

京都大学防災研究所創立50周年記念

第5回 防災フォーラム

「津波の大きさと防災」

2002年2月8日(金)

東京大学地震研究所 地震予知情報センター センター長・教授 阿部 勝征

河田 今日には防災フォーラムの最終回で、東京大学の地震予知情報センター長、教授の阿部勝征先生に「津波の大きさと防災」というタイトルでご講演いただきます。先生は、1944年にお生まれになり、東京大学の地球物理学科を1968年に卒業されています。そして博士課程修了後、北海道大学理学部の講師、助教授を経て、その間MITの研究者、カリフォルニア工科大学の上級研究者を経られ、1984年に地震研究所の助教授、1989年に教授、そして現在に至っています。専門は地震学で、特に津波の問題について卓越した研究者で、人間COEのような方です。地震予知連絡会委員、東海地震判定会委員等、多くの政府の委員を兼務していただいています。著書にも『巨大地震』（読売新聞社）『地震の物理』『地震予知』などがあります。一度先生にご講演いただきたいとかねがね思っており、こういう機会に先生をお招きし、ご講演いただけることを非常にありがたく思っております。

阿部 今日は1時間ほど時間をお借りして、私の専門の話をしてみたいと思います。一般の講演会の場合には、日本海中部地震からすでに19年たったとか、北海道南西沖地震からすでに9年たち、巨大津波はまれにしか起こらないものですから、防災意識の風化が著しいものですよと始めて始めますと、一般講演会風の講演になります。しかし、河田先生からいろいろと話を伺いますと、今日は大変りっぱな先生方がおられるということで、一般講演のような話はないことにします。

私は地震学で研究を進めてきましたが、国の会議では日本海沿岸部の津波防災という点では4省庁の会議に出たこともあります。太平洋沿岸の津波防災という点では7省庁の会、気象庁が津波の予報を量的化する場合の委員会とか、現在でも河田先生と一緒に消防庁などの津波防災に関する委員会に出ています。そのよ

うに津波の方面でいろいろな委員会にひっぱり出される理由もあります。それは私自身が「津波の研究も」過去に行ってきたことがあるからです。今日は研究者を前にお話しさせていただくということで、研究面を強調して、津波に対して私がどのような研究をしてきたかということ、それと防災を絡めるとどのような話になるかという点でまとめてみたいと思います。

全体としては、1点目が、津波の大きさを量的に表すためにはどのような方法があるか。2点目が津波の高さを予測することができるかどうかという問題です。その地震の大きさと津波の高さを予測することをまとめると何か新しい研究ができないかという点が3点目になります。

私が津波の研究を始めたのは大学院のころで、30年ぐらい前になります。「巨大地震と津波の発生メカニズム」が私の博士論文ですが、実際の津波は海底での断層運動による地殻変動によって生じているということが結論です。たくさんの津波を手がけましたが、手法として津波の発生メカニズムをどのように量的化するかということが一番大きな問題でした。

当時、津波は昔の津波の研究の流れをくんでおり、海底でどのようなことが起こるか全くわからない時代でした。そのために円形の領域を想定して、一様な隆起した場合の津波の発生や、正弦波的な海底変動を与えたときの津波の問題、その解法自体も運動方程式と境界条件から決まる方程式を解析的に解いて、結局はベッセル関数で展開して津波の波形を求めるという時代でした。

私が考えましたのは、まず津波を量的化するには3つの大事な量があるのではないかとということです。1つが津波の波源域と呼ばれるもので、これは津波の第1波の初動の時刻を海底に戻してやる逆伝搬図法により、津波の波を波源に戻します。そうするとある一定の面積を持った波源域ができます。その面積をいろいろ

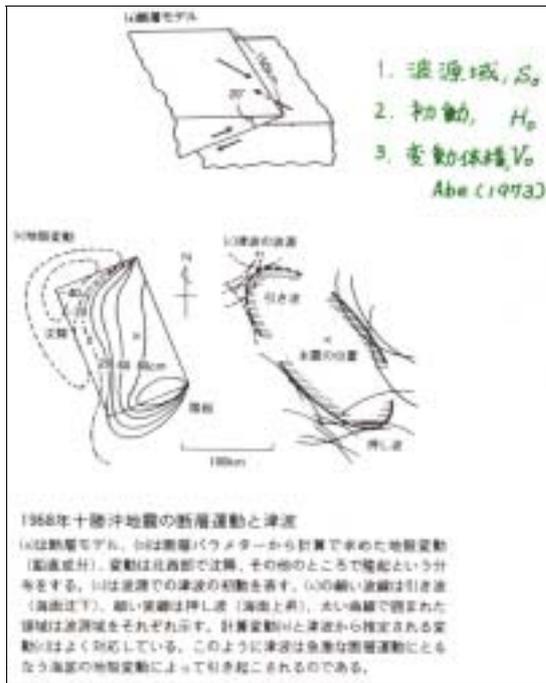


Fig 1

ろ比べてみると、地震のときに発生する海底の断層の面積にほぼ等しいことがわかりました。実際は津波の波源域の方がもう少し広くなります。これは、海底の地殻変動は断層面積を超えたところでも変動が生じるので広がるのがのちにわかりました。

2 番目に考えたことは、津波の第 1 波の初動があり、これは地震波の初動と同じで押し波と引き波が出てきます。この押し波と引き波が海底の地殻変動の隆起した分が、沈降した分かというものと関係するだろうと、実際に断層モデルから海底の地殻変動を計算したものと合うことがわかりました。これで海底の隆起と沈降の様子がわかりました。

次は、津波全体の大きさと実際の断層運動とが調和が取れているのかどうかということで、導入したパラメータが海水の変動体積というもので、実際の海底での地殻変動によって海水がどれだけ持ち上げられたか、または押し下げられたか、その体積を測ります。これは津波の高さと逆伝搬図法と、当時としては簡単な方法でしたがグリーンの法則を用いて津波の高さを波源に戻します。そして変動体積を計算して、実際の地殻変動による体積とを比べますと、これも非常によく一致することがわかりました。

このようなことから、海底で起こる地殻変動は実際の断層モデルから期待される地殻変動と同じものであるという結論を出しました。

今度は津波学の方ですが、私は直接はわかりませんが、津波の数値シミュレーションが私の研究を契機として盛んになりました。海面の初期水位を与

えて、それを与えるときには海底でどのような地殻変動があったかを与えることになります。ベッセル関数の展開は使わずに、本当の地殻変動を初期水位としての数値計算、それをリープフロッグ法で津波波形の計算が進められるようになりました。私が発表したのは 1973 年のことでした。

Fig 1 は、1968 年の十勝沖地震の例です。地震の断層運動から期待される海底の変動は、北西部の沈降域があって、南東部に隆起域があります。津波の波源を実際に戻すと、初動の第 1 波が引き波だったところが北西部に集まります。ここが沈降部です。沈降部と津波の第 1 波の引き波が同じになっています。この南側の部分は押し波になっています。実際の地殻変動は隆起になっています。ですから、パターンも合います。このようなことが行われたのが 1973 年、30 年近く前になります。これが私の最初の津波に関する論文でした。

次にアメリカに渡り、狭い意味での地震学の研究をしていましたが、一方では津波を調べてみたいと思いました。当時、私の指導をしてくださったのは金森先生でした。金森先生は次から次へとりっぱな論文をお書きになり、私も書きたいのですが、書くとうとうも金森流の論文になってしまいます。何とか金森先生と違う分野で仕事をしてみたいと、いろいろ考えて津波なら何とかなるだろうと。幸い、金森先生はあまり津波そのものに対して深い研究はされなかった面がありました。

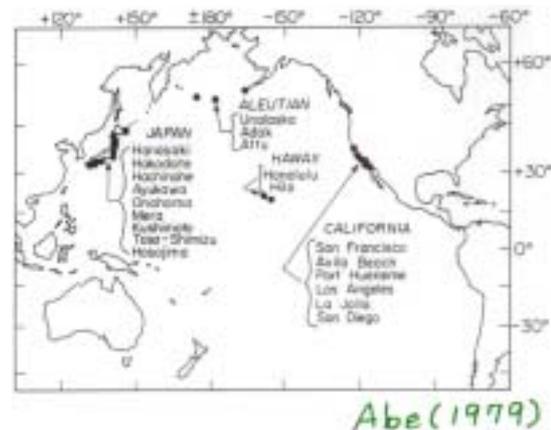


Fig 2

アメリカにいたときに考えついたのが、世界で大津波を起こす地震はたくさんあり、その規模を決められないかということです。津波の波形記録は検潮記録にありますが、その検潮記録は 1600 年ごろからヨーロッパにあります。その記録を使えないかと考えました。Fig 2 は、環太平洋で 1800 年代ごろから記録が使える地点を探し出したものです。主にカリフォルニアや日本になります。ハワイやアリューシャンはかなり歴史が

