

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

国井 隆 弘*

要 約

1978年6月に発生した宮城県沖地震において、筆者他が墓石調査によって最大加速度を推定した寺院墓地は約150地点ある。これらの地点での推定最大加速度は150~450gal およびそれ以上の範囲を持つ。本報告は推定加速度の大小が生じる要因の1つとして表層地盤による地震動の増幅性をとりあげ、

- (1) 表層地盤の良悪
- (2) 重複反射理論を用いたケーススタディ
- (3) 過去の同一地域の墓石調査

の三方向から墓石調査結果を検討することにより、地盤における増幅性が推定加速度の大小を説明する1つの要因になり得ることを明らかにしている。そしてこの結果から、墓石による推定加速度に定性的のみならず定量的にも妥当性が見出せる事に言及するとともに、サイスミックマイクロゾーニングのための墓石調査から推定される最大加速度における有用性に関する展望を述べている。

1 まえがき

地震動の地表における強さを墓石の転倒の調査から推定することがしばしばおこなわれる。この場合、調査の手法に関する問題、あるいは推定された最大加速度の信頼性、等に検討すべき残された課題は少なくない。しかしながら、最近の地震における被害の調査結果によると地域的にみた地震被害の大小の分布と墓石調査から推定された最大加速度とがほぼ調和している(たとえば望月他, 1978年)。このことは、墓石調査から推定される最大加速度が定量的に取り扱われることに問題がありながらも、たとえばサイスミック・マイクロゾーニングにおける評価の手法として、すなわち推定最大加速度が地震被害を説明するための地表における地震動の強さを示す1つの定性的な指標の形で、考慮すべき情報を提供すると考えられる。

一方、強震計などの地震計による地震動の観測は、その測定周波数範囲にわずかな不満を残しながらも、信頼度の高い最大加速度を示すとともに多くの情報を含んだ観測波形を提供してくれる。しかしながら最大加速度等の地震計から得られる情報は、今のところ地震計が設置されたごく近傍にしか正確には展開できないのが現状であると考えられる。したがって、地震被害のマイクロゾーニングを検討しようとする場合、現在の地震計の設置

状況は残念ながら極めて不満なものであり今後近いうちに満足すべき状況に到るとも思われない。

本報告はこのような観点に立ち、墓石調査から推定される最大加速度において検討すべき課題に対する1つのアプローチとして、推定最大加速度が持つ側面を明らかにすることを目的として二・三の検討をおこなったものである。対象とした墓石による推定最大加速度は、1978年6月の宮城県沖地震におけるものである。筆者、他は地震直後に福島県中北部および宮城県のほぼ全域にわたって、約150地点(1地点は1つの寺院あるいは墓地に相当する)の墓石調査を実施したが、その結果の詳細は既に報告した(国井, 荏本, 1978)。推定最大加速度は175galから450gal程度およびそれ以上の範囲の値であり特に大きな加速度が、仙台市の東側周辺に集中するとともに宮城県の古川市周辺にも極地的に得られている。

本報告でおこなっている検討は以下の3つの内容に関するものである。

- (1) 表層地盤の条件を土地条件図から得て、良い、普通悪いの三種に分類し、それぞれの地盤条件が多く含む墓石による推定最大加速度について検討する。
- (2) 墓石調査地域の地盤を表層と基盤とからなる8種の簡単なモデルにおきかえ、重複反射理論から生じ得る地表での最大加速度の値を定量的に検討する。
- (3) 1978年2月の地震の墓石調査の資料と今回の調査結果と比較検討する。

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

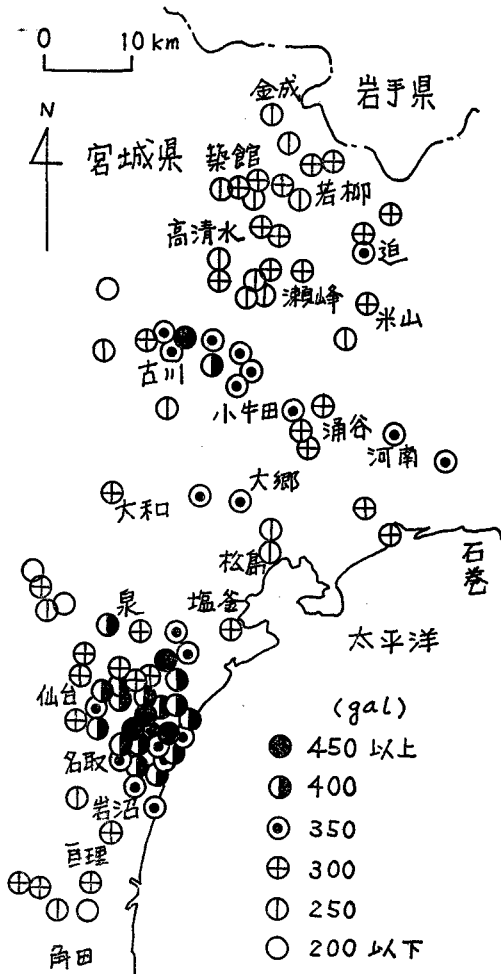


図-1 墓石調査による推定最大加速度
(1978年6月宮城県沖地震)

