




企画番号：14

**企画タイトル：蒸気機関車のデフレクター
(除煙板) 性能評価**



プロジェクトリサーチ 活動報告書

企画ナンバー14

デフレクター性能評価

提出日：2022年11月8日

1. プロジェクトの概要

1. 1 目的

本プロジェクトは機関車周りの流れの様子を可視化し、デフレクターの有無による流れの変化及び最も排煙を後方に流すデフレクターの形状を明らかにすることを目的とした。

1. 2 計画

授業後やメンバーの空いている時間に各自 3D モデルを製作し、Ansys シミュレーションで流体シミュレーションを行う。モデル製作からシミュレーションは各自 1Q から空いている時間で行う。主な活動場所は STEAM コモンズで、デフレクターモデルの制作は神谷が行い、解析はコモンズ内の PC で小熊と鈴木が行い、結果を適宜大津先生に報告し、アドバイスを頂きながら進めた。

1. 3 調査手法

流体シミュレーションソフト ANSYS Discovery Live で、蒸気機関車が時速 50 km/h 程度で走行しているときのデフレクター周りの空気の流れをシミュレーションし、機関車周辺の水気がどのように流れるかを推定し、排煙の流れの推定に繋げる。

1. 4 結果

シミュレーションにより、デフレクターがない状態では機関車前面に当たった空気は左右に分かれ、流れが広がっていく結果が得られた。しかし、標準デフレクターを装着することで、流れが機関車胴体に沿うように真っすぐ流れた。この効果は切り取りデフレクターでは確認できないものもあり、デフレクターによって整流作用があるものとならないものが存在すると考えられる。

2. プロジェクト活動報告

2. 1 デフレクターの誕生、形状の発展の背景について

鉄道車両において、運転士の視界が確保されていることは安全上必須である。しかし、蒸気機関車においては、運転室に排煙が流れれば運転士の前方の視界を妨げ、鉄道の運行上危険である。そこで排煙を上昇させて、運転室の上方を流れるようにすることで運転室に排煙が流れないようにすることができる。

さて、1925年のドイツで「風導板」と呼ばれるものがデフレクターの最初とされる。日本では「デフレクター」のほか「除煙板」とも呼ばれる。図 2-1-1 にデフレクターを装備した機関車の写真を示す。

図 2-1-1 において、機関車前面の両側面に設置されている板がデフレクターであり、このような形のデフレクターは「屏風形」と呼ばれる。

デフレクターを考案したドイツ国鉄の Friedrich Witte は、排煙を後方に流す原理を次のように説明している。

“機関車の走行によって生ずる気流を、煙室の近くに生じる渦流を迂回させつつ、風下にあたる缶胴の側に生じた低圧部内に誘導することによって、空気の回廊を作ってやり、この回廊に沿って排気と煤煙とを後方に送り出す”（鉄道ファン 1970.9）

そして1940年代初めにさらなる除煙効果を得ることを目的に Witte が風洞実験を行った結果、図 2-1-2 に示す形状が最も効果が高いと結論した。

この形状は「ウィッテ式風導板」や「切取式除煙板」と呼ばれる。図 2-1-2 のように、ウィッテ式風導板はデフレクターと機関車胴体を繋いで支持している。また、デフレクターが後端の方が前端より長くなっており、後ろの傾いたような形状をしている。日本の切り取りデフレクターでは、前傾姿勢になっているものは散見されるが、本プロジェクトで参考とした『門鉄デフ物語』には後方に広がる形状のデフレクターは掲載されていない。

図 2-1-2 に示した形状について Witte 氏は次のように述べている。

“実験の結果では、この形のものが最大の効果を発揮することが立証された。その効率は 21° まで発揮される。すなわち煙突から出る排気この形の風導板によって 21° まで上方へ押しあげられるが、これは他のいかなる風導装置も記録できなかった成果である。”（鉄道ファン 1970.10）

この切取式除煙板は、国鉄小倉工場の機関車課長が「外国には板の下方を切り取っている例がある」（関、p.29）と外国から帰った人から聞いたことで日本に伝わったとされる。

そして小倉工場で 1952 年に試験的に採用され、以後鹿児島・後藤・長野工場でデフレクターを改造する事例が相次いだ。ただ、このとき日本でも風洞実験が行われたことを示す資料は発見できなかった。



図 2-1-1 デフレクターを装備した機関車(C57 1)

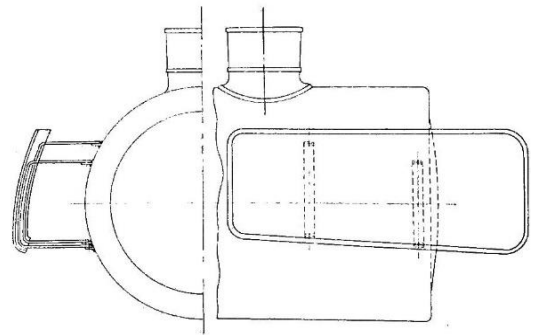


図 2-1-2 Witte による最も効果的な風導板の形状
（鉄道ファン 1970.10 p.86 より引用）

2. 2 研究の経緯

2. 1 節で述べたように、切取式除煙板は口伝によりもたらされ、そこで日本独自の形状が生み出された。しかし、Witte 氏自身が開発した図 1-2 に示した形状を、どのような経緯で設定したかという説明はなされていない。そのため日本での改造例の中に Witte 氏が設計した形状より高性能なものがある可能性がある。

また、切取式除煙板の長所について、関崇博氏は 1970 年 5 月号の『鉄道ファン』で関係者が口を揃えて言うこととして、「バイパス弁の点検・検修に非常に便利、資材が節約できる、入換等に便利、形態がざん新で、スマートであること」を挙げている。しかし、実用上の利点が挙げられていないことから、当時の関係者はデフレクターを切り取ることによる性能の変化を体感していなかったと推測できる。一方、短所について関氏は「いっぽう短所といえば、なかなか見当たらないが、改造に費用を要すことくらいでしょうか」（鉄道ファン 1970.5 p11）としている。このため、切取式除煙板の効果については関係者も認識していない可能性がある。

そして日本にはデフレクターを装備していない機関車も存在する。その例を図 2-2-1 に示す。図 2-2-1 は 8620 形 8630 号機である。この機関車は 1971 年に切取式デフレクターが取り付けられたが、翌年に取り外され、2022 年現在もデフレクターを装備していない。なお、8620 形は旅客用だけでなく、入換機として使われることもあった。



図 2-2-1 デフレクターを装備していない機関車(8620 形)

デフレクターを装備していない例は入換機によく見られるが、その目的は視界の確保である。

一方、C12 形のように、デフレクターを装備していなくても国鉄時代に貨物と旅客の両方に従事した形式がある。C12 形を図 2-2-2 に示す。図 2-2 は C12 形 66 号機であり、真岡鉄道で運行している。そこで煙に対する対策がされないということは、デフレクターを装備していなくても、運転士の視界を遮ることがないか、客車に煙が流れていかないといった可能性が考えられる。



図 2-2-2 デフレクターを装備していない機関車(C12 形)

そこで本プロジェクトでは、デフレクターの有無によるデフレクター周りの空気の流れを検証し、デフレクターの有無による流れの変化を含め、日本における各機関区のデフレクター改造例を基に、切取式デフレクターの効果及び各デフレクター装着時の流れ場の様子を探った。

2. 3 調査方法

2. 3. 1 モデルの作成

本プロジェクトで作成する機関車のモデルは現在も走行している機関車の中から選ぶこととし、さらに切り取り式デフの装備例の多さから C57 形と D51 形を選定した。

まず、小熊が機関車形式図と組立図を元に C57 形と D51 形のモデルを作成した。ここで、現在走行している C57 形は 1 号機であるため、組み立て図から 1 号機のモデルを作成した。D51 形は 200 号機や 498 号機などのいわゆる標準形が稼働しているが、それらの組み立て図を入手できず、蒸気ドームがカバーで覆われた 1 号機の図面しか入手できなかったため、そのカバー部分を標準形の形式図を基に作り替え、また機関車前面の胴体の端面を角ばった形に変え、D51 標準形の特徴を踏まえてモデル化した。

