二次元的に表現されたグラフは、ハリスのような設計技術者にとっては数学的関係をよりよく把握するために二次元のグラフは頭の中で三次元的に思い描かれて理解されていると考えられる。ハリスの三次元のグラフのモデルは、彼らのような技術実践に携わる技術者たちがどのように数学的関係を把握しているのかと言うことを如実に示す興味深い証言とすることができよう。

この報告が王立航空機工場から航空諮問委員会に提出されると、ベアストウはこのグラフの解法が非常に便利であること、安定性の計算を頻繁に遂行する必要がある場合に重宝することを指摘した<sup>(32)</sup>。

##### 五、航空界の科学仲介者としてのベアストウ

科学者プライアンの理論的研究から技術者バスクの設計

の實踐に至るまでの一連の研究開発の過程で、ベアストウは科学理論と技術実践とをつなぐ中心的な役割を果たした。その後の安定性の研究を追うことで、ベアストウの科学者と技術者との間の媒介者としての役割が鮮明になる。ある機会の折りに、彼は両者の「仲介者 (middleman)」と呼ばれたりもした。それはブライアンが安定性の理論をさらに拡張させ、その理論的帰結がフレデリック・ランチェスターによって批判されたときであった。

ブライアンは、自らの理論がNPLの安定性の実験研究に利用され、さらにその実験成果を利用してバスクが固有安定性を備える複葉機を設計したことによって、さらに自分の理論を拡張することに取り組んだ。ブライアンは自身の『飛行の安定性』を予備的な研究と位置づけていた。この論考は、飛行機の微小な振動を起こしたときの振る舞いを論じ、飛行機が水平直進飛行をしているという仮定の下で、縦方向と横方向の安定性を独立に取り扱っていた。同書の最終章で、彼は今後数学者と実験科学者によって取り組まれるべき二十の課題を数え上げている<sup>(33)</sup>。これらのいくつかはNPLのスタッフの安定性の研究の自然な延長であった。他はまったく別なテーマでの研究を志向するものであった。

これらの課題の中でブライアンが取り組んだのが、円形飛行をする場合の安定性と、突風を受けるときの飛行機の運動についてであった。一九一五年、彼はロンドンの航空協会に招かれ、同会の主催するウィルバー・ライト記念講演で円形飛行に関する講演を行った<sup>(34)</sup>。以前にベアストウが取り組んだ際のように振動が微小であることを仮定せず、より一般的な取り扱いを目指した。そのためベアストウと彼の助手たちが取り組んだ八次方程式の解の導出という難題に悩まされることはなかった。ブライアンは飛行機の構成と形状が、円形旋回飛行の際の安定性と操縦性にどのような影響を与えるか計算しようと試みた。そのために、彼は飛行機が単純に水平方向と垂直方向の平面から構成されると仮定した。翼に関しては、翼の前後方向の長さである翼弦の長さ、迎角、左右方向の横軸となす角度などについての変化を考慮した。



ブライアンの講演が航空協会の機関誌である『航空雑誌』に出版されると、それを読んだランチェスターが早速批判的なコメントを寄稿した。ランチェスターを特に懐疑的にさせたのは、ブライアンの理論によると飛行機が機体を横に傾ける「バンク」という姿勢をとることなく、旋回させることができるという結論が導かれることであった。陸上を走行するオートバイや自転車の場合と同様、飛行機も円形に旋回する際には、遠心力と釣り合いをとるためにバンクを必要とする。機体を傾げずに旋回することは事実上不可能なはずである。ランチェスターはそのことを皮肉をこめながら指摘した。

バンクせずに旋回しようとする飛行機は、横に傾きながら直進運動する飛行機と同様に不安定な状態にある。……おそらく多かれ少なかれ一定程度のヨーイングを伴いながら曖昧な平衡状態を保っているのだろう。カニの歩行のようなものである<sup>35)</sup>。

彼はまた、そのような不可能な条件を議論することは、飛行機の設計技術者たちに対して理論研究の価値と評価を損なわせてしまうとも苦言を述べた。ブライアンは早速『航空雑誌』に反論を寄稿し、飛行機、あるいは彼が呼ぶ「平面のシステム」が、縦方向と横方向の安定性と操縦性を保ちながらバンクをせずに旋回することが可能であることを論証しようとした<sup>36)</sup>。

数学者と技術者の間の対立にベアストウが口を挟むことになる。同誌に次のような仲裁的なコメントを寄稿した<sup>37)</sup>。

純粋な数学者と厳密に実践的な人物の両極の間で一群の作業者たちが是非必要となる。そのような一群の人々とは、常に両者の間に落ちてしまうという危険を伴うために確信的であり勇気が必要となる。この種の人々の任務は、数学的で学術的な材料を実用的な必要性に適応させ、成果を実践家たちが直接使えるような形式で提供することである<sup>38)</sup>。

