

建築的立場から高機能・高密度大都市の対震力を考える

福和 伸夫（名古屋大学大学院環境学研究科・教授）

昨年までと同じ雰囲気のかかと思っただけで来たら、今回はこんなにたくさんの専門家の方がいらっしゃるの、少しとまどっていますが、今日は建築的な立場から、高機能・高密度大都市の対震力についてお話ししたいと思います。

最初に、もしも今、東海・東南海・南海地震が発生したらこのビルの最上階ではどんな揺れになるか見ていただきたいと思います。

東海・東南海・南海地震ですから、東京駅からは少し離れた場所で起きる地震です。ごらん頂いているオフィスの揺れは、内閣府が計算した地表の揺れを用いて、この建物の固有周期を仮定して線形1自由度系の簡単な方法で計算してみたものです。もう少したつと、少し大きく揺れますが、恐怖感を感じるような揺れではなさそうです。家具が移動したり倒れたりするかもしれません。なぜこういった揺れ体感システムをつくっているかということ、自分の居る場所での揺れを体感してもらうことでわがこと感をもってもらい、対策へと誘導したいからです。

この程度の揺れでも、事前に揺れを経験しておかないと、突然揺れ始めれば、いつ収まるか分からない揺れで、それなりの恐怖感があるだろうと思います。今心配されている長周期地震動で共振をするような建物では、この揺れの10倍ぐらいの揺れが予想されます。今見ていただいた揺れはどのようなプロセスで予想したかをごらん頂きます。まず、Google Earth上で、今いる場所をUpしてみますと、サピアタワーが出てきます。今、私どもで高層ビルのデータベース化を始めています。それを使ってこのビルの特徴を見てみますと、3年前にできて、地上35階建て、166mということが分かります。そこで、この条件を使って、先ほどのような揺れを予測してみました。

つぎに、どうしてこの場所に建っているサピアタワーが先ほどのような揺れにとどまったかの理由を考えてみます。

Google Earth画面をぐっと引いていくと全国の超高層建物の分布が分かります。次に、それぞれの場所はどんな周期で揺れやすいのかを調べた長周期域の周期分布を重ねてみます。この建物は周期が4秒ぐらいで揺れると思います。背面にあるのは、どこの場所はどのような周期で揺れやすいかという地盤そのものの周期分布です。

東京は、周期が7秒から10秒ぐらいで揺れやすい場所ですから、1次周期だけを考えるとここはビルとは共振しにくい場所になります。一方で、がっかりするのですが、私が今住んでいる名古屋です。名古屋では見事に多くの高層建物の周期が地盤の周期と近接しています。名古屋や大阪は、建物の持っている周期と地盤が揺れやすい周期が比較的近いので、先ほど見ていただいたこの建物の揺れと比べるとずっと激しく揺れるということが分かります。このような問題に対して、今後、われわれはどう取り組んでいくべきかというのが今日の主題です。建築的な立場からお話しできればと考えています。

これ（図1）は六本木ヒルズから南西方向を見た写真です。何となくぞっとする風景です。この場所は、昔とは使われ方が随分違っていると思います。

皆さんご存じのことばかりだと思いますが、今から400年ぐらい前から、どんな場所でどんな地震が起きたかを順に振り返ってみます（図2）。

420年ぐらい前に、天正の地震がダブルパンチでやって来ました。この2カ所の断層がずれ動いたようです。その10年後、1596年に、1週間の間に3連発で地震が発生しました。最初に四国の中央構造線、三日後に別府、さ

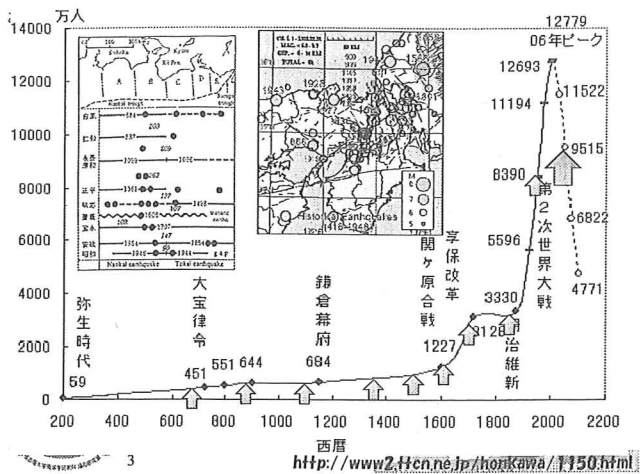


図 3

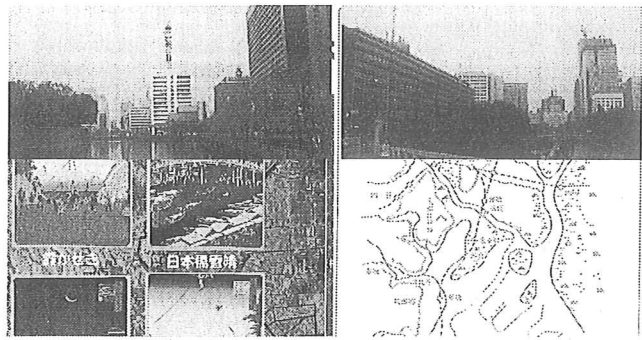


図 4

一番真っ赤な所に、気象庁と東京消防庁が本庁舎を造るとか、あるいは今日もいらっしやっているマスメディアの方々の本社があるとか、経団連の本社、JAの本社、日本一大きな商社の本拠地があるなど、見たくない光景でもあります。

