

インフラデータから衛星データを利用する 都市の丸ごと地震シミュレーション

国立研究開発法人海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 部門長 堀 宗朗

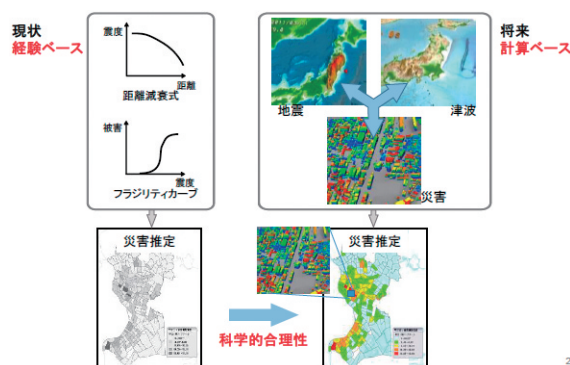
ご紹介ありがとうございます。海洋研究開発機構、JAMSTECの堀と申します。3月まで東京大学地震研究所におまして、4月から第2の職場で海洋研究開発機構におります。ご存じの方もいらっしゃるかもしれませんが、地震研は3月に辞めたのですが、6月1日から東大の工学系研究科の方にも戻ってしまいまして、なかなか大学から抜けられないところです。今日は「都市の丸ごと地震シミュレーション」ということで、お話ししたいと思います。

巨大地震・津波による災害予測の現状と将来

先ず現状です。都市を対象とする地震災害、例えば建物でも10万、100万の単位になりますので、一棟一棟、設計で使うような精緻な解析はできない。それで、経験ベースの比較的簡単な式を使った災害推定が主流です。皆さんならこういう話が分かりやすいかと思いますが、例えば地震動のデータで、100ヘルツのサンプリングで100秒ぐらい計測すると、0.3メガバイトぐらいのデータになります。経験式の入力となる震度にした瞬間に、このデータが8バイトになります。さすがにデータ圧縮としてはやり過ぎです。

そしてもう一つ。計算機の性能が非常に良くなっています。京コンピューター、それから筑波大と東大で持っているOakforest-PACSがあります。ここにLINPACKというスピードの性能で10.5ペタFLOPSという数が出ています。Oakforest-PACSは13.6。ちょっと生々しいですが、値段が約1,000億円と100億円で、10分の1でほぼ同じ性能ということになっています。さらにTSUBAME、これは東工大のマシンですが、GPUを使った非常に先駆的なマシンです。また、諸般の事情で忘れられてしまいましたが、日本発のPEZYという素晴らしいマシンです。世界最高のマシンはSummitというIBMとNVIDIAがタッグを組んで作ったアメリカのスパコンです。200ペタFLOPSで、京コンピューターの約20倍。5年もすると、そこら辺にあるとは言いませんが、多く

の研究機関、もしかしたらそれ以上に民間企業が使うマシンはこのレベルです。いかにこういう計算機を使うかということが、われわれ研究者の一つの使命です。そのために、この災害予測を変え、それも計算ベースにしよう。そのためには、本日のテーマである都市の地震災害用の優良なモデルを作ることがポイントになります。

