

パンタグラフまわりの 空気流動シミュレーション

光用 剛
鉄道力学研究部
(集電力学 研究員)

池田 充
同
(同 研究室長)



みつもち たけし



いけだ みつる

はじめに

新幹線のパンタグラフは、時速300km/hもの高速気流にさらされるため、大きな空気力が作用するうえ、主要な空力音（風切り音）源となっています。このうち、空気力については揚力（鉛直方向に押し上げる力）が重要な要素であり、揚力が大きすぎると架線を傷める原因となり、小さすぎると安定した集電性能が得られなくなるため、風速や風向によらず常に適正な揚力が作用していることが求められます。また、空力音については沿線環境への配慮から、できるだけ低騒音であることが求められます。そのため、パンタグラフの開発においては、安定な揚力特性と低騒音性を両立させることが非常に重要となるのですが、パンタグラフまわりの流れ場についてはいまだ未知の部分も多く、パンタグラフの形状決定は容易ではないのが現状です。ただし、近年の計算機とシミュレーション技術の発達により、物体まわりの流れをシミュレーションにより解析できるようになってきました。流れの数値シミュレーションは、定量的な評価に用いるにはまだ課題がありますが、パンタグラフまわりの流れの様子を理解するうえで有用なツールと

なりつつあります。

そこで、本稿では、最も広く使われている二つの代表的な数値シミュレーション手法を取り上げ、パンタグラフまわりの流れ場を解析した事例を紹介します。

流れのシミュレーションの難しさ

鉄道車両まわりの流れなど、流れの速度が音速（およそ340m/s）に比べて十分に遅い場合、空気は非圧縮粘性流体（縮まない、摩擦力の働く流体）として扱われます。その流れのシミュレーションは、図1に示すように物体まわりの空間を微小な要素（計算格子と呼びます）に分割し、流れの支配方程式に従って計算格子間の質量や運動量のやり取りを計算することで行われます。このとき、流れのもつ重要な性質のために、流れのシミュレーションには大きな困難さを伴います。それは以下に示す渦の性質です。

パンタグラフまわりの流れなど、工学的に問題となる流れの大部分は、乱流と呼ばれる不規則な渦の運動を伴う流れとなっています。この乱流と呼ばれる流れは次の二つの重要な性質をもっています。

- ①乱流中で渦はどんどん細かい渦へと変化していく
- ②細かい渦によって流れのエネルギーが散逸される

例えば、パンタグラフまわりの流れを考えた場合、渦の理論によるとエネルギー散逸にかかわる一番小さな渦の大きさは数マイクロメートル程度（1マイクロメートル＝1/1000mm）の大きさであることがわかっています。そのため、流れのシミュレーションを行う場合、マイクロメートル単位の細かい渦によってエネルギーが散逸される過程をきちんと再現しなければならず、計算格子もマイクロメートル単位で設定しなければなりません。この理屈ののちとると、例えば小さなコップ一杯分（100ml）の体積の空気の流れを計算するのでさえ 10^{14} 個もの計算格子が必要になります。現在、汎用の並列計算機で解析可能な計算格子数は数百万（ 10^6 ）～数千万（ 10^7 ）程度ですので、

