

【本件リリース先】

平成 27 年 2 月 6 日(金)15:00
(資料配布)
文部科学記者会、科学記者会、
原子力規制庁記者会(仮称)



平成 27 年 2 月 6 日
独立行政法人日本原子力研究開発機構
千代田化工建設株式会社

スーパーコンピューター「京」で「骨組構造物」の健全性を分析
—組立構造解析により国内外の耐震性の高いインフラ整備に貢献—

【発表のポイント】

- スーパーコンピューター「京」を使って、原子力機構で開発した「組立構造解析」で耐震性評価に不可欠な数値分析計算結果の「確かさ」を大幅に向上する原理を確立。
- 組立品の「あるがまま」状態を丸ごとシミュレーションで実現。従来の俯瞰的な分析に加えて、局所や詳細な部位の分析を同時に可能。
- 東北地方太平洋沖地震などの地震波を使って、機器の揺れをシミュレーションで再現し、機器や施設の開発・設計に生かし、国内外の耐震性の高いインフラ整備に貢献。

独立行政法人日本原子力研究開発機構(理事長 松浦祥次郎。以下、「原子力機構」という。)システム計算科学センターと千代田化工建設株式会社(代表取締役社長 澁谷省吾。以下「千代田化工建設」という。)は共同で、最先端のスーパーコンピューター「京」¹⁾(以下「京」という。)の超並列計算環境²⁾を活用して、「組立構造解析」³⁾で耐震性評価⁴⁾に不可欠な数値計算結果の「確かさ」を大幅に向上する原理を確立しました。

世の中にある構造物のほとんどは複数の部品からなる組立品です。組立品の健全性解析には、部品が結合する部分の取り扱いに経験的な知識やノウハウが必要とされてきました。そこで一層合理的な組立品の健全性分析を実現するため、その一つの課題である構造物を「あるがまま」の状態にシミュレーションする技術開発に取り組んできました。一方、従来のスーパーコンピューターは、沢山の部品から組み立てられた構造物の膨大なデータを複数同時に計算することが不可能でした。

今般原子力機構が開発した「組立構造解析」コードを「京」で動作するようにし、構造物を「あるがまま」の状態にシミュレーションできるようにしました。具体的には組立品の振動状態を分析するうえで欠かせない、構造物が共振しやすい状態⁵⁾を求める解析を、「京」上で複数の設計案を異なる複数の計算手段で同時並行して実施し、計算時間を短縮すると同時に、計算結果の「確かさ」を飛躍的に向上させることに成功しました。また、実際に観測された地震波を入力とする組立品の振動状態を分析するシミュレーションをも成功させました。

今後、本研究成果を原子力分野は元より産業応用にも一層展開し、より健全性の高い機器や施設の開発・設計に生かし、国内外の耐震性の高いインフラ整備に貢献していきます。本研究開発は、文部科学省 HPCI 戦略プログラムの一課題である分野 4 次世代ものづくりにおける課題 5 原子力施設等の耐震シミュレーションの研究開発で実施したものです。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究内容について)

日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター 副センター長

中島 憲宏 TEL:04-7135-2456

千代田化工建設株式会社 技術本部 技師長 松川 圭輔 TEL:045-225-4398

(報道担当)

日本原子力研究開発機構 広報部報道課長 中野 裕範 TEL:03-3592-2346

千代田化工建設 IR・広報セクション 赤松 勝 TEL:045-225-7734

【背景と経緯】

大型施設、プラント、機器などの実験的耐震性分析は、振動台と呼ばれる実験施設に縮尺したモデルを載せて実際に揺らし、その挙動を分析しています。一方、計算科学的耐震性分析は、図1にある直線でのみ形状を近似したビームモデル⁶⁾と呼ばれる経験や知識を凝縮した計算モデルを用いて、その挙動を計算しています(図2)。このモデルによる計算では全体の挙動を効率的に把握するのに適していますが、局所の分析には新たにその部分を取り出して解析する等の作業がさらに必要となります。