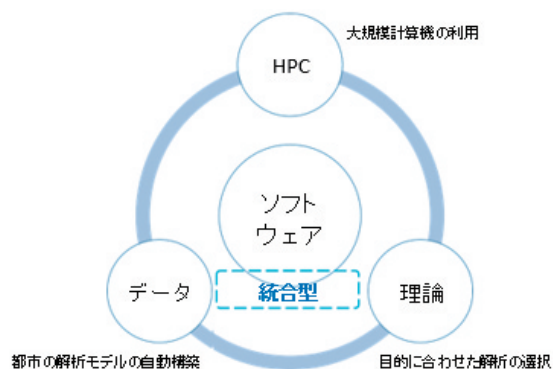


地震シミュレーションの現状

一つがハイパフォーマンスコンピューティング。スパコンだけですと、ただの箱で全く役に立たない。優良なプログラムを作ることが必要です。もちろんプログラムを買えばいいじゃないかという考え方もあります。買うにせよ、使うにせよ、やはり最初に誰かが作らなければならない。今、私はこのMicrosoftのofficeを使っていますが、一回いいプログラムを作ると、長い間収益があるわけです。多分私は、死ぬまでずっとMicrosoftに年間数万円を払わなければならないと思いますし、もしかしてここにいらっしゃる20代の方は、50年近く払い続けるということになります。これがプログラムを作ろうということです。

さらに、データが必要です。地震を対象としていますので、都市のしっかりしたモデルを作ることが必要です。それも、できれば自動構築で。

最後に理論。あまり計算と理論は馴染まないかもしれませんが、実は、こういう計算を進める上で大事なものは物理であり、数理です。



統合地震シミュレーション (IES)

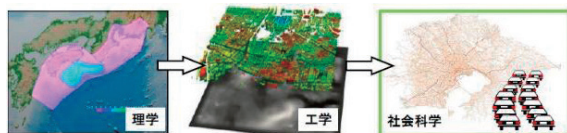
今、我々が作っているのは、都市統合地震シミュレーション Integrated Earthquake Simulation です。理学の計算、工学の計算、さらに社会科学の計算を全部まとめてしまおうというプログラムを作っています。このシミュレーションを京コンピュータや、次の富岳のようなスパコンで走らせるようなプログラムを作ります。優良プログラムとなれば、5年後、10年後には、色々なところで使ってもらえるかもしれません。

統合的予測シミュレーションの全体像をパッと示すために、いつもこの図を使います。これは、いまから5年ぐらい前の2014年に作ったビデオクリップですが、東京の地震解析用のモデルを作りました。東京駅、上野駅、池袋駅、新宿駅を含む約10km四方で、深さ300mぐらいの地盤モデルをボーリング・データと地表面形状データとを集めて作ります。土木工学の皆さんはご存じと思いますが、自由度が10万ぐらいのモデルが普通ですが、これは100億ぐらいかな。いまは10兆ぐらいの自由度のモデルがつくれます。100万×100万のレベルです。

複合災害の大規模シミュレーション

地震の場合は、インピーダンスコントラストが大きい場所で地震動が大きくなります。また、地形の急変部で地震動がおおきくなります。地盤を正確にモデル化することが重要です。ここでは地層が3層のモデルを自動で構築しています。

地形に応じて、よく揺れる所と、あまり揺れない所がはっきりします。青があまり揺れない所で、色が赤く



なるにつれて揺れが大きくなります。地震工学的には別に何の新しいことではありません。地盤が柔らかい所や地形が複雑な所がよく揺れるということは当たり前です。ただし、都市全体で俯瞰的に、どこがよく揺れるのかが分かるというのは意義が大きい。この地域には約33万の建物があります。建物一棟一棟にモデルをつくります。非線形の地震応答解析用のモデルで、一棟一棟に計算された地震動を入れて、建物はどこが揺れるかが分かります。四ツ谷は多分ここ、これが新宿御苑でしょうか。ここら辺がこの四谷ホール、建物の揺れの様子がわかります。揺れと同様に赤が地盤の歪みの大きな所です。ライフラインの地下埋設管は加速度よりも地盤の歪みで壊れるので、地盤のどこが歪むのかということを計算することが重要になります。加速度計や速度計では歪みが測れません。シミュレーションが地盤の歪みを評価する重要な方法になります。

社会科学のシミュレーションと称していますが、200万の人が、もし避難するとすればどうなるかということ計算します。この中で足の速い人が足の遅い人を追い抜くとか、前が詰まったら止まるということで、常時の整然とした避難ではなく、かなり混雑した状況を再現したシミュレーションです。スパコンのような大規模計算が必要です。