車体本体のモデル化を行ったのち、D51 形デフレクターの細かい寸法を得るため、小熊・神谷・鈴木は京都鉄道博物館に採寸に行った。測定の様子を図 2-3 に示す。ここで得たデータを基に神谷デフレクター



図 2-3 デフレクター測定の様子

モデルを作成し、デフレクターを装備しない状態とデフレクターを切り取った場合との比較対象とした。

続いて、『門鉄デフ物語』に寸法が掲載されていた小倉式、長野式、後藤式、鹿児島式の切り取りデフレクターのモデルを作成した。形状別の呼称は改造が施された国鉄工場に起因するもので関崇博氏が名付けた。本報告書でもその呼称を使用することとし、作成したモデルは表 2-3-1 の通りである。

表 2-3-1 作成した切り取りデフレクター一覧

D51 形	C57 形
標準	標準
K-1	K-1
K-7	K-2 (C55)
N-1	K-3
N-2	K-4 (C55)
G-3	K-5
G-5	K-6 (C55)
KG-1 (C61)	N-2
	N-3
	KG-2 (C55)

表 2-3-1 において、C55 形や C61 形に装備されたデフレクターも含まれるが、C57 形が C55 形の後継であること、C61 形が D51 形のボイラーを使用した改造機であることを踏まえて、煙室胴ーデフレクター間の距離が同じであれば流れの様子を再現できると考え、それぞれ C57 モデルと D51 モデルに装着することとした。

2. 3. 2 モデルの詳細

次に、各切り取りデフレクターのモデルの特徴を述べる。図 2-3-1 に D51 の新製時のデフレクターモデルを示す。モデル化は、『日本国有鉄道 蒸気機関車設計図面集』に掲載されていた D51 1 のデフレクターの寸法を基に行った。D51 形のデフレクターは図 2-3-1 の形状で製造されたため、本報告書では、図 2-3-1 のモデルを「D51 標準」と呼ぶ。横の長さは 1950 mm、下端から上端まで 2100 mm で、上端から 200 mm のところで煙室胴側に折れ曲がっている。

図 2-3-2 は標準形のデフレクターにバイパス弁の点検用に穴を開けたモデルである。バイパス弁とは、シリンダー内の吸気用・排気用の仕切りの作用を無くすための弁で、この弁を開けることでシリンダー内が真空にならず、ピストンの動きが鈍くなることを防ぐ。

図 2-5-2 でデフレクター側面に穴が開いていること以外は図 2-3-1 の D51 標準と同じ形状である。この穴はバイパス弁点検窓と言うため、図 2-3-2 のモデルは「D51 窓付」と呼ぶ。

図 2-3-3 は D51 799, 918, 1022 号機の 3 両に取り付けられた K-1 タイプのモデルである。標準デフレクターの下部を切り取ったような形状をしている。

横寸法 1950 mm、前部縦寸法 950 mm、後部縦寸法が 880 mm と、後ろに狭まっていく形状となっている。

K-1 タイプは D51 と C57 にそれぞれ存在するが、D51 に装着されたものは C57 のものより縦寸法が 400 mm 小さい。

図 2-3-4 のデフレクターは D51 272, 1021 号機などに取り付けられた K-7 タイプのモデルである。デフレクターはアングル材でデッキに垂直に支持されている。

K-7 タイプは小倉工場式の切り取りデフレクターとして最多の 146 両に付けられた。モデル化は 1021 号機に取り付けられたものを基に行った。ただし、モデルの簡略化のため、煙室胴との固定具は省略した。K-7 は横 1950 mm、縦寸法 700 mm の長方形の四隅に R200 の面取りが施されている。また、ランボード上からデフレクターを支持する形状となっている点を除いては、後述する C57 K-3 タイプと類似した形状である。

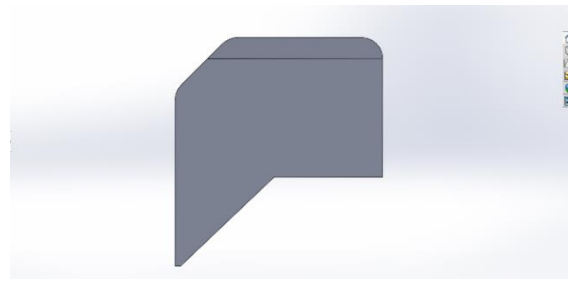


図 2-3-1 D51 標準

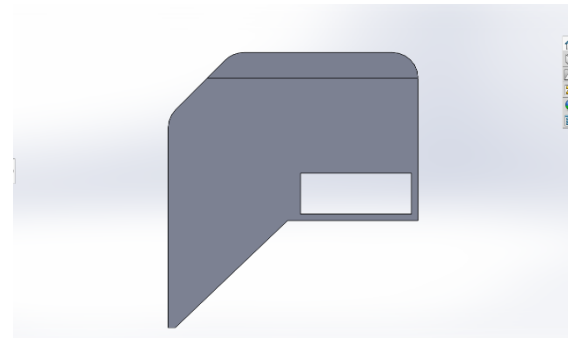


図 2-3-2 D51 窓付

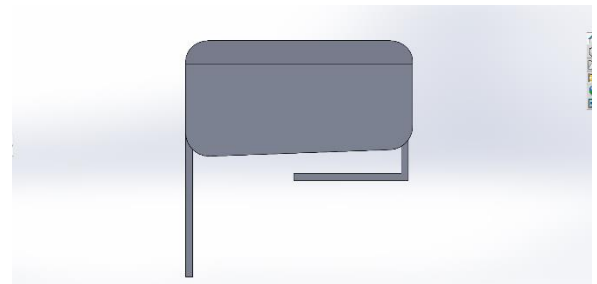


図 2-3-3 D51 K-1

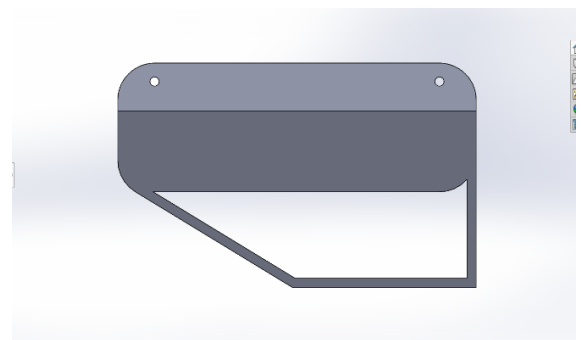


図 2-3-4 D51 K-7

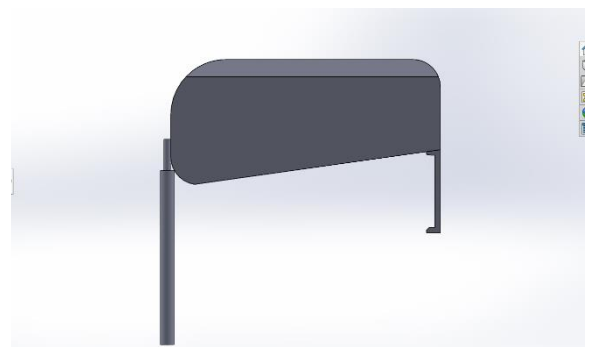


図 2-3-5 D51 N-1

なお、K-7タイプはD51だけでなく、C55やC57にも取り付けられていたが、D51に取り付けられたものと横寸法が1950mmで等しく、縦寸法も後端700mmで同じ、前端は35mmの差があるだけなのでC57形のK-7タイプは省略した。

図2-3-5のデフレクターはD51 135号機に長野工場に取り付けられたN-1タイプのモデルである。N-1をはじめ、長野工場式のデフレクターは長野工場式のデフレクターは前部が丸みを帯びている。またデフレクターはパイプでデッキに垂直に支持されているが、“長工式切取除煙板の特徴は、長野工場図面からも判断できますが、つまり、除煙板の前支えは、にぎり棒を兼ねた設計になっております。”(鉄道ファン1970.5)とあるように、掴まり棒の役割も兼ねている。またN-1は横1950mm、前端縦寸法900mm、後端縦寸法650mmで、支えが後端に付けられている。

