技術研究 · 流体力学の最前線

ナビエ–ストークス方程式の爆発：ファンCFDはまだ信頼できるか

2026年のナビエ–ストークス研究の転換はCFDの崩壊ではない。方程式を信頼できる範囲と、ファン設計者が実測データに頼るべき領域を、より鮮明にしたものだ。

技術レポート · SUNXFAN 技術編集部 · 2026-11

Web: https://en.sunxfan.com/ja/blog/navier-stokes-blowup-cfd-fan-engineering/

ファンの世界では、私たちは毎日、空気と折衝している。羽根車の一枚一枚の弧も、ボリュートの一本の曲線も、同じ方程式の上に成り立っている。ナビエ–ストークス方程式だ。粘性流体の運動を記述するこの式は、天気予報、航空機の設計、そして私たちが手がける遠心ファンや軸流ファンすべての空気力学を支える数学的な基盤になっている。

その基盤の上には、20年以上にわたって一つの問いがぶら下がってきた。三次元で滑らかな初期データを与えたとき、解は永遠に滑らかなままでいられるのか。それとも有限時間のうちに「爆発」し、速度や渦度が無限大へ発散しうるのか。

2026年、この問いは本当に転換点を迎えた。解かれたからではない。長らく抵抗してきた可能性を、数学のコミュニティが本気で受け止めはじめたからだ。爆発こそ極限状況における流体の本質的な振る舞いであり、滑らかさのほうがむしろ説明を要する例外的なケースなのではないか、という可能性である。

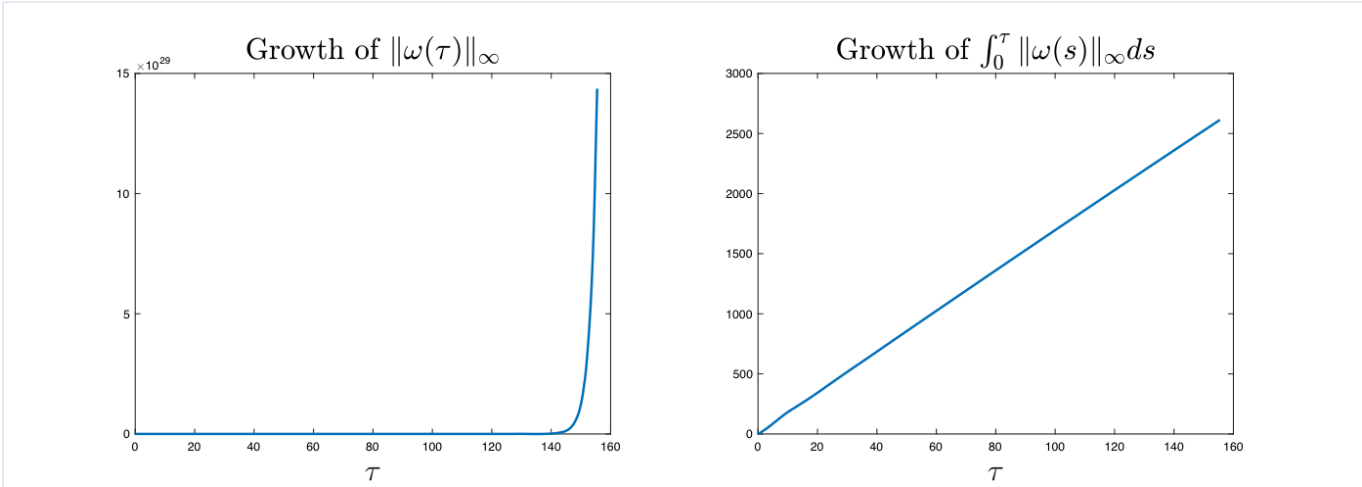


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

図1 — 一般化軸対称の設定における三次元ナビエ–ストークス方程式の渦度発展。ピーク渦度は有限時間で急峻に増大し、積分渦度はBeale–Kato–Majda基準に違反する。これは有限時間特異点が残すはずの、まさに数値的な痕跡である。原図：文献1（Hou, J. FoCM 2026, Fig. 15/16）。

