

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2019.3.NO.129

目次

センターの活動状況	①
都市の統合地震シミュレーションー地震発生、構造物被害、経済回復までー	③

センターの活動状況

I 運営状況

第27回理事会の開催

2019年3月1日（金）開催の第27回理事会において、2019年度事業計画及び収支予算等について付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

第20回評議員会の開催

2019年3月12日（火）開催の第20回評議員会において、2019年度事業計画及び収支予算、評議員の選任等について付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

今回の選任により、次の方が交代されました。

（敬称略）

区分	退任者	新任者	新任者所属・役職
評議員	桑原 政昭	大場 一鋭	一般財団法人日本原子力文化財団 専務理事

Ⅱ 成果等普及活動の実施状況

平成 30 年度 第 3 回原環センター講演会の開催

平成 30 年度第 3 回原環センター講演会を以下のとおり開催しました。

開催日時：平成 31 年 2 月 8 日（金）14:00～16:00

会 場：原環センター 第 1、2 会議室

演 題：ベントナイト資源及び工業の現状と将来

講 演 者：クニミネ工業（株）取締役資源探査部長 伊藤 雅和 氏



放射性廃棄物処分システムの緩衝材、埋め戻し材などの候補材料として 30 年来、調査研究されているベントナイトについて、国内外の資源、工業の現状及び現状から考えられる将来のベントナイト供給の形、課題などについて講演していただきました。

スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）との情報交換会議の開催

当センターと協力協定を締結しているスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）のヨハン・アンダーソン（Johan Andersson）博士、SKB 社の子会社の SKB インターナショナル社のマグナス・ホルムクイスト（Magnus Holmqvist）社長及びエリック・ターナー（Erik Thurner）シニアアドバイザー等を迎え、情報交換会議を開催しました。

開催日時：2019 年 2 月 12 日（火）15:30～18:00

議 題：スウェーデンにおける地層処分プログラムの現状
原環センターにおける研究開発の現状
今後の協力について

スウェーデンでは、SKB 社が 2009 年に使用済燃料処分場の建設予定地を決定し、現在は立地・建設の許可申請書の審査が行われています。このように、世界的にも進んだ処分場計画を有す SKB 社との協力は当センターにとって非常に有益なものであり、今回も多くの分野で情報交換等を行いました。

具体的にはまず、SKB 社が取り組んでいる使用済燃料処分場計画などの最新状況について説明していただきました。その後、当センターの概要の紹介に加え、当センターが実施している地層処分に関する研究開発プロジェクトの概要などについて情報提供いたしました。また、放射性廃棄物管理分野では、長期にわたる事業期間を支える人材を育成していくことが各国共通の重要な課題となっています。この点に関して、今後の協力の可能性について意見交換を行い、協議を継続していくことを確認しました。



都市の統合地震シミュレーション —地震発生、構造物被害、経済回復まで—

東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター長
海洋研究開発機構 理事補佐・数理科学・先端技術研究部門分野長
堀 宗朗

1. はじめに

都市の統合地震シミュレーションについてお話をします。

統合地震シミュレーションは、**図-1**の土木工学のソフトウェア開発のひとつと考えています。ソフトウェアという多くの方は、有限要素法を考えるとと思いますが、ここでのソフトウェアはマイクロソフトのOfficeのような統合環境です。土木工学のいろいろな問題を扱う統合環境を開発することを考えています。最先端の計算ができるハードウェア、現在、急速に集積しつつある膨大なデータ、そしてさまざまな最先端の理論を組み合わせることで、統合環境を作ることができます。この統合環境を使って、調査、設計、施工、維持管理のいろいろな処理ができるようにする、ということです。少し無理のある比喻（ひゆ）ですけれども Word、Excel、PowerPoint、Outlook を皆さんはマイクロソフトのOfficeの中で使っています。調査をWordに、施工をExcelに読み替えれば、同じ図をコピーアンドペーストで使う、たとえば、統合のイメージになります。このようなことを考えています。

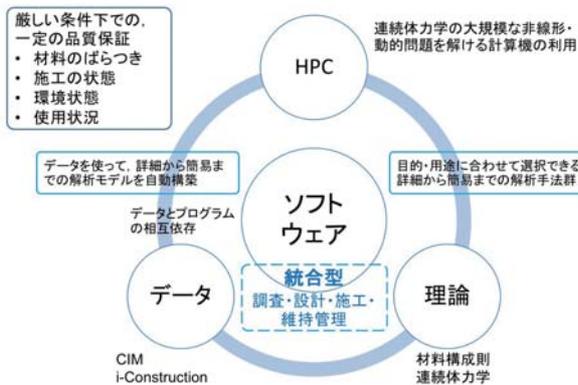


図-1 土木工学のソフトウェア開発の概念

2. 統合地震シミュレーション (IES) の全体像

統合地震シミュレーション (IES) の全体像は、**図-2**のように、理学の計算、それから工学の都市の計算、さらには社会科学の計算、これらを全て混ぜてしまおうという計算です。

したがって、ご紹介する研究成果は私個人のもの

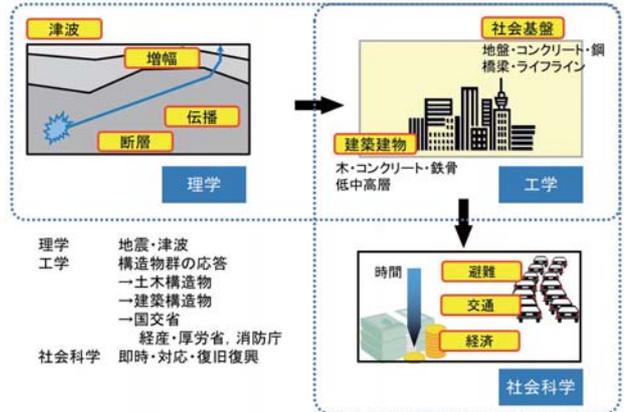


図-2 統合地震シミュレーション (IES) の全体像

のではほとんどありません。統合シミュレーションの研究開発にご賛同いただいた理学の研究者の方、工学の研究者の方、それから社会科学の研究者の方の成果です。最初に、地震のシミュレーション。地盤の揺れの結果を使って、建物のシミュレーション。さらに建物の被害の結果を使って、避難のシミュレーション。このようにどんどん地震の災害・被害の過程を計算していきましょう、ということが重要です。

具体的には、**図-3**のように、地震の部分は巨大地震発生サイクルプログラム (RSGDX)、これは理学の先生が作られているものです。それから3D-DYNという、これも理学の方のものです。それから我々のグループで、正確には東京大学地震研究所の市村強准教授が作られている動的非線形有限要素法 (GAMERA) です。また津波のほうは高性能津波