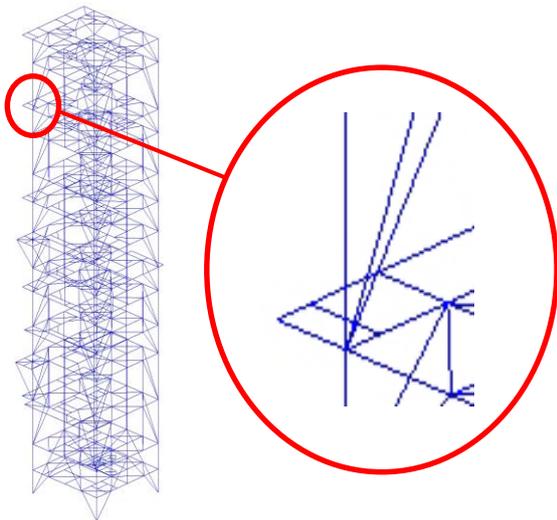


図1 モデル化されたシミュレーション

プラント構造をビームモデルで表現した例で、図形的には単純な直線で構造を表します。

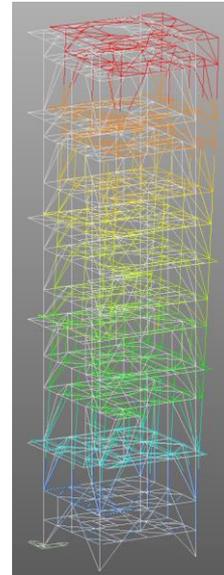


図2 モデル化されたシミュレーションの結果

プラント構造をビームモデル計算した例で、全体の挙動が見てとれます。青色は揺れの小さいところで、緑色、黄色、赤色と変化するに従い、揺れが大きくなっています。

これに対し、原子力機構は、図3にあるようにプラントの3次元形状を精緻に表現し、板厚や接続構造を実態と同じく「あるがまま」に表したモデルで、原子力施設の耐震計算を俯瞰的かつ詳細に分析できる技術を研究開発し、その挙動を計算しています(図4)。

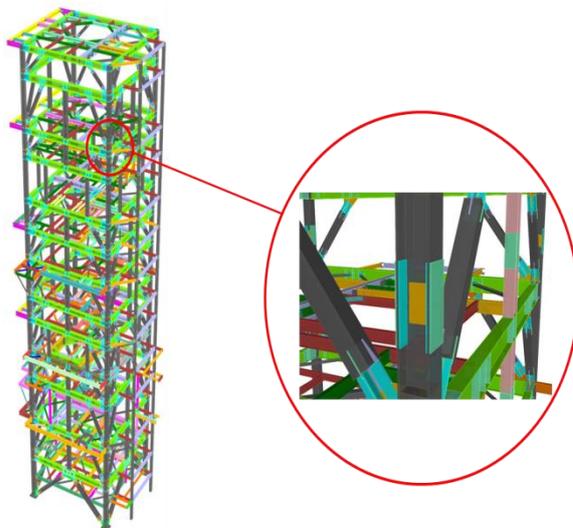


図3 「あるがまま」のシミュレーション

プラント構造を詳細にありのままに表現した例、図形的には複雑な3次元構造を表します。部品ごとに色を変えて表示してあるように、様々な部品から構造物が組み立てられています。

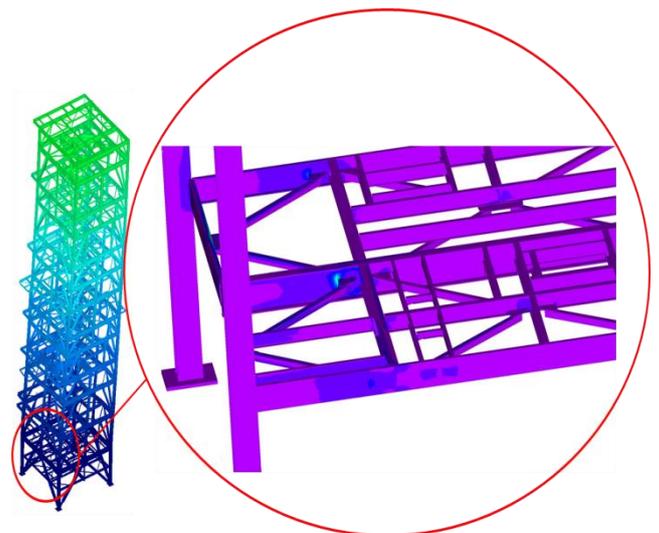


図4 「あるがまま」のシミュレーション結果

プラント構造を詳細にありのままに表現した例、全体の挙動と局所的な複雑な3次元構造の挙動の両方を見てとれます。構造物が揺れる度に、俯瞰的かつ局所的に緑色で示すように力がかかっていることが分かる。

