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

小林謙一⁽¹⁾, 荒川忠一⁽³⁾, 今井隆太⁽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⁾ KOBAYASHI Kenichi, ARAKAWA Chuichi, IMAI Ryuta, 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. We have used STAR-CD(Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions Computational Dynamics) for design of the mercury target, and confirmed its accuracy by the experiments. We consider to couple STAR-CD with the original structure analysis code. In order to obtain the properties of turbulence models of STAR-CD, we investigated the relation between the high Reynolds number K- model and the boundary condition on the walls.

1.背景

日本原子力研究所が大強度陽子加速器計画の中核施設と なる中性子実験施設の中性子供給源として開発を進めてい る水銀ターゲットの設計に当たり、中性子科学研究センタ ーは、水銀ターゲット内での停滞流を抑え、熱を効率よく 排除するための形状および構造を検討し、クロスフロー型 の水銀ターゲット[Cross-Flow type Target:CFT]を考案 [1](Fig.1)し、原寸大モデルを作成し、水による検証実験 を繰り返し行ない、熱流動解析コード STAR-CD の解析結果 との比較を行なった。その結果、流動解析および熱伝達解 析について実験と解析結果はよい一致を見た。(Fig.2)

一方、陽子ビーム入射時のターゲットの構造強度解析で は、容器ビーム窓の熱衝撃問題に加え、水銀の膨張に伴う 圧力波の伝播・反射と容器の変形などの相乗効果により強 い負圧が生じるという問題が出てきた。こうした負圧は、 容器壁を損傷するキャビテーションの発生につながること が示唆され、これに対する対策も必要となった。

これらの解析コードは、現象をマクロに扱い、さらに、 流体・構造連成解析のなかで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。こうした状況のもとで、 既に飛行機の翼周りでの気流と翼構造の連成解析[2]に経験 をもつ計算科学技術推進センターの並列計算法開発グルー プが、水銀ターゲットの流体・構造解析コードの開発を開 始した。これはその第一報である。



Fig.1 Target model made of acrylic resin

2.水銀ターゲット流体構造解析コードの概要

本研究開発にあたり、実験施設の建設計画との兼ね合い から、時間的制約が大きな問題となった。そこで、既存コ ードの有効利用が必要とされた。構造解析コードについて は既に自主開発コードをもっているものの、圧縮性流体コ ードである既存の連成コードを水銀ターゲットに応用する のは困難と判断した。幸いにも、既にターゲットの熱流動 解析で用いていた STAR-CD はキャビテーション解析機能を 有しており、これと構造解析コードのカップリングで、連 成解析コードを実現することにした。しかし、STAR-CD の現 バージョンの機能では不十分であり、機能拡充について、 開発元との共同研究を提案している。STAR-CD と構造解析コ ードの連成にあたっては、MpCCIの導入も視野においている。 2.1 STAR-CD 概要

水銀の流体構造連成解析コード開発に当たって、前述の ように汎用熱流動解析コード STAR-CD(Computational Dynamics,英国/CD-ADAPCO JAPAN)を用いることにした。 STAR-CD は、有限体積法に基づいた SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 法、 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)法、 SIMPISO(SIMPLE 法+PISO 法)を解析アルゴリズムとして採用 して陰的に代数有限体積方程式を解いている。SIMPLE 法お よび SIMPISO 法は定常状態の計算に適し、PISO 法ほ非定常 状態の計算に適している。

2.2 CFT の流動解析

中性子実験グループは、STAR-CD の精度を確かめるために 原寸大のアクリル模型(Fig1)を用いて水流動実験をおこ なった。その結果を Fig.2 に示す。実験では、Particle Imaging Velocimetry(PIV)法を用いて流れを可視化し、 速度分布を測定した。一方、STAR-CD による計算では、入り 口流速を一定にし、出口側では自由流出という境界条件の 元、SIMPLE 法を用いて定常状態を求めた。上図が、実験に よる測定結果であり、下図が STAR-CD による計算結果であ る。比較により、実験結果と計算結果は、よく一致してい ることがわかる。