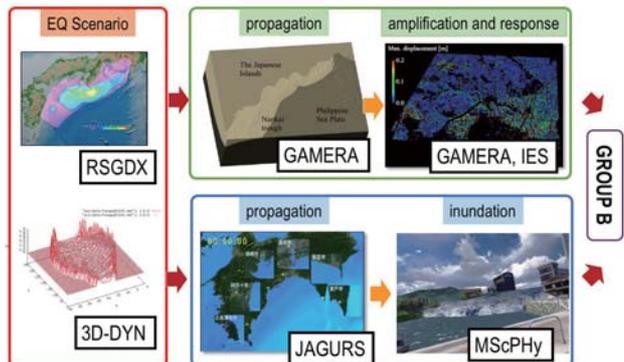


図-3 地震災害・被害のシミュレーション

計算コード (JAGURS)、もしくは九州大学の浅井光輝准教授が作られているマルチスケール粒子法 (MScPHY) です。繰り返しですけれども、Word で作った文章を PowerPoint に入れる、そしてより良いプレゼン資料とする、そのようなことができるようにしようとしています。

重要構造物の地震応答解析もより良いソフトウェアの開発が必要です。今、工学の分野では「デジタルツイン」といわれる、実構造物と全く同じ性能を持つ解析モデルをコンピューター上に作って予測解析をします。重要構造物の地震応答を予測する場合にも、この「デジタルツイン」を使って地震応答解析をすることを考えています。解析の最終目的は実は建屋の揺れではなくて、原子炉そのものがどのように揺れるのか、さらには、原子炉内の制御棒等がどのように振動するか、をできれば建設系の技術者が、優良なソフトウェアを使って全部計算する、ということが望ましいと考えています。勿論、配管系の揺れも全部計算します。先ほどご紹介した統合シミュレーションのように整理すると、建屋編、配管編、炉編というように、相応に連成させて正しく計算できるようにになればよい、という構想です。

次は、社会科学のシミュレーションです。大きく3つのシミュレーションをやっています。1つ目は群集避難のシミュレーション、次が交通障害のシミュレーション、最後が経済のシミュレーションです。

図-4 は、群集避難のシミュレーションの例です。図の左右は同じ都市で、左の図の赤の部分、地震によって建物が崩れて瓦礫 (がれき) で道が通れなくなった部分です。右の図は、耐震補強をしっかりと行った結果、瓦礫が生じなかった場合です。瓦礫が生じた場合と生じなかった場合の比較をすることで、すなわち、耐震補強の有無によって、どれぐらい群集の避難に差が生じるかを調べることができます。例えば、瓦礫が生じた場合、エージェントが避難を始めると、瓦礫があると判断した道路を通りません。そこで戻って迂回することをエージェントが考えます。避難場所に着くまで、この迂回を繰り返します。

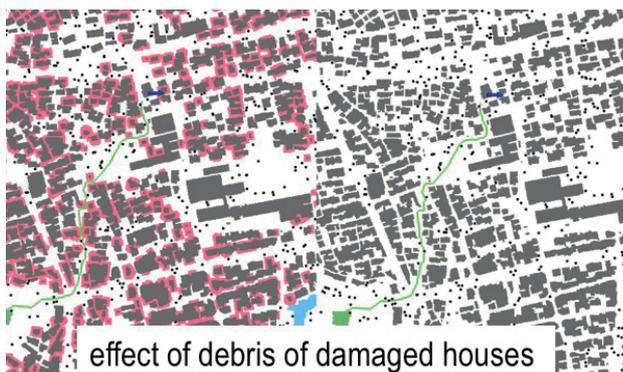


図-4 群集避難のシミュレーション

住民の数が数名だったらこの計算は問題なくできます。けれども1,000人、1万人、10万人になるとさすがに計算は簡単ではありません。ここは全て自動運転に近いような形で自律的にエージェントが動くという、この群集避難のシミュレーションが必要になります。計算機は同じ計算をさせても全く文句は言わないのでいろんな状況を考えて1,000回ぐらい群集避難のシミュレーションをすることで、どの程度、避難の状況がばらつくかを調べることもできます。このような計算結果も踏まえて、どの道路がどういうふうに使われていくかということが分かるようになります。

例えば、川が多い町の場合では、「どの橋を重点的に耐震補強すべきか」ということも分かるわけです。

高性能計算とはいえ、計算だけで即断することは賢明ではありません。都市情報等の先端データ等を使って計算結果の信頼度を上げることも必要になります。例えば、群集避難のシミュレーションでは、一人一人の行動パターンにデータに、機械学習を使って信頼度を上げたデータを使うことができます。サラリーマンが多い状況、もしくは学生が多い状況を考える場合には、サラリーマンや学生の実データに基づいたエージェントを使うことになります。どのような種類の人が多いかで群集の動きがどう変わるかを予測するのです。また、昼の避難と夜の避難では、人の動きがどう異なるかを考えるときにも、信頼度の高いデータを使ったシミュレーションは重要になります。

次は交通障害のシミュレーションです。これも連成シミュレーションです。建物の倒壊によって、どのような交通障害が引き起こされるかを調べるものです。倒壊にはいろんなパターンがあります。図-5 は建物倒壊のパターンを8とおりに計算したものです。

倒壊を基にした道路の残余幅を計算します。すなわち、建物が倒壊した結果、瓦礫によって道路が使えなくなりますが、これを考慮して道路がどの程度使えなくなったかということを計算します。被害の程度と交通障害の程度が予測できるようになるのです。これは東京の例ですが、首都直下地震を2ケース考慮した場合、被害箇所が少し変わってきま

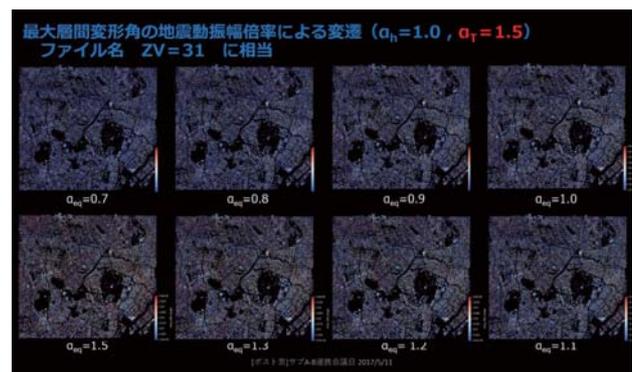


図-5 建物倒壊の計算 (例)

