



寄稿



エッフェル式風洞の元祖を訪ねて Visiting the Original Eiffel-Type Wind Tunnel

片岡浩人*
Hirotō KATAOKA

1. まえがき

きっかけは 2013 年末、会社の社外向け Web サイトのコンテンツ作成協力依頼だった。耐風設計に関する企画である。広報担当者からは、理工系を目指す高校生でも理解できるような内容で、かつ興味を惹くようなコンテンツを目指すようにとの指示が出ていた。

年が明けて 2014 年、何度か打合せをするなかで、風洞の種類に話が及んだ。エッフェル式とゲッチンゲン式の話である。その時に「エッフェルは、エッフェル塔の建設の際、自ら作った風洞で風荷重評価を行ったのではないか」と喋った。のちにこの話は間違いであることが判ったのだが、その時の広報担当者の受けが非常に良かった。そこでエッフェルの風洞に関してインターネットで調べてみたら、エッフェル自身が建てた風洞が今も現役で活躍している事が判った。パリ市内にあるその施設は、Le Laboratoire Aérodynamique Eiffel という名前で、地下鉄の駅からもさほど遠くない。そこで 10 年に一度の長期休暇を利用して、2017 年 6 月に訪問することとなった。

本報では、前半でエッフェルと彼が行った実験に関する基本的な事項について述べる。そして後半で私の訪問記を紹介する。前半の内容は文献¹⁻⁵⁾やインターネットで調べた事⁶⁻⁸⁾のサマリーではあるが、知っているようで意外と知られていない事柄が多いので、紹介させて頂く。特に、米国機械学会 (以下 ASME) が 2005 年に

エッフェルの施設と実験装置を Historic Mechanical Engineering Landmarks として顕彰した際の資料¹⁾が大変参考になった。

2. エッフェルの略歴

Alexandre Gustave Eiffel (以下エッフェル) の略歴⁶⁾を表 1 に示す。

鉄道建設関連会社に就職後、1866 年に独立してエンジニアリング会社 Société des Établissements Eiffel (以下エッフェル社) を創業する⁶⁾。同社を率いて 30 代後半から 50

表 1 エッフェルの略歴⁶⁾

西暦	経歴
1832	ディジョンに生まれる
1852	中央工芸学校化学科へ進学
1856	鉄道建設関連会社に就職
1866	エッフェル社創業
1884	自由の女神主要構造部を担当
1886	革命 100 周年記念モニュメント (のちのエッフェル塔) 工事をコンペで獲得
1889	エッフェル塔竣工
1893	会社経営から引退
1903	落下試験による空力実験
1905	シャン・ドゥ・マルスに研究所を建設
1909	研究所内に最初の風洞建設
1912	二代目の風洞をオートウイユに建設
1921	風洞施設を仏政府に寄付
1923	パリにて 91 歳で死去

* 株式会社大林組技術研究所 都市環境技術研究部 部長
General Manager, Urban Environmental Engineering Department, Technical Research Institute, Obayashi Corp.

代にかけて、多くの建物や構造物を手がけた。最も有名なエッフェル塔は、建設費の1/4以下しか補助金が出ず、残りの資金をエッフェル自ら調達している⁷⁾。そのため1889年の竣工から1909年までの20年間の収益は、エッフェル自身にもたらされる事になった。国を代表する観光施設に民間業者の名前がついているのも、このような経緯があつての事であろう。

パナマ運河建設工事にまつわるスキャンダルに巻き込まれた事をきっかけに、1893年、61歳で会社経営から引退する⁶⁾。ここから、空力や気象の研究にのめり込むこととなる。60代から80代後半まで一連の業績を成し遂げた後、91歳で死去した。

3. エッフェルが行った空力実験

3. 1 落下試験 (1903-1906)¹⁾

エッフェルが事業から引退した19世紀末は、動力付き航空機の開発を巡って、各国が競い合っていた時代である。しかし、エッフェルは飛行機よりも基本的な形状の空力特性にこだわった。すでに英国で風洞が発明されていたが⁸⁾、落下試験を実施した。もちろんエッフェル塔を最大限に活用した。

エッフェル塔の二段目の展望台 (高さ115m) にある床開口部からケーブルを垂らす。計測器の底に付いた棒の先端に試験体を設置し、計測器もろともケーブルに沿って落下させる。最後の21mの区間はブレーキをかけて機器を安全に回収する。1903年から1906年までの3年間で様々な形状の抗力を測定し、1907年に論文“Recherches Expérimentales sur La Résistance de l’Air Exécutées à La Tour Eiffel”として出版した¹⁾。

