

(96) 釧路市の表層地盤構造と微動観測から推定された卓越振動について

熊谷組技術研究所 正会員 鈴木 猛康

熊谷組技術研究所 正会員 足立 喜隆

熊谷組技術研究所 正会員 田中 港

1. まえがき

釧路沖地震では、丘陵地で斜面崩壊や激しい震動により住宅に被害が発生し、また港湾では液状化による亀裂、沈下が発生した。一方、釧路湿原上の盛土によって形成されている釧路市北部の住宅地では、かなり広範囲に亘って地盤沈下が発生している。このような被害の形態の相違に対して、表層地盤構造から説明を加える目的で、釧路市および一部その周辺で微動観測を実施した。また、微動観測結果と釧路地方気象台の強震観測記録から、微動観測地点における釧路沖地震の際の地震動の推定を試みた。本論文では、微動観測によって得られた各観測地点の卓越振動数と地震動の増幅特性をまとめ、表層地盤構造との関係について考察するとともに、推定された地震動から地震被害について考察を加える。

2. 表層地盤構造

釧路市周辺の表層地盤区分と今回微動観測を実施した地点を図-1に示す。釧路市の表層地盤は、a) 釧路市の北部および市の北に分布する湿原または湿原上の盛土地、b) 釧路市西部の太平洋岸に沿った旧砂丘地、c) 旧釧路川の東に位置する丘陵地（洪積ローム）、の3つに大きく区分できる。

釧路市における沖積層の基底深度の分布を図-2に示す¹⁾。釧路川の河口を最深部（80m）とし、東は旧釧路川東の丘陵地まで旧釧路川から

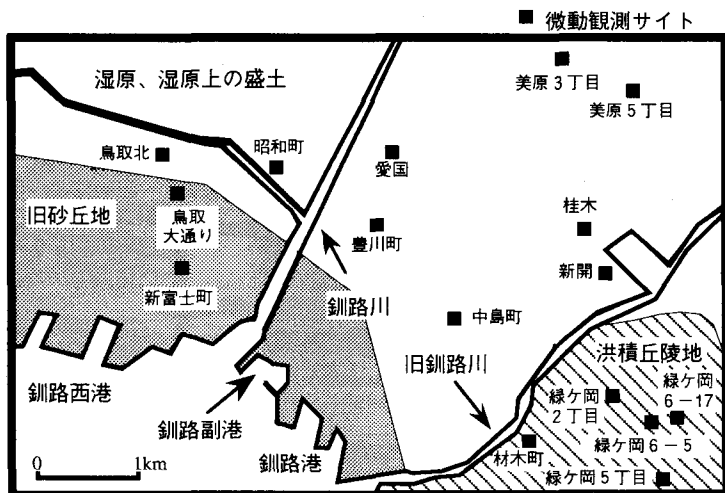


図-1 釧路市の表層地盤区分と微動観測サイト

離れるほど次第に沖積層厚が減少し、北は愛国から美原にかけて70mから30mへと急激に層厚が減少している。また西は、海岸から遠いほど、釧路川から遠ざかるほど少しずつ沖積層厚が減少している。ピート層の層厚分布を図-3に示す¹⁾。愛国と桂木の間の芦野地区付近に層厚4mのもっとも厚い地点があるが、その他の地点のピート層厚は厚い場所でも2~3m程度である。