こういう計算をして全部組み合わせるのが統合的予測シミュレーション、地震、津波の大規模シミュレーションです。要素技術としては、いろいろなシミュレーションを連成することになります。理学のシミュレーションでは、地震発生の数値解析を行います。富岳を使用することで、より精緻な地震の解析ができるような計算方法を進めています。また、津波のシミュレーションも行います。割り切ってしまうと、津波は粒子状態で計算できますけど、やはり都市の中に侵入する時には、自由表面といいますが、海水と空気との境界の所を正確に計算しないと精度が出ません。粒子系の比較的新しいシミュレーションを使って計算しています。

地震動の計算に関しては、スーパーコンピューティングという国際カンファレンスで何度か優秀研究としてノミネートされるレベルになっています。多分この分野では一番早くまた一番巨大なモデルが解けます。これは南海地震を想定した場合ですが、大阪から神戸に渡る地域の全地震動を計算することもできます。

重要な点は、都市モデルの自動構築です。後で詳し

く説明しますが、行政のデータ等を使うと、都市のモデルが形の他に、どういう力学特性、材料特性を持っているのか、ということが推測できるようになるので、非常に優良なモデルが作れるようになっています。

地形のモデルは各界からのご協力をいただきまして作れるようになっています。あとは行政のデータで、築年代や構造形式が解ると、モデルがより精緻なものになります。現在では少なくとも6,000万の、日本の国内のモデルが全て自動構築できるようになっています。建物がアップデートされ、提供されるデータがアップデートされると、それを反映した都市モデルを自動的に作れることになっています。

超大規模解析モデルの計算もできるようになります。先ほだのご発表で、点群データを使った計測があったと思いますが、同じような趣旨です。3次元CADデータ（全部、有限要素法のモデルです）から、1億から10億ぐらいの丸ごとの、原子力発電所ならば大規模施設丸ごとの、解析モデルを自動的に作れるような技術を持っています。

地震応答解析では、物理過程を計算しなければなりません。形状と材料特性を入力した精緻な解析モデルが必要です。モデルの徹底的な自動構築が重要になります。

社会科学のシミュレーション

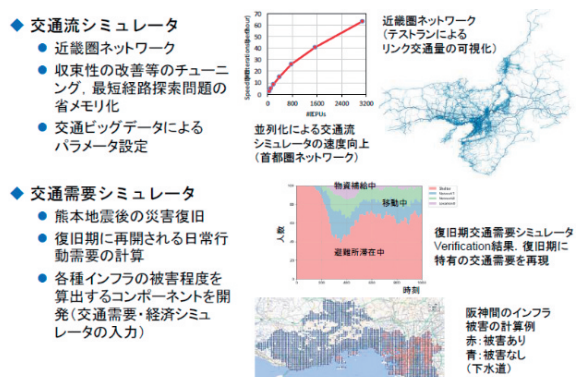
現在、取り組んでいる3つの社会科学のシミュレーションのうち、1つが群集避難のシミュレーションです。ここでは車両と人が混在した場合に、どういうふうに人が逃げるかということを計算しています。災害時の避難のルールでは、原則、車は使えません。しかし、このルールができたのは、高齢社会に突入する前です。いま、車なしでは津波被害が考えられない方も少なからずいらっしゃいます。もし合意ができるとすれば、誰がどういうタイミングで自動車を使っていいのか、使うべきなのかが、このようなシミュレーションで判るようになると思っています。

群集避難シミュレーションでは、東大生研の柴崎先生、関本先生のグループに入ってもらって、都市データを提供してもらい、ある種のデータ同化をして、個人の属性を組み入れた避難シミュレーションもできるようになっています。緊急時には個人の属性が重要で、早く走る、ゆっくり走る、土地勘がある、土地勘がない、