一方で、昔の人たちは意外と地名を大事にしていました。赤い点は、さんずいのような漢字が付いているバス停のある場所、緑の場所は丘などという名前が付いているバス停の場所です。かつては、こういうことに気を配って住む場所を決めていました。良い地名の場所は明らかに良い地盤であり、関東地震のときの揺れも小さいです。

こういうかつての知恵を失って、日本中どこにでも同じ耐震性の建物を造っている現代社会というのは、本当に良い社会なのか、建築構造的には疑問が残るところです。建築基準法だけにのっかって、それにぎりぎりで作ることをよしとする現代社会の雰囲気を変えないといけないと思っています。この赤い所に林立している大事な建物が、本当に大丈夫なのかチェックする必要があります。われわれがよって立つところの建築基準法は、関東地震のときの東京本郷での揺れくらいでは、人の命を失わないようにしようという程度のものです。東京本郷の揺れと比べてはるかに強い揺れの所に、その基準で建てた大事な建物がたくさん建っているということに疑問を感じます。

そして、そういう建物に依存しているのが、私たちの国の経済です。左側にあるのは東証一部上場会社の本社のある場所です。少し言いにくいのですが、赤い点々は、建設会社の本社のある場所です。みんな便利な場所に本社を構えています。便利な場所は危険な場所でもありそうです。これが私たちの国で一番大事な地域、東京の実態のように思います。つぎに、マスメディアの本社がある場所です。一番駄目な所にあります。地震に対する危機感の少ないメディアの発信する情報を聞き、学んでいる国民は、当然、地震に対する意識が低くなることとなります。こういったことが、ミュンヘン再保険会社が東京・横浜地区は心配だという結果を出すことと関係があるように思います。この赤いところに一番大事なものがあるのですから。

一方で、江戸時代、私たちがここをどのように使っていたかを、浮世絵からのぞき見てみたいと思います。何枚かの浮世絵を見てみると、霞が関、日本橋、虎ノ門、日比谷、品川などはこういう風景でした (図 5)。たった 150 年前です。その前、太田道灌が東京に城を造ったときの地図を見ると、震度の大きなところは、日比谷の入江にあたります。

上は 150 年前に広重が描いた浮世絵です。これはちょうど安政の地震が起きた時期です。2 段目は同時期に描かれた江戸切絵図です。それから現代の地図、下側が同じ場所に行って写真を撮ってきたものです。浮世絵には水辺が多いのですが、いずれも埋め立てていて、ビルがたくさん建っていることが分かります。

