

**千代田化工の解析技術**  
**～流体・構造連成解析のエンジニアリングへの活用～**  
**Fluid and Structure Interaction Analysis for Engineering Applications**

幅 直子                      小島 浩二\*  
Naoko HABA                Kouji KOJIMA

ChAS プロジェクト部 診断・解析プロジェクトセクション \*専門長  
Advanced Engineering and Diagnosis Section, ChAS Project Department

\*\*\*\*\*

**Abstract**

At Chiyoda Corporation, various simulation technologies are used in designing various facilities. CFD analysis and FEM analysis, which are three-dimensional analysis technologies, are also being applied to fluid-structure interaction analysis due to recent improvements in computer performance. Depending on the target phenomenon, it is possible to obtain a result closer to the actual phenomenon by performing the fluid-structure coupled analysis than by analyzing each of them individually. Coupling analysis can be broadly divided into strong-coupling analysis and weak-coupling analysis. In strong-coupling analysis, different phenomena are solved simultaneously without time delay and usually by one comprehensive software platform. In weak-coupling analysis, each phenomenon is analyzed by a dedicated software platform and the calculation result is passed between software platforms. In one-way coupling analysis, the calculation result is passed to the other analysis software once, and in two-way coupling analysis, the calculation result is passed multiple times between both analysis software platforms.

This paper introduces the following four cases; 1. An example of investigating the cause of pipe cracking at a fluid confluence with a temperature difference through one-way coupling analysis, 2. An example of two-way coupling analysis of CFD and FEM for Karman vortices, 3. An example of strong-coupling analysis of CFD and FEM for sloshing, and 4. An example of vibration analysis using a model that combines piping, equipment, and frames.

\*\*\*\*\*

**1. はじめに**

千代田化工では、機器や配管等の各種設備を設計するにあたり、様々なシミュレーションや解析技術を活用しています。例えば、プロセス系解析（定常プロセスシミュレーション、ダイナミック・

シミュレーション、反応モデルシミュレーション)、“熱利用解析”<sup>1)</sup>、熱流体解析(以下 CFD: Computational Fluid Dynamics)、有限要素法を用いた構造解析(以下 FEM: Finite Element Method)は歴史も長く、多くの活用実績を有しています。この中でも、3次元解析技術である CFD 解析や FEM 解析は、物体形状(3次元形状)をそのまま取り込み、物理法則に従って計算するので実験に代えることができ、計算結果の可視化により誰でも現象を視覚的に容易に理解することができます。また、近年のコンピューター性能の向上により、お互いの影響、すなわち、流体と構造物間の相互作用を考慮した**連成解析**が実用的な時間で行えるようになり、単独の解析では解決できなかったような複合的な問題も扱えるようになってきています。本稿では、**流体と構造物間の連成解析**について、弊社における活用事例を紹介します。

## 2. 連成解析とは

連成解析とは広義には、流体や構造物等の複数の物質間での熱、音、振動、磁界、電界、圧電などの物理現象の相互作用を考慮した解析のことで、英語では「Multiphysics Simulation」や「Co-simulation」等と呼ばれます<sup>2)3)</sup>。

流体と構造物では、流体は自由に变形できるのに対し、構造物は自由には变形できないという大きな違いがあります。そのため、CFD 解析と FEM 解析での計算方法は通常異なっています。弊社が主に扱っているプラント設備では流体は容器等の構造物内にあるため、流体と構造物は接触しています。例えば、この状態で流体が構造物を变形させ、その結果、逆に構造物が流体を押し戻す現象が生じる場合、それぞれの現象を個別に解析するよりも、流体と構造物の相互作用を考慮した連成解析を行う方が実現象に近い結果を得ることができます。

図 1 に示すように、連成解析には大きく分けて強連成と弱連成があります。強連成では異なる対象を同時に解析します。強連成には高度な解析ツールが必要となり、計算負荷も高くなります<sup>3)</sup>。一方、弱連成では、それぞれの現象を個別の解析ツールで計算して、ツール間で計算結果の受け渡しを行います。弱連成解析は、強連成解析よりも精度が若干低下しますが、計算負荷がそれほど高くないという利点があります。