新しくなります。ハワイも北海道と同じように書く言葉を持たない民族が住んでいたために、文献としてはあまり残っておりません。

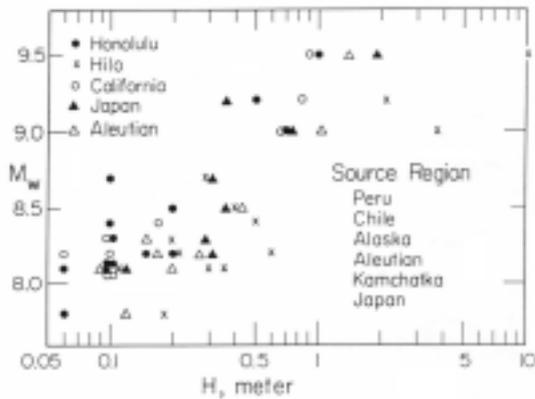


Fig 3

Fig 3は得られた津波の高さをプロットしたものです。当時、金森先生が提案したモーメントマグニチュードを取ってきます。そして津波の検潮記録上の最大振幅を取って、その両者を比べてみますと、規模が大きければ津波の高さも高くなっていることがわかりました。全体に高さ地震の規模を比べてみると、地震の規模が大きければ津波の高さは高くなるということがわかり、地震の規模がわからないかということ次のステップとして考えました。

地震のマグニチュードと同じように、最大振幅をもとにその対数を取ります。常用対数を取り、あとは+Bという補正項を加えればよいということがわかりました。この補正項としては、最初この太平洋の地震の場合には距離の関数として振幅の補正をします。遠くへ行けば減衰するとか、幾何学的にどんどん広がっていくためには振幅が減衰していくという距離が入りま

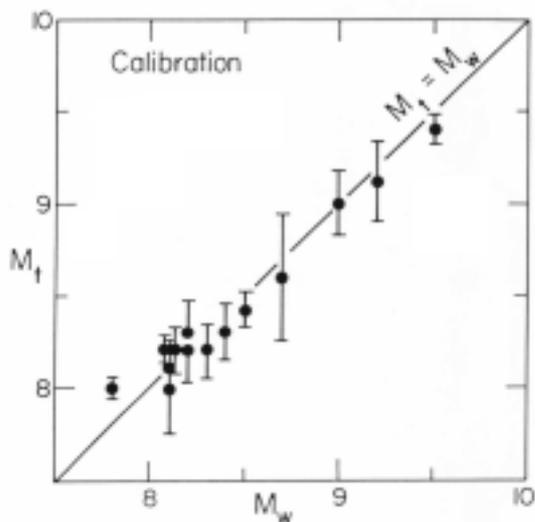


Fig 4

すが、太平洋全体を見てみると津波の場合にはどうやって減衰するかは、当時、私にはよくわからなかったのです。日本に行くともた収れんしてくるということもわからなかったので、Bとしては地震が起きた場所と観測点のペアで与えて、そのペアに対して補正をしました。例えば南米で起きた津波に対して日本で観測した場合にはBはいくつ使うかと決めます。

そして、モーメントマグニチュードがわかっていますから、それと津波マグニチュードを比較してみました。そうすると、Fig 4のようによく合います。地震や津波の規模の大きさにご注意ください。ここではマグニチュード8以上の大きな地震、もしくは大きな津波を起こした地震が対象になっています。±0.1ぐらいの精度で津波の高さから超巨大地震の規模が推定できることがわかりました。

その超巨大地震の規模は、地震の波からは非常に周期の長い波で、周期が数百秒といった波から規模が推定されますが、津波の場合は周期がこのように大きな地震の場合には20分から1時間ぐらいになります。非常に周期の長い波を取り扱っているということで、津波の高さは超巨大地震の規模を表すには非常にいいデータを提供してくれるということがわかりました。

この方法をいろいろな観測データにあてはめて、津波の規模を決めてみました (Fig 5)。そうするとマグニチュード9以上の超巨大地震は過去にも起きていたことがわかります。一番古いのが1820年ぐらいから環

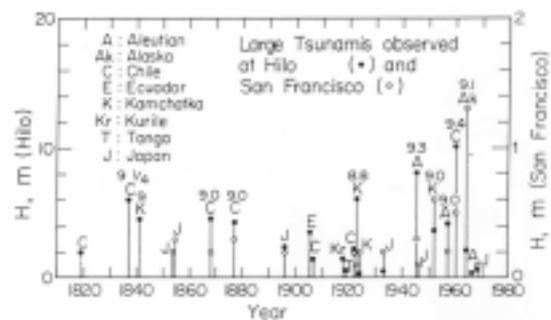


Fig 5

南米の大地震と Hawaii, 日本への津波 (津波高: 1994)			
地震名	年	Hawaii	日本
Lima (ペルー)	1586	?	津波あり
Callao (ペルー)	1687	?	津波あり
Concepción (チリ)	1730	?	津波あり
Concepción (チリ)	1791	?	津波あり
Concepción (チリ)	1822	津波あり	?
Valdivia (チリ)	1837	津波大被害	津波あり
Arica (ペルー・チリ)	1868	津波大被害	大津波
Iquique (ペルー・チリ)	1877	津波大被害	大津波 (死者多し)
Valparaiso (チリ) Mw 8.2	1906	津波あり	小津波
Atakama (チリ) Mw 8.5	1922	津波あり	津波あり
チリ西部 Mw 8.5	1950	津波大被害	津波大被害 (死者 119 行方不明 30)

Table 1

ます。このような研究がしばらく続きました。これからまた5年くらいたっているいろいろなことがわかってきました。

次に、日本付近の津波を見ていて不思議な現象に気がつきました。Fig 8では横軸に地震のマグニチュード、縦軸に津波のマグニチュードを取ります。多くの津波で両者を比較すると、これは最初の定義からわかるように両者は1対1に対応します。その値が同じになるように設定してあります。ところが日本海に発生した津波だけを取り出すと(点線上)、全体にバイアスがかかって日本海の津波の方が津波は地震の規模に比べて高く出ていることがわかりました。日本海の津波は不思議だという気がしました。

これをはるか昔にドクター論文で扱った方法で

$$S_0 = \text{波源域の面積}$$

$$H_0 = \text{平均海面変動量}$$

$$V_0 = H_0 \cdot S_0 = \frac{M_0}{\mu} \sin \delta \cdot \sin \lambda$$

$$D_0 = \text{計算平均変動量} = \left(\frac{1}{S_0} \iint D^2 dS \right)^{1/2}$$

* $M_0 = \mu DS$
 $V_0 = (D \sin \delta \cdot \sin \lambda) S$

Table 2

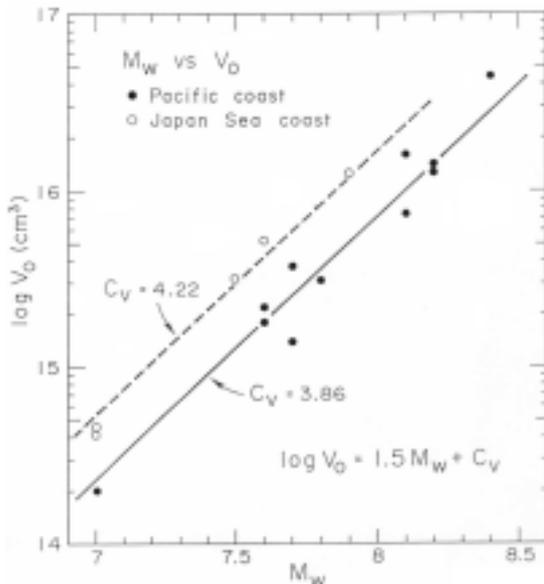


Fig 9

Table 2のように検証してみました。グリーンの法則で求められる津波の高さとか、波源域の面積をかけると海水変動の体積が出ます。今度は地震を想定してそれに基づく地殻変動も計算できます。その場合にはD0の地殻変動の量を積分すると、海底の変動の体積が出ます。V0とD0を比べてみるわけです。ですから、津波で実際にどれだけ海水が変動したかを津波の観測から決め、一方で地震の断層モデルから期待される海底の変動の体積を比べます。

それを比較してみたのがFig 9です。黒い丸で示したものが太平洋側の変動体積とマグニチュードの関係になります。これがこの実線で表される関係になっていますが、日本海側を見てみますと大きく出ています。つまり、実際の日本海側で起こる津波は変動の体積がマグニチュードに比べて大きいことがわかります。

