# 北海道での観測例

境 茂樹*　　片岡 俊一**
* ハザマ 技術研究所　ssakai@hazama.co.jp
**弘前大学理工学部地球環境学科　kataoka@cc.hirosaki-u.ac.jp

## １．2003 年十勝沖地震の地震動特性

### 1.1　強震動の概要

2003 年十勝沖地震は，兵庫県南部地震以降に急速に整備された各種強震観測網により，はじめて観測された M8 級の地震である．

図-1 は，K-NET と KiK-net で得られた最大加速度を距離に応じて示したものである [1]．図には，既往の距離減衰式 [2]を併せて示してある．観測値の全体的な傾向は既往の式に整合するようであるが，距離が 100km 以内でも大きくばらつく点が多数見られる．

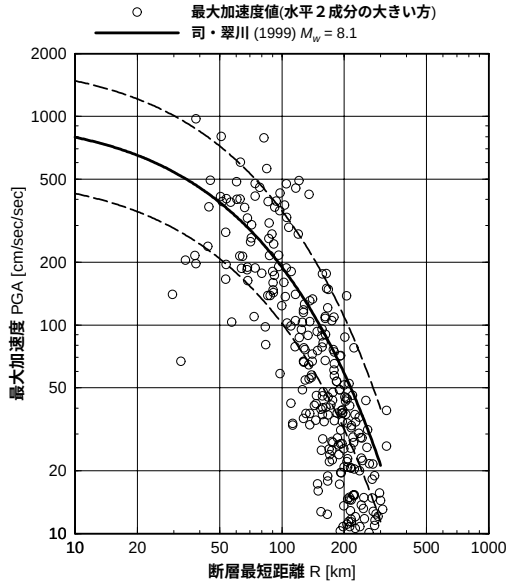



図-1　最大加速度の距離減衰特性

図-2 は，K-NET で観測された最大加速度（以下，PGA）の空間分布である．震央距離約 300km 以内の観測記録を対象に，水平２成分の大きい方の値を，丸の大きさに比例されて表している．このようにして見ると，星印で示した震央の北側あるいは北東側の PGA が大きいことが分かる．図-1 で見た，PGA のばらつきは，空間分布の不均一に対応していることが考えられる．

多くの震源インバージョンによれば，断層の破壊は南東から北西に向かったとされており [例えば 3]，断層破壊に伴う地震動のディレクティビティにより，このような分布になったものと思われる．

### 1.2　長周期強震動

苫小牧の石油タンクがスロッシングを起こし，火災に発展したことは記憶に新しい．この問題を直接扱った文献 4)では，苫小牧周辺の勇払平野で観測された，継続時間の長い長周期地震動は，深い地下構造により大きく増幅されたものであると結論づけている．更に文献 4)には，周期 7 秒，11 秒，減衰定数 1%の１自由度系の速度応答値の空間分布が示されており，勇払平野だけでなく，札幌が位置する石狩平野でも大きな振幅であることが分かる．

ここでは，最大速度（以下，PGV）に関する空間分布を図-3 に示す．PGV は周期 20 秒，減衰定数 0.7 の１自由度系の速度応答値としてもとめた．図には，水平成分２成分の大きい方の値をプロットしている．ただし，HKD086（直別）は，観測点周辺地盤の液状化により，基礎が傾いたとの報告 [5]があることから，図および以降の記述から省いている．

PGV は，PGA と同様に震央の北側で大きいが，日高地方から勇払平野，石狩平野でも大きくなっている．観測記録の内，最大の PGV は，日高地方に位置する HKD198（大樹）で約 80cm/s となる．また，HKD095（帯広）でも 32cm/s となった．後述するように，北海道ではいくつかの都市に免震建築が建つ．そのうちの札幌，函館では，K-NET の記録に基づくと，HKD180（札幌）で 18cm/s，HKD160（函館）で 13cm/s となった．これらの地点は，平野であるので，深い地盤構造によりやや長周期成分が増幅されている可能性がある．そこで，減衰定数 5%の２次元速度応答スペクトルを図-4 に示す．ここでは，水平２成分を