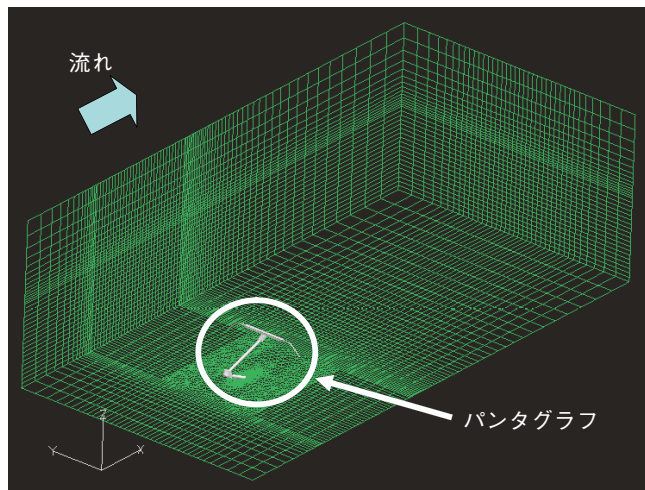


図1 流れのシミュレーションに用いる計算格子の例

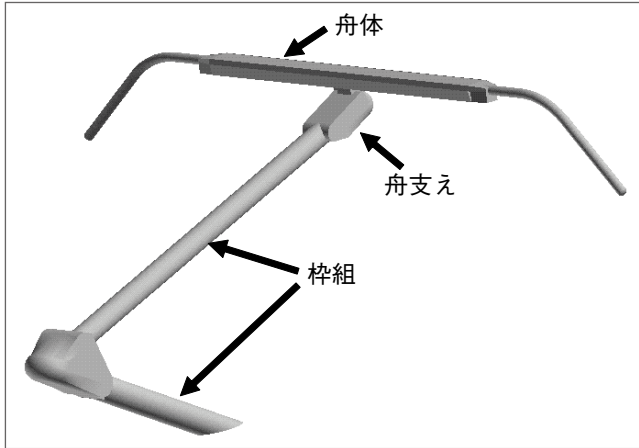


図2 パンタグラフ各部の名称

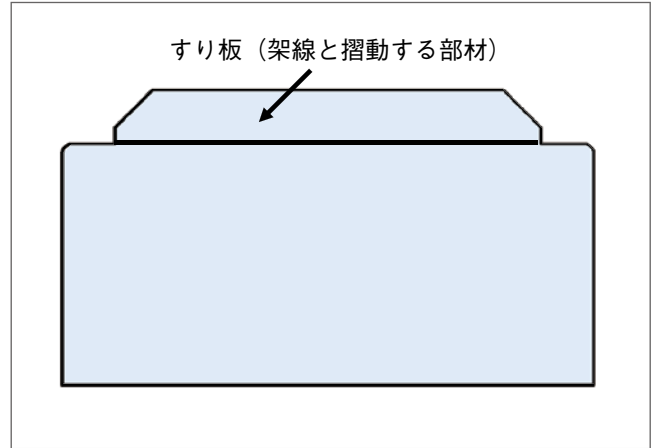


図3 新幹線用パンタグラフ舟体の断面形状例

現状ではコップ一杯分の空気の流れですら厳密には解析できないことがわかります。

そのため、流れのシミュレーションについては主として少ない(粗い)計算格子で十分な精度の結果が得られる計算方法の研究がなされてきました。その結果、微小な渦の振る舞いについての適切な近似やモデル化に関する種々の方法が開発され、広く用いられています。以下ではその代表的な方法とパンタグラフについての解析事例を紹介します。

流れのシミュレーションの方法と解析事例

RANS

物体まわりの流れ場を解析する際に、時々刻々変化する渦の振る舞いについての情報は必要とせず、時間平均的な流れ場の情報のみを得るだけで十分な場合があります。例えば、流れの中にある物体に作用する平均空気力を評価するような場合です。このとき、次のような方法で小さな渦の運動を計算することを回避します。

いま、時間平均的な流れを求めるため、流れの支配方程式そのものを時間平均し、時間平均した方程式を解くことを考えます。このとき、先ほど述べた微小な渦一つ一つの運動は時間平均する過程でならされ、流れの統計量として表すことができるようになります。したがって、細かい渦一つ一つの運動を計算する必要がなくなり、粗い計算格子でもシミュレーションを実施することができます。この方法は、流れの支配方程式(ナビエ・ストークス方程式)を時間平均(厳密にはレイノルズ平均と呼びます)した方程

式を解くことから、その方程式の名前(レイノルズ平均ナビエ・ストークス(Reynolds Averaged Navier-Stokes)方程式)の頭文字をとってRANS(ランズ)と呼ばれています。

解析事例 —RANS—

パンタグラフに作用する揚力は、主として舟体と呼ばれる架線と摺動する部材(図2)により生じることが分かっています。新幹線用舟体は風速や風向に対する揚力変化が小さくなるよう、図3に示すような矩形を基本とした断面形状をしています。しかし、例えばすり板(架線と摺動する部材、図3)がすり減ってくると揚力が大きく変化する場合がありますなど、舟体の特定の部位については形状の微妙な違いで揚力が大きく影響を受けることが知られています。