図2-3-6はD51 62, 95号機などに長野工場に取り付けられたN-2タイプのモデルである。N-1との違いは、前縁部がなめらかなアールを描いていたところを切り取り、斜めにしたことと、後ろの支持部分が後端と一致していないことである。N-1では支柱が後端と一致していたが、N-2では310mm前方に移動している。この変更は1959年に行われ、バイパス弁周辺の検修を考慮したものとされている。

図2-3-7はD51 499, 727号機に取り付けられたG-3タイプのモデルである。関氏は形態的特徴と、「標GT」という後藤工場標準車のマークがデフレクター側面についていたことから後藤工場式と分類している。

G-3タイプはデフレクターの上部と下部で長さが異なり、上部は2600mm、下部は1500mmとなっている。太さ60mmの支柱も前後ともに湾曲しており、デフレクター後部は支柱の湾曲に沿って丸みが付けられている。また支柱を除く下部900mmはランボードに垂直であるが、上部330mm分は胴体に向かって曲がっており、給水温め器に覆い被さるような形状をしている特徴がある。

図2-3-8はD51 187, 795号機に取り付けられたG-5タイプのモデルである。G-5タイプは標準形のデフ

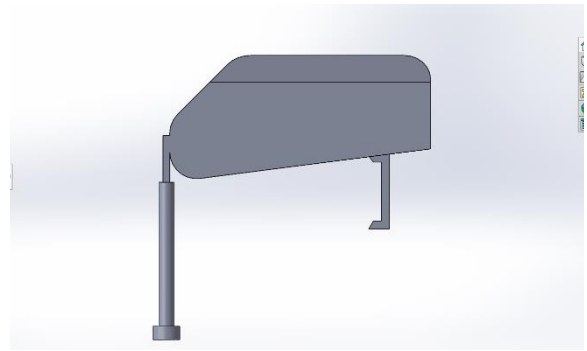


図 2-3-6 D51 N-2

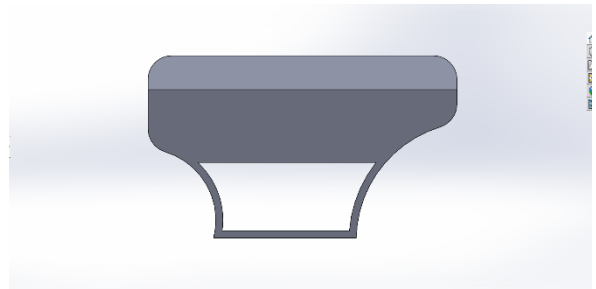


図 2-3-7 D51 G-3

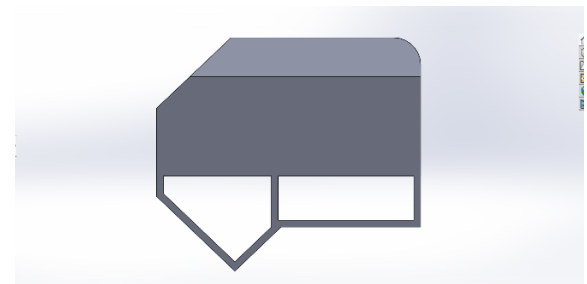


図 2-3-8 D51 G-5

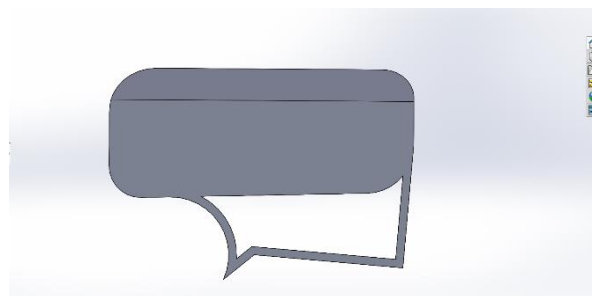


図 2-3-9 C61 KG-1

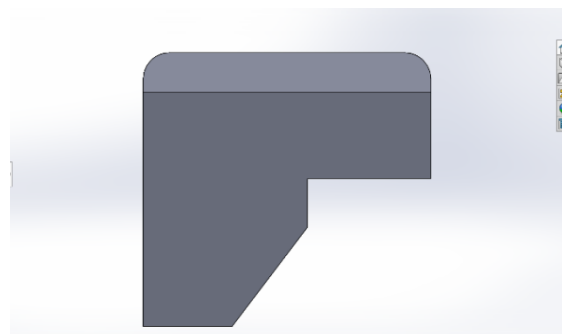


図 2-3-10 C57 標準

レクターを上から 500 mm の位置で切り取ることで作られたもので、3つの支柱で支持している。図 2-3-8 は D51 187 号機のをモデル化したものだが、187 号機は前部の支柱が垂直にランボードに設置されている。

図 2-3-9 は C61 13 に取り付けられた鹿児島工場式 KG-1 タイプのモデルである。図 2-3-9 はデフレクターの板部分を水平にして示しているが、装着時は支柱が水平になるので、後述の C55 K-2 タイプ同様に前方に傾いて装着されることになる。さらに、前部支柱が湾曲している点は K-5 タイプと類似している。

図 2-3-10 は C57 形の標準的なデフレクターである。これに D51 同様バイパス弁の点検用窓を開けられたものを図 2-3-11 に示す。図 2-3-11 は図 2-3-10 の C57 の標準形に穴を開けたもので、現在動態保存している 1 号機や 180 号機はこのタイプのデフレクターを装備している。

図 2-3-12 は C57 150, 155 号機に取り付けられた小倉工場式の切り取りデフレクター K-1 タイプのモデルである。後ろに向かって徐々に細くなる形状をしている。

横の長さは 1950 mm で C57 と D51 で同じであるが、縦の長さが異なる。またランボードからデフレクター上端までの高さも D51 の K-1 は 1200 mm あったが、C57 の K-1 は 990 mm である。

なお、SL ばんえつ物語号を牽引する C57 180 に装着される K-7 タイプは、2007 年に JR20 周年記念で作成されたものである。

図 2-1-13 は C55 13 号機に取り付けられた K-2 タイプのモデルである。これは K-1 を試験的に改造したものである。形前方に傾斜して取り付けられるため、後方に向かってデフレクターが斜め上に向かう形状となっている。横の長さは 1953 mm で、ランボードの支えの角度は 45° に傾斜している。

図 2-3-14 は C57 151 号機に取り付けられた K-3 タイプのモデルである。これも図 2-3-12 に示した C57 の K-1 タイプと同様に、デフレクターの前端と後端で縦の大きさが異なる。前端は 740 mm であるのに対し、後端は 670 mm である。ただし、ランボードからの高さと同様の横の長さは K-1 と同じ 990 mm と 1950 mm である。ただし、K-1 は支柱が垂直に付いていたが、K-3 は斜めに付いており、支持方法が異なる。