ベアストウがこのノートを『航空雑誌』に寄稿すると、同誌の編集者はベアストウの発言に賛同し、そのような種類の研究者・作業者は、「科学仲介者 (scientific middleman)」であり、ベアストウは「航空界における科学仲介者 (an aeronautical form of the scientific middleman)」であると脚注で注釈した<sup>(39)</sup>。その編集者によれば、そのような科学仲介者の代表として、ビクトリア期の小説家で科学の紹介者でもあったグラント・アレンがあげられるとしている<sup>(40)</sup>。アレンの著作の書評において、アレンは次のように評されている。「近代科学の時日と理論を一般大衆に魅力的に伝えようとする我が国のすべての作家の中で、グラント・アレン氏は我々の意見では最も成功している。……彼の著述のほとんどにおいて、我々は特徴的な巧みな思考と、おそらくこれも特徴的なスタイル上の優雅さを備えており、それらが相伴って彼のエッセイがそのジャンルの中では最も楽しめるものにさせている。」<sup>(41)</sup>アレンが科学と大衆の間の仲介者とすれば、ベアストウは数学者・理論家と技術者・設計家との間の仲介者であった。ベアストウはこの対立する両者の仲介を心がけた論評の記事を、協会機関誌に寄稿する前にブライアンに送った。それを読み、ブライアンはベアストウに同意したようである。実際のな技術を知らないことを認識し、ブライアンもまたベアストウの仲介者としての役割を認めて評価した。しかしブライアンは一見非実用的な事例についての理論的な考察ということについても、その意義を正当化しようとした。「理論的なバンクしないシステムは、一つの極端な事例を示すという点で、円形旋回運動の問題の形式的な研究に重要な役割を果たす。」<sup>(42)</sup>そして彼はそのような理論的考察を展開する理論家は、必ずしも航空の実用的な問題に通じていなくとも構わないのだと述べた。英国科学振興協会のある会員が航空科学の特別委員会を設置し、ブライアンをその委員長に推そうとしたとき、ブライアンは申し出を断ったという。その理由は、そのような役割を引き受けることは実際の問題と関わることになり、それは数学的な研究をただ複雑なものにするからだということであった<sup>(43)</sup>。意図的に航空工学の実践的な問題から距離をとることによって、ブライアンは数学的によく定義された航空上の問題に集中しようとしたのである。そ

のような態度は、しかしながら、航空諮問委員会の委員にとっては受け入れられないものであった。

## 六、ドイツの空気力学研究への関心

航空工学の歴史において、特に空気力学の分野において、後述のとおり、ドイツのゲッチンゲン大学と空気力学研究所のルドヴィッヒ・プラントルと彼の学生たちの研究業績は大変著名である。プラントルの境界層、後方渦、誘導抗力といった概念と、それらにもとづく理論と実験の研究成果は、現代の空気力学理論の基礎をなすことになる。しかしイギリス、アメリカ、その他各国の航空工学研究者たちにとって、プラントルらの研究の重要性は第一次大戦が終了するまで知られなかった。上述のブライアンと論争したフレデリック・ランチェスターは、実は一九〇七年と一九〇八年に出版した二冊の著作において、飛行機の安定性を論じるとともに、翼の揚力と抗力の説明にあたってプラントルの後方渦の理論と同様の理論を展開していた。しかしその著作で展開される理論はイギリスの科学者技術者からは一様に拒絶されている状況であった。理論の表現が難澁で、それまでの教科書的な理論をまったく無視して書かれている彼の理論は、イギリスの科学者には全く取り上げられない状況であった。しかし、航空諮問委員会の委員として会議に参加し、航空の知識にもとつき意見を表明していた。それに対してゲッチングンの研究者たちは、一九〇七年に出版されたランチェスターの著書を見て、自分たちが展開しようとしている理論との親近性を認識し、彼をゲッチングンに招き、プラントルらと会見することになる。プラントルの同僚であるルンゲが中をとりもち、ランチェスターの通訳となってプラントルらと会談することになった。プラントルの回想ではランチェスターからは影響を受けなかったと言っているが、イギリスの科学者との対応の差は歴然としている<sup>(4)</sup>。

また次のエピソードも、イギリスの研究者たちがドイツの空気力学者たちと研究上の重点の置き方を異にし、そのために異なる目標を目指して研究を進めていたことを物語っている。第一次大戦の前夜、イギリス人の学生ロバー

ト・ジョーンズがゲッチンゲン大学に派遣され、プラントルの下で空気力学の研究を進めた。その空気力学研究所で彼が研究しようとしたことは、空気の流れに置かれた曲がった板に働く空気抵抗の理論を検討することであった<sup>45</sup>。ジョーンズは北ウエールズの大学でのプライアンの学生であり、そこでプライアンの下で航空工学を勉強し、この問題への関心を発展させていた<sup>46</sup>。戦争勃発に伴い、ジョーンズはイギリスに戻り、NPLに配属されることになった。イギリスに彼がもち帰ったものは、代数方程式の数学的教科書であり、それらはイギリスの安定性の理論的研究に資するものであった。プラントルの下で進められる境界層や後方渦といった概念にもとづく空気力学の研究に関する情報は、まったくもたらされなかったようである。プラントルは当時新しい概念を提示していた。しかし、イギリスの技術者たちはジョーンズも含めて、この新しい理論には関心を示さなかった。戦争が終了して始めて、イギリスの技術者たちはドイツの空気力学研究の重要性を認識することになるのである。

プライアンの安定性理論は、飛行機が水平直進運動をするということを前提にしている。他の種類の飛行を取り扱うことは、複雑な代数方程式の取り扱いを必要とした。単純な円形の旋回飛行でも、方程式の係数を導くための膨大な計算とともに、八次方程式を解くことが必要とされたのである。理論的な取り扱いを一般化するために、ベアストウはますます代数方程式の数学的理論に関心をもつようになった。しかしイギリスにはこの主題に関して基本的な教科書しか存在しない。そこでドイツでこの主題での新しい教科書が出版されたという情報を得ると、ベアストウはジョーンズにその著作をイギリスに持って帰るように告げた<sup>47</sup>。この本はホルスト・フォン・ザンデンという人物による『実用解析』と題された本であったが、それは複素数の根について重要な点を説明していなかった。ベアストウはカール・ルンゲの百科事典の該当項目を参照し、そこでカール・H・グレップフェによって一八三七年に考案された効果的な計算方法を見いだした。その方法はどのような次元の代数方程式に対しても応用することができる、方程式の近似解を提供することができた<sup>48</sup>。ジョーンズはベアストウを助けるために、これらの

教科書とともに他のドイツの数学の著作を読み、計算の作業も行った。ジョーンズが代数学の教科書を輸入し、それまでにゲッチンゲンで提出されていた空気力学や流体力学の研究成果には関心を示さなかったこと、円形の旋回飛行の数学的研究に取り組み、プラントルらが着手し始めていた後方渦の諸事例への応用には関心を示さなかったこと、彼のそのような研究の方向性にイギリスの航空工学の研究者たちの安定性の研究への強い関心と専心を読み取ることができよう。