3. 2 初代風洞実験施設 (1909-1911)¹⁾

落下試験には測定時間の短さなどの課題があつた。そこで当時の実験方法について改めて調査を行った上で、自らのアイデアに基づいた風洞を計画した。当時の風洞 (基本的な構造は、風工学分野で“エッフェル式”と呼ばれるものと同一である) は測定断面が小さく、閉塞率の影響が無視できない。一方で測定断面を開放型にしてしまうと外乱の影響を受けやすい。そこで測定断面を小さな部屋で囲うこととした。すなわち風洞を収容する建屋内に、測定断面を覆う小部屋を設ける。本来の意味でのエッフェル式風洞とは、このタイプの風洞の事である¹⁾。このアイデアに基づいて、1909年エッフェル塔の直ぐ近く、シャン・ドゥ・マルス (Champs-de-Mars) の研究所内に、風洞を設置した。電源は、ちゃっかりエッ

フェル塔の発電機から引き込んでいた。

彼が最初に行った実験は、落下試験との比較である。静止流体中を移動する物体と、流れ場内に置かれた静止物体に加わる抗力が同じである事を確かめた。風洞実験装置の検証実験にもなった。

その後4,000体以上の翼断面の試験を実施し、その成果を1911年に論文“Résistance de l’Air et l’Aviation: Expériences Effectuées au Laboratoire du Champs-de-Mars”として発表した。

3. 3 二代目風洞実験施設 (1912-)²⁾

1911年、パリ市から土地の明け渡しを求められた事をきっかけとして、パリ市内のオートゥイユ (Auteuil) 地区に移転するとともに、1912年に改良型の二代目の風洞を建設した。写真1に示すように当初は2種類の風洞が設置されていたが、ほとんどの実験がより測定断面の大きいプロペラファンの方で行われるようになったため、1933年に小さい方の風洞は廃棄されている。

この風洞でエッフェルが施した改良は、図1に示すようにファンにディフューザーを設けた事である¹⁻³⁾。測定断面よりもファンの断面積を大きくし、断面風速を下げ、同時に静圧を回復させることで、ファンの効率が改善された。エッフェルはこれで1912年に特許を取った。ただし使用者には使用料を取る代わりに、彼と彼の研究所の名前を書いた1m×0.5mのパネルを、計測室の入り

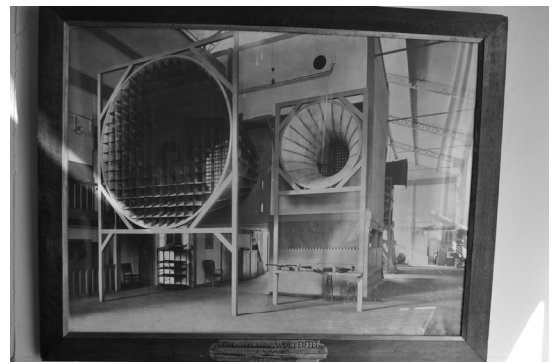


写真1 建設当初の二代目風洞

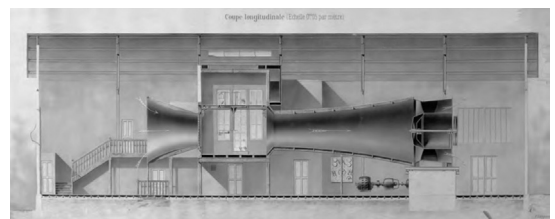


図1 二代目の風洞の断面を示した水彩画⁵⁾

口に掲げるように求めた^{2, 3)}。

もう一方のタイプであるゲッチンゲン式の風洞は、1909年にLudwig Prandtl (以下プラントル)によりドイツのゲッチンゲン大に最初に設置された³⁾。このプラントルの弟子との間で球の抗力の実験結果について一悶着があった。エッフェルが追加実験を行い、臨界レイノルズ数に相当する条件を見つけた^{3, 4)}。この件でエッフェルは、研究者の交流や研究成果の公開が、科学の発展に重要であることを知った。そこで、オートゥイユの風洞を広く研究者に公開し、使用料を取る代わりにその成果を公表する事を義務づけた³⁾。

風洞はエッフェルの生前、政府に寄付される²⁾。1945年、フランス航空宇宙産業グループ GIFAS (Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales) に買収され、自動車、建築、換気分野の実験施設として使われるようになる。1983年に風洞実験施設のみを運営する別会社が組織されたこともあったが、2001年にフランスの建築科学技術センターCSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment) に吸収され現在に至る⁵⁾。

