

発明の母

シミュレーションにより、ミルクウォーマーを計画より2年早く市場に投入し、プロトタイプコストを54,000ドル削減

Jim Shaikh (英国 ロンドン, yoomi 創設者)

長男 Danial が生まれると、彼がお腹をすかせてぐずっている間に、妻が搾乳しておいた母乳を冷蔵庫から取り出して温めるのが私の仕事になりました。それを見ていた妻から、「あなたはエンジニアでしょう、何か良い方法はないの?」と言われました。そこで私は、乳児に与えるミルクを温める簡単な方法を考案するよう、エンジニアリングコンサルタント会社である Intelligent Fluid Solutions (IFS) 社に依頼しました。自動加熱式哺乳瓶「yoomi」のコンセプトはこのようにして生まれました。私がフルタイムで働いている yoomi 社がこれまでに販売したボトルウォーマーは数千個に及びます。

yoomi は、哺乳瓶と加温器を一体化した製品であり、ボタンを押すと、母乳と同じ温度になるまでミルクを迅速かつ安全に温める機能を備えています。ただ、設計に際しては、乳児がミルクを飲む速度に応じて、ボタンを押してから1分以内にミルクの温度を5℃から34℃に上げることができる製品を開発しなければならないという問題に直面しました。

IFS 社のエンジニアリングチームは、哺乳瓶を加熱する方法を考案する際に様々な化学および電気加熱器を調べ、最終的に酢酸ナトリウム三水和物を使用することにしました。物質の相を変化させると熱を放出するほか、沸騰させて効果を簡単に回復させることができる酢酸ナトリウム三水和物は、電気座布団やカイロに使われています。しかし、この酢酸ナトリウム三水和物を使用した初期プロトタイプでは、ミルクの温度が所要温度の半分程度(17℃)までしか上がりませんでした。

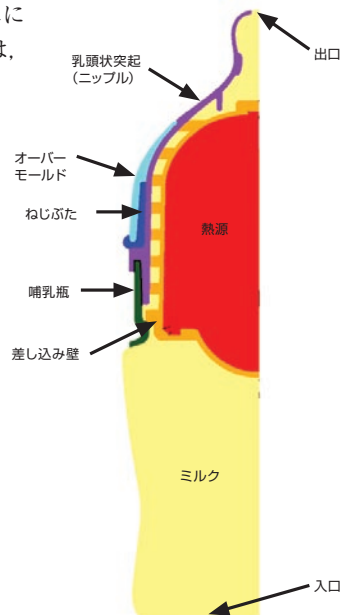
このため、IFS 社のエンジニアリングチームは、ANSYS 社の流体解析ソフトウェアを使用して、設計案の混相流体をシミュレーションすることにしました。多数のシミュレーションプロトタイプを評価したこのエンジニアリングチームは、試作品を4個作成するだけで、初期設計コンセプトの性能を2倍に高めることができました。また、12個の試作品を余計に作成する必要性を回避して54,000ドルを節約できたほか、yoomi の市場投入期間を2年短縮すること



左の図は yoomi の加温器、右の図は哺乳瓶。yoomi は、哺乳瓶のキャップ内に収まる加温器の流路に液体が流れ、加熱される仕組みになっている。

にも成功しました。

酢酸ナトリウム三水和物の結晶は80℃を超えると溶解して冷却可能となり、この水溶液が過冷却状態になります。yoomi では、金属製のディスクを強く押すと、閉じ込められていた酢酸ナトリウム三水和物の結晶が解放されて水に溶けてから、この水溶液が結晶化して酢酸ナトリウム三水和物の固体に変化し、熱を放出する仕組みになっています。母乳や調乳は、いくつかの流路を通過して、この凝固過程で温められてから、乳児の口元に届くようになっています。なお、これらの流路は、ミルクと接触する表面積を大きくするために湾曲させてあります。