図 2-3-15 は C55 11 号機に取り付けられた K-4 タイプ

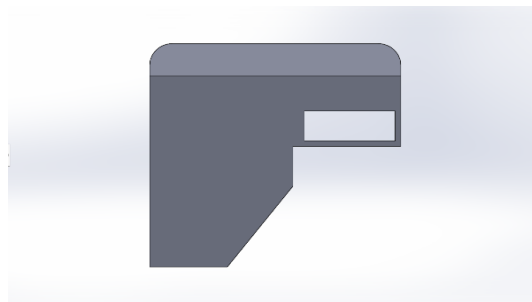


図 2-3-11 C57 標準窓付

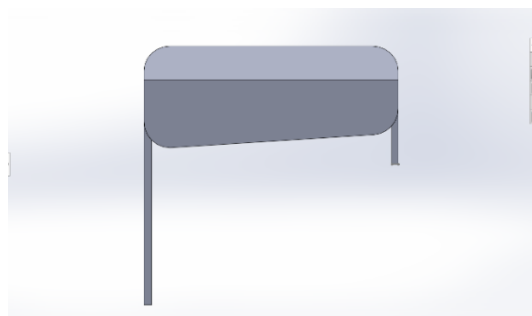


図 2-3-12 C57 K-1

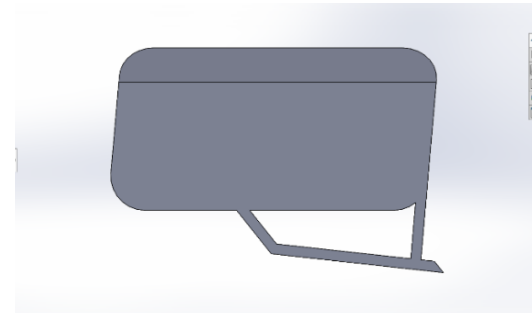


図 2-3-13 C55 K-2

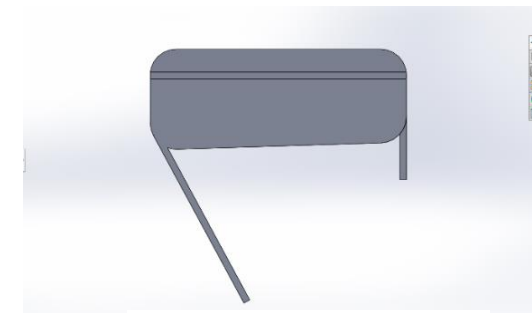


図 2-3-14 C57 K-3

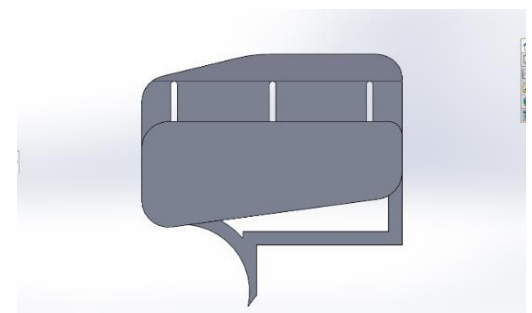


図 2-3-15 C55 K-4

のモデルである。他のデフレクターと比較して大きく見えるが、横幅は1930 mmでK-1、K-3タイプのデフレクターより20 mmほど短い。これは上部450 mmの部分が可動し、下部と重なることで厚みと高さに変化させることができる。それによりデフレクターの効果的な高さを調査することがこの意匠の目的であった。

また、デフレクターに縦方向に穴が開けられているが、これは胴体に固定するための支持材が干渉しないようにするためである。

図2-3-16はC57 65号機に取り付けられたK-5タイプのデフレクターモデルである。横の長さは1950 mmで、ランボードからの高さは990 mmである。高さは前端が750 mm、後端が700 mmで、長方形に近い形をしている。またK-4と同じくランボードからエプロンにかけて支柱を配し、湾曲させて前部を支持している。

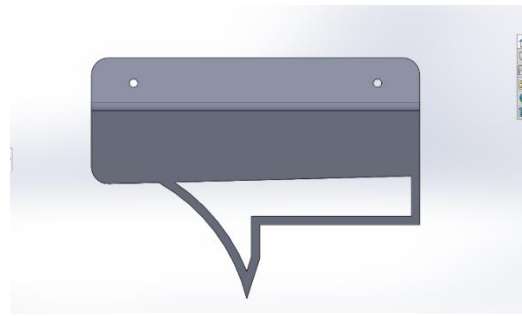


図 2-3-16 C57 K-5

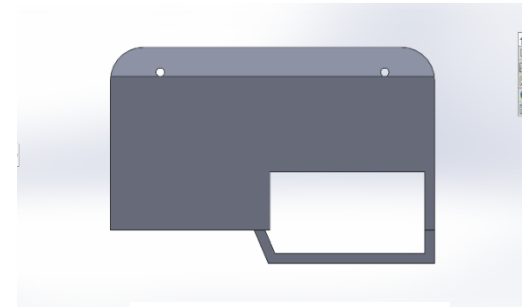


図 2-3-17 C55 K-6

図2-3-17はC55 52に取り付けられたK-6タイプのデフレクターモデルである。1953年に取り付けられた際はランボードから200 mm上方までデフレクターの側板で覆われており、側板下部350 mmは着脱可能であった。その着脱可能領域は1972年に本機が鹿児島県にある吉松機関区に転属した際に、バイパス弁の点検窓の作成と同じ目的で切り取られた。図2-3-17は切り取られた後のK-6デフレクターをモデル化したものである。なお、横の長さは1950 mmで、縦寸法は前端が1100 mm、後端が750 mmである。2022年現在、C55 52号機は切り取られた状態のデフレクターを装備して吉松駅に保存されている。

次に、これらを装着する機関車ボディの3Dモデルを図2-3-18と図2-1-19に示す。

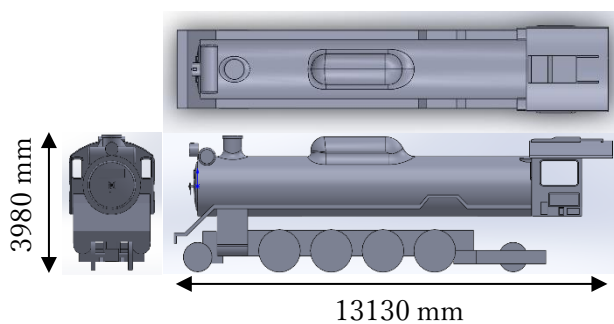


図 2-3-18 D51 3D モデル

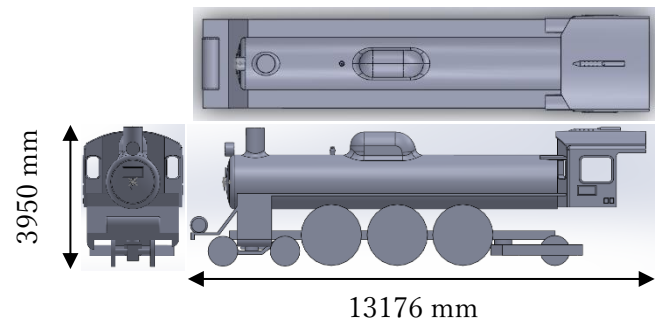


図 2-3-19 C57 3D モデル

図2-3-18はD51形の3Dモデルである。各部寸法は1次形の組み立て図に準拠したが、1次形の動態保存機がないことから、1次形からモデルを変更し、給水温め器を煙突前に配置、ドームが砂箱と蒸機溜めをケーシングしたのみで、「なめくじ」と呼ばれるカバーを外して標準形とした。

図2-3-19はC57形の3Dモデルである。モデルは1号機の組み立て図を基に作ったため、モデルはC57の1次型となっている。なお、D51とC57共にランボード下や弁装置は複雑な構造であることから簡略化してモデル化を行った。

本プロジェクトで作成したモデルは以上である。なお、D51とC57のボディは小熊が組立図を基におおまかに作成し、鈴木が運転室と煙室扉部を細部まで仕上げ、切り取りデフレクターを含む各デフレ

クターの 3D モデルはすべて神谷が製作した。

図 2-1-2 に示した Witte による最も効果的な風導板の形状と比較すると、支持方法とデフレクターの形状に差異があることがわかる。日本ではデフレクターの支持はランボードまたはエプロン部に設置した支柱で行い、機関車胴体と繋ぐのは補助であり、支柱は全て地面に垂直に立っているが、ウィッテ式風導板では機関車胴体と支柱を直接支持しており、その支柱は地面と水平である。また日本におけるデフレクター側板の形状は平板であるが、ウィッテ式風導板は罐胴に沿うように湾曲している。

2. 3. 3 シミュレーション方法

本プロジェクトではシミュレーションソフトとして ANSYS Discovery Live を使用した。これはナビエストークス方程式を境界条件下で解き、結果を着色したうえで図示することで視覚的に流れの様子を把握できるようにするソフトである。

シミュレーション時の風速は時速 50 km/h 程度で走行していることを想定した 13.8 m/s とし、分解能は計算処理速度の低下を防ぐために、シミュレーションソフトで設定できる中間値の Explore=0.08 m で行った。