つぎに、日比谷公園がどうしてできたかを見てみます。国土交通省のホームページ (図 6) を見るとその理由が

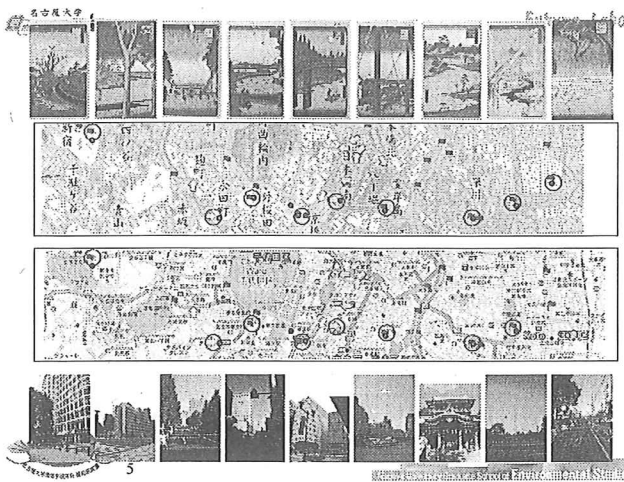


図 5



図 6

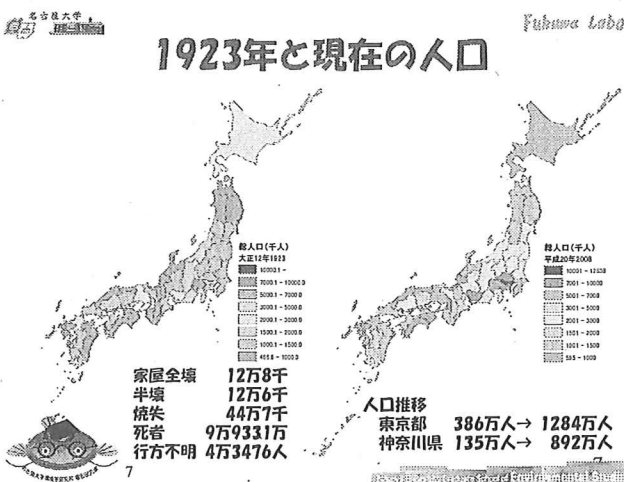


図 7

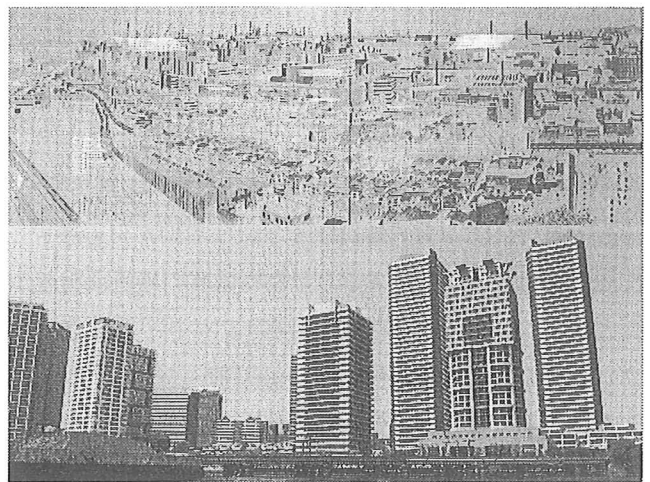


図 8

良く分かります。ホープレヒトさんとエンデさんが、官庁街の設計をしていた当時、当初、日比谷の練兵場跡に官庁街を造ろうとしていて、司法省を造る予定だったのですが、あまりに地盤が軟弱で劣悪を極めたために、建物建設を諦め全体の計画を変更したようです。そして日比谷練兵場跡の海側半分を占める軟弱地は日比谷公園として残り、司法省は残り半分の裁判所の敷地に造りました。また、他の官庁は議院、参謀本部、外務省、裁判所、司法省に囲まれた敷地へと変更しました。こんな大事なことを私たちはほとんど知りません。でも、このことは、東京の地震防災を考える上でとても大事なことです。

関東地震が起きたときの日本の人口分布は、図7の左のようになっています。このときたとえば神奈川県に住んでいた人は135万人です。現在は右の図のようになっており、神奈川県は人口が900万人弱と約7倍にもなっています。

明治より少し後の時代に、横浜駅前には上の絵のような街並みであったのですが、現在は下のような街並みになってきています(図8)。これを見て何となく不安を感じるわけです。

先ほど来お話ししてきた江戸時代や明治時代には、左側のような場所に家を建て、低層の建物を造っていた時代です(図9)。現代は右の絵のような時代になってきました。その中で、私たちはこんな感じで生活をしているように思います(図10)。湾岸の一番よく揺れる所に発電所やガスタンクを造り、堤防で囲まれた海拔ゼロメートル地帯に大きな建物を造り、電気・ガス・上下水などのライフラインに頼った生活です。そしてエレベーターが