例えば、配管に熱湯を一定時間流して放熱させた時の配管の温度変化や变形を解析する場合には、CFD 解析で熱湯を一定時間流した時の配管内面の温度分布や圧力分布を求め、その結果を構造解析ツールに入力して計算することで構造物の变形の挙動を得ることができます<sup>4)</sup>。このようなケースでは弱連成解析で十分な目的を果たすことができ、流体解析ツールから構造解析ツールへの一方向のデータの受け渡しで完結する片方向連成解析を用いることができます。しかし、流体が構造物を变形させ、その結果、逆に構造物が流体の挙動に影響を与えるような現象の場合には、同時に計算(強連

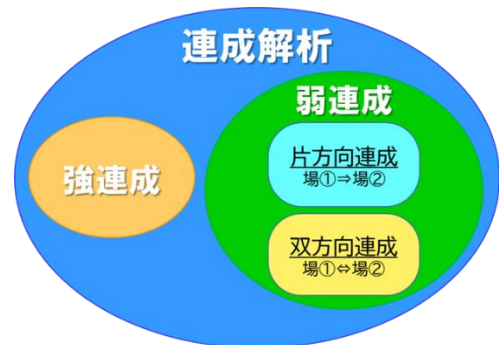


図 1 連成解析の簡易的な分類

成解析) を行うか、流体と構造物を個別に計算しながら、流体から構造、構造から流体へとデータを細かい時間刻みで双方向に受け渡すことを繰り返す、双方向連成解析を行います。

弊社が主に扱っているプラントでは、後述するように、流体と構造物が影響し合う現象は数多くあり、流体と構造物の相互の影響が大きくなる場合、大事故につながる場合があります。このような場合、計算負荷は高くても、強連成もしくは双方向連成解析を行う方が実現象に近い解析結果を得ることができます。近年ではコンピューターの性能が向上したこともあり、お客様のプラントでのトラブル発生時の原因究明や対策立案に連成解析が実用的に活用されています。

### 3. 片方向連成解析活用事例～温度差のある流体合流部の配管割れ原因究明～

温度差のある流体が合流すると双方の流体の温度差と合流のさせ方により、合流部付近で急激な温度変化が生じる場合があります。また、機器の運転変動により、周期的な温度変化が発生し、配管に変動熱応力が生じる場合があります。

この現象を検討するため、(1) 運転データを確認して CFD 解析の条件を設定し、(2) CFD 解析にて配管合流部の温度分布を求め、(3) CFD 解析で得た配管合流部の温度分布を用いて FEM 解析を行った片方向連成解析の事例を紹介します。片方向連成解析は、コンピューターの負荷がそれほど高くないため、トラブルシューティングやその対策としての改造案の立案によく活用されています。以下に検討結果を記します。

#### (1) 運転データの確認と CFD 解析の条件設定

主管を流れるフィード流量と枝管から主管に流入するクエンチガス流量の運転データ (図 2) を確認し、解析条件を設定しました。解析条件は、温度変動の大きくなる以下の 2 ケースとしました。

