

# 1978年宮城県沖地震における墓石調査による 推定最大加速度と微動特性の関係

国井 隆弘\* 荏本 孝久\*\*

## 要 約

1978年6月に発生した宮城県沖地震において、筆者らが墓石調査を実施した寺院・墓地は約150地点である。これらの地点での推定最大加速度は150~450 gal およびこれ以上の範囲を持つ。本研究は、これらの調査地点のうち、震央距離に大差のない90~130 kmの地点23箇所を選び、地表の常時微動を観測し、微動が有している振幅、周波数等の特性と推定された最大加速度の値との関係を特に表層地盤の条件に注目しながら明らかにしようとするものである。これにより、微動特性と地震動強度の関係について言及するとともに、常時微動のサイズミックマイクロゾーニングのための有用性に関する展望を述べている。

## 1 序論

1978年6月の宮城県沖地震では各種施設が甚大な被害を受けている。被害は宮城県全域にわたって発生しているだけでなく、福島県北部および岩手県南端部にまでおよんでいる。震源は、発表機関により多少異なる様であるが、大体宮城県の東方沖にあると言われている。しかし被害に関する資料によると、仙台市周辺および宮城県中部、北部の被害が多く、これらの地域より10~数10km明らかに震央に近い宮城県北部東海岸での被害は比較的軽微なものにとどまっている。この地域の被害は仙台市よりさらに数10km震央から遠い福島市およびその北部地域の被害よりも少ないとみることできる。被害の程度の比較は種々の尺度により異なるため安易にできるものでもないし、各種施設の耐震強度に地域的な偏在が仮りにあったとしても、以上に述べた地域的に大差を示す被害の程度は震央距離からだけでは説明できないと考えられる。

斜面の崩壊あるいは地盤災害等による支持条件の悪化にとともに発生する各程施設の被害を除けば、各種施設の被害は施設下の地表面あるいはその地下近傍の地盤のゆれ方、すなわち地震動の強さに支配されるはずであ

る。ここで述べた地震動の強さは、被害に関して各種の指標が考えられ(国井, 田中, 1978), 施設の種類によって強さの評価手法が異なると考えられる。もっとも多く用いられる指標の1つが加速度である。筆者らは地震後に墓石の転倒調査を実施して、被害発生地域とほぼ同じ地域内の150箇所の最大加速度を推定した(国井, 荏本, 1978)。

推定された最大加速度は値が150 galから450 gal およびこれ以上の範囲に分布している。地域的には前述した被害の場合と同じ様に、震央に近い地点ほど大きな加速度が推定されるという傾向はみられない。そして、推定加速度の大小がその地区の被害の大小と調和していると考えられる。すなわち、墓石調査から推定される最大加速度は各種施設の被害を説明できる地震動の強さを示す有効な指標であると言える。

この様な指標をある地域に対してあらかじめゾーンマップの形で与えていけば、1つのサイズミックマイクロゾーニングとなり、襲来する地震に対する防災の観点からかなり有意義なものとなる。そしてこのためには、推定された最大加速度の大小がなぜ生じたかを説明できる必要がある。

地表およびその地下近傍での最大加速度の値にかかわる要因はいくつも考えられるが、その中で表層地盤の特

\* 東京都立大学都市研究センター・工学部

\*\* 神奈川大学工学部

性に着目して二・三の検討を試みた(国井, 1979)。その結果, 土地条件図から求めた表層地盤の良悪が最大加速度をかなり支配することが明らかとなった。この結果は, 今までよくおこなわれている表層地盤の増幅特性にもとづくサイスマックゾーニング手法(たとえば, 東京都防災会議, 1978)にとってある程度うらづけになるものである。このゾーニング手法は, せん断波の重複反射理論を用いることから実施が可能となるため, この理論が成立しない条件が生じたり, あるいはこの理論以外の現象が支配的である場合には, ゾーニングの精度は低下する。その一例として複雑な基盤が考えられる。実存している多くの基盤と表層地盤に対して, 厳密に重複反射理論を適用する事は不可能であるとさえ言われる。この問題に対する解決策の試みはいくつかなされているが, これらがゾーニング手法にとり入れられるには至っていない。

このような観点に立ち, 本研究はゾーニング手法と適合する可能性を持つ常時微動に着目した。常時微動は実際に発生している振動現象であり, 数値解析では表現できない表層地盤からの情報を与えてくれるが, 発震源の問題等, 種々の不明な点を残している。本研究は微動波形が有しているいくつかの特性と推定最大加速度との間に何らかの関係を見出そうとするものである。

## 2 墓石調査の概要

調査は宮城県全域および福島県北部, 岩手県南端部に対しておこなわれた。要した期間は地震直後よりほぼ2週間であり, 筆者らに1名加えた3名で主としておこなわれた。推定される1個所の最大加速度は, 1つの寺院・墓地での調査の結果より得られるが, これらの調査地点の選定および調査地域の設定に際しては, 調査が進行する中で, 以下の事項によるものとした。

- ① 調査地域は墓石の転倒がみられる全域とする。この結果前述した宮城県を中心とした範囲が定まった。なお, 北限, 南限は, もっとも転倒し易くしかも数が極端に少ない墓石の形状(約150galで転倒する形)から定められる結果となった。また, 調査の能率を向上させるため山形県は割愛した。
- ② 調査地域内では調査地点ができるだけ等しい密度で分布するよう試みた。ただし仙台市および周辺では全ての寺院・墓地を対象として, 住家被害等の調査のための資料を考慮している。また宮城県中央北部では, 以前の1978年2月宮城県沖地震の際に墓石調査を実施していることから, これらの地点における今回の再調査をめぐしたため, やや調査地点の密度が高くなっている。
- ③ 転倒した墓石の修復作業がおこなわれる以前に調査

を実施する必要がある。修復作業は規模が多様ではあるが, 一般に被害が軽微な地区ほど早くおこなわれる。このため, 被害の地区ごとの程度の情報をもとに被害の軽微な地区から順に被害甚大地区へと調査順路を選定した。この方法は前述した①の調査地域の設定方法と都合良く調和している。

