流体構造連成解析システム

JUPITER-FrontISTR の改良

仕様書

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
軽水炉工学研究センター
核工学・炉工学研究グループ

第 1 章　一般仕様

1. 件名

流体構造連成解析システム JUPITER-FrontISTR の改良

2. 概要

多相多成分三次元熱流動解析コード（JAEA Utility Program for Interdisciplinary Thermal-hydraulics and Engineering Research、以下「JUPITER」）と構造解析コード FrontISTR を用いて整備した流体構造連成解析システム（JUPITER-FrontISTR）を改良し、流体構造連成計算に対する代表的なベンチマーク問題である Turek 問題で検証する。

本作業では、FrontISTR により計算された構造体表面の速度を流体解析に反映できるよう、JUPITER に実装されている埋め込み境界法（Immersed Boundary Method、以下「IBM 法」）を改良する。また、JUPITER と FrontISTR による弱連成解析において、所定の連成間隔ごとに解析結果を受け渡すため、JUPITER の解析時刻が次の連成時刻を超えないように時間ステップ幅を調整し、両コードの解析時刻を連成時刻に同期させる機能を実装する。これらの機能を用いて、Turek 問題の解析を実施する。

3. 契約範囲

JUPITER コードに「2. 概要」で示した機能の実装および Turek 問題の解析を行う。また、作業内容について報告書にまとめる。

4. 貸与品

受注者は、本作業遂行上必要であると原子力機構が認めたプログラム等の無償貸与を、作業期間内に限り受けることができる。また、プログラム等は作業終了時に返却すること。

5. 納期

令和 9 年 2 月 26 日（金）

6. 提出書類

(1) 実施計画書（契約後速やかに）　1 部
(2) 作業工程表（契約後速やかに）　1 部
(3) 契約先の資本関係・役員の情報、本契約の実施場所、従事者の所属・専門性（情報セキュリティに係る資格・研修等）・実績及び国籍についての情報を記した書類（契約後速やかに）　1 部
(4) 情報セキュリティ実施状況確認書（契約後速やかに）　1 部

(5) 報告書 (機構指定様式) 1 部
(6) 報告書および解析データ（DVD-R 等） 1 部
(7) その他原子力機構が必要とする書類（随時） 1 部

（提出場所）
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
軽水炉工学研究センター　核工学・炉工学研究グループ（第 2 研究棟 135 号室）

7. 検収条件

内容検査の合格、「6. 提出書類」の確認並びに、原子力機構が仕様書の定める業務が実施されたと認めた時を以て、業務完了とする。

8. 品質管理

原子力機構は、受注者の品質保証活動が計画通りに実施されていることを確認するため、受注者に対して監査を行うことができるものとする。

9. グリーン購入法の推進

(1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA 機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。
(2) 本仕様に定める提出書類（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

10. 特記事項

(1) 納入物件の所有権および納入物件に係わる著作権（著作権法第 27 条および第 28 条に規定する権利を含む）は、原子力機構に帰属するものとする。
(2) 受注者は、本契約により新たに発生し、また原子力機構により開示した情報に付加させた情報（但し、受注者が引合い前から自己所有していた情報を除く。以下、「成果情報」）の機密を保ち、第三者に漏えいしないよう適切な措置を講じ、措置結果とそれを証明する書類を提出すること。
(3) 成果情報の外部発表もしくは公開、または第三者への公開は行わないこととする。但し、原子力機構の文書による承認を得た場合はこの限りではない。
(4) 貸与物件は、契約終了後速やかに原子力機構に返還するものとする。
(5) 貸与情報および成果情報の目的外使用を禁止する。
(6) 貸与情報および成果情報の第三者使用を禁止する。
(7) 受注者は貸与情報および成果情報の機密保持の義務を負う。
(8) 契約終了後は、貸与情報の返還後、諸データ類の消去義務を負う。消去結果を証

明する書類を提出すること。

（9）JUPITER、FrontISTR の実行環境の整備および実行は受注者の責任として実施すること。

（10）受注者は、上記の各項目に従わないことにより生じた、原子力機構の損害およびその他の損害についてすべての責を負うものとする。

11. 協議

本仕様書に記載されている事項および本仕様書に記載のない事項について疑義が生じた場合は、原子力機構と協議の上、その決定に従うものとする。

12. 情報セキュリティ強化に係る特約条項

受注者（以下「乙」という。）は、本契約の履行に当たり、情報セキュリティの強化のため、契約条項記載の情報セキュリティに係る遵守事項に加え、以下に特約する内容を遵守するものとする。

（情報セキュリティインシデント発生時の対処方法及び報告手順）

第１条 乙は、情報セキュリティインシデントが発生した際の対処方法（受注業務を一時中断することを含む。）及び発注者（以下「甲」という。）に報告する手順について整備しておかなければならない。