もう少し実際に即したのを見てみますと、Fig 10にありますのは1964年の新潟地震と1978年の宮城県沖地震です。両者ともに地震のマグニチュードを示すモーメントマグニチュードは7.6で同じです。高さや距離では新潟地震は宮城県沖地震よりも同じ距離において、高く出ています。ですから、同じ地震のマグニチュードでも日本海側の津波の方が高く出るということになります。この昔に行った計算で実際にこれを検証してみますと、地震の規模が同じであっても津波のマグニ

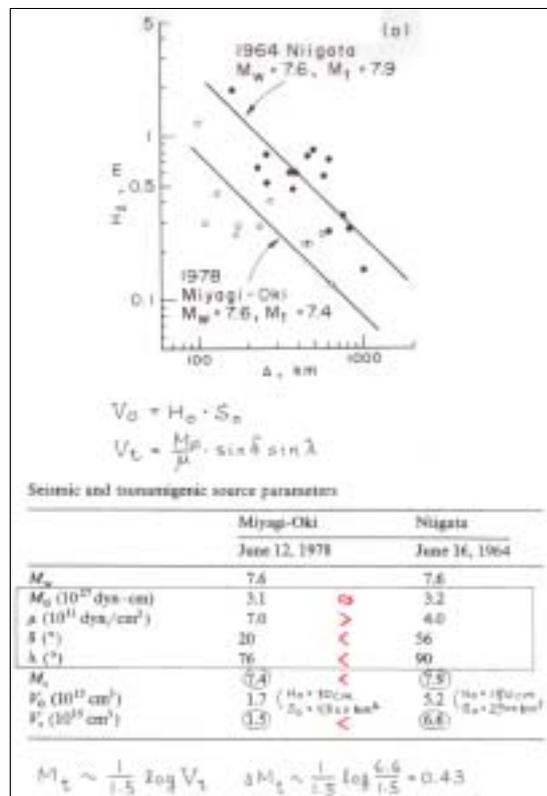


Fig 10

チュードは0.5の違いが出ることとなります。これを簡便法で計算しますと、津波の変動体積と地震から期待される体積の違いは簡単に出来ます。計算してみますと、0.43数式上違ってもいいと出てきます。先程は0.5の違いですから0.4はほぼ同じで、日本海側の津波は高いこととなります。

ここで計算を使っているいろいろ見てみますと、なぜ日本海の津波が大きかったかには3つほど要件があります。それは太平洋側でたくさん津波が発生するわけですが、大きな地震に限りますと、太平洋側の津波の場合はほとんどが低角の逆断層からということになります。低角というのは水平面に対しての断層の傾きの角度ですから、緩い角度でもぐっている断層面になります。津波の発生に寄与するのは海底の上下変動になりますから、緩い角度で傾斜している場合には、そこで大きく滑ったとしても上下成分は小さくなります。それが1点です。

日本海側に発生する地震の特長の1つは、断層の傾斜角が45度とか60度と非常に大きくなります。したがって、その上下変動も大きくなり、傾斜角の違いによる寄与、傾斜角が緩いか高いかという違い。2番目に地震の起こる深さを考えますと、日本海側の地震は比較的浅いところで起きています。太平洋側の場合はプレート境界のかなり深いところ、深さが20~60キロメートルぐらいの深さで変動が起きています。日本海側の方は浅いところで起きますから、上下変動も海底で大きくなるということがあります。

ほかにいろいろありますが、浅いところで剛性率が小さくなるから変動が大きくなります。日本海の場合は太平洋に比べてかなり細長いかたちをしています。そのために変動量自体も大きくなり、日本海側の津波は大きくなるということで、これは重要な結果だと思います。

同じマグニチュードに対して日本海側の津波は約2倍高くなります。厳密には平均で1.6倍高くなります。私が今まで扱ってきた津波のマグニチュードは高さの常用対数を取りますから対数を取ると問題がなくなってしまうですが、人間生活との絡みで考えますと津波の高さは実スケールで出てきます。1.6倍高いということは、例えば5メートルの津波が8メートルになるとか、2メートルの津波が3.2メートルになるという具合に、リニアなスケールで考えますと生活に大変影響があります。したがって、新潟地震の場合も日本海中部地震の場合も北海道南西沖地震の場合も、いずれも数メートルから10メートルを超す大津波になっています。太平洋で10メートルを超えるのはマグニチュード8クラスの地震でしかありませんが、マグニチュード7クラスの地震でも10メートルに達するという日本海側の

特徴は防災上、気を付けておかなければいけないことだと思います。

最近、この日本のマグニチュードに対して、ほかの方の研究も出てきました。その1つとして、その方のなさったのは太平洋側と日本海側、それぞれマグニチュードの算出方式を変えて、日本海側で決めても地震のマグニチュードと合うように作ったというものがあります。私の場合は日本海と太平洋は同じ式を使うために、このような差が出て来たのがわかりましたが、その人のような方式を取りますと、日本海では津波から決めたマグニチュードは地震のマグニチュードと合うように作っていますから、実際に津波が高いというのは出てきません。津波を予測するうえでは日本海は地震の規模よりも高いのだということをあらかじめ考慮しておかなければいけないと私は思います。

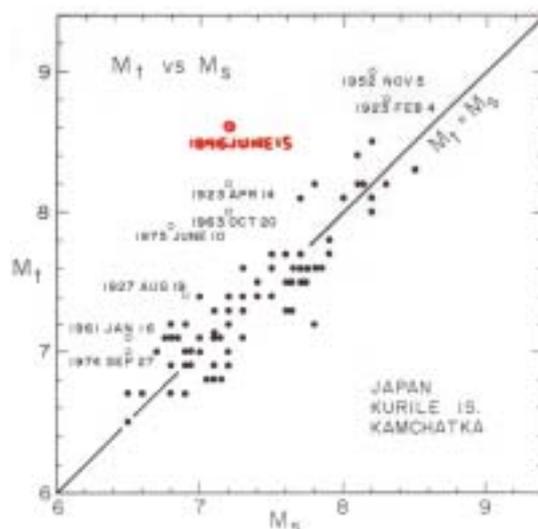


Fig 11

このような研究を通じて、津波地震と呼ばれるものを定量化することができました。日本の例を出しますとFig 11では横軸に地震のマグニチュードを取ります。厳密には表面波マグニチュードと呼ばれるものですが、通常、使われる地震のマグニチュードを横軸に取り、縦軸に津波のマグニチュードを取ります。マグニチュードを決めた原則からいえば、地震のマグニチュードと津波のマグニチュードは同じになるべきものですが、実際にはばらつきがあります。そのばらつきよりもはるかに大きいものを津波地震と定義したわけです。ですから、津波の規模を定量化したために地震の規模と比較することによって、どの地震がどの程度、津波地震らしいかということがわかりました。

その中でも特に顕著なのが、この白い丸で書いた津波地震があるわけです。この津波地震を調べているうちに、一番気になるのは明治の三陸地震津波（1896）です。ここにはプロットされていませんが、理由は横

軸の地震のマグニチュードがわからなかったのです。明治29年ですから、まだ日本も近代地震学が始まったばかりでデータがありません。しかし、何としてもこの地震の規模を決めたいということで、このために5年間くらい津波の研究がお休みになります。その間、1800年代の地震の規模が決められないかいろいろ調査しました。

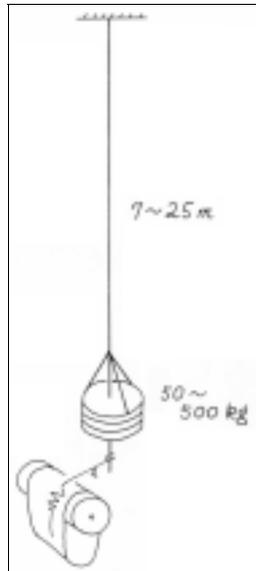


Fig 12

ヨーロッパには地震計がありました。当時は主にイタリア地震学とか、ロシア地震学、フランス地震学などで、論文を読むときにロシア語、フランス語、イタリア語で、イタリア語は私は習ったこともないのでかなり勉強しました。Fig 12はイタリアにある地震計の1例ですが、直径が8ミリぐらいのワイヤーで7~25メートルの長さ、これは場所によって違います。一番長いのは25メートルというのがあります。教会のタ

ワーの天井から地下室までワイヤーをぶら下げ、おもりを付けます。おもりがまた場所によって違いますが、一番重いのでは500キロあります。この鉄の輪をたくさんくっつけるわけです。そうしますと、本当の鉛直振り子ができます。その振り子の先に棒を付けて、梃子で書くという地震計です。

このような地震計がイタリアの各地にありました。当時はもっとほかのものもあります。パシュウィツの地震計とか、水平振り子を使った地震計がありますが、この場合は20センチぐらいの三角形のもので少し傾けるものです。ミラーが振り子についていて、その揺れ具合を光を当てて、そのミラーの反射で印画紙の上に焼き付けるという方法もありました。

