

## キャビテーション解析機能の開発背景

流体解析ソフトウェアSCRYU/Tetraに搭載しているキャビテーション解析機能を用いると、設計段階における正確なキャビテーションの発生予測が可能です。非定常性の強い現象であるキャビテーションは、機器の性能低下や気泡が生じることによる騒音のみならず、物体表面に対してエロージョン（壊食）現象を引き起こすため、CFDを用いた非定常キャビテーション解析が重要となります。お客様とともにキャビテーション解析に取り組むソフトウェアクレイドル 技術部 藤山に、機能開発背景を聞きました。



株式会社ソフトウェアクレイドル  
技術部 技術一課 藤山 敬太

——開発の背景を聞かせてください

### キャビテーション解析はどのような機器が対象となるのか？

キャビテーションは、水などの液体で作動する機器で発生します。「眼鏡店の店頭でよく見かける超音波洗浄」といったキャビテーションを有効利用した機器も存在していますが、「ポンプ」、「船用プロペラ」、「発電プラントなどの配管」などの大部分の機器ではキャビテーションは性能低下や振動などの悪影響の原因となります。

ご存じのとおり、ポンプや船舶用プロペラなどの水力用回転翼設計においては、近年の省エネルギー問題に対応すべく、小型化・高効率化の要求が益々高まっています。設計現場においては、従来からCFDによる性能予測が有効に活用されていますが、要求性能が厳しくなるにつれてキャビテーション発生の予測が避けて通れなくなっています。というのも、キャビテーションによる性能低下、機器の損傷、騒音などのリスクを事前に予測することが、設計者にとっての非常に重要な課題となってきているためです。

ところが、いざ解析を行おうとしても、実際の気泡は数ミクロンと極めて小さく、さらにその運動は非常に非定常性が強いいため、とてもそのままではシミュレーションを行うことが困難です。そのため実際に数値解析による予測を行うためには、現象をモデル化することが必要となってきます。CFDにおけるキャビテーション現象のモデル化についてもこれまでに様々な手法が提案・検証されてきましたが、昨今の計算環境の向上もあって迅速にリアルタイムで設計へとフィードバックするための計算時間と予測精度の両立が可能となってきました。

### SCRYU/Tetraにおけるキャビテーション解析では、どのような手法が使われているのか？

SCRYU/Tetraにおけるキャビテーション解析機能としては、「圧縮性気液二相局所均質媒体モデル<sup>\*1</sup>」と「フルキャビテーションモデル<sup>\*2</sup>」の組み合わせによるものが基本となります。まず流れる流体の取扱いとしては、圧縮性気液二相局所均質媒体モデルを用いています。このモデルでは、液相についても蒸気相と相似な状態方程式を仮定し、蒸気相・液相・不凝縮ガスについてそれぞれの密度と質量分率から流体の密度を合成することで、1流体の圧縮性解析の形で計算を行います。

また気泡の生成と消滅に関するモデルについては、Singhalらによるフルキャビテーションモデルを用いています。このモデルの特徴は、「バブルダイナミクスに基づく気泡の生成・消滅」・「乱流の効果」・「空気等の不凝縮ガス」これら全てについて考慮するキャビテーションモデルとなっていることとなります。

また、キャビテーションは非定常性の非常に強い現象となります。そのため、乱流モデルとしては一般的なRANSモデル（レイノルズ平均モデル）では不十分な場合があり、空間的・時間的許容度の比較的高く一般的な工学的モデルにも適用しやすいRANS+LESのハイブリッドモデルがより適合性が高いこともあります。たとえば図11は、過去に弊社で実施したキャビテーションの周期的放出について計算した例<sup>\*3</sup>ですが、通常のRANSモデルでは間欠性が再現できないところが、ハイブリッドモデルの一種であるSST-SAS (Scale-Adaptive Simulation) モデルを用い

(※1) Okuda, K. and Ikohagi, T., "Numerical Simulation of Collapsing Behavior of Bubble Clouds", Trans. of the Japan Society of Mechanical Eng. B, Vol. 62, 1996

(※2) Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H.Y., Jiang, Y., "Mathematical Basis and Validation of the full Cavitation model", Journal of Fluids Engineering, vol.124, 2002

