水銀ターゲットの流体構造連成解析コードの開発

Development of fluid-structure interaction code for mercury target

今井隆太⁽¹⁾, 荒川忠一⁽³⁾, 小林謙一⁽¹⁾, 日野竜太郎⁽²⁾, 石倉修一⁽²⁾, 粉川広行⁽²⁾, 寺田敦彦⁽²⁾, 羽賀勝洋⁽²⁾, 渡辺正⁽¹⁾ IMAI Ryuta, ARAKAWA Chuichi, KOBAYASHI Kenichi, HINO Ryutaro, ISHIKURA Shuichi, KOGAWA Hiroyuki, TERADA Atsuhiko, HAGA Katsuhiro, WATANABE Tadashi

⁽¹⁾日本原子力研究所(計算科学技術推進センター),東京都目黒区中目黒 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⁾東大,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. From the analysis repeatedly done until present, CENS confirmed that the cavitation might be generated in the effect of the pressure wave propagation. CCSE advanced to develop the fluid-structure interaction code while the generation of the cavitation is considered, and the structure analysis code for parallel computing was developed as a first step. It is confirmed that this developed code obtains the calculation result which is comparable to the commercial code (LS-Dyna). The original code developed in this paper will be easily coupled with another code of computational fluid dynamics including the effect of variance of the shape due to the thermal and pressure forces.

1.背景

日本原子力研究所(原研)と高エネルギー加速器研究機構 (KEK)は,大強度陽子加速器計画を共同で推進している. この計画の中核施設である中性子散乱実験施設では,大強度 中性子ビームを用いた中性子物理に関する研究成果が期待 されている.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,WW 規模のパルス状陽子ビームと水銀ターゲットとの核破砕反 応を利用することになる.

2.水銀ターゲットの課題

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の容器壁とそれが包む液体水 銀とから構成されている.(Figure1に水銀ターゲットの外観 図を示す.)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, 核破砕反応が起きて中性子が発生する。

水銀ターゲットでは,次の現象が問題となり得る.

- ・液体水銀の核破砕による高密度の発熱
- ・ターゲット容器のビーム窓部の熱衝撃
- ・液体水銀の瞬間的な膨張による圧力波伝播

従って,水銀ターゲットの設計・開発においては,停滞流の 発生を抑制して核発熱による高密度の熱を効率的に除去す ることが不可欠であり,熱衝撃や圧力波に耐える構造強度を 確保することが肝心である.

中性子科学研究センターにおける現在までの圧力波伝播 の解析では,容器壁の動的変形と圧力波の反射などが相乗し て水銀中に負圧が生じ,キャビテーション発生の可能性が示 唆された.既存の設計解析コードを用いた個別の熱流動解析 と構造強度解析では,相互作用を考慮したキャビテーション の発生消滅を解析することは困難であることが分かってき た.

計算科学技術推進センターは、このような状況を背景に、

中性子科学研究センターと共同して,流体構造連成解析による水銀ターゲットシミュレータの研究開発に取り組むこととなった.



Figure 1: Outer view of mercury target assembly (dimensions : target container 100mm(height), max 500mm(width), effective length 800mm)

3.連成解析コードの設計・開発

本研究開発では、流体と構造のそれぞれの解析コードの改 良の容易さや最適な並列計算のためのプロセス配分のしや すさなどを鑑みて、弱連成による流体構造連成解析コードの 開発を計画している.つまり、ターゲット容器中の液体水銀 の熱流動を流体解析コードが担当し、ターゲット容器の動的 変形を構造解析コードが担当し、インターフェイスコードが 流体解析コードと構造解析コードの間の物理量の受け渡し を仲介することで,連成解析全体を制御する計画である.こ こでは,流体解析コード,構造解析コード,インターフェイ スコードの連携に着目して各プロセスの計算手順を設計す る.(参考文献[1]を参照)

流体構造連成解析の基本的な計算手順は Figure2 の通りで ある.流体解析コードは,ターゲット容器内部の液体水銀の 流れ場,温度場,圧力場を計算し,インターフェイスコード に流れの物理量を受け渡す.インターフェイスコードは,液 体水銀の圧力がターゲット容器壁に及ぼす流体力を構造解 析コードに受け渡す.構造解析コードは,流体力を外力とし てターゲット容器壁の変位場,応力場を計算し,インターフ ェイスコードにターゲット容器壁の変形量を受け渡す.イン ターフェイスコードは,変形量から流体格子を更新して,流 体格子のメトリックを流体コードに受け渡す.そして再び, 新しい流体格子の下で流体解析コードが液体水銀の流れ場 を計算する.