ケース①：クエンチガス流量割合が低い運転条件の中でもクエンチガス流量が大きいケース

ケース②：クエンチガス流量割合が低い運転条件の中でもクエンチガス流量が小さいケース

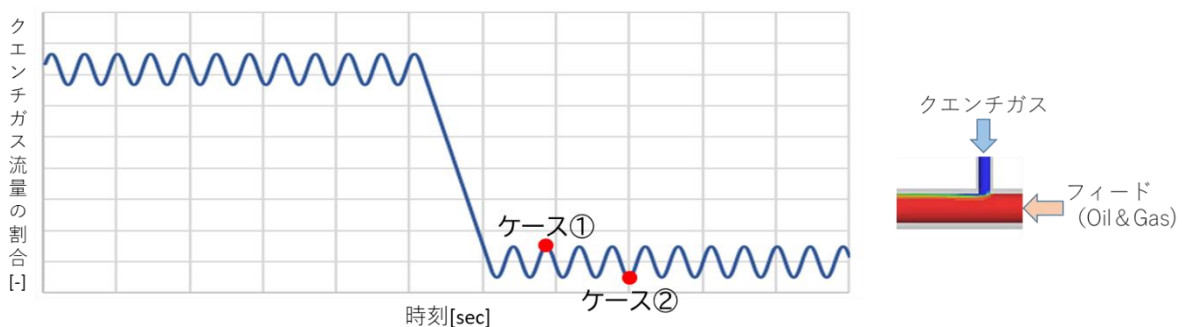


図 2 フィード流量に対するクエンチガス流量の割合の時間変動

(2) CFD 解析による配管合流部の温度分布の計算

(1)で決定した解析条件にて、CFD 解析および伝熱解析で配管内の気液二相流および合流部付近の温度分布を確認しました。

本事例では、解析ツールとして CFX(ANSYS 社製)を使用しました。

解析結果を図 3 に示します。ケース①とケース②の解析結果を比較することにより、クエンチガスの流量変動により配管の内表面温度が大きく変化することがわかります。

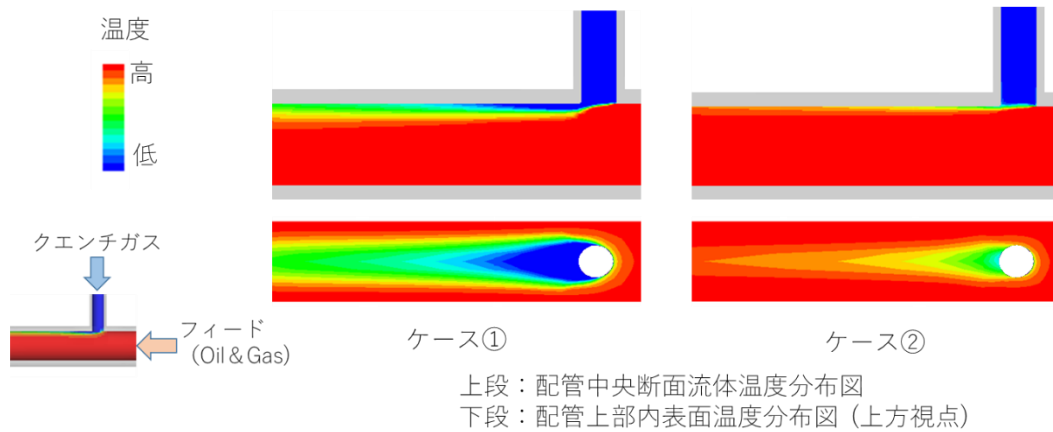


図 3 CFD解析による配管合流部の温度分布解析結果

(3) CFD 解析で得た配管合流部の温度分布を用いた FEM 解析の実施

CFD 解析で得られた配管の温度分布の結果を FEM 解析ツールに入力し、内圧を作用させ熱応力解析を行い、応力分布を確認しました。

解析ツールには、汎用有限要素法プログラム ABAQUS (Dassault Systemes 社製)を使用しました。図 4 に解析結果を示します。この結果より、配管の内表面温度が大きく変化するのに伴い、配管の内表面の長手方向に降伏点を超える大きな引っ張り応力が生じ、繰り返しの応力変動幅が有限の繰返しで破断するレベルになることがわかりました。また、発生応力の最大値位置と実際に割れが生じていた位置はほぼ一致していることが確認できました。

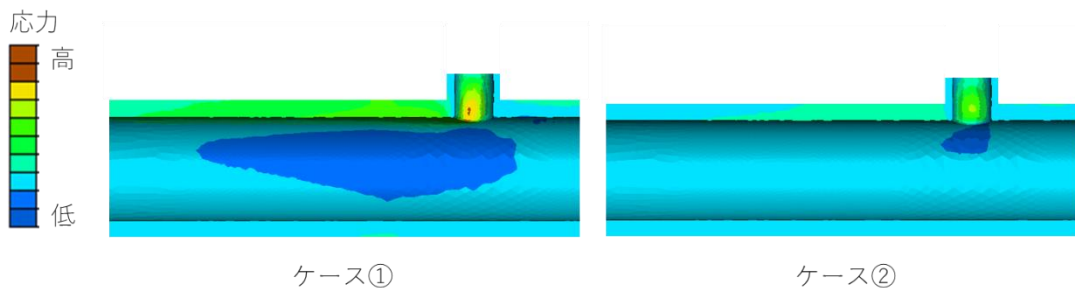


図 4 FEM解析による管軸方向成分の応力分布解析結果

本事例では、流量や気液比の異なる運転条件での解析結果から、配管割れの原因として、流体の混合状態の変動による応力振幅に起因した熱疲労割れと推定できました。このため、流体の混合状態を改善し、配管の応力分布への影響を小さくするために、枝管の構造をインナーノズルタイプへ変更することを提案しました。