4. 訪問記

4. 1 訪問のアポイント (出発前)

休暇を2017年6月7日から20日までの2週間で取ることにした。航空券や宿の手配をし、日々の観光などのおおよその日程が決まったのが5月初め。そろそろLe Laboratoire Aérodynamique Eiffel (以下エッフェル空力研究所) にアポイントをとらなくてはと思い、同研究所のWebサイトで連絡先を調べた。4人のメールアドレスが掲載されていた。まずは所長らしき人に訪問を希望する旨のメールを送ったのが5月8日月曜日。週末まで待っても返事が来ない。見ず知らずの人間からのメールに対して、返事がこない事は予想していた。残りの3人にも同じ文面でメールを送ってみた。しかし、エラーメッセージが返信されてきた一人を除いて応答がない。

次のステップとして、5月16日に郵便で訪問の申込み文を送った。幸い風洞の写った英文のパンフレットが会社にあったので、それも同封。いくらなんでも、こちらが素人ではない事はわかってくれると期待した。

返事は来なかった。

4. 2 訪問のアポイント (出発後)

アポイントが取れないまま出発の日を迎えた。

6月6日の夜に出国し、翌7日の朝にパリ経由でニース入り。宿について早々に、ジュアン・レ・パンの別荘地

に向かう。1920年代フランスで活動した芸術家や、家内お気に入りのアメリカ人小説家達との交流の舞台となった別荘 Villa America 探しをした。既に取り壊されたとの情報もあったが、高級別荘地の高い塀の向こう側に、それらしい白亜の建物を確認することができた。日本を発ってまだ24時間も経っていない段階でのこの成果に、幸先の良さを感じた。また南仏滞在中は好天にも恵まれた。

6月13日にエクス・アン・プロヴァンスからマルセイユを経由してパリに移動。この間、毎日メールの確認をしたが、返事は来っていない。そろそろ白黒つけないと、後の日程がはっきりしなくなる。アポイント無しで強引に訪問する事も考えた。

訪問予定前日の6月14日朝9時。思い切って電話してみた。すぐにつながった。Google 翻訳で調べた発音をたよりに、へたくソなフランス語を喋った。哀れに思ったのか、先方は英語で対応してくれた。結局、事前のメールや郵便でのアピールは効果があったのだろう。こちらの事を信用してくれて、すんなりと訪問を快諾される。時間は15日の“end of the day”, すなわち定時を過ぎた17時を指定された。先方の名前を聞き逃したので確認したら、所長のBlanchardさんだった。念の為に、拙いフランス語で予約確認のメールを送ったら、“C'est bien note. A demain.”という短い返事が届いた。これが事前にエッフェル空力研究所から届いた唯一のメールとなった。

4. 3 いよいよ訪問

訪問当日。午前中はエッフェルに敬意を表してエッフェル塔観光。この日の午前中に限って、今回の旅行中で唯一の曇りの日。展望台からパリ市内がかすんで見える。落下試験装置を設置したと思われる場所も探してみたが、判らなかつた。観光を終え、一旦ホテルに戻り、前日購入したシャンパーニュのお土産とともにエッフェル空力研究所へと向かう。

エッフェル空力研究所はパリ市西側16区のオートゥイユ地区内にある。メトロの最寄り駅は9号線のミケランジュ=モリトール (Michel-Ange Molitor) 駅か、10号線のシャルドン=ラガシュ (Chardon-Lagache) 駅である。我々が宿泊していた11区のホテルからは、メトロ5号線でオベルカンフ (Oberkampf) まで行き、そこで9号線に乗り換えるのが手取り早い。パリ中心部を取り囲むように、ぐるっと反時計回りに半周、約30分でミケランジュ=モリトール駅に着いた。外に出て南北に走るミッシェル=アンジュ通り (Rue Michel-Ange) を南方向に向かうと、エグゼルマン通り (Boulevard Exelmans) という中央に緑地

帯を備えた大通りに出る。そこを左折してしばらく通り沿いに歩くと、緑地帯が消えアンダーパスが始まるあたりで、Sakura という名前の日本料理屋が左手に見える。その手前の角を左に曲がるとボワロー通り (Rue Boileau) で、通りに入って直ぐ、いきなりエッフェル空力研究所の建物が現れる (写真2)。