調査地点は158個所であるが, このうち加速度が推定できたのは151個所である。最大加速度は25galきざみで推定できたがこれらを適当なランクに分けて地図上にプロットしたのが図1である。図中の仙台市およびその周辺では調査地点の密度が高いため全地点がプロットされていない。

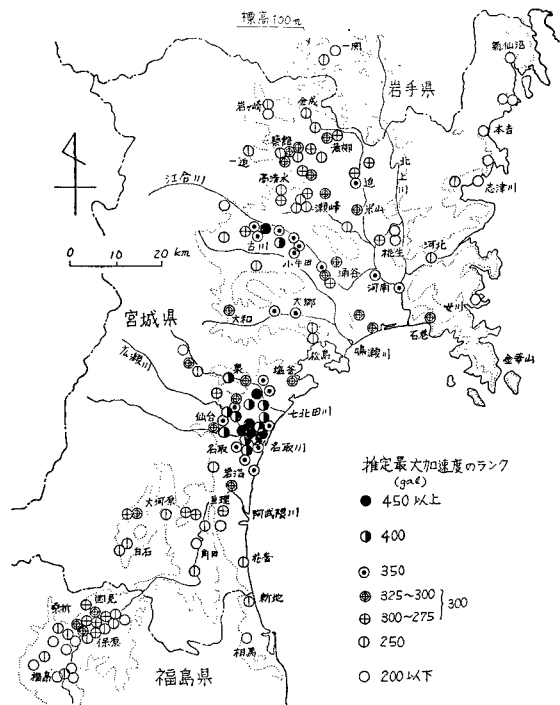


図1 推定最大加速度

仙台市周辺から東側の地域, および古川—小牛田地区に大きい加速度が推定されているが, 加速度の大小の地域的な分布には一定した明快な傾向はみられない様である。

## 3 推定最大加速度と表層地盤の関係

地表での地震動の強さに強くかかわる要因の1つとして表層の地盤条件が考えられる。推定された最大加速度が表層の地盤条件によって大きな影響を受けることに関しては, すでに定性的, 定量的な解析を試みてきた(国

井, 1979)。ここではその1部の概略を後節のための資料として示す。

加速度の大小に関連すると考えられる要因のうち、震央距離の影響を取り除く目的で震央距離（気象庁発表の震央による）が90~130 kmの範囲にある調査地点に注目する。この結果、対象となる調査地点は95個所となる。図2はこれらの地点の推定最大加速度を50galごとに分類して地図上にプロットしたものである。加速度ごとの調査地点数を求めたのが図3である。

本研究では表層地盤の条件を知る方法として土地条件図（国土地理院発行）に注目した。約百におよぶ地点の表層地盤条件を簡易に判別するためには適した1つの方

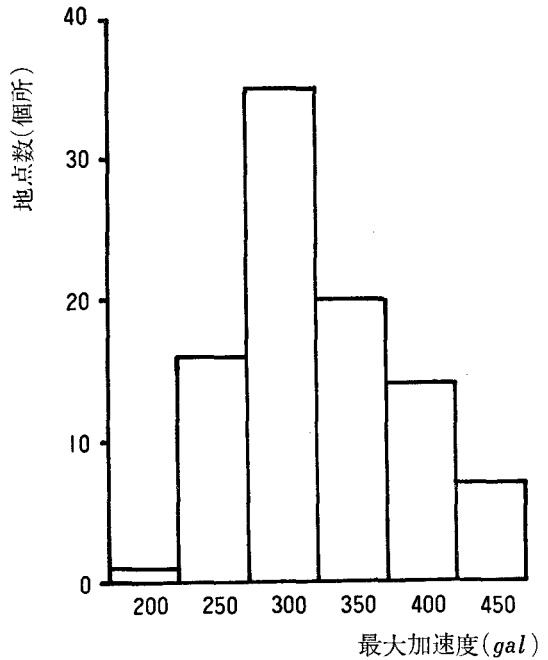


図3 最大加速度と調査地点数

法であると考えられる。土地条件図で分類されている各種地盤を、良、普通、悪の三種に再分類して示したのが表1である。調査地点はこの三種のいずれかに属するが表1にはその地点数が示されている。

表1 表層地盤の分類

記号	地盤条件	土地条件図に示される地盤種類	地点数
A	良い地盤	山地に属し、洪積台一般、緩斜面、崖錐、岩石台地、段丘状である地盤	40
B	普通の地盤	低地に属し、自然堤防、砂州、三角洲、海岸平野である地盤	44
C	悪い地盤	低地に属し、谷底平野、氾濫平野、旧河道である地盤	11

図3で示された各加速度の地点に関して、三種の地盤に分けて作り直したものが図4である。これから、推定最大加速度と表層地盤の条件とが明らかに対応していることが理解できる。