#### 4. 双方向連成解析事例～カルマン渦に関する解析<sup>5),6),7)~</sup>

カルマン渦とは、“円柱、角柱のような柱状物体が流れに直角に置かれた時”<sup>8)</sup>、“物体の下流には互い違いに並んだ渦の列が形成される”<sup>8)</sup>ことを言います。この現象は古くからよく知られており、1911年にカルマンが、渦の安定に関する条件を理論的に示したため、この名がついています<sup>8)</sup>。カルマン渦に関する現象は身近なところでも起こっています。例えば、図5に示すような、利尻島の下流に生じている地球規模のカルマン渦もあります。また、送電線が風でヒューヒューと音を出すのもカルマン渦によるものです<sup>10)</sup>。

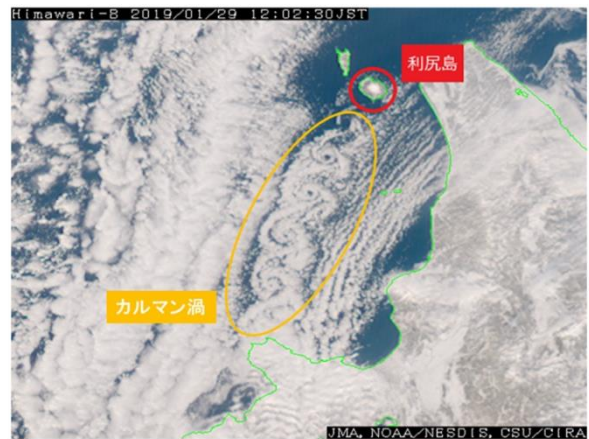


図5 地球規模のカルマン渦 (出典：気象庁HP<sup>9)</sup>)

カルマン渦が放出される時に、構造物には反力として流れ方向と直行する方向に交番荷重（両振り荷重）が作用し、構造物は振動します。渦を放出する振動数と構造物の固有振動数が近接した場合、構造物は大きく振動し、構造物に損傷が発生することがあります。このように渦を放出する振動数が構造物の固有振動数と同期する現象をロックインと呼びます<sup>11)12)</sup>。ASME<sup>\*脚注1</sup>、BS<sup>\*脚注2</sup>、日本機械学会、日本建築学会等では、同現象によるトラブルを回避するための設計基準が示されており、例えば、高い煙突等ではこれらの基準をもとに螺旋状の板を設置するような対策が施されます<sup>13)</sup>。

この現象は本来、流体と構造物を同時に解析する強連成解析で計算すべき現象ですが、ここでは双方向連成解析にて検討を行った事例を紹介します。カルマン渦による構造物の振動現象は、上述のように構造物の後流に生じた渦の影響で起こり、構造物の変位が小さい場合は流れへの影響は無視できますが、ロックイン状態では、構造物の変位が大きくなり流体への影響は無視できません。このような現象では、構造物の固有振動数を考慮し、計算時間刻みを小さくしてCFD解析とFEM解析の各時間刻みでデータの受け渡しを行う双方向連成解析を行うことで、現実に近い結果を得ることができます。解析ツールとして、汎用構造解析プログラム Abaqus/Standard と Abaqus/CFD を用い、双方向流体・構造連成解析を行いました。