（情報セキュリティ強化のための遵守事項）

第２条 乙は、次の各号に掲げる事項を遵守するほか、甲の情報セキュリティ強化のために、甲が必要な指示を行ったときは、その指示に従わなければならない。

(1) この契約の業務を実施する場所を、情報セキュリティを確保できる場所に限定し、それ以外の場所で作業をさせないこと。

(2) 業務担当者に遵守すべき情報セキュリティ対策について教育・訓練等を受講させるとともに、業務担当者には甲の情報セキュリティ確保に不断に取り組み、甲の情報及び情報システムの保護に危険を及ぼす行為をしないよう誓約させること。また、業務担当者の異動・退職等の際には異動・退職後も守秘義務を負うことを誓約させ、これを遵守させること。

(3) 暗号化を要する場合は、「電子政府推奨暗号リスト」に記載された暗号化方式を実装し、暗号鍵を適切に管理すること。

(4) 甲の承諾のない限り、この契約に関して知り得た情報を受注した業務の遂行以外の目的で利用しないこと。

(5) 甲が提供する情報を取り扱う情報システムへの不正アクセスを検知・抑止するために、ログを取得・監視し全ての業務担当者についてシステム操作履歴を取得すること。

(6) 甲が提供する情報を格納する装置、機器、記録媒体及び紙媒体について、業務担当者のみがアクセスできるよう施錠管理や入退室管理を行い、セキュアな記録媒

体の使用や使用を想定しない USB ポートの無効化、機器等の廃棄時・再利用時のデータ抹消など想定外の情報利用を防止すること。

(7) 情報システムの変更に係る検知機能やログ解析機能を実装し、外部ネットワークへの接続を伴う非ローカルの運用管理セッションの確立時には、多要素主体認証を要求するとともに定期的及び重大な脆弱性の公表時に脆弱性スキャンを実施し、適時の脆弱性対策を行うこと。

(8) システムの欠陥の是正及び脆弱性対策について、対策計画を策定し実施するとともに、システムの欠陥の是正及び脆弱性対策等の情報セキュリティ対策が有効に機能していることの継続的な監視と確認を行うこと。

(9) 委任をし、又は下請負をさせた場合は、当該委任又は下請負を受けた者に対して、業務担当者が遵守すべき情報セキュリティ対策についての教育・訓練等を行うこと。

(10) 契約条項に基づき甲が乙に対して行う情報セキュリティ対策の実施状況についての監査の結果、情報セキュリティ対策の履行が不十分である場合には、甲と協議の上改善を行い、甲の承諾を得ること。

(11) 契約の履行期間を通じて前各号に示す情報セキュリティ対策が適切に実施されたことの報告を含む検収を受けること。また、本契約の履行に関し、甲から提供を受けた情報を含め、本契約において取り扱った情報の返却、廃棄又は抹消を行うこと。

13. 大型計算機の利用について

□　大型計算機（SGI8600）を利用しない

☒　大型計算機（SGI8600）を利用する

本作業を行うに当たり、受注者は原子力機構の大型計算機を使用する。ただし、CPU ノード 12,000 ノード時間、GPU ノード 6,000 ノード時間を限度とし、この時間を超える場合は別途協議の上、原子力機構が対応するものとする。また、計算機の利用に当たっては原子力機構の利用規則を遵守するものとする。なお、使用に際しての習熟等については受注者にて行うこととする。

第２章　技術仕様

1. 概要

本作業では、原子力機構で開発している最新版の多相多成分三次元熱流動解析コード JUPITER と構造解析コード FrontISTR を用いて整備した流体構造連成解析システム（JUPITER-FrontSITR）を改良し、の代表的なベンチマーク問題である Turek 問題の弱連成解析を実施する。

JUPITER による流体解析において、移動および変形する構造体の運動を考慮するため、JUPITER に実装されている IBM 法を改良する。具体的には、FrontISTR により計算された構造体表面の速度を JUPITER の固体表面速度として保持し、当該速度に基づいて IBM 法の粘性計算をすることにより、構造体表面の運動を流体計算に反映できる機能を実装する。

また、JUPITER と FrontISTR による弱連成解析において、所定の連成間隔ごとに流体解析結果および構造解析結果を受け渡すため、JUPITER の時間ステップ幅を調整する機能を実装する。JUPITER では CFL 条件に基づいて決定される時間ステップ幅を基本とし、解析時刻が次の連成時刻を超える場合には、当該連成時刻で解析を終了するよう時間ステップ幅を調整する。これにより、JUPITER と FrontISTR の解析時刻を連成時刻に同期させる。

これらの改良を加えた JUPITER-FrontISTR を用いて、流路内に設置された円柱およびその後方に接続された弾性構造物を対象とする Turek 問題の弱連成解析を２次元で実施し、流体場、圧力場および構造物の変位等の解析結果を取得する。