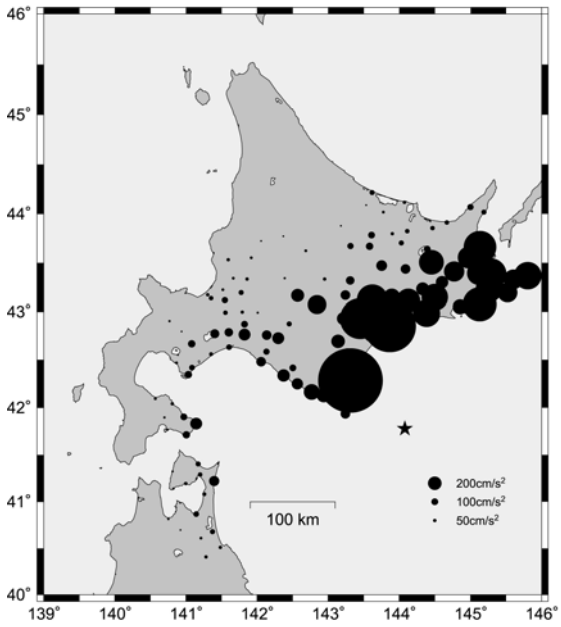



図-2　最大加速度の空間分布（星印：震央）

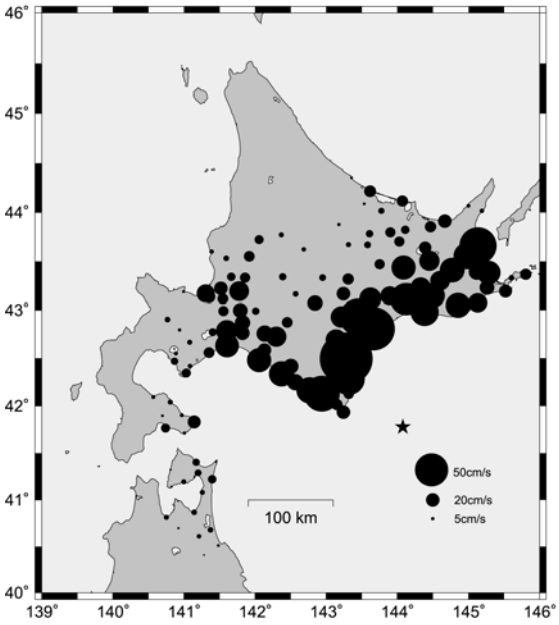



図-3　最大速度の空間分布（星印：震央）

独立に扱い，その時々刻々のベクトル振幅の最大値を応答値としている．図から，札幌（HKD180）では，周期３秒と５秒付近，函館（HKD160）では，周期４秒付近で 60cm/s の応答値になっている．２成分の合成値ではあるが，小さくない応答であると言えよう．

### 1.3　釧路地域における地盤震動研究 [6)]

第２章で免震建築の応答を紹介する釧路地域では，1993 年釧路沖地震の際にも，10km の範囲に５点の強震観測点があったが，最大加速度の値が，320cm/s/s～919cm/s/s と大幅に異なっていた．震源は，釧路市の直下であることから，この違いは表層の違いに起因すると考えられた．そこで，地震観測により，この差異を検討することが提案され，16 の機関により 23 点の観測点をもつ観測網が整備された．この観測網では，1994 年北海道東方沖地震の記録も観測されたが，その後に発生した兵庫県南部地震のため，強震計の移設などがあり，共同観測は終了している．

また，上記共同観測の報告書には，１地点ではあるが，PS 検層の結果も掲載されており，さらに各種機関による地下構造推定も行われている．このように，多くの地盤震動に関する研究がなされている．詳細については，文献 6)を参照されたい．

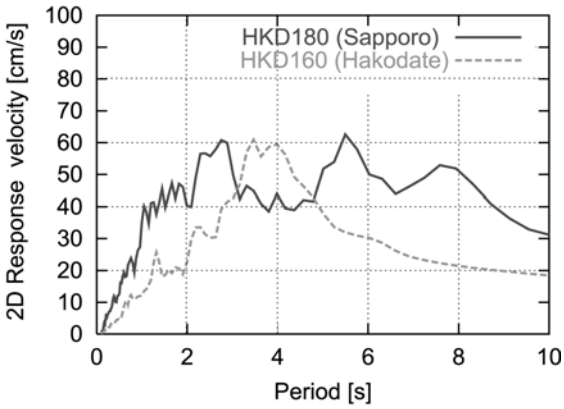



図-4　K-NET 札幌（HKD180）と函館（HKD160）の記録による減衰定数 5%の時の２次元速度応答スペクトル

### 1.4　最大余震

本震の約２時間後の６時８分頃に起きた最大余震（$M_J$7.1）の際には，本震よりも大きな地震動指標が観測された地点が複数あった [7)]．例えば，浦河の K-NET 観測記録の最大加速度・最大速度は本震のそれを上回り，気象台における計測震度も最大余震の方が大きかった．このような観測点のうち，北海道側の多くの観測点は，短周期成分が表層で増幅された結果と解釈できるが，震源域が大きな M8 クラスの地震では，余震の影響についても十分な配慮が必要であることが再確認できた．