2 表層地盤の条件と推定最大加速度

過去の地震被害に関する多くの調査報告は、被害がいわゆる悪い地盤のところが多発することを指摘している(たとえば、田治米、望月、松田、1974)。したがって悪い地盤における地表では、より大きい加速度の地震動が発生したものと予想される。このことは、悪い地盤ほど地震波動を集めやすいとして一般に説明できるが、特に表層の地盤条件が悪い場合には弾性波の重複反射理論によって、表層地盤の増幅性を論じることにより説明される。本節は、表層地盤の条件が墓石調査による推定最大加速度に重要な影響を与える要因の1つであると予想し、その実態を検討したものである。

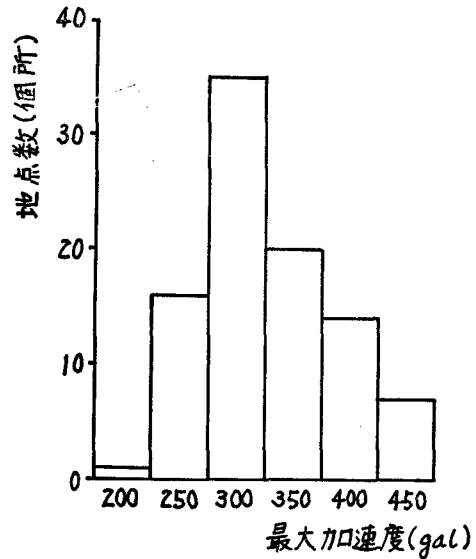


図2 推定最大加速度と地点数

2-1 対象とした地域および推定最大加速度

墓石調査は福島県中北部および宮城県のほぼ全域に対して実施したが、これらがかなり広範囲であるため、日程等の条件から平低地の地点を特に選んでいる(国井、荏本、1978)。このため表層地盤の条件にかたよりが生じる恐れが考えられる。しかしながら、宮城県北部においては平低地の地点を選ばずほぼ全ての寺院、墓地を調査の対象としている。この理由は、1978年2月に発生した宮城県沖地震の際に筆者ほかがこの宮城県北部で墓石調査をおこなっていたため(詳細は後述する)、両地震の調査結果を比較検討しようとする目的を持っていたことによる。したがって宮城県北部の調査地点は各種の表層地盤の条件を含んでいると考えられる。

次に仙台市の周辺に関してであるが、この地域においても都市施設に被害が多発した等の情報のためほぼ全ての寺院、墓地において墓石調査を実施した。したがってやはり表層地盤の条件は多種なものからなると考えられる。

一方、本節における検討の目的に立てば、推定最大加速度に影響を及ぼす要因のうち、表層地盤の条件以外の要因の影響はできるだけ避けることが望まれる。このような避けたい要因の中では、震央距離の影響がかなり強いものと考えられる。このため、本節では震央距離が、90~130 kmの範囲においては推定最大加速度に及ぼす震央距離の影響がそれ程大きくはないと仮定して、この範囲にある調査地点の資料を用いることとした。なお、ここで用いた震央は国立防災科学技術センターの発表(強震速報No.15, 1978年6月)によっている。

このような観点により選定された地域にある加速度推

定地点の位置および推定最大加速度を図1に示す。これら108個所の地点のうち解析の対象とした地点（後述する土地利用条件図がある地点）は95個所となるが、この推定最大加速度と地点数の関係を示したのが図2である。ここで450galは推定値が450galのものとしてこれ以上のものを含んでいる。450gal以上を450galとみなして平均値を求めると300~350galとなる。図2はこの平均値を中心としたほぼ正規状な分布であるとみなせる。なお、推定最大加速度は25galきざみで求められているが、検討を進める上での便利さから50galきざみで表示している。

2-2 表層地盤の条件

表層地盤の良悪を知るための方法は数多い。そして、手の込んだ手法を用いればそれだけ得られる情報が増しそれにともなって地盤の良悪の判定のための基準が細かく検討できる。しかしながら108個所の地点に対して地盤の良悪を知るための何らかの試験を実施すること、あるいは各地点付近の地盤柱状図等を得て地質、地理学的に各地点の地盤性状を知ること、のいずれも多くの困難がともない筆者にとっては実行できない。そこで最も安易に地盤の種類が知れる土地条件図を用いることとした。土地条件図は国土地理院が発行し市販されている2万5千分の1の地図である。