この条件でシミュレーションを行ったところ、Explore=0.08 m では 0.08 m 以上の大きさの物体を認識することから、デフレクターの厚みを実際よりも厚くしないと風が貫通する結果となった。そこでデフレクターの厚みは 0.1 m としてシミュレーションすると風の貫通がなくなったことから、デフレクターの厚みは実際よりも厚い 0.1 m とした。そしてデフレクターと煙室胴との間隔が実際の距離と同じ 400 mm になるよう煙室胴とデフレクター間の距離を変更して小熊と鈴木がシミュレーションを行った。シミュレーションを行っている様子を図 2-3-3-1 に示す。

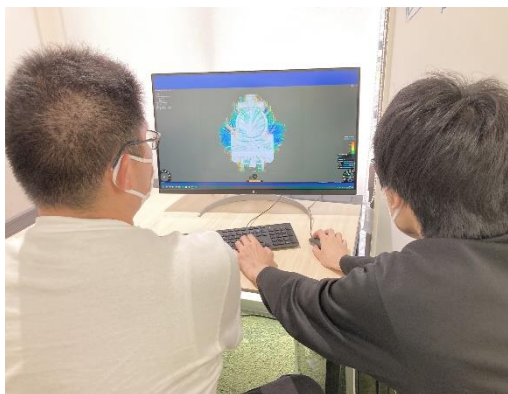


図 2-3-3-1 シミュレーションの様子

図 2-3-3-1 のように、パソコンで流線を見て流れの様子を確認しながらシミュレーションを行った。

2. 4 シミュレーション結果

上記のモデルについて、流速のシミュレーション結果をカラーコンター図として以下に示す。各図において、色の違いは流速の違いを示し、黒い筋は流線を表す。コンター図の各色におけるおおよその値[m/s]を図 2-4-1 に示す。

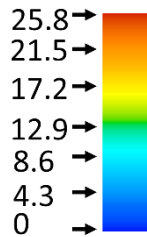


図 2-4-1 コンター図におけるおおよその値

2. 4. 1 D51 のシミュレーション結果

図 2-4-1-1 に D51 ボディの解析結果を示す。機関車前面に当たった空気が減速し、左右に拡大していくように分布している。側面では流れの遅い空気が反時計回りに渦を巻き、この渦を避けるように水平に流れているのがわかる。

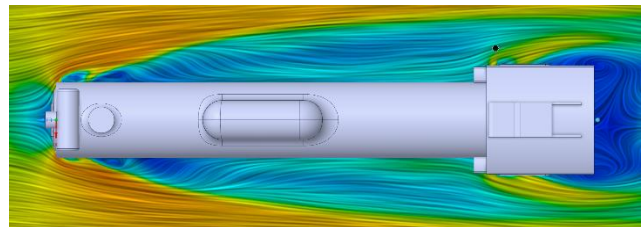


図 2-4-1-1 D51 ボディの解析結果

図 2-4-1-2 に D51 に標準デフレクターを装着した際のシミュレーション結果を示す。機関車前面に当たった空気はデフレクター外側で減速するが、内側では加速している。減速した空気は左右に拡大することなく機関車胴体に沿って流れている。また、一度ドーム付近で流速の遅い空気の領域は小さくなるが、再び運転室に向かって拡大していることがわかる。

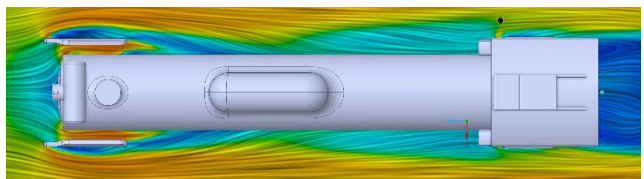


図 2-4-1-2 D51 標準の解析結果

図 2-4-1-3 に標準窓付デフレクターを装着した際の解析結果を示す。図 2-4-1-2 同様に、機関車前面に当たった空気はデフレクターの内側と外側で流れが別れている。側面では S 字形の流れがある上部でデフレクターから上昇する流れが存在することがわかる。この流れは窓付でのみ確認できる。

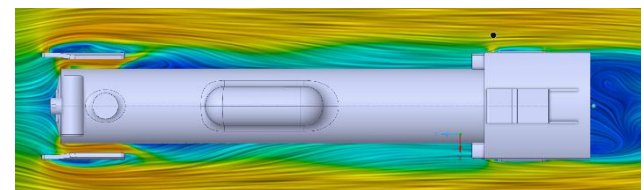


図 2-4-1-3 D51 標準窓付の解析結果

図 2-4-1-4 に K-1 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。標準、標準窓付に比べて高速のまま流れていることがわかる。また、標準デフレクターと比べて低速部分が少ないことが特徴として挙げられる。

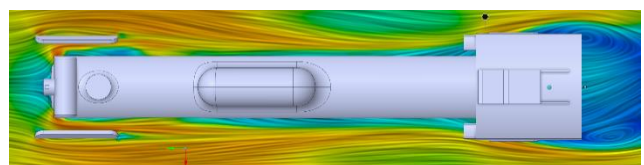


図 2-4-1-4 D51 K-1 の解析結果

図 2-4-1-5 に K-7 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。図 2-4-1-1 に示したデフレクターを装着していない D51 ボディ単体と似た分布をしている。また、デフレクター部分に斜め方向の流

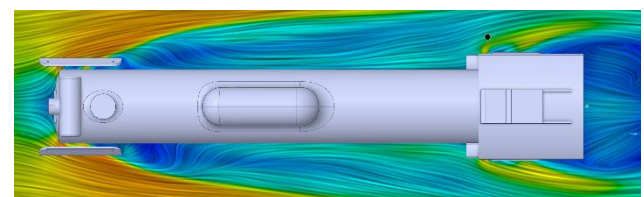


図 2-4-1-5 D51 K-7 の解析結果

線が貫通しているように見えるため、図 2-3-4 に示した K-7 デフレクターが、解析を行った煙室扉ハンドル中央を通る水平面上が支柱であることで、デフレクター側板に風が当たっていないことが考えられる。このため、解析を行う面を引き上げることで、デフレクター側板による効果を検証できる可能性がある。

図 2-4-1-6 に N-1 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。図 2-4-1-6 において、デフレクターの外側の速度低下が図 2-4-1-4 に示した K-1 での速度低下より程度が低いことがわかる。また、デフレクターを過ぎた流れはボイラー胴に沿って黄色で示された領域で速く流れている。このときの流速は図 2-4-1 より、およそ 17.2 m/s 近傍と推測できる。さらに、黄色で示された領域の外側に流速の遅い領域が存在し、その流れが運転室両側まで存在することがわかる。

図 2-4-1-7 に N-2 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。デフレクター後端で低速の流れが機関車両側に拡大している様子が明瞭にわかる。また N-1 と比較して、ボイラー胴に沿う流れに赤色の領域が見えることが、より速く流れていることがわかる。ただし、左右に拡大した低速の流れが運転室まで続いていることは共通している。図 2-4-1-8 に G-3 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。G-3 ではデフレクター後端からボイラー側に湾曲する流れが顕著である。後端部では N-1 と同等の流れの遅い空気が位置しているが、その領域はデフレクター外側にもせり出している。また、ボイラーに沿って流れる空気の速度は K-1 と同じように見て取れる。

図 2-4-1-9 に G-5 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。G-3 と比較して、G-3 ではデフレクター後端で低速の流れと連続していたが、G-5 では低速の流れの中に高速の流れが存在することがわかる。ただし、機関車両側面に広がる低速域の範囲に大きな違いはない。

図 2-4-1-10 に KG-1 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。これは図 2-4-1-5 に示した K-7 とよく似た流れ場となっており、デフレクターと煙室胴の間に流速の遅い渦が発生することや、機関車の左右に広がる低速の流れの広がり方も似ており、その範囲に大きな差異は認められない。

図 2-4-1-11 に KG-2 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。この解析結果は、運転室側面まで