#### 4 常時微動測定

前節により、地震動の強さを表す1つの指標と考えられる墓石調査の結果から推定された最大加速度値の地

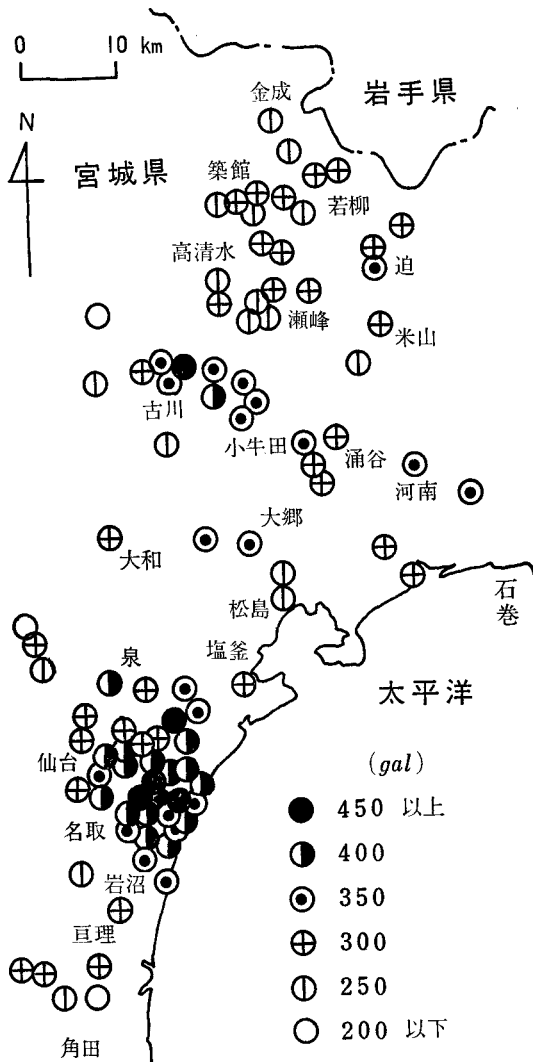


図2 推定最大加速度（震央距離90~130km）

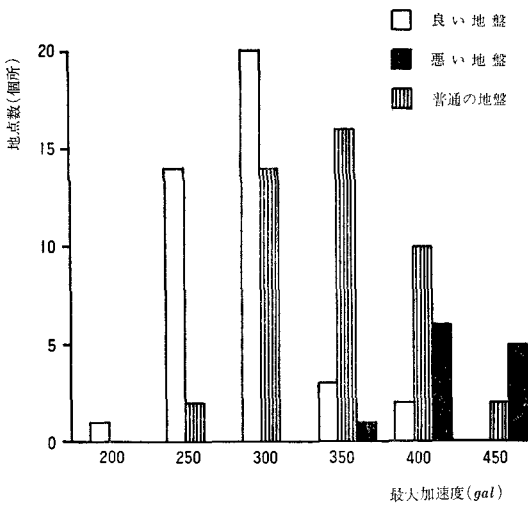


図4 最大加速度と表層地盤の条件

域的な分布と、調査地点毎の表層の地盤特性として地盤の性状を表わす地盤分類との対応関係から、推定された最大加速度値の大小が主に表層地盤の条件に基づく動特性の影響を強く受けているものと考えられる。すなわち表1で分類された3種類の地盤条件より悪い地盤ほど推定最大加速度値が高い値を示している。このことは、過去の震害調査結果においても指摘されている表層地盤の増幅特性に根拠を置く、沖積層厚と住家の全壊率との関係(田治米, 望月, 松田, 1978)とも調和的である。

墓石調査から推定された最大加速度値と表層の地盤特性との関係について、より詳細に物理的な検討を実施するためには各調査地点での地盤調査の結果が必要である。しかしながら、墓石調査を実施した地点近傍での地盤調査資料は、ほとんど皆無に等しい。従って、調査地点の地下近傍に関する地盤の層構造・物理定数ならびに基盤性状を知ることは不可能である。一方、地盤の動特性ならびに地盤条件を概略的に検討するための簡便な方法として常時微動の測定結果が広く工学的に利用されている。しかしながら、特に短周期における常時微動特性は、観測点近傍の外乱に大きく影響され著しく変化するとともに、その震源・伝播経路ならびに波動の性質が十分に解明されていないため、工学的な利用に関する評価方法が未だに不明確であると思われる。本研究では、一つの試みとして墓石調査による推定最大加速度値と、墓石調査地点における常時微動測定による地盤の振動特性の相関関係を各地点の表層の地盤特性を考慮して検討することとした。このような相関関係を得ることは、常時微動測定の工学的利用に関する基本的な有用性を示唆するとともにサイスミックマイクロゾーニング手法への

適用の可能性を与えるものと考えられる。このことからすれば、墓石調査が実施された多くの地点で常時微動の測定が実施されることが望ましいわけであるが、本研究では墓石調査が実施された地点のうち以下に記述する方法によって選定された地点で測定を実施した。

- ① 常時微動の測定対象地域は広範囲となるため推定最大加速度値が高い値を示し、地盤条件の分類が可能である仙台市とその周辺地域とした。
- ② 表1による3種類の各地盤条件による測定地点数がほぼ同程度に分布し、また各地盤条件内での推定最大加速度値の分布が均等に分布するように測定地点を選定する。
- ③ 道路交通の影響を受けない地点や特定の機械振動の震源等が存在していない地点を選定する。

以上のような条件によって常時微動の測定地点を23地点選定し測定を実施した。図5に仙台市およびその周辺地域の地盤条件の分類と常時微動の測定地点を図示しておく。なお図中の地盤条件A, B, Cは表1の分類に対応している。

常時微動の測定は固有周期1秒の動コイル式速度型換振器により水平2成分(N-S, E-W成分)を各測定地点で平均約10分間程度測定し、その記録のうち極めて定常的な振動性状を示す時間帯を解析対象としている。図6に各々異った表層の地盤条件で測定された記録例を示している。すなわち、No.33地点は地盤分類ではAに属し、No.156地点はBに属し、No.119地点はCに属している。

#### 4-1 常時微動の測定結果

常時微動の測定は図5に示されている23地点で実施された。測定された常時微動の記録波形は、図6に示されているように極めて定常的な時間帯においては、各測定地点の地盤条件によって非常に相違し、Aの地盤条件程振幅レベルは小さくなる傾向が明瞭に見られる。この傾向は全部の測定地点についても同様であり、表層の地盤条件の相違が常時微動の振動特性に強く影響を及ぼしているものと考えられる。図7は記録された常時微動のフーリエスペクトルの例で、図6のNo.33, No.156, No.119の記録波形に対応している。図より、N-S成分, E-W成分ともにほぼ同様な周波数特性を示していて、No.33地点では4 Hz, No.156地点では3 Hz, No.119地点では2.5 Hz付近に卓越する周波数が見られる。一方、図8は、周波数特性の時間的変動を考察するために各測定記録のランニングフーリエスペクトル解析を実施した結果で、スペクトルの最大値で基準化して振幅スペクトルを6ランクで示したものである。この解析結果においても、上記各測定地点での卓越周波数は時間的に明瞭に継続していることから、これらの卓越する周波数は各測定地点毎の地