そんなことが大きく効いてきます。

社会科学のシミュレーションの2つ目は、交通障害のシミュレーションで、2つのシミュレーションが必要です。1つは交通流そのものです。常時の場合にはいろいろな解析方法がありますが、非常時なので特殊な解析方法が必要になります。もう1つのシミュレーションは交通需要予測です。災害時に、誰があえて交通機関を使うか、もしくは使わないか、ということ予測することが目的です。

避難所に滞在している場合、移動している場合、さらに物資の輸送中で全体の交通の需要が変わると、それに応じて交通量も変わります。これを名古屋から大阪まで全域で計算します。スパコンは、まさにこういうむやみに大きい計算が得意ですので、細部を考えた広域の交通障害のシミュレーションに使えることになります。



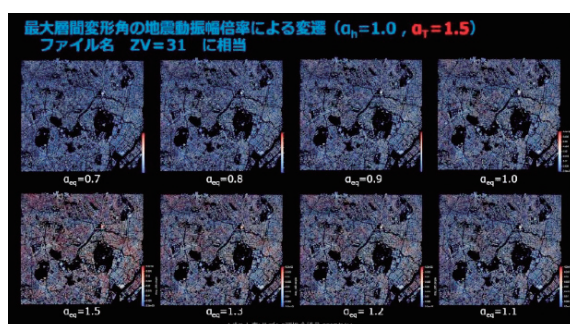
3つ目は経済障害のシミュレーションです。エージェント・ベースのマイクロ経済シミュレーションといいますが、経済客体としての人は1人1人の、企業や銀行は本社から支店レベルまで、全部モデル化して計算します。これもスパコンが得意な計算で、1億から10億の数のいろいろなエージェントがマイクロ経済の計算をすると、マクロ経済の状況が再現できそうです。例えば、EUがリーマンショックの時に、経済活動が一時期低下し、その後復活したか、ということが再現できるようになりました。経済の分野でもなかなか難しい問題のようですが、マイクロ経済の計算をスパコンの力を借りて大規模に解き、マクロ経済の状況を再現・予測する、ということは重要です。

首都直下地震の統合シミュレーション

統合シミュレーションで進めているのは、首都直下

地震です。計算機の利点は、同じようなシナリオのシミュレーションも不平を言わずに計算してくれることです。630の災害シナリオ、建物は250万弱、道路は35万程度の災害を考えて全部計算しました。

この図が建物倒壊の計算結果で、赤が倒壊の度合いが大きい箇所です。パラメーターを変えるとどれくらい被害がばらつくのかわかります。これを基に道路が閉塞され、どの程度、交通が制限されるかを計算します。建物の被害状態によって道路ネットワークが使えなくなるかわかります。この一連の計算をまとめた結果、交通量がどうなるか表しました。被害がない場合が常時の交通状態ですが、この状態が大体再現できます。2つの地震シナリオを考え、交通量ネットワークがどれだけ使えなくなるかを計算することができます。



地震シミュレーションの現状

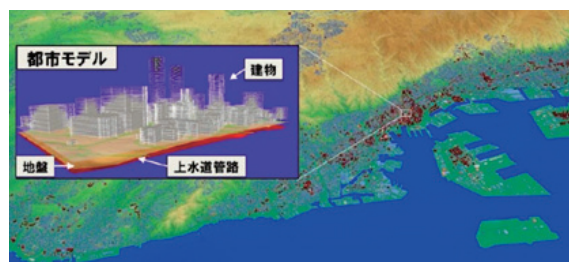
これが、いま作っている地震シミュレーションの構成です。ソフトウェア工学で使われる密結合と疎結合を使います。密結合は、例えば銀行口座のように、常にデータが同期するものです。疎結合は、必要な時だけデータが同期します。データを統一して使うには、フォーマットやプロトコルを統一するという、かなりの手間が必要になります。密結合の場合はフォーマット統一が必須ですが、疎結合ではデータを変換すればいいので、フォーマットの統一もしくは基準の統一の必要はありません。