一般に、物体に作用する空気力は物体まわりの圧力分布から決まり、物体表面の圧力の低いところでは面が吸われ、圧力の高いところでは面が押され、その力のバランスにより空気力の大きさが決まります。したがって、物体表面の圧力分布が分かれば、舟体のどの部位にどれくらいの空気力が作用しているかを調べることができます。さらに、物体表面の圧力分布に加え、物体まわりの流れの様子や流れのなかの圧力分布がどのようになっているかを知ることができれば、物体に作用する空気力と流れの関係を理解することができます。しかし、風洞試験に代表される実験計測は点や面での測定が基本であるため、物体まわりの流速や圧力の空間的な分布を得ることは容易ではありません。そこで、数値シミュレーションによる舟体まわりの流れ場の解析を行いました。この場合、舟体まわりの渦の時系列な運動よりも、時間平均的な流れ場に興味があるため、先述

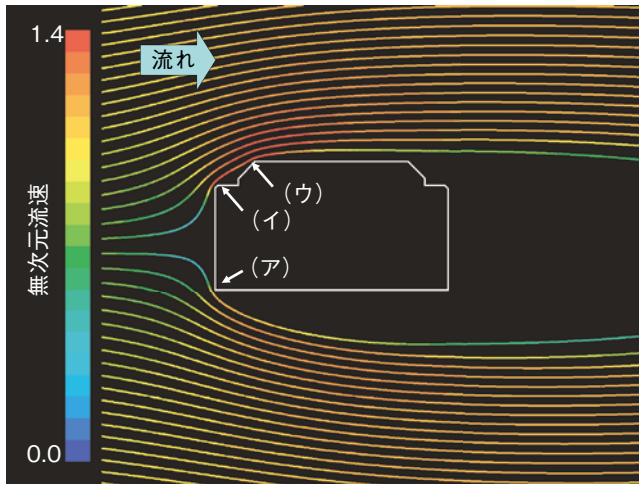


図4 舟体まわりの流線図

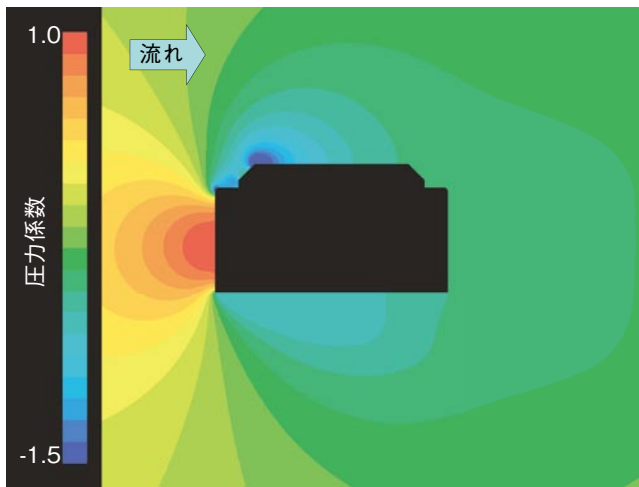


図5 舟体まわりの圧力分布

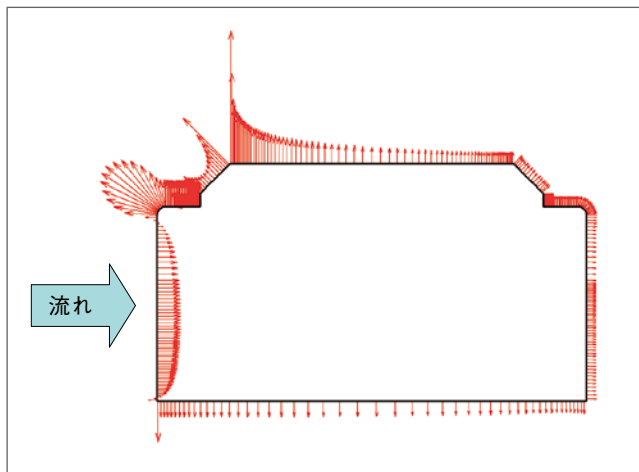


図6 舟体に作用する力の分布

したRANSにより解析を行います。

シミュレーションによる解析結果を図4～図6に示します。図4は舟体まわりの流線図であり、色は流速の絶対値を示しています。図4を見ると、舟体下面側では上流側角部(図4(ア))で流れが剥離し、舟体に再付着することなく流下している様子がわかります。それに対し、舟体上面側では上流側角部(図4(イ))で流れが剥離した後、すり板面取り部(図4(ウ))に再付着し、舟体近傍を滑らかに流下しています。このとき、図4(イ)(ウ)近傍で流速が増加しています。図5は舟体まわりの圧力分布を示したものであり、図4の流速が速い箇所(図4(イ)、(ウ))で圧力が顕著に低くなっている様子がわかります。図6は図5の圧力分布をもとに、舟体表面に作用している力を描画したものです。図6を見ると、舟体上面側角部やすり板面取り部分など、流れが舟体近傍を沿って増速し、圧力が顕著に低下している部分で大きな力が働いている様子がわかります。したがって、こういった箇所の形状の微妙な差が、舟体の揚力特性に大きく影響を与えていることがわかりました。

