

4. 地震防災

—現象の理解から被害の軽減へ向けて—

北海道大学 工学研究院 高井 伸雄

1. はじめに

日本に住んでいる私たちにとって、地震という自然現象が一瞬で日常生活を破壊することは、良く知っています。そして、地震が起こる場所、起こらない場所、さらには地震による揺れが地域によって違うことも経験的に知っています。しかし、依然として各地で大きな地震が発生すると、痛ましい現場の映像がTV等で報道されていることも事実です。それでは、私たちは何を知り、明らかにすれば、地震災害は軽減されるのでしょうか？

最近の電子科学技術の進歩により、近年では飛躍的に強震観測網が発達してきました。その強震観測網による観測により、少しずつ明らかになって来た地震による揺れ‘強震動’という現象を紹介し、また、建物を始めとする構造物への影響を少しでも紹介できればと思います。

2. 北海道と付近の地震の巣

最初に、北海道に住んでいる私たちにとって、将来起こるであろう地震は、どの地域で起こるのでしょうか？現在日本では、様々な組織により、地震に関する情報がWWWによって提供されるようになりました。その一つである、地震調査研究推進本部[1]では主要活断層とプレート境界で発生する海溝型地震評価結果を公開していますので図1で見てください。



(a) 主要活断層の評価結果

(b) 主な海溝型地震の評価結果

図1 主な活断層の評価結果と海溝型地震の評価結果(2010年20日現在) ([1]より)

図1 (a)を見ると、札幌では石狩低地東縁断層帯が比較的近くに存在しますし、図1 (b)では、2003年十勝沖地震を代表とする繰り返し大規模な地震が発生する太平洋の海溝型地震、1993年南西沖地震を代表とする日本海側の海溝型地震も評価対象となっている事が分かります。このように、地震の巣となっている・なるであろう地域を、まずは頭に入れて置いてください。

3. 地震観測網で捕らえられた地震動

1995年兵庫県南部地震以降に、日本では強震観測網が急速に整備されました。例えば気象庁による震度計観測網、総務省による地方自治体の震度情報ネットワーク、そして市民でもWWW経由で利用可能な(独)防災科学技術研究所による強震ネットワーク (K-NET) (図2) [2]、基盤強震ネットワーク (KiK-net)、その他(独)建築研究所、(独)港湾空港技術研究所や、北海道では(独)土木研究所・寒地土木研究所のネットワークも有ります。代表的な機関の観測点を示すと図3の様になります。K-NETは約25km間隔で整備されていますので、密度が高い様にも思えますが、例えば1995年兵庫県南部地震の震災の帯が幅わずか1~2kmであったことを考えますと、まだまだ不十分であるとも言えるかもしれません。



図2 K-NET 浦河観測点

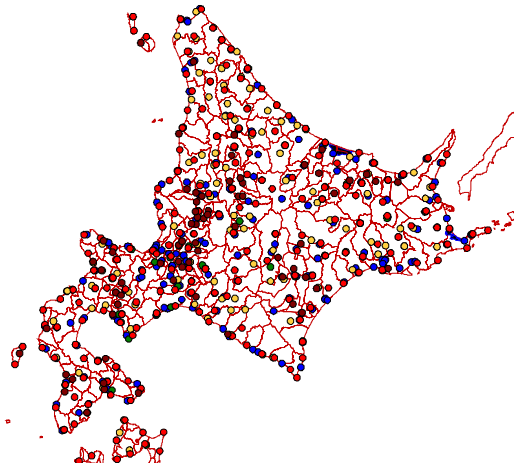


図3 北海道の主な強震観測点

それではこれらの観測網によって、どのような記録が得られているのか、見てみましょう。図4に2003年9月26日に発生した十勝沖地震でK-NET札幌観測点(太平)で観測された記録を示します。このように一般に強震記録は3次元での地表の動きが刻々と記録されています。これは、実際の地表の動きが3次元で、それを水平動の2次元分、上下動の1次元分、さらには時間という4次元目で記録しているという言い方も出来るかもしれません。このような記録を一つの地震で多数の地点で観測することで様々な情報を得られることは後述いたしますが、図4の上段2つを見ると、最初に小さな揺れが続き、続いて大きな揺れが来ていることに気づきます。最初の揺れがP波で大きな揺れがS波で有ることはご存じの方も多いでしょう。2003年十勝沖地震の様な大地震では100秒以上も揺れが続いていることが良く理解できます。

この波形を見ても明らかなように、地震によって地表面が波打っている事がわかります。このように地震が発生した十勝沖から約300km離れた札幌で地面が揺れる要因を考えてみましょう。