「あるがまま」の構造計算では、スーパーコンピューターのような高性能な計算機を必要としますが、詳細な解析や局所の解析結果を単純にかつ簡単に見て取れます。一方、ビームモデルによる計算方法や計算結果の見方は専任者でないと理解が難しいことと、モデル化をするためには多くの経験を積む必要があるということが、熟練技術者の減少に伴う社会的課題とともに技術的課題となっています。そこで、このような問題を排除していくために、設計対象を簡略化することなく解析可能な有限要素法⁷⁾による丸ごとシミュレーションの開発が行われてきました。しかし、多くの部品から組立てられる構造物を丸ごとシミュレーションしようとする、部品間のつながりをいかに解析するかが課題となっていました。現状、様々な経験知や設計知などを活用して、部品間を接続し解析するのが一般的ですが、その解析精度の検証や向上が課題となっており、一層合理的な組立品の構造解析技術の確立が望まれていました。原子力機構と千代田化工建設とは、このような問題意識を共有し、2013年3月15日に技術協力を開始し、現状の解析技術の打破に取り組むことになりました。今般、「京」を使い、多くの部品で組み立てられる大型施設、プラント、機器などの構造解析において、これまで一台のスーパーコンピューターでは難しかった機器や部品同士のつなぎ目などの挙動解析や、部品を差し替えて部材の軽量化等にもなう健全性解析が可能であることを確認しました。

【研究の内容と成果】

原子力機構が研究開発してきた組立構造解析コードを「京」で動作するように改良し、「京」の特徴である数多くの並列演算器を効果的に使う技術を追加して複数の設計案を同時に分析することを可能としました（図5）。また、「京」の特徴を利用し複数の異なる分析計算方法を同時に実行させることにより短時間でそれら計算結果を比較することが可能となり、計算解のばらつきの中から一層合理的とされる解を推定することで、計算結果の精度を高めることができました。従来のスーパーコンピューターでは、沢山の部品から組み立てられた構造物の膨大なデータを複数同時に計算することは演算能力の面から容易ではなく、また分析計算方法も経験的に選択して計算することが一般的でした。今回の研究開発成果を用いることで、一つの計算方法に絞り込んで計算するのではなく、複数の計算方法を比較しながら計算精度を高めるという一層合理的な分析が、計算機上で可能となりました。

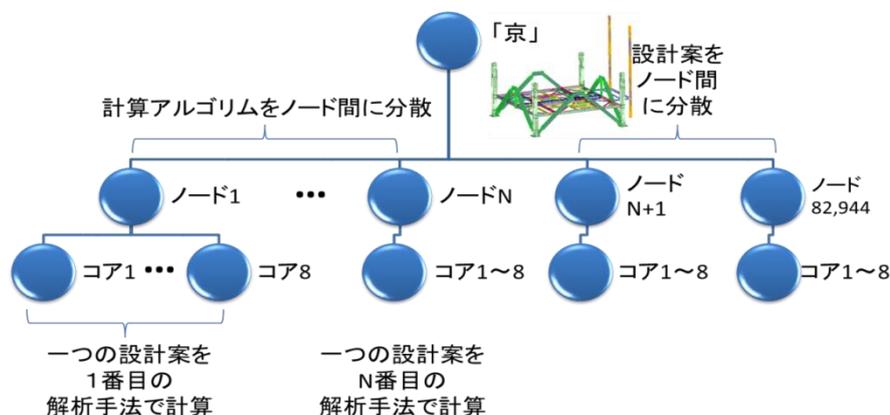


図5 組立構造解析の分散並列化

京は、ノードと呼ばれる82,944個のCPUから構成されています。一つのCPUはマルチコア⁹⁾技術で作られており、一つのノードと呼ばれるCPUの中にさらに8個のCPUが内蔵されており、これをコアと呼んでいます。すなわち、82,944(ノード)×8(コア)=663,552の並列計算が可能となります。