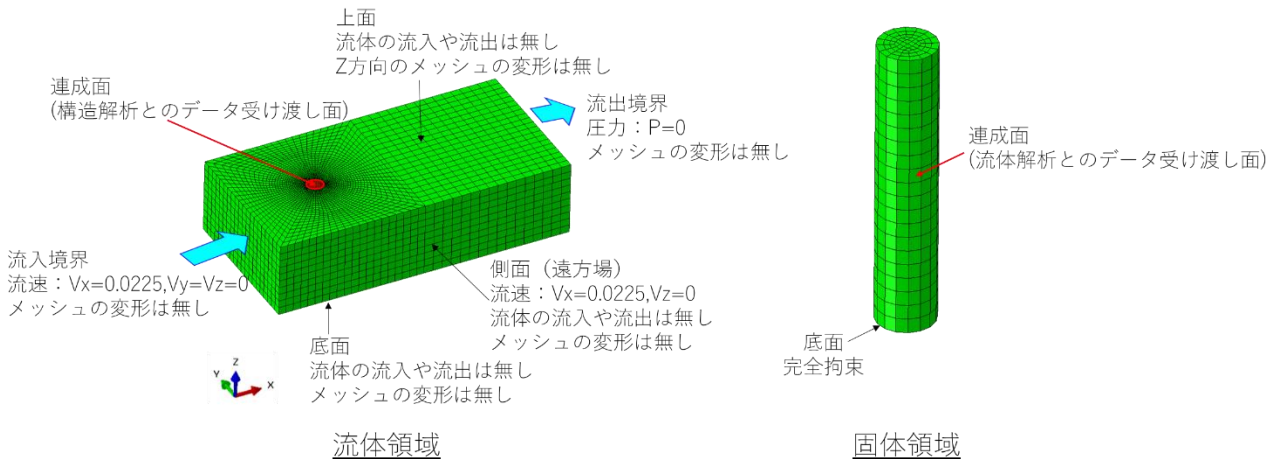


図 6 流体領域と固体領域の解析モデル(メッシュ)と境界条件

図 6 に解析モデルを示します。入口流速 (V) が 0.0225[m/s]で一方向に流れる流体に対し、直径 (D) が 2 cmの円柱を 1 本配置したモデルとしています。流れの強さを表すレイノルズ数 (円柱直径基準) は 300 としています。材料の条件は、密度を 7800[kg/m<sup>3</sup>] とし、ヤング率 (E) をパラメータとして円柱の固有振動数 (f<sub>c</sub>) を変化させて、換算流速 (Vr<sup>\*脚注 3</sup>) が 1、2、3、4、5 となる条件で解析を行いました。

図 7 に Vr=5 の時の解析結果 (圧力等値面図) を示します。図 7 で流体は左手前から右奥に流れています。円柱の後流に交互に圧力の低い部分 (負圧) ができており、カルマン渦ができています。図 8 に換算流速に対する円柱と後流の渦放出振動数を示します。後流の渦放出振動数は、円柱断面の中心から流れ方向に約 2.8D、流れ直角方向に約 0.6D、底面から約 5D の位置の流速の変動振動数を示しています。Vr=5 の時に、円柱の固有振動数と後流の振動数が一致し、ロック

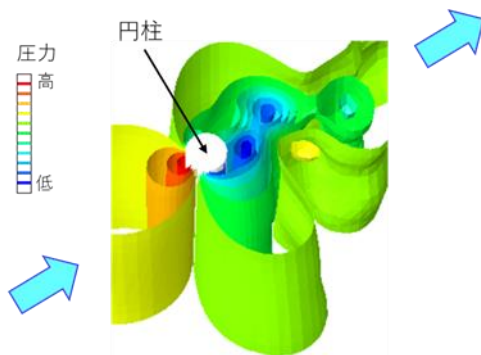


図 7 ある瞬間の円柱周りの圧力等値面図 (Vr=5の場合)

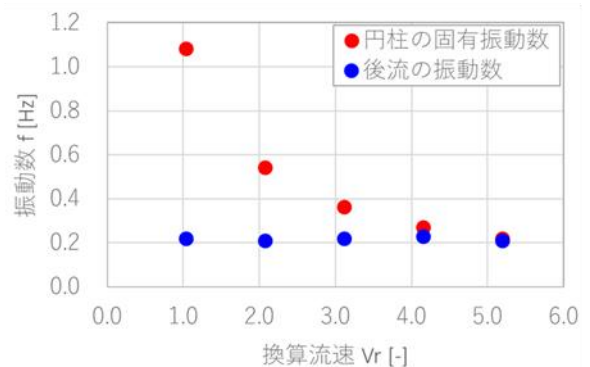


図 8 換算流速に対する円柱と後流の振動周波数

イン状態であることがわかります。図 9 に換算流速に対する円柱の最大振動振幅を示します。ロックイン状態である Vr=5 の場合に振幅が非常に大きくなるのがわかります。