土地条件図から寺院、墓地の地点の地盤の良悪を判定するわけであるが、ここではいくつかの研究成果（たとえば望月他、1978年）等を参考にして以下の如く大別する。

- (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
- (普通の地盤) 低地に属し、自然堤防、砂州、三角州、海岸平野である地盤
- (悪い地盤) 低地に属し、谷底平野、氾濫平野、旧河道

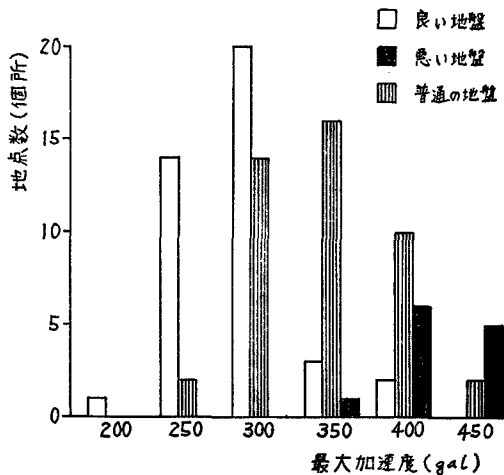


図-3 推定最大加速度と表層地盤の条件

表1 地盤条件の分類

地 盤 条 件	地 点 数
良 い 地 盤	4 0
普 通 の 地 盤	4 4
悪 い 地 盤	1 1

である地盤

この結果、加速度が推定された地点は表1のように分類される。

2-3 地盤と加速度の対応性

推定最大加速度と表層地盤の条件との対応性を示す一例が図3である。この図から良い地盤の地点は350gal以上で極減し450galを含まない、普通の地盤は350gal付近をピークにしてその両側で漸減している、悪い地盤は、350gal以上にある、等が特徴づけられる。450gal以上の推定値を450galとしてそれぞれの地盤の平均値を求めると、良、普通、悪の順に290、350、420galとなる。次に各レベルの加速度の中でそれぞれの地盤がしめる地点数の割合(%)を求めると図4となる。200galでは良い地盤1地点しかないため必ずしも十分な資料数ではないが、図4に大きな影響を及ぼさないため、そのまま割合を求めている。この図は3種の地盤が最大加速度を生じる確率のような意味を持っていると考えられるが、図からはそれぞれの地盤の折れ線が明らかに異なる傾向を持つと理解できる。

このように、土地条件図による地盤のかなり大ざっぱな分類にもかかわらず、墓石から推定される最大加速度は地盤の種類ごとに明快地判別され対応づけられる。

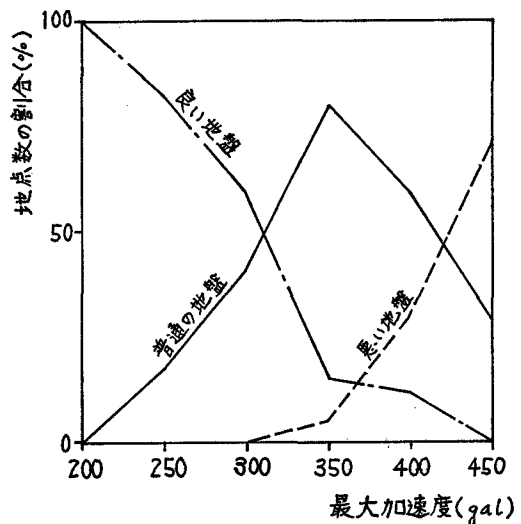


図-4 推定最大加速度と地点数の割合

のことは墓石から推定される最大加速度が、実際に生じた最大加速度と異なると考えたにしても、表層の地盤特性を強く反映した地震動の強さを示す1つの指標になり得ることを暗示していると思われる。地盤の条件をより詳細に検討したり、震央距離等の他の要因を含めた解析により、さらに明確な結果が得られるものと考えられる。

3 表層地盤が持つ増幅性からの検討

弾性波動論によれば、基盤から表層地盤へと入射するせん断波は地表で反射し基盤で1部が再び反射することにより、重複反射現象が発生しこの結果表層地盤で入射波が増幅されることになる。本節はこの原理を用いることにより、墓石調査から推定された最大加速度の値について定量的に検討を加える。

図1において推定された最大加速度の値が400galを越える場合が数箇所に見出される。400galは震度法による設計震度のほぼ2倍であり、かなり大きな加速度である。過去における我が国内外の地震計による記録が最大加速度400galにいたる例は非常に稀である。したがって墓石調査から推定される加速度の値が実際に生じている加速度をかなり上まわっているという印象を避け得ない。本節ではこの問題に対して簡単なケース・スタディを試みることにより検討をすすめる。