LES

作用力の時系列変化や空力音など、物体まわりの非定常な流れが重要となる問題を数値シミュレーションで解析する場合には、時々刻々変化する渦の運動をきちんと再現する必要があります。この場合、次のような方法で小さな渦の運動を計算することを回避します。まず、流れのなかの渦をその大きさにより区別し、計算格子で解像できる程度の大きさの渦の運動については直接計算を行います。一方、計算格子より小さい渦の運動については、その運動そのものではなく渦運動によるエネルギーの散逸量のみを大きな渦の振る舞いから物理モデルにより近似計算します。これにより、エネルギーの消費に関わるほど細かい渦の運動を厳密に計算する必要がなくなり、比較的粗い計算格子で流れのシミュレーションが実施できるようになります。この方法は、大きな渦の振る舞いを計算するという意味の英語(Large Eddy Simulation)の頭文字をとってLES(エル・イー・エス)と呼ばれています。

なお、RANSとLESの計算コストを比較すると、一つ一つの渦の振る舞いを時々刻々解いていく必要のあるLESの方が、RANSよりも細かい計算格子と多くの計算時間を必要とします。

解析事例 —LES—

パンタグラフの主要な騒音源は舟体であることがわかっています。鉄道総研では、これまで舟体の形状平滑化によ

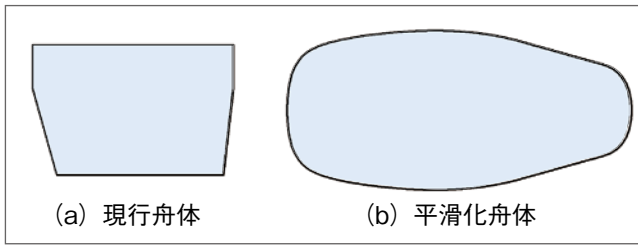


図7 比較を行った舟体断面形状

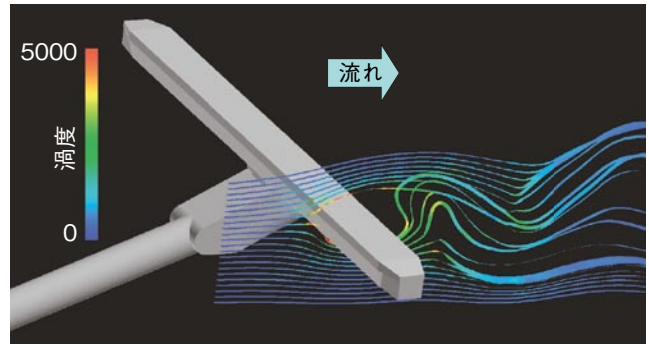
る空力音低減に取り組んできました。図7はその一例であり、舟体断面形状を図7 (a) から図7 (b) へ変更することにより、舟体単体の風洞試験では大幅な騒音低減効果が得られることがわかりました。しかし、平滑化舟体を実機パンタグラフに搭載した風洞試験では、舟体単体の試験ほど騒音低減効果が得られないこともわかりました。これは、舟体と舟支え(図2)との接合部による影響であると考えられましたが、そのメカニズムについてはよくわかっていませんでした。そこで、実機パンタグラフまわりの流れのシミュレーションを行い、舟体や舟支え近傍における流れ、特に空力音の発生原因となる渦や乱れの様子について調べました。