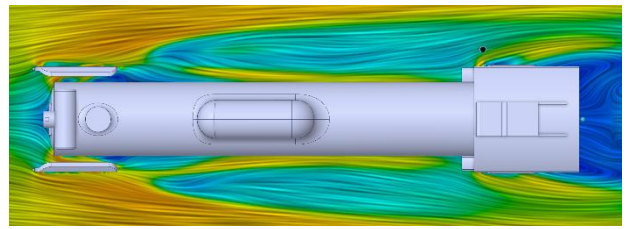


図 2-4-1-6 D51 N-1 の解析結果

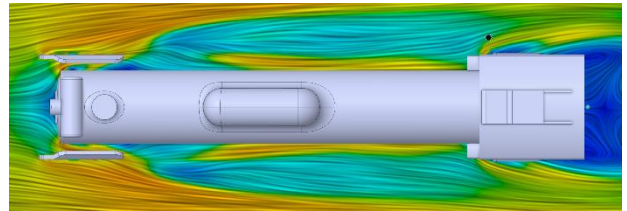


図 2-4-1-7 D51 N-2 の解析結果

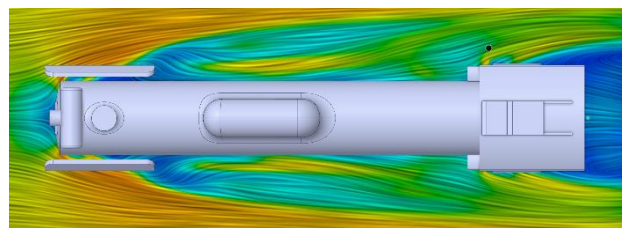


図 2-4-1-8 D51 G-3 の解析結果

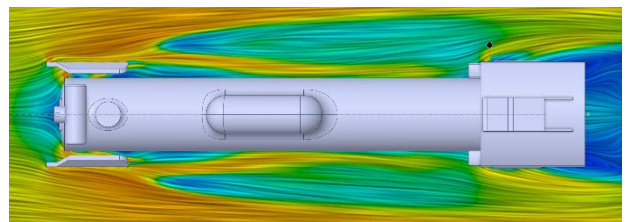


図 2-4-1-9 D51 G-5 の解析結果

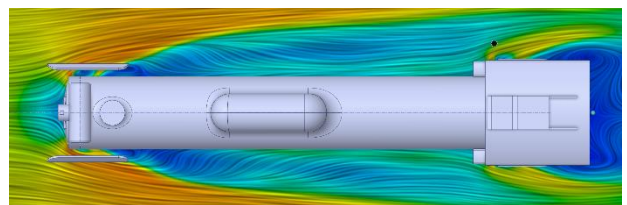


図 2-4-1-10 D51 KG-1 の解析結果

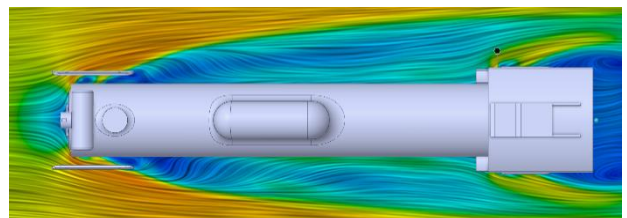


図 2-4-1-11 D51 KG-2 の解析結果

図 2-4-10 に示した KG-1 タイプの解析結果と同じであった。異なる点は、運転室後ろの低速部分の範囲であるが、今回テンダーを解析対象にしていないことから、両者の流れ場はおおむね一致していると評価できる。

2. 4. 2 C57 のシミュレーション結果

図 2-4-2-1 に C57 ボディの解析結果を示す。機関車前面に当たった空気は D51 のときと同様に左右に流れの遅い空気が側面に発生している。その流速は図 2-4-1-1 に示した D51 ボディと比べて遅くなっていることがわかる。煙突後方から遅い流れが新たに生じている点は D51 ボディとは異なる。

図 2-4-2-2 に標準デフレクターを装着した際の解析結果を示す。機関車前面に当たった空気は、D51 標準の解析結果同様にデフレクターの外側で遅くなり、内側で速くなっていることがわかる。ただし、速度の遅い空気は煙突とドームの間付近に多く分布するが、その後胴体に沿って流れる際に流速の遅い空気の領域が D51 標準より小さくなっており、収束するように流れている。

図 2-4-2-3 に標準窓付デフレクターを装着した際の解析結果を示す。大まかな流れは図 2-4-2-2 に示した標準デフレクターと同等と言えるが、速度の遅い空気の収束は窓のないデフレクターほど顕著ではない。

図 2-4-2-4 に K-1 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。ボディのみとほとんど変化がないように見えるが、デフレクターを突き抜ける流れがあることから、支柱にのみ風があたっている状態のシミュレーション結果と考えられるため、シミュレーションを行う部分を垂直方向に高くする必要がある。

図 2-4-2-5 に K-2 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。遅い空気は概ね機関車胴体側面に沿って流れているが、運転室手前側面に緑で示された流れが生成されていることがわかる。なお、図 2-4-2-4 に示した K-1 の結果と比較すると、遅い空気の左右への拡大が少々抑えられていることがわかる。

図 2-4-2-6 に K-3 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。煙室胴とボイラーの間あたりの位置から流速の遅い空気が生じ、それが拡大、広く分布

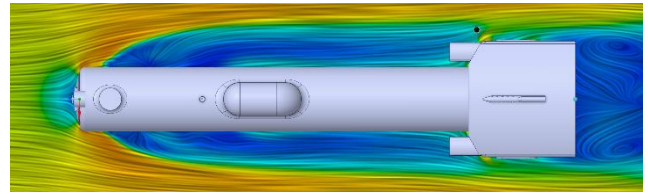


図 2-4-2-1 C57 ボディの解析結果

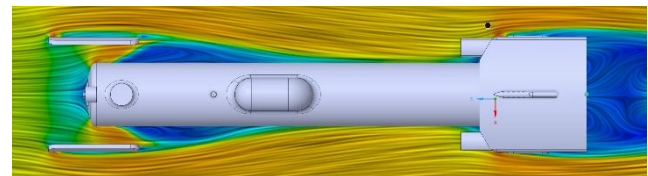


図 2-4-2-2 C57 標準の解析結果

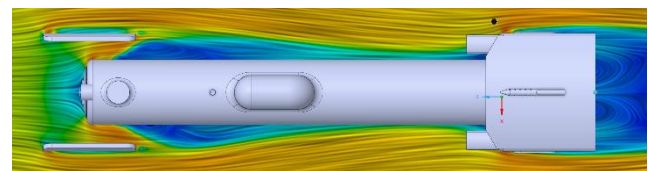


図 2-4-2-3 C57 標準窓付の解析結果

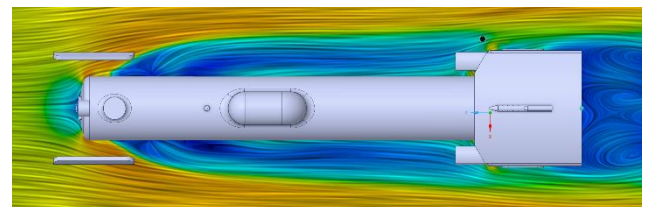


図 2-4-2-4 C57 K-1 の解析結果

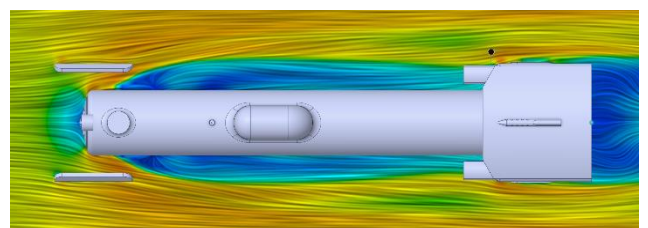


図 2-4-2-5 C57 K-2 の解析結果

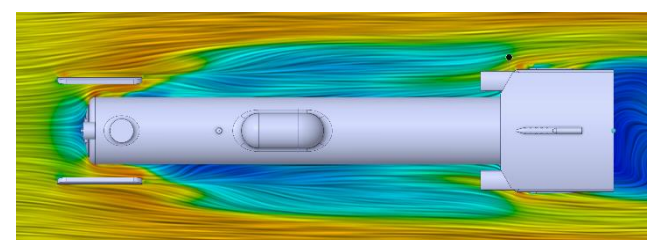


図 2-4-2-6 C57 K-3 の解析結果

している。しかし、側面を流れる空気の流速は K-1 や K-2 と比べると速い。

図 2-4-2-7 に K-4 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。流れの様子は K-3 と類似しており、前面に当たって減速した空気はデフレクターと煙室胴の間で一度加速し、デフレクター後方で再度減速、その流れが運転室に向けて広範囲に分布している。しかし、ドームが位置するあたりから後方に向けて、流速の速い空気がボイラー側面に沿って流れている。この速度分布は他のデフレクターでは見られない。