1896年の明治三陸地震の記録も現在残っています。Fig 13はその記録です。ここに波があり、この周期が18秒ぐらいです。水平2成分があります。鉛直振り子の場合は水平2成分がどうして取れるのかというと、このように揺らしたときに直角に2本レバーを出しておきますと、水平の動きが書けます。これが1センチの長さです。2ミリぐらいの波がここに出ていることがおわかりになるとと思います。これは日付や時刻から見ましても明治の三陸地震の記録です。これはRocca di Papaというローマの近くで、長さが15メートル、重さが250キロのおもりを付けた鉛直振り子の下で取れた記録になります。これを使わない手はありません。このようなイタリア語やフランス語やいろいろな論文を駆使してキャリブレーションします(Fig 14)。明治時代の世界の地震計で一番致命的なのは時刻は比較的よく読み取れますが、倍率がわからないのです。これは科学の進歩と関係があると思いますが、当時は地震の記録を取ることに喜びを見いだしていたようです。地震がなくても遠くで起きた地震の記録が取れま

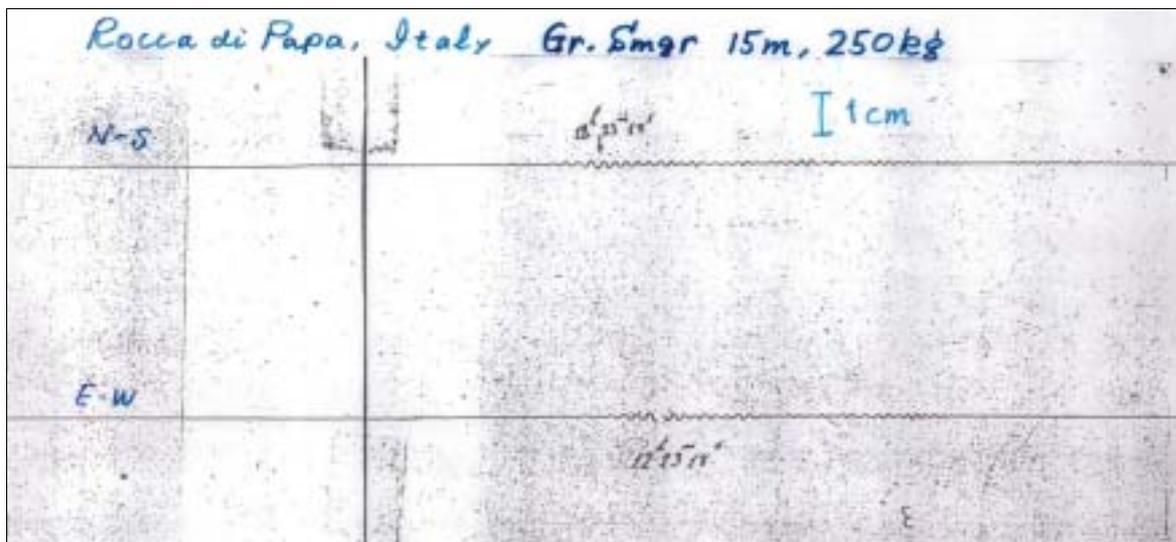


Fig 13

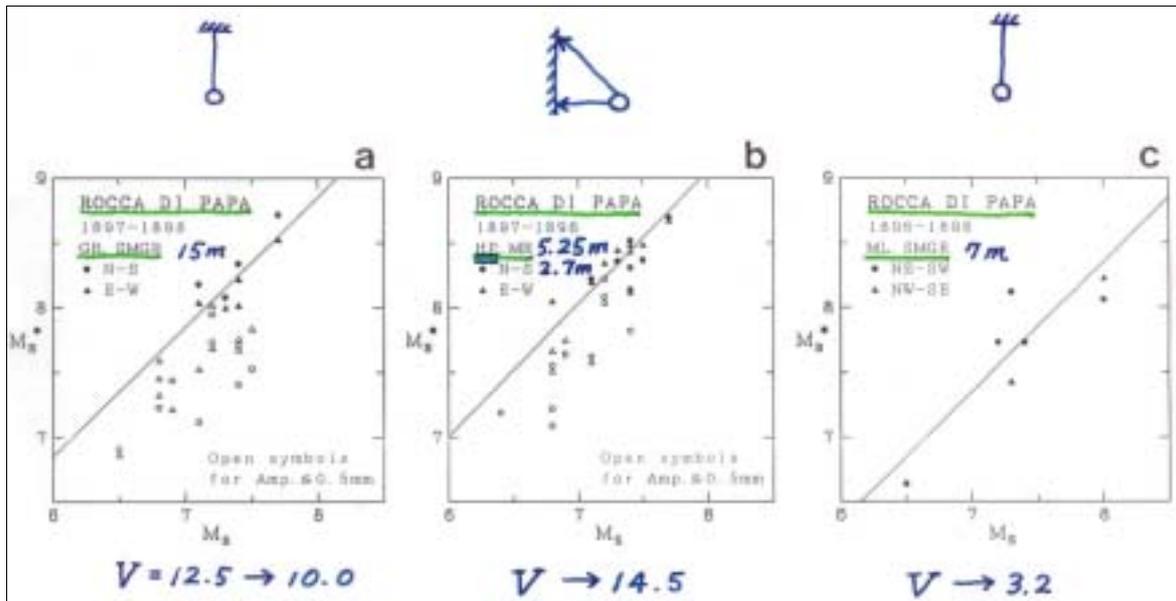


Fig 14

す。だから、時刻を押さえれば波がどれくらいの早さで伝わってきたかということがわかることに興味を見いだしたわけで、どれくらい揺れたかというところまで思いが至らなかったのです。そのために実際の地震計の倍率がわかりません。その倍率を作り出さないとはいけません。

それを作り出すにあたって、すでに倍率がわかっている地震の記録があって、わからない地震の記録を比べてみるという方法を取ったわけですが、これは普通の人にはできないでしょう。というのは、近代の地震計が出てきたのが大体1904年以降です。今、対象にしているのは1800年代ですから、両者のつながりがありません。近代地震計ができたころには古い地震計はすでに使われなくなっています。

唯一、その橋渡しをしたのがミルンの地震計です。ジョン・ミルンという人が日本に長年来て研究していましたが、イギリスに戻って当時の大英海軍を使い、世界中にミルンの地震計を展開しました。そのミルンの地震計が世界中で動いたのが1897年ごろから1913年ぐらいの間です。かろうじてイタリアの地震計とミルンの地震計が一時オーバーラップしたことがあります。ミルンの地震計については私は大変詳しく調べた経緯がありますから、その知識を使うと1800年代と1900年代をうまくつなげることができました。ですから、新しい見方をミルンの地震計を中継ぎとしてイタリアの、当時は近代的な地震計でしたが、今となっては超古典の地震計のキャリブレーションができました。

その一例がFig 14です。教会ごとによって地震計が違います。長さが15メートルのものもあれば、この場合は5メートルの長さのワイヤーを吊って、2.7メートル

でつかえ棒を置く水平振り子です。これは7メートルの長さの鉛直振り子とか、いろいろありますがそれぞれにキャリブレーションを行いました。倍率を調べてみますと、10倍とか、15倍とか、3倍とか、こういう倍率だったことがわかります。この長さ15メートルの場合は基本倍率はかろうじて計算できます。これは細かい設計図みたいなものがあり、長さがわかりますから、基本倍率は12.5倍ですが、フリクションの影響

TABLE 3
Magnitudes M_s of the Kasiki, Japan earthquake of 1908
10, 1908 (10-2227, 22-28, 1448). based on reported maximum
trace amplitudes of undamped seismographs through the
correction in Table 1

Station	Instr.	Comp.	Dist.	Δ_1	Period T_0^*	M_s
			(deg)	(km)	(s)	
Osaka	Ep. 48	N-S	70.0	18	8.18	7.04
Osaka	Ep. 48	E-W	70.0	20	8.00	7.18
Fuku	Magn. V		85.2	1	12-24	8.01 7.11
Kobe	Dr. Magn.	NE-SW	87.8	0.75	18	7.81 7.11
Kobe	Dr. Magn.	NE-SW	87.8	1.75	20	8.28 7.48
Rocca di Papa	Dr. Magn.	N-S	87.8	1	18	8.04 7.18
Rocca di Papa	Dr. Magn.	E-W	87.8	1	8.04 7.18	
Rocca di Papa	Ep. 48	N-S	87.8	0.3	18	7.00 6.88
Rocca di Papa	Ep. 48	E-W	87.8	1.05	18	8.00 7.92
Ischia	Ep. 48	N-S	88.1	4.3	15	8.07 7.72
Ischia	Ep. 48	E-W	88.1	1.15	15	8.10 7.18
Calcutta	Dr. Magn.	NE-SW	88.2	1.3	18	8.23 7.47