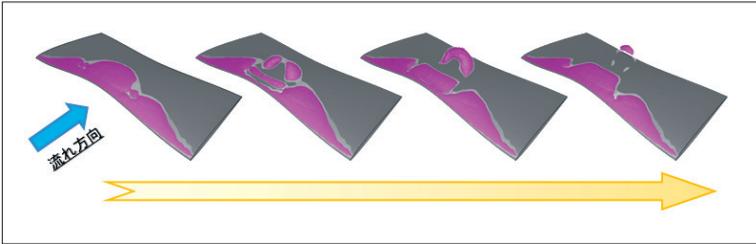


図1 水流中の3次元捻り翼に生じる非定常キャビテーションの発生予測 (赤色部はキャビテーション発生予測位置)

ることで現象をよく再現することが可能となりました。

もちろん、かなりキャビテーションの発生予測ができるようになってきたとはいえ、まだまだキャビテーションの発生範囲やその状態変化などについては完全なものとは言えません。そのため、今後も継続的にキャビテーションモデルと乱流モデル、その両面からの開発、検証が必要となると考えています。

### キャビテーションに関連して、エロージョンという現象をよく耳にします。考慮することはできるのでしょうか？

エロージョンとは「壊食」と呼ばれる現象のことで、気泡が破裂する際にマイクロジェット（強いジェット流）・衝撃波が生じて物体の表面を攻撃する現象です。特に、気泡が崩壊して圧力が急激に上昇する場所において、そのリスクが高いといわれています。

エロージョン予測において、現象をミクロまで考慮することは現状では非現実的です。そのためSCRYU/Tetraではそのエロージョンの発生リスクについて、圧力と

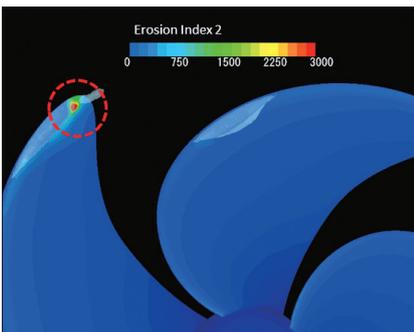


図2 エロージョン解析事例 (インデックス2の出力結果)

蒸気量それぞれの絶対値と変動の大きさを組み合わせて表現するというコンセプトのもとに能見らが提案した簡易インデックス<sup>※4</sup>を、解析結果の物体表面上に情報として出力することができます。

簡易インデックスということもあり、壊食量の推定などを完全に行うことは残念ながらできません。ただ、壊食場所の位置推定やそのリスクの大小について評価が可能となりますので、その情報を生かしてよりエロージョンフリーな機器開発が可能になります。

### 近年、船舶分野での需要が高まっていると聞きました

そのとおりです。船舶においては、船体後流の流れ場の影響により推進器であるプロペラの翼面上で非定常なキャビテーションが生じることが知られています。この非定常なキャビテーション現象は船体側に大きな圧力変動を起こす原因となっており、船体構造や居住性への影響を考慮するためには設計の段階で正しく予測することが重要となります。しかしながら、船

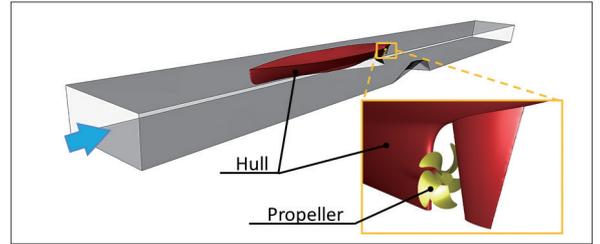


図4 船体・プロペラ一体解析モデル

体とプロペラの両方を考慮した実験は高価かつ手間がかかるため、この分野におけるCFDの重要性が高まっているのです。

それでは実際に、船体とプロペラを一体とした流体解析結果<sup>※5</sup>を見てみましょう。この例では、図4のように実験に合わせた解析領域に内に、モデルスケールの船体、およびプロペラを再現して解析モデルを作成しています。

検証の一つとして、ここではキャビテーションパターンを見てみましょう。図5は、解析結果のキャビテーション発生範囲（ボイド率10%の等値面）を図示したものです。この結果を見ると、船体後流の影響によるキャビテーション発生範囲の非定常変化が計算されており、これは実験における傾向ともよく一致していました。さらに踏み込んだ検証として、船体における圧力振動の振幅を比較したものが図6となります。この結果を見ると、1次の翼通過周波数成分だけではなく3次・4次といったより高次の周波数にわたって圧力振幅を予測できており、設計段階におけるキャビテーション推定・圧力振動予測に対して高い有効性を示していると考えています。