1. 2026年の転換：三つの証拠が同じ方向を指す

1.1 OpenAIの外力付き爆発：分野への衝撃であって決着ではない

2026年9月8日、OpenAIは、マルチエージェントシステムが約88時間で、滑らかでコンパクトな台を持つ外力項に駆動された三次元非圧縮ナビエ–ストークス方程式の有限時間爆発を構成し、Lean 4で検証したと発表した。見出しだけを読むと、ミレニアム懸賞問題への直接の答えのように見える。

精査はすぐに始まった。独立したLean監査により、コンパイル済みの形式化が自然言語の原稿を忠実に写していないことが分かっている。補題8.6は逆作用素をm+4階微分で制御できると主張するが、Leanのコードはm+5階を要求する。さらに根底的な異論は問題設定そのものに向かう。ミレニアム版は外力なし・有限エネルギーであり、OpenAIの構成は高波数域へエンストロフィーを送り込み続けるよう設計された滑らかな外力に依存している。外力付きの爆発が外力なしの問いに答えるかどうかは、まったく決着していない。クレイ数学研究所は何も認定しておらず、OpenAI自身も賞を主張しないと明言している。

1.2 CaltechのPINN：外力のない世界における自己相似プロファイル

外力というOpenAIの道筋と対をなすのが、Caltechの研究チームが物理情報ニューラルネットワーク（PINN）を用いて構成した、三次元オイラー方程式の自己相似爆発プロファイルである。外力なし、非有界、自由空間。Terence TaoはOpenAIの発表前夜にこのアプローチを公に支持した。意義は方法論にある。外部から何も注入せず、方程式自身に特異性を育てさせるという点で、内在的な流体力学的不安定性という描像に近い。

1.3 合意の移動：「滑らかさの証明」から「爆発の理解」へ

個々の証明よりも重要なのは、合意そのものが動いていることだ。2026年、Taoはこの分野の考え方が転換し、正則性予想がいまや広く偽とみなされている——特定の初期データは有限時間で爆発する——と明言した。2025年から2026年にかけて、独立した複数のグループが、渦管伸張の連鎖、位相的ロック、カスケード機構から構成や強い証拠を報告している。研究の重心は、解が滑らかであり続けることの証明から、いつ、どのように破れるのかの記述へと移りつつある。

2. 爆発の背後にある幾何：渦伸張の正帰還ループ

ナビエ–ストークス方程式が暴走しうるのは、三次元流れが避けて通れない幾何学的な機構、渦伸張のためである。渦管を軸方向に引き伸ばすと、角運動量の保存によって管はより速く、より細く回転する。速い回転は伸張をさらに強める。これが正の帰還ループだ。数学的な問いは、粘性散逸が常にこれを抑え込めるだけの強さを持つかどうかにある。

Caltechの数値計算はその帰結をあからさまに示す。一般化軸対称方程式において、ピーク渦度は有限時間で $O(1/(T-t))$ のオーダーで増大し、積分渦度はBeale–Kato–Majda基準に違反する。有限時間特異点が形成されつつあることを示す証拠である。ここで粘性は直感に反する役割を演じる。粘性による正則化は解を滑らかにし安定させるため、渦伸張を駆動する非線形の配向を弱めるどころか、むしろ強めうるのである。