Inlet Velocity : 3m/s



Analytical Result : 3m/s



Fig.2 Distribution of the velocity

3.流体コード開発の現状

前章で見たように、STAR-CD が水流動実験を十分再現しう ることが確かめられたので、シミュレータの流体解析コー ドとして、STAR-CD の採用を決定した。

第1章で述べたように、ターゲットの安全性を確保する 上で、核破砕時に発生する熱の処理が重要になってくる。 ターゲット内での熱分布を正確に把握するためには、乱流 の評価が重要である。STAR-CDには、いくつかのk - モデ ルをはじめとするいくつかの乱流オプションがある。ここ では、工学的によく使われる高レイノルズk - モデルを採 用する。また、合わせて重要な課題となるキャビテーショ ン崩壊による腐蝕に伴う容器壁の粗さを考慮するために、 壁法則のパラメータの変更による熱分布の相違について考 察する。

3.1 解析条件

ターゲット内の熱分布を調べるために、水銀の物性値と して Table 1 の値を与えた。

密度	13112.3kg/m ³
粘性係数	$1.04 \times 10^{-3} Pa \cdot s$
比熱	135.5J/kg·K

Table 1 The Properties of Mercury

Fig.3 に、陽子ビームによる発熱分布を示した。ビーム窓は 13cm × 5cm とした。発熱密度はビーム窓から 3cm ほどのとこ ろで最大となり、ビーム窓から離れるにしたがって小さく なる。



境界条件は、50の水銀を入り口平均流速1m/sで流し込み、出口では、自由に流出させる。

固体と流体の接触面での境界条件は、STAR-CDの壁関数を 用いて与えた。壁関数は以下のようにして与えられる。[1]

$$u^{+} = \begin{cases} y^{+} , y^{+} \leq y_{m} \\ \frac{1}{k} \ln(Ey^{+}) , y^{+} \geq y_{m} \\ u^{+} : (u - u_{w})/u_{t} \\ u : 接線方向の流速 \\ u_{w} : 壁面速度 \\ u_{t} : (t_{w}/r)^{1/2} \\ t_{w} : 壁面せん断応力 \\ y^{+} : rC_{m}^{1/4}k^{1/2}y/m \end{cases}$$

ここで

$$y_m - \frac{1}{k} \ln(Ey_m) = 0$$

である。E, は実験定数で、デフォルトでは、それぞれ9.0、 0.42 である。 y_m は、速度の接線成分がゼロとなる点から 壁までの距離に対応しており、壁の粗さの目安となる。今 回の解析では、E の値を小さくすることでy_mを大きくし、 壁の粗さの影響を調べた。

3.2 解析結果

今回の解析において、計算領域を約54万の非構造メッシュに分割した。特に、熱の集中が予想されるターゲットの中心領域にメッシュを集中した。メッシュの大きさは、固体壁近傍で1mm程度にした。水銀は、右下より流入させ、右上から流出させる。陽子ビームは左より連続的に入射させ、SIMPLE法により、定常状態を求めた。

Fig.4、Fig.5 に、それぞれ、E=9.0、4.5 の場合の温度分 布を示す。水銀流の上流側では、温度上昇がほとんど見ら れない。発熱密度分布のピークは、ターゲットの中心線上、 ビーム窓から 30mm のところにするが、定常状態の温度分布 の最高温度は下流側に存在する。ターゲット内の速度分布 との対応を見ると、水銀流が下流側の案内羽にあたり、流 速が遅くなる領域に最高温度点が存在することがわかる。 最高温度は、Fig.4、Fig.5 でそれぞれ、300 、273 であ る。E=4.5 の場合、 ymが大きくなり、固体壁近傍の速度勾 配が小さくなったために、エネルギー損失が抑制されるた めに温度上昇が押さえられたために、Fig.5 の最高温度が下 がったものと考えられる。



Fig.4 Distribution of Temperature (E=9.0)



4.まとめ

水銀ターゲットの開発に当たり、設計に必要なデーター 収拾のために流体・構造解析シミュレータの開発に着手し た。

流体コードは STAR-CD を導入し、そのコードの特徴につ いて調査中である。今回は、将来、キャビテーションを考 慮した際に考えられる固体壁の腐食の影響を考慮するため に、

STAR-CD 実装の壁関数の実験定数 E を変化させた場合のター ゲット内温度分布への影響を調べた。その結果、E を小さく して、壁を荒くすると最高温度が下がることがわかった。

参考文献

[1]寺田、神永、木下、日野、内田、安保、"ブレードタイプ クロスフロー型水銀ターゲットの開発"、JAERI-Tech、

1

99-073

[2]Kimura , T. , Takemiya , H. and Onishi , R "CFD/CSD COUPLED SIMULATION ON A PARALLEL COMPUTER CLUSTER" AIAA-99-3275