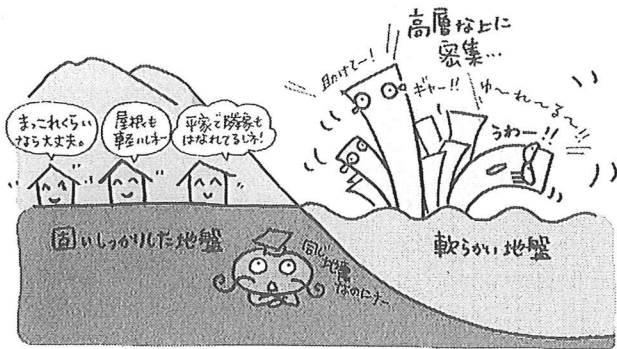


図 9

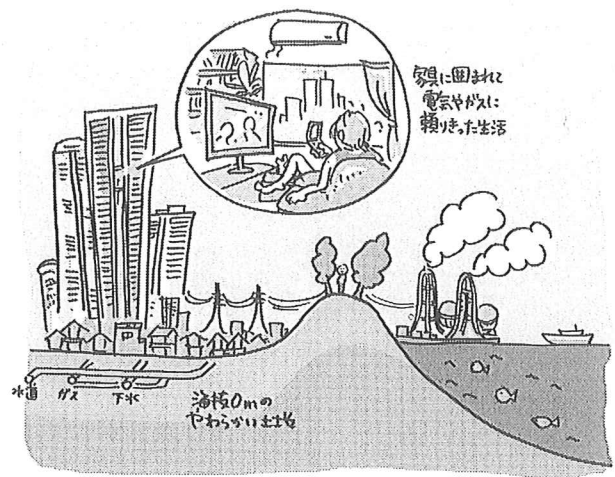


図 10

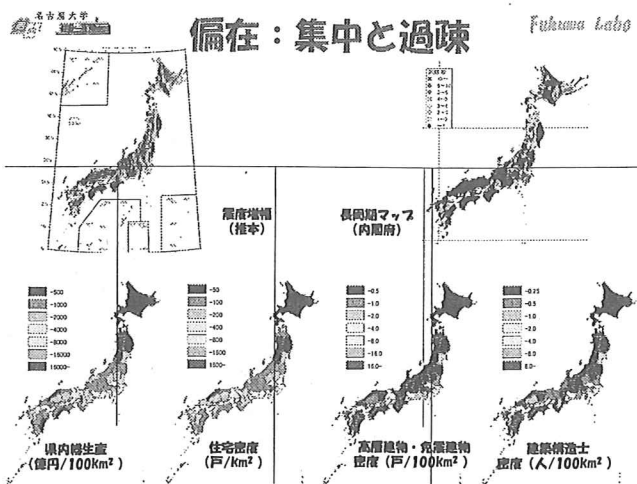


図 11

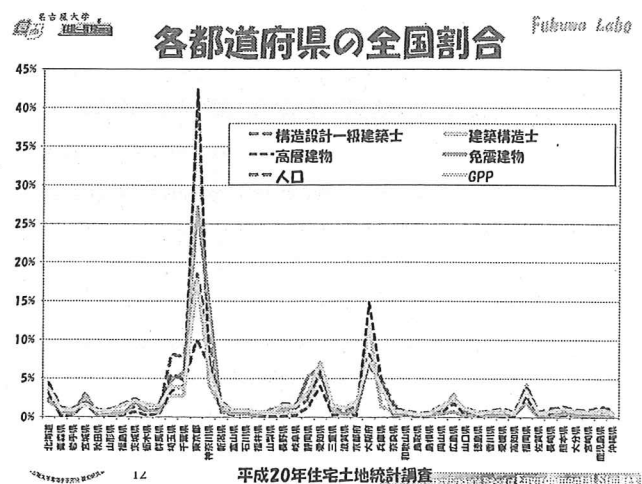


図 12

なければ生きていけない所で、大地震に対しての想像力なく、快適な生活をエンジョイしています。

こういった生活スタイルは、防災面では具合が悪く感じられます。左上は、どこがよく揺れやすいかという震度増幅度マップ、右上はどこが長周期で揺れやすいかという長周期マップで、地震本部と内閣府が作ったものです(図 11)。左下は経済がどこに集中しているか、左から 2 番目はどこに建物が集中しているか、左下の 3 番目はどこに長周期で揺れやすい高層の建物が集中しているか、そして一番右下は、そういう建物を造る高級エンジニアがどこにいるかという図です。いずれもととても良く揺れる所に集中していることが分かります。こう見てくると、世のインテリゲンチヤはみんな、余り賢くは無いということが分かります。短期的かつ狭い世界の中で最適化を進めてきた結果、国全体としては大変なことになってきています。この国は、本当にどのぐらい安全なのか、そろそろまじめに考える必要があります。

このグラフ(図 12)は、日本全体を 100 としたとき、どこにどれぐらい集中しているかを調べたものです。赤い線が人口の集まり方で、それほど密集していません。かつては日本全国で同じ人口分布でしたが、今はこのぐらい東京に集まってきました。人口の集まり方よりも、GPP(県内総生産)の集中度の方が、はるかに大きくなっています。

この県内総生産の比率と、姉齒さんの事件で創設された構造設計一級建築士の人数の比率は全く同じです。すなわち、構造設計一級建築士は産業界のニーズに応じて作られる建設物の量に比例して存在しているということ

です。そして、もっとも集中度が高いのが超高層建物です。超高層建物は全国に2500本程度あると言われてい
ます。ほぼ同じ数なのが建築構造設計のプロと言われる建築構造士の数で、約2500人います。高層建物の分布と建
築構造士の分布はほぼ一致しています。大変強く揺れる所にたくさん大事なものが人が集中しているという実情が
あるということです。すなわち、東京には1000本ぐらい超高層と1000人ぐらいの建築構造士がいます。私、直
感的に、地震被害後に超高層建物のチェックを責任をもってできる力のある構造屋は数百人ぐらいしかいないだ
ろうと思っています。高層ビルが被災後に健全であるかどうかを調べるには相当の人手と期間が必要になります。
数百人の技術者で1000本のビルの安全性を早期にチェックすることは、数の上では無理だと思われる。建物の
安全性を確認して安全宣言をしなければ、ビルの再使用の判断はできません。そうすると、超高層建物に集中立
地する我が国の経済の中核は麻痺状態になってしまいます。このため、地震計などを用いたモニタリング技術の
確立が望まれています。

こういったことを念頭に置きながら、名古屋と大阪、東京の東証一部上場会社がどこにあるか、図化したの
でご覧下さい(図13)。一番地盤条件の良くないところに立地しているのが大阪で、次が東京、一番地盤条件が良
いのが名古屋です。このことは都市の形成史と関係しているように思います。秀吉が大阪城を築城したのは1583
年、江戸開府は1603年、名古屋城の開府は1610年です。秀吉はまだ戦国の時代が残る時期に城を造りましたか
ら、どこからも攻められない、上町台地の北端にあった石山本願寺の跡地に城を造りました。ですから、町は、周
辺の軟弱な地盤につくらざるを得なかったこととなります。

江戸は1590年に家康が江戸に移らされて、1600年代以降に城を拡張しました。旗本は武蔵野台地の上に居住さ
せ、外様大名は、その力をそぐために日比谷入江を埋め立てさせそこに住ませました。ですから、江戸のまち
の半分は軟弱な地盤になりました。

これに対し、名古屋は、今年開府400年を迎えますが、大阪に睨みをきかせるために、1610年に家康が清洲か
ら名古屋城に移しました。家康は、1586年の天正の地震、1596年の慶長の3地震、1605年の南海トラフでの地
震を経験したあとでしたから、地盤が軟弱で水害危険度の高い清洲を避けたのかもしれませんが。名古屋のまち作
りは、江戸に入った後の戦後のまちづくりですから、熱田台地の良い地盤にまちをつくりました。ただし、現代
人は台地の上から軟弱な名古屋駅周辺に都心を移そうとしています。これは大きな問題だと思えます。