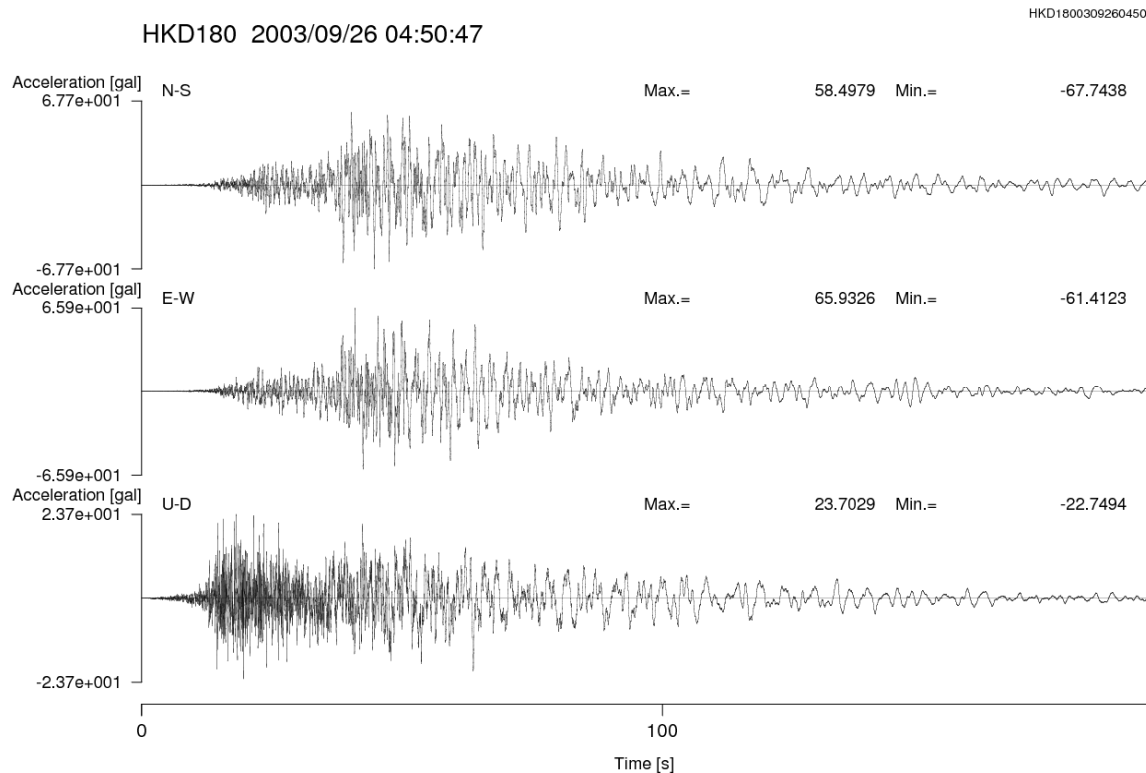


図4 K-NET 札幌観測点における2003年十勝沖地震の地震記録

4. 観測点での地表面の動き

まず、考えなければならないのが、地震を起こす断層です。地震を起こす断層を“震源断層”と呼びます。その震源断層から放出されるエネルギーが大きければ大きいほど、遠くまで地震による揺れを伝えます。この震源の規模を評価する値がマグニチュードで、マグニチュードを含めた震源の性質を、“震源特性”と呼ぶことにします。

つぎに考えなければならないのが、震源からの距離です。地震波は同様に波である光や音と同様に、震源から離れるほどにその揺れの大きさは小さくなります。ですので、震源からの距離が重要な要素となります。加えて重要なのが、地震の波の伝わりやすさです。例えば光を考えてみてください。光を通しやすいガラスと通しにくいガラスが有ることをご存じかと思いますが、地球の内部も良く地震波を伝える部分と伝えにくい部分によって構成されているのです。このように震源からの距離と地震波の伝わりやすさの性質を含めて、地震波の“伝播経路特性”と呼びます。

最後に重要なのが、地震を観測する地点の真下の地盤の性質です。感覚的に我々は軟弱な地盤な地域では地震時に揺れやすく、堅い岩盤のような地域では揺れにくいことを知っています。このような性質を地震波の“地盤増幅特性”と呼びます。