Figure2: Coupling of CFD and CSD

現在,流体構造連成解析を制御するインターフェイスコードとして,MpCCI(Mesh based parallel Code Coupling Interface)が有望であると考えている.MpCCIとは,多原理シミュレーションの連成解析コード間のインターフェイスであり, GMDによって CISPAR プロジェクトで開発された連成通信 ライプラリ COCOLIBを基礎としている.MpCCIの特徴については後述する.

4.個別コードの概要

4.1 流体解析コード

水銀ターゲットの流体構造連成解析の第一段階では,流体 解析コードとして Star-CD を適用することを考えている.と くに, Star-CD が実装しているキャビテーションモデル及び 乱流モデルの適用可能性に注目して,水銀ターゲットに特有 の現象への対応を検討する.

この検討結果は、「水銀ターゲットの流体構造連成解析コ ードの開発 」として報告する.

4.2構造解析コード

水銀ターゲットの流体構造連成解析の構造解析担当コー ドとしては,将来的な拡張性を考慮して,計算科学技術推進 センター並列計算法開発グループが開発中である.開発中の コードは,有限要素法による動的弾性解析コードであり,メ ッセージパッシングライブラリとしてMPIを用いた並列処理 を行い,大規模問題に対応することを考慮している.また, ソルバーには,計算科学技術推進センター並列計算法開発グ ループが開発した並列数値計算ライブラリ PARCEL(Parallel Computing Elements)が使用可能となっている.

4.3インターフェイスコード

インターフェイスコードとしては, MpCCI(Mesh-based parallel Code Coupling Interface)が有望であると考えて いる.MpCCIとは,GMD(German National Research Center for Information Technology)が開発している多原理シミュレー ションの連成解析コード間のインターフェイスである。 MpCCIの基本概念及び特徴は以下の通りである.

- ・複数コードの弱連成のインターフェイスを提供する。
- MPI の上位構造である。
- ・ 連成コードがそれぞれ独立したグリッドを設定できる.
- ・相違なるグリッド間の近傍探索や補間処理を行う.

MpCCI(COCOLIB)の実績例としては、CISPAR プロジェクトなどによる Star-CD, PAM-Crash などの連成解析がある.

5.構造解析コードの検証

上述のように,水銀ターゲットの流体構造連成解析の構造 解析担当コードとして,動的弾性解析有限要素法コードを開 発している.この開発コードの検証計算として,キャビテー ション発生試験を模擬した解析条件で,液体水銀を弾性体と して近似した擬似流体中の圧力波伝播について,開発コード と商用コード(LS-Dyna)との比較計算を行った.

キャビテーション発生試験の主な解析条件は以下の通りである.

| 形状条件 | 形状 | 円柱 |
|--------------|-------|------------------------|
| | 半径 | 55mm |
| | 高さ | 150mm |
| 物性条件 (水銀) | ヤング率 | 85.8Mpa |
| | ポアソン比 | 0.4995 |
| | 密度 | 13500kg/m ³ |
| 物性条件 (容器) | ヤング率 | 196Gpa |
| | ポアソン比 | 0.3 |
| | 密度 | 8030kg/m ³ |
| 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 | 下向き 5m/s |

Table1:Conditions

今回の検証計算では,液体水銀を弾性体として近似した擬 似流体中の圧力波の伝播を計算している.このときの基礎方 程式と半離散式は以下の通りである.

$$\sum_{k} \frac{\Im s_{ik}}{\Pi x_{k}} + b_{i} = \mathbf{r} \, \vec{u}_{i}, (i = 1, 2, 3)$$

$$s_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} \mathbf{e}_{kl}, (i, j = 1, 2, 3)$$

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Im u_{i}}{\Im x_{j}} + \frac{\Im u_{j}}{\Im x_{i}} \right), (i, j = 1, 2, 3)$$

$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} \{ \vec{d} \} + \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \{ \vec{d} \} + \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \{ d \} = \{ f \}$$
$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} = \int_{\Omega} \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}' \mathbf{r} \begin{bmatrix} N \end{bmatrix} d\Omega$$
$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} = \int_{\Omega} \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} d\Omega$$

商用コード(LS-Dyna)の時間積分スキームは,中心差分 法である.

$$d_{n+1} = d_n + \Delta t \cdot v_{n+\frac{1}{2}}, \quad v_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(v_{n+1} + v_n)$$

一方,開発コードの時間積分スキームとして,中心差分法 とその亜種の2通りを検証した.中心差分法の亜種とは,以 下の差分式に従う手法であり,通常の中心差分法に比べて, 変位の式の右辺に第3項が付加されている.

$$d_{n+1} = d_n + \Delta t \cdot v_{n+\frac{1}{2}} + \frac{1}{m} \Delta t^2 \cdot a_n, \quad v_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (v_{n+1} + v_n)$$

検証計算の結果を Figure3.1 ~ Figure3.3 , Figure4.1 ~ Figure4.3 に示す.上から,円柱状の擬似流体の上部,中部, 底部のそれぞれにおける変位の時刻歴を示している.