す。交通障害の程度も変わってくるというわけです。図-6の色は混雑の度合いを示します。当然、被害箇所が増えてくると、交通障害、すなわち交通渋滞は増えます。しかし、道路はネットワーク化されているので、被害が増えると渋滞が増える、という単純なものではありません。被害箇所が多いのにあまり交通障害が起こらない場合がある、というのがこの計算結果です。意外なことに東京の場合、この計算をする限り、一定の程度の被害までは交通渋滞は常時と比べて顕著に変わらないという結果が出ました。これは交通のご専門の方がやられた計算ですが、意外だったそうです。勿論、一定の程度の被害の場合ですが。なお、普通の交通シミュレーションはもう少し粗い都市モデルを使いますが、詳細な都市モデルを使うと、主要な道路以外のネットワーク化された道路を使うことで、被害による交通障害を柔軟に吸収する可能性があることが示されます。



図-6 被害箇所と交通量
(構造物被害の結果、道路閉塞がある場合)

最後は経済シミュレーションです。通常の経済シミュレーションは、ざっくり、均衡を考える経済モデルを使うものです。これに対して、高性能計算を使う経済シミュレーションでは、エージェントベースの経済モデルを使います。この高度な経済モデルを使って地震による経済被害とその回復の過程を計算しようというものです。図-7はエージェントの間のお金の動きを見たものです。銀行、中央銀行、政府に対応したエージェントがあり、お金のやり取りをします。いろいろな産業の間や、産業と銀行、投資家でもお金のやり取りをします。このような組織・人単位の経済活動を全て計算しようというシミュレーションです。

このエージェントベースのシミュレーションは、経済の分野では、最先端として研究されているところです。土木屋の我々もここに参入して、高性能計算の力を借りてどこまで組織・人単位の経済活動のシミュレーションができるかに挑戦しようとしてい

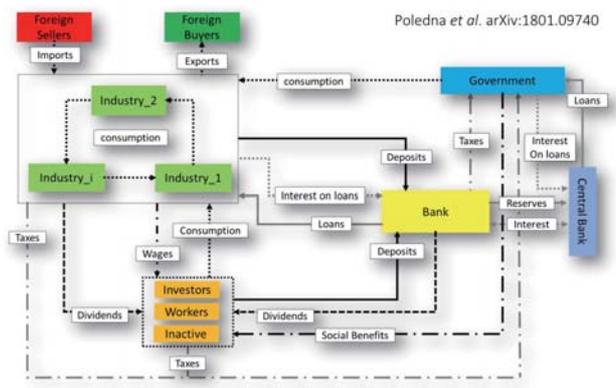


図-7 経済のシミュレーション例 1

ます。経済の専門家が使っている式をそのまま算入して、さらにちょっと難しい話で申し訳ないですが並列計算をするためのメモリの分散ということも考慮して高速化を進めています。経済活動のシミュレーションの難しいところはいろんな取引があることです。これをうまく整理して計算するという、そういう数値計算のテクニックも開発し、高速化・大規模化を進めています。

図-8は、あまりにも身最良(みびいき)な設定ですが、面白い計算結果です。簡単に言うと地震発生後、土木産業に投資をするとどうなるかという計算結果です。青が特に何もしない場合で赤が土木産業に投資した場合です。あまり差がないようですが、ある状況になると土木産業に重点的な投資をしたほうが、例えば雇用では、失業者率が、災害で低下した後、ぐっ

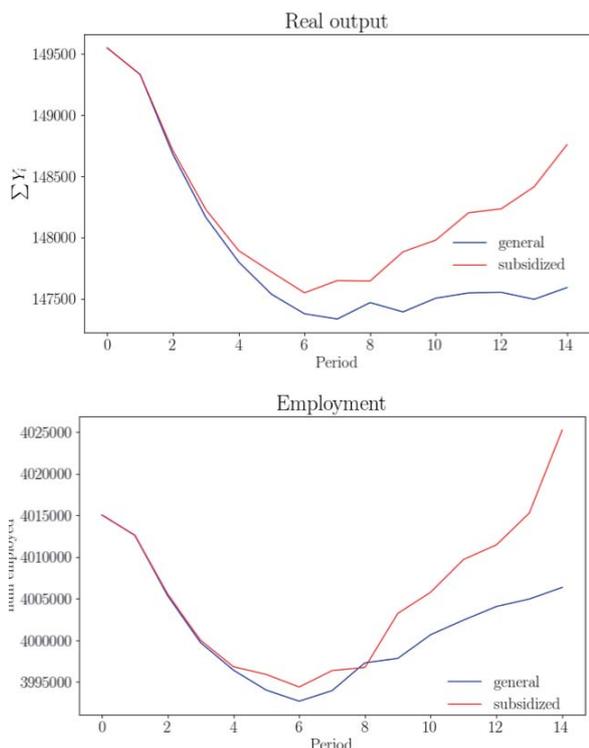


図-8 経済のシミュレーション例 2(土木産業への投資の効果)

と回復することになっています。アウトプットである総生産量も震災後どんと落ちるのですが、土木産業に投資すると少なくとも月単位で見ると、投資しない場合に比べ、優位な差が出るようです。土木の計画系の研究者がこれを聞いたら非常に喜ぶような話です。この計算結果は、土木産業への投資による影響があまり出ないところと、出るところがはっきり区別されます。リアリティーがある計算結果かどうかは別にして、非常に興味深いと考えています。

3. モデル構築技術の普遍化

皆さんご存じのように、計算機そのものは、物理は全く分かりませんし、化学も分かりません。経済は分かりそうな顔をしているかもしれませんが、経済も分かりません。彼らができるのは足し算の計算だけです。適切なソフトウェアを作ることによって、計算機にしてみれば地震の計算も経済の計算も見掛け上は全て同じ、0と1の計算です。要するにソフトウェアをきちんと作ることによって今のような統合シミュレーションは可能になります。また少し誇張になりますが皆さんがお使いのマイクロソフト Office も Word 用の計算、Outlook 用の計算、確かにそういう計算をしていますけれどもやっていることは0と1のバイナリの計算です。バイナリの計算という意味で全て普遍的なことです。この計算機を使って我々が必要な仕事をするためには、ソフトウェアは重要だということでございます。

次がデータのモデル、特にモデル化です。いろんなかたちでデータがあります。都市の計算に使うデータ、例えば地震動の場合は時間、さらに建物の場合は建物の揺れ、さらに建物は避難のときには障害物になります。もしかしたら経済活動の場合にはエージェントのいる場所になります。したがっていろいろなデータをモデルに変えなければならない。これは言うのは簡単ですが、やるのは非常に難しい。標準的に使われるのは全てのデータのフォーマットを統一するという統一化、共通化ということがあります。ところがデータの量とかそのデータの種類の少ないうちは、統一化は非常に簡単ですけれども、少なくとも我々は行政データをはじめとして数十年使っているわけで、それを今日から全部統一しようというのはとてもじゃないけれど難しい。そこで、ここで考えているのはデータをうまく処理できる、データを処理するというのはデータそのものには触らないでデータから必要な情報を取り出して、そしてモデルを作る。そんなようなことができないかということです。これも本当に言うのは簡単、やるのは大変ですけれども適切なソフトウェアを作るとこのようなデータ処理ができるということになります。