このように、基本的には、ある観測点で観測される強震動は

$$[\text{強震動}] = [\text{震源特性}] \times [\text{伝播経路特性}] \times [\text{地盤増幅特性}]$$

によって説明される事になり、大まかに漫画で描くと図5のように考えられます。

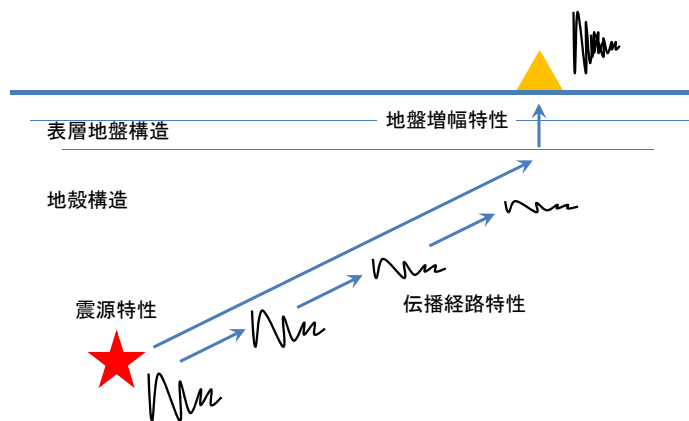


図5 地震の波の伝わり方

ただし、これだけでは説明しにくい観測記録も多く、地形的な要因や盆地形状の要因等が複雑に絡み合っ
て強震動が生成されることも分かってきています。

さて、強震動の強弱を私たちはどのように表現しているのでしょうか？日常で揺れを感じると、TV やラジ
オをつけて、現在地の震度やその他の地域の震度を知るように努めるでしょう。この震度というのが、強震
動の強弱の指標の一つです。依然として震度と震源の規模であるマグニチュードを混同されている方も多い
のですが、光に置き換えればマグニチュードは電球のワット数、震度は手元の明るさです。例えワット数が
大きい電球であっても、その電球から離れれば離れるほど、手元の明るさは暗くなっていきます。同様に、
地震も大きなマグニチュードであっても、震源から遠く離れれば離れるほど震度は小さくなるのが普通で
す。2003年十勝沖地震で気象庁の発表したマグニチュードは8.0、札幌气象台での震度は4、震源により近
い浦河町では6弱と報告されています。

この気象庁震度（階）は1996年以降に地震観測記録を基に算定されるように変更されました。先ほどの
2003年十勝沖地震におけるK-NET札幌の記録はこの震度の計算法を用いて指標化すると震度5弱相当に
なります。近い地点でも、地盤増幅特性によって震度が違うことが理解できます。

5. 建造物の応答

ここで話が若干地震そのものから離れます。ここまで人間と建物は不在でした。もちろん、地震による揺
れは人が居なくても生じますが、人がいなくては“災害”にはなりません。また、地震で直接人が亡くなる
ことは無いでしょう。多くの場合**地震が建物を破壊して人を死に至らしめる**のです。ですので、地震災害を
軽減するためには、建物の特性も良く理解する必要があります。

ところで、建物を含めた橋や塔やタンク等のいわゆる構造物と言われる物には、その構造物特有の揺れ方
があります。天井から吊された電灯をイメージしてみてください(図6)。同じ電灯でも天井からのヒモの長
さが長ければ、ゆっくり長く揺れ、ヒモの長さが短ければ、早く小刻みに揺れる事を我々は知っています。
電灯が一往復する時間を周期と言いますが、これと同様に構造物それぞれにも特有の周期があり、その特有
の周期を“固有周期”と呼びます。この固有周期によって同じ地震動でも揺れの様子は全く違います。