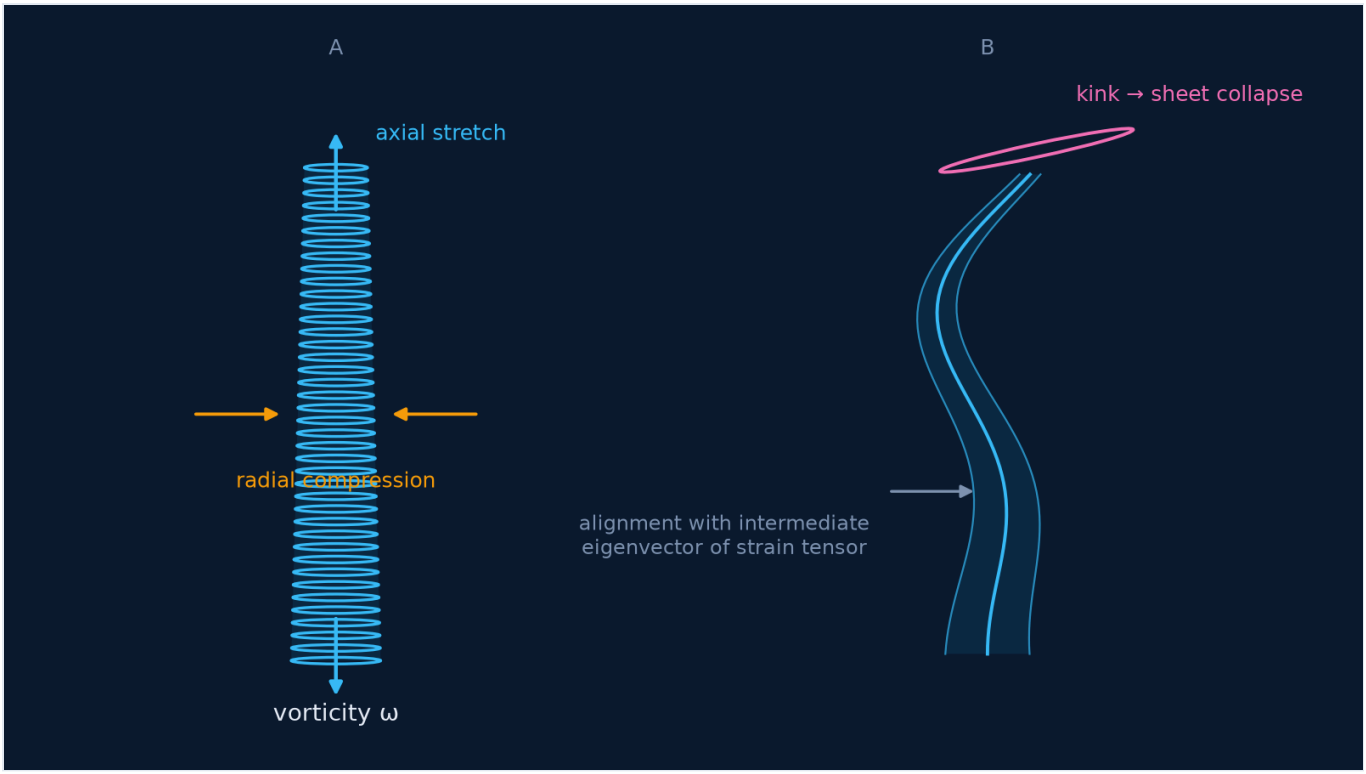


図2 — 渦管伸張の模式図。管が軸方向に伸び、半径方向に圧縮されるにつれて、渦度はひずみ速度テンソルの中間固有ベクトルへと配向し、やがて管は折れ曲がってシート状に崩壊する。伸張項そのものの幾何である。原図：文献2（Ruhr-Universität Bochum, Fig. 2.3）。本稿では理解を助けるため描き直した。

3. ファン設計者にとっての意味：広く誤読されている結論

よくある誤読はこうだ。ナビエ–ストークス方程式が爆発しうるなら、それに依拠するCFDとファン設計は無効になる、と。

実際は逆である。爆発は、極限状況下で無限の解像度を持つ連続体モデルについての言明だ。工学的なCFDはその問題を解いたことがない。解くのは飼いならされた版である。有界な形状、離散化されたメッシュ、RANSまたはLESの乱流クロージャ、そして平均流で定義される目標。エンジニアが日々戦っているのは、無限大へ走る渦度ではなく、急峻な勾配、解像度の足りない乱流渦、はく離、そして特定の運転領域で静かに機能を止めるクロージャである。

