

津波速報の為の津波発生判断モデルの開発

水工学研究室 能登 兵衛
指導教官 細山田 得三

1. まえがき

津波発生の一の要因は海底で起きる地震である。そのため地球上で津波の起こりやすい場所は、地震活動の盛んな地域に一致することは当然であり、実際に過去に生じた津波の80%以上が我が国の太平洋岸から千島、アリューシャン列島、アラスカ、メキシコの太平洋岸、加えて南米のペルー、チリ沖にかけての環太平洋地震帯で起こっている。地震と津波の関係性については、これまで多くの学者・研究者が研究してきている。

その中で飯田は、海底で発生する地震により津波は必ずしも発生するわけではなく、津波の規模が地震のマグニチュード M と震央の深さ $D(\text{km})$ に依存することを明らかにし、図 1.1.を示している。

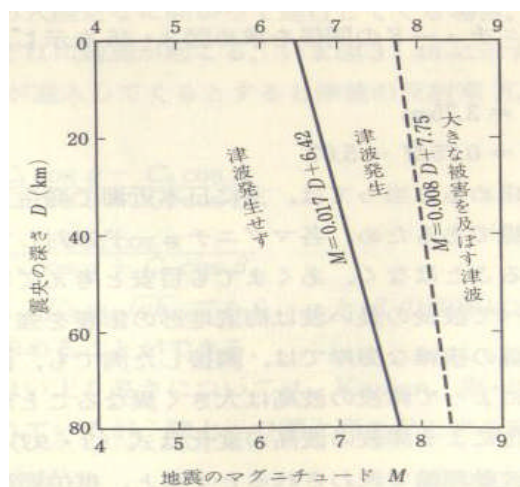


図 1.1. 津波の発生限界と規模 ¹⁾

$$M \geq 0.008D + 7.75 \quad (1)$$

$$0.008D + 7.75 > M \geq 0.17D + 6.42 \quad (2)$$

式(2)の範囲では、被害を及ぼす規模の津波となり、式(3)の範囲では津波は発生するが、その規模は小さく、また式(3)で示される範囲では津波が発生しないことを明らかにした。

$$M < 0.017D + 6.42 \quad (3)$$

また、図 1.1.から明らかなように、地震のマグニチュード M

が 6.4 以下では津波が発生しないことになる。

2. 研究の目的

先に挙げた津波の発生限界と規模 (図 1.1.) のグラフは今でも広く普及しており、この図から、一般的にマグニチュード 6.4 以下の地震において、津波は発生しないというのが定説になっている。しかしながら、気象庁 (気象業務支援センター) 発行の 2007 年度版 “地震年報” において、津波が発生した地震の震源深さとマグニチュードの関係をプロットすると、図 2.1.のようになった。

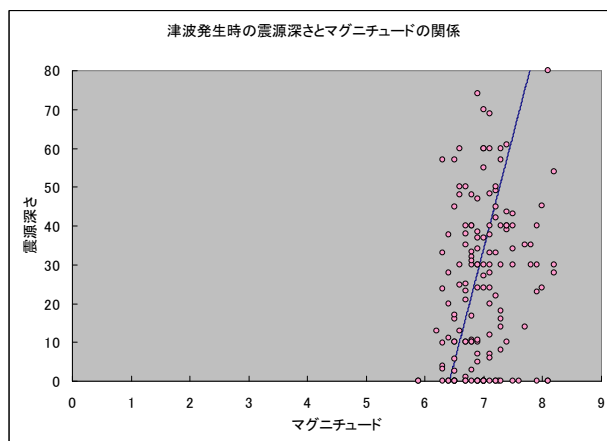


図 2.1.地震発生時の震源深さとマグニチュードの関係

青い線で示しているのが、津波発生の境界線とされていた $M = 0.017D + 6.42$ の線である。この図 2.1.から分かるように、図 1.1.において “津波発生せず” とされていた領域内において、多数、津波を伴った地震が発生しているのが見てとれる。