Average $T_0^* = 7.22 \pm 0.22$

Aftershocks
June 15, 19:16 M_s 7.0
15, 23:01 7.1
17, 03:43 7.0

Table 3

響などがあるのでしょうか，実際は10倍だということがわかりました。

このような方法で世界中の文献から集めてみますと，イタリアが主ですが1896年の三陸地震の記録が12例集まりました。Table 3のように計算できます。そして先程求めた倍率を元に地動に戻して，地動から現在決められるマグニチュードの決定方式を使って決めます。この右端が答えです。非常にばらつきが小さくて，この12か所の平均が 7.22 ± 0.22 です。標準偏差が0.2ということは大変よく決まっている方に入ります。表面波マグニチュード7.2だとわかります。周期を見ても18秒，15秒，16秒，18秒ですから，20秒前後ということでマグニチュードの決定の基準にもあてはまります。そして決められたマグニチュードが7.2になります。ついでに余震も7.0，7.1，7.0と結構大きく決まっています。しかし，これらは津波を伴っていません。

このような津波地震をまとめてみますと，ある不思議なことがわかりました。これに関しては私は答えを持っておりません。顕著な津波地震をあげてみますと，不思議なことに地震の規模は7.2，7.3，7.2，7.2，7.2という値になっています。どういうわけか7.3を超える津波地震はなさそうです。河田先生は精力的にパプア

ニューギニアで4年前の津波の高さを調べました。その津波の高さからマグニチュードを計算しますと8.3でした。ところが地震のマグニチュードは7.1です。これも7.3を超えていません。世界で有名な津波地震，アリューシャンの津波地震が入っていますが，30メートルを出すような津波地震でも地震の規模は7.3であったということです。これはなぜだかわかりません。

このように津波の観測記録からマグニチュードというものが決定できることがわかりましたが，防災の面からは実際に被害を与えるのは遡上した津波です。その遡上した津波を何とか予測できないかということに次は挑戦しました。

実際の津波高はFig 15のように大変大きなばらつきがあります。これは日本海中部地震のときの能代周辺で，ここでは一番高い津波が観測されたために，たくさんの方が行ってデータがたくさんあります。それを全部プロットしたのがこの図です。この中で一番低いのは上流の方で2.2メートルというところがあります。それから一番高いのは峰浜というところで13.75メートル。2～14メートルまでばらつきます。

気象庁がいくら津波予報で量的化を進めたとしても，このようにばらついたものを最初から予測するのは不可能です。これを一つ一つやるのは河田先生やそういう方に任せて，私はこういうものには目をつぶります。そして考え出したのは，20キロメートルの海岸線にわ

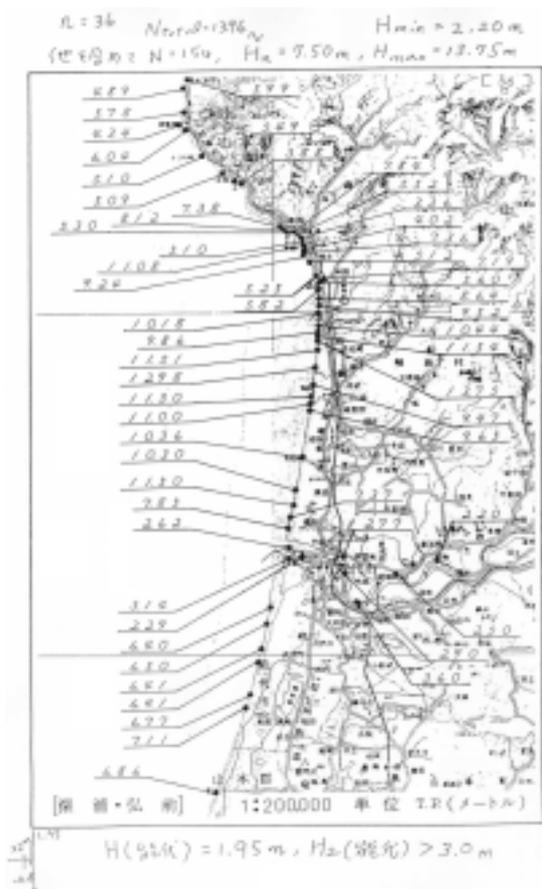


Fig 15

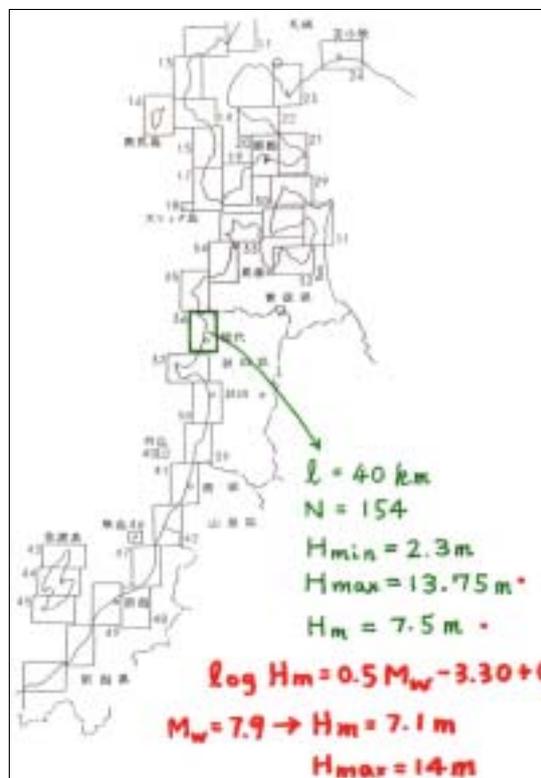


Fig 16

たって全部の平均値を取りますと7.5メートルになります。この平均高を予測できないかというわけです。

この地域で平均してもあまり役には立ちませんが、Fig 16でたくさんのデータを並べてみますと、先程お見せしたのは太枠の範囲のみです。ところがこのように日本海側でたくさん観測されています。このそれぞれの平均値を予測できないかと考えました。津波の高さを与えてマグニチュードを計算しましたから、逆にマグニチュードを与えると高さが予測されてもいいという発想になりました。

答えを先に言いますと、日本海中部地震の場合にはモーメントマグニチュードは7.9でした。この予測式は津波の高さからマグニチュードを予測する式ですが、7.9を与えると平均の高さは、7.1メートルと出てきます。そうすると先程の能代のところで計算したものでは平均値は7.5メートルでした。私が与えた式では7.1メートルですから、ほとんど同じです。それから最大高はここでは実測高13.75メートルでした。私の予測式を使いますと14メートルというのが出てきます。この式自体は日本海中部地震に限ったものではなく、太平洋側でも使えるようになっています。

先程の式は津波の高さにはある程度の上限があるだろうということを考えたわけです。それは地震の相似

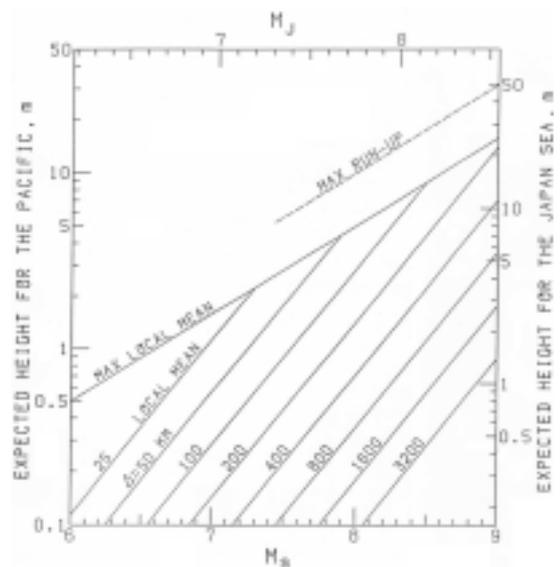


Fig 17

則と呼ばれるものからある程度変位の体積が決まるだろうと想定して、あるところで地震の相似則から期待される最大高をまず出したのです。その範囲内で、あるいは距離とともに津波が減衰するというものを組み合わせてあります (Fig 17)。