図8、図9はシミュレーションにより得られた流線図であり、色は渦の強さ(渦度の絶対値)を示しています。舟体近傍の流線図(図8)を見ると、平滑化舟体は現行舟体に比べ舟体後流の渦が低減されている様子がわかります。一方、舟支え近傍の流線図(図9、ただし舟支え下流側からの流線も描画している)を見ると、現行舟体に比べ平滑化舟体の方が、舟支え近傍から生じた乱れが広い領域に広がっている様子がわかります。これは、舟体形状の平滑化により、舟体後流に生じる渦が低減されたことで、舟支えから生じる乱れが成長しやすくなったものと考えられます。

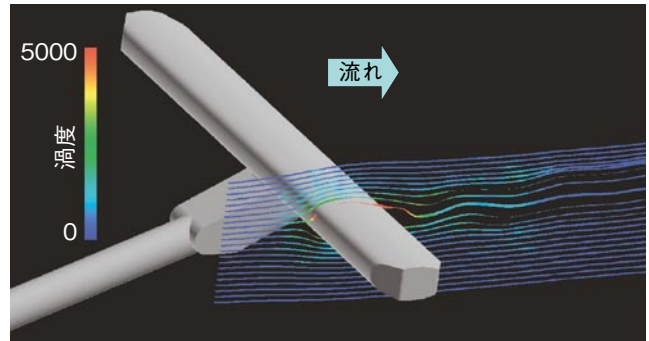
以上のことから、舟体の平滑化により舟体から発生する空力音は低減されたものの、舟支えから発生する空力音が増加したと推察されます。したがって、実機パンタグラフの空力音低減には、舟体形状の平滑化だけでなく、舟支えも含めた形状改良が重要であることがわかりました。

おわりに

本稿では、流れのシミュレーションの方法と解析事例を紹介しました。流れのシミュレーションは、流れ場の空間的な様子がわかる反面、定量的な評価に用いるには、計算精度や計算時間の面でまだ課題があります。現状では、定量的な評価を行う場合には風洞試験を行い、流れの定性的な傾向から現象解明を行う場合にはシミュレーションを用いるといったように、両者の特徴をうまく生かしながら研究を進めていくことが重要です。[RRR]

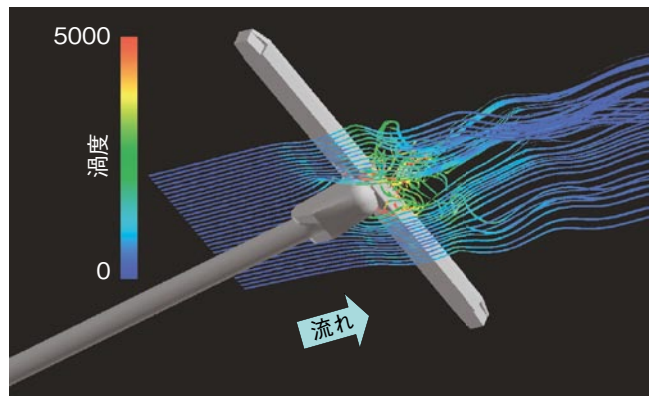


(a) 現行舟体搭載パンタグラフ

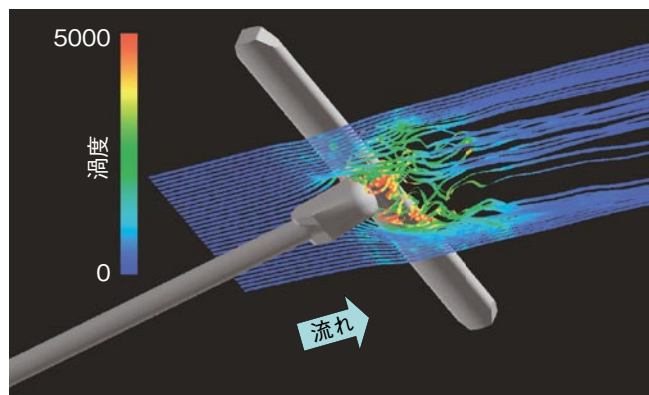


(b) 平滑化舟体搭載パンタグラフ

図8 舟体近傍の流線図(瞬時場)



(a) 現行舟体搭載パンタグラフ



(b) 平滑化舟体搭載パンタグラフ

図9 舟支え近傍の流線図(瞬時場)