次にこれらを時系列に見ていくと、飯田らがこの関係図を発表した 1950 年代においては、図 2.2.のようにおおよそ津波発生時の地震の震源深さとマグニチュードの関係性を表しているといえるが、1960 年代～2000 年代にかけて、上記したように、従来 “津波発生せず” と思われていた領域内において多数地震活動が記録され、結果、図 2.1.のように分布するに至ったことが分かる。

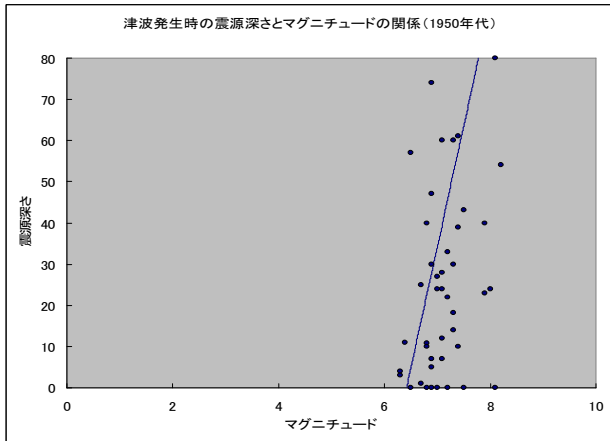


図 2.2. 1950 年代地震分布

そこで、本研究においては、津波を伴う地震の震源深さとマグニチュードの関係性をもう一度見直すと共に、新たに、地震の震源深さとマグニチュードから津波の発生を予測することが出来る判断モデルの作成を行った。

3. 統計的分析

地震年報に記載されている 1923 年～2007 年までの地震データの中からマグニチュード 5.5 以上のものを抜き出し、年ごとに日本周辺地形図にプロットし、その発生分布を図示した。(例：2007 年地震発生分布図を図 3.1.として記載)

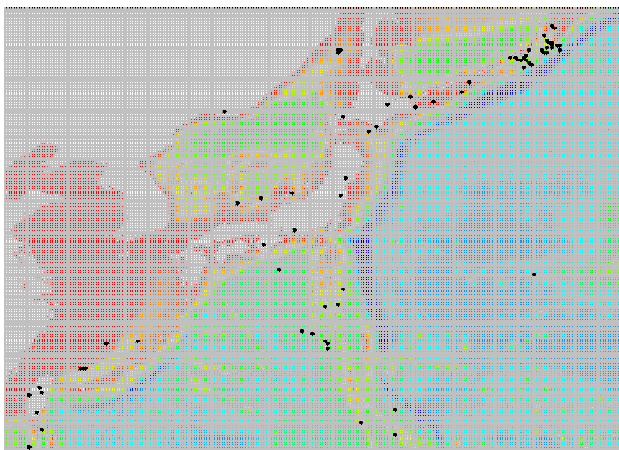


図 3.1. 2007 年地震発生分布図

次に、震源地が海底以外のもの（震源地が陸地のもの）や、地震が発生しても日本沿岸に津波は発生しないであろう地震（台湾以西など）の震源地を除去していく。加えて、地震年報による津波記録のデータは、同一震源地においてマグニチュードが最も大きい地震を、津波を伴った地震として記録し

ていると見受けられるため、同一震源地の地震についてはデータを1つだけ採用することとした。

上記を行った結果、日本周辺において津波を発生させる可能性のあるマグニチュード 5.5 以上の地震を 2776 個抽出した。このうち実際に津波を発生させた地震は 146 個である。これら 2776 個の地震についてその震源深さとマグニチュードの関係をプロットすると図 3.2.のようになる。図 3.2.の黄色点は実際に津波を発生させた地震をプロットしたものである。この図から地震の震源深さ 80km 以上になると津波は発生しないことがわかるため、縦軸の震源深さを 80km までとして、グラフ図 3.3.を作成した。

