

圧力波伝播中の気泡成長シミュレーション

A bubble dynamics simulation in the pressure wave propagation

今井隆太⁽¹⁾, 石倉修一⁽²⁾, 粉川広行⁽²⁾, 日野竜太郎⁽²⁾, 後藤紀一⁽¹⁾, 荒川忠一⁽³⁾
 IMAI Ryuta, ISHIKURA Shuichi, KOGAWA Hiroyuki, HINO Ryutaro, GOTO Norikazu,
 ARAKAWA Chuichi

- ⁽¹⁾日本原子力研究所 (計算科学技術推進センター), 東京都中目黒 2-2-54
 JAERI(CCSE), 2-2-54 nakameguro meguro-ku Tokyo
- ⁽²⁾日本原子力研究所 (中性子科学研究センター), 茨城県那珂郡東海村白方 2-4
 JAERI(CENS), 2-4 shirakata tokai-mura naka-gun Ibaraki
- ⁽³⁾東京大学, 東京都文京区本郷 7-3-1
 univ. of Tokyo, 7-3-1 hongo bunkyo-ku Tokyo

CCSE(Center for promotion of Computational Science and Engineering) and CENS(Center for Neutron Science) carry out the joint research and development of the mercury target simulator. In this paper, we simulate the interaction between the pressure wave propagation and the deformation of the target wall. In particular, we introduce an easy coupling algorithm with an FEM code and a bubble dynamics code. Consequently it turns out that the negative pressure might be generated in the case of 2.5mm wall. Furthermore, we will investigate the behavior of bubble dynamics in the pressure wave propagation.

1. はじめに

日本原子力研究所は, 高エネルギー加速器研究機構と共同で大強度陽子加速器計画を推進している. この計画では, 従来の研究炉よりも1桁以上高い強度の中性子ビームを発生させることを目指しており, MW 規模のパルス状陽子ビームと液体水銀との核破砕反応を利用して中性子を発生させる装置(水銀ターゲット)の開発に取り組んでいる. 中性子科学研究センターでは, 水銀ターゲットの設計のための頑健性評価として, 実験と数値シミュレーションを行っている.

2. 水銀ターゲットのシミュレーション

水銀ターゲットとは中性子散乱実験施設における中性子の供給源であり, 主に SUS316 の容器とその中を循環する液体水銀とから構成されている. 水銀ターゲットでは, 陽子加速器から照射された陽子ビームが容器壁を通過して内部の液体水銀と衝突し, 核破砕反応が生じて中性子が発生する. 水銀ターゲットの設計のための頑健性評価においては, (1) 液体水銀の核破砕による高密度の発熱, (2) ターゲット容器のビーム窓部の熱衝撃, (3) 液体水銀の瞬間的な熱膨張による圧力波伝播という現象が問題となる.

今まで中性子科学研究センターでは, 流体コードと構造コードを個別に適用して解析を進めてきたが, より詳細な解析のために, 流体構造連成解析が必要となってきた. そこで, 計算科学技術推進センターと共同して, 弱連成による流体構造連成解析コードの開発に取り組むこととなった. 昨年度までに構造コードの開発は終了し, 現在は流体コードの開発を実施している. 本報告では, 圧力波伝播と容器壁の変形挙動の相互作用を対象を絞った予備的評価を実施する. とくに, 弾性解析 FEM プログラムと気泡成長モデルをカップリングして気泡の挙動を評価する簡易アルゴリズムを紹介する.

3. 液体水銀中の圧力波伝播

液体水銀中の圧力波伝播についての評価として, ホプキンソン棒法試験 (Figure 1) が実施された. シミュレーションでは, 液体 (水銀) を弾性体で近似して弾性波の伝播を計算した. Figure 2,3 に示す実験とシミュレーションの比較から,

弾性体近似によるシミュレーションが十分良い結果を与えることが分かった. また実験結果から, 入力棒及び出力棒にエロージョンが確認された. これは, 圧力波伝播中に発生した気泡が潰れる際の衝撃波によるものと考えられている.