### 七、イギリスの安定性研究を模倣するアメリカの研究者たち

イギリスにおける飛行機の安定性の空気力学的研究は、海外の研究者、特にアメリカの航空技術者たちの関心を集めるところとなった。アメリカではちょうどそのころ航空研究の計画が立てられ始めており、そこでNPLでの安定性研究が注目を浴びるようになっていたのである。米国の国家航空諮問委員会 (National Advisory Committee for Aeronautics: NACA) は、スプートニクショックの後に設立されるNASAの前身となる機関であるが、名前の類似性が示唆するように、イギリスの航空諮問委員会をモデルにして一九一五年に創設された機関である<sup>(49)</sup>。NACAを創設する以前、そして以後における航空研究の計画と組織の仕方を追いかけると、彼らアメリカ人の技術者が少なくとも第一次大戦が終了するまでは、イギリスの安定性の研究に対して非常に強い関心をもち、フォローしていたことを見て取ることができる。

最初期において、アメリカの各機関で航空研究の計画と組織を組み立てる上で大きな役割を果たしたのが、ジェローム・ハンセーカーという人物である。海軍大学で造船技術を学んだハンセーカーは、航空の勃興とともに、それに強い関心をもつようになっていく。第一次大戦が勃発する直前に、彼はスミソニアン協会の資金援助を得て、ヨーロッパで航空研究のための「装置・方法・資源」についての最新の発展」を調査するために大西洋を渡りヨーロッパ

パ各国の研究機関を訪れる。もう一人の調査訪問者であるカトリック大学機械工学教授アルフレッド・ザームとともに、ハンセーカーはイギリスではNPLと王立航空機工場、フランスでは航空技術研究所とグスタヴ・エッフェルの研究所、ドイツではゲッチンゲンのモデル研究所とドイツ航空研究所を二ヶ月間かけて順次訪問見学した<sup>(50)</sup>。この見学旅行に先駆けて、ハンセーカーはエッフェルの空気力学の著作を英語に翻訳し、またMITの学長であるリチャード・C・マクローリンに対して同工科大学における航空工学の大学院プログラムの開設を強く促していた。このような関心をもつハンセーカーに対し、翻訳をした経験からフランスのエッフェルの研究にひかれたり、あるいは後の視点からすればゲッチンゲンという大学付設の研究機関でなされている研究にひかれたらうと想像されるが、彼が最も感銘を覚えたのは、そのどちらでもなく、イギリスの研究活動だった。

マクローリンとNPLの所長であるグレースブルックとの間に面識があったことにより、ハンセーカーはNPLで二週間見学者として滞在することが許可された。ハンセーカーは二週間のうちに、NPLのベアストウ、その下で働く助手たちの作業を見学しながら、彼らが前年の一九一二年から着手している安定性の研究の理論と実験方法についてじっくりと観察し学習したことだろう。ハンセーカーが訪れたときには、ベアストウのチームはすでに飛行機の安定性についての基本的な実験を終え、実験成果を報告書として提出していた。ハンセーカーはそれをもちらん参考にさせてもらっただろう。彼はそこで理論、実験、実践への応用が緊密に連携されていることに感銘した。それはヨーロッパのどの研究所よりも成功している研究プログラムに思えた。当初期待をしていたエッフェルの研究所だが、エッフェル本人は高齢のために活発な活動を展開できず、朝と晩に研究所にやってきて助手の作業を監督するだけであった<sup>(51)</sup>。

MITに戻ると、ハンセーカーは同僚の数学教授エドウィン・B・ウィルソンらと航空工学の研究教育プログラムを策定することとしかかった。数人の助手の中には、後にダグラス航空機製造会社の創設者となるドナルド・

ダグラスも含まれていた<sup>(52)</sup>。NPLの研究に感銘したハンセーカーは、イギリスから風洞の設計書、空気力学天秤などの実験装置を持ち帰っていた。事实上、MITのキャンパスにNPLの空気力学課の研究設備をそっくりそのまま再建しようとした。ちょうどそのころ、新しいケンブリッジの土地がMITに寄贈され、ハンセーカーの実験研究施設はその新キャンパスに建設されることになった。新しい実験施設で、ハンセーカーと同僚たちは飛行機の動的な安定性を研究していった。

ハンセーカーの同僚のウィルソンは、理論家としての役割を果たした。彼はエール大学の理論物理学者ウイラー・ギブスの学生で、数学の能力に優れていた。ハンセーカーとの共著の最初のNACA技術報告で、ウィルソンは突風を受けた際の飛行機の安定性を論じている<sup>(53)</sup>。その問題はベアストウとネイラーがすでに研究しており、その成果はグレイズブルックによって彼の一九一五年のウィルバー・ライト記念講演で解説されていた。ウィルソンはその研究成果に関して、航空協会誌に出版されたグレイズブルックの記念講演を通じてのみ情報を得ることができた。戦争が始まるとイギリスの航空諮問委員会は技術報告を機密扱いし、公式に認可された科学者と技術者にだけ配布することになった。そのためベアストウとネイラーの技術報告はそのままではアメリカの研究者たちの手には届かなかつたのである。グレイズブルックの講演は、ベアストウとネイラーの方法を最も単純な例を使って説明する。飛行機の進行方向に水平に突風が起こり、そのために飛行機に対する風の相対速度が突然変化し、その後すぐに一定になるとする。そのような突風によって帰結される飛行機の振動運動の性格について解説された。続いて同様の例が、突風が進行方向ではない方向から起こるとき、突風が継続的に何回も起こるとき、どのような振動が引き起こされるか解説された。突風が継続的に起こることを考察する際には、一定の時間間隔で起こることが仮定された。続いて、キューの気象観測所におけるスタントンの自然風の記録が紹介され、継続的な突風のデータが解析され、そのデータを参考にして飛行機の振動運動が分析された。