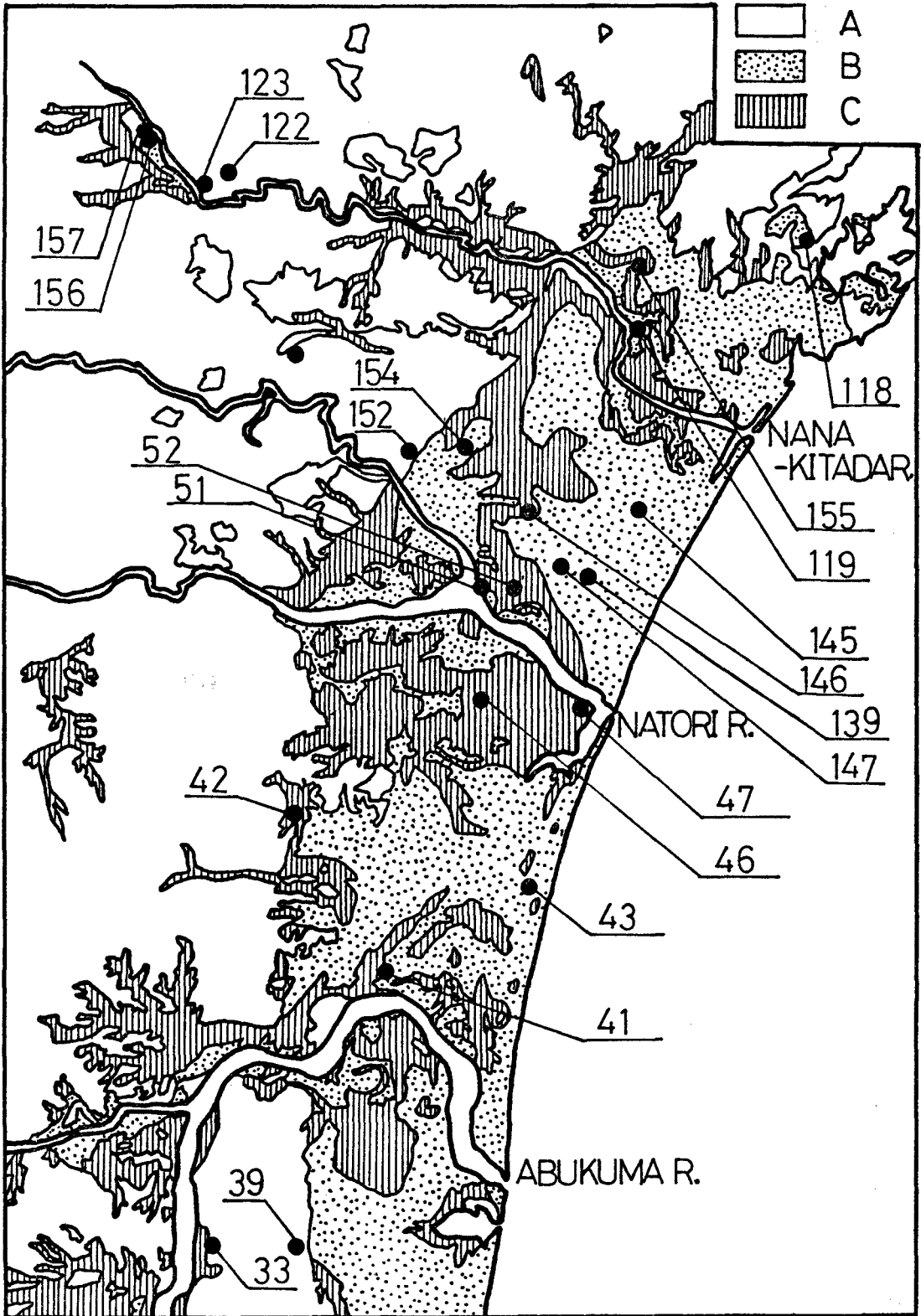


図 5 常時微動の測定地点

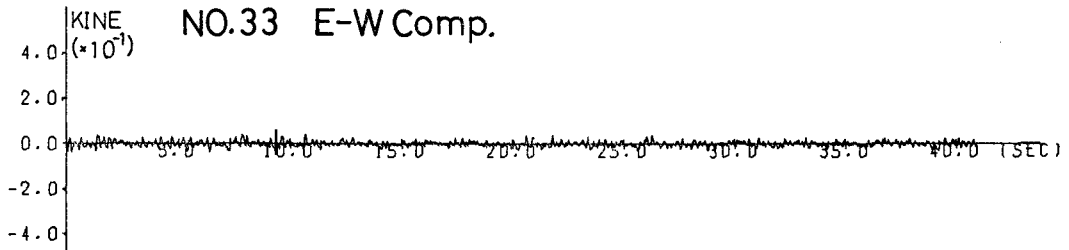
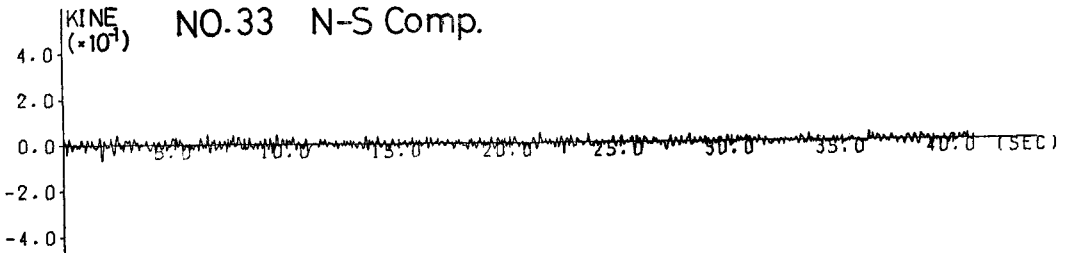


図 6 (a) 記録波形(No.33)