4. 統合地震シミュレーション (IES) の基幹技術

ちょっと難しい言い方になりますけれども、数値解析の連成結合でカップリングという考え方があります。固体、流体のカップリングというので流体系の計算をされている方は聞いたことがあるかもしれませんが。我々はこの数値解析のカップリングをデータのカップリングにしようということを考えています。データの疎結合というキーワードがあります。

データの疎結合というのは、その対比となるデータの密結合が一つのデータを変えると全部同時に変わるという極めて強固な結合仕様に対して、そうということが一切起こらないと、全てばらばらで構わない、独立で構わない、ただし必要なときにはデータを結合する、必要なときにだけデータを結合させて必要な情報を取ってくる、そういうやり方です。これをするために我々の作った統合地震シミュレーション (IES) は、GIS と同様なレイヤー構造を作ります。さらに先ほど申し上げたソフトウェアの密結合、疎結合なのでちょっとソフトウェア自身を切り分けるというのがソフトウェアの疎結合だとすると、データのほうも同じようなやり方をしています。そのため仕組みとしてはデータが3つあったら、これを1個のデータコレクションに疎結合して、このデータコレクションから例えばモデル3つを作る。このようなやり方をすると非常に効率よくデータが疎結合できるというわけです。

なぜ、これは効率がいいかというところ例えばデータが10種類でモデルを10種類作ろうとすると、その変換の手続きは 10×10 で100個必要です。この方法だと10個のモデルをデータコレクションに、データコレクションからモデルに変換するので $10 + 10$ の20個にしてもらわなければならない。さらに先ほどちょっと申し上げたように1つのモデルを作るときには2つのデータを使う場合もあります。そうすると急に高校の数学になりますけれども10個のデータがあるとその組み合わせが $2^{10} - 1$ になります。それをやるわけですからこの疎結合の方法は少なくともソフトウェアを作る上で非常に重要になった。こういうやり方をするとフォーマットの統一というのを一切使わない。図-9のように、疎結合では、密結合の

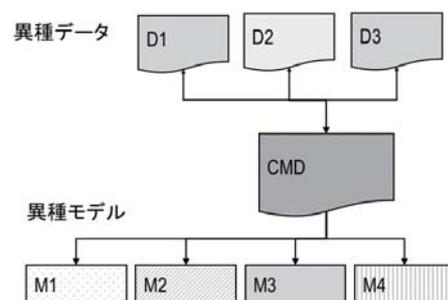


図-9 疎結合のデータとモデルの作成

場合に必要なフォーマットの統一を使わずに、異種フォーマットのデータを使って、異種モデルをいっぱい作ることが可能になります。今は統合地震シミュレーションということですが、さらにはこれを一個進めた統合エンジニアリングシステムということで神戸大学の飯塚敦先生を中心に国交省の力も借りて何とかうまくこのデータの効率的な運用ができないかということを考えています。

5. 統合シミュレーションの展開

ここで少し格調高く触れますけれども、先ほどのお話に戻るように全部これは計算機を使うのではありません0、1のバイナリの世界です。適切なプログラミングを作るとこのようなデータの疎結合は非常に見通しのいいかたちでできる、そういうふうを考えています。本当に多種異種データ変換というのはもしかしたらあまり多分、産業でもやっていないので土木工学からこのようないろんなデータを使って、さらにそれをいろんなモデルに展開することができる。そういうことを他の工学にすごく発信できるのではないかと思っています。

さて、わが国は非常にデータを大事にする文化があります。世界のレベルでも、観測データ、実験データ、計測データ、といったデータを重視するよう思われます。その一方で、データを誰がどう使うか、ということに関しては、少々、口幅ったいですが、結構鈍感なような気がします。例えば、地震観測の研究者は非常に観測データを大事にしますが、誰がそのデータをどう使うかに関してはあまり関心がないように思われます。本来、データは、ユーザーが何のためにどう使うかを考えて集めるべきだと思います。統合シミュレーションでは、**図-10**のようにシミュレーションの解析モデルを作ることがデータの目的です。このデータを使う目的を明確にすることが大事です。

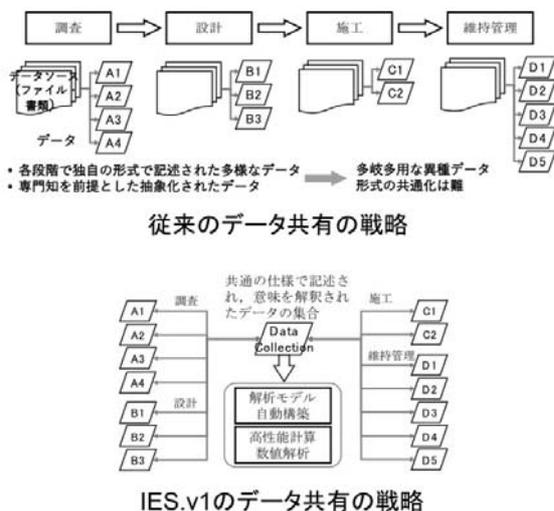


図-10 統合シミュレーションの進化

解析モデルを作るためのデータの扱い方には疎結合を使います。また、データの扱いは、首尾一貫してデータ変換としています。データ変換はあくまでも手段です。目的は統合シミュレーションするための解析モデルの構築です。解析モデルを作るために、どのような（データの取り扱いである）データ変換をするのか、さらには（そのデータ変換のために）どのようなデータベースを作るのか、という二点が我々の考えているバックボーン、格好の良い言い方をすれば、フィロソフィーです。

6. 都市モデル

次は都市モデルです。都市モデルを自動構築するソフトウェアがあると、地震のためのデータが津波等にも使えるようになる、ということが重要です。私は、もともと固体を扱う研究者ですが、計算機にしてみれば固体も流体も差はありません。一つのデータを変換して都市モデルを作ると、地震のシミュレーションから津波のシミュレーションまでできるようになる、ということです。**図-11**は、神戸市、兵庫県と一緒に検討した、防潮堤の効果を調べるためのシミュレーションです。適切な防潮堤が有る場合と無い場合で、どれだけ、例えば南海トラフ地震のときに津波の被害が抑えられるかということ調べてやりました。なお、兵庫県下の都市で、さまざまなデータを使って明石市、芦屋市、西宮市、尼崎市の都市モデルを構築し、想定される南海トラフ地震について、災害・被害のいろいろなシミュレーションができるようになっていることを紹介します。