複数の異なるデータを集めて、いろいろなモデルをつくることができます。例えば3次元のデータや行政データから、建物の属性データを集めて、木造構造物や鉄骨構造物の解析モデルを自動的に作ることができるようになります。

データを集めてデータコレクションを作り、データコレクションからモデルを構築する、という一連のデータ変換が重要です。残念なことに、わが国の大学で

は死語となりましたが「オブジェクト指向プログラミング」や「アスペクト指向プログラミング」を利用することによって、多種、異種、多様なデータの自動変換ができるようになります。

次は理論です。基本となる式はラグランジュアンを使います。このラグランジュアンに使う関数をうまく変形することがポイントです。



一つの構造物に対しても、簡単なバネと質点系のモデル、構造モデル、非常に精緻なモデル、いろいろなモデルを作ることができます。このモデルを互いに整合させる必要があります。むやみやたらと難しいモデルを作る必要もないし、このご時世に簡単なモデルを作る必要はなく、要求された精度、空間分解能、時間分解能に見合う適切なモデルを作ることが非常に重要になります。

完全にデータがそろっていれば、完全なモデルができます。データが欠けている場合、手間をかけて精緻なモデルを作るよりは、少し品質を下げたモデルを作る、しかも、それが精緻なモデルに整合するということが重要になります。

地震シミュレーションの現状で、どんなソフトウェアができているのかをご紹介します。

これは神戸市の都市モデルです。形状のデータの他に属性を記述した行政のデータが入っています。建物がどういう種類か、どういう年代で建てられたかが推定できます。3次元モデルを作ったので、どの角度からでも見ることができます。こういうモデルを都市全体で組み合わせた3次元のシミュレーションが、5年もすれば、どこでも計算できることになります。

同じ都市モデルを津波解析用に変えて、津波の進入がどうなるかも計算できます。上の図が防潮堤の対策をした場合、下の図は対策をしなかった場合です。防潮堤の対策が、津波の進入に効果があることが分かります。所謂「なんちゃってシミュレーション」では、このような差は出ないかもしれませんが、スパコン使う

きっちりした計算をすると、しっかり差を評価することができます。

建物一棟一棟は、地震応答解析の時には揺れの解析モデルで、津波解析の時には津波が入らない障害物としてモデル化されます。モデルが自動的に区別されて使われるようになっていきます。津波の場合は、3次元の地形データと1m解像度の2次元格子データを組み合わせています。このモデルの自由度も1,000万を超えてしまうので、自動的に作られています。

地盤でも都市丸ごとのシミュレーションができます。ボーリング・データを基に地盤のモデルを作ります。現在の経験的な方法ではなく、数値解析による液状化判定を試みています。神戸大学の飯塚先生のグループが開発されたプログラムを利用すると、想定された地震動が入力された場合、赤が液状化の可能性が高い所、色が黄色になると液状化の可能性が低くなるという判定ができます。この液状化のシミュレーションは万能ではありません。例えば、山の地区に、赤い箇所がありますが、これは地盤工学的にはおかしい結果です。もしかしたらモデルのパラメーターの解釈に間違いがあるかもしれません。計算結果の吟味は絶対必要です。

建物のモデル化は、凝っています。まず2次元CADデータで建物形状、これに地盤参考図等の行政データを組み合わせて、幾何形状のデータと属性情報を関連付けます。このデータセットを作ると、テンプレートフィッティングによって3次元モデルを自動的に作ります。ミスがないように、堅牢にデータ変換ができるようにすることが非常に重要になります。