ウィルソンは突風を受ける際の飛行機の振る舞いを分析するにあたって、異なる数学的手法を開発した。彼は突風が数学的表現  $(1-r)e^{-rt}$  で表現されると仮定した。ここで  $J$  は風の強さを表し、 $r$  は突風の減衰の早さを表す。上の式は風の速度が急に変わり、それが徐々に別の速度に落ち着いていくことを表している。 $r$  の値によって突風の性格は異なることになる。そこで彼は三種類の  $r$  の値を考えた。穏やかな突風として  $0 \cdot 2$ 、中程度の突風として  $1$ 、鋭い突風として  $5$  という値である。この突風の公式により、計算はイギリスの方式よりもずっと簡単に早くなった。

ウィルソンは次に突風の数学的モデルを一般化し、振動する突風を扱った。そのような突風は気象観測や野外でしばしば体験することができるものであった<sup>(54)</sup>。そのような気象条件下での飛行の安定性を計算するにあたって、突風の振動を調和振動として表現できると彼は仮定した。そのような仮定は単純なものではあるが、この理論研究の第一の目的はそのような振動的な突風が共鳴などの異常な効果を引き起こすかどうかを吟味することにあるとして、単純な仮定を正当化した。この研究のために、ウィルソンは再びイギリスの安定性研究を参考にした。航空諮問委員会の公式な技術報告は入手できなかったが、いくつかの関連する論文を雑誌に見つけることができた<sup>(55)</sup>。MIT の航空学プログラムの新任教員も安定性の研究を継続した。ハンセーカーは風速が変化させて固有方程式を計算したが、新任のアレクサンダー・クレミン、エドワード・P・ワーナー、ジョージ・D・デンキンジャーは、飛行機の機体の長さや尾翼の面積、迎角などを変化させて安定性を吟味した<sup>(56)</sup>。十一の異なる事例を検討することで、飛行機の各部品的设计と飛行における安定性との関係についていくつかの実用的な結果を導き出している。これらのMITにおける安定性研究は、いずれもイギリスのベアストウらの安定性研究の枠組みにのっとるものである。戦時中の両者の交渉は、米英の研究者たちが安定性の研究を最重要視していたことをよく物語っている。NPLの研究成果は一九一三年に出版されたが、戦争の勃発とともに機密扱いになりアメリカ側には届かないよう



になった。米国が潜水艦の無差別攻撃を契機にドイツとの戦いに一九一七年に参戦すると、NACAはイギリス側にそれまで機密にしていた技術報告をすべてアメリカ側にも提供してくれるよう改めて要請した。NACAからの要請は航空諮問委員会の月例会で検討され、ほぼすべての技術報告をアメリカへ送付することが決定された。ほぼすべてであって、すべてでなかったのは、委員会で除外例を指定したからである。それは安定性に関する研究報告であった(57)。この除外決定はイギリスの航空諮問委員会がNPLによって着手された安定性の研究を非常に重視していたことを示すものである。またこの除外決定はアメリカの研究者たちを落胆させるものでもあったろう。ウィルソンはベアストウの一九一三年の研究報告以降のイギリスの研究動向に大きな関心をもち、連合国側の一員として開示されることを強く期待していた。開示されないことを知り、研究の継続を断念することになる。その理由を彼は知人宛ての書簡に、「イギリスでなされたことについて情報をすべて得ることができるようになるまで、自分の研究を続ける気になりません」と記している(58)。ウィルソンにとって、イギリスでの研究の進展を知らずに自分で研究を継続して進めることは、時間の大変な浪費になりかねないと思われたのである。一九二〇年に出版した教科書の中で、彼はその不満を語っている。

この時期、航空工学の書物を出版するにあたって、残念に思うことを述べざるを得ない。それは戦時中に特にイギリスにおいて進められた理論的な発展のうち、ほとんどとは言わぬまでも多くがいまだに出版されていないことである。だが、それが公表され、理解するまで待つことは長い遅れになってしまう(59)。

科学者ウィルソンはイギリス側の技術報告、特に安定性に関わる研究報告の機密化に大いに不満を感じた。不満はまた、それ以前の研究への高い評価と、まだ見ぬ研究成果への大きな期待の存在を言外にほめかすものでもある。イギリスの先端的な研究に関する情報を必要とするアメリカの航空工学者たちにとって、一つの自然な対応策はそのような航空研究に通じているイギリスの技術者をリクルートすることであった。ハンセーカーは自分が去った

後のMITが活力を失っていることを懸念し、イギリス人技術者の招聘を提言し、MITの学長マクローリンもそれに賛同した。海軍からヨーロッパに派遣されていたハンセーカーに宛てて、学長は二人のイギリスの技術者エルンスト・レルフとB・メルヴィル・ジョーンズと面談するように書簡で依頼した<sup>(60)</sup>。学長の第一希望はベアストウであったが、当時すでにイギリスの航空工学界をリードする存在となっていた彼を招聘することはまず無理であると思わざるを得なかった。学長の書簡はイタリアに送られ、手紙が届いたときにはハンセーカーはすでに同地を去っていたために、連絡が間に合わずハンセーカーは二人の若いイギリス人技術者に面談しそこなってしまった。学長からハンセーカーに宛てられた次の書簡では、MITですぐにでも専任の講師を雇用しなければならぬと切迫した調子で連絡した<sup>(61)</sup>。ハンセーカーは返信で、一人の技術者に面談しなかったことを謝り、代わりに別の候補としてNPLでベアストウと働いた経験をもち、現在プリストル航空機会社で働いているフランク・S・バーンウェルという人物を紹介した。ハンセーカーはこの技術者の論文を読み、ベアストウの薫陶を受けていることを知った。

「バーンウェルは」は明らかに、ベアストウの下で働くことで、イギリスが過去四年間に成し遂げた顕著な進歩の基礎を作り上げた一群の人々の健全な技術思想を体得している<sup>(62)</sup>。

