

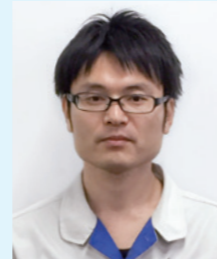
車載用高圧水素タンクの実用化において、ガソリン車と同等の充填時間3分程度で急速充填することが求められている。

その中で、急速充填時の問題として、タンク内温度がCFRP使用許容温度の85℃を上回る可能性があることが指摘されている。

そのため、さまざまなタンク形状・使用環境において、安全で効率的な充填を行うには、タンク内の温度や流れの状態を正確に把握する必要があり、タンク内温度を計測した事例^{*1)}が数多く発表されている。

一方、水素タンクは高圧容器であることからタンク内の流れを可視化することが難しく、CFD (Computational Fluid Dynamics) によりタンク内の流れを可視化することが必要とされている。近年、京スーパーコンピュータの一般利用が開始されたことにより、これまで実施が難しかったCFDの事例も報告されているが、水素充填時のタンク内温度予測を行った事例は少ない状況である。水素充填においては、充填ノズル先端で衝撃波をともなった超音速流が生じるため、充填完了までの非定常解析を実施するには京スーパーコンピュータをもちいても1ケースの解析に数週間かかることが想定される。

本稿では、解析負荷が膨大となる要因の超音速流をモデル化して簡易モデルとして解析を行うことで、水素タンクの充填解析を高速化した事例を紹介する。



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
CAE・実験評価部 解析技術室
まつしか ひろかず
松岡 寛和



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
CAE・実験評価部 解析技術室
かわにし ひでき
川西 秀樹

質量・熱量の補正を圧縮性流体の関係式(1)~(3)により行った。式(1)、(2)は、等エントロピー流れを仮定した理想気体の圧力比、密度比であり、式(3)は充填ノズルによりタンク内に持ち込まれる熱量を表す。

ここで、 ρ_0 :よどみ点密度(kg/m³)、 ρ :タンク内密度(kg/m³)、 κ :比熱比(=1.4)、 M :マッハ数、 P_0 :よどみ点圧力(Pa)、 P :タンク内圧力(Pa)、 T_{in} :流入ガス温度(K)、 T_{ref} :参照温度(=298.15K)、 v_{in} :流入ガス流速(m/s)、 $C_{p,in}$:流入ガス比熱(J/kgK)、 m :質量流量(kg/s)である。

$$(1) \quad \frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$(2) \quad \frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

$$(3) \quad h = m \left[C_{p,in} (T_{in} - T_{ref}) + \frac{v_{in}^2}{2} \right]$$

A-2 二次元軸対称モデルでの解析

閉空間への仮想ノズルモデルの適用を検討するため、従来のモデル化方法(充填ノズルをモデル化、以後、実ノズルモデルと称する)と仮想ノズルモデルによるモデル化方法の結果の比較を行った。

解析条件は第1表に示すように、吉村^{*1)}によって実施された実験条件を参考に決定した。

解析には、汎用熱流体解析ソフト ANSYS/FLUENT ver14.5 を使用し、水素タンク形状を二次元軸対称モデルでモデル化した。ソルバーは圧力ベースの Coupled Solver、時間・空間の離散化は2次精度風上差分、乱流モデルはk- ω SSTモデルを使用した。

解析メッシュは第2図、第3図に示す通りであり、タンクの内容積はどちらも約40Lと同じであるが、仮想ノズルモデルでは充填

ノズル出口面より21.3mmの位置に仮想ノズル境界面を設けた。実ノズルモデルのメッシュ数は約45万であるのに対し、仮想ノズルモデルではメッシュ数は約28万とメッシュ数を約38%減らすことができた。

第4図にタンク内平均温度の時間履歴を示す。青線が実ノズルモデルの温度履歴、○が仮想ノズルモデルの温度履歴を表している。どちらのモデルにおいても、ガスが密閉されたタンクに充填されるため、タンク内ガスは圧縮される。タンク内ガスと樹脂ライナーとの間には対流熱伝達により伝熱しているが、その放熱量よりも圧縮仕事による発熱量の方が大きいいため、タンク内のガス温度は上昇している。実ノズルモデルでは、充填開始から急激に温度が上昇し、約8.0secで60℃を超え、そこから温度上昇は緩やかになり、