電子機器冷却用軸流ファンを対象とした2025年のLESは、この「工学的な非滑らかさ」を目に見える形にしている。通常の背圧（0および6 mmH_2O）では吸込み側の流れは付着したままで、対をなす入口渦管が良好なコヒーレンスで現れ、翼端漏れ渦も明確に識別できる。12 mmH_2Oでは前縁に剥離域が生じ、はく離した渦は翼端に向かって螺旋状に伸びていく。18 mmH_2Oの失速条件では、入口渦管は完全に消失し、混沌として拡散した大規模乱流に置き換わる。一方、吸込み側のはく離域は翼高さの約80%、弦長の20%にまで広がる。この光景のどこにも特異点は現れない。だが一つの事実は現れる。乱流クロージャは付着流れでは持ちこたえ、広範なはく離と失速では信頼を失う、という事実である。

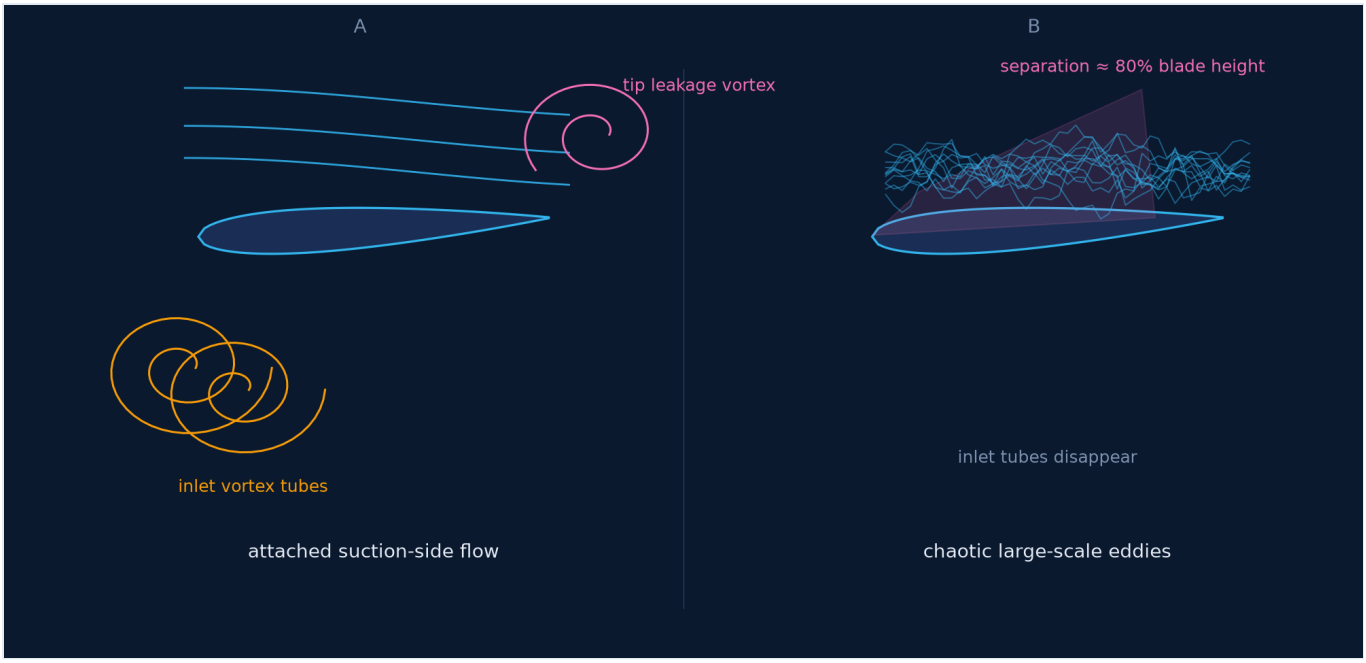


図3 — 軸流ファンの流れ構造、通常時と失速時の比較。左は吸込み側の付着流れ、コヒーレントな入口渦管、明確な翼端漏れ渦。右では入口渦管が消え、大規模乱流が支配し、はく離域が翼面全体へ広がっている。これが工学的なCFDが日々扱う非滑らかな現実であり、同時にクロージャの妥当性の境界を示す。原図：文献3（Applied Acoustics 2025, Fig. 15–18）。模式図は本稿で描き直した。