3-1 基盤の加速度波形

宮城県沖地震では多くの加速度波形が強震計によって得られているが、ここでは塩釜港工事事務所構内の地表に設置してある強震計の記録に注目する。この記録はNS方向の加速度波形であり最大加速度は335galである。強震速報No.15に報告された原波形の主要動部分に対し、筆者が簡易補正して得た波形が図5(a)である。今後波形のデジタル数値が発表されるものと思われるが、本報告では図5(a)の波形をデジタル化して解析をおこなう。

強震計の設置された場所における土質柱状図は図6であるが、これから深さを考慮したせん断波速度(田治米,

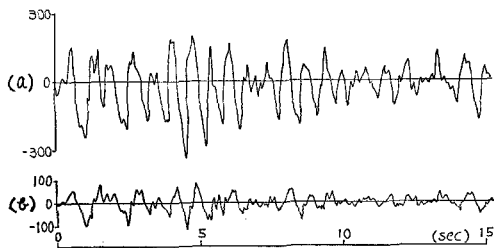


図-5 加速度波形 (NS方向)
(a) 塩釜の地表における強震計の記録
(b) 計算された基盤上の波形

望月, 松田, 1974) を参考にして考え出された地盤モデルが図7となる。このように簡略化のため最も単純なモデルを考える。図5(b)は、図6のモデルを用いて図5(a)から計算される基盤上面の加速度波形である。すなわち、地表の記録から重複反射理論により基盤の地震動の1つの例が推定されたことになる。

3-2 重複反射から求まる地表の加速度

ここでは先に求めてある基盤での地震加速度波形を入力とした場合の各種の表層地盤からなる図7のようなモ

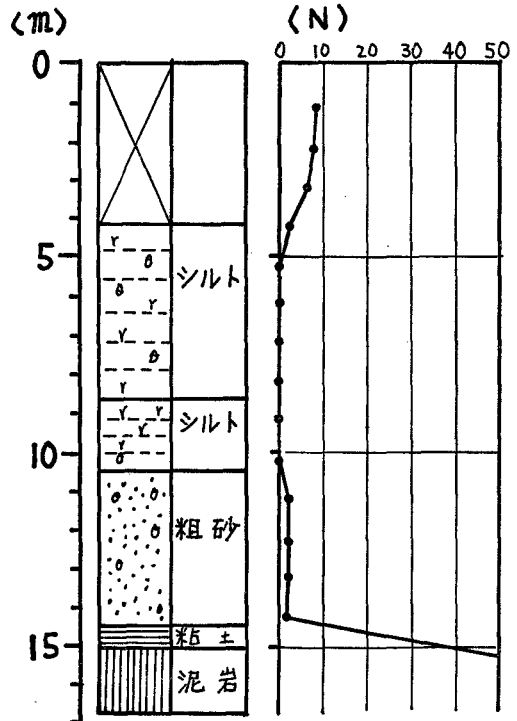


図-6 強震計設置箇所(塩釜)の土質柱状図とN値

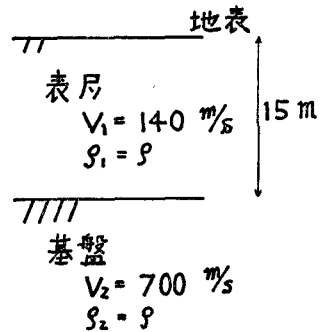


図-7 地盤モデル(塩釜)

デルの地表における加速度波形を求める。表層地盤のモデルは表2に示した8種類を想定する。良い表層地盤とは洪積層程度と考え、普通および悪い表層地盤をせん断波速度でそれぞれ300および100m/sと区分した。表層厚は5, 10, 20mをそれぞれ、薄い, 中位, 厚い場合の例として考え、良い地盤では厚い場合だけが問題になるとする。また、地表における加速度が最大となるような表層厚を求めてこれを最悪な厚さとしたが、この解析によればこれは15mの厚さとなる。このようなモデルによって全ての地盤を最も適確に表わせるものとは思われないが、おおよその地盤は、これらのモデルのどれかにあるいは中間なものに近似できると考えられる。これらのモデル地盤の1次卓越周期は0.07~0.8秒の範囲である。

基盤におけるせん断波速度を700m/sと仮定し、各モデルの地表において計算される加速度波形を図8に示す。ここで(a)~(h)の記号は表2の記号と対応している。図から入力加速度が増幅されている様子が明らかであるが、特に悪い表層地盤での増幅度が大きいことに注目される。これらの地表での加速度の最大値を表2に示したが、良い地盤および普通の地盤で大体250~300gal悪い地盤で300~750galの範囲にある。前者が2.2~2.6の増幅倍率であるのに対し後者は2.6~6.5の倍率となり後者において大きく増幅されていることが確かめられる。

表2 表層地盤のモデル

表層地盤	せん断波速度 (m/s)	表層厚 (m)	地表の最大加速度 (gal)	記号
良い	450	薄	254	(a)
		中位	246	(b)
		厚	253	(c)
普通	300	薄	286	(d)
		中位	472	(e)
		厚	316	(f)
悪い	100	薄	679	(g)
		中位	754	(h)
		厚		