このような計算原理を用いて、共同で計算した結果を図6に示します。これは構造物が共振しやすい状態を求める解析結果の一例です。対象は、次世代型の石油・ガスプラントや化学プラントの機器や配管等を支え、収めるための骨格的な構造部です。国民の生活に必須となる石油系燃料の精製、都市ガスの供給、化学品の製造などを行うプラントなどが代表例です。これら「くらしの礎」ともいえるプラントの安全をより確かなものとするに寄与するために、高性能計算機を活用したシミュレーション技術の共同研究を進めます。

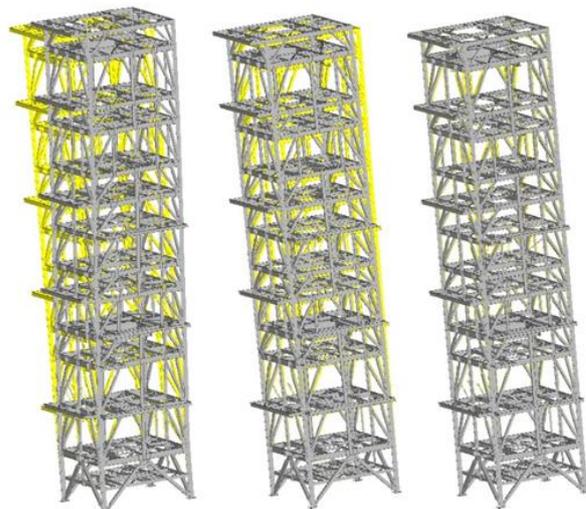


図6 次世代型化学プラントの骨格（骨組）構造の共振しやすい状態解析結果

数万部品から組み立てられている化学プラントの骨格構造を「あるがまま」に3次元のデジタル図形化し、固有振動数を計算しました。その揺れやすい状態図を誇張して、わかりやすいようにコンピュータ・グラフィックス化しました。灰色の元の状態から揺れた状態を黄色で表現しています。

【今後の展開】

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震などのデータをシミュレーションで再現し、耐震性のより高い石油・ガス・化学等のプラント構築につなげる予定です。また、本研究成果を原子力分野は元より産業応用にも一層展開し、より健全性の高い機器や施設の開発・設計に生かし、国内外の耐震性の高いインフラ整備に貢献していきます。進展する計算機技術とともに、今後一層、多様化し高度化されていくシミュレーションの要素技術を活用し、数値計算結果の「確かさ」の確度を向上していく研究を進め、一層合理的な設計過程の確立を目指します。

【用語解説】

1) 京

理化学研究所(神戸)に設置されたスーパーコンピューターの愛称で、富士通が製作を担当した。開発費は約1,100億円である。1秒間に1京回(510兆回)の計算速度を誇るため、「けい(京)」と名付けられた。2011年6月のスパコン世界ランキング(TOP500: <http://www.top500.org/>)では、日本勢として7年ぶりに第1位になった。2012年7月にそのすべてが完成した。

864台のラック(筐体)から構成され、1ラックにはCPU(Central Processing Unit: 中央演算処理装置)が102(ノード)個搭載(計算ノードとしては96個)されている。CPU(ノ

ード)はマルチコア技術で作られており、1CPUは8つのコア(CPU)を持つことから、京は総数663,552個(82,944ノード(=864ラック×96ノード)×8コア)のCPUを利用できる並列計算機である。ここで、マルチコア(Multiple core, Multi-core)とは、1つのCPU内に複数のCPU(プロセッサ・コア)を封入した技術であり、一見には1つのCPUに見えるが利用上、それ自体が並列計算機(複数のCPUで構成される演算器)として使える。

2) 超並列計算環境

並列計算(parallel computing)は、複数のCPUで1つの計算をさせることである。並列コンピューティングや並列処理とも呼ばれる。このような計算のために設計されたコンピュータを並列計算機という。明確な定義はないものの、超並列とは並列計算の中で並列数の多いことをいう。超並列計算機(Massively parallel machine)は1990年代初頭から台頭し、地球シミュレーターなどが、その代表である。時代と共に並列度は増えるため、何個以上のCPU数で超並列であるというはっきりとした定義はないが、一般にその時代の最先端の並列計算機を超並列計算環境あるいは超並列計算機と呼ぶ。