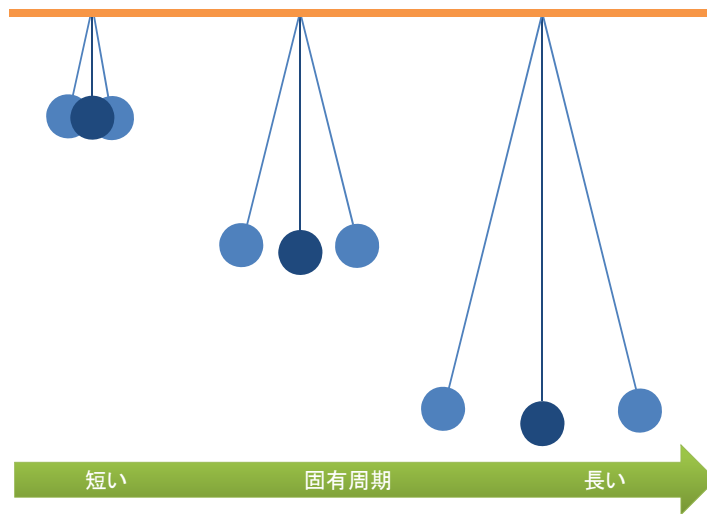


図6 振り子のヒモの長さの違いによる固有周期の変化

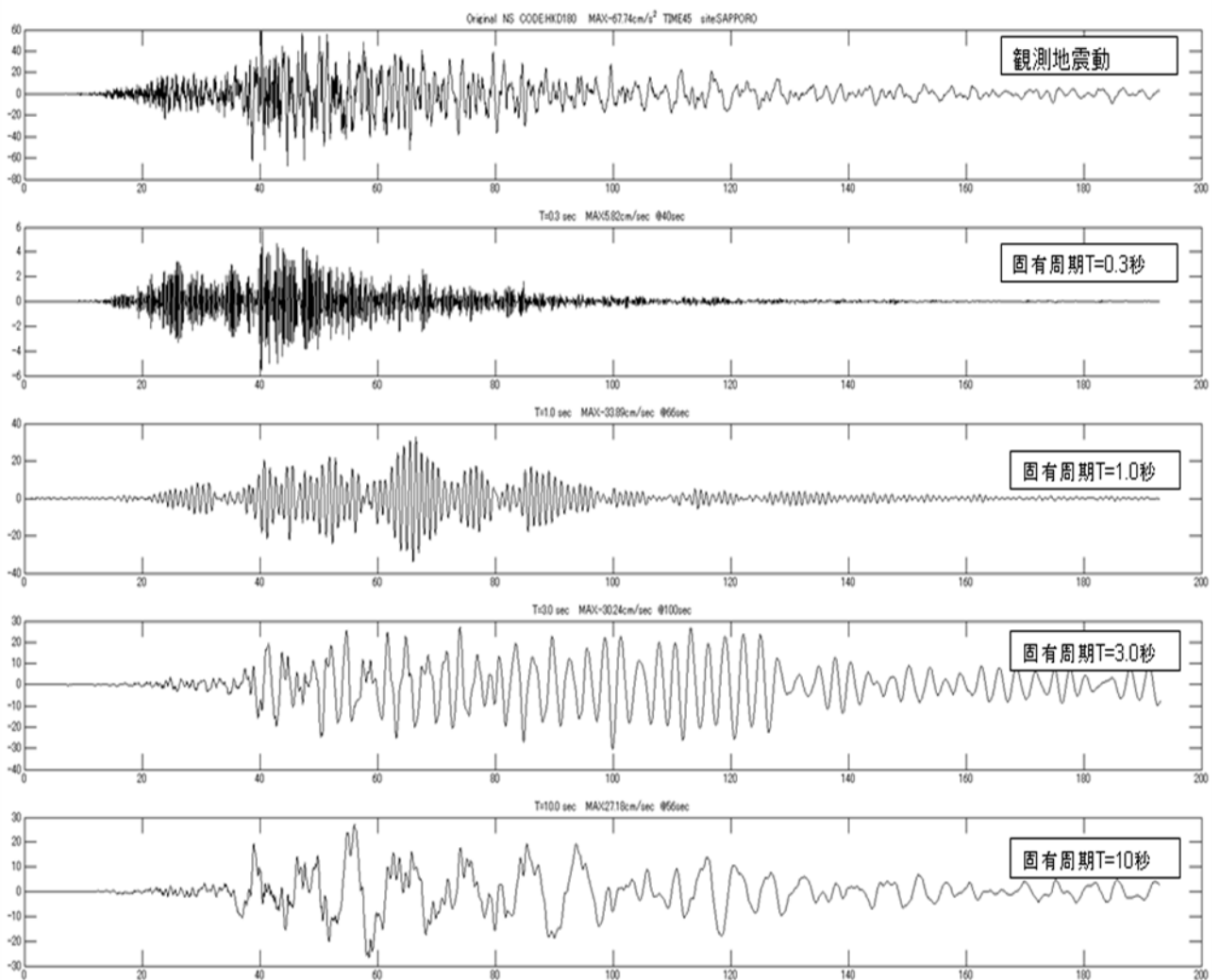


図7 実際の地震時の振り子の揺れの計算値“速度応答波形”

これを踏まえることで、ある観測点で観測された強震動に対して、固有周期の違いによる振り子の揺れ方を計算機によって計算することが可能です（厳密には減衰という揺れを止める要素を含めての計算になり、ここでは5%の減衰を加えています）。図7は図4で示した2003年十勝沖地震のK-NET札幌観測点の強震記録の南北成分（図4の最上段）に対して0.3秒、1.0秒、3秒、10秒の固有周期を持つ振り子を振らした時の揺れ方の様子を示した物です。振り子の固有周期によって、揺れの大きさも違いますし、大きく揺れる時間帯も違うことが良く理解できます。もちろん、実際の構造物は振り子に置き換えられるほど単純ではありませんが、地震時の大まかな揺れ方を見るのが可能になると言えます。少々乱暴な置き換えをすれば、低い建物は短い固有周期で揺れ、高い建物は長い固有周期でユラユラと揺れると考えられます。この検討から、K-NET札幌観測点周辺では3秒程度の比較的長い周期の構造物で揺れが大きく長く続いたであろう事が予想できるのです。強震動に対して振り子や構造物がどのように動くかということを経験時の“応答”という言い方をします。

6. 地震動の伝わり方と地盤による増幅—伝播経路特性と地盤増幅特性—

前節の振り子の応答を用いて地震観測網で得られた強震動を見ていきましょう。すべての地点に対して揺れ方を刻々と見るのは不便ですので、応答の最大値を地図上に表示していくことで見やすくしましょう。図8は図7の様に各地点で計算した応答波形の最大値を地図上に示した物です。振り子の固有周期は違いがより明確になるように固有周期0.1秒と10秒の振り子を揺らしました。