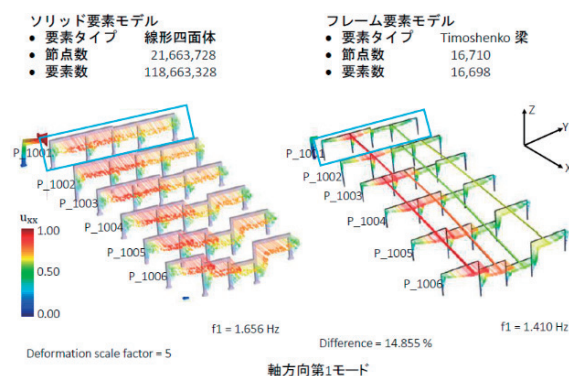
先ほど申し上げたように、データの量、質に応じて、適切な解析モデルを考えなければなりません。良いデータが多い時にしょぼい解析をしてもしょうがないですし、逆に、大したデータがないのに大規模解析をするのも合理的ではありません。モデルの確実性もしくはデータの正しさに応じて、適切な解析モデルを作ることが重要です。データの品質と量が上がれば、解析モデルの品質も上がるので、決め打ちではなく、データに応じて適切な解析モデルが選択され、そしてシミュレーションすべきです。神戸市にある全ての建物についての都市モデルできています。

物理過程の数値解析によるシミュレーションは、科学的に合理的な方法として、今後、使われていくと考えています。内閣府の防災では、このようなハイパフォー

マンスコンピューティングを使ったシミュレーションをもう既に実施しています。大きな流れとして、計算機が大きく速くなるのだから、その力を利用しない手はないという当たり前の判断がなされ、物理過程のシミュレーションが使われるようになっていくと考えています。

都市モデルは、埋設管等にも使うことができます。埋設管を梁で、地盤を地盤ばねで単純にモデル化したものや、複雑な形状を忠実に表現したモデルを作ることができます。神戸市のご協力で市が管理するデータをもらってモデルの自動構築を試みました。下水道に対して解析モデルができますし、上水道に関しても解析モデルを自動的に作ることが確認されました。

道路橋ネットワークにも使うことができます。これは首都高速道路会社のご協力で、地震が来た時どのように応答するかを検証することが目的です。CADのデータを基に上部構造と橋脚基礎とを分類し、それから精緻なソリッド要素解析モデルを自動的につくります。また、計算を簡単にするためのフレーム要素モデルも必要になります。フレーム要素にも断面のデータを付けて、より精緻にしたモデルもつくることができます。



実際に計算をしてみると、ソリッド要素モデルの場合、1.18億の自由度、フレーム要素の場合には、16,000自由度のモデルが自動構築されました。自動構築までは良かったのですが、計算をしてみると、二つのモデルが整合しませんでした。解析モデルの整合が重要と言ったのが、整合しなかったので大変困りました。具体的には、ソリッド要素のモデルの固有振動数が1.6ヘルツであるのに対して、フレーム要素は1.4ヘルツでした。せっかくスパコンで高い性能を出す解析コードを開発したけれど、使ってみたら実力は大きく落ちた、という訳です。整合しない原因を探るために、固有モードを調べてみると、橋脚と橋桁の接

合部に問題があることが分かりました。ソリッド要素モデルの場合、接合部に約10の支承を付けていますが、フレーム要素モデルの場合、接合部は2点の支承でした。この支承のモデル化の僅かな違い、橋脚と床版を結ぶ接合の違いによって、大きな差が出てしまったのです。原因が明らかになったので、接合部である支承に関して徹底的なモデル化を行います。支承の所謂、デジタルツインを作って水平剛性やねじれ剛性、曲げ剛性を計算しました。この支承の解析結果を加えてソリッド要素モデルを改善すると、固有振動数も固有モードがしっかり合うようになりました。整合する解析モデルが作れたのです。

