

MPS粒子法による水撃（ウォーターハンマー）現象 再現可能性の検討

Study on Possibility of Simulation of Water Hammer Effects using MPS Particle Method

戸倉 直¹⁾

Sunao Tokura

1) 博(工) プロメテック・ソフトウェア(株)&(株)トクラシミュレーションリサーチ (E-mail: tokura@prometech.co.jp)

Regarding the active use of hydroelectric power generation and pumped power generation which are environmentally friendly, the research to protect these hydraulic systems from water hammer phenomena which may cause serious damages to these systems, is being conducted. In this presentation, first, an experiment on the entire water hammer pump piping system utilizing the water hammer effect was reproduced using MPS particle method based CFD simulation technique. After that, simulation to reproduce the mechanics of water hammer pump including valve operation using a detailed model of the water hammer pump was tried. As a result, it was confirmed that the actual behavior of the water hammer pump could be reproduced.

Key Words : MPS, particle method, water hammer

1. はじめに

世界的に電力需要の急激な増大が予測される中にあって、太陽光や風力などの再生可能エネルギーとともに環境負荷の少ない水力発電や揚力発電などの積極的な活用が期待されている。こうした水理系で課題となるのが水撃（ウォーターハンマー）現象であり、水流の突然の遮断等により、配管内の水圧が急激に上昇し、配管自体や、配管に接続するバルブ、発電設備などが破損する可能性のある現象である。一方で、水撃現象を利用した装置として水撃ポンプが知られている。水撃ポンプは水撃現象で生じた水圧により揚水する仕組みを持っており、電力を必要としないため、環境への負荷がなく、電源のない山間部や、電力供給の乏しい途上国での灌漑などに積極的に活用することが期待されている。本講演ではまず、MPS粒子法を用いたCFDシミュレーションにより、水撃ポンプ配管系全体の実験の再現を行い、実験とシミュレーションとの比較を行った。その後、水撃ポンプの詳細モデルを用いてバルブを含む水撃ポンプの動作の再現を試みた。その結果、水撃ポンプの実際の挙動が再現できることを

確認できた。

2. 水撃ポンプ実験のシミュレーション

水撃ポンプはポンプ自体だけでなく、貯水タンクおよびタンクからポンプまでの給水管を含めた全体として動作する。そのため、貯水タンクも含めた全体モデルを構築する必要がある。そこで文献[1]を参考にFig.1に示す全体モデルを作成した。モデルは大きく分けて貯水タンク、給水管、水撃ポンプから構成される。タンクの容量は150lである。実際のモデル化に際しては貯水タンクは構造的にはモデルに含めていない。その理由としては、貯水タンクをモデル化した場合、そこに蓄えられた水を粒子で離散化してモデルに含める必要があり、粒子数が増加して計算に負荷がかかるためである。その代わりとしてタンクからの流入口にタンクの底部に相当する圧力境界条件を設定した。こうすることでタンクからの流入口に関してトリシェリの定理が成り立ち、流速がEq.1で与えられる。ここで g は重力加速度、 h はタンク内の液面高さである。 h は文献[1]に示されていなかったため、 $h=1500\text{ mm}$ と仮定

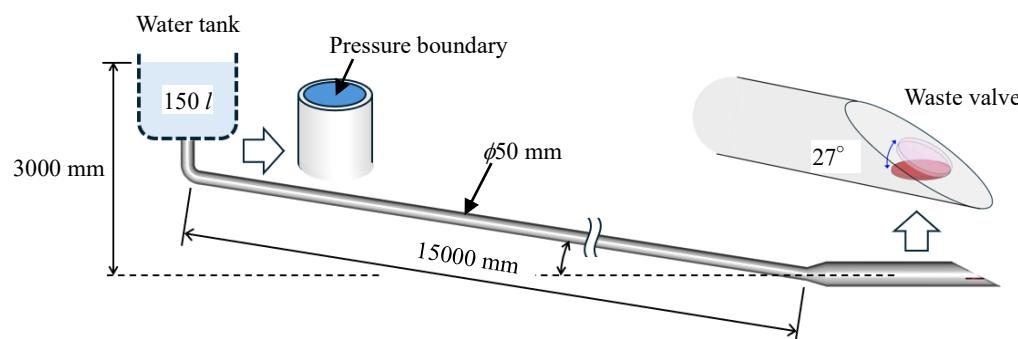


Fig.1 Geometry and dimensions of water hammer pump experiment equipment

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

した。

給水管は内径50 mm、長さ15000 mmとなっている。水撃ポンプの詳細な寸法も文献[1]に記されていないため、モデルは長さ850 mm、内径100 mmとし、排水口直径は80 mmとした。排水バルブは直径80 mmの円板で、先端がヒンジとなっており、バネ定数12 Nm/radの回転バネにより圧力変動とともに弁が開閉するしくみとなっている。モデル化およびシミュレーションには市販のMPS粒子法[2]CFDソフトウェアParticleworks Ver.8.1[3]を使用した。このソフトウェアにはバルブのような構造物の剛体運動（並進/回転運動）を計算する機能が備わっているため、機構解析ソフトなどの外部ソフトとの連成計算は不要である。なお、この実験に用いられるポンプはポンプと配管内における圧力変動に着目した構造となっているため、水を汲み上げるための揚水バルブは省略されている。水はMPS粒子で離散化されているが、計算負荷を考慮して粒子径は5 mmとした。その結果、解析領域内における最大粒子数は約30万となった。