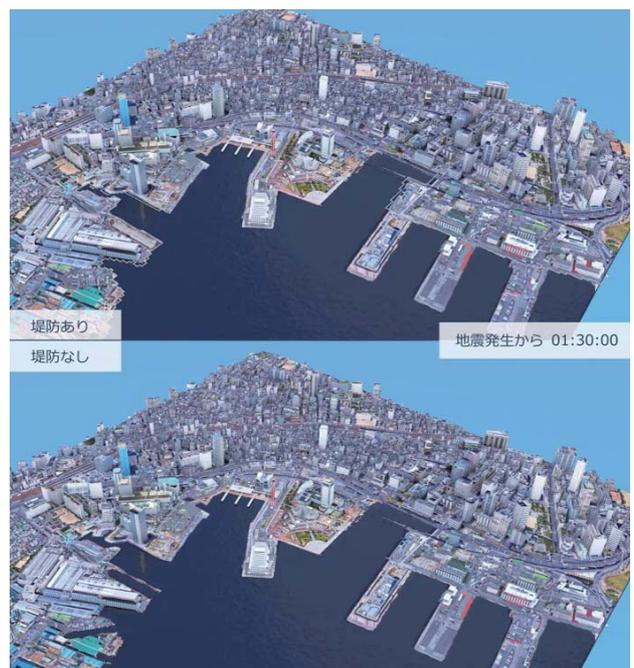


図-11 津波被害のシミュレーション（堤防の有無）

さて、統合地震のシミュレーションは「京」(けい) コンピューターのプロジェクトで手がけました。このプロジェクトは兵庫県と神戸市が後押しをして下さりました。県と市としても、せっかく世界最高の計算ができるのであれば、自分たちの都市でその計算が利用できるようにならないということで、後押しをして下さったと考えています。県と市の協力を得て、地盤、建築建物、ライフラインまでいろいろな構造物を含む都市モデルを作ることができます。例えば、地盤モデルの場合、先ほどの計算と同じですが、地盤の解析モデルを作って、地震の揺れや地盤のひずみをきちんと計算することができます。さらに、谷底低地という地形では、揺れが集中する様子も分かります。地盤の解析モデルを使ったシミュレーションをすることで、地震動が集中しそうな箇所が、観測を待たなくても分かるということになります。

地盤では液状化が問題になります。液状化の解析も統合シミュレーションに入れてあります。勿論、液状化の予測をする方法はシミュレーション以外にもあります。けれども、液状化の発生を過大に評価することが多いようです。シミュレーションを使う液状化の解析では、ボーリングデータから、1次元の地層の厚さを推測し、さらに地層の土質パラメータを全て推定して、地盤の解析モデルを作ることが必要です。このような液状化の先端的な研究は、我々のグループに協力をして下さっている神戸大学の竹山智英先生が行っています。解析モデルに地震動を入力して液状化の判定をしますが、解析モデルの数が問題です。この地域では約1万本のボーリングデータがあり、同じ数の解析モデルが構築されます。このため「京」コンピューターを使ってこの1万カ所の液状化シミュレーションを全部計算します。計算時間は約1時間ですみます。

さらにこのデータをきちんと扱うために、図-12のようなデータ処理プラットフォームを作っています。先ほどの繰り返しですけれども、さまざまなデータからいろいろな解析モデルを作るときのソフ

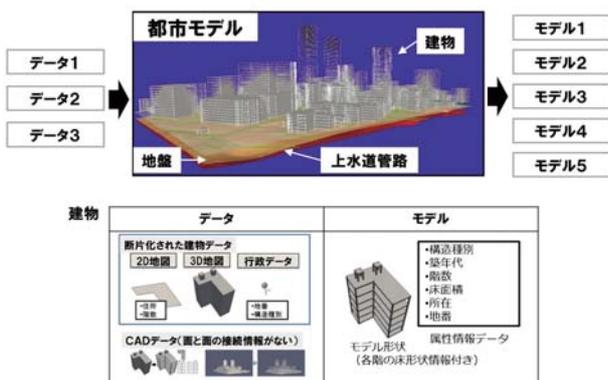


図-12 データ処理プラットフォーム (DPP)

トウェア群です。プラットフォームは、このソフトウェア群を使いやすいようにまとめたもので、このプラットフォームを使うことで、データ処理のためのソフトウェアを作る作業を効率化することができます。Wordには、さまざまなタブがあり、そのタブにある機能を使うことで、効率的に作業ができます。また、プラットフォームがあると、新しいソフトウェアをゼロから作る代わりに、既にあるソフトウェアを再利用することで、ソフトウェア作成の作業を効率化できます。特に共通のデータ操作は、再利用が有効です。このようなデータ処理や、データ処理をするソフトウェアを作成するための大きなソフトウェア群がデータ処理プラットフォームです。プラットフォームの代わりに、ソフトウェアのライブラリという言い方もあるかもしれません。データ処理をするので、ライブラリというよりもプラットフォームのほうがいいだろう、ということで、データ処理プラットフォームとしております。

図-13 にデータ処理のフローを示します。建物の場合にはかなり高級なことをします。まず1個1個の建物データがあります。別のデータとして地番参考図等のデータがあります。これは紙のデータになっています。地図と地番参考図を目で比べると、この住所の土地の地番は何番だとすぐ分かりますが、この住所と