yoomi システムのプロトタイプ3の設計

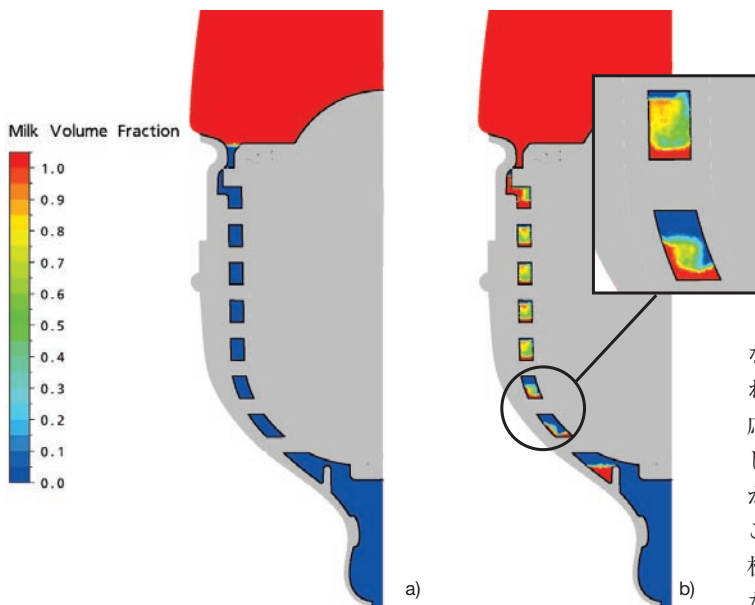
yoomi を適切に設計するには、ミルクに熱を伝達する流路の形状とサイズを決める必要がありました。この課題をクリアするには、酢酸ナトリウム三水和物が相変化する複雑な熱システムを把握しなければなりません。また、各流路の設計を検討し、ミルクへの熱伝達率を最大限に高める必要もあります。

初期のコンセプト設計を作成した際には、公開文献で研究するとともに層流の熱伝達を考慮に入れて作成した単純な流路形状を用いて、基本的な数値解析を実施しました。しかし、直線的な流路に限定してこの設計を行ったため、物理テストの結果と一致せず、初期のコンセプト設計に基づいて作成したラピッドプロトタイプでは、ミルクの温度

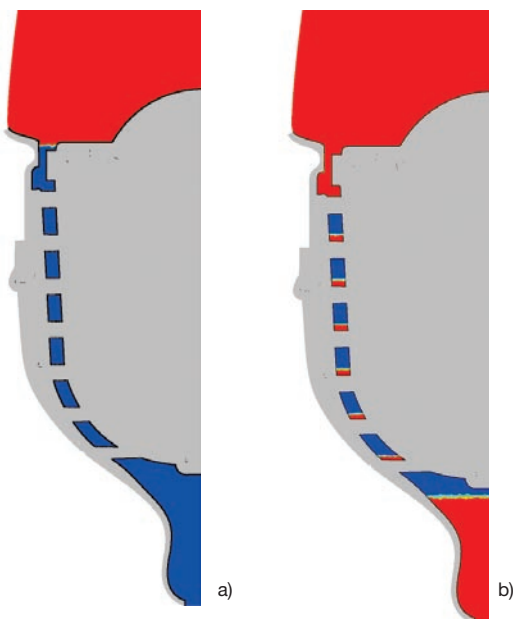
が所要温度の半分程度までしか上がりませんでした。

このため、同社のエンジニアリングチームは最初の段階に戻って設計を変更し、別のラピッドプロトタイプを作成しましたが、各プロトタイプの作成に約4,500ドルのコストと1週間の期間を要しました。それに加え、このラピッドプロトタイプとボトルウォーマーの生産バージョンの特性が一致しませんでした。おそらく、このプロトタイピング手法を使用していたら、市場性のある製品を開発するのに4年間で16個のプロトタイプを作成しなけりななかつたでしょう。

IFS社のエンジニアであるAndrej Horvat氏は、流体力学ソフトウェアANSYS CFXを使用して、実際の流路形状をモデリングしました。その後、このシミュレーション結果を確認して流路を再設計し、



プロトタイプ3におけるミルクの体積分率：a) $t = 39.3s$, b) $t = 51.9s$



プロトタイプ4におけるミルクの体積分率：a) $t = 39.3s$, b) $t = 51.6s$

各反復計算で流路形状を調整し、液体が均一に流れるようにした。

流路を拡大したところ、熱伝達率を大幅に向上させることができました。熱伝達率を向上させるために流路の幅と深さを調整した同氏は、この方法をとったことで、ミルクウォーマーから出るミルクの温度を22℃まで上げることに成功しました。しかし、まだ十分ではありません。