## ２．建物応答例

### 2.1 北海道の高層および免震建物の建設状況

一般の建築物に比べ，高層建物や免震建物は地震観測を実施している可能性が高いと考えられる。そこで，北海道内における高層および免震構造評定物件について調査した。

高層評定物件については，日本建築センターのビルディングレター（2000 年旧法までの案件）により調査し，２８件確認された。その内２２件は札幌市内に集中している。

免震建物については，(社)日本免震構造協会の会員ページの評定完了一覧 [8]に基づき，2000 年５月２日までの案件について調査した。その結果，免震建物の物件数は１９件（釧路９，札幌５，帯広３，函館１，苫小牧）で，1993 年釧路沖地震および 1995 年兵庫県南部地震を契機に普及してきている。なお，上記１９件には木造系の免震住宅や信号施設は除外している。また，2000 年以降日本建築センター以外の審査機関による評定物件の増加や，改正基準法による一部免震建物の構造計算の緩和等により，現在の件数はこの数字を上回っていると考えられる。これらの評定案件では，他の建物に比べて強震観測を実施している可能性は高く，実際 2003 年十勝沖地震において，複数の免震建物で免震層相対変位が 1995 年兵庫県南部地震時の変形を上回る観測事例が報告された。次節に，論文で公表された免震建物の観測結果について整理した。

### 2.2 釧路地域における免震建物の応答結果

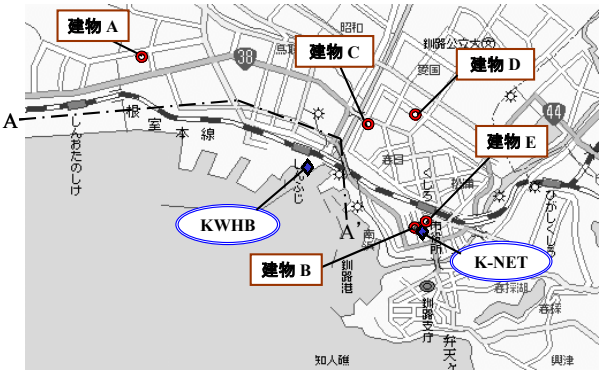
応答結果を調査した免震建物は，2004 年建築学会大会で報告された釧路市内の５つの免震建物で，その建物概要と各建物の設計時の固有周期 [9]および免震層相対変位の観測結果(東西方向)[10)～14)]を表－１に示す。建物 A と D は病院で，建物 B，E は事務所，C は事務所・住宅となっている。構造種別は RC 造または SRC 造で，階数は３～９階建，基礎形式や免震装置は多様である。設計時の１次固有周期は，レベル１変形時で２秒～３秒程度である。十勝沖地震の際に観測された基礎上の加速度は 190～290cm/s² 程度，免震層相対変位は，10～30cm 程度の大きさとなり，建物によって応答に差が認められる。

これら建物の位置を，強震記録が公開された近傍の強震観測地点（K-NET 釧路および港湾地域強震観測点・釧路西港（KWHB））とあわせて図－１に示す。

表－１　観測建物の概要と応答結果 [2)～7)]

| 建物記号 | 建物A | 建物B | 建物C | 建物D | 建物E |
|---|---|---|---|---|---|
| 用途 | 病院 | 事務所 | 事務所・住宅 | 病院 | 事務所 |
| 構造種別 | RC | SRC | RC | RC | SRC |
| 階数(地上/地下) | 3/0 | 9/1 | 3/0 | 4/0 | 7/1 |
| 基礎構造 | ベタ基礎 | 場所打RC杭 | ベタ基礎 | PHC杭 | 場所打RC杭 |
| 免震装置 | HDR*1 | 天然ゴム，鉛ﾀﾞﾝﾊﾟｰ，鋼棒ﾀﾞﾝﾊﾟｰ | LRB*1 | HDR*1 | 天然ゴム，鉛ﾀﾞﾝﾊﾟｰ，鋼棒ﾀﾞﾝﾊﾟｰ |
| 設計時固有周期*2 (L1-L2)(秒) | 2.19-2.58 | 2.78-3.23 | 2.01－2.40 | 1.99-2.45 | 2.43－2.83 |
| 基礎の加速度 EW方向 (cm/s²) | 212 | 192 | 286 | 272 | 222 |
| 免震層最大変位 EW方向 (cm) | 13 | 9 | 30 | 26 | 14 |