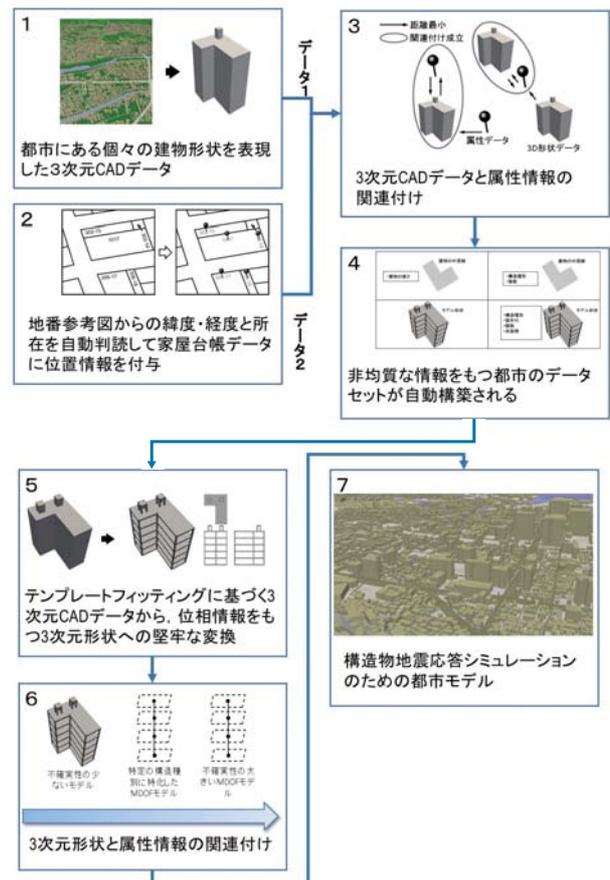


図-13 データ処理のフロー

地番の同定を自動化させることが必要になります。このような地図の判読技術は他の地図、もしくは図面にも使えます。良い判読技術は非常に便利です。

データ処理プラットフォームでは、判読のためのソフトウェアが集まっています。また、2つのデータの関連付けのソフトウェアもあります。例えば、一つの建築建物の形状のデータと行政のデータを互いに関連付ける、ということです。それから建物の構造を推定するソフトウェアもあります。データが利用できれば、適切な推定をして、鉄筋コンクリート造であると内部構造はこうであろう、というような推定です。利用できるデータの量と質に合わせて、複雑な解析モデルから簡単な解析モデルまで、適切な解析モデルが選択できるようにすることもします。

このようなデータ変換をするためには、膨大なデータの中には、わずかながらミスやエラーが含まれていることも考慮しなければなりません。このミスやエラーを自動的に修正するというのも重要です。ミスの例というのは、図形を描かせてみると分かります。例えば、ちょっと建物の図形が重なるところがある、また、T字型の建物だけれども、もとのデータは少し重なっている、といったことです。図形がうまく合うよう、修正します。このようなミスやエラーの検出と修正は、モデル構築技術がより普遍的になり、非常に強力なデータ処理ができるようになるということになります。

また、データ中にはこれはどうしても人に見せたくないというデータもあります。実際、行政データは公開が禁止されているものもあります。さらにはデータのフォーマット自身も秘匿しなければならない重要なデータもあります。狭い意味の情報セキュリティではありませんが、情報セキュリティに間接的に関わることとなります。秘匿データを処理するために、データの中で絶対にユーザーには見えないような処理をする。そのような工夫もして個人情報保護の時代に合ったソフトウェアにしようとしています。

今までの話をまとめてみると、複数のデータを集めて、すなわち、形状のデータや行政のデータを集めて、建物の詳細データを作ります。地番参考図等もしっかり読めるようにします。これによってモデル自動構築が完成します。我々は先端都市モデルと言っていますが、普通はGoogle マップ、もしくはゼンリンと言うほうが正確かもしれませんが、カーナビで使われるような3次元地図を使って、都市の形をなぞったモデルはできます。データの量が増え、さらにはデータの質が良くなると、よりよいモデルができるようになります。まさにデータが駆動する先端都市モデルが自動構築できるということになります。

図-14は神戸市を対象に作った世界最先端のモデルです。この都市モデルを使った地震のシミュレ

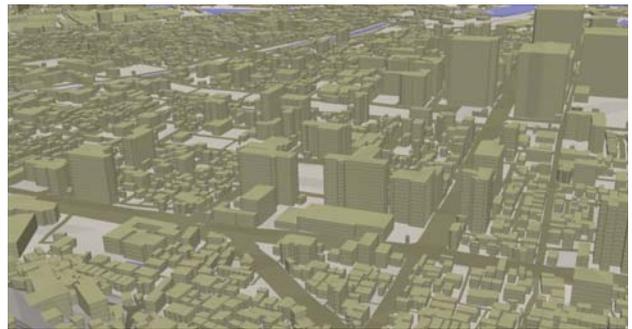


図-14 先端都市モデル(神戸市)

ションでは、どこがどのように揺れるか、という地震被害の基本的な問いに対しても、従来の形だけの都市モデルよりは、高い信頼度をもって推定できるようになります。

ライフラインの地震被害の評価・予測も重要です。ライフラインを作る埋設管ネットワークは慎重な扱いが必要です。日本の場合、共通のフォーマットでガス、電気、上水道、下水道、それから通信の埋設管ネットワーク全てのデータが整備されています。このデータを変換してライフラインの都市モデルを作ろうというわけです。普通の梁(はり)とばねの解析モデルからシェルの解析モデル、さらには複雑な解析モデルまで、重要度、もしくは被害の度合いに応じてさまざまな解析モデルが自動で作れるようにしました。なお、埋設管ネットワークの解析モデルには少し数学が必要になります。うまく管がつながっているかどうかということを正しく判定する際に、数学が必要となるのです。このような検証もできるソフトウェアを作って解析モデルを作ります。

言い方には気を配らなければなりません、「京」コンピューターを使うときには「チャラチャラしたソフトウェア」ではうまく実行できません。実行できても「京」コンピューターの性能を出すことができないと、「京」コンピューターを運営している人には残念な状況となります。やはりきちんとしたソフトウェアは、手作りでもしっかり作っておかないと、うまくいきません。我々は、「京」コンピューターの性能も引き出せる良いソフトウェアを作ろうとしています。本当に細いところですが、複雑な形状の解析モデルを作る際にも、きちんと形状を扱うことでミスのないモデル自動構築ができるようになります。その結果となる解析モデルは、データを全部読んでエイッと変換した解析モデルですが、かなり細かい形状を表している、ぴったり再現するモデルとなります。今のところミス0%で完全な変換ができています。

ライフラインの地震のシミュレーションをする際、適切な物性パラメータを与えて計算してみると、どの箇所が地震動によって被害を受けるかが推測できるようになります。ライフラインのモデルを拡大し

てみると、一部特異的な変形を示します。先ほど申し上げたように、複雑な箇所はシェルモデル、さらにはソリッドモデルを使ってもっと正確に解析して、本当にどの程度の被害が起こるかを分析する。そのような研究も行っています。このライフラインのシミュレーションは、下水道や上水道にも使えます。

7. 実構造物への適用

都市以外に、どういう構造物に高性能計算を使うシミュレーションを適用してきたかということをごっとうご説明します。

地震動

最初が地震動で、ライフラインの会社と共同でやったものです。大きな地震動が起こると、どのような被害が生じる可能性があるかを検討するためのシミュレーションです。今までご紹介したような非常に大きなモデルを作って地震動を計算して、各地点の揺れを計算するというわけです。特に3次元の構造が重要なので、柔らかい地盤、もしくは複雑な地形の箇所が重要です。地形は、全てモデル化して計算するということになります。このような大規模計算の結果、ライフラインの材料である構造材料の塑性ひずみに比べればはるかに小さいひずみレベルしか大きな地震動で生じませんでした。したがって、全く問題なし、ということが分かりました。歪以外のいろいろな指標で調べても、問題なし、となりました。地震のいろいろなケーススタディを行って、被害はないだろうということが予想されます。