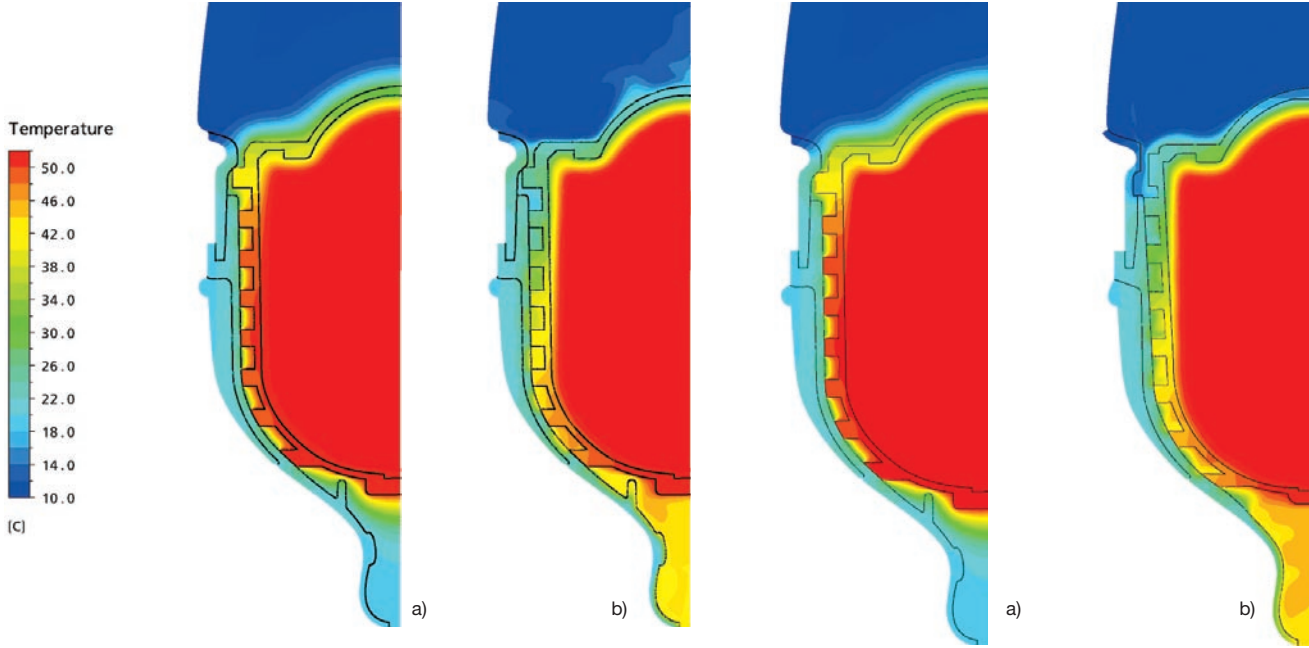
次に同氏は、発生した熱が流路の壁を介して移動し、ミルクに伝わるまでの様子を適切に把握するため、酢酸ナトリウム三水和物の相変化を表現したモデルを作成することにしましたが、そのためには、凝固過程の正確なモデルが必要でした。そこでHorvat氏は、酢酸ナトリウム三水和物の挙動特性の凝固モデルを公開文献から引用し、このモデルを実験データで校正して使用しました。その後、同氏はユーザー定義関数を作成してANSYS CFXに組み込みました。

卓越した性能を備えたANSYS CFXでは、この複雑な解析から意味のある結果を導くのに十分な大きさの時間ステップを使用して収束を得ることができました。これにより、IFS社のエンジニアリングチームは、ミルクが加温器の流路を介して移動する様子のほか、ミルクが進行方向と反対の方向に空気を送り込む様子、相変化材料から出る熱でミルクの温度が高くなる様子など、様々な物理現象を完全に可視化することができました。

この混相流シミュレーションでは、凝固過程が安定していないことも分かりました。実際、相変化材料は、流体から固体になるとエネルギーを放出しますが、エネルギーを取り除かないと反応が止まります。また、エンジニアリングチームが流路の数を減らして熱伝達率を高めたところ、流体流量が流路によって異なる傾向が見られました。これは、いくつかの流路で温度が大幅に低下することを意味します。このため、エンジニアリングチームは、流体解析を実施し、流路間の流れのバランスをとる作業を入念に行いました。

この流体解析を実施したことで、空気がyoomiの性能を大きく左右することが判明しました。たとえば、乳児にミルクを与えるためにyoomiを逆さまにすると、ミルクが加熱流路に入ると同時に、ニップル内の空気が加熱流路に勢いよく流れ込みます。このため、設計の初期段階でシミュレーションを行い、ミルクがニップルに流れ込むのを空気が抑えていることを確認するとともに、Horvat氏が流路形状を変えて空気とミルクの流体流量を調整し、空気とミルクがそれぞれ異なる方向に流れるようにすることによって、この問題を解決しました。CFDシミュレーションを使用しなかつたら、この問題を把握して解決するのにかなり時間がかかったことでしょう。

また、この加熱材料の混相流挙動をモデリングしたところ、このシミュレーションと物理テストの結果がよく一致しました。最適な設計を最小限の時間で実現するには、このようにしてシステム全体の動作を把握する必要がありますが、これは、CFDシミュレーションを行わなければ不可能でしょう。Horvat氏は、正確なシミュレーション結果を使用して流路形状を修正したことで、ミルクの温度を28℃まで高め、大幅な改善を図ることができましたが、まだ目標には届いていません。