今のようなことを頭に置きながら、私たちの国はどうなっているか見ていきます(図14)。軟弱な堆積平野に多
くの人が住み、高層の建物や発電所を造りました。火力発電所は一番よく揺れる埋立地にあります。この場所に
東証一部上場会社と東証二部上場会社の本社を置きました。大事な工場群も広い敷地を求めて軟弱な地盤に立地
しています。工場のサプライチェーンの輸送を担う高速道路は、活断層に沿って走っています。見事に私たち現
代社会の脆弱度を示していると思えます。

最近、こういうことに対する感受性がなくなっているように思います(図15)。これまで申し上げてきましたよ
うに、現代は、外力はどんどん大きくなっていますし、抵抗力は下がっていきそうです。そういう中で、地震の活動
期を迎え、気候温暖化も迎えています。経済成長を求めて、低平地を利用するようになり、そしてそういう所に
人口を偏在させてきました。一方で、構造物の規模を大きくしてきています。そして、東京・大阪・名古屋のよ
うな大都市は、高機能で高密度な社会としました。こういった社会は災害には脆くなりがちです。

これから人口減少で少子高齢化の時代を迎えます。そして、地域社会の力も弱まっていそうです。企業は基本
的に利益を追求します。行政は、自己防衛意識が強く、特に地方では情報の公開が高くありません。

国民も、当事者意識がなくなり、楽観主義かあきらめているか、どちらかで、災害と正面から向き合っ
てちゃんと減災対策をしようとしている人があまりいません。専門家も、学問の細分化で倫理観や責任感が低下し、自
分のことを考えると学力や技術力も低下しています。

そういう中で、今後どうやって社会を守っていくかを考えるのがこの複合災害の問題であるかと思えます。もっ



三大都市圏の東証一部
上場会社本社位置

図 13

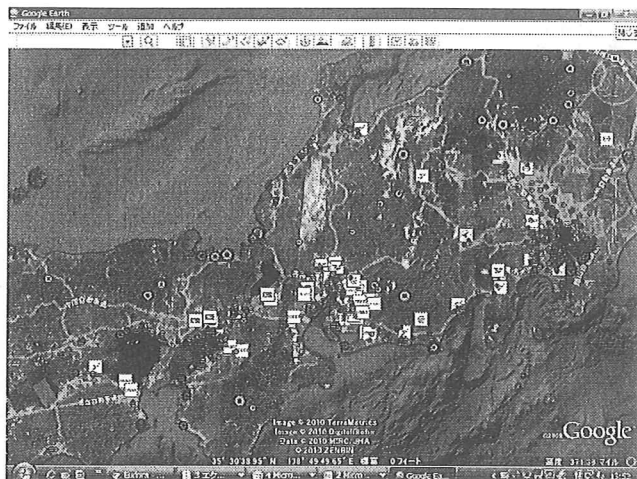


図 14

1. 外力と抵抗力：外力低減（危険地帯退避）と抵抗力向上（耐震化・維持管理・対応力）
2. 地震活動期と気候温暖化：地盤の変動、気候変動と複合被害
3. 低平地の土地利用：揺れ・液状化・堤防と埋立地下・浸水
4. 人口の偏在：人口集中と過疎、インナーシティ問題と限界集落
5. 構造物規模の立平面拡大：高層階の揺れ・高層階民と避難・同時被害者増大
6. 高機能・高所得社会：ライフライン・電子情報への過度の依存、脆弱性と波及
7. 人口減少・少子高齢化、核家族：親負担の世代間公平性、災害弱者、災害伝承
8. 地域社会：災害認知社会、地域共同体、市民参加、絆、自助・共助・公助
9. 企業社会：分業と中央集約→脆弱性、無関心とただ乗り、事業継続
10. 行政：縦割、自己防衛意識、創意工夫不足、情報非公開、小災害減少と体験不足
11. 国民：心技体の力と生きる知恵、当事者意識、無関心無責任、楽観と諦め、行政への依頼心、資産家の責任感、多様な人生観、市民参画意識
12. 専門家：細分化、危機認識不足と過信、倫理観・責任感低下、学力・技術力低下
13. 国民と専門家：双方向情報伝達、良質かつ適正量の情報、市民参加による決定
14. 個人資産と国家債務：積蓄分、防災水準と経済性、最低限の社会基盤維持
15. 既存不適格物の放置：リスク評価、社会的影響の開示、診断技術・改修技術
16. 住宅耐震化と室内安全：備えないことが恥ずかしいと思う社会、行動の誘発
17. 国や自治体、企業、消費者や安全、市民、技術者や安全、倫理観

現代社会に生きる人間の責務は 次世代に迷惑をかけないこと！

図 15

高層&免震建物の備えの促進

1. 想定地震の絞り込み：影響度の大きい地震
2. 高層ビル⇔高層オフィス（経済）&高層住民（高層&免震建物、産業&住民データのDB作成）
3. EGMによる揺れの予測&標準的高層Bモデル
4. 被災シナリオ作り→当事者の想像力を醸成
5. 構造的被害のモニタリング法の検討
→E-Defense実験、解体超高層
6. オーナーや住民に対策を促す揺れ体感ツール