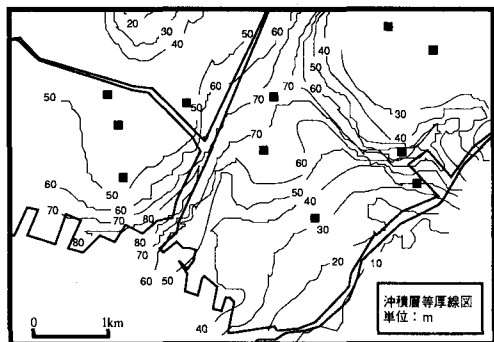


図-2 沖積層厚コンターマップ

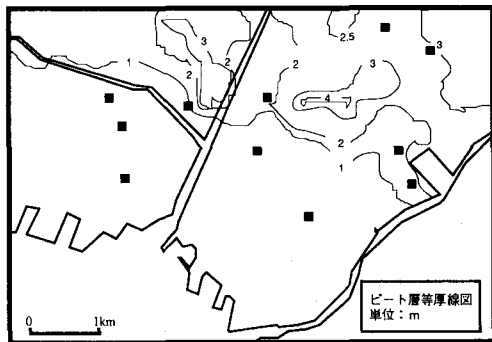


図-3 ピート層厚コンターマップ

3. 微動観測およびデータ処理方法

微動観測は、釧路沖地震の2ヶ月後の3月中旬(冬季)と地表面下1m程度の凍土が完全に解ける5月中旬(春季)の2回にわたって図-1に示す16の地点において実施した。NS(南北)、EW(東西)、UD(上下)の3方向の速度成分を、サンプル数8192、サンプリング間隔100 Hzで収録することとし、1地点につきこの測定を3回繰り返した。データ処理としては、まずそれぞれの記録のフーリエスペクトルを算出し、これにハニングウインドウを3回かけて平滑化した。次に各地点ごとに各成分の平滑化された3つのフーリエスペクトルの平均をとり、各地点の方向別平均スペクトルとした。最後にUD方向の平均スペクトルに対するNSおよびEW方向の平均スペクトルの比として、フーリエスペクトル比(以下、スペクトル比と称する)を求めた²⁾。

4. フーリエスペクトル比

16の観測地点の中から新富士町、愛国、中島町、美原3丁目、緑ヶ岡2丁目および緑ヶ岡6-5の6地点を選定して、これらの観測地点について得られたスペクトル比を図-4に示した。旧砂丘地の新富士町と湿原上の盛土地である愛国、中島町、美原3丁目との間にスペクトル比の形状に基本的な違いはなく、明瞭なピークが認められる。沖積層厚が50~70mと厚い新富士町、愛国の卓越振動数が約0.7 Hzと低く、美原3丁目では1.2 Hz、中島町では1.4 Hzで沖積層厚に対応して卓越振動数はやや高くなっていることがわかる。これらに対して緑ヶ岡2丁目および緑ヶ岡6-5のスペクトル比は、ピーク部が1.5~3.0 Hzの広範囲の振動数領域に分布している。これは恐らく、この付近が斜面の切土、盛土によって造成されているため、フレッシュな洪積ロームの上に、風化層と軟弱な盛土層が堆積した表層地盤構造となっており、基本せん断振動および2次のせん断振動に対応するモードの両方が卓越するため、あるいは基盤境界が不整形な表層地盤構造となっているため複雑な振動モードを呈するため³⁾と推測される。