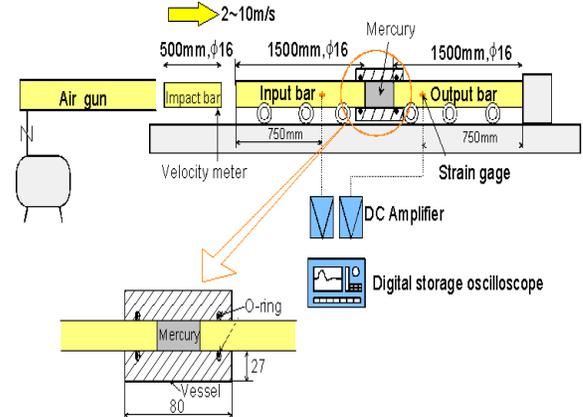


Figure 1: Impact Test Apparatus

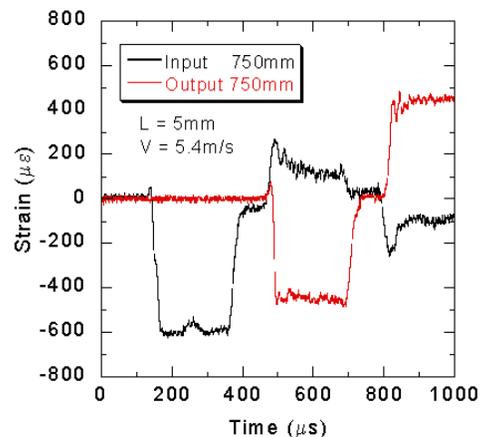


Figure 2: Experimental result

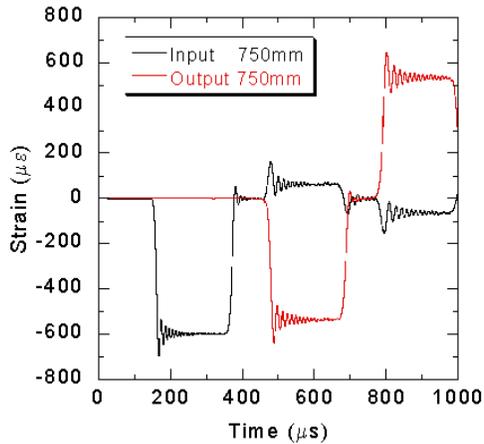


Figure 3: Simulation result (LS-Dyna)

そこで、キャピテーション発生試験とその数値シミュレーションを実施し、水銀ターゲットの頑健性評価における気泡成長の影響を検討する。実験では、Figure 4 のような円筒状の容器の中に液体（水）を充満させ、その先端に衝撃を与えて圧力波を発生させる。

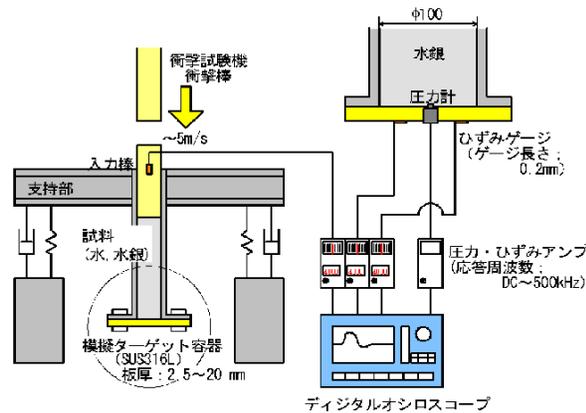


Figure 4: Pressure Wave Propagation Test Apparatus

シミュレーションでは、液体（水）を弾性体で近似して、弾性波伝播と容器壁の変形挙動の関係を調べた。即ち、円柱状の液体（水）をソリッド要素で分割し、底部の容器壁をシェル要素で分割した FEM による動的解析を実施した。主な解析条件は以下の通りである。

Table 1: Conditions

形状条件	形状	円柱
	直径	100mm
物性条件 (水)	体積弾性率	2.2Gpa
	ポアソン比	0.4995
物性条件 (容器)	密度	1000kg/m ³
	ヤング率	196Gpa
境界条件	容器側面	固定
	容器底面	自由
	容器先端	自由
初期条件	水銀先端	荷重

初期条件として、ピーク時の底部の圧力が実験結果とほぼ等しくなるような節点荷重を先端部に与えた。底部の容器壁が、20mm、10mm、5mm、2.5mm の4つのケースを考える。

その結果、容器壁が 2.5mm の場合に負圧が確認された。これは、容器壁が薄いと圧力波が到達したときの変形挙動が大きく、容器壁近傍の液体水銀が膨張するためと考えられる。実際、容器壁が 5mm 以上の場合は負圧が確認されなかった。実験においても容器壁の厚さを 2.5mm とした場合に負圧が確認された。尚、下図のグラフにおいて、実験とシミュレーションにおける圧力波の到達時刻が異なるのは時刻の基準の取り方の違いに依ると思われる。