注) 基盤での入力最大加速度は115galである。

前節での検討によると、墓石調査が示す最大加速度が良い地盤で200~350gal(平均290)、普通の地盤で250~450gal(平均350)、悪い地盤で350gal以上(平均420)であった。これらと本節の結果を対応させてみると、良い地盤と悪い地盤においてはほぼ一致するが普通の地盤においては本節の計算結果が下まわる加速度を示している。この理由の1つに300m/sのせん断波速度がやや大き過ぎる仮定であったことおよび20mの厚い地盤では十分な厚さであると言えないことが考えられる。そこでせん断

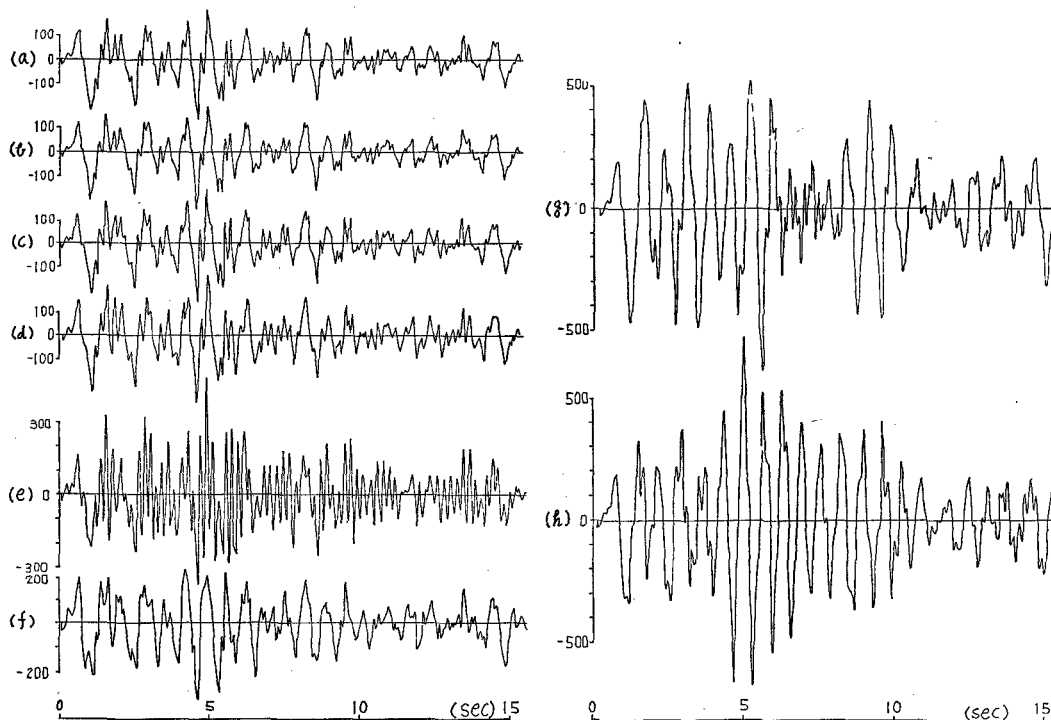


図-8 計算される地表での加速度波形

波速度の仮定をそのままにして、各地盤において最大の地表加速度が得られる表層厚さを求めてみると、良い地盤で約70m、普通の地盤で約50mとなる（悪い地盤は15mで表2で得られている）。この厚さでの地表加速度の最大値は良い地盤で約325gal、普通の地盤で約425galとなる。これらの発生し得る最大加速度およびそのときの表層の厚さを再び本節の結果に加えて考察すれば、普通の地盤においてはより大きな最大加速度が生じるものと十分考えられる。

このように、前節で得られた墓石調査から推定される最大加速度と表層地盤の関係を、本節でのモデル地盤の仮定による検討から、再び示すことができたある程度定量的にも加速度値の妥当性が示し得た。モデル地盤はボーリング柱状図等を得てより具体的な多層モデルとして扱われるべきであるし、またここでの検討がせん断波だけのしかも減衰作用を無視した等、解析が十分な条件のもとにおこなわれてはいない。今後さらに満足のいく資料を得て検討をすすめる機会を得たいが、墓石調査から推定される地震動の最大加速度がほぼ妥当な値を示していることが説明できたと考える。

3-3 強震計の記録との比較

先に述べたように強震計による加速度波形が各地で得られている。強震計が設置されている場所と近くの墓石調査地点の両者がかなり近接することは稀であるし、少しでも離れば両者の表層地盤に差が生じ必ずしも同程度の加速度が得られるとは思われないが、ここでは簡単に比較検討をおこなう。

