

数値解析で空気の流れを探る

鈴木 昌弘

環境工学研究部
(空気力学 主任研究員)

中出 孝次

同
(同 副主任研究員)

光用 剛

鉄道力学研究部
(集電力学 研究員)



すずき まさひろ



なかで こうじ



みつもち たけし

はじめに

列車のまわりの空気の流れを探ることは、列車を安全に運行するためや列車走行に伴う騒音を低減するため、また乗り心地を良くするために、必要不可欠なものです。空気の流れは、19世紀前半にフランスの土木技術者ナヴィエとイギリスの物理学者ストークスにより独立に導出された方程式(ナヴィエ・ストークス方程式といいます。)により書き表せます。つまり、ナヴィエ・ストークス方程式を解けば、空気の流れがわかるわけです。ところが、この方程式は、やっかいなことに非線形偏微分方程式なのです。非線形とは文字通り線形に非ずということです。線形では、解が2つある場合にはそれらを足し合わせたものも解になります。適当な解をたくさん見つけて、それを組み合わせると一般のどんな問題も解けます。ところが、非線形ではそれができません。そのため、解析的な解を求めるのが非常に難しくなるのです。そこで、空気の流れを探るためには、風洞などを使って実験を行うか、計算機を使って調べること(数値解析)になります。

流れの数値解析

現在の計算機は四則演算と論理演算しかできないので、連続な偏微分方程式の解を直接求めることはできません。しかし、連続な空間を細かく分割することにより、偏微分方程式を近似的に連立一次方程式に置き換えると、計算機で解くことができるようになります。

計算機を使って空気の流れを調べようという初期の試みのひとつとして、イギリスの気象学者リチャードソンが第一次世界大戦中に手回し計算機により大気の流れを解こうとしたという記録が残っています。懸命に計算機を回し続けたにもかかわらず、数値解析手法が未成熟であったため、たった6時間後の天気予測に失敗したと言われていましたが、彼はその後の数値天気予報の先駆者となりました。また、日本では、東京大学の川口光年氏(その後、鉄道総研

の前進である鉄道技術研究所に在籍)が1953年に手回し計算機を毎週20時間、約1年半まわし続けて円柱まわりの流れを解いています。計算機による流体力学(空気や水の流れを研究する学問)、すなわち計算流体力学のさきがけとなるものでした。

このように先駆者たちは大変な苦勞をしながら研究を続けたわけですが、電子計算機の発明により状況は大きく変わりました。初期のコンピュータは、今の電卓程度の性能しかありませんでしたが、その後の歴史をみると、指数関数的に性能が伸びてきています。それに伴い、計算流体力学が発展してきました。

必要な計算機能力

それでは、空気の流れを解析するとき、どの程度の計算機の能力が必要なのでしょう?今の計算機の能力で、もう十分なのでしょう?先ほど述べたように、数値解析では、空間を細かく分割します。この最小の分割幅に応じて解像度が変わってきます。デジタルカメラの画素数と映像の滑らかさとの関係を思い浮かべていただければよいと思います。

どの程度の解像度が必要なかをお話する前に、流れという現象について考えてみましょう。私たちが日常接する流れは、きれいに物体に沿って流れている(層流)わけではなく、物体の背後に渦巻くような流れ(乱流)ができています。ここで、ひとつの例として、16両編成の列車が300km/hで走行する時の流れをみてみましょう。この時、列車の側面や後ろには、空気が渦まく領域ができます。一番大きな渦の大きさは数mぐらいのものです。その渦は、流れののって崩壊し、小さな渦に分裂していきます。さらにその渦はより小さな渦に分裂していき、最終的には渦はなくなり、熱エネルギーになります(この過程を「エネルギーのカスケード」といいます。)流れを正確に知るためには、熱エネルギーになる直前の小さな渦まで解像する必要