図 2-4-2-8 に K-5 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。流れの様子は概ね K-2 デフレクター装着時と似ているように見えるが、運転室手前に K-2 装着時よりも遅い空気が流れていることが分かる。C57 ボディのみの場合と比べて運転室周りの流速が速い点異なる。

図 2-4-2-9 に K-6 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。ボディのみの場合と比べてドームの位置より後ろで流速が速くなっている。また、ドームが位置するあたりの前方から濃い青で示された、より流速の遅い流れが生じていることが確認された。この流れは C57 ボディでも見られたが、そのときよりも後方で生じていることから、デフレクターの存在が影響していると考えられる。

図 2-4-2-10 に KG-2 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。これもボディのみの場合と大きな変化が見られないが、デフレクター後方で流れが乱れており、渦のような流れも確認できる。

図 2-4-2-11 に N-2 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。比較的遅い空気は概ねボディに沿って流れ、それよりも少し流れの速い、緑で示された流速の空気は外側に広がっていることが分かる。しかし、渦のような流れが確認されず、ボディ周りが概ね直線的に流れている。

図 2-4-2-12 に N-3 デフレクターを装着した際の解析結果を示す。流れの分布が K-3 と似ており、他のデフレクターで確認されたような、特に濃い青で示された、流速 4.3 m/s 以下の遅い空気が見受けられない。一方、水色で示された流速 8.6 m/s ほどの少し速い流れの空気がボイラーに沿って流れている。

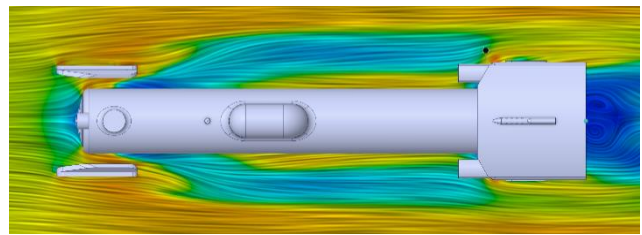


図 2-4-2-7 C57 K-4 の解析結果

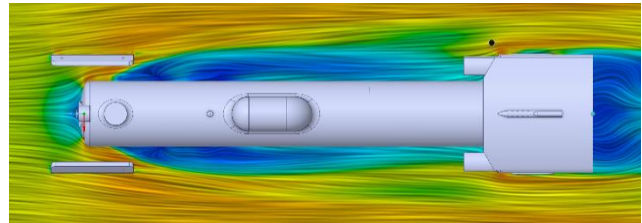


図 2-4-2-8 C57 K-5 の解析結果

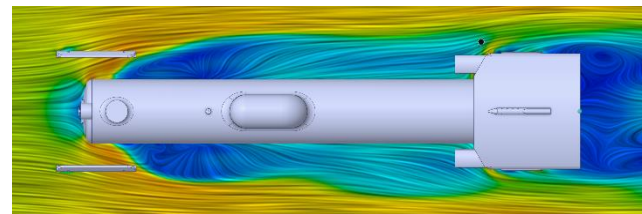


図 2-4-2-9 C57 K-6 の解析結果

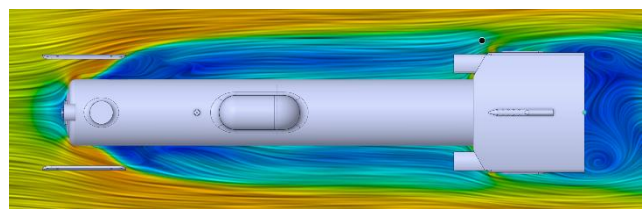


図 2-4-2-10 C57 KG-2 の解析結果

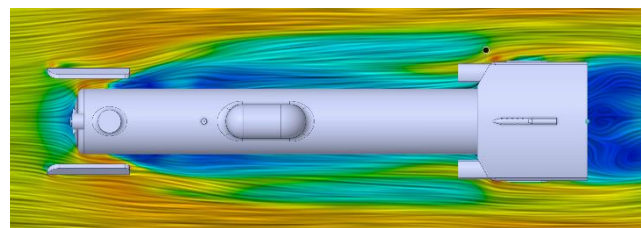


図 2-4-2-11 C57 N-2 の解析結果

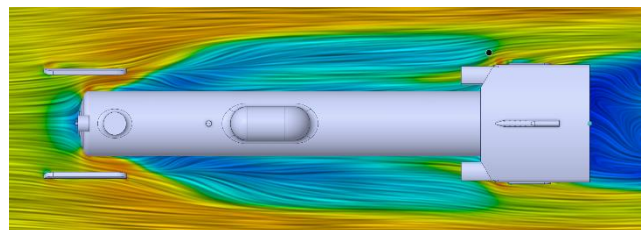


図 2-4-2-12 C57 N-3 の解析結果

2. 5 考察

空気が流れているある場所で速度が異なると、ベルヌーイの定理より、高速で流れる空気の圧力が低くなる。このため排煙は高速で流れる空気に引き込まれて流れると考えられる。また、シミュレーション環境においては、流体は空気であるので動粘度は $15.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とし、デフレクターの代表長さを 1.95 m と仮定、流速 13.8 m/s の条件下でレイノルズ数は 17.8×10^5 となり、 3.0×10^5 を超えることから、実際の流れ場では乱流域となる。

さて、排煙が機関車周辺に留まると視界不良を招くので、この点においてデフレクターに求められる効果は“機関車が走行する速度を維持したまま空気を流すことで、排煙を円滑に車体から遠ざけること”と言える。したがって、効果的なデフレクターとは機関車周辺の空気の流速を走行速度から落とすにいくデフレクターと考えられる。

ここで D51 形に装着したデフレクターを考えると、最も効果的な流れ場を形成したのは K-1 タイプのデフレクターとなる。図 2-3-2 に示した標準窓付デフレクターの解析結果（図 2-4-1-3）と K-1 の結果（図 2-4-1-4）を比較する。両者の流れの様子が異なっていたが、両者の形状の差は、側面の面積や形状、支持部分の違いである。標準デフレクターではエプロン部に並行な斜めの側板部があるが、K-1 は長方形に似た形状をしており、前端は支柱のみである。標準窓付デフレクターはデフレクター側面全体が機関車に接地しているが、K-1 デフレクターは前端から伸びる柱で支持され、後部はランボードと支柱で支持したうえで支えとなる部品がある。

流れの様子を比較すると、標準窓付デフレクターでは速度の遅い流れが機関車側面に全体的に分布し、その流速も濃い青で示され、4.3 m/s 以下の流れであることが推測できる。またデフレクター外側の面では特に流速が遅くなっていることがわかる。一方 K-1 デフレクターを付けた場合、デフレクター側面の流れは橙で着色され、向かい来る流れより加速している。また、標準デフレクター装着時に煙突と蒸気ドームの中間地点あたりで見られた特に速度の遅い流れはなく、機関車側面に分布していた低速の空気の領域も小さい。