検証計算の結果,中心差分法の場合には,開発コードと LS-Dyna との計算結果のトレンド成分は一致するものの,開 発コードの方は細かい振動が顕著となる結果となった.一方, 中心差分法の亜種の場合には,細かい振動がなくなり,開発 コードとLS-Dynaとの計算結果が十分一致することが分かっ た.

中心差分法とその亜種との相違点が時間積分に与える影響を考えるために,基礎方程式を時間発展の形に変形し,中 心差分法の亜種の効果を検討した.以下の式は上から,基礎 方程式(半離散化後の節点変位に関する常微分方程式),中 心差分法,中心差分法の亜種のそれぞれを時間発展の形に変 形した式である.

基礎方程式:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} d \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & E \\ M^{-1}K & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ v \end{pmatrix}$$

中心差分法:

$$\frac{1}{\Delta t} \left\{ \begin{pmatrix} d_{n+1} \\ v_{n+\frac{1}{2}} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} d_n \\ v_{n-\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} \Delta M^{-1} f_n \\ M^{-1} f_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\Delta M^{-1} K & E \\ M^{-1} K & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_n \\ v_{n-\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

中心差分法の亜種:

$$\frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{pmatrix} d_{n+1} \\ v_{n+\frac{1}{2}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_n \\ v_{n-\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \right\} = \left(\Delta \left(1 + \frac{1}{m} \right) M^1 f_n \right) + \left(-\Delta \left(1 + \frac{1}{m} \right) M^1 K E \right) \begin{pmatrix} d_n \\ v_{n-\frac{1}{2}} \end{pmatrix} M^1 f_n + \left(-\Delta \left(1 + \frac{1}{m} \right) M^1 K E \right) \begin{pmatrix} d_n \\ v_{n-\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \right)$$

上式を比較すると,中心差分法の亜種では,中心差分法に 比べて空間方向に $\Delta t \left(\frac{1}{m}\right) M^{-1} K$ の分だけ平滑化されている

ことがわかる.即ち,中心差分法の亜種では右辺第3項を付加することによって,人工的に数値拡散の効果を付加したことに相当することがわかる.

現在は、キャビテーションの発生・消滅の可能性を検討す るために、単体バブル動力学モデルとの連成解析の準備を進 めている。今後は、開発コードの完成度を高めながら、連成 解析に対応していく予定である.



Figure 3.1: Structure analysis for cylindrical vessel comparing with commercial code(LS-Dyna) (displacement response of cylindrical shaped vessel on top level)



Figure 3.2: Structure analysis for cylindrical vessel comparing with commercial code(LS-Dyna) (displacement response of cylindrical shaped vessel on middle level)



Figure3.3: Structure analysis for cylindrical vessel comparing with commercial code(LS-Dyna) (displacement response of cylindrical shaped vessel on bottom level)







Figure 4.2: Displacement response (time=1.0e-4 sec.)



Figure 4.3: Displacement response (time=1.8e-4 sec.)

6.おわりに

日本原子力研究所では、中性子科学研究センターシステム 工学グループと計算科学技術推進センター並列計算法開発 グループ(及び数値実験グループ)とが共同して、核破砕水 銀ターゲットシミュレータの研究開発に取り組んでいる.水 銀ターゲットの流体構造連成解析では、弱連成に基づく計算 手法を設計しており、とくにインターフェイスコードとして は、MpCCIを採用することが有望である.また、並列計算 用構造解析コードを開発しており、商用コードとほぼ同等の 計算結果が得られることを確認した.

今後は、水銀ターゲットに特有のキャビテーションの発生 可能性を検討しながら、設計に貢献できる流体構造連成解析 コードの開発を続ける予定である.

参考文献

[1] 大西亮一,太田高志,木村俊哉,"並列計算機による多原 理統合型 CFD シミュレーションの概念設計", JAERI-Data/Code, 96-031