があります。この場合の最小の渦の直径は100分の数mm程度と想定されます。そこで、これを解像するために、列車のまわりの空間（ここでは、左右、上下方向に10m、前後方向に500mとします。）を0.01mmの立方体に分割することになると、その総数は 5×10^{19} 個（50億の100億倍）になります。流れを解く時には、上下、左右、前後の3方向の気流の速さと圧力の合計4成分を求めるので、 2×10^{20} 元の連立一次方程式（未知数が 2×10^{20} 個ある連立一次方程式）をある瞬間毎（1000万分の1秒程度毎）に解いていく必要があります。しかし、現在の最高レベルのスーパーコンピュータを用いた計算でも、数億元の連立一次方程式を解いている程度ですので、これを実行するにはその数兆倍程度以上の性能の計算機が必要となり、現状では不可能です。そこで、細かな渦をとらえることはあきらめ、おおまかな流れの様子だけを探ろうという考えがでてきます。実際、工学的にはこれで十分な場合が多いのです。しかし、小さな渦が大きな流れの様子を決定していることが珍しくありません。そこで、小さな渦の影響をモデル化（乱流モデル）して数値解析に取り入れることが必要になるわけです。ある特定の流れに対して有効な乱流モデルは提案されていますが、残念ながら、全ての流れに対して有効なモデルは未だに見つかっていません。したがって、このモデル化は、発展途上の分野で、現在でも盛んに研究されています。

以上のように、流れの数値解析は計算機能力からくる空間解像度の限界や乱流のモデル化の問題があり、その精度はまだ満足のものにはなっていません。しかし、風洞等の実験に比べ、いくつかが有利な点があります。まず、実験では数点から、かなりがんばっても数百点程度の測定点しかデータを得ることはできませんが、数値解析では、全ての空間の速度と圧力を得ることができます。これらの情報を用いて、流れの様子を見えるようにすること（可視化）により、理解が深まります。また、実験で再現することが難しい流れでも、数値解析では再現することができます。また、実験に必要な模型を製作する必要ももちろんありません。

このような利点から流れの数値解析は、実験とならぶ研究手段となってきています。鉄道総研でも、40年ほど前から流れの数値解析を始め、これまで鉄道に関わる様々な流れの数値解析を行ってきまし

た。ここでは、その中で、パンタグラフまわりの流れとトンネル内走行中の列車まわりの流れ、そして横風を受ける列車まわりの流れの解析を紹介したいと思います。

パンタグラフまわりの流れ

新幹線の主な騒音源のひとつにパンタグラフがあります。パンタグラフは、トロリ線と接する舟体と、舟体を支える枠組から構成されています（図1）。パンタグラフから発生する騒音を低減させる方法を考えるとき、流れの様子を探ることが重要です。そこで、パンタグラフまわりの流れを数値解析で調べてみました。解析に使用した空間の分割の様子を図2に示します。パンタグラフまわりの空間を約700万個に分割しています。この分割した空間で連立一