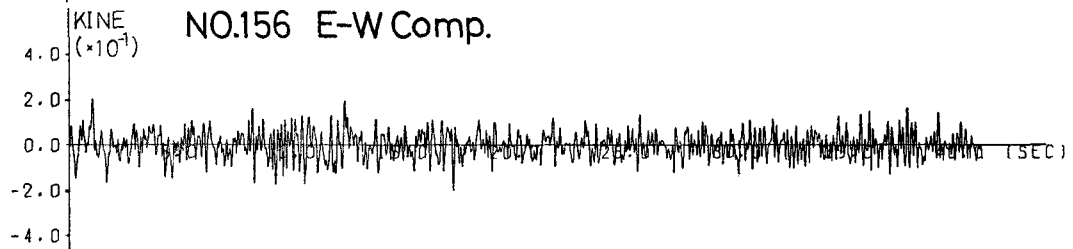
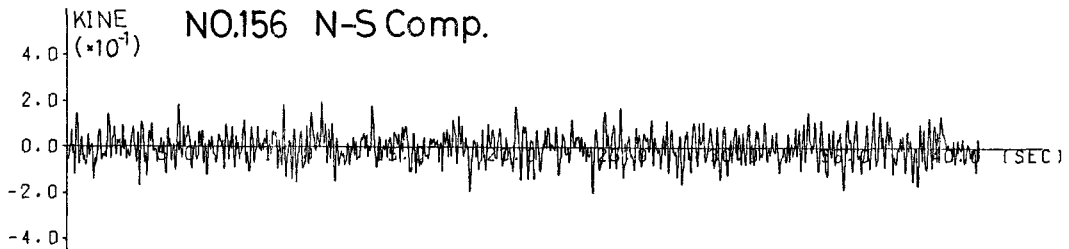


図 6 (b) 記録波形 (No.156)

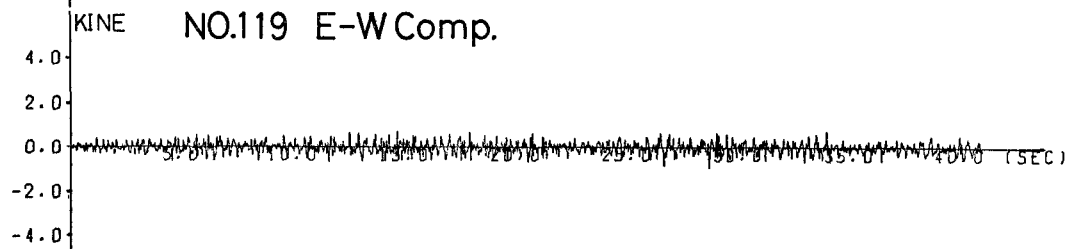
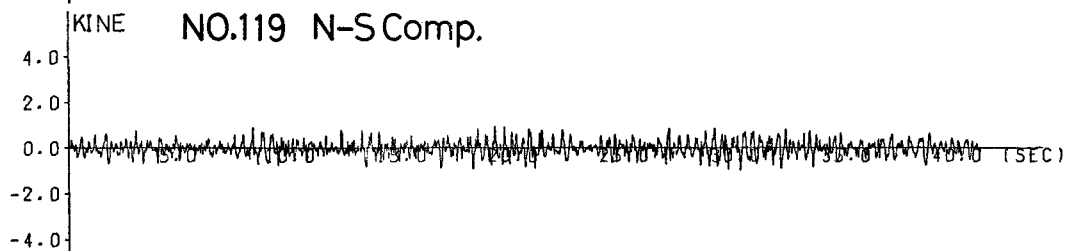


図 6 (c) 記録波形 (No.119)