そのような距離による減衰があるわけですから、Fig

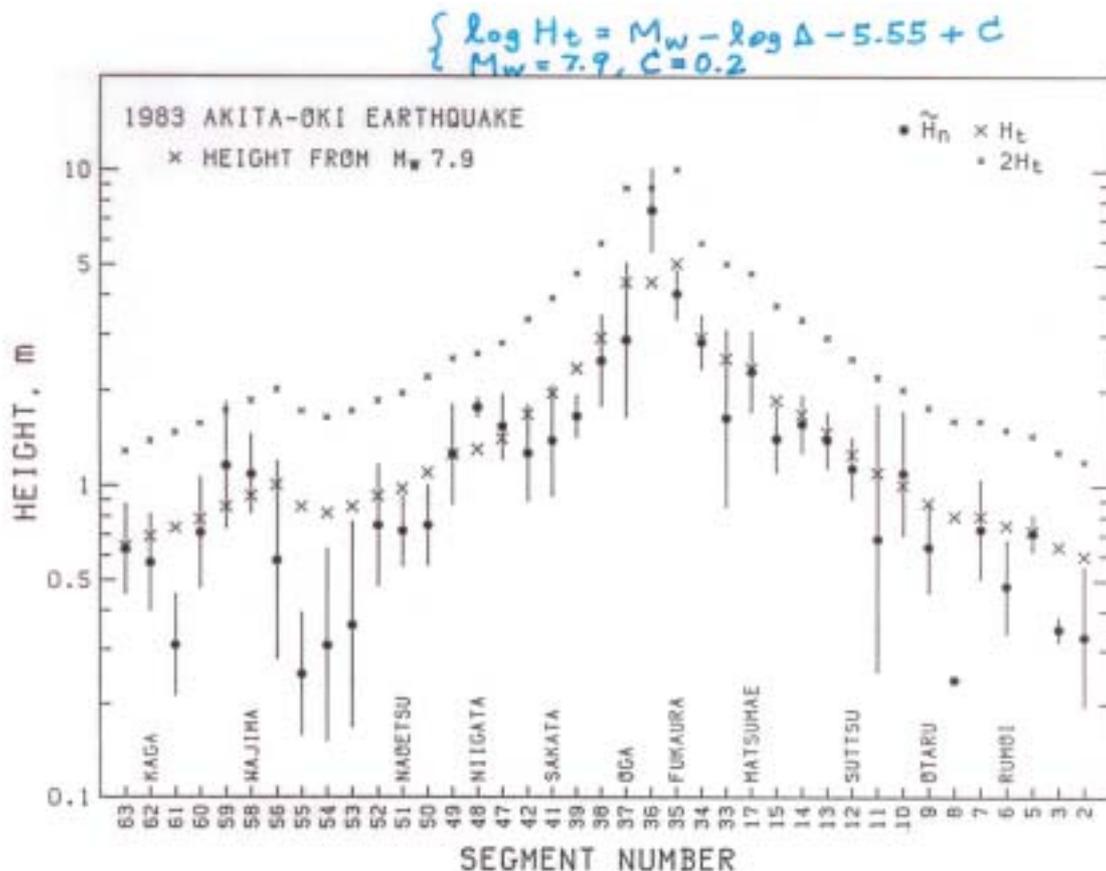


Fig 18

18でどれくらい合うかを見てみます。1つの区域で20キロメートルずつ海岸を区切り、横に並べます。この辺は北海道の留萌です。秋田を越えて、青森、新潟、輪島まで来ます。黒丸が実測の高さです。一番高いところで7.5と出てきます。ここに大きな「x」で書いてありますが、これが私の式から予測される津波の高さです。ですから、遡上高を使ったとしても津波の高さが予測できます。その場合は津波の高さとして遡上高の平均値を持ってくるとこのように合います。

詳しい津波の統計的処理を考えますと、20キロでくくった中の平均値には大きな意味があります。対数正規分布をして津波の高さはばらつきますが、その平均値は全体の高さのよい指標であるという研究もあります。

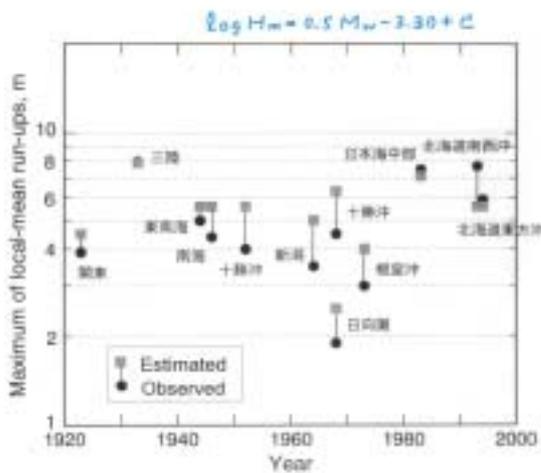


Fig 19

Fig 19は過去の日本の大津波がどの程度合うかを見たものです。関東地震から始まり、日本海中部地震はよくあった例です。北海道南西沖地震はこの程度になります。実際の平均は8メートルに対して予測は6メートルです。この程度には合います。小さくなると合わなくなりますが、私の計算はあまり細かいことを考えておらず、大きければ合うようになっています。ここでは全部の津波は高さが最大4メートルを超えたものを選んでみます。南海地震、東南海地震もこの程度は予測できるということです。津波のマグニチュードを決めるには津波の高さを使いました。それを逆に使うとマグニチュードから津波の高さが予測できるので。

それからまただいぶ時間がたち、数年前の話になります。これまで、考え出したのは津波マグニチュードを決めるのはあくまでもサイエンスのうえですから、計器で観測された高さを用いることにこだわりました。ところが、それにこだわっていると、江戸時代に起きた津波はマグニチュードが決まらないことになりま

す。そのマグニチュードも決めたい。その根拠はマグニチュードを与えると津波の平均の高さが予測できること、逆をいえば平均の高さがわかればマグニチュードが予測できるだろうということを考えます。

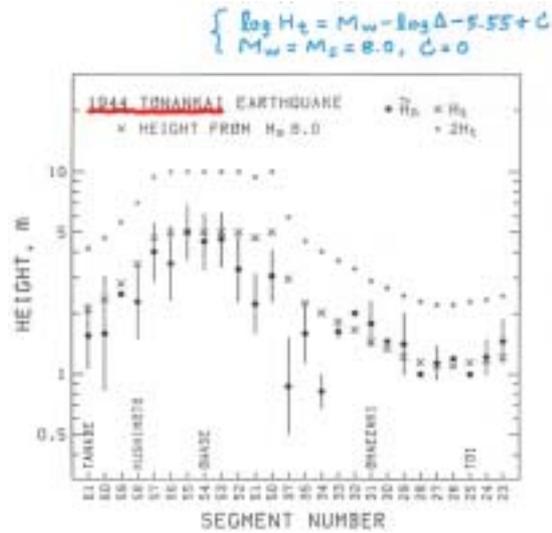


Fig 20

Fig 20は古い地震ではありませんが、1944年の東南海地震です。太平洋側では海岸を40キロメートルごとに区切り、それに沿って観測値の平均を取ります。それがプロットしてあります。実際に予測式と比べますとこのようにある程度ばらつきはありますが、合わせることができます。特に高かったところで計算式と実測の高さがよく合います。ですから、逆にこの実測の高さから地震の規模を決めてみようと考え、その式を作りました。

なぜ古い津波にこだわったかということ、地震のマグニチュードは原則として地震計で得られた最大地動振幅から決めます。ところが、古い地震の場合はマグニチュードを決めるデータがありません。地震計が江戸時代にはありません。それでもなぜか地震のマグニチュードが決まっています。これは震動分布とか、津波の広がりから見たマグニチュードだと思いますが、あまり厳密ではないと思います。ですから、昔の地震のマグニチュードはそれほどあてにならないと思います。その理由をいろいろ調べましたが、元地震研究所の河角先生がお決めになった地震のマグニチュードが基本になっています。

最大のわからないことは、河角先生がどのようにして安政の東海地震とか南海地震のマグニチュードを決めたかです。何となく宇佐美先生のカatalogなどを見るとマグニチュードの値が書いてあります。ところが、どうやって決めたかというもとの材料は一切残っていないのです。紙にさらさらと書いて、例えば8.4と決まったら8.4という値はノートに残っていますが、計算式