カルマン渦は基礎的な現象であり、実験により多くの知見がまとめられています。弊社では、本章で紹介したような3次元の連成解析によって検討し、解析の妥当性も検証しました。このように、弊社では、工学上問題となる基本的な現象を高度な解析技術により検討・検証し、実際のエンジニアリングにおける解析による具体的な対策立案等に活用しています。

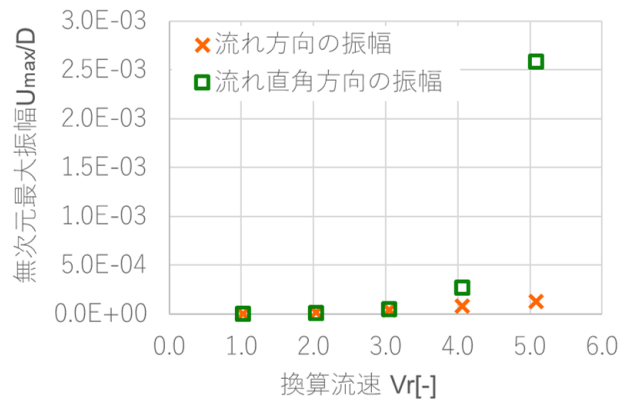


図9 換算流速に対する円柱の最大振幅

### 5. 強連成解析事例～平底タンクのスロッシング～

スロッシングとは、平底タンクなどの容器内の液体が、外部からの比較的長周期の振動により揺動することを指します<sup>12)</sup>。実現象として、例えば地震による石油タンクのスロッシングや輸送船のタンク内容液のスロッシングなどがあり、揺動の大きさによってはタンクの浮き屋根が破壊されたり、内容液が溢れたりして大事故につながる場合があります。2003年十勝沖地震ではスロッシングに起因するナフサタンク火災が発生しています<sup>14)</sup>。

本章では、スロッシング現象について流体・構造連成解析を行った事例を紹介します。解析には強連成で流体・構造連成解析のできる解析ツール ADINA (ADINA R&D 社製) を使用しました。

図10に示すように、スロッシングが発生すると液面が大きく揺動することによりタンクの浮き屋根が損傷を受ける場合があります。従って、浮き屋根の動きを考慮した強連成解析によりタンクが損傷を受けるかどうかの検討を行う必要があります。

また、大きな地震動の短周期の成分が作用した場合、タンク本体が大きく応答し、底部の一部が浮き上がったり、タンクの一部が座屈したりする現象が生じます。現状のタンク設計では、連成荷重を解析によらない簡便な方法で評価していますが、計算にタンク基礎や地盤を考慮する場合や地震波がタンクに入る状態を精緻化する場合など、より精緻な情報が必要になる場合、強連成解析手法が有効になります。