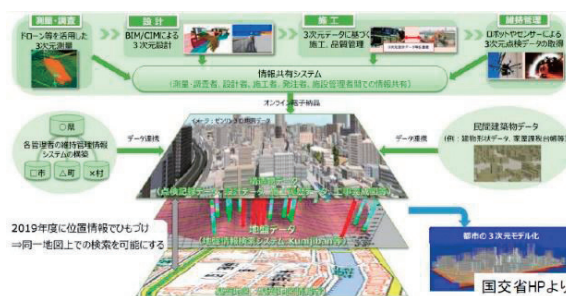
計算はあくまでも一つの道具です。道具を正しく使うためには工学知が重要です。支承という細分にまできちんとしたモデル化をしないと、大きく計算結果が違ってしまうことは、工学知の重要性を理解する上で、非常にいい勉強になったと考えています。

次世代型地震シミュレーション

次世代型地震シミュレーションには2つポイントがあります。ひとつは複数地震動にさらされた構造物の局所的な被害の推定です。複数地震動というと、2016年熊本地震を思い浮かべるかもしれません。首都直下型地震では、複数回の地震が起こる可能性は低いと思いますけども、南海地震の場合には、いわゆる壊れ残りから地震が起こると、場所によっては大きな地震動を2回受けるかもしれません。第二次大戦末期1944年東南海地震の時には、翌1945年に三河地震が起こっています。東南海地震がプレート境界に起こる巨大地震。三河地震は1995年兵庫県南部地震のような内陸地震で、それらが同時期に起こったという例です。複数回の地震をしっかりと予測することが次世代型シミュ

レーションの大きな目標です。

次世代型地震シミュレーションのもう一つのポイントは、事前の備えからレジリエンス向上のためのシミュレーション利用です。シミュレーションの解析モデルの作成にインフラデータを利用する、ということです。このため、国土交通インフラデータプラットフォームなどを利用することを考えています。

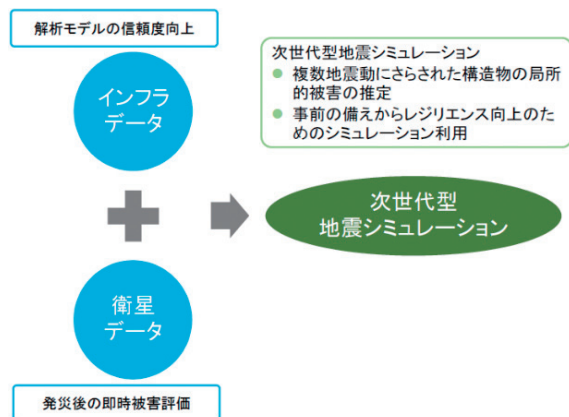


いろいろなプログラムの入力ファイルを自動的につくる技術が、インフラデータプラットフォームでは重要なかもしれません。インフラデータプラットフォームの数字を見ながらプログラムを使うためにデータを手入力をするという笑い話のようなことを避けるためにも、データをいろいろなアプリケーションの入力ファイルに自動変換することが求められていると思います。このようなデータ変換技術に関しては、スパコンで培われた疎結合、もしくは自動変換技術が利用できるよう期待しております。

東大に特任教授として採用されましたが、われわれの独自の説明なのかもしれませんが、徹底的にユーザー視点で、インフラを指定してデータ処理を指定するといろいろなことができる。例えば「このインフラを3次元可視化せよ」ということもできれば、経年による劣化予測解析ができる、あるいは地震に対する耐震評価できる。このようなシミュレーションを使うデータ処理をできるようにすることがポイントです。

データを使うことは重要ですが、できればいろいろなプログラムの入力として使う。そのための仕組みがインフラデータプラットフォームです。インフラプラットフォームの研究開発の方向としては、計算機の高速化と大容量化、通信の高速化を考えると、データを使って、いろいろなアプリケーションを自動的に実行することになります。

これで重要なのがAPI (Application Programming Interface) です。APIをいかに安価に作るか。今はや



りの言葉で言えば、競争領域と協調領域に分けて作るか、が重要です。例えばインフラには、橋梁、トンネル、港湾、河川と、いろいろ構造物がありますが、それぞれが独自にAPIを作ると非常に高価になってしまいます。アプリケーションにも解析から積算までいろいろあります。そうすると、協調領域でAPIの8割が程度が簡単に作れるようにして、残りの2割は競争領域として独自に作れるようにする。そういうようなことを提案しようと思っています。