まだ約束の時間には早いので、建物の周りを回って外観を眺めることにする。ボワロー通りと交差するミュセ通り (Rue de Musset) に沿って研究所建屋の南側妻面がある。再び、ボワロー通りに戻って、建物西側正面を眺める (写真3)。玄関とおぼしき入り口の隣に、例の ASME が Historic Mechanical Engineering Landmark として顕彰した記念のプレートが掲げられていた (写真4)。建物西側のファサードを見ると、とても 100 年前に建てられた建物には見えない。周辺は大使館や高級そうな邸宅が並ぶ閑静な住宅地といった趣である。17 時近くなると、エッフェル空力研究所の東側にある小学校から下校する児童と、それを迎えに来た親たちで、ひとときミュセ通り境界が賑やかになった。彼らが居なくなった頃、思い切ってエッフェル空力研究所の玄関のベルを鳴らして、中に入る。

中で迎えてくれたのは、Pierre Baudime さんという若い男性 (以下ピエール君)。後日送られてきた履歴書には Engineer Assistant すなわち実験助手と書かれていた。お土産のシャンパーニュを渡したら、翌日にパーティーを開く予定らしく大層喜んでくれた。

玄関を入れて直ぐの部屋で簡単な自己紹介をし、中の施設を時間が許す限り見せてほしいとお願いした。所長の Blanchard さんにご挨拶をと思ったら、もう帰宅された後だった。部屋の北側窓側には、エッフェル式風洞の概念模型が置かれ、壁面には風洞の断面を描いた水彩画 (図1) が飾られていた (写真5)。

南側の妻面に面したスペースに案内される。左手には風洞の吸込み口ノズルが大きく口を開いている (写真6)。妻面の壁際には、落下試験の測定器が陳列されていた (写真7)。奇麗に保存され、まだ使えそうである。傍らには、計測の原理を描いたポスターもあった。

次に、二階に上がる。風洞の測定断面がある高さである。この階の南側妻面に沿って、エッフェルの論文が陳列されている。最初にあったのは、1907 年の論文と 1911 年の論文、そして後者のドイツ語版。中央に空力天秤の図解のページが開かれていた。その横には“Atlas Météorologique”と題された気象観測記録の 1903 年版と 1906 年版。エッフェル塔で測られた気温、湿度、気圧、



写真2 エッフェル空力研究所 南面ファサード



写真3 エッフェル空力研究所 西側から



写真4 ASME の記念プレート



写真5 ピエール君から風洞断面図の説明を受ける

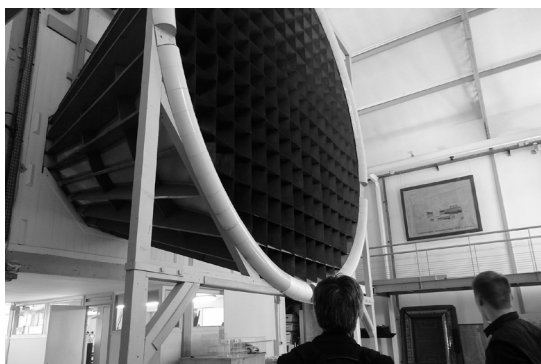


写真6 風路風上側の吸込み口

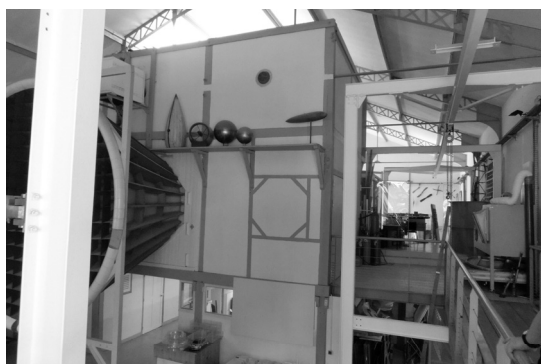


写真8 撤去した小型風洞の痕跡



写真7 落下試験装置の展示



写真9 プロペラファンとファンベルト

風向、風速の記録が見える。東側には、出来た直後と思われる風洞の写真(写真1)と風洞の図面が飾られていた。この他に、建築用の模型や、可視化用の小さな実験装置なども置かれていた。大きな吸込み口の横に回り込むと1933年に撤去された小型風洞の痕跡(写真8)。壁面に沿って風洞の北側に回り、今も稼働しているファンの外観(写真9)を眺める。

一階に降りて、ファンを下から眺める。床の上には、先ほどの水彩画にも描かれていた、シャン・ドゥ・マルスの風洞で使われていたと思われるモーター。この他にも、いかにも年代物の制御盤が無造作に置かれている。