4. SUNXFANの見解：正確なモデルは効率と騒音の変数である

ファン業界で過小評価されがちな事実が一つある。空力効率の1ポイントも、騒音低減の1デシベルも、突き詰めれば流れ構造をより正確に記述することから生まれる。

EC遠心ファンが部分負荷でも高効率域を保てるかどうかは、羽根車内部の二次流れとはく離渦が、想定した範囲の内側にとどまるかで決まる。前向き羽根の多翼遠心ファンを対象としたCFD研究では、羽根車入口の曲がり部に大きな再循環域、羽根前縁で誘発される顕著なはく離、そしてボリュート舌部と羽根車後流の間の噴流–後流干渉が確認された。これは流れの非定常性と離散的な騒音の主要な発生源である。多翼遠心ファンの内部流れに関する別の研究でも、最高効率点においてさえ羽根間流路に再循環と大きな渦が観察されている。いずれも数学的な特異点ではないが、すべては同じナビエ–ストークス方程式が工学的スケールで表れているものだ。

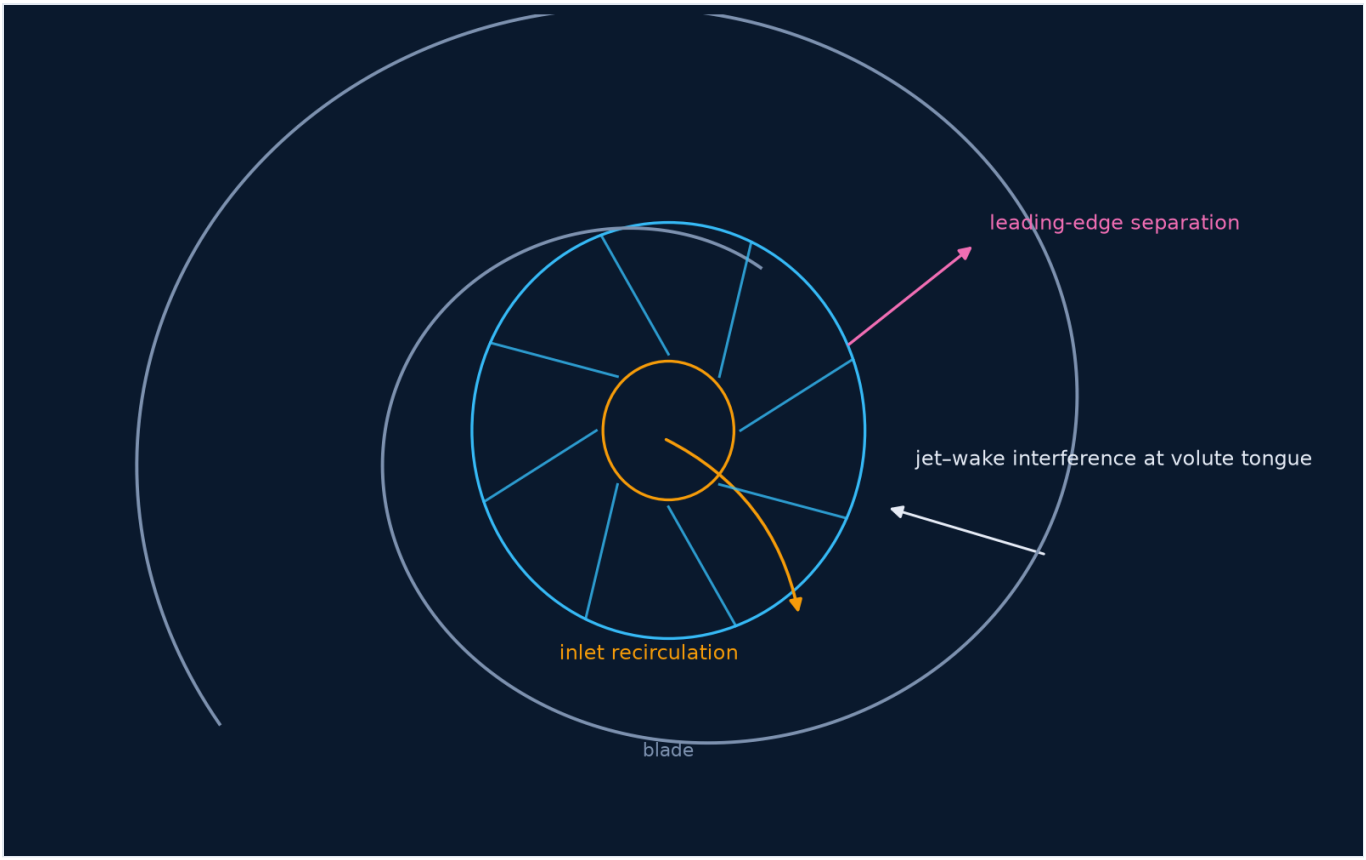


図4 — 遠心羽根車内部の流線と速度場。入口再循環、前縁はく離、ボリュート舌部付近の噴流–後流干渉が、効率損失と離散騒音の主要な源である。特異点はどこにもない。それでもこれは工学的スケールにおけるナビエ–ストークス方程式である。原図：文献4（TU Darmstadt, Fig. 9/12）。模式図は本稿で描き直した。

2026年の数学的最前線の実用的な価値は、爆発の証明そのものではない。それが促すシミュレーションの文化にある。妥当性を意識したCFD、つまりどの運転点ならモデルが背負えるのか、どこに局所的な細分化、別のクロージャ、あるいは実機試験への回帰が必要なのかを、あらかじめ把握しておく姿勢だ。SUNXFANが担うHVAC、データセンターと蓄電冷却、クリーンエア、そして800V HVDC向けの用途では、どの空力判断をCFDに任せられ、どれを実測データで固定すべきかを、より明確に見分けることを意味する。

5. 結び：数学は流体の暴走を認め、工学はそれとともに生きることを学ぶ

ナビエ–ストークス方程式の存在と滑らかさの問題は、2026年においても解決にはほど遠い。OpenAIの結果には異論が続き、Caltechの構成はいまだ独立した検証を要し、クレイ研究所の100万ドルは誰の手にも渡っていない。変わったのは前提である。大域的な滑らかさはもはや自明ではなく、爆発の構造、条件、帰結が正当な研究対象になった。