トンネル

トンネル構造物の地震応答は、普通は2次元断面で行う場合が圧倒的に多いです。トンネルの性質上大体真っすぐな管でできているからです。ところが真っすぐな管だと車が入らないので、取り付け部分が必要になります。この部分は3次元構造物になるので、地震の応答は複雑になります。その分をしっかりと計算しようということになります。計算方法は様々なものが考えられますが、高性能計算を使うことで、3次元のトンネル構造物の地震応答がしっかり分かるようになります。やはり構造物が一部急変するようなどころに関しては、きちんとしたチェックをすることで、3次元モデルを使う数値解析をすることで評価できます。キーワードで申し上げましたけれども、トンネル構造物の「デジタルツイン」を作ろうとしているわけです。

高速道路

最後の例が高速道路です。2つのデータが必要で、1つは設計で使った AutoCAD のデータ、これ

は設計で使うために、断面ごともしくは部分ごとのデータとなっています。その断面ごと部分ごとのデータをつなげる GIS のデータがもう一種類のデータです。橋の線形、橋梁の部材。この2つのデータを組み合わせて解析モデルを作ります。また解析モデルの構築は全自動です。構造物を上部構造と下部構造に分けて、大体どのような形状になっているかということ判定し、重要な部材を抽出し、そしてその抽出された部材の適切な構造モデルを作ります。この一連の作業を自動で行うということになります。言うのは簡単で、お見せしても1分もかかりませんが、自動化は結構大変です。

このような自動化の努力をして作ったのが図-15の構造要素と梁要素の解析モデルです。形状の詳細までしっかりモデル化されています。ポイントは、これは全て自動なので、人の手が一切入らないことです。実は全自動のソフトウェアを開発したのは、私が指導したスリランカからの留学生でした。日本語が読めないわけです。日本語を読まないですむよう、高いレベルでの全自動化を行いました。

ソリッド要素で作ってみると図-16のような解析モデルができます。詳細の形状まで忠実に表現できる解析モデルが全自動でできました。留学生は非常に喜びました。私も大変うれしかったです。

実際に計算してみるとこの部分で有限要素法の要素で言うと1億1,000万ですね。梁要素で言ったら2万弱の要素になります。

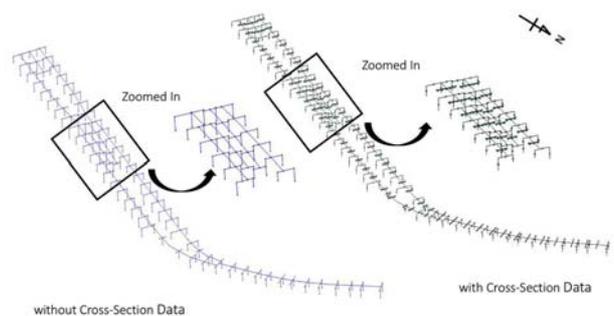


図-15 フレーム要素モデル

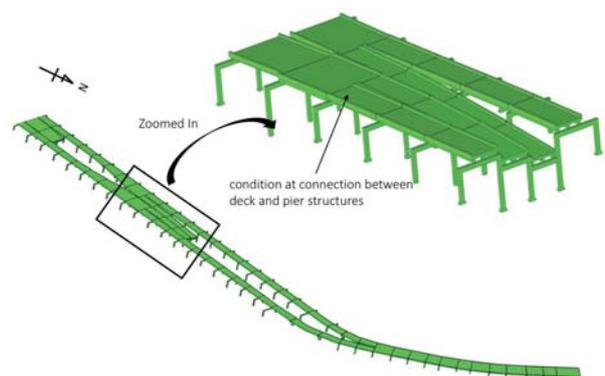


図-16 ソリッド要素モデル

しかし、苦勞して全自動で作った二つの解析モデル、**図-17**の結果が全く合いませんでした。どういふことかということ、一次の固有周期。ソリッド要素が1.6Hzで、梁要素が1.5Hzで15%の誤差がある。これは非常に大きな違いなので解決しなければなりません。違いを分析すると、接合部の挙動が全く違う。詳細を見てみると、梁要素、ソリッド要素の揺れ方が全然違う。そこでこの橋脚の場合には支承といわれる上部構造と下部構造を結ぶ接合部を徹底的にモデル化します。支承を適切にモデル化すると、先ほどの二つの解析モデルの結果が合うようになります。大規模な橋梁構造物の地震応答を決める大きな要因の一つはこの小さな支承です。この支承を適切にモデル化することによって2つの解析モデルが整合するようになりました。

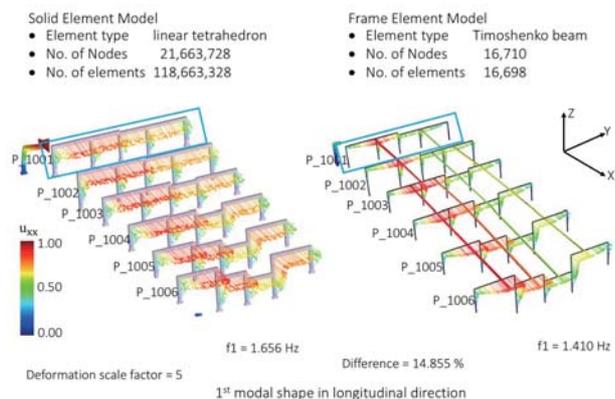


図-17 ソリッド要素モデルとフレーム要素モデルの比較

我々の勉強不足かもしれませんが、支承はあまり土木屋が入る分野ではなくて機械屋さん任せているようです。何となくブラックボックス化していたのかもしれませんが。統合シミュレーションのモットーの一つは「他の人の仕事を自分で行う」ことです。機械に入ってこの支承をきちんと扱ってみると、うまく解析モデルが自動構築できるようになったということになります。このようなモデルの自動構築は、当然、橋梁構造物全般に適用できます。複雑な地震応答を示す曲がった橋梁に対して、ソリッド要素でモデル化しても梁要素でモデル化しても、きちんと計算できるようになったということです。

図面データと地形データをうまく合わせることで橋梁モデルを自動で作ることができました。同様なモデルの自動構築は、高速道路の会社と共同研究を進めています。先ほどお名前を申し上げた神戸大学の飯塚先生とご一緒に阪神高速の橋梁構造物を全部モデル化して来るべき南海トラフ地震に備えるということを進めています。そのときのポイントは、30年前ぐらいの紙データ、これをいかにデジタルデータに変換して解析モデルを作るか、そこに尽きます。