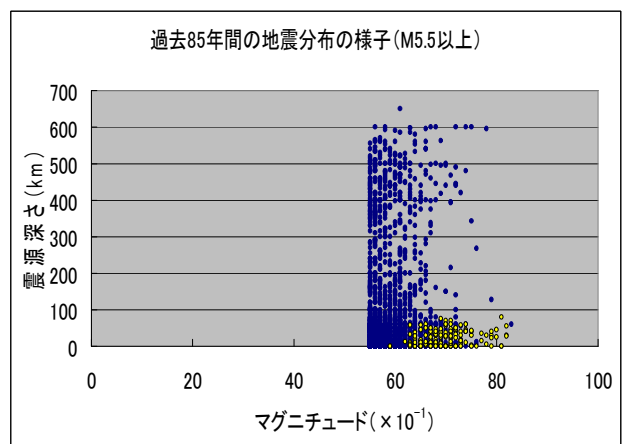


図 3.2. 過去 85 年間の地震分布の様子

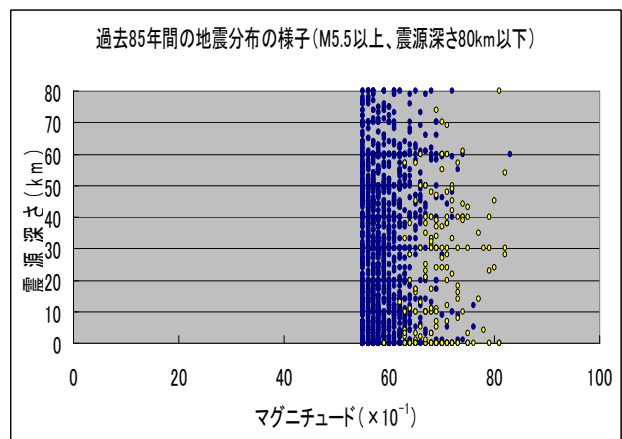


図 3.3. 過去 85 年間の地震分布の様子(震源深さ 80km 以下)

4. 津波発生判断モデル

現在までのデータを見ると、飯田の提案した津波を伴う地震の震源深さとマグニチュードの関係式： $M = 0.017D + 6.42$ には改善が必要であり、新しい関係式を提案する必要があると感じた。ここでは新しい津波発生判断モデルを提案し

ていく。

まず、実際に津波を伴った地震として記録されているものをプロットし、それらを X 軸方向に測った距離の 2 乗和を最小にするように最小二乗法を用いて X の Y に対する回帰直線を引いた。(図 4.1.)

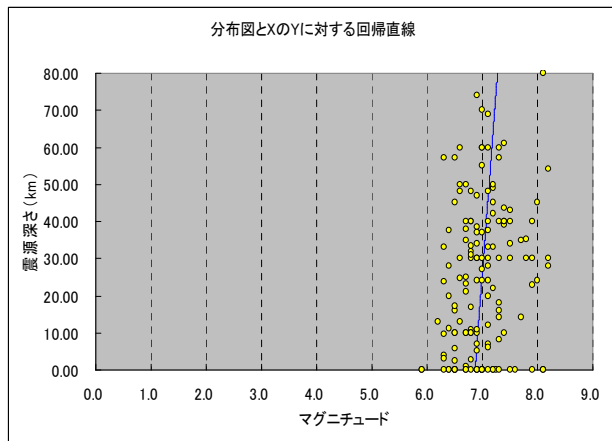


図 4.1. 分布図と X の Y に対する回帰直線

この図 4.3.1.を基に、新しい震源深さとマグニチュードの関係性を提案していく。まずこの X の Y に対する回帰直線のうち、傾きに関しては母集団の特性を現していると考えられることからその値を用い、これに実測値が平均などの値からどのくらい乖離しているかを 100 百分率で表したものを乖離率とした上で、その乖離率の考え方 (図 4.2.参照) を用いて切片を決定していった。

具体的には乖離率の式を

$$\text{乖離率} = \frac{\text{実測値} - \text{回帰直線 X 値}}{\text{回帰直線 X 値}} \times 100$$

とし、今回の 147 個の津波を伴った地震のうち最もマグニチュードの小さい M5.9 が、新しく提案する震源深さとマグニチュードの関係式から乖離率で考えて 5%外れているとしたときの関係式と 1%外れているとしたときの関係式をそれぞれ考えてみた。(図 4.3.)