ファンの後ろに立つエンジニアにとって、それは見慣れた姿勢だ。私たちは永遠に滑らかな流れの世界を手にしたことはない。手にあるのは、はく離、混合、非定常性、そして逆圧力勾配に抗う境界層である。フロンティアが動いたのは、数学がついに、最も厳密な言語で、エンジニアが日々向き合っていることを認めたからだ。空気はいつも行儀よくは振る舞わない。それでも実際の工学は、行儀よく振る舞わない空気の中で、効率的で静かで信頼できるファンを届け続けている。

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM*（2026）：一般化軸対称ナビエ–ストークス方程式における最大渦度の急成長とBKM爆発基準。
2. Ruhr-Universität Bochum、博士論文、図2.3：渦管伸張とシート状の崩壊。
3. *Applied Acoustics*（2025）：通常時および失速時における電子機器冷却用軸流ファンのLES、図15–18。
4. TU Darmstadt：遠心ファンのCFD解析、速度と流線、図9–12。
5. Zenodo、「A Structural Dismantling of OpenAI's "Finite-Time blowup for Navier–Stokes"」、2026年9月。
6. Zenodo、「Navier–Stokes Lost in Translation」、2026年10月：Lean形式化の不一致と、外力付き・外力なしの命題の相違について。
7. Terence Tao、ナビエ–ストークス正則性をめぐる合意の変化についての公開コメント、2026年。

SUNXFAN®について：SUNXFANは、HVAC、データセンターおよび蓄電システムの熱管理、クリーンエア用途向けに、産業用のEC・DC・AC遠心ファンおよび軸流ファンを製造している。800V HVDCアーキテクチャ向けに設計したファンユニットも含まれる。流体力学の最も基本的な問いに息長く向き合い続けることが、ファンシステムの効率と信頼性を長期にわたって保つと考えている。