を書いた紙を丸めて捨てたらしいのです。ですから、ほとんど残っておらず、安政の東海地震や東南海地震のマグニチュードは何だろうかというのはいまだにわかりません。

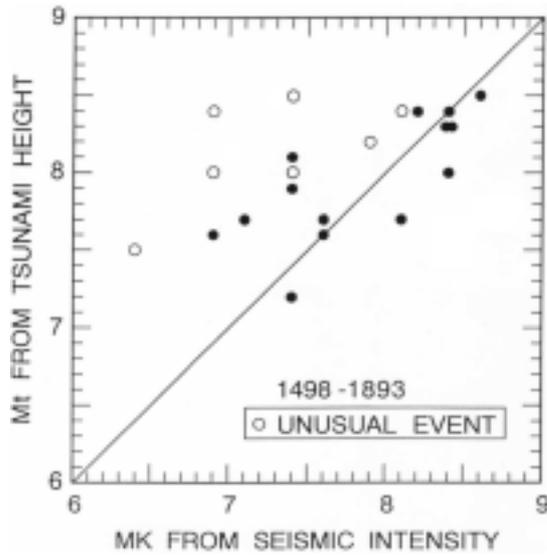


Fig 21

Fig 21は、津波のマグニチュードを使えば津波の高さはある程度の意味があるわけですから、それをもとにして津波のマグニチュードを決めれば、地震のマグニチュードとは違った情報が得られるのだろうというのがそもそものねらいでした。最終的に河角先生の決められたマグニチュードと津波のマグニチュードを比べてみると、何となく合っています。地震の規模が大きければ津波の高さも高くなっているということがわかります。

しかし、この白い丸で書いたものはどう見ても異常な地震です。ですから、それを区別しなければ全体がだんご状になっていますから、これが合っているか合っていないかを見るのは問題があると思います。その異常と思われる地震を除いてみますと、何となくこの程度には合うということです。縦軸 (Mt FROM TSUNAMI HEIGHT) は理由づけの根拠を相当持っています。ところが地震のマグニチュードの方はどうして決まったかわかりません。その違いが何を意味するということも、津波の方はわかりますが、地震の方は全くわかりません。これが今の地震学の現状かと思えます。そのようにして江戸時代の津波までさかのぼって、実際は1498年までさかのぼれました。それ以前は津波のデータもほとんど信頼に足るのではありませんでした。

例えば東海、南海、東南海地震を見てみますと (Table 4), 1498年の明応の東海地震以降から決まっています。明応の地震は非常に大きかったとか、宝永の地震、安政の地震は規模が大きかったと言われていますが、津

波のマグニチュードを決めると昭和の地震よりも江戸時代の東海・南海地震の方が規模が大きいことがこの津波マグニチュードからおわかりになると思います。

東海・南海	
1498年9月20日明応東海	8.5
1605年2月3日慶長地震	8.2*
1707年10月28日宝永地震	8.4
1854年12月23日安政東海地震	8.3
1854年12月24日安政南海地震	8.3
1944年東南海	8.1
1946年南海	8.1
日向灘	
1662年10月31日日向灘地震	7.7
1769年8月29日日向灘地震	7.2
1941年日向灘	7.6
1961年日向灘	7.5
1968年日向灘	7.7
日本海	
1804年7月10日象潟地震	7.7
1833年12月7日山形沖地震	8.1
1964年新潟	7.9
1983年秋田沖	8.1
1993年奥尻	8.1

Table 4

1605年の慶長の地震では8.2ですが、これは津波の高さから非常によく決まります。しかし、この地震の地震動による被害を考えると、ほとんど合いません。一番大きく揺れるところで最大震度4程度であったということが推定されています。当時の建物やいろいろな状況から見て、震度5はないということが実証されています。震度4にもかかわらず、津波のマグニチュードが8.2である。そうするとこの地震のマグニチュードが8にながしというのはどうして決まったかわからなくなります。たぶん、津波の広がりが広いからほかのものと類推すると、8程度だろうということでしょう。

最大の震度が4であった地震がなぜ地震の規模では8クラスなるのか私にはよくわかりませんが、津波を見れば8クラスです。おそらく非常に規模の大きかった津波地震ではないかと思えます。ですから、類推しますと地震の規模は最大7.3程度ではなかったか、これははっきりしませんが、ほかの状況から見ると7クラスならば震度4くらいでちょうどいいのではないかと思います。

400年ぐらいにわたって津波の規模を決めることができましたから、長い期間を取ればそれだけおかしな津波もたくさん出てきます。特異な津波としては、1596年の別府湾の地震で、瓜生島が沈んだとか沈まなかったとかいう地震です。これもきちんと津波の高さは残っています。かなりの確度で津波の高さがわかります。これでは8.0相当というのがわかります。

1741年の渡島半島沖の津波も大変不思議な津波で、北海道の渡島半島の西側で100キロメートルぐらいの範囲で最大10メートルを超す津波がきました。ところが古い記録には地震の地の字が出ていません。唯一出ているのは対岸にある渡島大島という島がありますが、その島が噴火しているようだということしか古文書には残っていません。しかし、津軽沿岸まで大津波が襲った地震です。これは津波マグニチュードでは8.4で大変大きな地震です。

1771年、八重山で津波が発生しました。石垣島に大きな被害が出たわけですが、最大が30メートルぐらいの津波があっただろうと言われていています。その石垣島の津波の高さの平均値を求めてマグニチュードに変換すると8.5相当になります。この地震はおそらく河田先生たちがお調べになったパプアニューギニアの津波と非常によく似ていると思います。パプアニューギニアの場合は40キロメートルの長さにわたって最大15メートルの津波がきました。最大がアロップ村で15.0メートル、平均の高さが6.8メートルになります。その津波からマグニチュードを計算しますと、津波マグニチュードは8.3になります。地震の規模が7.1に比べて8.3だったわけです。この八重山津波の場合も最大30メートルで平均の高さが8.6メートルになります。しかし、津波の指向性は非常に強く、パプアニューギニアの津波と非常に似ていると思います。それから遠くへいくと、津波があまり大きく記録されておらず、非常に局地的な津波だったという点も類似していると思います。

したがって、八重山のこの津波の8.5とパプアニューギニアの津波の8.3はほぼ同じようなメカニズムで起きたのではないかと考えていますが、論文にはそのように書いてありません。論文には発生機構についてはパプアニューギニアの津波と八重山津波との関連性が注目されるとしか書いてありません。

1792年、島原湾津波は前山が倒壊して有明海に流れ込んで対岸で津波が起きた地震ですが、高さの資料が100以上あります。平均の高さから津波のマグニチュードを計算してみますと、7.5と決まります。

そのようにして長い間、津波の話ばかりをしてきましたが、津波のマグニチュードを決めるという研究がどんどん進み、津波の高さからマグニチュードを決め、次に地震のマグニチュードから津波の高さを予測する

という研究に進みました。その後は津波の高さから歴史地震のマグニチュードを求めてみるということまで現在は来たというお話をさせていただきました。

質疑応答

河田 今のお話を聞いていると、大きな流れがよく理解できたと思います。ご質問があればお聞きしたいと思います。

高橋 津波地震のM_sに上限があるというお話でしたが、M_sで使う20秒程度の短周期の地震波に乗るエネルギーに限界があるためと考えられるのでしょうか。

阿部 先程も申しましたように私は考えていません。アリューシャンの津波も7.3とか、明治三陸も7.2、パプアニューギニアも7.1とか、並べてみると上限がありそうですが、メカニズムはそれぞれに違うようにも見えるのです。ですから、メカニズムが違ってても地震の波の周期20秒ぐらいで見ていると同じ規模で頭打ちになるというところが、私にはわかりません。

高橋 20秒程度の地震波の方に原因があるということでしょうか。

阿部 おそらく津波を非常に大きくするような海底の変動の時間定数があって、その時間定数を使うと地震の20秒の波が頭打ちになってしまいます。そういう意味で共通性があるのではないかという気がします。ですから、例えばそちらの研究が進んで、パプアニューギニアの海底地滑りが非常に濃厚ですが、その海底地滑りの時間定数がどの程度であったかがわかるとかなりこの分野で進歩すると思いますが、たぶんわからないでしょう。まして、1771年の八重山になるともっとすごいと思いますが、やはり時間定数はわかりません。明治の三陸津波はかろうじて時間定数がわかっていますが、それでいくと1分～2分程度のゆっくりした動きだとそのようになるということだけがわかっているぐらいです。

河田 研究の内容についての直接の質問ではありませんが、そうして4～5年に1つずつ新しいアイデアでまとめて成果を上げておられますが、4～5年の間は何をしておられるのでしょうか。ある日突然その解析のアイデアが出てくるのではないと思いますが、次にこういうことをしようと考えておられるのか、例えばほかの地震学のことをやっておられて、その合間に津波の知見を少しずつ蓄積されて新しいアイディ

アで解析されているのか、その辺を知りたいのです。

阿部 ある人が言っていたのですが、私の津波の論文は暇なときに出てくるようだ。普段は先程お示した論文以外に何倍も狭い意味での地震の波を使った研究論文をたくさん書いています。しかし、この津波の方は非常におもしろいのですが、いつも何か考えている状態で、次から次へとアイデアが出てくるというものではないのです。しばらく棚に上げておいて、ほかのことをやっていると、そういえばというのが出てくるというのが普段のもので、最初にお話したように「津波の研究も」やってきたという程度なのです。