A-1 仮想ノズルモデルによる近似解法

解析対象を詳細にモデル化したフルモデルの解析負荷が膨大となるような場合において、解析対象の一部を詳細にモデル化して一部のみを解析し、その結果を簡易モデルの境界条件とする手法が一般的にもちいられている。たとえば、水素漏洩に代表される大気中への水素の噴出の事例^{*2)}では、配管近傍の超音速領域を詳細

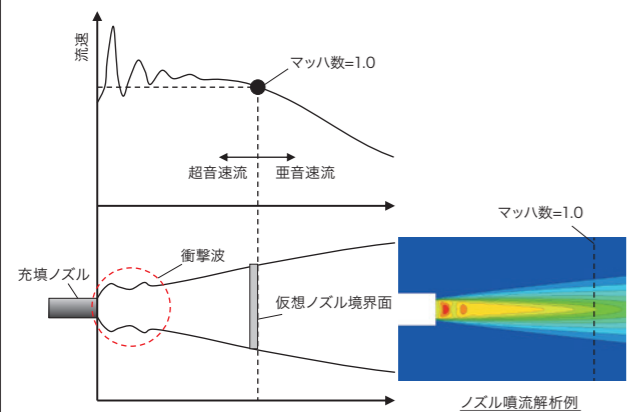
モデルにより解析し、この結果を境界条件として配管から少し離れた亜音速領域を簡易モデルにより解析を行っている。本稿では、このモデル化方法を充填ノズルに適用することから、このモデル化方法を仮想ノズルモデルと称する。

第1図に示すように、水素充填においても水素漏洩と同様に充填ノズル近傍は衝撃波をともなう超音速領域となる。衝撃波をともなう超音速領域を解析するには、微小な解析メッシュや微小な時間刻みが必要となることから、解析負荷が膨大となる。一方、ノズルから離れるとガス流速は次第に減速し、ある距離まで離れるとマッハ数<1.0の亜音速流となる。亜音速流であれば、微小な解析メッシュや微小な時間刻みとする必要がなくなることから、超音速領域とくらべて解析負荷を抑えることができると考えられる。これまで、水素タンクのような閉空間に仮想ノズルモデルを適用した事例はないことから、水素充填への適用を検討した。

まず、充填ノズル近傍のみを詳細にモデル化して水素噴流の解析を行い、超音速から亜音速に変化する位置(マッハ数=1.0)を特定する。この詳細モデルの解析結果から全圧・全温・乱流諸量を抽出し、水素タンクの簡易モデルの境界条件として与えた。

この条件をもちいて仮想ノズルモデルにより充填を行うと、タンク内が閉空間であることから、実際のノズルで解析を行った場合とくらべてタンク内に持ち込まれる質量・熱量が大きくなる。そのため、

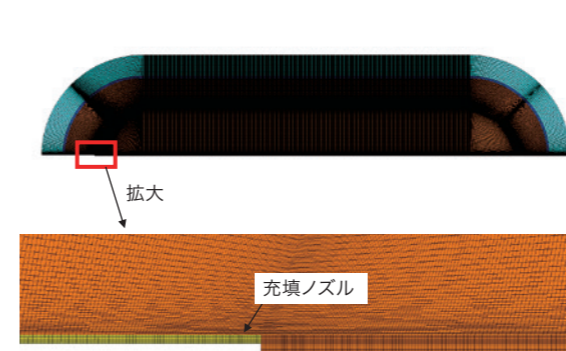
第1図 仮想ノズルモデルの概要



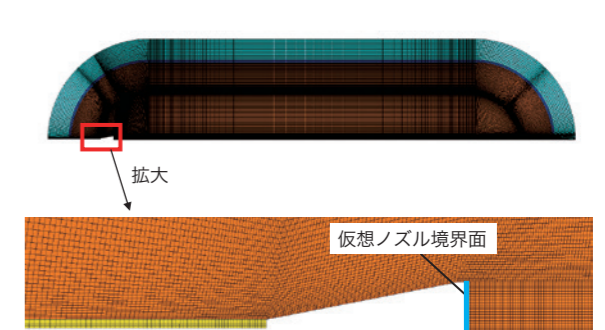
第1表 解析条件

水素密度	理想気体
タンク内容積	40.0(L)
充填ノズル径	3.0(mm)
仮想ノズル径	12.0(mm)
ガス流量	700.0(g/min)
充填条件	流量一定
タンク内初期圧力	1.0(MPa)
タンク内初期温度	25.0(°C)
充填ガス温度	0.0(°C)
充填時間	60.0(sec)