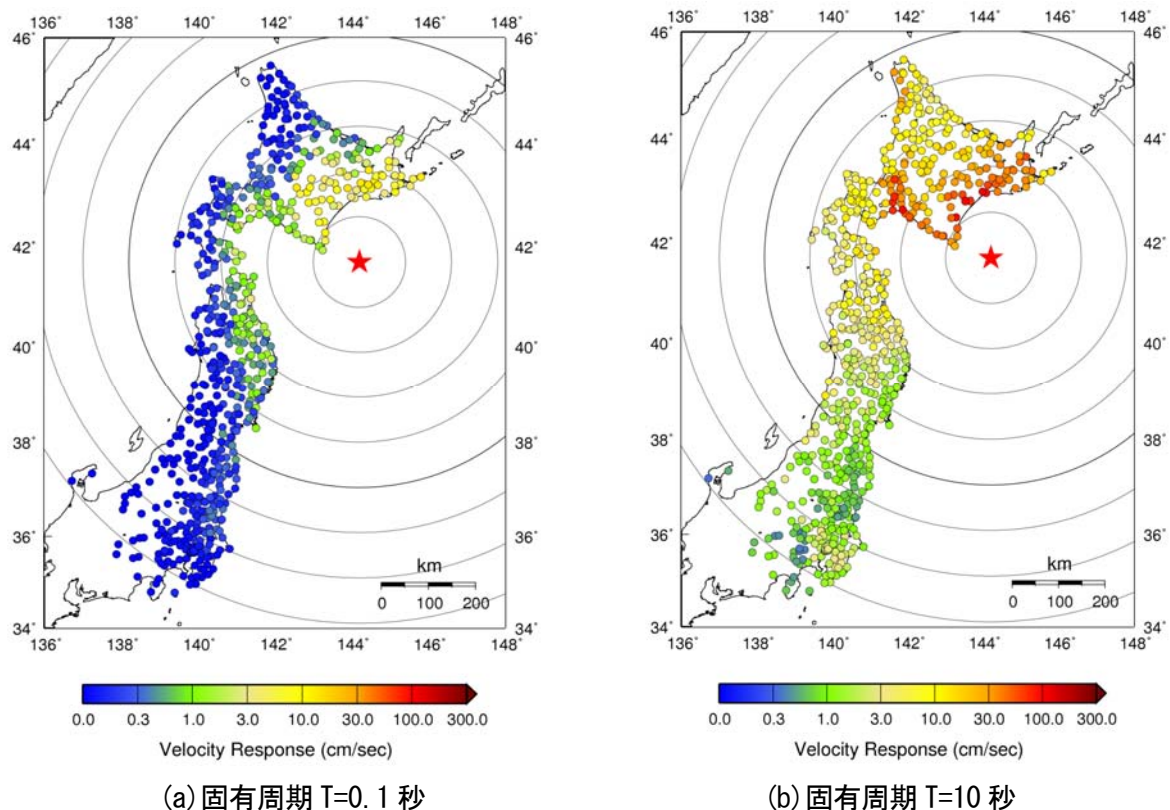


図8 2003年十勝沖地震の強震記録を用いた速度応答最大値（減衰定数5%）の空間分布

この図をみると 0.1 秒の振り子では北海道・東北の太平洋側での値が大きく、同じ距離でも道北では値が小さいことがわかります。一方の 10 秒の振り子では石狩・勇払での応答が大きく、また、道北でも揺れが大きい地域も有るように見受けられます。さらに詳しく見るために、図 9 のように地域を分けて、その地域ごとに色分けをして、震源からの距離と応答値を比較してみたいと思います。