最大加速度が150gal程度にいたる地表あるいは建物の1階、地階の強震計の記録の最大加速度（主として強震速報No.15）と、その強震計に最も近い墓石調査地点で推定された最大加速度を比較するのが表3である。

強震計が示す値は、その後補正され訂正されているものもあると思われるが、1979年7月1日に筆者がその情報を得ていないものは訂正していない。また前述の如く墓石調査から推定される加速度は25galきざみである。表3で両者を比較すると必ずしもよく合うとは言えない。宮古市の記録に対するのは気仙沼市の墓石調査結果であるが、後者がより震央に近いのに対してより小さい加速度が推定されているのは、後者の調査地がかなり地盤の良い所にあるため、気仙沼市の宮古にもっとも遠い他の調査地では地盤が普通であるためか175galが推定されている。仙台市においては旧市内の各調査地において275gal~350galの範囲の値が墓石調査により推定されているが、調査地が地震計の場所から隣れている場合が多い。大船渡市に関しては宮古市の場合と同じ事が言えよう。塩釜、石巻両市においては強震計と墓石調査による両者の値がEW方向に関してはよく近似している。今後、

表3 強震計と墓石調査

市	場 所	強 震 計			墓石調査	
		設置位置	方向	最大加速度(gal)	方向	推定最大加速度(gal)
宮 古	宮古港工事事務所	地表	NS	150	NS	150以下 気仙沼
	東北大学工学部	1 F	NS	240	NS	275
EW			190	NS	275	
仙 台	住友生命仙台ビル	B 2 F	NS	253	NS	300
			EW	227	EW	275
	国 鉄 ビ ル	B 1 F	NS	438	NS	300
			EW	338	EW	275
大船渡	大船渡津波防波堤	地表	EW	170	EW	150以下 気仙沼
塩 釜	塩釜港工事事務所	地表	EW	289	EW	300
石 巻	開北橋付近	地表	NS	200	NS	325
			EW	294	EW	300

表層地盤の条件等の資料を得て検討を進めていきたい。

4 1978年2月の宮城県沖地震における墓石調査結果からの検討

今回の宮城県沖地震の約4ヶ月前に同名の地震が発生し、その際に筆者ほか宮城県北部において墓石調査を実施した。本節ではこの両地震で墓石調査を実施した地点の推定加速度の結果について検討をおこなう。

4-1 1978年2月の地震について

2月20日13時37分に発生した宮城県沖地震はマグニチュードが6.7と中規模のものであるが、震度Vが大船渡震度IVが北は宮古から南は水戸までとかなり広い範囲に強い地震動をもたらした。震源は北緯38.7度、東経142.2度、深さ60kmにあり、6月の地震に対し約60kmほどほぼ北の方向に震央を持っている（強震速報No.14, 1978年4月）。

この地震により北上川水系の数橋に支承部を中心とした軽微な損傷、北上川下流部の堤防のきれつ、道路斜面被害などが発生した。建築物に関する被害はやや大きく仙台市のビルのガラス破損が多発したほかに宮城県北部の地域で学校、公民館などに8件の被害が発生している。このうち2件の被害は復旧がかなり困難なほど大きい。この地震における被害発生の特徴は、震源に近い宮城県北東部および岩手県南東部の海岸沿いの地域における被害に比べて、宮城県北部内陸側により大きな被害が発生したことにある。筆者ほか墓石調査を実施した理由の1つはこの特徴に対する疑問にある。

4-2 墓研調査および推定最大加速度

墓石調査は3月29日～31日の3日間でおこなわれた。調査地点は35地点であるが、このうち加速度が推定できたのは23地点で、残り12地点では最大加速度が175gal以下であることは判明するが、加速度が推定できる寸法の墓石がないため加速度が推定できない。推定最大加速度は175～300galにあり、その分布は図9に示す如くである。築館若柳、中田町に大きな加速度の地点がみられるが、推定最大加速度の大小の傾向について図から明確にはわからない。

4-3 両地震からみられる推定最大加速度の関連性

両地震で2度加速度が推定された地点、すなわち、1978年2月の地震で墓石調査がおこなわれ、6月の地震で再び墓石調査がおこなわれた地点は、27個所である。これらの地点で推定された最大加速度の関係をj知るために横軸に2月の地震の最大加速を縦軸に6月の地震の最大加速度をとり示すと図10となる。この図から、○印の集団がやや右上りの傾向を持ち、両地震が示す最大加速度に相関性があると言えなくもないが、相関性はかなり低いと考えられる。そこで2月の地震の最大加速度に関して注目する加速度の両側(+25および-25galしたもの)