イギリスからの航空技術者の雇用を実現させるために、ハンセーカーはNACAの事務局長を務めるジョセフ・S・エイムズと、海軍航空隊技術主任であったトゥマン・H・ベーンに応援を要請した。後者へ宛てた書簡において、ハンセーカーはマクローリンがイギリス以外から航空技術者を雇用する意志がないことを告げ、アメリカ側はすでに多くのイギリスの研究成果を知っているが、それでもイギリスの指導的な技術者を雇うことに意義があると強調した。このような強い動機と説得活動があったにもかかわらず、彼らは結局第一次大戦後イギリス人技術者の採用に踏み切らなかった<sup>(63)</sup>。結局不採用に終わったことの原因と真相は定かでない。優れたイギリス人技術者が大西

洋を渡る意思をもたなかったからかもしれない。ちょうどその頃にアメリカ人はドイツの航空技術者たちが空気が学で注目すべき研究成果をあげており、その多くが戦後職を失い外国に就職先を求めていることに気づくようになる。しばらくして、アメリカのNACAはゲッチンゲンのマックス・ムンクを採用することになる。そして数年後、プラントルに次ぐ研究者であるテオドル・フォン・カルマンがアメリカに移住することになるのである<sup>(64)</sup>。

## 八、結論

第一次世界大戦前から始まるイギリスの飛行機の安定性に関する航空研究において、ベアストウは理論家、実験家、そして飛行機の設計者たちを仲介する中心的な役割を果たした。応用数学者ブライアンは、一九一一年に飛行機の安定性に関する優れた力学理論を提出し、そこで水平定常飛行をしている飛行機の安定性の要件を一つの代数方程式を解くことに還元した。この数学的理論に基づき、ベアストウは実験研究プログラムを組織し、ブライアンの方程式を解くために必要な係数を決定するために、風洞内に飛行機のモデルを設置し、特別仕様の精密測定器具を利用して、モデルの力学特性を測定した。測定結果を得ることによって、結果を方程式に代入することで安定性の程度を判断することができるが、それによって逆に安定性を達成するためのモデルの形状の条件を模索することができた。ベアストウの実験結果は、王立航空機工場のバスクらの設計家たちによって活用され、安定性を達成できる飛行機が設計され、製造された。この研究の功績によりベアストウは後に王立協会の会員にも推挙されることになる。また同じ時期、『航空雑誌』の誌上で交わされた論争を仲介したことから、「航空界における科学仲介者」とも呼ばれることになった。さまざまな専門分野を背景として有する学者や科学者と技術者が共同する航空工学界において、科学者と技術者との間でのコミュニケーションを助ける人物が必要とされ、そのような役割をベアストウが果たしたと認識されたのである。

科学と技術の関係をめぐる問題は、技術史の研究においてしばしば議論されている<sup>(65)</sup>。技術史家ヒュー・エイトケン、科学研究と産業技術との間をとりもつ翻訳者という概念を提示し、ラジオ技術の発明と発明に至るまでの電磁気学研究の歴史を論じている。ドイツの実験物理学者であるグスタブ・ヘルツ、イギリスの実験物理学者オリバー・ロッジ、イタリアの技術者であり企業家であったグリエルモ・マルコーニの三人を取り上げ、それぞれの人物が成し遂げた業績の性格を、「翻訳」の概念を利用して論じる。「ヘルツは数学的方程式を実験装置に翻訳し」、「ロッジは実験装置を少なくとも潜在的には無線通信の実用技術というべきものに翻訳し」、「マルコーニは実験室の技術をとりあげ、それを経済的に成り立つビジネスに翻訳した」<sup>(66)</sup>。このエイトケンの翻訳者の概念は、本稿で論じた空気力学の研究における科学と技術の仲介者という概念に重ね合わせることができるだろう。

科学の研究成果を技術活動に携わる技術者たちに伝達し、理解してもらい、設計活動に活用してもらうために、ベアストウは理論内容と実験成果を簡潔に要約し、量的関係をグラフを用いながら表現した。ベアストウ論文の読者の一人であるハリスは、さらに三次元的な立体的モデルまでも作り同僚の設計家たちの便に供した。それは設計家たちの思考様式をよく表すものでもある。ベアストウの技術報告はその思考様式に合わせて書かれたものだったと言えよう。

ベアストウらの行った安定性研究については、内外から高い評価を受けた。少なくとも第一次大戦が終了するまでは米国の航空工学の研究者は、ドイツよりもイギリスにおける航空工学の進展に関心を注ぎ、ベアストウらのNPLチームが進める安定性研究の動向に注目していた。そしてイギリス側も、参戦後の米国に対して安定性の研究に関してだけは機密解除をしなかったように、同研究を最も重要視していた。

しかし、実は、第一次大戦が始まった頃から、イギリスの研究者の間ではベアストウらによるモデルを用いた風洞試験のデータに対して根本的な疑義がもたれるようになっていた。第一次大戦が勃発し、飛行機が戦線に送られ

るにつれ、飛行機の性能が風洞試験によって予測された性能を反映していないことが気づかれるようになった。縮尺モデルを利用した風洞試験の結果と実機によるフルスケールの測定結果との間に差があることが気づかれ、問題視されるようになったのである。第一次大戦中にイギリスの空気力学に関わる航空工学者たちの関心は、この寸法効果の問題に注がれ、ベアストウらの研究成果を見直すことの必要性も一部では意識され始めていた。両データの食い違いの源泉を探し求める作業が戦時中に展開されたが、十分に突き止められることはなかった。戦後にプラントルの新しい空気力学理論がドイツから導入されることで、食い違いの重要な源泉が理解されていくことになる<sup>(67)</sup>。それは、ゲッチンゲンに派遣した若い研究者ジョーンズが安定性の研究に限定することで、十分な関心を払えなかった理論であった。