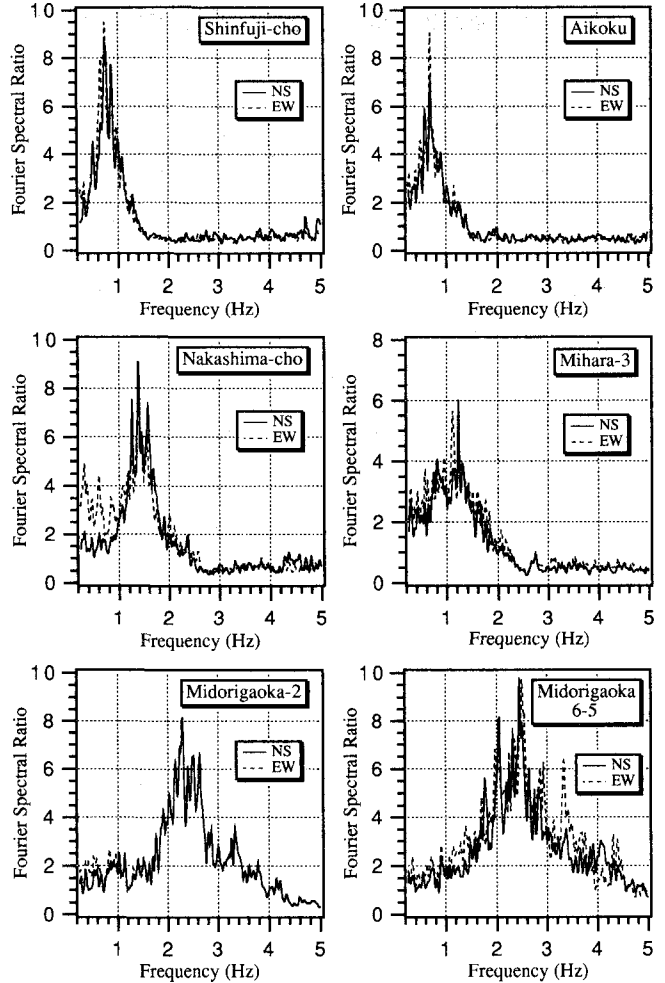


図-4 スペクトル比の代表例

表-1 スペクトル比の卓越振動数領域と最大値

観測サイト名	卓越振動数(Hz)		スペクトル比最大値	
	春	冬	春	冬
新富士町	0.6 - 0.9 (0.74)	0.6 - 1.0 (0.72)	9.5	5.8
鳥取大通り	0.5 - 0.9 (0.62)	0.3 - 0.7 (0.63)	9.6	8.1
鳥取北	0.5 - 1.1 (0.67)	0.5 - 0.8 (0.62)	5.8	8.3
昭和町	0.5 - 0.9 (0.72)	0.4 - 1.0 (0.73)	8.2	7.2
豊川町	0.6 - 0.8 (0.72)	0.5 - 0.8 (0.63)	10.4	9.8
愛国	0.6 - 0.9 (0.70)	0.6 - 0.8 (0.72)	9.0	9.7
中島町	1.2 - 1.7 (1.38)	1.3 - 1.5 (1.40)	9.1	7.7
美原3丁目	1.1 - 1.4 (1.23)	1.1 - 1.6 (1.29)	6.0	8.2
美原5丁目	0.8 - 1.6 (0.96)	0.8 - 1.2 (0.93)	7.6	8.4
桂木	1.3 - 1.8 (1.55)	1.5 - 1.8 (1.68)	8.0	5.1
新開	0.8 - 1.2 (1.12)	1.1 - 1.7 (1.54)	11.1	6.8
材木町	3.0 - 5.0 (3.30)	2.8 - 4.4 (4.14)	5.1	15.4
緑が丘2丁目	2.0 - 2.7 (2.29)	2.0 - 2.6 (2.50)	8.1	11.0
緑が丘6-5	1.9 - 2.9 (2.50)	2.3 - 2.9 (2.38)	9.8	13.2
緑が丘6-17	1.5 - 2.8 (1.81)	1.7 - 2.0 (1.88)	6.2	24.0
緑が丘5丁目	不明瞭	不明瞭	4.4	2.6

16の観測地点で得られた表層地盤の卓越振動数範囲とスペクトル比のピーク値を、地盤区分毎に整理して表－1にまとめた。表中では、スペクトル比のピークが明瞭な場合、卓越振動数範囲の右の（ ）内にスペクトル比のピークを与える振動数を記載している。旧砂丘地および湿原上の盛土地（平野部）では卓越振動数が2 Hzより低いのに対して、洪積丘陵地では卓越振動数が2 Hzよりも高くなっている。表中には3月の測定結果（冬）と5月の測定結果（春）が併記されている。平野部ではほとんど両者の観測結果に相違は認められず、表層地盤の卓越振動自体に地表面付近の凍土の影響はさほどなかったと言えよう。また、時期の異なる観測結果の一致は、微動観測結果の妥当性を示していると思われる。ただし丘陵部の一部では、5月の観測でスペクトル比が極端に大きくなるケースがあった。

5. 地震動の推定と地震被害に関する考察

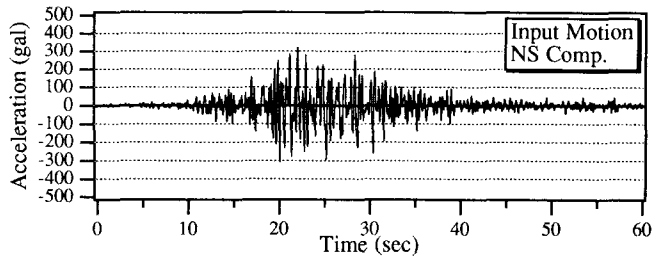
5月の微動観測では、3月の16観測地点の他、釧路西港、芦野、武佐および釧路地方気象台敷地内において観測を追加した。スペクトル比が振幅1の入射波に対する地表での振幅を表す周波数応答関数を与える仮定すると、釧路地方気象台の強震観測記録⁴⁾とスペクトル比より基盤から表層への入射波を求めることが可能となり、さらに4. で得られた各観測地点のスペクトル比を周波数応答関数として、次式により釧路沖地震の際の各微動観測地点の地表面の地震動 $\ddot{y}(t)$ を推定することができる。