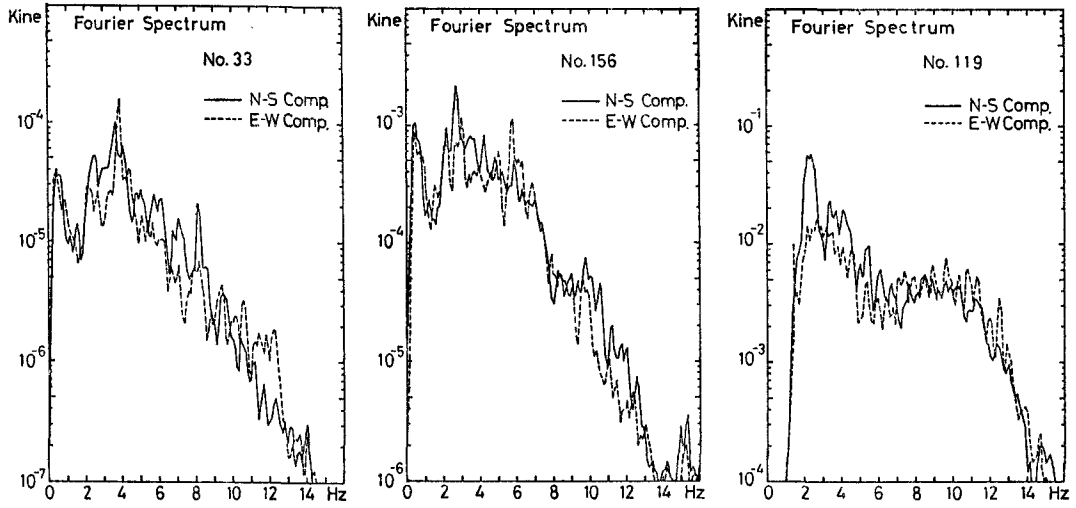


図 7 フーリエスペクトル

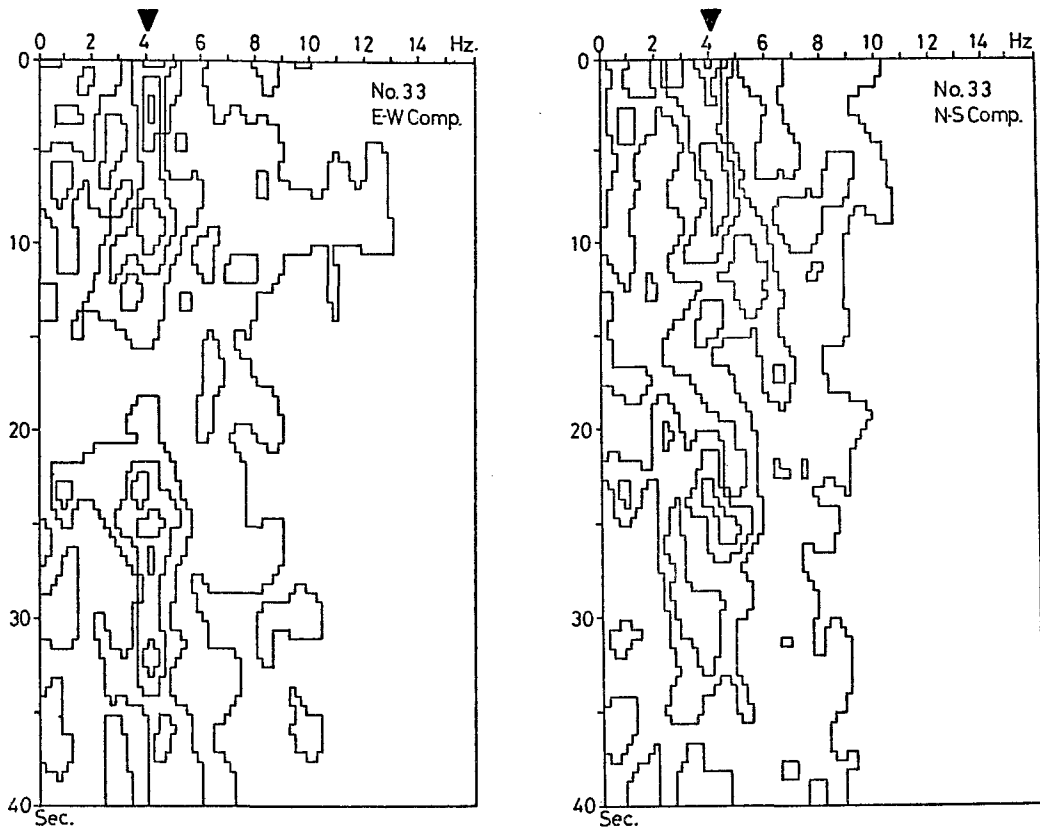


図 8 (a) ランニングフーリエスペクトル (No.33)

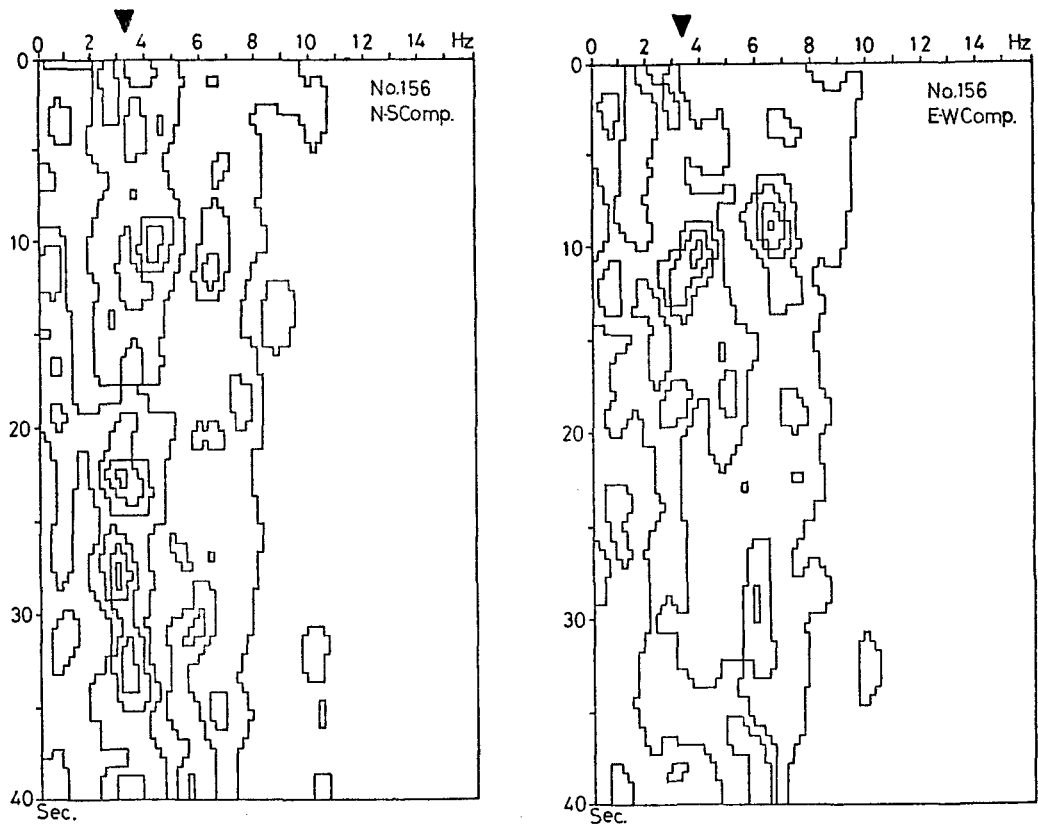


図 8 (b) ランニングフーリエスペクトル (No.156)