註

- (1) 本稿は、英文として発表した拙稿、"Leonard Bairstow as a Scientific Middleman: Early Aerodynamic Research on Airplane Stability in Britain, 1909-1920," *Historia Scientiarum*, vol. 17, no. 2 (2007-8), 101-120" を加筆補正し日本語にしたものである。
- (2) 発明家からの数多くの新発明のアイデアが航空諮問委員会にはひっきりなしに寄せられた。同委員会は、発足時からそのような発明のアイデアをスクリーニングし、重要なものをNPL、国防省、あるいは海軍に通報する課題が課せられていた。科学史家ダニエル・ケブレスは第一次大戦中、アメリカの海軍諮問評議会が同様の義務を負わされて、発明家のアイデアのスクリーニング業務によって追われ、しかもそこからは実りある技術は何も生まれなかったことを指摘している。Daniel Kevles, *The Physicists: The History of Scientific Community in Modern America* (New York: Knopf, 1971), p. 138. 第一次大戦中同評議会はトマス・エジソン の指揮の下で一〇万にのぼる発明のアイデアを受け取り、国家航空諮問委員会 (National Advisory Committee for Aeronautics: NACA) は一萬六〇〇〇以上のアイデアを受け取った。
- (3) Minutes of the Advisory Committee for Aeronautics, 12 May 1909, DSIR 22/1, National Archives (以下 NA と略), Kew, England.
- (4) George H. Bryan and W. E. Williams, "The Longitudinal Stability of Aerial Gliders," *Proceedings of the Royal Society*, 73 (1904), pp. 100-116.

- (5) Minutes of the Advisory Committee for Aeronautics, 3 June 1909, DSIR 22/1, NA.
- (6) Minutes of the Advisory Committee for Aeronautics, 18 October 1909, DSIR 22/1, NA.
- (7) George H. Bryan, *Stability in Aviation: An Introduction to Dynamical Stability as Applied to the Motions of Aeroplanes* (London: Macmillan, 1911).
- (8) ブライアンは安定的な平衡関係とプリルアンの議論について、同書、七〇ページで論じている。
- (9) ブライアンは彼の論考では、これらの安定性に対して、対称的 (symmetric) 安定性と非対称的 (asymmetric) 安定性という名称を与えている。飛行機の形状の対称性からそのように呼称したのであるが、彼の継承者にその用語は使われなかった。
- (10) フライアンの理論研究の歴史的背景としての調速装置の安定性の力学的理論研究については、Otto Mayr, “Maxwell and the Origins of Cybernetics,” *Isis*, 62 (1971), pp. 425-44 を参照。またケンブリッジ大学で数学のチューターとしても名高かったルースにこうして、Andrew Warwick, *Masters of Theory: Cambridge and the Rise of Mathematical Physics* (Chicago: University of Chicago Press, 2003), chapter 5 “Routh’s Men: Coaching, Research, and the Reform of Public Teaching” を参照。
- (11) *Technical Reports of the Advisory Committee for Aeronautics*, 1 (1909), p. 4 を参照。
- (12) 技術部は Department of Engineering、空気力学課は Division of Aerodynamics の訳でもある。両者の階層関係を分かりやすくするために、そのように訳した。
- (13) See Edward Pyatt, *The National Physical Laboratory: A History* (Bristol: Adam Hilger, 1983).
- (14) 空気力学課の風洞と他の新しい設備は技術部主任のトマス・スタントンの航空諮問委員会技術報告に説明されている。Thomas E. Stanton, “Report on the Experimental Equipment of the Aeronautical Department of the National Physical Laboratory,” *Reports and Memoranda of the Advisory Committee for Aeronautics* (以下 R. & M. 略), 25 (April 1910). その中で、彼は回転アーム、風塔、モーターの検査装置などについて述べている。航空諮問委員会に提出された技術報告は、最初内部資料として T などの番号がふられ、より広く回覧されることが決定された報告に対して、この R. & M. の番号が割り振られ、その多くが外部に公開された。
- (15) スラストウの伝記事項については G. Temple et al., “Leonard Baird,” *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 11 (1965), pp. 23-40 を参照。
- (16) アメリカの技術者ジェローム・ハンセーカーは、翌一九一三年に NPL の実験研究に訪問者として参加することになるが、

- 当初はランチェスターの著作がほとんど顧みられなかったに驚いたという。それに対して「ブリタニアン」の編集者ハーンズへの「お前のよく知られたる教授 (somewhat obscure professor)」という印象は「たゞ」の *The Reminiscence of Jerome C. Hunsaker*, Aviation Project, the Oral History Office, Columbia University, 1960.
- (17) 一九二二年から二三年にかけてベアストウと彼のグループは多くの成果報告を出している。Leonard Bairstow, J. H. Hyde, and Harry Booth, “The New Four-Foot Wind Channel; with a Description of the Weighing Mechanism in the Determination of Forces and Moments,” R. & M. 68, Technical Reports of the Advisory Committee for Aeronautics (NACA-TRACA-1) (1912-13), pp. 59-71; The Aeronautics Staff in the Engineering Department of the National Physical Laboratory, “Method of Experimental Determination of the Forces and Moments on a Model of Complete Aeroplane; With the Results of Measurements on a Model of a Monoplane of Bleriot Type,” R. & M. 75, *ibid.*, pp. 128-32; Leonard Bairstow, B. M. Jones, A. W. H. Thomson, “Investigation into the Stability of an Aeroplane, with an Examination into the Conditions Necessary in Order that the Symmetric and Asymmetric Oscillations can be Considered Independently,” R. & M. 77, *ibid.*, pp. 135-71; and L. Bairstow and L. A. MacLachlan, “The Experimental Determination of Rotary Coefficients,” R. & M. 78, *ibid.*, pp. 172-79. 1926年の論文はR. & M. 77とR. & M. 78である。
- (18) Leonard Bairstow and Harris Booth, “Investigation into the Steadiness of Wind Channels, as Affected by the Design Both of the Channel and of the Building by Which It is Enclosed or Shielded,” R. & M. 67 (September 1912).
- (19) Leonard Bairstow, J.H. Hyde, and Harris Booth, “The New Four-Foot Wind Channel; With Description of the Weighing Mechanism Employed in the Determination of Forces and Moments,” R. & M. 68 (March 1913).
- (20) *Ibid.*, p. 65.
- (21) M. J. G. Cattermole and A. F. Wolfe, *Horace Darwin's Shop: A History of the Cambridge Scientific Instrument Company, 1878-1968* (Bristol: Adam Hilger, 1987), p. 88.
- (22) The Aeronautics Staff in the Engineering Department, the National Physical Laboratory, “Method of Experimental Determination of the Forces and Moments on a Model of a Complete Aeroplane; With the Results of Measurements on a Model of a Monoplane of a Bleriot Type,” R. & M. 75 (March 1913).
- (23) A. Campbell and T. Smith, “On a Method of Testing Photographic Shutters,” *Proceedings of the Physical Society of London*, 21