*1 HDR:高減衰積層ゴム，LRB:鉛プラグ入り積層ゴム
*2 性能評定ｼｰﾄの長辺方向を記載。物件毎にﾚﾍﾞﾙ1、ﾚﾍﾞﾙ2のｸﾗｲﾃﾘｱが異なるので注意




図－５　観測建物の概要

釧路地域の入力地震動の特性を把握するため，建物 A の基礎上の記録，および公開された建物 B（地盤上）[17)]，K-NET 釧路 [5)]，釧路西港（KWHB）[15)]の４観測点の東西方向の強震記録を分析した。

図－２は，４観測点のフーリエスペクトル（0.2Hz の Parzen ｳｨﾝﾄﾞｳで処理）を示す。この図より，K-NET，建物 B では周期 1.2 秒に，建物 A では周期 1.2 秒と 2.5 秒程度に，KWHB では周期 1.8 秒と，いずれもやや長周期帯域に優勢なピークが認められる。なお，建物 A は免震基礎上の記録のため，周期 1 秒以下の短周期側では建物基礎の入力損失の影響で応答が小さくなっている。

入力地震動の免震建物応答への影響を検討するため，減衰 20%の変位応答スペクトル *SD* を求めた。その結果を図－３に示す。また，この図には，前述した５つの免震建物の免震層相対変位の実測結果を重ねてプロットする（マーク:I-I)。なお，マークの幅は設計時のレベル１時からレベル２時の固有周期の幅を示す。この図の結果より，釧路市中心部に位置する K-NET，建物 B の変位応答スペクトルはほぼ同じであるが，建物 A および KWHB のスペクトルは，K-NET，建物 B に比べて周期２秒以上の長周期域で大きい。また，変位応答スペクトルと各建物の免震層相対変位の実測値とを比較すると，建物 A，B および E は実測結果が 10cm 前後となり，その基礎および周辺地盤上の応答スペクトル値とほぼ対応するが，建物 C,D の実測結果は 26～30cm 程度と非常に大きい。このことから，建物 C,D 周辺の周期 2 秒前後の入力地震動の特性は，釧路中心部に位置する K-NET，建物 B や KWHB，建物 A 周辺と比較してかなり大きいと推定され，建物 C,D の基礎上の強震記録は釧路市内の局所的な地盤構造や入力特性を知るひとつの手がかりになると考えられる。

また，図－４は，従来の設計で標準波として用いられている EL CENTRO NS，TAFT EW，HACHIHOHE EW と BCJ－L2 の変位応答スペクトル（減衰 20%）と，釧路市内で観測された建物 A および K-NET の変位応答スペクトルを重ねて示す。なお，BCJ-L2 以外の波形は 50cm/s に基準化している。この図より，K-NET 釧路は従来の標準波と同等レベルであるが，建物 A の周期 2~6 秒にかけての応答変位は，BCJ-L2 と同等レベルとなっている。

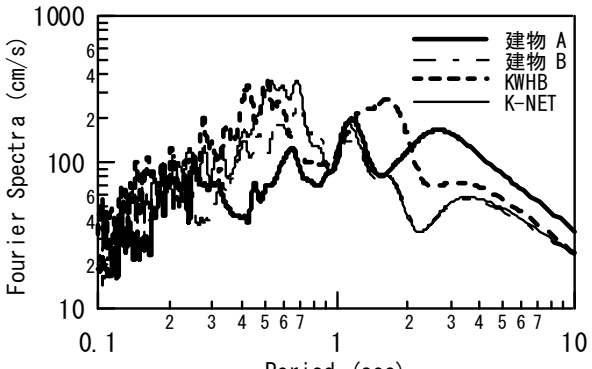
### 2.3 釧路地域の地盤構造と構造物への影響

釧路地域の深い地盤構造と，建物 A，KWHB および釧路中心部に位置する建物 B や K-NET 観測点におけるやや長周期帯域の応答特性との関係を調べるため，各観測点の工学的基盤以浅の S 波速度構造モデルを作成し，表層地盤の増幅特性を検討した[17]。

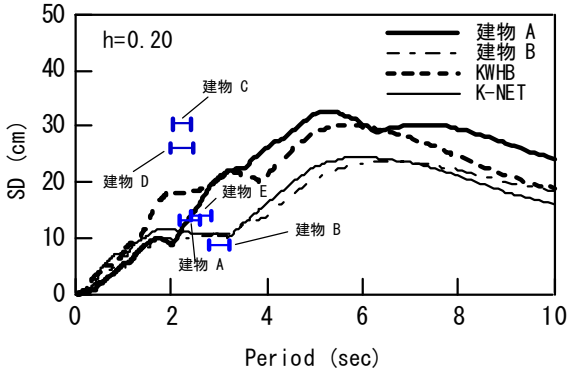
釧路地域の東西地質断面（図－１の A－A’断面）は図－５に示す通り，工学的基盤と考えられる浦幌層群は西側ほど深くなっている[18]。