我々もその飯塚先生のプロジェクトに入れてもらいました。データ変換の部分を担当しています。

8. 群集避難の都市モデル

群集避難の都市モデルは毛色が違うのですが、実は2つのモデルを使います。1つはグラフモデルというものです。グラフモデルとは、点と点を結ぶ線のモデルです。もう一つがグリッドモデルです。これは空間のモデルで、人が追い越をしたり、立ち止まる時の空間を表すモデルです。

行政の力を借りて、我々が普段使える道路ネットワークの他に、建物居住者ネットワークや建物形状GISなどを使ってモデルを作りました。勿論、避難用の都市モデルです。ポイントは、より良質なデータや異なる種類のデータが使えるようになると、より洗練された解析モデルが作れることです。勿論、データが増えると、データ処理の手間は増えます。しかし、そのデータの処理の手間というコストをかけても、結果として、より良いモデルができることになります。この場合は群集避難用の道路データがそのより良いモデルです。

ある道路のデータが使える場合、まずこのデータをグリッド化します。グリッド化というのは建物、要するに障害物があるところと、障害物がないところを、格子を使って区別することです。次にこの障害物がないところをつないでグラフモデルを作ります。点と接点でつなぐということにします。2車線の場合や複雑な道路形状では、グリッドモデルを作るのは決して簡単ではありません。しかし、洗練されたソフトウェアを作ることによってあまりミスがないようなモデルを作れるようになっていきます。具体的には従来の方法で作った都市モデル、新しい方法で作った都市モデルを比較すると、従来の方法では道路の幅が広がっています。幅員では3車線ぐらいになってしましますが、新しい方法では、1レーンずつ、2レーンずつの道路となり、より詳細で現実に近いモデルができました。**図-18**にまとめてありますけれども、データが足りないと、どうしても過

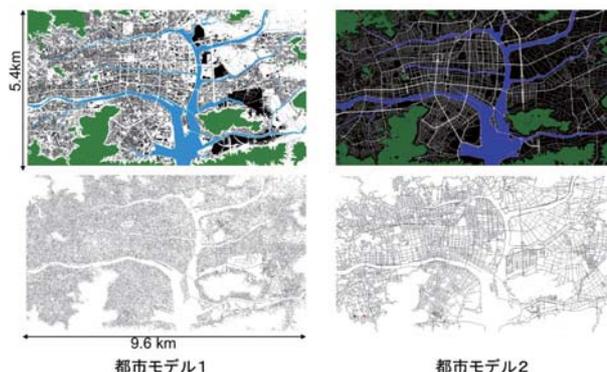


図-18 都市モデルの比較

度に幅が広い道路となってしまいます。ところが新しいデータ、道路ネットワークのデータが使えると、データの質が上がり、レーンの数もしっかり組み込まれたモデルとなります。

ここにいる皆さんは、私と世代が近いので、一太郎、三太郎、花子とかいう古典的なソフトウェアから Word に移れたわけですね。今の若い人は Word から離れることができるでしょうか。要するに、新しいソフトウェアを使うことができる柔軟性を失ってしまったのではないのでしょうか。「一生君たちはマイクロソフトに年間2万円ぐらい払い続けるわけですね」と学生に尋ねているのですが、これはあまり望ましいことではないようです。ソフトウェアを適切に更新したり、新しいものに取り組むことは重要です。さて、群集避難では解析モデルが非常によくなりましたので、計算性能を徹底的に上げようということをしました。計算性能というのも計算をする性能ではなく、モデルを自動構築する性能です。モデルが複雑になると、従来のソフトウェアではモデルを作る時間が増えてしまいます。そこでモデルを作るソフトウェア自身も改良したわけです。細かいことは省略しますが、従来のソフトウェアでは37秒ぐらいかかったものが、新しいソフトウェアではその10分の1ぐらいでモデルが作れるようになりました。このような改良は重要と思います。

9. おわりに

もうこれで最後です。今、**図-19**のような都市モデルは日本列島全体をカバーしています。これは、内閣府が進めている戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）で、防災科学技術研究所が開発しているものです。また、防災科学技術研究所が観測した地震動を入力すると、該当都市が揺れる計算も自動できるようになります。勿論、地盤のデータを使うと、ライフラインの被害も計算ができるようになります。イメージで書いていますが、地盤の揺れ、建物の揺れ、そして避難。さらには、既にご説明した交通障害や、さらには経済活動、このようなことまで地震発生後に計算できるようにすることを考えています。

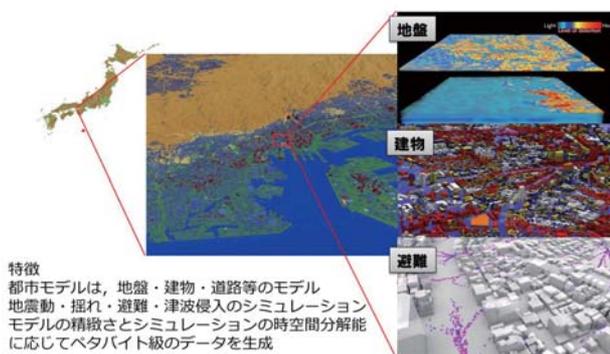


図-19 日本列島をカバーする全地域の都市モデルのイメージ

これは極めて先端的な科学技術です。もともとの研究開発の趣旨は、先月からマスコミが取り上げるようになった、「京」コンピューターの次の、ポスト京と呼ばれる計算機を使うためのソフトウェアです。最先端のスパコンを使うソフトウェアを作る研究開発です。なお、最先端のスパコンを使う高性能のソフトウェアは他の計算機でも信頼できる結果を出します。途中でお見せした計算結果、地盤の計算結果、ライフラインの計算結果、さらに高速道路の計算結果は「京」コンピューターを使っていない計算です。「京」コンピューターで開発された優良なソフトウェアを使った計算です。最先端の環境で作った優良なソフトウェアは他の計算環境でも信頼できる結果を出すということです。

我々は、今、科学技術として地盤、建物、避難、経済活動、このような都市全体の統合シミュレーションをしています。地震だけではなく、津波も視野に入っています。この都市全体の統合シミュレーションをいかに社会に世界に使ってもらうか、が重要です。今、このような統合地震シミュレーションの社会への応用・適用を我々のグループで考えるところです。

（本稿は、平成30年12月14日に開催した、平成30年度原環センター研究発表会特別講演「都市の統合地震シミュレーション—地震発生、構造物被害、経済回復まで—」の内容に基づき再構成したものです。）

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）

TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116

ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>