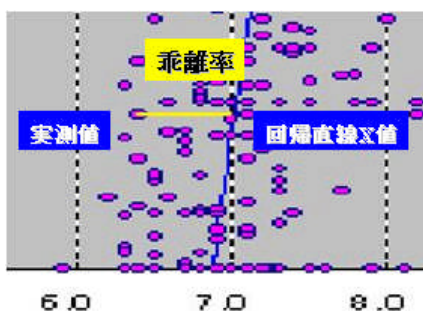


図 4.2. 乖離率の考え方

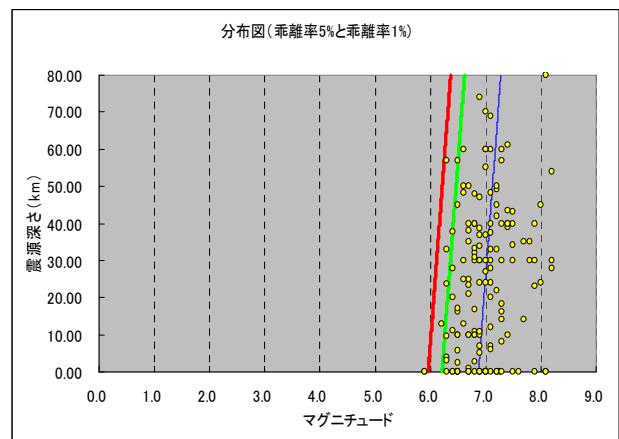


図 4.3. 乖離率 5%と 1%の関係式

図 4.3.の緑の線が乖離率 5%の関係式であり赤い線は乖離率 1%の関係式である。それぞれ震源深さを D (km)、マグニチュードを M としたとき乖離率 5%の関係式は (4.1)、乖離率 1%の関係式は (4.2) と表される。

$$M = 0.005092 D + 6.210526 \quad (4.1)$$

$$M = 0.005092 D + 5.959596 \quad (4.2)$$

飯田の関係式: $M = 0.017D + 6.42$ では津波を伴った地震のうち約 40%は“津波発生せず”と考えられていた領域内に分布している。しかしながら上記乖離率 5%、1%の関係式を用いると“津波発生せず”と考えることができる領域内で地震が発生したのはそれぞれ約 6%、約 1%と非常に低い水準になった。

次にこれら 2つの関係式の実用性・優位性について考えてみた。乖離率 1%の関係式を用いると地震分布のうち 1%だけが、“津波発生せず”と考えられる領域内で津波を伴う地震が発生したことになる。これは一見すると、非常に高い精度で津波を伴う地震の特性を表しているように思われるが、実際は関係式の切片を小さくしていけば、安全域内での津波を伴う地震発生の可能性も低くなっていくのは当然である。式

(4.2.) によると $M6$ ($\approx M5.959596$) 以下の地震では津波が発生しないことになるが、実際に過去 85 年間の津波発生の記録を見ると、この $M6$ を下回りながらも津波を発生させた地震は 2 回 (2006 年 1 月 1 日、1984 年 6 月 13 日、共に震源地は鳥島沖) だけである。この考え方を拡張すると、切片を 5 や 4 にすれば (つまり $M5$ や $M4$ 以下の地震については、津波は発生しない、という考え方をすれば) 図 4.3.にて、全ての地震を関係式の右側に分布させることができる。この場合“津波発生せず”の安全域内においての、津波を伴う地震

の発生確率は 0%である。しかしながらこの考え方をを用いると、津波発生判断モデルの開発という観点から見たとき、その実用性・有意性に疑問が生じてくる。上記の結果、モデルとして使用すべき震源深さとマグニチュードの関係式は乖離率 5%のものであると考えた。この場合、安全域内で津波を伴う地震が発生した割合は 5~6%ほどであり、高い精度で津波を伴う地震の特性を表すことができているといえる。