浦幌層群より表層の S 波速度構造について，建物 A は GL-83m まで，KWHB は GL-76m までの PS 検層結果[15]が得られており，これ以深の層は Vs=450m/s と仮定した。釧路中心部は K-NET で代表させ，その深い地盤構造については文献 19)を参考とした。設定した建物 A，KWHB，K-NET の３箇所の S 波速度構造モデルを図－６に示す。

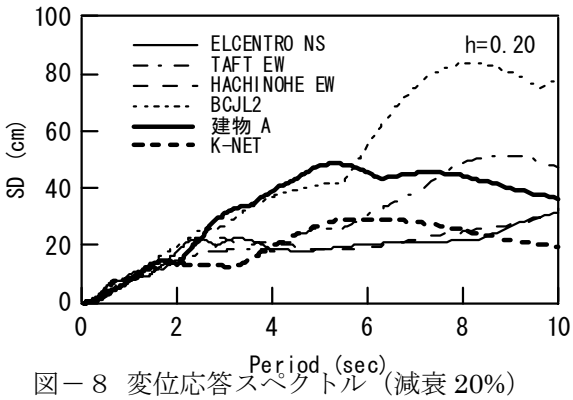
この地盤構造を基に，１次元等価線形解析



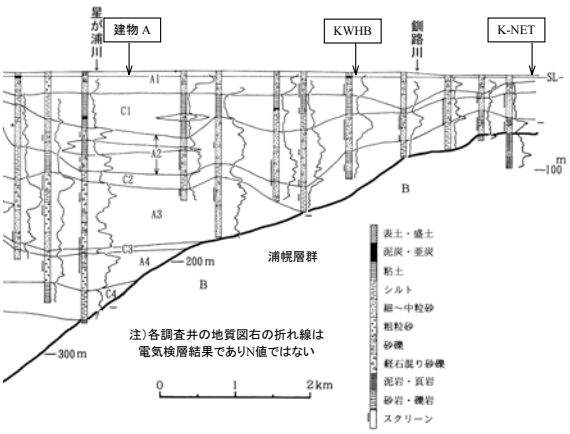
図－６ フーリエスペクトル



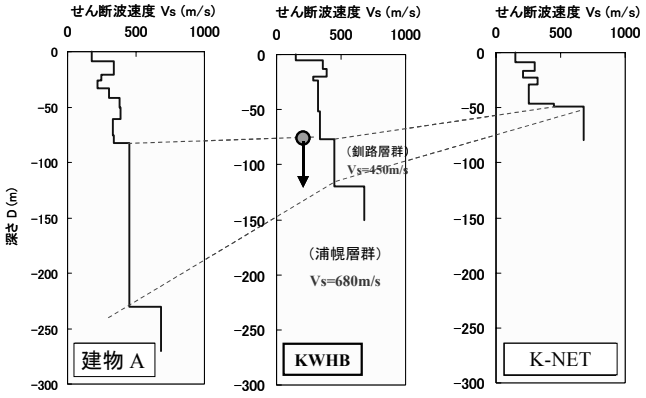
図－７ 変位応答スペクトル（減衰 20%）
*図中のﾏｰｸは免震層相対変位の実測結果