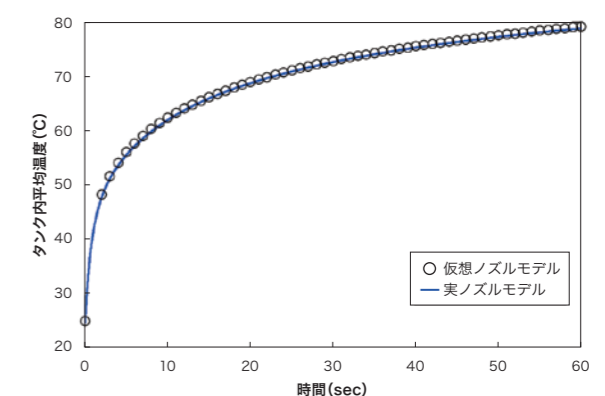
第2図 実ノズルモデルの解析メッシュ(二次元軸対称モデル)



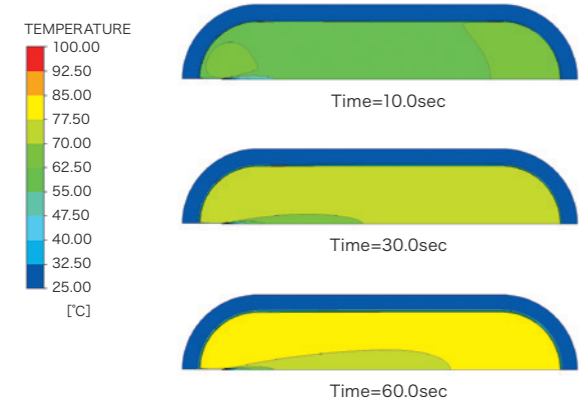
第3図 仮想ノズルモデルの解析メッシュ(二次元軸対称モデル)



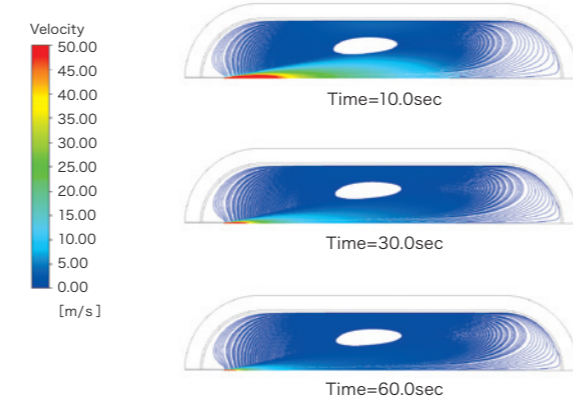
第4図 タンク内平均温度の時間履歴(二次元軸対称モデル)



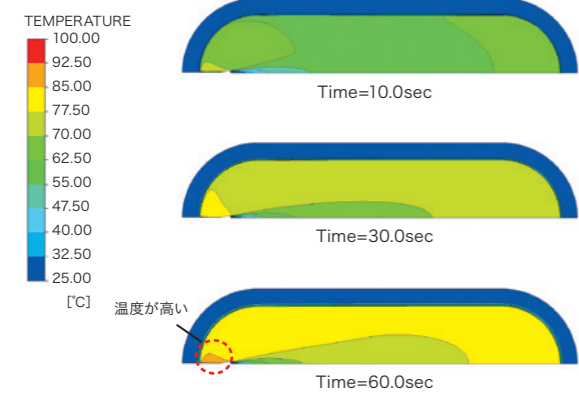
第5図 実ノズルモデルの温度分布(二次元軸対称モデル)



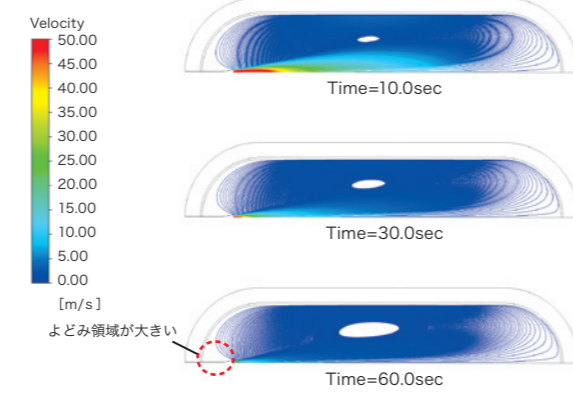
第7図 実ノズルモデルの流跡線(二次元軸対称モデル)