Fig.2 に水撃ポンプの動作のスナップショットを示す。

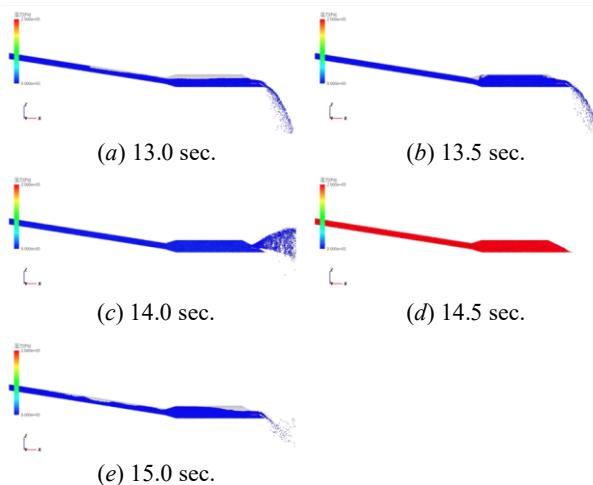


Fig.2 Water flow changes, valve motion, and pressure contour

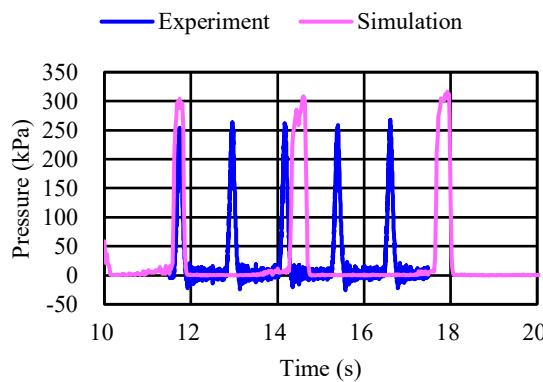


Fig.3 Pressure history in water hammer pump

Fig.2(a)ではタンク（流入口）からの水がポンプ内に流入し続いている状態で、Fig.2(b),(c)でポンプ内に水が満たされていく、それとともに圧力が高まり、Fig.2(d)で水圧に押されてバルブが閉まり、一気に水圧が上昇している。その後、水撃圧により水が給水管内に逆流し、ポンプ内の圧力が低下するためFig.2(e)でバルブが開いて一気に圧力が低下している。この繰り返しにより排水バルブが開閉を繰り返し、ポンプ内の圧力が周期的に変化する。水撃ポンプ実験のシミュレーションで得られたポンプ内の圧力履歴と文献[1]に記載された実験結果の比較をFig.3に示す。この図は実験とシミュレーションの最初の圧力ピーク値の時間を合わせたグラフとなっている。ピークの間隔は実験とシミュレーションとで乖離がみられるが、圧力ピークの間隔はポンプ容量や貯水タンクからの流量によって変動することが考えられる。これらの情報が文献に記載されていないためピーク間隔の不一致は十分想定される範囲と考えられる。重要なことはバルブが閉じた瞬間に発生する水撃現象とその圧力変動によりバルブの開閉がMPS法によるシミュレーションで再現できていることである。計算時間はNVIDIA製GPU GV100 1枚を用いて6時間45分であった。

3. 水撃ポンプの揚水機能のシミュレーション

水撃ポンプの本来の役割は、水を高い位置まで汲み上げることである。そこで水撃ポンプの詳細モデルを作成し、揚水のメカニズムの再現を試みた。解析モデルの形状をFig.4に示す。給水管から供給された水がポンプ内に供給され、一部は排水口から流出するが、やがてポンプが水で満たされるとその水圧で排水バルブが閉じる。すると急激に水圧が上昇し、揚水バルブが開いて水圧により水が上部の揚水管に供給される。その後ポンプ内の圧力が低下するため排水バルブが開くとともに、揚水バルブが閉じる。再びポンプが水で満たされると排水バルブが閉じ、同じ挙動が繰り返される。こうして揚水管に水が周期的に供給されることにより高所への水の汲み上げが行われる。また空気タンクを備えた水撃ポンプでは、空気タンクに流入した水で圧縮された空気圧により、揚水効果が高まると言われる。排水バルブと揚水バルブには圧