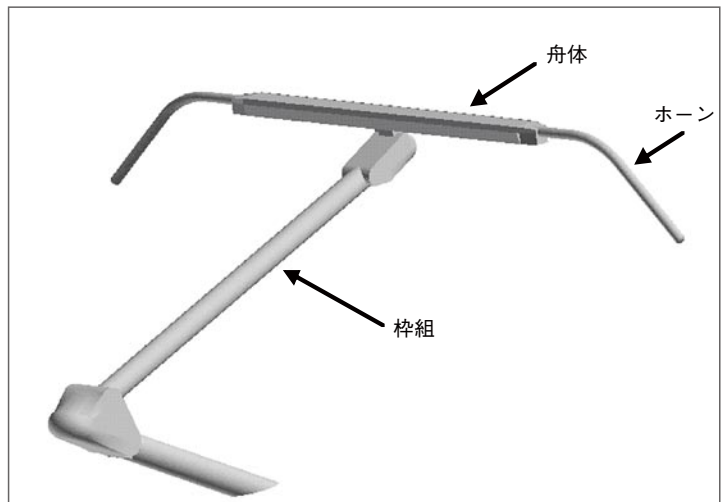


図1 パンタグラフ

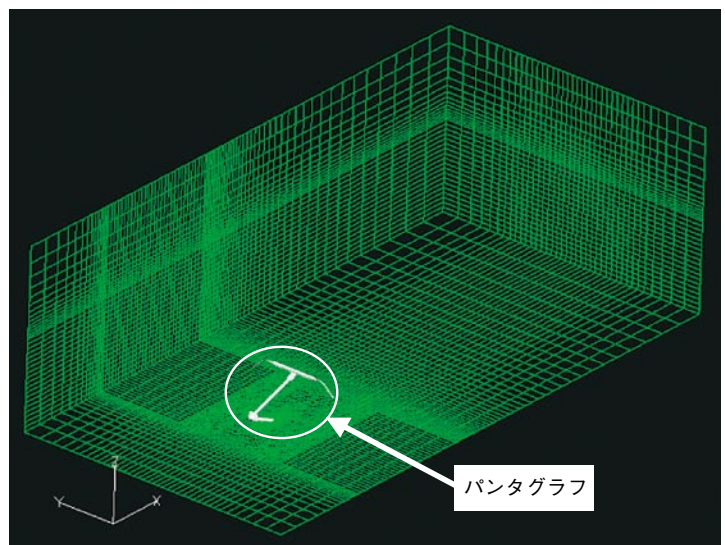


図2 計算用に分割したパンタグラフのまわりの空間

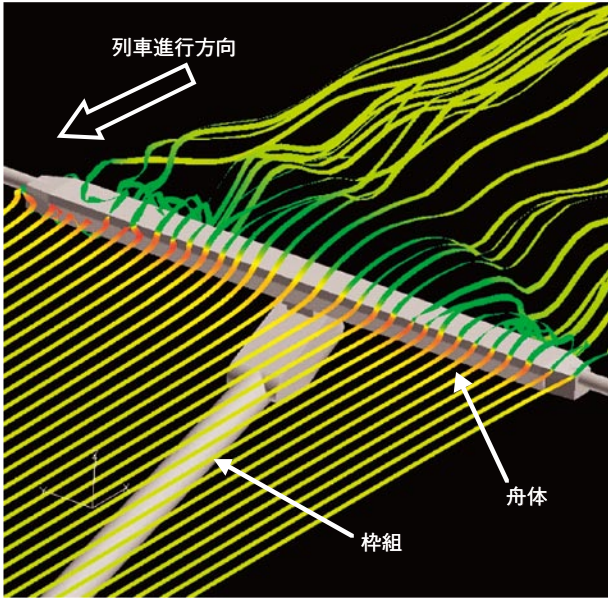


図3 パンタグラフ舟体まわりの流れの様子

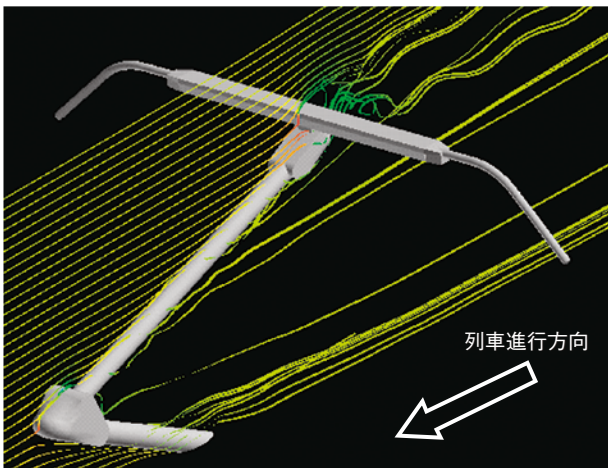


図4 パンタグラフの枠組に当たる流れの様子

次方程式を解くわけです。それでは計算結果を見ていきましょう。まず、図3では舟体に当たる気流の様子を線（流線）によって示しています。もし、流れが時間的に変動しないならば、空気は流線に沿って流れます。舟体の背後で流れが乱れ、騒音源になっていることが予想されます。次に、枠組にあたる流線を図4に示します。舟体に近い枠組の上部に当たった流れは、枠組の背後に回り込み、そのまま枠組に沿って上り、舟体背後で渦巻いています。この部分の流れを拡大して気流の動きを矢印で示したのが図5です。ここでは舟体を真横から見ています。赤い矢印が流れの速いところです。枠組の下面側に沿って上ってきた流れと舟