標準窓付デフレクターと K-1 タイプの差は、先述のように側面面積や形状の差である。K-1 の形状と支持方法では N-1 や N-2 が似ているが、K-1 のような機関車側面に速い流れを生む効果はなかった。ここから、デフレクターの中でもエプロン部に接している領域を切り取り、かつ後方に向かって狭くなる形状が必ずしも機関車周りに速度の速い流れを形成するとは言えない。

ここで、圧力分布のコンター図のカラーバーを図 2-5-1 に示し、標準窓付デフレクターと K-1 デフレクター装着時の機関車周りの圧力分布を図 2-5-2 と図 2-5-3 に示す。

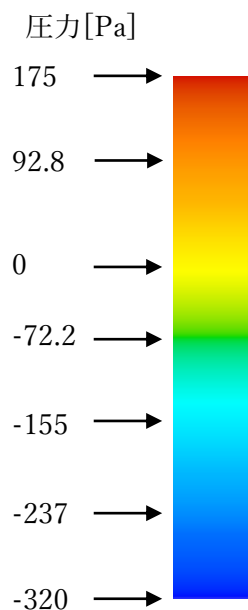


図 2-5-1 各色が示すおおよその値（圧力）

図 2-5-2 と図 2-5-3 において、どちらも煙室扉前に高い圧力がかかり、デフレクターと煙室胴との間で圧力が低くなっている。ただし、流速と圧力是对応関係にはなく、流速が遅いとシミュレーションされた箇所であっても圧力が低いとは限らないことがわかる。

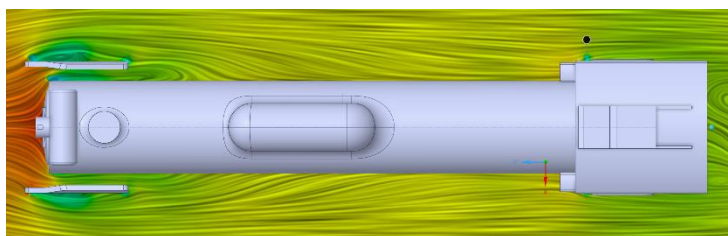


図 2-5-2 標準窓付デフレクターの圧力分布

このことから、排煙は流速が早い空気に引き込まれて流れるのか、圧力の低い空気に吸い込まれるように誘導されるのかを検証する必要がある。

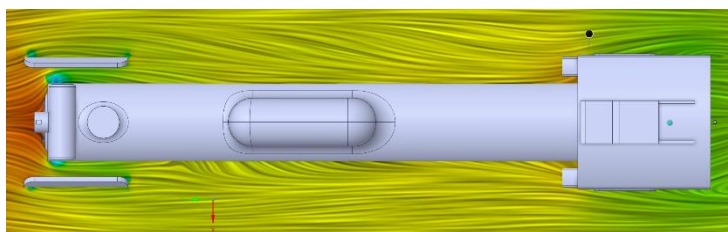


図 2-5-3 D51 K-1 デフレクターの圧力分布

ところで、デフレクターの役割について記述したものとして、『図解機関車名称事典』があり、その中でデフレクターの役割は次のように説明される。

“機関車が高速度で走行するときは煙突の前面に圧力を生じ気流は之れがため左右に別れて煙突の左右に部分真空を生じ、煙突より吐出す煤煙の一部は之れを補ふため煙室後方に於て側面に降下し來り、機関手の前途見透しを遮り運轉を困難ならしめるのであって、此の傾向は速度が大きくなる程又カットオフの小さくなる程大となるのである。煙除装置は前頭氣流が左右に擴大することを阻止し、煙室の左右に部分真空の發生することを防止する作用をするもので、之れによって煤煙の運轉室前面附近に低迷することを防止し、機関車乗務員の前途の注視を容易ならしめるものである。”（原文ママ）

ここでは、氣流が機関車の左右に分かれることによって部分真空が生じ、煙室後方に煙が流れるとし、それをデフレクターによって抑制すると説明している。

図 2-5-2 と図 2-5-3 において、デフレクターと煙室胴の間や、デフレクターの周辺に負圧部が生じることは確認できたが、部分的に真空が生じることは確認できなかった。ただ、「煙除装置は前頭氣流が左右に擴大することを阻止」という記述に関しては、2.4.1 節及び 2.4.2 節で示した各デフレクターの流線から、機関車ボディのみの解析では左右に拡大していた流れがデフレクターによって抑制されているこ

とが確認でき、記述通りの効果があることが確かめられた。この「左右に拡大」を防止する効果は、機関車胴に沿って流す効果であるので、整流効果と呼べるはずである。したがって、デフレクターには整流効果のある形状が存在すると言える。この効果が高いのは、D51・C57 両方の標準デフレクターと D51 の K-1 タイプであった。

2. 6 結論

本プロジェクトは機関車周りの流れの様子を可視化し、デフレクターの有無による流れの変化及び最も排煙を後方に流すデフレクターの形状を明らかにすることを目的として流体シミュレーションを行った。その結果として以下の事項が明らかになった。

1. デフレクターがない状態では、機関車前面に当たった空気は減速して左右に広がる。
2. デフレクターを装着することで機関車周りの空気の流れが変化し、その変化の仕方はデフレクターの形状によって異なる。
3. デフレクターには整流効果のある形状が存在し、効果が高かったのは D51・C57 両方の標準デフレクターと D51 の K-1 タイプだった。
4. デフレクターの中でも、エプロン部に接している領域を切り取り、かつ後方に向かって狭くなる形状が必ずしも機関車周りに速度の速い流れを形成するとは限らない。

2. 7 今後の展望

今後の研究課題として、以下の事項が挙げられる。

- ・ C57 形が装着していた K-1 タイプは D51 のものと形状、寸法ともに大きな差はないが、図 2-4-1-4 で確認できるほどの、空気を高速で流す作用は確認できなかった。ただし、C57 の場合は解析を実施した煙室ハンドルを通り地面に垂直な平面上にデフレクター側板が位置していなかった可能性があるため、風を受けていることを確認したうえで解析を行い、D51 K-1 のみに上述のような流れ場が形成される理由を考察する。
- ・ 各デフレクターの流れ場の違いと形状の違いを紐づけて考察し、どのような形状のとき、どのような流れが形成されるのかを考察する。
- ・ 整流効果が認められるデフレクターの特徴をまとめ、整流効果の高いデフレクターに求められる形状を明らかにする。
- ・ デフレクターモデルの厚みを再検討し、より本物（16 mm）に近い厚みで解析を行う。
- ・ 層流域での解析も行い、流れの変化を観察・考察する。
- ・ 各解析結果を数値化し、デフレクター周囲の流速と圧力を定量的に比較できるようにする。
- ・ 速度の違いによる流れ場の変化を調べ、デフレクターが効果を最も発揮する流速を明らかにする。
- ・ 排煙は流速が早い空気に引き込まれて流れるのか、圧力の低い空気に吸い込まれるように誘導されるのかを圧力のシミュレーションを行って検証し、デフレクター評価の基準を決定する。

謝辞

本研究は京都鉄道博物館に協力いただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

2. 8 参考資料

参考文献

鉄道ファン 1970 年 9 月号, 交友社

鉄道ファン 1970 年 10 月号, 交友社

門鉄デフ物語一切取式除煙板調査報告一, 関崇博, ネコ・パブリッシング, 2009

日本国有鉄道 蒸気機関車設計図面集, 原書房, 1976

引用文献

鉄道ファン 1970 年 9 月号, 交友社, p.36

鉄道ファン 1970 年 10 月号, 交友社, p.86

鉄道ファン 1970 年 5 月号, 交友社, P121

門鉄デフ物語一切取式除煙板調査報告一, 関崇博, ネコ・パブリッシング, 2009, p.29

図解機関車名称事典, 武井明通, 図書刊行会, 1979, p.61

(「最新機関車名称図解」(昭和 11 年)の複製)

図 2-1-2: 鉄道ファン 1970 年 10 月号, 交友社, p.86

写真

図 2-1-1 小熊 龍

図 2-2-1 小熊 龍

図 2-2-2 小熊 龍

図 2-3 鈴木 翔太

図 2-3-3-1 神谷 悠

協力

京都鉄道博物館