2. 作業実施内容

2.1 流体構造連成解析システムの改良

2.1.1 固体速度を考慮した埋め込み境界法の改良

JUPITER に実装されている埋め込み境界法（Immersed Boundary Method: IBM）について、FrontISTR で計算された構造物表面速度を境界条件として利用できるよう改良を行う。構造物表面速度は FrontISTR の解析結果から取得し、JUPITER の固体表面速度として設定する。また、FrontISTR から出力される構造物表面速度を JUPITER で利用するためのデータ受け渡し機能を整備し、連成解析において構造解析結果を流体解析へ反映できるようにする。

2.1.2 JUPITER-FrontISTR 連成解析における時間ステップ調整機能の実装

JUPITER と FrontISTR による弱連成解析において、所定の連成間隔ごとに流体解析結果および構造解析結果を受け渡すため、JUPITER の時間ステップ幅を調整する機

能を実装する。JUPITER では、流体計算の安定性を確保するため、CFL 条件に基づいて時間ステップ幅が決定される。この時間ステップ幅による解析時刻が次の連成時刻を超える場合には、当該連成時刻より前に解析を終了するよう時間ステップ幅を調整する。これにより、JUPITER と FrontISTR の解析時刻を所定の連成時刻に同期させ、両コード間で解析結果を受け渡せるようにする。

2.2 改良した流体構造連成解析システムの検証のための Turek 問題の解析

2.1 で整備した機能を用いて、Turek らが提案した流体構造連成解析ベンチマーク問題の解析を実施する。Turek 問題の解析条件は、流体構造連成解析に対応したオープンソースの解析コード Kratos Multiphysics[1]の検証問題として利用されている条件を利用する。

解析体系は、流路内に設置された円柱後流中の弾性構造物を対象とし、JUPITER により流体場を計算するとともに、FrontISTR により構造物の変形挙動を計算する。両コード間で流体力および構造物変位・速度情報を交換することにより弱連成解析を実施する。解析により得られた流速分布、圧力分布ならびに構造物変位履歴（振幅や周期）を整理し、流体構造連成解析結果として取りまとめる。

[1] https://kratosmultiphysics.github.io/Examples/fluid_structure_interaction/validation/fsi_turek_FSI2/

2.3 報告書の作成

2.1 から 2.2 の作業をまとめ、報告書を作成する。なお、文章については WORD（WINDOWS 版）あるいは互換性のあるソフトで作成するものとする。電子媒体（DVD-R 等）には、解析コードから出力される一連のデータファイル（インプットデータファイル、リスタートファイル等を含む）、報告書および報告書に用いた図（表計算ソフトおよび図画作成ソフトのデジタルデータおよびファイル）を格納すること。

3. 大型計算機の利用について

本作業を行うに当たり、受注者は原子力機構の大型計算機を使用する。ただし、CPU ノード 12,000 ノード時間、GPU ノード 6,000 ノード時間を限度とし、この時間を超える場合は別途協議の上、原子力機構が対応するものとする。また、計算機の利用に当たっては原子力機構の利用規則を遵守するものとする。なお、使用に際しての習熟等については受注者にて行うこととする。

4. その他（特記事項）

(1) 本件の遂行においては、数値流体力学および数値計算手法に関する専門的な知識を有し、C 言語による流体コード作成および改良等のプログラミング作業、数値解析の実行および評価分析に関わる技術力を有することが必要である。特に、JUPITER

による IBM 法を用いた固液混相解析および FrontISTR との流体構造連成解析に関する知見・技術力を有することが必要である。また、JUPITER の環境構築、入力ファイルの作成および利用の習熟は受注者の責任にて行うこと。

(2) 本件では、原子炉設計データに関わる情報を扱うこと、および解析コード管理および解析コードのトレーサビリティ（品質保証）確保の観点から、本作業に用いる JUPITER とデータコンバーターの原子力機構外への持ち出しは不可とする。大型計算機での開発・実行に関する環境及び作業場所については原子力機構との協議により決定する。

(3) 本作業は、(2) と同じ理由から、全ての解析は、原子力機構で所有する大型計算機（SGI8600）で実施することとする。計算機の仕様等の情報については原子力機構から提供するが、使用に際しての習熟は受注者の責任にて行うこと。したがって、受注者は大規模な PC クラスタ計算機に係わる一般的な知識を有すること。

(4) コード管理は、Git 及び GitHub を用いること。Git および GitHub によるコード管理の習熟は受注者の責任にて行うこと。

(5) 「2. 作業実施内容」のうち、2.3 を除くものについては、原子力機構の大型計算機上でのみ行うこととする。また、「2. 作業実施内容」の修正が必要になる場合は原子力機構と協議する。