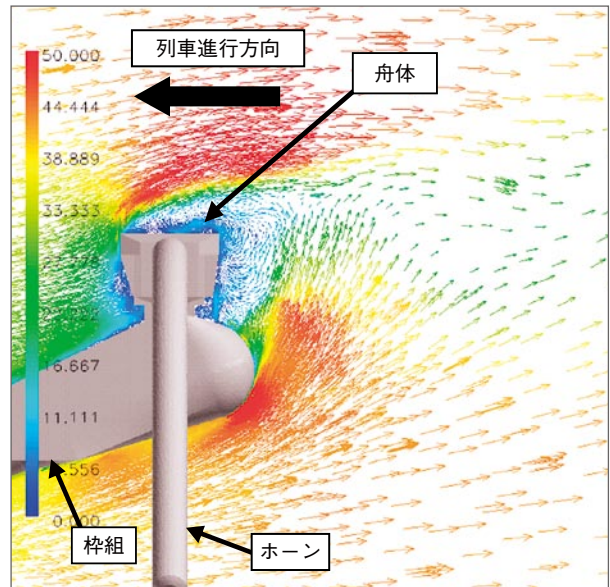


図5 舟体と枠組の接合部付近の流れの様子

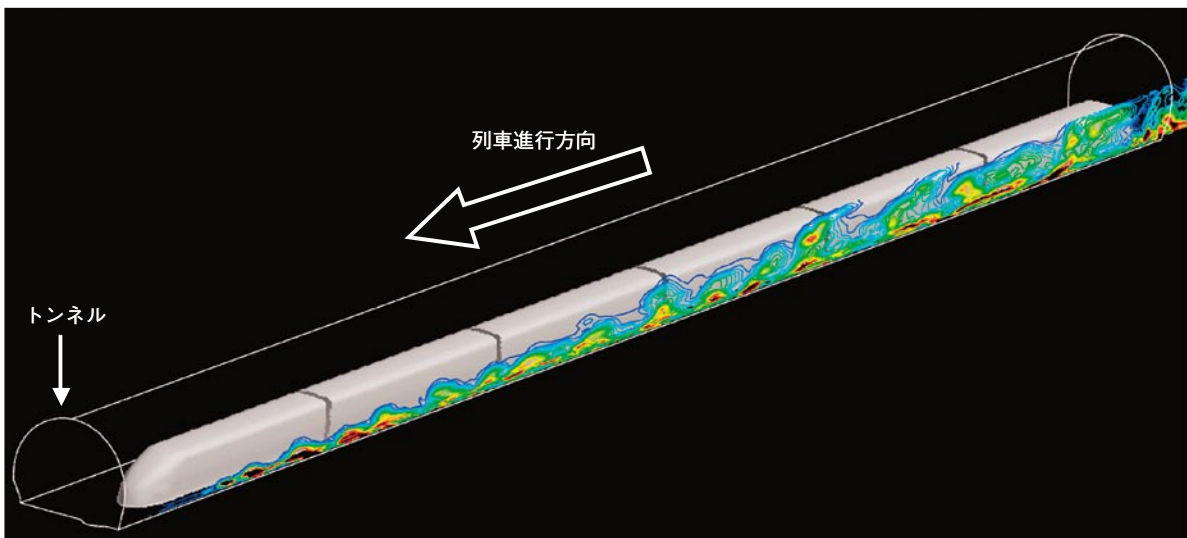


図6 トンネル内走行中の列車まわりに広がる渦

体の上面からの流れが会い、その間で舟体の周りに小さな渦ができています。

トンネル内走行中の列車まわりの流れ

新幹線などの高速列車では、トンネル内走行時に車両まわりに変動空気力が発生し、車両の左右動揺が持続する場合があります。実際に列車を走らせて試験を行うと、トンネル壁に面した列車側面の圧力が変動して、その力で列車が揺れていることがわかりました。また、圧力の変動は先頭車両から後尾車両に向かって徐々に大きくなることもわかりました。しかし、どうしてトンネル壁に面した側の列車側面に圧力の変動が生じるのか、どうしてその変動が後尾側ほど大きくなるのかは、なかなかわかりませんでした。そこで、流れの数値解析を行いました。トンネルの壁と列車との間の流れが渦巻いている様子を図6に示します。赤いところが、強く渦巻いています。床面付近で発生した渦が、トンネル壁と干渉し、列車側面側に回りこんできます。その渦が先頭から後尾に向かって側面に広がっていく様子がこの図からわかります。この渦により変動空気力が発生し、車両を揺らしていることがわかりました。