- (1907-9), pp. 788-94, reprinted in *The National Physical Laboratory, Collected Researches*, 6 (1910), pp. 91-97.
- (24) R. & M. 77, p. 163.
- (25) *Ibid.*, p. 216.
- (26) C.F. Caunter, "A Historical Summary of the Royal Aircraft Establishment: 1918-1948," *Aero*, 2150, November 1948.
- (27) スアストウらのグラフの利用と技術活動における表現方法と計算方法としてのグラフの活用の歴史について、Takehiko Hashimoto, "Graphical Calculation and Early Aeronautical Engineers," *Historia Scientiarum*, vol. 3, no. 3 (1994), pp. 159-183. ※参照。
- (28) G. Temple et al., "Leonard Bairstow," *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 11 (1965), pp. 23-40. スアストウが王立協会会員に推挙されたのは一九二三年に十一月のジョビである。その後四年間サスメンディングの期間を経た一九一七年に会員に選ばれた。"Bairstow, Sir Leonard," *EC/1917/02*, Royal Society. 推薦者は「レイリー卿を始めとする航空諮問委員会の会員が大半を占めてゐる」。
- (29) Leonard Bairstow and John L. Nayler, "Investigation of Lateral Stability, Indicating the Conditions Applicable in Design for Securing Maximum Lateral Stability," R & M 116 (March 1914).
- (30) Robert G. Harris, "Graphical Solution of Stability Biquadratic," R. & M. 262 (September 1916). 回覧号は T. 817, DSIR 23/831, NA への提呈されたものである。後出の図は T. 817 からコピーされたものである。
- (31) *Ibid.*, p. 230.
- (32) Minutes of the Advisory Committee for Aeronautics, 10 October 1916, DSIR 22/1, NA.
- (33) Bryan, *Stability in Aviation*, pp. 178-80.
- (34) George Bryan, "The Rigid Dynamics of Circling Flight (Steady Motion in a Circle - Lateral Steering of Aeroplanes)," *Aeronautical Journal*, 19 (1915), pp. 50-74. トリアブンの研究は基本的にライットのアーロン工科大学の技術者ハンス・リースナーと彼の学生による研究に回ったのである。Hans Reisser, "Die Seitensteuerung der Flugmaschinen," *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschifffahrt*, 1 (1910), pp. 101-6 and 117-23. リースナーの著述であるカール・ゲーレンはこの課題で博士論文を執筆した。
- (35) Frederick W. Lanchester, "The Rigid Dynamics of Circling Flight," *Aeronautical Journal*, 19 (1915), pp. 107-8, on p. 108.



- (36) Bryan's reply to Lancheester's "The Rigid Dynamics of Circling Flight," *Aeronautical Journal*, 19 (1915), pp. 108–11, on p. 110.
- (37) L. Bairstow, "Inherent Controllability of Aeroplanes: Notes Arising from Professor Bryan's Wilbur Wright Memorial lecture," *Aeronautical Journal*, 20 (1916), pp. 10–17.
- (38) *Ibid.*, p. 11.
- (39) *Ibid.*, p. 11.
- (40) エドワード・トマンの生涯と業績 (1917年) J. S. Cotton and Rosemary T. Van Arsdel, "Allen, Grant," Dictionary of National Biography を参照。また最近の研究書として、G. H. Grant を参照。William Greenslade and Terence Rodgers, eds., *Grant Allen: Literature and Cultural Politics at the Fin de Siècle* (Aldershot: Ashgate, 2005); Jonathan Smith, "Grant Allen, Physiological Aesthetics, and the Dissemination of Darwin's Botany," in Geoffrey N. Cantor and Sally Shuttleworth, *Science Serialized: Representations of the Sciences in Nineteenth-Century Periodicals* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 2004).
- (41) George J. Romane's review on Grant Allen, *Cain Clout's Calendar* (London: Chatto & Windus, 1883), in *Nature*, 28 (1983), pp. 194–95, on p. 194.
- (42) Bryan to Bairstow, 21 February 1916, reproduced in *Aeronautical Journal*, 20 (1916), pp. 17–19, on p. 18.
- (43) G.H. Bryan, "Researches in Aeronautical Mathematics," *Nature*, 96 (1915–16), pp. 309–10, on p. 310.
- (44) See Julius Rotta, *Die Aerodynamische Versuchsanstalt in Göttingen, ein Werk Ludwig Prandtl's: Ihre Geschichte von den Anfängen bis 1925* (Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1990), pp. 189–190 and note 8 on p. 313. ロッタはトマンの回想として三つの文献を引用しているが、その中で特にトマンのイギリスの王立航空協会でのヴァルバー・ライント記念講演を参考にとっている。Ludwig Prandtl, "The Generation of Vortices in Fluids of Small Viscosity," *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 31 (1927): 720–743.
- (45) Minutes of Göttingen Vereinigung zur Förderung der Angewandten Physik und Mathematik, Ostern 1915, in the Prandtl Collection at Max Planck Institut für Strömungsforschung, Göttingen. 「シムントもこの風洞内のアーチ状の板のまわりの空気の流れの理論」と題された学生の研究計画が戦争のために中止された」と記述されており、これがジョーンズの研究であったと推測される。
- (46) Bryan, "Researches in Aeronautical Mathematics," op. cit., p. 510.