(6) ポスト処理（可視化）に関しては、汎用性、大規模データに対する優位性の観点から、parallel vtu (pvtu)フォーマット及び XDFM フォーマットを用い、Paraview による分散可視化で対応する。可視化対象は、流速分布、圧力分布、構造物変位及び構造物速度分布等とする。

(7) 本作業で用いる FrontISTR は、 https://www.frontistr.com/download/から入手することとし、 FrontISTR 用入力データの作成、JUPITER-FrontISTR による連成解析に関わる実行環境整備は受注者の責任にて行うこと。

(8) JUPITER は CMake により ビ ル ド す る こ と 。 CMake は https://cmake.org/download/から入手し、大型計算機への導入と習熟は受注者の責任にて行うこと。ビルド要件を以下に示す。

- C99 に準拠し、OpenMP3.0 が使用できる C コンパイラ
- GCC の場合は、4.3 以降
- Intel Compiler（Linux）の場合は、11.1 以降で、かつ GCC4.3 以降
- MPI ライブラリ（MPI2.1 以降の使用に準拠しているもの）
- CMake 2.8.12 以降を用い、3.6 以降推奨

(9) JUPITER のビルドには、re2c (Regular Expression to C)が必要である。re2c の入手は https://github.com/skvadrik/re2c から行うこと。また、大型計算機への導入は受注者の責任にて行うこと。

(10) 本作業において作成した JUPITER-FrontISTR による連成解析用のコンバータ、実行スクリプト及び関連する設定ファイルは、作業終了時に解析データとともに電

子媒体へ格納し、納入すること。

以上

情報セキュリティ強化に係る特約条項

受注者（以下「乙」という。）は、本契約の履行に当たり、情報セキュリティの強化のため、契約条項記載の情報セキュリティに係る遵守事項に加え、以下に特約する内容を遵守するものとする。

（情報セキュリティインシデント発生時の対処方法及び報告手順）

第１条 乙は、情報セキュリティインシデントが発生した際の対処方法（受注業務を一時中断することを含む。）及び発注者（以下「甲」という。）に報告する手順について整備しておかなければならない。

（情報セキュリティ強化のための遵守事項）

第２条 乙は、次の各号に掲げる事項を遵守するほか、甲の情報セキュリティ強化のために、甲が必要な指示を行ったときは、その指示に従わなければならない。

(1) この契約の業務を実施する場所を、情報セキュリティを確保できる場所に限定し、それ以外の場所で作業をさせないこと。

(2) 業務担当者に遵守すべき情報セキュリティ対策について教育・訓練等を受講させるとともに、業務担当者には甲の情報セキュリティ確保に不断に取り組み、甲の情報及び情報システムの保護に危険を及ぼす行為をしないよう誓約させること。また、業務担当者の異動・退職等の際には異動・退職後も守秘義務を負うことを誓約させ、これを遵守させること。

(3) 暗号化を要する場合は、「電子政府推奨暗号リスト」に記載された暗号化方式を実装し、暗号鍵を適切に管理すること。

(4) 甲の承諾のない限り、この契約に関して知り得た情報を受注した業務の遂行以外の目的で利用しないこと。

(5) 甲が提供する情報を取り扱う情報システムへの不正アクセスを検知・抑止するために、ログを取得・監視し全ての業務担当者についてシステム操作履歴を取得すること。

(6) 甲が提供する情報を格納する装置、機器、記録媒体及び紙媒体について、業務担当者のみがアクセスできるよう施錠管理や入退室管理を行い、セキュアな記録媒体の使用や使用を想定しないUSBポートの無効化、機器等の廃棄時・再利用時のデータ抹消など想定外の情報利用を防止すること。

(7) 情報システムの変更に係る検知機能やログ解析機能を実装し、外部ネットワークへの接続を伴う非ローカルの運用管理セッションの確立時には、多要素主体認証を要求するとともに定期的及び重大な脆弱性の公表時に脆弱性スキャンを実施し、適時の脆弱性対策を行うこと。

(8) システムの欠陥の是正及び脆弱性対策について、対策計画を策定し実施するとともに、システムの欠陥の是正及び脆弱性対策等の情報セキュリティ対策が有効に機能していることの継続的な監視と確認を行うこと。

(9) 委任をし、又は下請負をさせた場合は、当該委任又は下請負を受けた者に対して、業務担当者が遵守すべき情報セキュリティ対策についての教育・訓練等を行うこと。

(10) 契約条項に基づき甲が乙に対して行う情報セキュリティ対策の実施状況についての監査の結果、情報セキュリティ対策の履行が不十分である場合には、甲と協議の上改善を行い、甲の承諾を得ること。

(11) 契約の履行期間を通じて前各号に示す情報セキュリティ対策が適切に実施されたことの報告を含む検収を受けること。また、本契約の履行に関し、甲から提供を受けた情報を含め、本契約において取り扱った情報の返却、廃棄又は抹消を行うこと。