横風を受ける列車まわりの流れ

最後に基礎的な数値解析の例をご紹介します。いま、この原稿を書いているとき、東京には台風が近づいていて、強い風が吹いています。窓から見える樹木は時おり大きく揺らいでいます。自然風は、強くなったり、弱くなったり、時に渦巻いたりしています。このような自然風の特徴を取り入れた数値解析が最近できるようになってきました。図7は、自然風の中におかれた列車まわりの空間の圧力分

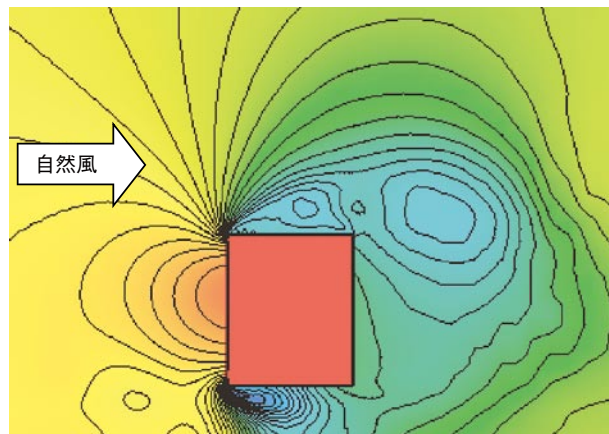


図7 自然風を受ける列車まわりの圧力分布

布を示したものです。列車とはいっても、車輪やパンタグラフはなく、単純な四角いブロック（赤い部分）で表しています。橙色が圧力の高い領域、青色が圧力の低い領域を示しています。屋根上と床下に圧力の低い領域があります。実験でこのような空間上の圧力の分布データを得ることは非常に難しく、数値解析を行って初めてわかるものです。図8は、列車まわりの流れの様子を流線によって示しています。列車の屋根上や側面に接した渦のほかに、列車の風上側や風下側にも渦があることがわかります。自然風の中の物体まわりの流れについては、まだよくわかっていないことが多く、数値解析により理解が進むことが期待されます。

おわりに

計算機の性能は指数関数的に向上しているので、今後とも流れの数値解析はますます盛んになり、より実用的な分野へとその守備範囲を広げていくものと考えられます。我々も鉄道分野における幅広い利用をすすめていきたいと思っています。[RRR]

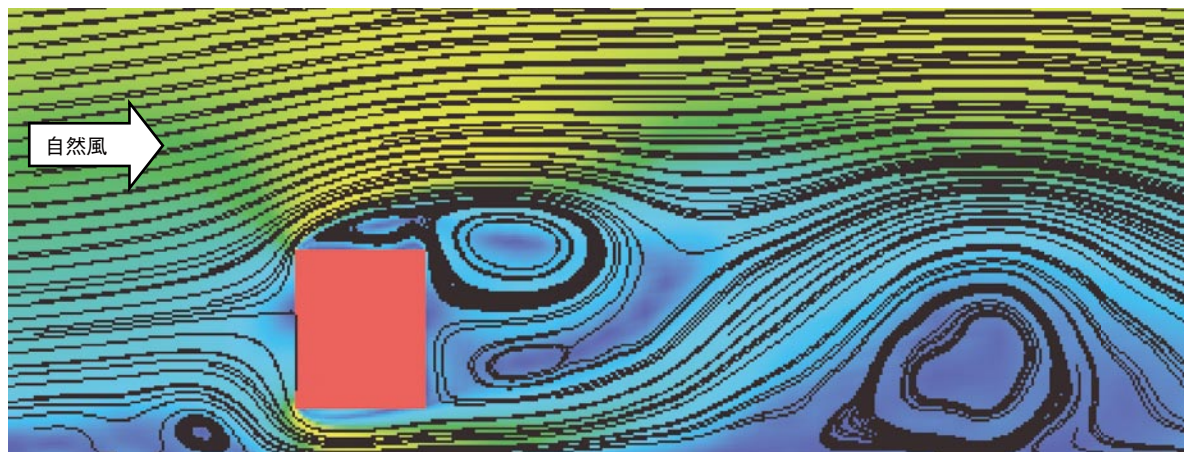


図8 自然風を受ける列車まわりの流れの様子