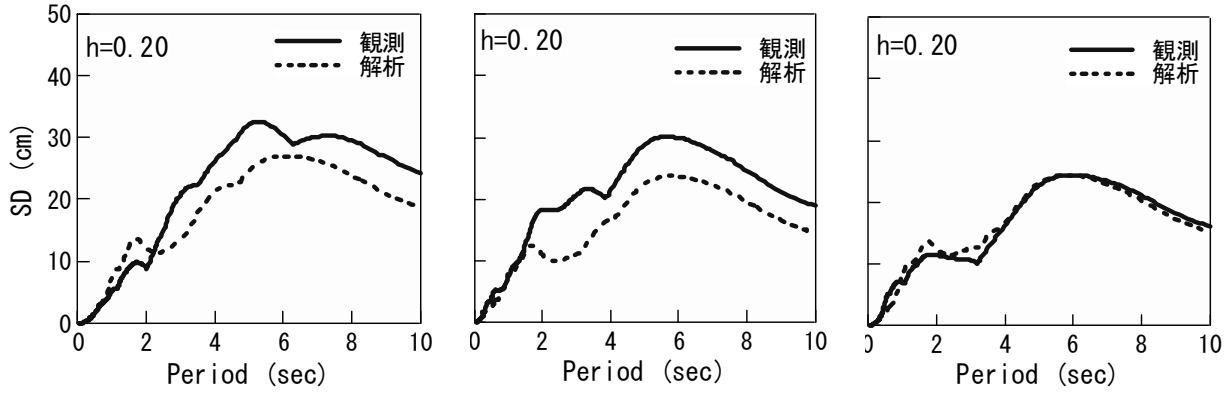
図－８ 変位応答スペクトル（減衰 20%）




図－９ 釧路地域の地盤構造（A-A'断面）[19)]




図－10 S 波速度構造モデル




（a）建物 A　　（b）KWHB　　（c）K-NET

図－11 変位応答スペクトル（減衰 20%）

で KWHB の地中（GL-77.45m）の観測記録を用いて浦幌層に引き戻し，その引き戻し波を各地盤構造モデルで立上げ，地表面応答波を算出し，各地点の地表面応答波の減衰 20%の変位応答スペクトルを求めた。その結果を観測結果と比較して図－７に示す。この図より，各点の解析結果のスペクトル形状は，全体的に観測結果とよく対応し，変位応答スペクトルに浦幌層より表層の地盤構造の影響が現れていると考えられる。ただし，建物 A と KWHB については解析結果が観測結果に比べやや過小評価となっており，地盤構造モデルの精度や不整形地盤の影響、深い地盤構造の影響等について検討する必要があると考えられる。

### 2.4 免震建物の強震記録の活用と将来への期待

#### (1) 免震建物の強震観測の活用

免震建物の普及は進んでいるが，普及当初に比べて強震観測を実施しないケースが増えていると思われる。この理由として，コストの問題は別として，免震効果が広く認知され，第３種地盤上免震や塔状比が大きい建物など特殊な免震建物でなければ，設計上特に問題がないという認識があるものと思われる。しかし，免震建物でレベル２相当の入力による変形を生じた建物は非常に少なく，また中小地震時の応答特性も十分明らかにされていないのが現状である。

前述の５つの免震建物では，2003 年十勝沖地震時の建物応答のシミュレーションが実施されているが，その結果，以下の課題が指摘されている。

①建屋応答に与える高次モードの影響[10),11),12)]

②免震層復元力特性の設計時と観測結果との差異[11),12)]

③免震装置の経年変化 [13)]

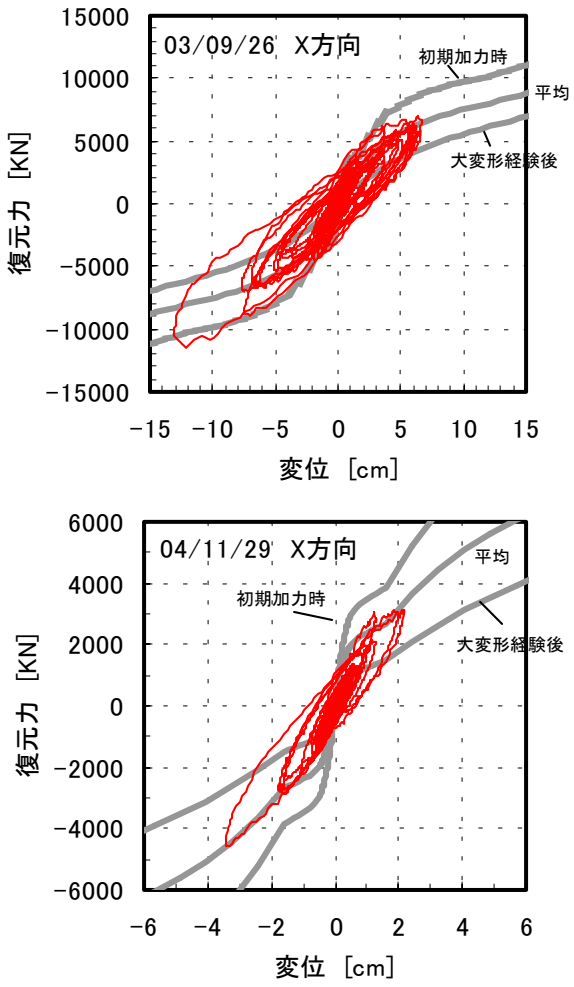
①については，高次モードの影響により建屋内加速度が低減しない，いわゆる免震効果が発揮されないケースであり，これは大振幅時だけでなく，中小地震時でも課題であり，微振動を嫌う精密機械工場等での問題点も指摘されている [21)]。こうした課題を直視し，高次モードも制御可能な次世代型の免震システムの開発が望まれる。