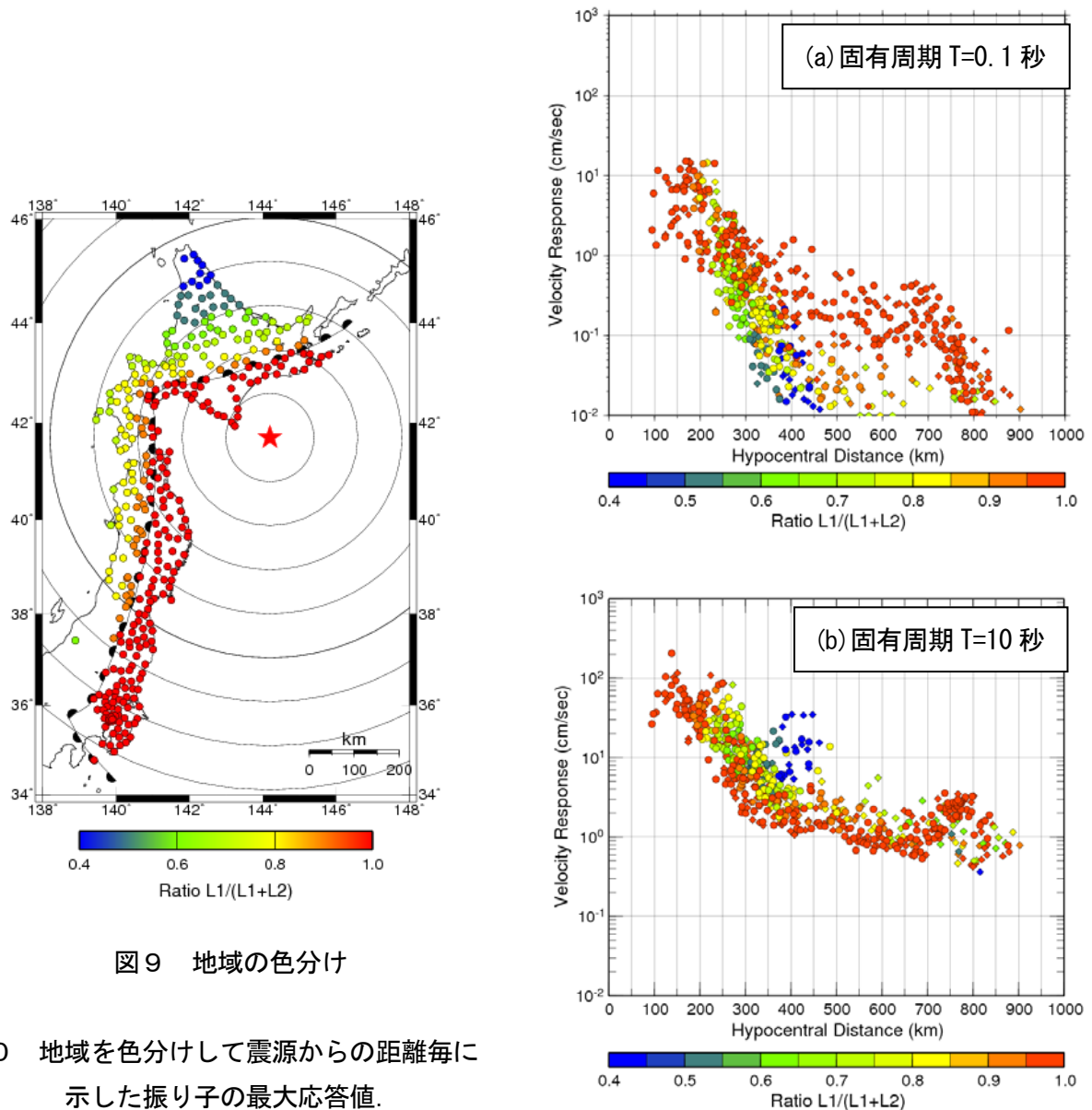


図 9 地域の色分け

図 10 地域を色分けして震源からの距離毎に示した振り子の最大応答値。

図 10 をみるとより明確に、(a)の固有周期 0.1 秒では北海道・東北から関東までの太平洋側で揺れ方が大きくなっていることが良く理解できます。また、太平洋側から日本海側に観測点が奥まるにつれて、揺れの小さくなる傾きが急であることも理解できます。

一方の(b)の固有周期 10 秒の振り子では特に太平洋側と日本海側での揺れ方に大きな違いは見られませんが、400km 付近の日本海側、図 8 (b)で確認すると道北のサロバツ原野周辺での振幅が他地域の同距離と比

較して大きいことがより明確に理解できます。0.1秒の振り子の応答値での地域による揺れが小さくなる傾向の違いは、伝播経路特性であると考えられ、10秒の振り子の応答値のみせる現象は、震源特性や地盤増幅特性を含んだ盆地のような地形による影響であると考えられています [3].

つぎに比較的狭い地域の中での応答の違いを見てみましょう。図1-1は札幌を含んだ石狩平野内の揺れの違いを周期 $T=5$ 秒の振り子を揺らして比較しています。図1-1の左図は石狩平野の地図で、表示されている点線に沿って、右図に応答波形を並べてみました。右図の下にはこの点線の地下の構造が描かれており、その中に示されている V_s という数値はS波速度と言われる各層の地質の軟らかさを示す指標だと考えてみてください。このS波速度が大きくなるとその層の地質が固くなります。一番深いところに存在する $V_s=3200\text{m/s}$ という層の深さが左図に等値線としても示されています。堅い層が地表にまで到達している札幌市のMSF観測点（簾舞）から柔らかい層が厚くなるにつれて、揺れ方が大きくなっている様子が、よく分かります。もちろん、 $V_s=3200\text{m/s}$ の層の深さだけではなくそれより浅い層の重なり合い方が強震動に影響しています。これは、地盤増幅特性や地下の盆地構造の影響によるものと言えます [4].