図 16

とも重要なことは、次の世代に迷惑を掛けないという一点です。

今後すべきことは（図 16）、まず、この国を破局に追い込むような地震は何かを絞り込むこと、それから、高層ビルのように、不安が残る建物の問題についてはどうすればいいか考える必要があります。いずれにせよ敵の姿が分からないと対策ができませんので、揺れを精度良く予測する必要があります。その上で、どういう被災になるかというシナリオを作ることで、技術者や住民の当事者意識を植え付けたり、想像力を醸成したりする必要があります。

また、災害が来た後、本当に建物が被害を受けているのかどうかを、早急にチェックできるような方法を作る必要があります。そして何よりも、できるだけ事前にオーナーや住民に対策を実施してもらうため、それを促すようなツールを作る必要があります。

そこで、私どもが進めている幾つかの検討状況について報告をいたします。まず、日本中の地震断層に対して、比較的簡単な方法で揺れと被害を予測して、どの地震の影響が大きいかを調べることをしています（図 17）。

それをやっていると、東海・東南海・南海地震が圧倒して重要であることが分かってきます（図 18）。

人的被害を見ると、われわれが持っている対応力を大きく超えそうだとということも出てきます（図 19）。

一方で高層ビルはどのような所にあるか、どこに高層階に住んでいる住民がいるかということ进行调查始めています。これをしてみると、やはり現状は具合が悪いということが分かります。どこにどんな高層ビルがあって、そ

名古屋大学 Future Labo
地震ハザード&リスク&対応力の評価

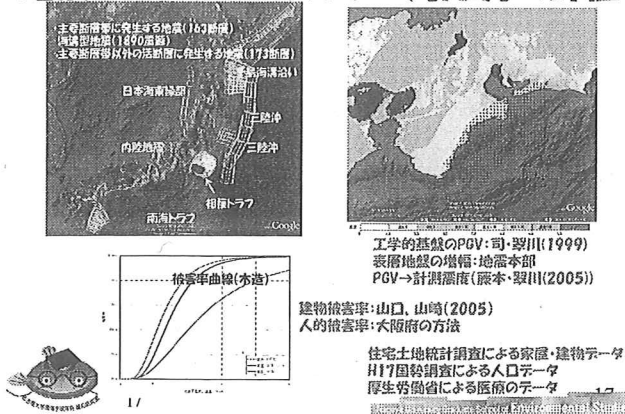


図 17

名古屋大学 Future Labo
震度6弱暴露人口の上位10位の地震

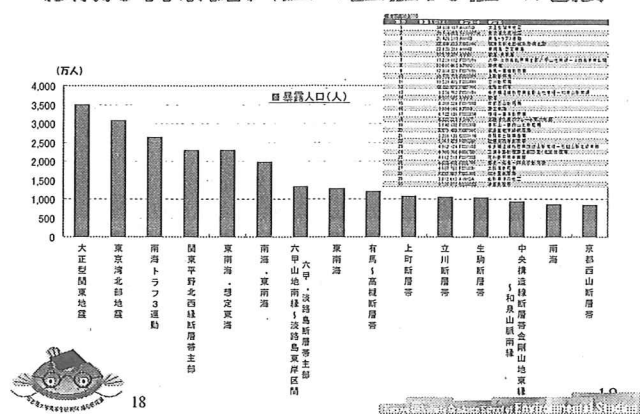


図 18

名古屋大学 Future Labo
人的被害の評価結果

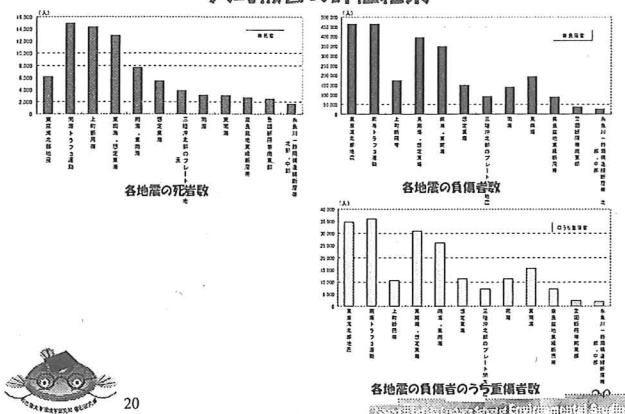


図 19



図 20

れはどんな特徴があるかということ、防災的観点で把握しておく方がいいかと思ひます。

そして、高層ビルが建っている場所は、かつてどういう場所だったかを分かるようにし、高層ビルの耐震性能を上げるように社会を誘導したいと思っています。これ(図20)は、江戸切絵図の上に高層ビルの立地点を載せたものです。こういうシステムができてくると、ビルの発注者も耐震性の重要性に気づいてくれるように思ひます。

それから、せっかく K-NET や KiK-net の記録が出はじめていますので、それらを使って、より良い精度で揺れを予測することも必要になってきます(図21)。これは、中部地域での揺れの予測結果です。従来の予測精度とくらべると格段に信頼性が高くなっています。

そして、最終的には個々の建物の問題を考える必要がありますが、具体的な建物を対象にすると非常にやっかいなことになってしまうので、標準的な建物モデルを作って、それに対して応答計算をして被害傾向を把握しようと考えています。今、高層ビルや事務所ビルの一般的モデルを作り始めています(図22)。

今後、これを使って応答計算をした上で、地震のときどんなことが起きるのか、シナリオを少しずつ書いていこうと思っています。これは高層住宅の例です。想定される揺れや、家具の転倒の仕方を頭に置きながら、シナリオを書いています(図23)。