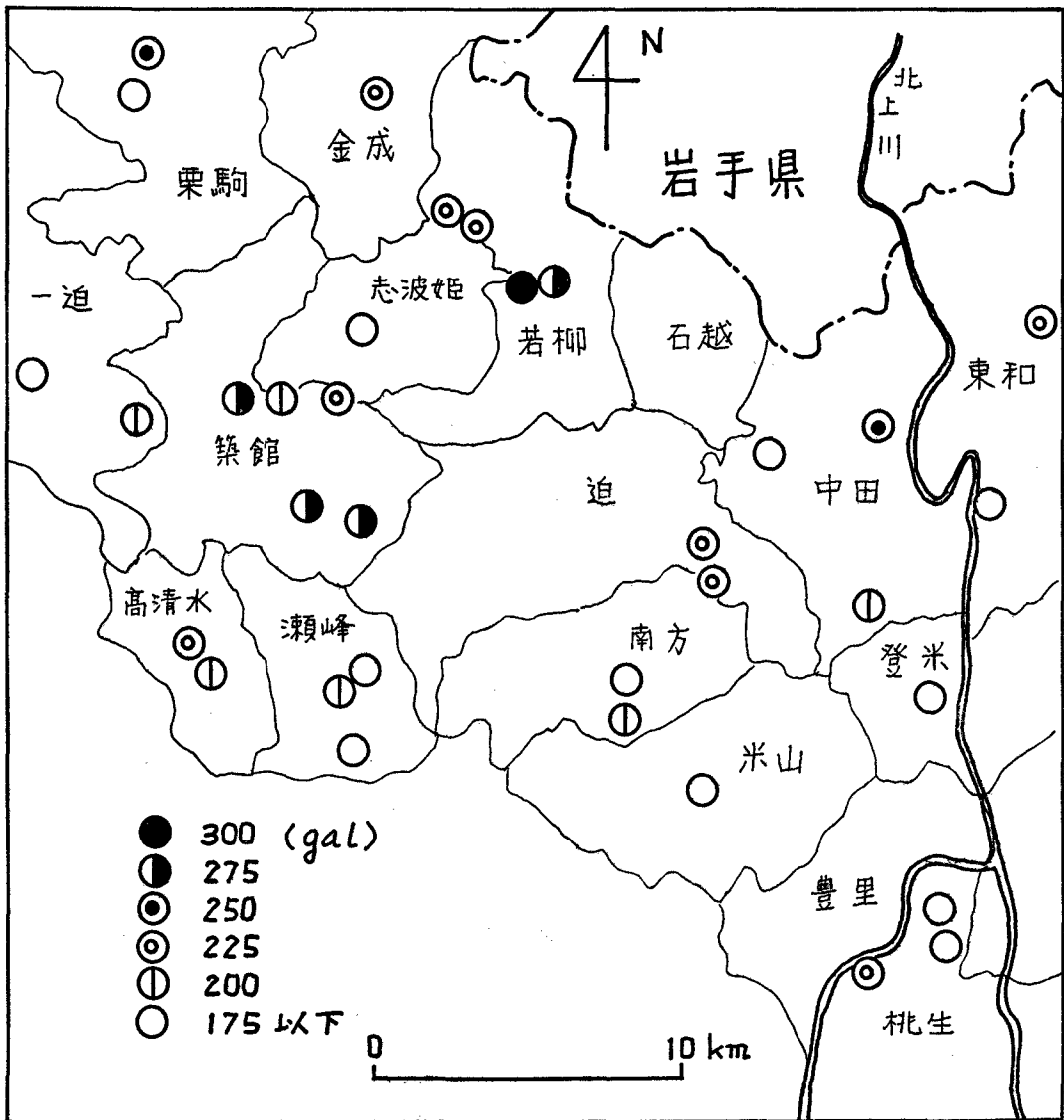


図-9 墓石調査による推定最大加速度 (1978年2月宮城沖地震)

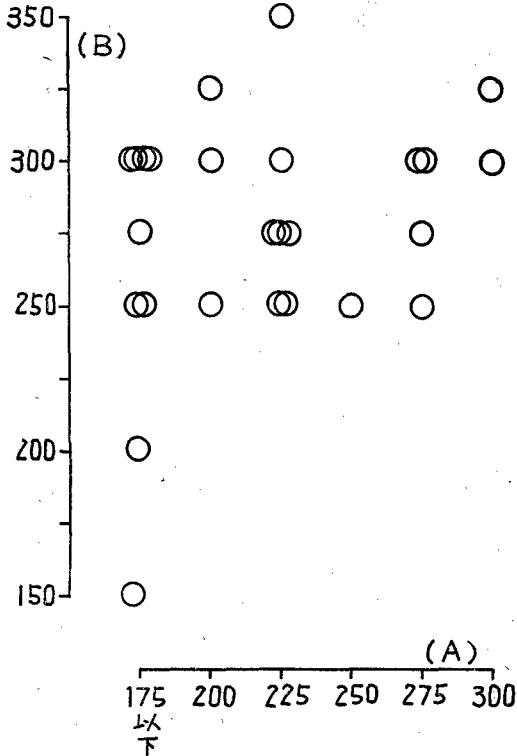


図-10 2回の地震における推定最大加速度の対応
 (A) 1978年2月宮城県沖地震の推定最大加速度 (gal)
 (B) 1978年6月宮城県沖地震の推定最大加速度 (gal)