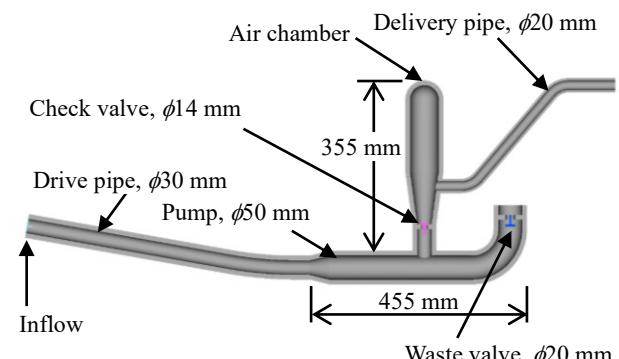


Fig.4 Geometry and dimensions of water hammer pump

力の低下によりバルブが元の位置に戻るよう並進バネを定義してある。このモデルに関してはある程度細かい解像度が必要となるため、粒子径は2 mmとした。水撃ポンプ実験のシミュレーションで示されたように、排水バルブが閉じることで発生する圧力波が給水管をさかのぼって減衰するメカニズムをモデル化するためには十数メートルの給水管をモデルに含める必要があり、やはりモデルが大規模化してしまう。そこでこの水撃ポンプの詳細モデルではモデル規模を抑えるため、給水管の途中までをモデルし、給水管の端部に流入境界条件を設定した。これにより給水管からの周期的な流量の変化を流入境界の流量の周期的变化で模擬することとした。Fig.5に流入境界における流速の時刻歴を示す。さらにモデル規模を小さくするため、左右対称な形状を考慮して1/2モデルとした。

こうして行った水撃ポンプ詳細モデルの動作のスナップショットをFig.6に示す。ポンプ内の水圧の変化により排水バルブと揚水バルブが周期的に開閉を繰り返し、揚水管への水の汲み上げが生じていることがわかる。なお、本解析では空気室内の空気を粒子でモデル化しており、空気の圧縮による揚水効果も考慮できるようモデル化したが、このポンプモデルでは空気の圧縮効果は明瞭にはとらえられなかった。このモデルの計算時間はGV00 1枚で4時間50分であった。

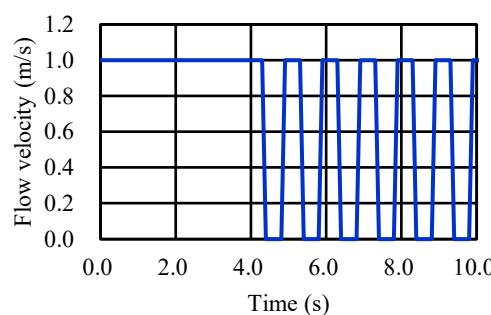


Fig.5 Flow velocity history at inflow boundary

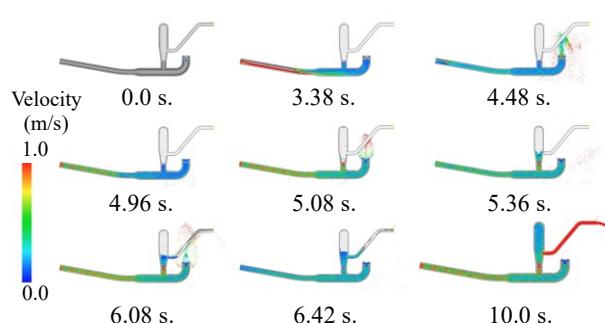


Fig.6 Simulation of moving mechanics of detailed water hammer pump

4. まとめと今後の課題

本稿では水撃現象に着目し、MPS粒子法CFDソフトウェアを用いて水撃ポンプの簡易的な全体モデルを作成し、全体の挙動の再現を試みた。その結果、急激な水圧変化によるバルブの周期的な開閉挙動をとらえることができた。次に詳細な水撃ポンプモデルを用いて排水バルブと揚水バルブの周期的な開閉による揚水挙動を再現できることを示した。

今後の課題としては、本稿では計算コストを抑える観点から簡易的な全体モデルと詳細な部分モデルを使い分けたが、Particleworksに実装されている可変解像度機能（指定した領域のみ粒子解像度を細かくすることが可能）を用いることにより、ポンプ内のみ細かい解像度で計算を行うことで長い給水管を含む水撃ポンプ系の全領域をひとつのモデルでモデル化し、低い計算コストで計算することが可能であると考えられる。さらにこうした様々なシミュレーション技術を活用した最適化計算により、揚水効率の高い水撃ポンプの開発も可能となるであろう。本稿で示されたように、MPS粒子法CFDソフトウェアが水撃ポンプだけでなく、水撃現象をともなう様々な水理系の課題に適用可能なツールとなることが期待される。

参考文献

- [1] 清水康史, 濱田龍寿,, 遠藤茂勝: 水撃ポンプ内の発生水撃圧力と伝播速度について, 日本大学生産工学部第40回学術講演会, 2007.
- [2] S. Koshizuka and Y. Oka: Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- [3] Particleworks WEB site: <https://www.particleworks.com/>

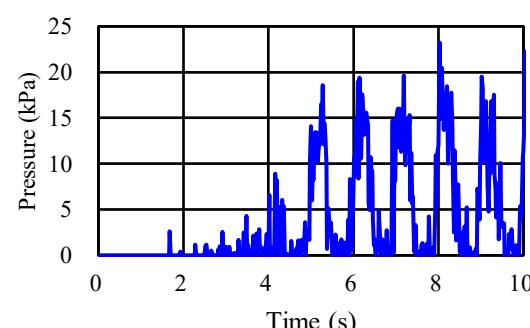


Fig.7 Pressure history in water hammer pump