それから、地震が起きた後、どうやって健全性をチェックできるのかの予備検討をしています。たまたま今、高層ビルが幾つか解体され始めていますので、ビルのオーナーや施工業者に交渉して、実際に解体されている高層ビ

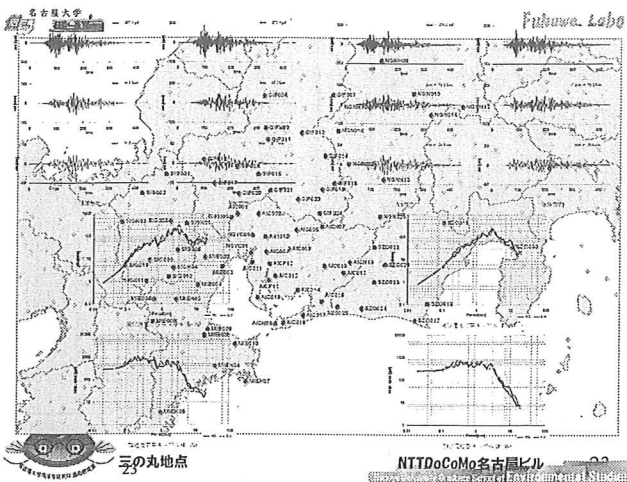


図 21

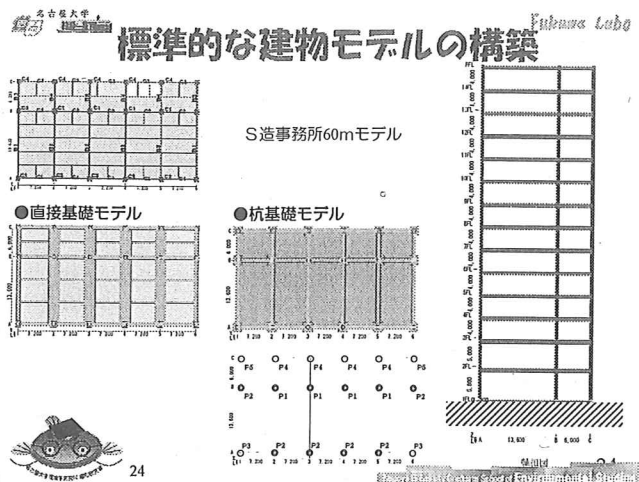


図 22

地震時のシナリオ書き

- ・ フローリング上の食卓が前後左右に大きく移動
- ・ 机が掃き出し窓にぶつかり窓ガラスが粉々に
- ・ 転倒した家具が前後左右に床を滑り壁にぶつかる
- ・ 食器戸棚は観音開きの扉があき食器が飛び出す
- ・ 割れた食器、ヤカン、電子レンジ、電気ポットが飛び
- ・ 冷蔵庫が一気に倒れ、中ものが散乱、水浸し
- ・ ピアノは前後左右に動き、ALC版の壁を割り、倒れる
- ・ 大画面テレビ、デスクトップのパソコンも吹っ飛ば
- ・ 便所の息子は両腕で壁を押さえてこらえる、ドアが
- ・ 開かない、ぶつかって外に、廊下は風呂の水で水浸し、
- ・ 子供部屋の娘は、ベッドごと前後左右に移動。本棚か
- ・ ら落ちた本がベッドの上に散乱。とっさに布団を捲
- ・ 揺れが収まった後、家族の安否を確認。皆、無事。
- ・ 玄関の靴箱が散乱。玄関ドアが開きにくい、停電&断水
- ・ エレベーターは停止
- ・ 廊下のあちこちにコンクリートの破片が落下
- ・ 隣の家の人たちが廊下に、両隣の家族の安否も確認

提供： 中川和之

図 23

地震が起きた後

- ・ 通常の建物は余り大きな被害ではない
- ・ 超高層建物は強い揺れ、室内
- ・ 損傷があるかどうかどう判断する？
- ・ 損傷場所をどうやって特定する？
(内装&アスベスト除去)
- ・ 使っていいかどうかどう判断する？
- ・ 地震が連動する中、いつどの建物から補修する？

図 24

ルで実験をしはじめています(図 24)。ただし、この当時のビルはアスベストだらけですから、とにかく解体や実験が本当に大変です。あわせて、アスベストがある中で解体をするのに、どのぐらいの人手と重機、手間が要るかモニタリングしています。想定以上に大きな数字になってきて、多分がっかりするような結果になるように思います。建物の溶接部の破断など、構造体の損傷の有無については、実際にはアスベストを全部はがさない限りチェックできませんから、現実には相当に大変なことになります。これでは、災害後の対応はとて無理なので、モニタリングで損傷が把握できないかということを検討しています。今、首都直下地震のプロジェクトでやっている E-Defense の実験で、たくさんのセンサーを置いてみて、振動モニタリングによって、損傷の把握がどの程度できるかを調べています(図 25・26)。

たくさんの加速度計を入れ、ある処理をしてみたところ、力～変位関係がある所で変化をすることがモニターできました。そして、揺れている最中に、このように剛性の変化を検出することができましたので、損傷の発生をリアルタイムにチェックできそうだという見込みがしてきました(図 27)。