河田 今、お話をお聞きしていると、地震の起こり方のメカニズムの裏づけがきちんと入っています。例えば、日本海側と太平洋側の津波の大きさを比較すると、日本海側の方が同じマグニチュードに対して津波が大きいと指摘されました。そういうのを見つけれられたときに、その差の原因が非常にクリアに出てきています。通常データ解析をそういう視点でやってみないと原因がわからないわけです。

阿部 津波は非常に学際的な分野で、海岸工学から見た津波もありますし、海洋学から見た津波もありますが、私の場合は地震学から見た津波の話ですから、河田さんのような方からご覧になるともの足りないかもしれません。私の場合は地震学から見た津波ですから、地震学がきちんとしていないと私の存在価値がなくなってしまうので、そのように見えたのかもかもしれません。

河田 私は今日初めて、先生の一連の津波の研究のレビューを聞かせていただいたのです。断片的には知っていましたが、それをお聞きして本当に感銘したのは、僕たちのように複素方程式を使って解析してわかった現象の解釈が非常に物理的にきちんとされていることです。その辺で、自然現象の解析は1つの現象の見方というか、それをきちんとやればできるのだということを私は聞かさせていただきました。

阿部 この場をお借りして、この機会を与えてくれました河田先生に大変感謝します。全部をまとめてレビューしたのはこれまでで初めてです。

寒川 別府湾の津波が特異ですけれども、あそこを活断層が。

阿部 東西走向の断層が卓越しています。

寒川 断層面が横ずれを伴って垂直というのは、日本海や太平洋の津波を起こすほかの地震と全く違うので、そういうことがかなり異常な津波の高さをもたらず要因になっているのでしょうか。

阿部 1596年ですので、わかりません。このときは別府湾内の奈田で最大8メートルの津波、それから別府湾全体での平均の高さが4.9メートルになるのです。ですから、津波自体は相当な規模で発生したと思われます。これが単純に現在わかる活断層を元にしても出てこないと思います。何が起きたのでしょうか。瓜生島がなくなってしまったといいますが、何が浅いところの地形が陥没したということから見ると、非常に特殊な海底地滑りとか、そういうものが現在見られないかと。

例えば1741年の渡島大島の津波の場合も、渡島大島が噴火したということしかわからないわけです。実際に渡島大島は無人島で、ヘリコプターで見に行ったことがあります。崖崩れのあとがあるのです。それを元にして津波の計算をされた方がいますが、絶対量が合いません。10メートルの高さの津波なんて出ないといいますが、最近、日本海沿岸の海底の非常に精密な調査の結果が出ますと、渡島大島の北の方向の海底に非常に大規模な高まりがあって、それが津波を起こしたのではないかといい、今村先生たちは現在計算を進めておられると思います。

精密ないろいろな調査などをすると新たにまたいろいろなことが合ってくるのだと私は理解していますが、別府湾の場合は全くわかりません。八重山群島の津波も。パプアニューギニアもあれだけ最近起きて、潜水艇も出て調査していますが、なかなか海の底というのがわからないのです。そこから解きほぐしていくしかないのです。

寒川 大きな海底地滑りが起こっていたりという可能性もあるわけですか。

阿部 ただ、浅いところで津波を励起するかというのはまた別の問題になりますが、わかりません。

J.Mori 防災のために阿部先生の経験式はよく合うとは思いますが。津波地震について言えば、例えば、ある地震が起きたときその地域でどの程度の津波が出るのか出ないのかということは、どのくらいまでわかるのでしょうか。

阿部 私の式の場合も依然として津波地震というのは予測のうえでは泣き所です。ですから、津波地震であるかどうかを別の方法で認定するよう努力して、それが津波地震と認定されたら予測に生かすと。地震予知と違って、津波の予測はある意味では考えやすいです。これは昔から私は言い続けていますが、起きてから考えればいいので、その点は起きてから考えるための観測データを増やせばいい、質を変えればいいのです。例えば、広帯域の地震計を駆使して、津波地震かどうかを認定すればいいのです。そのためには15や20分はかかるでしょうが、大津波が来ることを考えればその程度の時間は許されると思います。

ですから、総合的に判断するよう努力すればいいと思っています。気象庁が津波の量的予報を行うといっても、観測データそのものは昔のデータを使って考えているだけです。津波地震には全く対応できません。

J.Mori 例えば、今後ハザードマップがたくさん作られるでしょう。そうすると阿部先生の経験式を使って、この地域ではたぶんこれくらいの津波が出る可能性があるというような計算が出てくることになると思います。しかしその場合は、津波地震がどこでも起きる可能性があるのか、それともある地域だけで起きるということになるのでしょうか。

阿部 例外であっても、大災害を起こすものは無視してはいけませんが、今のところ私の式は無視しています。それでも、私の式は簡便式としていろいろな分野で使われています。原子力発電所の設計の最初の段階でも使われていますが、あくまでも簡便式であって、津波地震が起きた場合には役に立ちません。私のこの津波の式も地震研究所のホームページで現在公開しています。そこには津波地震には対応できない、それによって被害を被っても責任は取らないとか(笑)、いろいろなコメントが書いてあります。

最近になって10年以上前のものがどうして今ごろホームページに載ったかというのは、困難があり、私の場合は地震の起きた場所を同定する必要があったからなのです。日本海と太平洋をわけます。それをホームページ上で日本海と太平洋を区別する手法を開発するのに、すごく時間がかかったのです。以前のNECのノートパソコンですと、パレットで地図上で太平洋は水色、日本海は赤色とやって、そこにポイントを落とします。そのグリッドの色を判断して、太平洋が日本海か区別できて、それはすぐにできたのですが、今のパソコン上でPERL言語を使ってそれをやるのが困難だったために、10年ぐらいい時間がかかってしまったとい

うことが実情にあります。実際に何を思ったかといいますと、日本付近の地震の震源決定をしますと、その地名は自動的に出てきますので、その地名で判断することにしました。そのために一般公開は遅れたのです。直接、津波地震には私のは使えません。

寒川 南海地震や東海地震の津波の分析をされていて、1498年明応東海地震がすごく大きな津波を発生させたということを紹介していただきましたが、実は江戸時代から現在まで南海トラフで地震が起きた場合には東海系と南海系がいつもセットで発生していることがわかっています。しかし、明応のときだけは南海地震の記録が全くなくて、東海地震の記録しかありません。そのときにたまたま東海地震がすごく大きな規模で、そのときに南海地震があったかどうかはミステリーになっていますが、そのことについて何かありますか。

阿部 遺跡からわかりませんか。非常に高い津波が出ましたが、これは紀伊半島から房総半島の記録が残っているのです。最大が15メートル、平均で8.7メートルですからマグニチュード8.5に相当すると思いますが、紀伊半島から西のデータが皆無なのです。皆無というのは、あったけれども残っていないと私は思うのですが、ないものはわからないのです。ですから、あとは遺跡調査を待つしかない、私の見解はそれだけです。

寒川 実は私は遺跡の調査を専門にしまして、そのときの南海地震とか東海地震、東南海地震も含めてですが、遺跡で液状化現象の痕跡をずっと調べていたのです。明応の南海地震であつたらちょうどいい時期のものが四国にたくさん出てきています。おまけに江戸の安政とか明応の地震の痕跡に比べて、明応の南海地震らしい液状化の痕跡が特別多くあって規模が大きいのです。遺跡の液状化のことからいうと、そのときにすでにこれまで一番大きい明応の南海地震があつた方がつじつまが合うのです。ですから、先生の津波の研究にすごく興味を覚えて、たぶん私の方も明応の南海地震はやはりあつたのではないかという感じです。

阿部 遺跡の発掘調査は非常に重要で、津波の場合は江戸時代の前とあとでは津波の資料の質が全く違うのです。江戸時代の前の1498年というまだ応仁の乱のころで、ほとんど古文書が残っていません。江戸時代になってから資料が比較的残るようになってきたので、津波の場合は1600年以前、江戸時代の前は2例しかわかっていないのです。現在でもマグニチュード8

クラスの地震は10年に1回ぐらい起これば、400年間に40個くらい起きてもいいにもかかわらず、実際には10個くらいしかないのです。ですから、ほとんどの大きな津波をもたらしたものの資料が抜けているということで、手法を変えて今後は調べる必要があるのではないかと思います。

寒川 そのことについてですが、最近、遺跡の発掘調査で津波の堆積物が見つかるようになってきて、現在では静岡県の湖西市で何回分もの津波の痕跡が出て

います。それが資料を補完するようなものになると思いますが、これから遺跡でそういうものが見つければ役に立つと思います。

河田 それは都司先生も絡んでおられますね。

寒川 都司先生とか熊谷さんとか。

河田 それでは阿部先生、ありがとうございました（拍手）。