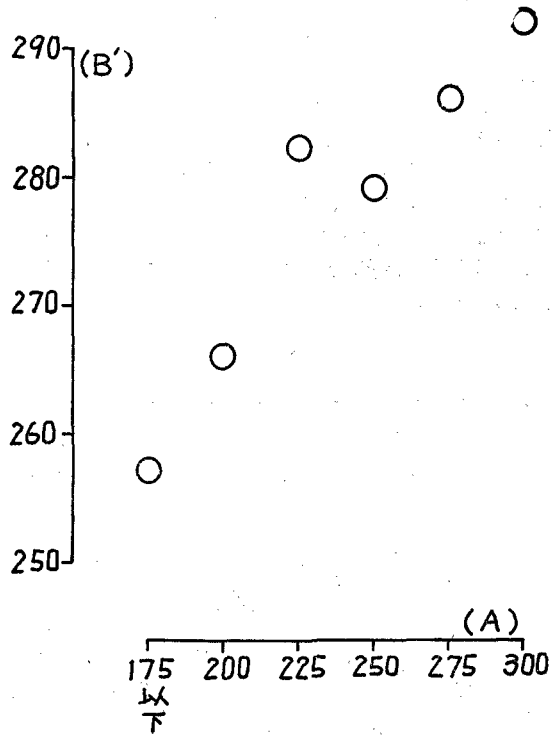


図-11 移動平均による推定最大加速度の対応
 (A) 1978年2月宮城県沖地震の推定最大加速度 (gal)
 (B') 図-10のBを移動平均したもの (gal)

の加速度に対する6月の地震の加速度を加えて、移動平均をおこなった結果、図11が得られる。横軸が225galの点が例外的に大きな縦軸の値を有しているが、全般に両軸には強い相関性が見出せる。このことは両地震の最大加速度が個々の地点においては大きくばらついているものの、全体としては明確な一定の傾向、すなわち2月の地震での加速度の大小が6月の地震での大小と類似する傾向を示していることになる。

この様な傾向が得られた理由として二・三が推測される。1つは前節で述べてきた表層地盤の増幅性である。またこの地域の地下構造に特殊性があるかも知れない。あるいは墓石調査に現われる定誤差によることも考えられる。筆者は地下構造に関して知るところが少なく、ここでは言及できない。墓石調査の定誤差に関しても心当りが無い(国井, 荏本, 1978年)。したがって現在のところ前節で述べたような表層地盤の増幅性のための結果として理解したい。

5 むすび

墓石調査から推定される最大加速度について宮城県沖

地震を例に、地盤の条件、重複反射の計算例として2度の地震で示す相関関係から、推定加速度が示す側面を明らかにした。この結果、いわゆる表層地盤が悪い地点ほど高い加速度の値が推定されやすく、推定値がほぼ妥当なものであり、推定加速度の大小が表層地盤の増幅性によって大きく影響されることが説明できた。このことから墓石調査によって推定される最大加速度が地震動の強さを評価するための1つの指標になり得るものと考えられる。

末尾ながら、資料整理および計算にご助力いただいた堂前満氏(元卒研学生、現在PC橋梁勤務)に感謝するとともに、中心的に墓石調査を実施し、とりまとめにあたってご助言をいただいた荏本孝久氏(神奈川大学)に感謝いたします。

文献一覽

望月利男・国井隆弘・松田磐余・宮野道雄

1978 「サイスマック・マイクロゾーニングにおける震度分布の評価手法について——その1。墓石調査による震度と被害の関係からのアプローチ——」

『総合都市研究』第2号, pp. 19~30。

pp. 103~114。

国井隆弘・荏本孝久

田治米辰雄・望月利男・松田磐余

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,

1974 『地盤と震害』槇書店。

ON THE MAXIMUM ACCELERATION ESTIMATED
FROM INVESTIGATION OF TOMBSTONES

Takahiro Kunii *

Comprehensive Urban Studies, No. 8, 1979, pp. 111~119

Maximum acceleration in 150 points were estimated in the June 1978 Miyagi-ken Oki earthquake by the present writer. This report takes notice of the *amplification nature* of earthquake ground motion in the surface layer because it must be one of the important factors which makes a significant difference in estimated values. The amplification nature is demonstrated from three points of view ;

- 1) condition of the surface layer,
- 2) a case study using the multiple reflection theory,
- 3) comparing the estimated acceleration at points with other values that were estimated at the same points in the February 1978 Miyagi-ken Oki earthquake.

* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University