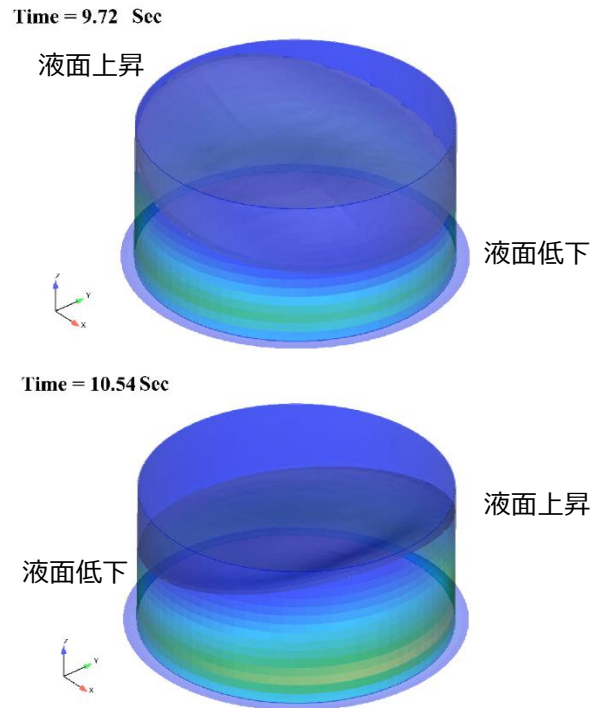


図10 タンクスロッシング解析

## 6. 強連成解析事例～配管・機器・架構を組み合わせたモデルによる振動解析～

強連成解析の2つ目の事例として、「設備内のある機器が振動源となり、配管を介して架構に振動が伝達され、架構で振動が増幅される」現象を紹介します。この場合、異なる機器間（構造物間）の相互作用を求める必要があります。架構は本来、機器や配管等を支持することを目的としていますが、設置した周辺の機器から設計時に想定していなかった振動が発生した場合、相互作用が生じることにより有害な振動が発生する場合があります<sup>15)</sup>。機器や架構および配管は、単体での振動特性と集合体での振動特性が異なるため、この事例では、配管・機器・架構を組み合わせた集合体としての解析モデルを作成して解析を行いました。解析ツールには、建築構造分野の汎用解析ソフトウェア Midas iGen（MIDAS Information Technology 社製）を使用しました。

本事例では、以下の手順で検討を行いました。

- (1) 設計時のデータをもとに、架構、機器、配管および支持構造物を配置。
- (2) 架構、機器、配管、配管支持構造物を適切な条件で接合。
- (3) 固有振動解析を行いモード形状および固有振動数を確認。
- (4) 振動源となっていると推定される機器に、矩形波の衝撃力を作用させ、時刻歴応答解析を実施。その際、別途実施していた実機での振動計測値（方向および振幅）と解析結果が同様な傾向となるように、解析モデルの調整を実施。

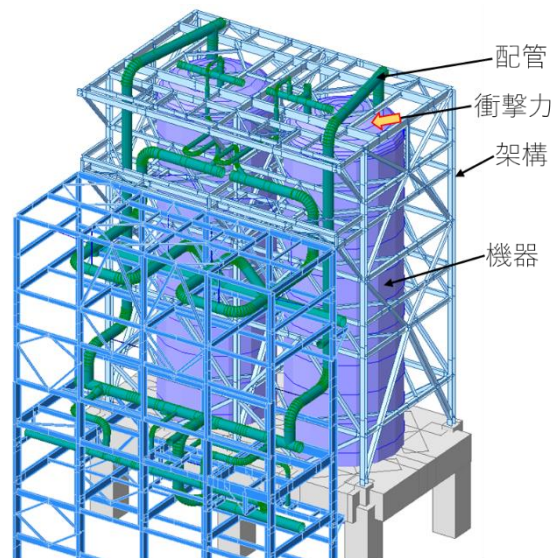


図 11 架構、配管、機器の連成振動解析モデル

本検討で作成した解析モデルを図 11 に示します。本事例では、配管支持構造物に破損が生じたためトラブルシューティングとして検討が実施されました。プラント設計では、通常、架構や機器、配管はそれぞれの設定荷重に基づき、個別の解析ツールを用いて設計され、振動源となるようなポンプ・コンプレッサー等の回転機は、所定の振動レベルになるように基礎設計が行われます。従って、設計時には設備内において有害な振動の発生源は想定されませんが、実機での振動計測の結果から、ある機器の振動が、配管を介して架構まで振動が伝わるのが分かりました。

本事例では、架構、配管、機器の連成振動解析を行うことにより実際の振動現象の傾向を再現することができたため、配管支持構造物設置部位の架構に補強のための梁を追加し振動を低減させ、配管支持構造物