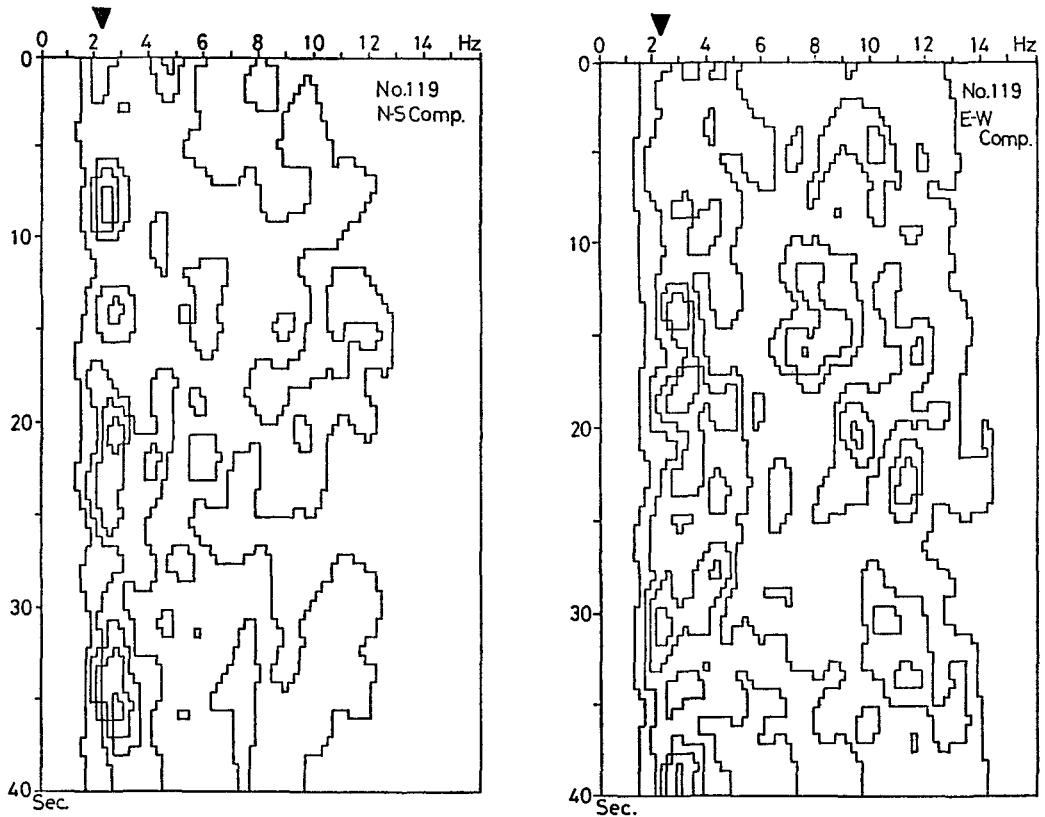


図 8 (c) ランニングフーリエスペクトル (No.119)



盤条件に基づき、表層地盤の卓越周波数であると考えられる。これらの解析は、すべての測定地点での常時微動の観測記録について実施され、ほぼ同様な周波数特性に関する結果が得られている。

また、各測定地点における常時微動の振幅特性の相違を検討するために次式で定義する平均振幅 $\bar{D}$ を算定することとした。

$$\bar{D} = \frac{1}{T} \int_0^T |D(t)| dt \quad (1)$$

ただし  $\bar{D}$  : 常時微動の平均振幅

$D(t)$  : 常時微動の測定記録

$T$  : 測定継続時間

上式で定義される平均振幅 $\bar{D}$ を各測定地点における水平2成分の平均値として算定し、常時微動の振幅特性として比較すると、各測定地点の地盤条件によってかなりの相違が認められる。表2は、以上の解析結果を常時微動の測定地点と、対応する表層の地盤条件ならびに墓石調査による推定最大加速度値(50 gal 間隔に変換)とともにまとめた結果である。

表 2 常時微動の測定結果

No.	測定地点	市町村名	地盤	最大加速度	平均振幅 $\times 10^2$	卓越周波数 Hz
39	称名寺	巨理	A	200	5.73	3.10
122	西照寺	泉	A	200	4.50	4.50
157	興禅院	"	A	200	4.50	4.25
33	定迎寺	角田	A	250	1.13	4.00
42	福寿院	名取	A	250	10.50	4.30
123	林泉寺	泉	A	250	9.30	4.75
118	西園禅寺	多賀城	A	300	8.60	3.75
128	龍雲寺	仙台	A	300	10.37	3.20
152	東禅寺	"	A	300	19.95	3.60
41	墓 地	名取	B	300	9.90	3.10
156	清興寺	泉	B	300	4.90	3.00
43	法円寺	岩沼	B	350	16.90	3.50
47	観音寺	名取	B	350	15.50	3.00
139	昌林寺	仙台	B	450	20.03	2.50
147	薬王寺	"	B	450	16.85	2.60
154	国分尼寺	"	B	450	13.71	3.15
155	慈雲寺	多賀城	C	350	11.50	2.25
119	西光禅寺	"	C	350	23.60	2.60
145	墓 地	仙台	C	400	36.10	2.50
146	霞目墓地	"	C	400	41.53	3.00
46	大照寺	名取	C	400	22.80	2.90
51	得照寺	仙台	C	450	45.36	3.00
52	祐善寺	"	C	450	30.93	3.00

### 5 推定最大加速度と常時微動測定による地盤の振動特性

地震直後に実施された墓石調査地点のうち仙台市周辺における23地点について常時微動測定を実施し、推定最大加速度値と常時微動による地盤の振動特性について表層の地盤条件を考慮して両者の相関関係を検討することとした。図9は、推定最大加速度値と卓越周波数の関係を示したもので、図より各々の地盤条件と推定最大加速度値に対応して右下がりの傾向を示している。すなわち、地盤条件が悪くなるほど、そして推定最大加速度値が増加するほど卓越する周波数は低周波数に徐々に遷移する傾向が見られる。一方、図10は、同様に推定最大加速度値と平均振幅の関係を示したものである。図より平均振幅は対応する地点の地盤条件ならびに推定最大加速度値とともに右上がりの傾向を示し、特にCの地盤条件