### メッシュにおける要素数はどの程度を要するのでしょうか？

以前の解析では要素数は数百万程度と少なかったのですが、現在は解析環境が劇的に上がっているため、1億近い要素のメッシュを用いて精度よくシミュレーションを行うことも可能になりました。図7は船舶用プロペラの

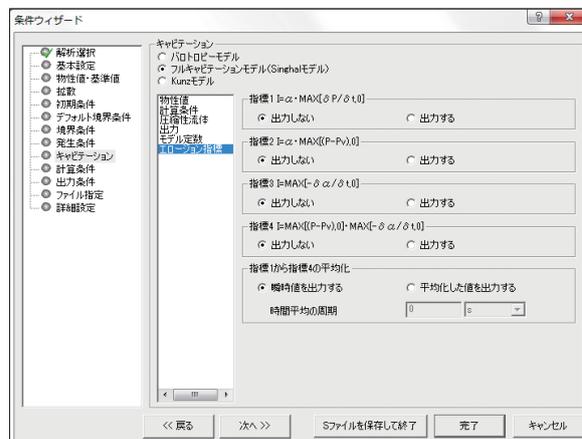


図3 簡易インデックスの出力設定画面

※3) Fujiyama, K., Kim, J.-H., Hitomi, D., and Irie, T., "Numerical Analysis of Unsteady Cavitation Phenomena by using RANS Based Methods", Proc. of the 16th Cavitation Symposium, 2012  
 ※4) Nohmi, M., Iga, Y., and Ikhagi, T., "Numerical Prediction Method of Cavitation Erosion", Proc. of Turbomachinery Society of Japan, Vol.59, 2008  
 ※5) Fujiyama, K., "Investigation of Ship Hull Pressure Fluctuation induced by Cavitation on Propeller using Computational Fluid Dynamics", Proc. of the 17th Cavitation Symposium, 2014

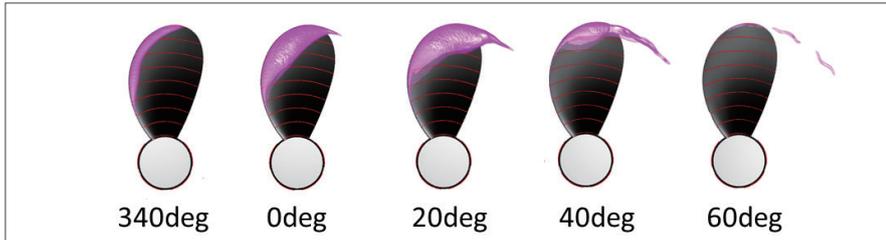


図5 プロペラ翼面上に生じる非正常キャビテーション発生予測

翼端渦内に生じるキャビテーションを再現した例です<sup>※6</sup>。ここで、二つの解析結果図について説明していきます。まず、図7(左)についてですが、プロペラの翼端から伸びる非常に細長いキャビテーションを再現できているのが確認できます。この解析を行うためにSCRYU/Tetraに搭載されている解適合解析機能を利用して翼端渦付近のメッシュを微細化しており、7500万という要素数のメッシュを作成しています。

一方、図7(右)は同じ解析をより多い1億3000万要素のメッシュで解析した結果となります。ただ、メッシュ作成時に解適合解析のような機能は使っておらず、結果として翼端渦内のキャビテーションを再現できておりません。このように、キャビテーション解析においては単純な要素数だけではなく、解析対象となる現象に応じたメッシュの作成ということが非常に重要となります。

### 簡単な使い方

キャビテーション解析のプロセスは2段階にわけて行うのが一般的な方法となります。まずは、初期場を作成するためにキャビテーション解析なしの非圧縮性解析を行います。次に、その解析結果からのリスタート解析という形で、圧縮性の非正常キャビテーション解析を行います。

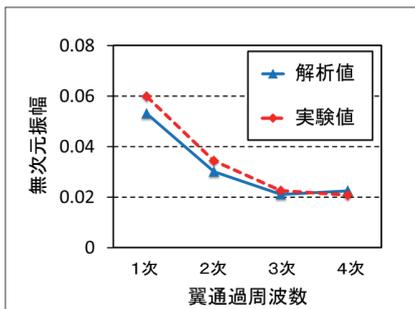


図6 船体表面における圧力振動振幅

なお、非常に圧力が低い場合など極端にキャビテーションが起こりやすい条件では、どうしても解析が発散しやすくなりますが、キャビテーション解析についても多くのノウハウを蓄積できていますので、是非ご相談いただければと考えます。