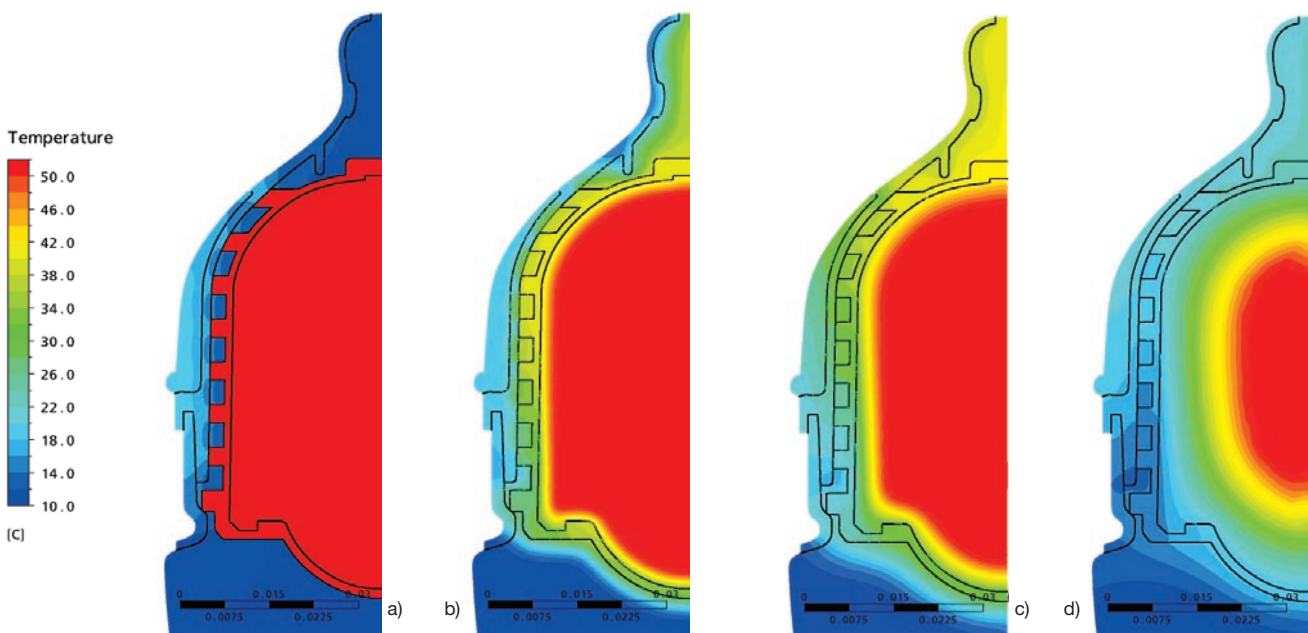
プロトタイプ3における温度：a) $t = 39.3s$, b) $t = 51.9s$

プロトタイプ4における温度：a) $t = 39.3s$, b) $t = 51.6s$

ミルクウォーマーの設計を繰り返し行い、ニップルに流れ込むミルクの温度を最適化した。

IFS社のエンジニアリングチームは、様々な形状を短時間で評価できれば、設計を迅速に改善できると信じていました。そこで、Horvat氏がANSYS CFXを使用して一連の設計研究を行い、この結果に基づいて単純な解析モデルを作成してみたところ、本格的な流体解析を実施した場合よりも短時間で設計を評価することができました。さらに同氏は、この解析モデルを使用して数千もの形状案を評価してから、最良の設計をいくつかピックアップし、これらの設計の完全な流体解析を行いました。同社のエンジニアリングチームは、この手法を利用したことで、ミルクの温度を目標の34℃まで上げることができました。

このプロジェクトでは、ANSYS CFXを用いたため、時間とコストを大幅に節約することができました。プロトタイプを作成してテストする従来の手法を使用していたら、市場性のある製品を開発するのに4年間で54,000ドルを費やしていたことでしょう。しかし、その代わりに流体解析を実施して製品の物理特性を正確に予測することができたため、4個のプロトタイプを作成するだけで、設計目標を半分の期間で達成することができました。なお、yoomiのプロモーションをWeb上で展開したところ、初期生産分が4日間で完売しました。この需要を満たすため、生産を増やすとともに、英国の他の小売業者や国際的小売業者にも販売ルートを広げています。■



プロトタイプ3における温度、 $k_{plug} = 10W/mK$ ：a) $t = 39.3s$, b) $t = 60s$, c) $t = 120s$, d) $t = 600s$

長期間にわたって計測したミルクウォーマーの温度