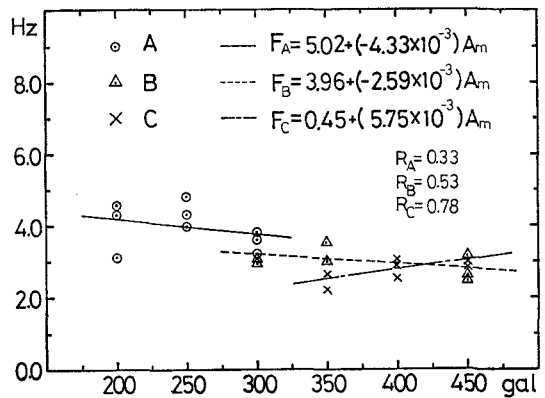


図 9 推定最大加速度と卓越周波数の関係

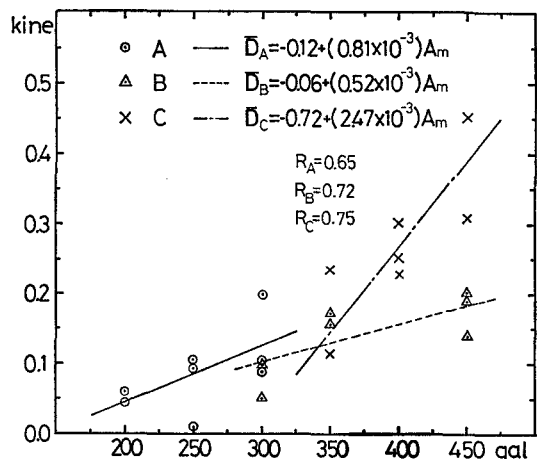


図 10 推定最大加速度と平均振幅の関係

では著しい傾向が見られる。すなわち、平均振幅では地盤条件が悪くなるほど、また推定最大加速度値が増加するにつれて増大する顕著な傾向が見られる。このことは、一般に地表面下数mから数10mの範囲における表層の地盤剛性ならびにその層厚の大小に起因する地盤の振動特性の物理的な解釈とも極めて調和的であると考えられる。以上のことから、前述したごとく推定最大加速度と表層の地盤条件が明瞭に対応し、墓石調査による推定最大加速度が表層の地盤条件を強く反映した地震動の強さの分布を示すものであるとともに常時微動の特性と地震動の特性には強い関連性が存在していることを示唆しているものと思われる。

## 6 まとめ

1978年宮城県沖地震の直後に実施された墓石調査による推定最大加速度値と常時微動測定に基づく地盤の振動特性に関して、表層の地盤条件を考慮して検討を加えた結果、これらは相互に極めて明瞭な関連性を示し、墓石調査による推定最大加速度値が表層の地盤条件の影響を強く受けた地震動の強さの分布を示すものとして、より深い理解が得られた。以下に本研究において得られた知見ならびに問題点を要約してまとめ列記する。

- i) 墓石調査による推定最大加速度値の地域的な差異について、震央距離にそれ程大差のない地域で国土地理院刊行の土地条件図に基づく3種類の地盤条件の分類を用いて検討した結果、推定最大加速度値の相違が地盤条件と明瞭に対応づけられる。
- ii) 墓石調査が実施された仙台市周辺の23地点において常時微動測定を実施し、推定最大加速度値と常時微動による地盤の振動特性の関連性について検討を加えた結果、表層の地盤条件に基づくと考えられる卓越周波数と推定最大加速度値とは負の相関関係が見られた。一方、平均振幅に基づく常時微動の振幅特性と推定最大加速度値とは正の相関関係が見られ、両者ともに表層の地盤条件を考慮することによってより明瞭にその相関関係が対応づけられる。このことは、墓石調査による推定最大加速度値が表層の地

盤条件を強く反映した地震動の強さの分布を示しているものと考えられる。

- iii) 常時微動特性と推定最大加速度値が明瞭な相関関係を示すことから、地震時における地震動特性と常時微動特性は何らかの関連性があるものと考えられる。このことは、予め表層の地盤構造が物理的に判明している地域において常時微動の特性と地盤条件との対応関係が説明できれば更に理解が深まり、今後のサイズミックマイクロゾーニング手法に適用される可能性を示唆しているものと考えられる。
- iv) 墓石調査による推定最大加速度値が表層の地盤条件に基づく地震動の強さの指標となりうることは理解されるが、地震動特性に関するどの物理量に対応するかについては、墓石転倒の力学的メカニズムを解明する必要がある。すなわち墓石の物性・scale effect および周期特性と地震動の振幅特性・周期特性・位相特性および方向性に関する関連性についての問題点を考察する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 国井隆弘・田中 努  
1978 「地震動の強さを評価する方法について」『総合都市研究』第2号, pp. 31~38
- 国井隆弘・荻本孝久  
1978 「1978年6月宮城県沖地震における墓石調査による最大加速度の推定」『総合都市研究』第5号, pp. 103~114
- 東京都防災会議  
1978 「東京区部における地震被害の想定に関する報告書」
- 田治米辰雄・望月利男・松田馨余  
1978 「地盤と震害—地域防災研究からのアプローチ」『槇書店』pp. 203~216
- 国井隆弘  
1979 「墓石調査から推定される最大加速度に関する二・三の考察」『総合都市研究』第8号, pp. 111~119

RELATIONS BETWEEN THE MAXIMUM ACCELERATION ESTIMATED BY  
THE INVESTIGATION OF TOMBSTONES IN THE 1978 MIYAGI-KEN OKI  
EARTHQUAKE AND THE CHARACTERISTICS OF MICROTREMORS

Takahiro Kunii\* and Takahisa Enomoto\*\*

\* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

\*\* Kanagawa University

*Comprehensive Urban Studies*, No. 14, 1981, pp.109~118

In the June 1978 MIYAGI-KEN OKI EARTHQUAKE, the numbers of investigated points of tombstones which are Buddhist temple grounds and graveyards were about 150 points. The estimated maximum acceleration of these points were distributed in the range from 150 to 450 gal and above. In this report, 23 points existing in the range of epicentral distance from 90 to 130 km selected and at each of these points the microtremors at the ground surface were observed. The object of this investigation is to explain the relationship between the characteristics of amplitude and frequency of the observed microtremors and the estimated maximum acceleration by considering the surface ground conditions. The results indicate an existing relationship between the characteristics of the microtremors and the intensity of earthquake motions. Prospects for the utilization of microtremors in seismic microzoning are also discussed.