### 利用することでのメリットや注意点などはありますか

これはキャビテーション解析に限ったことではありませんが、より精度よく解析を行うためには、やはり対象となる現象に対して正しい解析条件と必要なメッシュを用意することが何よりも重要となります。そして、出てきた結果に対して本当に実現象と合致しているのか、ということをしっかり検討するということも必要です。そのため解析を実験に対して完全に置き換えるということはまだまだ難しいかと考えています。

そうはいつでも現実的にはなかなか難しいキャビテーションの発生の様子を可視化できるというのは、やはりCFDの最大のメリットだと思います。目で見るということにより、さらにキャビテーションという現象そのものに対する理解を深めていただくということも、ユーザー様のエンジニアリング業務には非常に役立つと考えております。

解析手法が成熟してきたこともあり、ユーザー様がより強力にキャビテーション解析を行えるようになってきたことは間違いありません。また、キャビテーションを正しく再現できるようになったこ

とで、それに付随した圧力変動などの現象やエロージョンリスクの評価を行えるようになってきたということは、設計現場においてとても大きな意味を持つと思います。

### ユーザー様にひとことお願いします

ユーザー様のすぐそばでニーズを把握できる「純国産」のメリットを生かしながら、引き続き新しい技術を導入しながらキャビテーション解析の性能向上を継続的に図っていくことで、キャビテーション解析がより多くのユーザー様にお役立ちできるよう努めてまいります。もし、実際にご使用になってみてお気づきの点やご要望がございましたら、どのようなことでもお寄せいただければ幸いです。

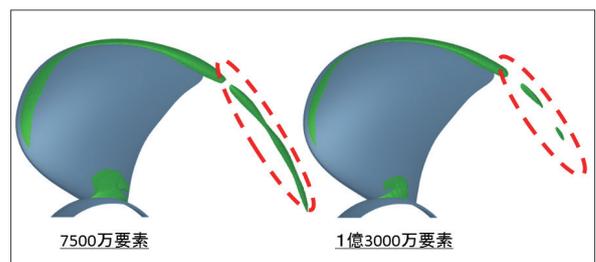


図7 プロペラ翼端渦内に発生するキャビテーションの予測

(※6) Fujiyama, K., Kim, C., and Hitomi, D., "Performance and Cavitation Evaluation of Marine Propeller using Numerical Simulations", Proc. of smp'11 Workshop on Cavitation and Propeller Performance, 2011



## SCRYU/Tetra

SCRYU/Tetraは複雑な形状の熱流体解析を簡便に行うことをコンセプトに設計したソフトウェアです。多くのCADネイティブデータを含む形状データに対応するインターフェースを備えており、条件設定においても、ウィザードに従い、対話形式で設定していただくとなっています。また、従来難しいとされていたメッシュ作成においても、自動化、高速化などさまざまな工夫が施されたメッシュャーを有しており、初心者の方から解析専任者の方まで、多くの方にご利用頂けます。

### ● この記事に関するお問い合わせは下記まで。

#### 株式会社ソフトウェアクレイドル

##### ● 本社

〒530-0001 大阪市北区梅田3-4-5 毎日インテシオ  
Tel: 06-6343-5641 Fax: 06-6343-5580

##### ● 東京支社

〒141-0032 東京都品川区大崎1-11-1 ゲートシティ大崎ウエストタワー  
Tel: 03-5435-5641 Fax: 03-5435-5645

##### ● 名古屋営業所

〒450-0001 愛知県名古屋市中村区那古野1-47-1 名古屋国際センタービル  
Tel: 052-589-8649

Email: [info@cradle.co.jp](mailto:info@cradle.co.jp) | Web: [www.cradle.co.jp](http://www.cradle.co.jp)



※SCRYU/Tetraは、日本における株式会社ソフトウェアクレイドルの登録商標です。  
※その他、本パンフレットに記載されている会社名、製品・サービス名は、各社の商標または登録商標です。  
※本資料の内容、テキスト、画像等の無断転載・無断使用を固く禁じます。  
※本パンフレットに掲載されている製品の内容・仕様は2015年4月現在のものです、予告なしに変更する場合があります。  
また、誤植または図、写真の誤りについて弊社は一切の責任を負いません。