次に津波を伴った地震・伴わなかった地震の双方がプロットされているグラフ内に今回提案した式 (4.1.)、飯田の関係式： $M = 0.017D + 6.42$ を図示したものを図 4.4.とし、これらを考察していく。

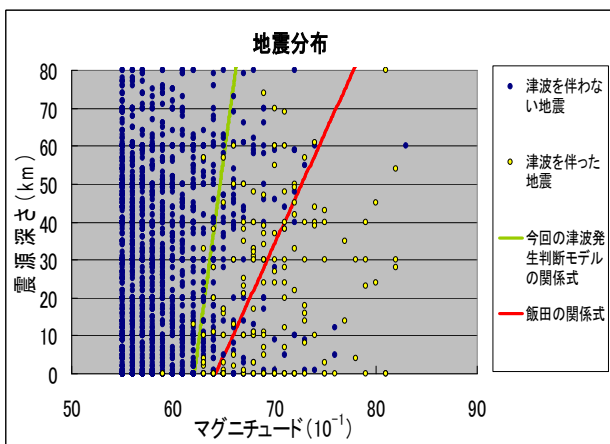


図 4.4. 地震分布と関係式の様子

図 4.4.を見ていくと津波を伴わない地震（青点）はそのほとんどが飯田の関係式の左側にプロットされており、非常に高い確率でその発生分布を表すことができているといえる。しかしながら何度も記してきたように、津波を伴った地震（黄色点）の発生分布については、その関係式の左右に分布してしまっておりこの飯田の関係式を、津波を伴った地震の発生判断基準、とするには少し精度が悪いのではないかと考える。これに対し、今回提案した式 (4.3.1.) はその右側（津波発生のおそれあり）の領域内に若干の青点があるものの、津波を伴った地震（黄色点）の発生分布についてはその大部分が関係式より右側の“津波発生のおそれあり”の領域内に分布しており、精度良く表すことができているといえる。

5. 結論と今後の課題

本研究においては、飯田が提唱し、世間一般に浸透している津波発生を伴う地震の震源深さとマグニチュードの関係

式： $M = 0.017 D + 6.42$ について、その有意性を確かめると共に、自ら津波発生判断モデルを作成しそれを提案した。今回提案した関係式は、過去 85 年間に発生した津波を伴う地震のうち最も小さいマグニチュード M5.9 を基準に乖離率の考え方をを用いるものであり、これら計算の結果から新しく

$$M = 0.0051 D + 6.21$$

を提案した。

今後の課題としては以下の点が挙げられる。

1. 今回の研究に関しては統計的・経験的にだけ地震データを扱っており、“なぜこのような結果が導き出せるのか？”といったような工学的なアプローチがなされていない。その点を考えることにより、より信頼度の高い津波発生判断モデルが構築できると考える。
2. 今回の研究では日本周辺で発生した地震のみを取り扱ったが、実際には東南アジア周辺や南米周辺を震源地とする地震により、日本沿岸部に津波が押し寄せることも多々ある。それらを考慮し、より包括的に地震と津波の関係を研究することが必要だと考える。
3. 今回の研究に関しては、海岸工学分野の研究であると同時に、地震工学分野の知識も必要であった。前者の知識に加えて、後者の知識は“特に”不足していたことが否めない。これら研究の基礎にあたる部分を強化することが必要であると考ええる。

謝辞

本研究の遂行にあたり終始一貫してご指導を受け賜った大飼直之助教授に心からの謝意を表します。また、有益な助言をいただいた細山田得三准教授には深く感謝の意を表します。終わりにあたり、様々な面でお世話になった水工学研究室の皆様には大変感謝しております。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 尾崎 晃 他：概説 海岸工学、森北出版
- 2) 田河 生長 他：確率統計、大日本図書
- 3) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 4) 地震年報：気象業務支援センター