この1本の線を引く工数は決して小さくありません。効率的に進めるために、競争領域と協調領域とを分けて、協調領域で無駄なく、インフラ種類によらずに、またアプリケーションの種類によらずに、開発できる仕組みを考えているところです。

衛星データ

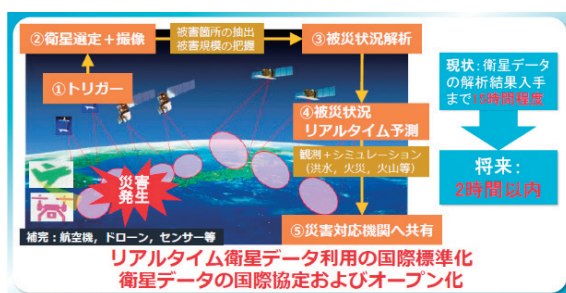
最後の話題が衛星データです。SIP、戦略的イノベーション創造プログラム「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」が進められています。このSIPでは、衛星データを利用し発災後2時間での被災状況報告を最終目標にする研究開発を一つの課題としています。発災後2時間というのは、例えば南海トラフの地震の場合には、政府の災害対策本部ができるタイミングです。

具体的にはこの図の2番目「被災状況解析予測」が衛星データの研究開発です。皆さんからもいろいろご協力をいただいております、本当にありがたい限りです。この研究開発のポイントは2点です。発生後2時間で被害状況の俯瞰的把握を行うこと、リアルタイムでの広域被害状況を把握すること、です。

SIPの特徴は研究期間の5年間は集中初期投資で、5年間で完成する、ということではありません。研究開発を続けることで2時間が然るべき時期に達成することが目標になります。衛星系の技術者と防災系の技術者とがタッグを組んでこの大問題に取り組んでいます。

さらに「衛星コンステレーション」というキーワードがあるように、国際展開も十分期待できます。トリガー、セクター、解析、予測、情報共有には、にシステム化が必要とされます。これは、わが国が得意とする分野です。衛星コンステレーションを使い、衛星データ利用の一連の過程をミス無くこのトリガーから災害対応までができることで、日本の方法が衛星データ防災利用の国際標準になり、衛星データそのものの国際協定お

よびオープン化にもつながるのではと考えています。



地震シミュレーションの将来

インフラデータと衛星データを使う地震シミュレーションの将来を考えてみます。一つは、設計用の解析モデル。インフラデータを使うと、設計用の解析モデルが使えます。想定災害や実災害に対する応答解析の信頼度が圧倒的に向上できます。局所的にどこが壊れるかが分かるようになります。これが一つの次世代地震シミュレーション。

もう一つが、被害解析から作成される疑似衛星データです。模擬衛星データと観測衛星データを比較することによって、より高速に発災後の被害推定を広域で行うことが可能となります。

最後に、日本列島をカバーする全地域の都市モデルが開発されるようになりました。都市モデルのデータは簡単なものです。より質の高いデータを使うと、より質の高い都市モデルとなります。このために今後、インフラデータや衛星データが、数値シミュレーションに優良な解析モデルを提供するという意味で、非常に重要になります。ぜひ、スパコンを使うような計算分野でも、皆さんが取得されるデータがうまく利用され、そして地震災害の軽減に少しでもつながればということを考えております。

以上、私のお話はこれで終了させていただきます。ご清聴、どうもありがとうございます。



講演者
堀 宗朗 (ほり むねろう)
国立研究開発法人海洋研究開発
機構付加価値情報創生部門
部門長

本稿は2019年8月2日に開催された、当協会主催「第41回測量調査技術発表会」における堀宗朗氏の基調講演の内容をまとめたものです。