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Y(\omega) S(\omega) e^{i\omega t} d\omega \cdots (1)$$

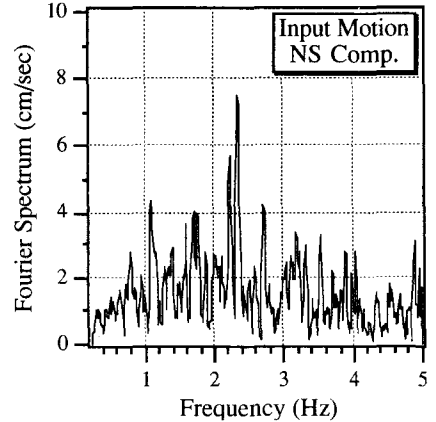
$$Y(\omega) = \frac{1}{B(\omega)} \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{a}(t) e^{-i\omega t} dt \cdots (2)$$

ここで、 $\ddot{a}(t)$ は釧路地方気象台で観測された加速度のNS成分のうち、主要動の81.92秒（サンプル数4096）であり、 $B(\omega)$ は釧路地方気象台で得られたスペクトル比である。また $Y(\omega)$ は（2）式で与えられる入射波のフーリエ係数であり、 $S(\omega)$ は3月の観測で得られた各観測地点のNS方向のスペクトル比である。なお、沖積層における高周波成分の減衰と、解析の結果得られた波形の卓越振動を強調することを考慮し、（1）式による解析は0.25 Hz～5.0 Hzまでの振動数範囲について行った。したがって、実際（1）式の解析に用いた入射波は図－5となり、最大加速度は約320 galで、そのフーリエスペクトルは図－6である。

16地点についての解析結果のうち、特徴的な愛国、美原3丁目および緑が丘6－5に関して推定された加速度波形を図－7に示す。愛国では0.7 Hz程度の卓越した振動が約10波見られるが、入射波にこの成分が少ないため、最大加速度は400 gal程度である。また美原3丁目ではほぼ1.2 Hzの成分が卓越している。図－6に示すように入射波にこの成分が含まれるため増幅された結果であり、愛国に比べて最大加速度は大きく約550 galとなった。釧路沖地震では、釧路市北部の湿原上の盛土地で最大で30～40 cmの地盤沈下が発生している。写真－1は美原3丁目の典型的な地震被害例を示しており、地盤沈下によって地震後、民家の玄関の土間コンクリートと地盤の間に20 cm程度のギャップが生じている。仙台市苦竹地区のビートのサンプルを用いて行った室内実験によれば⁵⁾、ビート層厚が3 mで過剰間隙水圧比が0.7のとき、地盤沈下量は20 cmとなる。上記の解析結果は、過剰間隙水圧を上昇させるのに十分な加速度であり、昭和町、愛国、芦野等ビート層の堆積している地区で同様な現象を確認していることより、地盤沈下のかかなりの部分にビート層の発生過剰間隙水圧の消散による沈下が寄与していることが推測される。ビート層の過剰間隙水圧の消散には時間を要するため、宮城県沖地震の例と同様に、今後数年に亘りさらに地盤の沈下量が増大するものと思われる。



図－5 入射波の時刻歴応答波形



図－6 入射波のフーリエスペクトル

一方緑が丘6-5では、スペクトル比の卓越振動数と入射波の卓越振動数が一致した結果、最大加速度は1200 galに達する結果となった。また愛国や美原3丁目の波形と異なり、主要動部が前半と後半に2分された形状となっている。これらの解析はあくまでも線形解析であるので、得られた最大加速度の絶対値は釧路沖地震の際の値より大きな数値を与えているであろう。しかしながら、緑ヶ岡の一部の地区では、釧路地方気象台と同じかそれより大きな1Gを超える加速度が発生した可能性を示唆しており、斜面崩壊を誘発させた要因の一つと言えよう。このように(1)式による地震動の推定は、各地点の表層地盤特性を良く反映した妥当な結果を与えている。