第6図 仮想ノズルモデルの温度分布(二次元軸対称モデル)



第8図 仮想ノズルモデルの流跡線(二次元軸対称モデル)



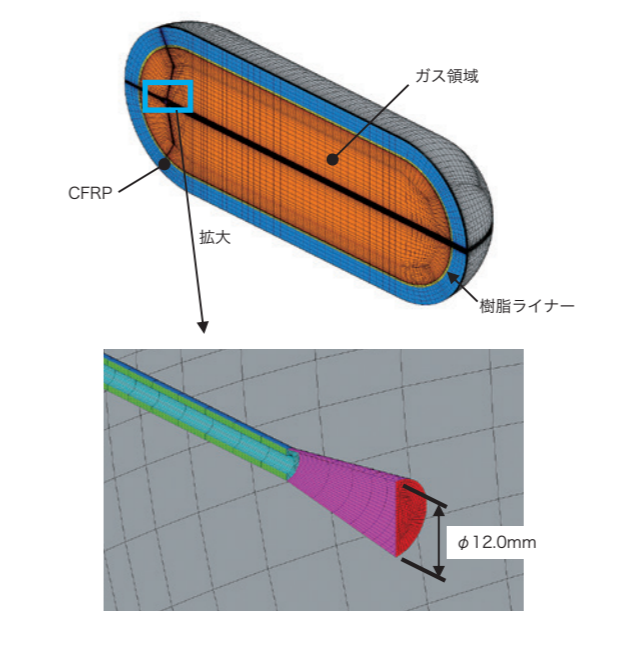
60sec後には約78.9°Cに達している。仮想ノズルモデルの温度履歴も実ノズルモデルと同様であり、実ノズルモデルの温度履歴を再現できている。実ノズルモデルと仮想ノズルモデルの温度差は最大で約0.8°C、60sec間の温度差を時間平均すると約0.3°Cと、実ノズルモデルと仮想ノズルモデルの結果はよく一致していることがわかる。

第5図に実ノズルモデル、第6図に仮想ノズルモデルの温度分布を示す。実ノズルモデル、仮想ノズルモデルのどちらもCFRPの温度はほぼ変化がなく、時間の経過とともにガス領域の温度が上昇

していることがわかる。両者を比較すると、ノズル背後の領域において、仮想ノズルモデルでは実ノズルモデルよりも温度が高くなっている。これは、第7図、第8図に示すように仮想ノズルモデルでは、仮想ノズル境界面が実ノズル境界面よりも下流側(図右側)にある影響により、ノズル背後のよどみ領域が大きいことが原因であると考えられる。

ノズル背後の領域を除くと、実ノズルモデルと仮想ノズルモデルの温度分布はよく一致しており、二次元軸対称モデルにおいて水素充填に仮想ノズルモデルを適用できることがわかった。

第9図 仮想ノズルモデルの解析メッシュ(三次元モデル)

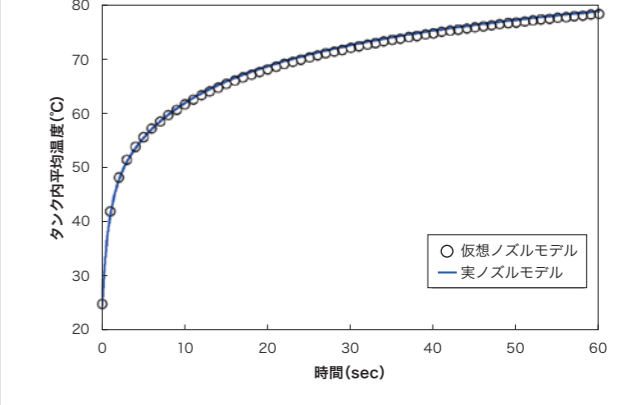


している。二次元軸対称モデルと三次元モデルの温度レベルはほぼ同じであるが、三次元モデルでは噴流が下向きに噴出し、タンク右下の領域が低温となることがわかる。二次元軸対称モデルでは、対称性を保つために中心軸上の流れは直進するため、必ず上下対称の温度分布となる。しかし、三次元モデルでは重力の影響により冷たい噴流が下向きに流れるため右下の領域が低温となったと考えられる。これにより、タンク上部の高温の領域と比較して約4.3°Cの温度差が生じている。また、二次元軸対称モデルではノズル背後の領域の温度が高くなっていたが、三次元モデルではノズル背後の領域も流れがよどまないことから、二次元軸対称モデルのように温度が高くないことがわかる。