3) 組立構造解析

これまでの大型施設、プラント、機器などの耐震性は、振動台と呼ばれる実験施設に縮尺した模型を載せて実際に揺らし、その挙動を分析している。「組立構造解析」は「京」を使って計算機内で発生させた地震波でデジタル化された大型施設や機器を揺すり、その耐震性や挙動を数値計算で分析する。

構造物は特別な削り出し品以外は、一般に二つ以上の部品から組み立てられている。組み立て品は、削り出し品のように一つの部品であるかのように連続体として有限要素法により計算することが一般的である。しかし、多くの部品からなる一般的製品やプラントは、それ自体を一つの部品と見做して有限要素法により計算すると精度が保てない場合が多い。この課題を解決するために、当時の日本原子力研究所は組み立て品を構造解析する技術の研究開発に着手した。組立構造解析とは、部品の結合状態を「あるがまま」にデジタル図形化し、その結合条件を付与して有限要素解析する技術である。これにより例えば、ボルト締結部のボルト破断などを構造物全体の解析と同時に計算する。

4) 耐震性評価

原子力施設等の安全設計では、自然現象を含む種々の設計条件を考慮した場合にも公衆及び従事者等に過度の放射線被曝を与えないように施設を設計することが要求されている。この自然現象の一つとして地震があり、原子力施設等が大地震に遭遇した場合にも、この要求を満たす必要がある。すなわち安全設計の一環として耐震設計が行われている。設計は一般に、「統合と分析」から成るとされており、評価は多くの分析結果を統合することによって生まれる総合的な知見である。建物・構築物は、それ自体が安全上の機能を直接的に要求されるものは少なく、支持あるいは収納する安全上重要な設備の支持機能を損なわないという観点から耐震性(支持機能)を確保する評価が必要とされている。機器・配管系については、その耐震重要度に応じて、耐震安全性を応力解析等により確認している。この場合、数値計算(解析コードによる分析)が使われることが多々ある。

5) 共振しやすい状態

構造物それぞれがもつ、揺れやすい特定の形（振動形）であり、固有振動モードと呼ばれる。この振動形は特定の揺れの速さ（固有振動数）に対応しており、この速さの揺れが地震波に含まれると、揺れが大きくなる共振現象が起こる。

6) ビームモデル

骨組み構造の解析を行うために、複雑な構造物の部材、例えばH型鋼（図7）をビーム（直線）で置換して、計算するためのモデルを作成する。骨組み構造物の解析をするための伝統的な方法である。モデル化には経験と知識が不可欠であり、上手にモデル化できると簡単な計算で正しい答えが得られる。物理的な意味も分かりやすい一方で、個々の問題に適した妥当なモデルを作れるかという合理的判断に課題が残る。あるがままのシミュレーションとこのビームモデルによるシミュレーション結果を比較すると、図8に示すように、ビームモデルでは大雑把な挙動しか見て取れず、「あるがまま」のシミュレーションでは部材の特長に沿った詳細な解析結果が見て取れる。