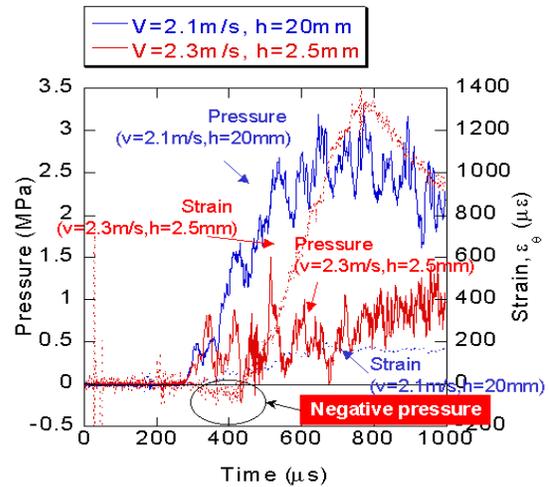


Figure 5: Experimental result

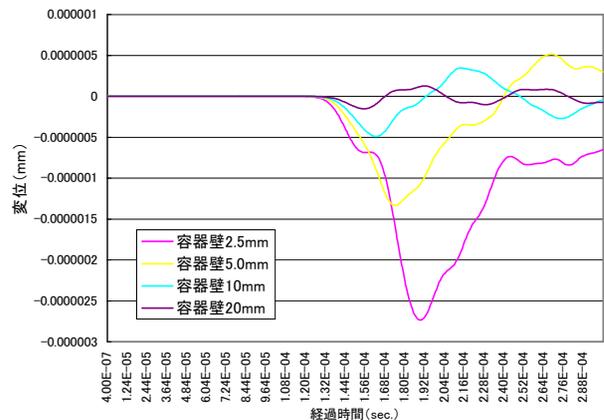


Figure 6: Displacement of the bottom wall

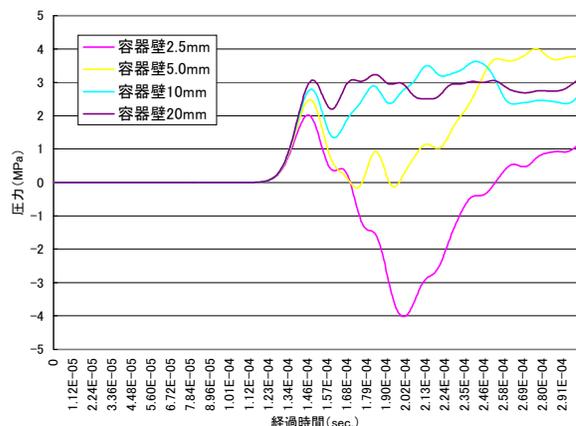


Figure 7: Pressure near the bottom wall

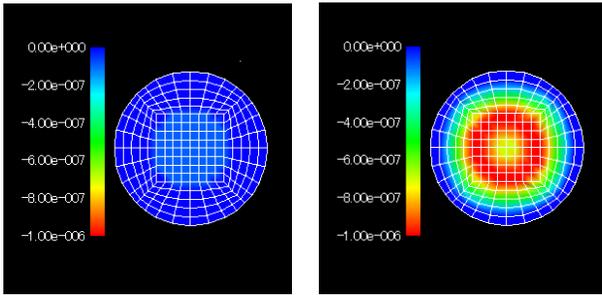


Figure 8: Deformation of the bottom wall
(Left: wall width=20mm, Right: wall width=2.5mm)

4. 気泡成長シミュレーション

液体水銀中に気泡が存在するとき、負圧の発生による気泡の動的挙動を検討するにあたり、本報告では単一気泡を対象とした基本的な特性を検討する。単一気泡の運動方程式は、液体の圧縮性を考慮した Keller の式と圧力及び温度の式を連成して解く。

単一気泡の運動方程式

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c}\right) \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_L} \left(1 + \frac{\dot{R}}{c}\right) \left[p_B(t) - p_\infty - p_s \left(t + \frac{R}{c}\right) \right] + \frac{R}{\rho_L c} \frac{dp_B(t)}{dt}$$

圧力の式

$$\frac{dp}{dt} = \frac{3}{R} \left((\gamma - 1) K \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_R - \gamma p \dot{R} \right)$$

エネルギーの式

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{dp}{dt} = \nabla \cdot (K \nabla T)$$