ということで、こういう損傷検出を少しでも容易にするために、とにかくすべての高層ビルにセンサーを入れてもらうように誘導することが大事だと思っています。最初にも申し上げましたが、東京全部の高層ビルを早期にチェックすることは、現在の日本の実力では不可能ですし、東京の高級エンジニアがみんな東京の高層ビルにかかわってしまうと、本当にやられている名古屋や大阪の建物をチェックする人はいなくなってしまう状況にな

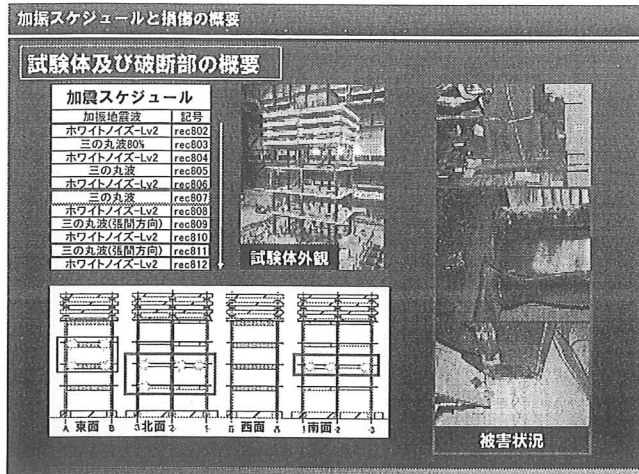


図 25

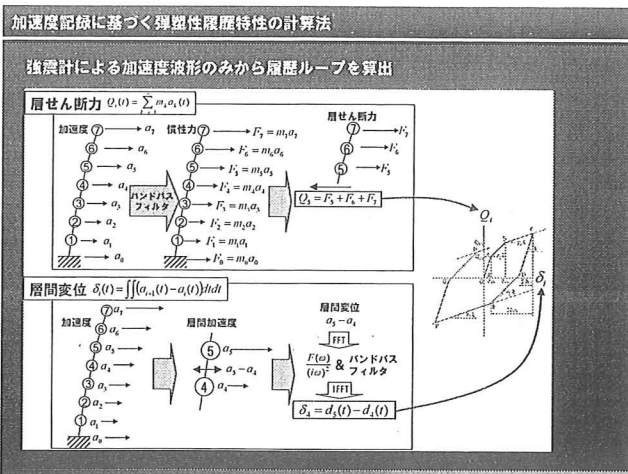


図 26

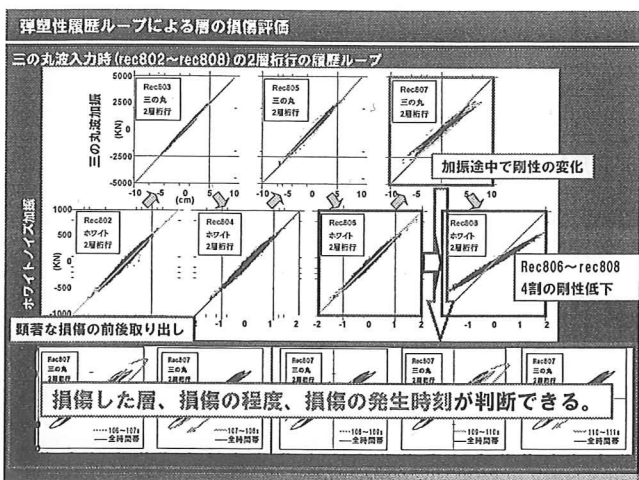


図 27

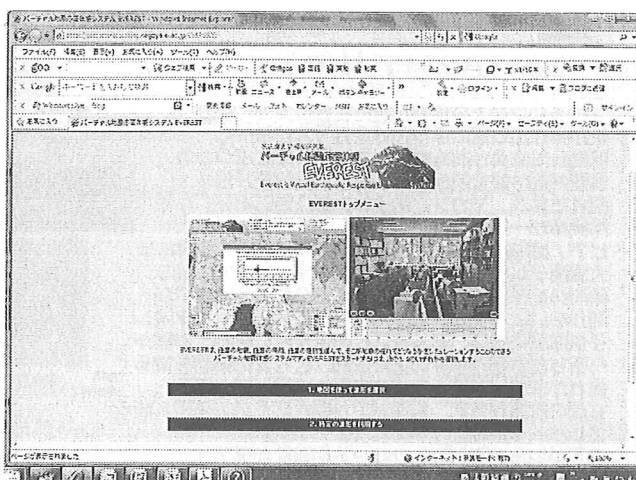


図 28

ります。

故に、そういう備えを事前に促進していくために、地震時のイメージを持ってもらうということで作ったのが、バーチャル地震体験システムのEVERESTです。最初に見ていただいた揺れはこのシステムのアウトプットです。このようにホームページ(図28)に入っていて、地図を使って自分の住んでいる場所の揺れを調べることができます。「東京駅」と入れて、ここの建物の揺れが見たいというようにして、スタートして、地震は例えば「東海・東南海・南海地震」にします。地図の中心の揺れで、今から見たいのは30階建ての建物で、110秒ぐらいから見たいとって計算をしたものが、先ほど最初にお見せした揺れです。

大都市の弱さを知り、減災対策を本格的に進めるために、現在進めていることがらについて、ご報告しました。どうもありがとうございました。