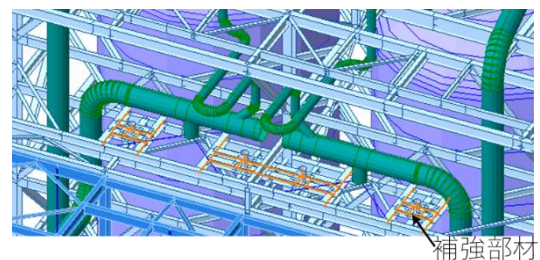


図 12 対策案



を適切なものに変更するという対策案を提案することができました（図 12 参照）。また、振動源が特定できたため検査方法、検査部位、検査周期等の提案も行いました。

## 7. おわりに

本稿では、プラント設計やトラブルシューティングで活用されている CFD 解析と FEM 解析を用いた連成解析の活用事例を紹介しました。これらの例から分かるように連成解析を行うことで、実現象をシミュレーションにより高精度で再現することができ、トラブルの原因究明やその対策に役立てることができます。弊社は、このような高度解析技術を駆使することにより、プラントの安全・安定操業の根幹をなす設計に貢献していきます。

\*脚注 1 ASME : The American Society of Mechanical Engineers (アメリカ機械学会)

\*脚注 2 BS : British Standards (英国規格)

\*脚注 3  $V_r = V / (f_c \times D)$

## 引用文献、参考文献

- 1) 千代田化工建設株式会社, "Project Lifecycle Engineering 事業遂行支援.シミュレーション・解析技術.シミュレーション・解析技術の例.熱利用解析",  
<https://www.chiyodacorp.com/jp/service/advanced/simulation/> (2021/01/25 時点)
- 2) サイバネットシステム株式会社, "ANSYS ユーザーのための CAE 用語辞典.連成解析",  
<https://www.cybernet.co.jp/ansys/glossary/renseikaiseki.html> (2021/1/13 時点)
- 3) MONOist, "メカ設計用語辞典：連成解析",  
<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/2005/19/news005.html> (2020/5/19)
- 4) サイバネットシステム株式会社, "初めての流体構造連成体験セミナー 実習① CFX 片方向連成解析", (2012), 2013 年 3 月 28 日, 東京.
- 5) 日本機械学会, "配管内円柱状構造物の流力振動評価指 JSME S 012", 日本機械学会, (1998), pp.2-6.
- 6) 中村晶, 岡島厚, "円柱構造物の流体励起振動",  
[http://www.inss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/2000\\_7J201\\_215.pdf](http://www.inss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/2000_7J201_215.pdf)  
(2021/1/13 時点)
- 7) 株式会社メカニカルデザイン, Mech D & A News Vol.2012-2,  
<https://www.mech-da.co.jp/services/files/MNL/MechNewsletter2012-2.pdf>  
(2012/5)
- 8) 日本機械学会編, "機械工学事典", 日本機械学会, (1997), p.245.

- 9) 気象庁, “特徴的な雲, 利尻島の風下で発生したカルマン渦”  
[https://www.data.jma.go.jp/sat\\_info/himawari/obsimg/image\\_cloud.html](https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/obsimg/image_cloud.html)  
(2021/1/29 時点)
- 10) 社河内俊彦, “トピックス身近な流れ-カルマン渦列-”, 中部電力技術開発ニュース No.96,  
[https://www.chuden.co.jp/resource/seicho\\_kaihatsu/kaihatsu/kai\\_library/news/news\\_2010/news\\_96\\_N09603.pdf](https://www.chuden.co.jp/resource/seicho_kaihatsu/kaihatsu/kai_library/news/news_2010/news_96_N09603.pdf) (2002/5)
- 11) 日本機械学会編, “事例に学ぶ 流体関連振動 第2版”, 技報堂出版, (2008), p.34.
- 12) 日本建築学会編, “建築構造における連成・接触問題の考え方と扱い方”,  
日本建築学会, (2020), p.1.
- 13) 日本機械学会編, “事例に学ぶ 流体関連振動 第2版”, 技報堂出版, (2008), p.45.
- 14) 気象庁, “長周期地震動による被害”  
[https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/choshuki/choshuki\\_eq3.html](https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/choshuki/choshuki_eq3.html)  
(2021/1/13 時点)
- 15) 日本建築学会編, “建築構造における連成・接触問題の考え方と扱い方”,  
日本建築学会, (2020), p.99.