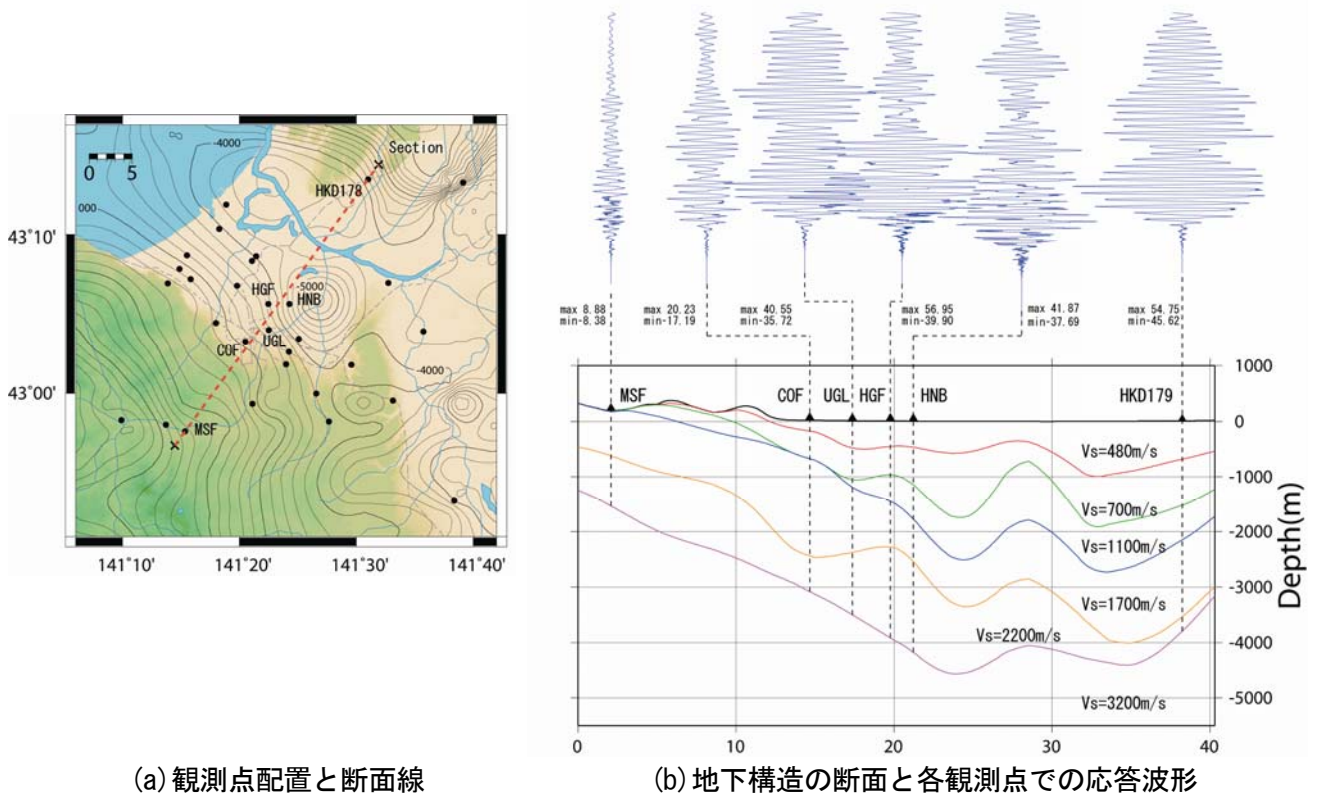


図1-1 石狩平野における2003年十勝沖地震時の応答波形の比較 (固有周期 $T=5.0$ 秒)

このように応答を介して地震動の空間分布を見ることで、固有周期の違いにより、強震動の空間分布が全く異なる様子を呈していることが明らかになってきました。さらにはその要因を探ることで、来るべき大地震時の予測がより高精度になります。この様に、平常時の地震観測は大変重要な情報を提供してくれるのです。

7. 現象の理解から予測へ向けて

これまでに見てきた強震動の空間分布等の様子は決して単純では無いことが分かりましたし、震源の特性をマグニチュードという規模だけで説明しましたが、詳細に関しては言及していません。例えば2003年十勝沖地震のようなマグニチュード8クラスの地震では震源断層の長さが約100kmにも達します。そして、それは地下深くに面積を持って広がっており、その広がりの中で非常に複雑な“壊れ方”をして地震波を放出します。また、地震波の伝わり方が一様ではないことも前述の通り観測で証明されていますし、地盤増幅特性も観測点の真下だけではなく広がりを持って評価しなければなりません。ですが、様々な分野からの技術援用等を基に、将来来るべき地震の揺れ方がいくつか示され始めています。図12に地震調査研究推進本部による研究結果がJ-SHIS[4]という形でWWW公開している例を紹介します。図12は石狩低地東縁断層が地震を引き起こしたときどのような震度分布になるのかを描いた物です。先述の通り、断層の壊れ方は非常に複雑ですので、様々なパターンで計算し、平均化処理が行われています。計算手法を細かく解説することは避けませんが、震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性さらには盆地構造等の効果が計算結果には含まれています。