6. まとめ

釧路市内および釧路町の一部で微動観測を実施し、卓越振動数と増幅特性をまとめ、表層地盤構造との関係について考察した。さらに、スペクトル比を基盤(洪積層)から地表への周波数応答関数と仮定して、各観測地点の地震動を推定した。その結果、以下の結論が得られた。(1)旧砂丘地帯および釧路湿原上の盛土(平野部)では、沖積層厚に対応して0.6~1.4 Hzの明瞭な卓越振動が得られた。(2)洪積丘陵地では卓越振動数が1.5~3.5 Hzの広い範囲に分布し、ピークは平野部ほど明瞭ではない。(3)冬季における地表面付近の凍土の地震動に対する影響はほとんど認められない。(4)推定された各地点の地震動は、平野部の地盤沈下と丘陵地の斜面崩壊をよく説明している。

7. 参考文献

- 1) 北海道開発局：5万分の1地質図幅説明書・大楽毛(釧路一第35号)，1966
- 2) 中村，滝沢：常時微動による表層層厚と基盤および表層地盤のS波速度の推定，鉄道総研報告，Vol.4，No.9，1990，pp.29-35.
- 3) Suzuki, T. and Unami, K.:The Extended Quasi-three-dimensional Ground Model for Irregularly Bounded Surface Ground, Structural Engineering / Earthquake Engineering, JSCE, Vol.9, NO.1, 33s-43s.
- 4) 気象庁：釧路沖地震強震観測デジタルデータ，1993.
- 5) 鈴木猛康：動的応力履歴を受けた粘性土の沈下挙動について，応用地質，Vol.25, No.3, 1984, pp.21-31.

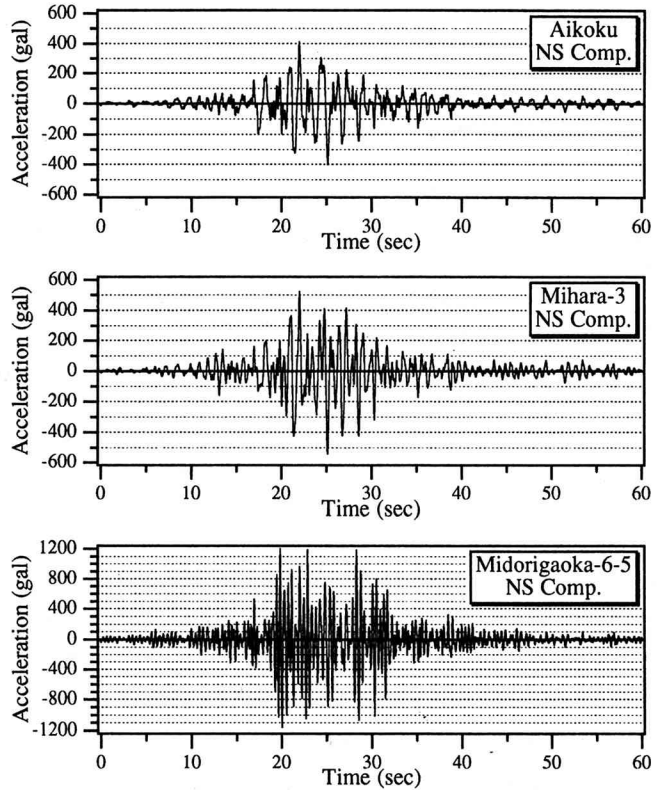


図-7 3観測サイトにおける地震動の推定結果

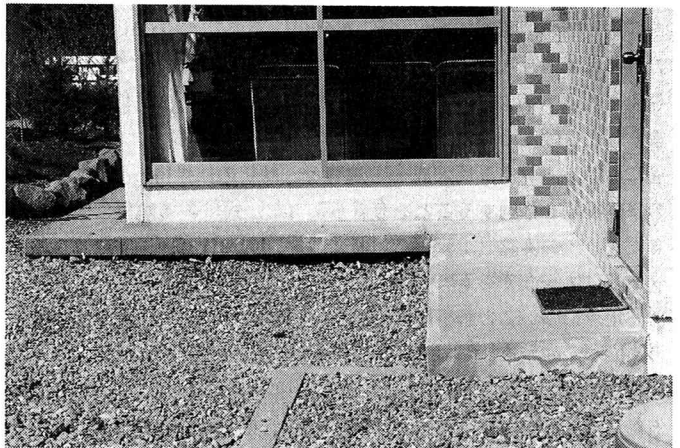


写真-1 地盤沈下による住宅の被害例(美原3丁目)