②については，積層ゴムや鉛ダンパー等の復元力特性が，設計時のモデルで十分説明可能かという点である。例えば，高減衰積層ゴムは，過去に経験した最大せん断ひずみの大きさによって復元力特性が変化する特性を有し，一般的に設計時の復元力特性はメーカーの資料に基づき，初期加力時および大変形時の特性の平均値に基づき設計されている。一例として，建物 A の高減衰積層ゴムの特性について検討した結果を図－８に示す [20)]。この図から，初めて経験する大変形時には，メーカの実験による初期加力時の復元力にほぼ対応し，大変形経験後は，平均値（設計用）にほぼ対応することが示された。従って、高減衰積層ゴムの復元力特性は大ひずみ経験の前後で変化するので，建屋の設計用せん断力の設定には注意が必要であるとともに，強震観測による復元力特性の把握が重要と考えられる。

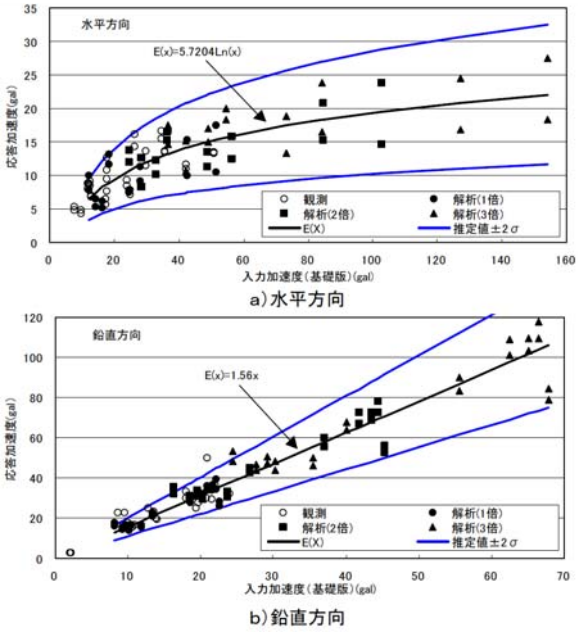
③の経年変化については，別置試験体や実際の積層ゴムの加力試験で，剛性等の経年劣化の影響は少ない [22)] とされているが，こうした試験と並行し，強震観測結果をうまく活用すれば，免震装置の維持管理に役立てることが可能となる。その検討例として，橋村，瓜生他は，免震建物の基礎上および建屋の加速度応答結果から，観測結果が推定曲線の±２σ内であれば，建屋の振動特性に影響を及ぼす剛性変化は少ないとし，強震観測のモニタリングによる維持管理手法を検討している [22)]。免震建物に限らず，強震記録を利用したヘルスモニタリングについては，本シンポジウムでも取り上げており [23)]，今後更なる研究開発の進展が期待される。

**(2) 建物強震観測の将来への期待**

建物強震観測は，その意義を以前から当委




図－12 高減衰積層ゴムの復元力特性
上：2003 年 9 月 26 日十勝沖地震
下：2004 年 11 月 29 日の釧路沖地震




図－13 免震建物の強震観測結果
（基礎上と建屋の応答加速度の関係）

員会のシンポジウムで指摘し提言[24]としてまとめているが,建研などの一部機関の活動を除き,進んでいないのが現状である。公的機関の強制的な指導も必要であろうが,根本的な問題は,強震観測の意義が一般に広く周知されていないことにあると思われる。また,これまでの建物の強震観測の議論では,実施者と利用者（主に研究者）の議論に留まり,観測される建物のオーナーや居住者不在の議論だったのではないだろうか。

今後必要なのは,オーナーや居住者にとってメリットのある強震観測であり,設計者や施工者はそのメリットを明確に示すことが大切である。例えば最近の不動産証券化に伴うデューディリジェンス（投資不動産の適正評価）の地震リスク評価に地震観測から得られる耐震健全度評価（例えば固有周期や減衰特性の安定性等）がエンジニアリングレポートの評価項目に加えられれば,建物のオーナーや投資家の関心が高まり,より一層,建物の強震観測が進むものと期待される。

また,最近の地震被害による現地調査から,オーナーや入居者は,加速度や速度の時刻歴波形を精度よく記録することよりも,部材応力や最大層間変位,層間変形角等から建物健全度を把握し,使用の可・不可の情報を迅速に認知できるシステムを求めている。

こうしたニーズに対しては,（独）建築研究所の「高知能建築構造システムの開発」[25]などの取組みや,河村教授の唱えるユビキタス強震観測[26]などの構想があり,従来型の地震計にとらわれない,ナノテク分野のＭＥＭＳデバイス等の建設分野への応用が今後期待される。

謝辞：本報告の作成にあたり、参考とさせていただいた強震観測を実施している関係各位に謝意を表します。

＜参考文献＞

1) 石川裕,地震及び地震動,2003年十勝沖地震被害調査報告会概要集,2-3,土木学会地震工学委員会,2003.