次に案内されたのが、二階の測定断面内がある部屋。一边が2m程度の正方形の台の中に、小振りのターンテーブルがしつらえてある(写真10)。ただし、もともと一様流を対象とした空力実験用の風洞なので、境界層乱流を作るためのアプローチ部分が存在しない。したがって建築分野の実験に関しては、ここで得られる知見は限られると思う。ここからプロペラファンの方向を覗いた時に見える、ディフューザーが美しい(写真11)。

測定室の奥には100年前に設置された風洞の制御盤が残された部屋(写真12)。ここは、文献2)にエッフェル



写真10 風下側から見た測定部

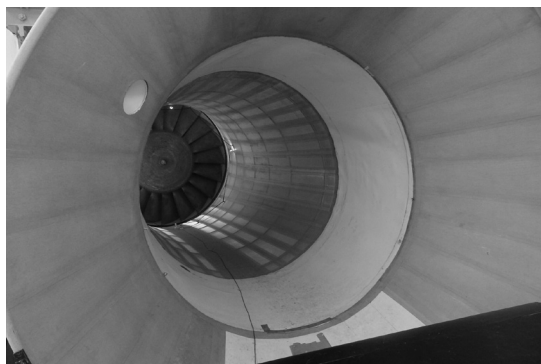


写真11 ディフューザーとプロペラファン

が共同研究者と一緒に写った写真が掲載されている（写真13）。両者を比較すると、左手窓際のテーブルはやや小振りになったものの、ほぼ当時のままである。さすがに現在の風洞の制御盤は、別の場所の新しいものに置き換わっていた。

ここでサーヴィスとしてピエール君の指示でファンを駆動してくれた。測定断面内に首を突っ込み、エッフェルと同じ100年前の風を感じているのだと、一人悦に入っていた。

これで見学は終わり。丁寧に説明してくれたピエール君にお礼を述べて、研究所の外に出た。ざっと40分間の見学時間だった。

こうして無事に念願のエッフェルが作った風洞を見ることができた。興奮冷めやらぬままホテルに帰り、お土産と同じシャンパーニュで祝杯をあげた。なお、今回の休暇では Villa America とエッフェル空力研究所を訪ねる他に、女性作家が同時代にパリ市内サンジェルマン地区に建てた Le Temple de l'Amitié という神殿の写真の撮る事を目的としていた。残念ながらこれは叶わなかった。

5. おわりに

せっかく貴重な体験をしたのだから部内の人間に共有してもらおうと、7月に部会で上記のような内容を発表した。ところが、何故か全く受けなかった。さらに今回のきっかけとなった Web コンテンツ作成の方も、企画見直しにより立ち消えとなってしまった。このままお蔵入りかと思っていた。ところが9月1日の日本建築学会風荷重懇親会の場で挨拶のネタに使ったら、図らずも受けてしまった。さすがに、エッフェル式風洞にお世話になっている人が多い場では反応が良い。そして、その場にいらした本学会の編集・広報委員会の奥田委員長から直々に、原稿の執筆を依頼され、今回の原稿につながった。

謝辞

末筆ながら、筆者の訪問を許してくれた所長の Blanchard さん、そして丁寧に案内してくれたピエール君こと Baudime さんにお礼を述べたい。

参考文献

1) Lawrence, J. L., “Eiffel 1903 Drop Test Machine and 1912 Wind Tunnel”, Historic Mechanical Engineering Landmarks, ASME (the American Society of Mechanical Engineers), section Française, 67 rue Boileau – 75016 Paris, France, (2005.10)



写真12 保存されている制御室



写真13 まだ現役だった頃の制御室²⁾ 手前がエッフェル

- 2) Damljanovic, D., “Gustave Eiffel and the Wind: A Pioneer in Experimental Aerodynamics”, Scientific Technical Review, Vol. 62, No. 3-4, pp. 3-13, (2012)
- 3) Chanetz, B., “A Century of Wind Tunnels since Eiffel”, Comptes Rendus Mécanique, Vol. 345, pp. 582-594, (2017.8)
- 4) 橋本毅彦, 「戦前の風洞の発達史」, ながれ, Vol. 33, pp. 249-252, (2014.6)
- 5) CSTB, “Le Laboratoire Aerodynamique Eiffel A 100 Ans, Focus sur Un Équipement Unique en France”, Dossier de Presse, (2012.4)
- 6) Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Gustave_Eiffel, (2017.11)
- 7) Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Eiffel_Tower, (2017.11)
- 8) Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel, (2017.11)