ここで、 R は気泡の半径、 \dot{R} はその時間微分、 c 、 ρ_L 、 μ_L 、 σ は液体の音速、密度、粘性係数、表面張力、 $p(t)$ は気泡の内圧(気泡内均一)、 p_∞ は液体の静水圧、 $p_s(t)$ は気泡近傍に作用する変動圧、 $p_B(t)$ は気泡外周の液体圧、 T は気泡内温度、 u は気泡内ガス流速、 γ は比熱比、 K は気泡内ガスの熱伝導率である。

本報告で用いる気泡成長モデルは、上述の Keller の式をルンゲクッタ法で解くプログラムである。この気泡成長モデルと FEM プログラムをカップリングして、負圧が発生するような圧力波伝播中の気泡成長シミュレーションを実施する。つまり、FEM プログラムを用いて前述のような圧力波伝播を計算し、とくに気泡の位置する部分の圧力時刻歴を計算する。この圧力時刻歴を Keller の式の右辺における変動圧とする。それぞれの時間積分を同時実行することで、圧力波伝播から気泡成長への作用を考慮するという意味での連成計算を実施する。気泡成長から圧力波伝播への作用のモデル化については今後の課題である。

初期半径が $1.0e-5m$ 、 $5.0e-5m$ 、 $1.0e-4m$ 、 $2.5e-4m$ の 4 つのケースを考える。その結果、気泡周りの圧力が正から負になり、気泡半径が増大するときの増大率は初期半径が小さいほど大きいことが確認された。また、最終的には全てのケースで半径は初期の 10 倍以上に膨張することが確認された。半径が初期の 10 倍以上になると増大率が小さくなり、その状態が持続している。

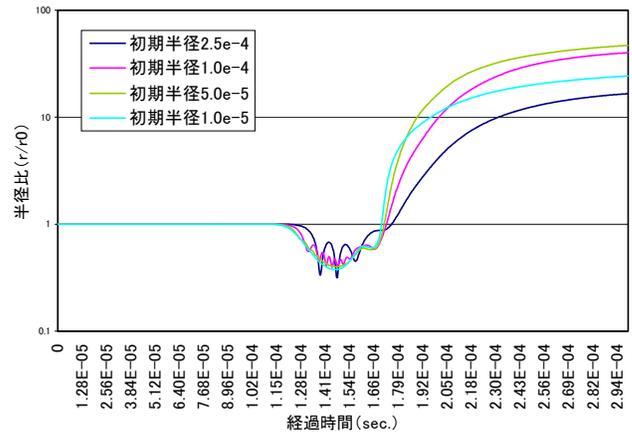


Figure 9: Bubble size

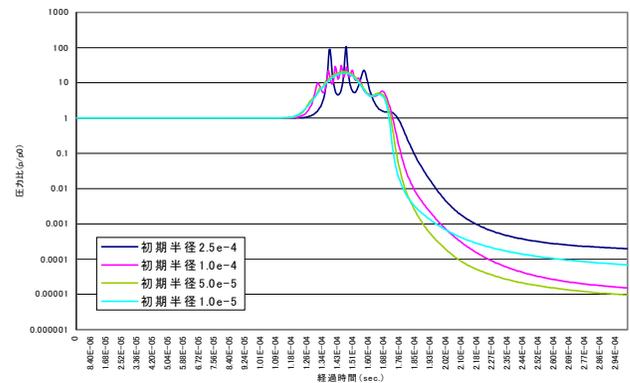


Figure 10: Bubble pressure

4. おわりに

液体を弾性体で近似することで、FEM を用いて圧力波伝播を計算した。その結果、容器壁の厚さを薄くするほど変形が著しくなり、それに伴い圧力が低下することが確認できた。また、容器壁を 2.5mm にすると負圧が発生する可能性があることを実験及びシミュレーションで確認した。その際、気泡成長シミュレーションを実施することで、気泡半径が初期の 10 倍以上に膨張することが確認された。半径膨張率が 10 倍でも体積膨張率が 1000 倍になることに注意すれば、気泡成長が圧力波伝播に影響を及ぼすことは十分に考えられる。気泡成長から圧力波伝播への作用のモデル化については今後の課題である。

参考文献

- (1) 石倉修一、他：液体金属ターゲットの動的熱衝撃問題におけるバブル動力学の予備検討、計算工学講演会論文集、Vol.6 (2001 年 5 月)
- (2) A.Prospertetti, et.al.: Nonlinear bubble dynamics, J. Acoust. Soc. Am. 83, 502-513 (1988)