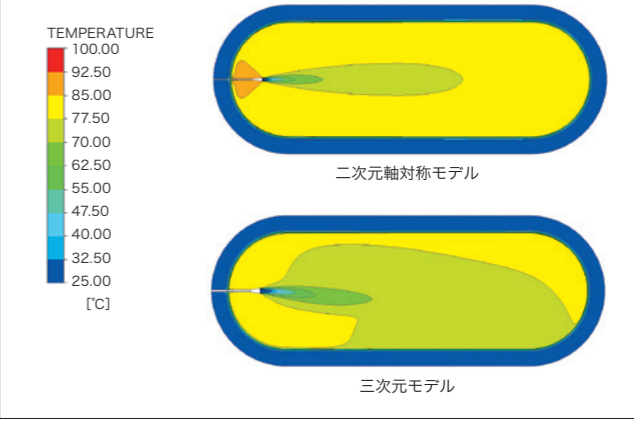
温度履歴が実ノズルモデルをほぼ再現できおり、かつ、三次元特有の現象が現れていることから、仮想ノズルモデルをもちいてタンク内の温度予測やタンク内の流れの可視化が可能となったと考えられる。

三次元モデルでの解析(60.0sec間)に要した時間は約262.5hである。この結果から180secの充填完了までに要する時間を予測

第10図 タンク内平均温度の時間履歴(三次元モデル)



第11図 水素タンク内の温度分布 Time=50.0sec



すると、解析時間は約33日となる。仮に、三次元の実ノズルモデルのメッシュ数を500万メッシュ、時間刻みを1/10にする必要があると仮定すると、実ノズルモデルの180secの充填解析には1650日が必要となる。これは、京スーパーコンピュータで解析を行うと約31日で終了する計算量である。以上から、仮想ノズルモデルをもちいて、京スーパーコンピュータで解析を行うのと同等の速度で水素タンクの充填解析を行うことが可能となることがわかる。

A-3 三次元モデルでの解析

前章では、二次元軸対称モデルで仮想ノズルモデルの適用を検討した。本章では、これを三次元に拡張して適用を検討する。

解析モデルを第9図に示す。前章で作成した二次元軸対称形状を三次元化し、1/2対称としてモデル化した。解析メッシュは約100万メッシュであり、解析条件は二次元軸対称モデルと同様とした。

実ノズルモデルでの三次元解析には膨大な時間が必要となるため、実ノズルモデルの結果は二次元軸対称モデルの結果で代用した。

第4図と同様に、第10図では青線が実ノズルモデルの温度履歴、○が仮想ノズルモデルの温度履歴を表している。二次元軸対

称モデルと同様に三次元モデルでもタンク内ガス温度は上昇しており、実ノズルモデルとの温度差は解析初期が最大であり約1.0°C、60.0sec間の温度差を時間平均すると約0.4°Cである。

二次元軸対称モデルの温度差よりも最大で約0.2°C、平均で約0.1°Cの差異が生じているが、両者はよく一致しており三次元モデルでも水素充填に仮想ノズルモデルを適用できることがわかった。この温度履歴を外挿すると180secの充填でタンク内温度は約88.8°Cとなるため、この条件では充填はできないことがわかる。

第11図に水素タンク内の温度分布を示す。上側の二次元軸対称モデルは三次元モデルと比較しやすいよう、上下対称に表示

FCV(Fuel Cell Vehicle)の実用化を推進するにあたり、車載用高圧水素タンク内の流れの可視化や温度を予測することは有用であり、これまではより簡易なモデル化方法により顧客ニーズに応じてきた。

本稿では、より現実に近い仮想ノズルモデルにより、高精度かつ高速に水素充填解析を実施した事例を紹介した。現状は、理想気体・流量一定の条件に限定されるが、さらに実在気体・圧力上昇速度一定での解析が可能となるよう、解析技術の高度化を推進している。

参考文献 *1) 吉村ほか: JARI Research Journal, Vol.31(2006), No.6, pp.17-20
 *2) 武野ほか: 水素エネルギーシステム, Vol.37(2012), No.1, pp.33-39
 ● 木枝ほか: 自動車研究, Vol.30(2008), No.6
 ● A.G.Venetsanos: International Journal of HYDROGEN ENERGY 35(2010), pp.3908-3918
 ● Heitsh, M et al.: Proceedings of the Third International Conference on Hydrogen Safety(2009)