2) 司宏俊・翠川三郎,断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度．最大速度の距離減衰式,日本建築学会構造系論文集,No.523,63-70,1999.

3) Honda Ryosuke, S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi, and H. Fujiwara, Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Plantes Space, 56, 317-322, 2004.

4) 畑山健,座間信作,西晴樹,山田實,廣川幹浩,井上凉介,2003年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害,地震第2輯,57,83-104,2004.

5) (独)防災科学技術研究所K-NETのHP：
http://www.k-net.bosai.go.jp/

6) Association for Earthquake Disaster Prevention, Japanese working group on effects of surface geology on seismic motion, Strong motion database, Cooperative strong motion observation in Kushiro, Hokkaido, Japan, 1997.

7) 片岡俊一,2003年十勝沖地震の余震地動の強さ,東北地域災害科学研究,41（印刷中）,2005.

8)日本免震構造協会のHP：http://www.jssi.or.jp/

9) （財）日本建築センター：ビルディングレター（'95.11,'96.10,'97.3,'97.5,'99.2)

10) 鹿嶋,関他：2003年十勝沖地震における釧路合同庁舎の地震応答（その１）～（その２),日本建築学会大会梗概集,構造Ⅱ,pp.265-258,2004.

11) 伊沢,寺田,大西：2003年十勝沖地震における釧路市内の免震病院の挙動(その１)～(その３),日本建築学会大会梗概集,構造Ⅱ,pp.269-274,2004.

12) 松本,石丸他：釧路市に建つ免震建物の静的加力試験と 2003 年十勝沖地震時の動的挙動（その１）～（その２),日本建築学会大会梗概集,構造Ⅱ,pp.275-278,2004.

13) 鈴木,金子他：2003年十勝沖地震における釧路市内免震事務所ビルの地震挙動について(その１)～（その２),日本建築学会大会梗概集,構造Ⅱ,pp.279-282,2004.

14) 加藤他：2003年十勝沖地震による釧路市に建つ免震病院の応答,日本建築学会大会梗概集,構造Ⅱ,pp.283-284,2004.

15) (独)港湾空港技術研究所のHP：
http://www.eq.ysk.nillim.go.jp/

16) (独)建築研究所のHP：
http://iisee.kenken.go.jp/

17) 境,伊藤：釧路地域における強震記録と免震建物の応答,ハザマ研究年報,pp.1-4,2004

18) 広田,横山,和田,深見：北海道釧路地域にお

ける帯水層の塩水化：北海道立地質研究所調査研究報告第 30 号, 2000.
19）片岡，笹谷：ＥＳＧ釧路共同強震観測活動の報告－1994 年北海道東方沖の記録を題材として－，日本建築学会大会梗概集，構造Ⅱ，pp. 257-258，1995. 8
20）加藤，境，伊藤：2003 年十勝沖地震による釧路市に建つ免震病院の応答, ハザマ研究年報, pp. 5-8, 2004
21）中村，竹脇：地震観測に基づく免震建物の小振幅時高次モード特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 289-290，2004.
22）山崎，瓜生，中西，近藤，橋村：免震構造物の維持管理手法の検討（その１）～（その２），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 335-338，2004.
23）中村, 若松:ヘルスモニタリングと地震観測　－建物の耐震健全性評価につながる強震観測の活用－, 第 2 回強震データの活用に関するシンポジウム，pp. 41-50，2000.
24）日本建築学会 強震観測小委員会：建物の強震観測に関する将来像（案）－強震観測小委員会活動報告（案）－，第 3 回強震データの活用に関するシンポジウム，2002
25）(独)建築研究所，国土交通省国土技術政策総合研究所，(財)日本建築センター：日米共同構造実験研究　高知能建築構造システムの開発・平成 14 年度報告書，2003.
26）河村：ユビキタス強震観測，記念シンポジウム「日本の強震観測 50 周年」－歴史と展望－ 予稿集，2004.