- (47) L. Bairstow, "The Solution of Algebraic Equations with Numerical Coefficients in the Case Where Several Pairs of Complex Roots Exist," an appendix to L. Bairstow, J. L. Nayler, and R. Jones, "Investigation of the Stability of an Aeroplane When in Circling Flight," R. & M. 154, TRACA 1914-15, pp. 189-252, on p. 251.
- (48) Carl Runge, "Separation und Approximation der Wurzeln," in *Encyclopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen*, I B3a. ケンントヘウ彼の方法について J. J. Burckhardt, "Gräffe, Karl Heinrich," in *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 4, p. 490' を参照。
- (49) アメリカでの初期の航空工学の発達に携わったアルフレッド・E・サートゼ、イギリスの航空諮問委員会にNACAが設立された二年前の一九一三年に委員会の財政と経営に関して質問を送ったこと。Minutes of the Advisory Committee for Aeronautics, 21 January 1913. NACAの歴史についてはこちらを参照。Alex Roland, *Model Research: The National Advisory Committee for Aeronautics, 1915-1958* (Washington, D. C.: NASA, 1985).
- (50) See A. F. Zahm, "Report on European Aeronautical Laboratories," *Smithsonian Miscellaneous Collection*, vol. 62 no. 3 (1914); Jerome C. Hunsaker, "Europe's Facilities for Aeronautical Research," *Flying*, 3 (1914), pp. 75, 93, and 108-9.
- (51) The Reminiscence of Jerome C. Hunsaker, Aviation Project, the Oral History Office, Columbia University, 1960, pp. 22ff.
- (52) タグノリスの初期の活動について René J. Francillon, *McDonnell Douglas Aircraft since 1920*, vol. 1 (London: Putnam, 1979), pp. 22f' を参照。
- (53) Edwin B. Wilson, "Theory of an Airplane Encountering Gusts," *NACA Technical Report*, no. 1, part 2 (1915).
- (54) Edwin B. Wilson, "Theory of an Airplane Encountering Gusts, II," *NACA Technical Report*, no. 21 (1917). この論文は最初 *Transactions of the American Philosophical Society* に出版された。
- (55) ウィルソンが引用している文献は次の二本の論文である。George H. Bryan and Selig Brodetsky, "The Longitudinal Initial Motion and Forced Oscillations of a Disturbed Aeroplane," *Aeronautical Journal*, 20 (1916), pp. 139-56; Thomas J. IA. Bromwich, "Normal Coordinates in Dynamical Systems," *Proceedings of the London Mathematical Society*, 15 (1917), pp. 401-48.
- (56) "An Investigation of the Elements Which Contributed to Statical and Dynamical Stability, and of the Effects of Variation in Those Elements," *NACA Technical Report* No. 17. タグノリスの航空諮問委員会にロマンズの講義 (instructor) である「ローナー・ウィルソン」は助手であった。

- (57) Minutes of the Advisory Committee for Aeronautics, 8 May 1917, DSIR 22/1, NA. 会議に際して「イギリスの技術報告はイタリアには送られていない」と言及され、結局イタリアはアメリカに外務省を通じて送付されることが決定された。
- (58) Wilson to Henry A. Bumstead, October 6, 1919, Hunsaker Papers, Box 1, File B, Smithsonian Institution.
- (59) Edwin B. Wilson, *Aeronautics: A Class Text* (New York: John Wiley and Sons, 1920), p. v. 序文は一九一九年七月に書かれ、ドイツの戦時期の研究成果はまたアメリカに伝わってこなかった。
- (60) McLaurin to Hunsaker, 28 January 1919, Hunsaker Papers, File B. 休戦後のハンセーカーのヨーロッパ派遣の任務について多次を参照。 *The Reminiscence of Jerome C. Hunsaker's Aviation Project*, Oral History Research Office, Columbia University, 1960.
- (61) McLaurin to Hunsaker, 9 May 1919, Hunsaker Papers, Box B.
- (62) Hunsaker to McLaurin, 16 May 1919, Hunsaker Papers, File B.
- (63) Hunsaker to Ames, 8 April 1919, Hunsaker Papers, File A; Hunsaker to Bane, 16 May 1919, Hunsaker Papers, File B.
- (64) Paul Hanle, *Bringing Aerodynamics to America* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1982).
- (65) 技術史家のスタウニンマンローは、『技術と文明 (Technology and Culture)』誌に掲載された論文のノートを含括し、その中で科学と技術の関係を論じた論文についてを概括している。John M. Standenmaier, *Technology's Storytellers: Reweaving the Human Fabric* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1984), chapter 3. 最近の論文については、技術上の概念の科学的概念への発展を論じた次の論文を参照。Chen-Pang Yang surveys the issue and discusses the evolution of an engineering concept into a scientific one in his "Scientific Fact or Engineering Specification? The U.S. Navy's Experiments on Wireless Telegraphy circa 1910," *Technology and Culture*, 45 (2004): 1-29.
- (66) Hugh G. J. Aitken, *Syntax and Spark: The Origins of Radio* (New York: Wiley, 1976).
- (67) 寸法効果の論争については次の拙稿を参照。橋本毅彦「《語間》から《研究》へ—飛行機の登場と英国政府の科学者たち」『年報科学・技術・社会』第一巻、一九九二年、九一—一〇七ページ。Takehiko Hashimoto, "The Wind Tunnel and the Emergence of Aeronautical Research in Britain," in Peter Galison and Alex Roland eds., *Atmospheric Flight in the Twentieth Century* (London: Kluwer Academic Publishers, 2000), pp. 223-239. 第一次大戦中の寸法効果論争については、より詳しい続稿を準備中である。