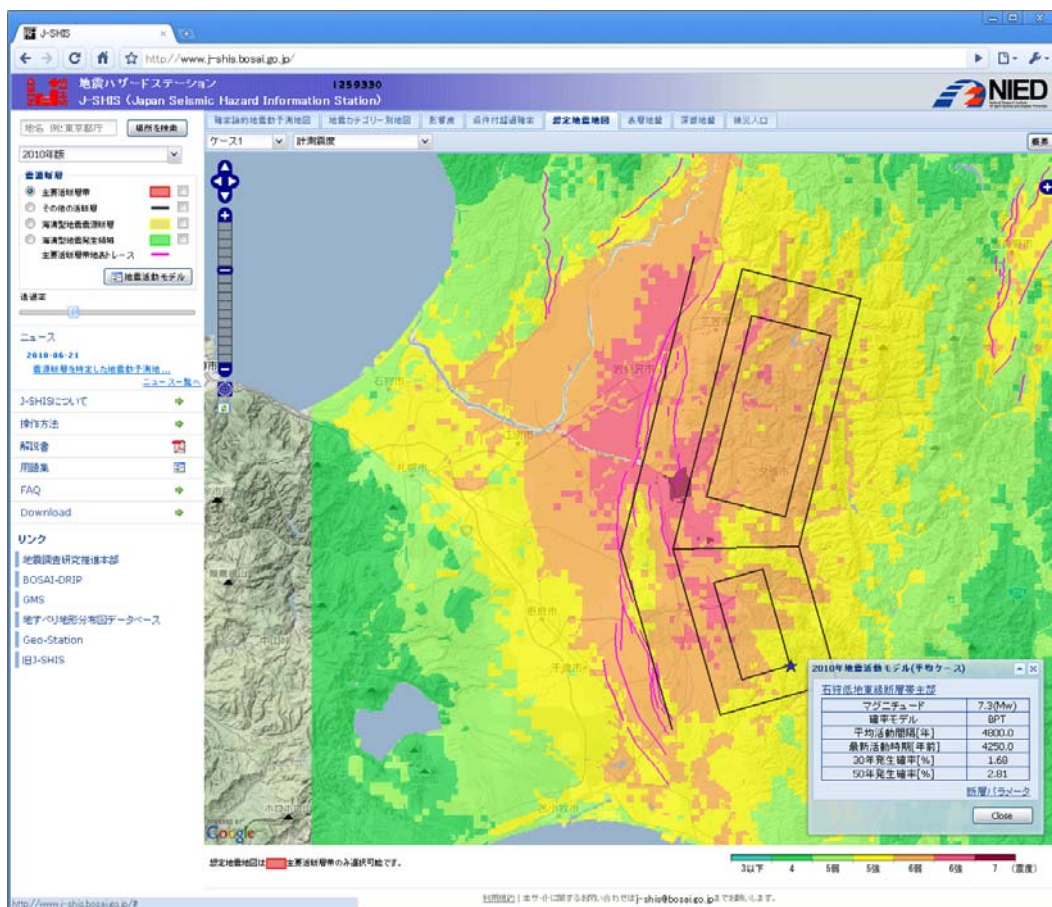


図12 J-SHISによる石狩低地東縁断層帯地震での予測震度分布 ([4]より)

これによれば、本地震が発生すると、札幌では多くの地域で有史以来これまでに経験したことのない(発掘調査等では経験が推定されている地域もあります)、震度5強という大きな揺れに見舞われますし、一部

の地域では6弱と予測されている地域も見られます。札幌市外では震度6強の地域も多く、栗山町周辺では震度7に達するとの予測結果です。もちろん、様々な変数を仮定した上での計算ですので、結果が正しいかどうかは実際に地震が発生するまで証明することは不可能ですが、実際に発生してからでは遅いことも事実です。(本節では強震動予測に関して言及しました、決して“地震予知”では無いことに注意してください。)

8. おわりにー減災に向けてー

地震防災をより効果的に実施するためには、第一に現象を理解することが大切です。本稿では主に2003年十勝沖地震での多くの観測記録を基に、観測から得られた知見の一端を紹介いたしました。最後に若干ですが、所謂地震防災に関しての言及をしておきたいと思います。先に、地震で人が死亡するのではなく、地震で壊れた建物により人は死亡する、と述べました。では、建物の被害は何によって決まるのでしょうか？

地震による建物被害は建物への入力である[強震動の強さ]と[建造物の地震に対する強靱さ]と[地域内での建造物の数(強靱さごとの数)]を考えなくてはなりません。これは、ある地域での強震動が非常に大きいとしても、その地域の建物が地震に対して非常に強ければ、被害は無いことになりすし、逆に強震動が小さくても建物が脆弱であれば、多くの被害を生じるでしょう。すなわち、なにはともあれ、所有する建造物の地震に対する強さを判定[耐震診断]して、脆弱であれば強く[耐震補強]する事が重要です。

加えて、我々が北海道に住んでいることを忘れないようにしなければなりません。1995年の兵庫県南部地震は冬の地震でした。多くの方が着の身着のまま一夜を明かしたことはご存じの通りです。しかし、北海道で同じ行動が取れるのでしょうか？

積雪寒冷地であることは、このように被災時に負に働く可能性が強いと思われます。これは専門家でなくとも考えなければならぬ事だと思しますので、個人での防災を考える上での重要な要素として忘れないで頂ければと思います。

謝辞

本稿で用いたデータは気象庁、(独)防災科学技術研究所、札幌市、北海道により観測され提供されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 地震調査推進本部 URL <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- [2] 強震ネットワーク URL <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- [3] 高井伸雄・前田宜浩・笹谷 努：「2003年十勝沖地震による北海道内の強震動記録を用いた速度応答の空間分布」, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM,334, 2006.
- [4] 三村 渉・高井伸雄・笹谷 努：「2003年十勝沖地震における札幌都市圏の長周期地震応答」, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No83, p161-164,2010.
- [5] J-SHIS URL <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>

上記以外に、「地震の揺れを科学するーみえてきた強震動の姿ー」(東京大学出版会)が平易でおすすめです。