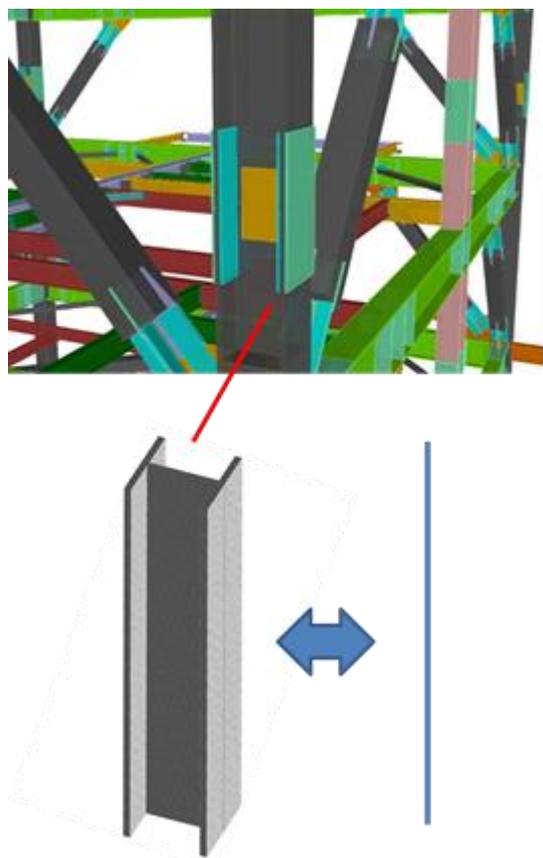


図7 次世代型化学プラントの骨組構造における部材（H型鋼）の例

骨組構造は、様々な断面をもった鋼材により組み立てられます。代表的なものがH型の断面をもったH型鋼と呼ばれるものです。ビームモデルでは、その断面がH型であったり、口型やL型でもそれぞれ同じ直線でモデル化されます。ここでは、部品ごとに色を変えて表示してあるように、様々な部品から構造物が組み立てられています。

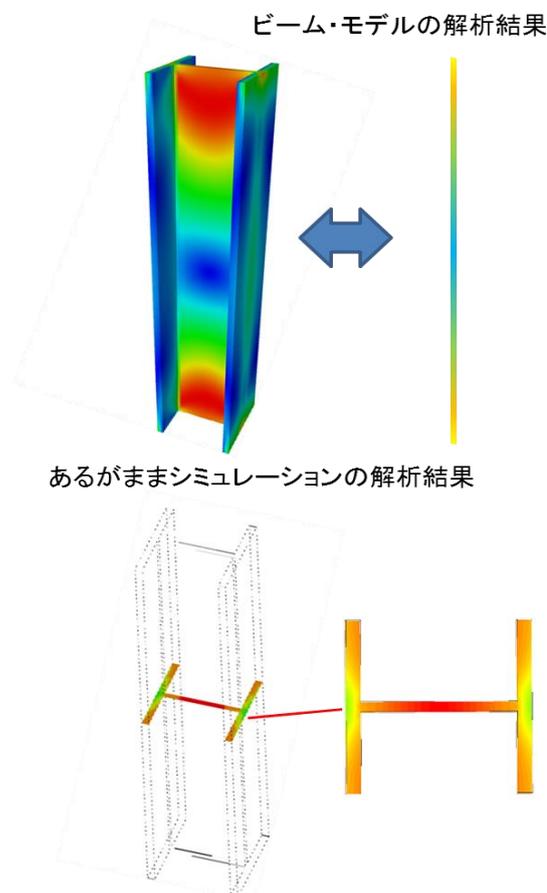


図8 ビームモデルと「あるがまま」のシミュレーションの解析結果比較例

(a)のビームモデルでは、(b)の「あるがまま」シミュレーション結果と比べて、俯瞰的な挙動の特長を見て取れますが、部材の断面（H型）等における詳細な挙動は直接的には見て取れません。押し付けられる力が働いているところが赤色に近くなり、引っ張られる力が働いているところが青色に近くなる様子を可視化しています。

7) 有限要素法

有限要素法は数値解析手法の一つで、解析対象となる構造物を微小で単純な要素（立方体など）の集合体で細かく分割し、それらの要素ごとに力の釣り合い状態などを計算し、最終的に全要素の挙動をまとめて、解析対象物の挙動を近似値として求める。現在では、一般的な力学計算手段として多用されている。

8) マルチコア

演算器（CPU：Central Processing Unit や MPU）の高速化は、演算器の中の配線の短小化、工学的には微細化加工により、その集積度を上げることで、動作速度の向上をしてきた。一方で、単一の演算器で高速化を図るのみではなく、複数の演算器を並列に並べ、たくさんの処理を同時平行して行い、計算の全体の処理速度の向上をするという方法もとられてきた。従来はひとつの演算器を単位（チップ）として製作しかできなかったが、微細化加工技術の進歩により、一つのチップに複数の演算器を入れ込むことが可能となった。これをマルチコア化と呼び、一つのチップに複数の演算器（コア）を搭載することによって、効率的な並列演算が可能な演算器へと進歩した。