

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20939

研究課題名（和文）地球内部のQ値はほんとうに振幅に依存しないのか？

研究課題名（英文）Does not seismic attenuation in the Earth really depend on amplitude??

研究代表者

中島 淳一（Nakajima, Junichi）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：30361067

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：地震波減衰の振幅依存は室内実験からは示唆されていたが、観測で振幅依存を調べた研究は存在しない。本研究では2003年宮城県沖地震の余震をデータとして減衰の振幅依存を検証した。得られた結果は明瞭な振幅依存を示しており、特に直達波で依存性が大きい。振幅依存性をモデル化したところ、減衰が振幅の0.1-0.2乗に依存すれば観測結果をうまく説明できることが明らかになった。これまでに行われていない新規性の高い研究である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波の減衰は波の振幅に影響を与えるため、強震動の数値シミュレーションなどにも重要なパラメータである。しかしながら、これまでの研究では減衰は振幅に因らず一様であると仮定されてきた。もし減衰に振幅依存がある場合、強震動を正しく評価するためには、振幅依存を考慮する必要がある。特に強震動は振幅が大きいため、減衰の非線形性の影響をより強く受けるからである。本研究の結果は、大地震の地震動予測の高精度化に資すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study investigates whether attenuation is actually independent of seismic-wave amplitudes by systematic analysis of a large number of spectral amplitudes of co-located earthquake pairs with different observed amplitudes. We analyzed M3-5 intraslab earthquakes that occurred after the 2003 Miyagi-oki earthquake (M7.1) in NE Japan. The obtained results suggest that amplitude-dependent attenuation is required to explain the observations, which contradicts a long-standing recognition that amplitude-dependent attenuation is negligible for the propagation of seismic waves. Our model calculation suggests that  $Q^{-1}$  is proportional to the seismic amplitude,  $A$ , with the power of 0.1-0.2. Our result highlights the need to revisit and potentially rethink current models of the physical mechanisms influencing intrinsic attenuation.

研究分野：地震学

キーワード：地震波減衰

## 1. 研究開始当初の背景

地球内部の岩石は弾性体として近似できることから、地震波伝播の定式化、地震の震源過程解析、地殻変動解析などは線形弾性論に基づきデータ処理・解析が行われている。一方で、地球内部は非弾性の性質も持ち合わせており、観測される地震波形は減衰の影響を受けていることもわかっている。また、減衰に強い周波数依存性があることも、粘弾性モデルによる理論的考察や岩石試料を用いた減衰測定、地震波の解析などからわかっており、地震波形の解析では減衰の周波数依存を考慮する場合が多い。

一方で減衰の振幅依存はよくわかっていない。固体惑星の非弾性変形に関する研究(惑星の内部減衰、潮汐加熱、地球月の軌道進化など)では、減衰の値は振幅に因らず一定であると仮定されてきた。室内実験では振幅が大きくなると地震波減衰は明瞭な振幅依存を示すことが古くから知られていたが、室内実験で示される振幅依存は地震波の振幅より十分小さな場合に観測されるものであり、実際の地震波の伝播では減衰は振幅に依存しないと考えられてきた。

## 2. 研究の目的

地球内部の減衰については地球の自由振動や地震波形の解析などから、そのおおよその値が推定されている。地震波の減衰をもたらす物理メカニズムは必ずしも明確ではないが、地震波の伝播に伴うミクロな変形(岩石中の結晶粒界すべり、結晶の格子欠陥に起因する転位の運動、部分熔融域の粘性変形によるエネルギー散逸など)がその主な原因と考えられている。これまでの岩石試料を用いた室内実験では、上部マントルを構成するかんらん岩などいくつかの岩石(鉱物)については減衰の周波数依存が精密に測定されており、その値を用い地震波形解析が行われ、地球内部の非弾性に関する理解が格段に進展してきた。しかしながら、これまでの研究では「地震波の減衰は振幅に依存せず一定である」という暗黙の仮定がある。減衰の主な原因が岩石(鉱物)の変形によるものであれば、変形の度合いは地震波形の振幅(入力となる歪み変化)に依存し、減衰(Q値)が振幅依存を示す可能性がある。

そこで本研究では地震波の観測データ解析により、地震波減衰が振幅に依存するかどうかを検証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

地震波形解析により減衰の振幅依存性の有無を検証する。地震の規模はマグニチュード(M)で表され、Mが2大きくなると地震のエネルギーは約1000倍になり、波の振幅は約32倍になる(振幅の2乗がエネルギーになるため)。つまり、Mがある程度異なる地震を対象とし、振幅の異なる地震波を解析することで減衰の振幅依存性を調査することが可能になる。

本研究で重要なポイントは減衰の空間変化と振幅依存との切り分けである。例えば、Mの異なる2つの地震を解析に用いる場合、その位置が大きく離れていると減衰の空間変化に起因する減衰の差が、見かけの振幅依存として現れると考えられる。そこで本研究では2003年に発生し東北地方の太平洋スラブ内で発生した宮城県沖地震(M7.2)の余震を用い

ることで、震源位置の近い地震を選択しつつ、地震の規模の差も担保するよう工夫する。

本研究では規模の異なる近接する地震のスペクトル比を計算し、その高周波側の傾きから減衰の振幅依存を検出するという新しい手法を提案した。なお地震のスペクトルは震源での破壊伝播過程を含むため、その影響を受けないようコーナー周波数よりも高周波(20–40 Hz)の傾きを評価した。波形のS/Nも考慮して解析を行った。ペアを取る地震の震源間距離は5km以内とした。解析の時間窓は1秒であり、P波到着を起点に0.5秒ずらしながら4つの時間窓を設定した。4つの時間窓を設定したのは、直達波とコーダ波の振幅依存性の違いを調べるためである。なお、この解析では規模の異なる地震ペアを解析するが、震源メカニズム解が異なる場合にはマグニチュードから期待される振幅が地震ペアで異なってしまうという問題がある。そこで本研究では、観測された地震波形に基づき振幅の違いを正確に評価することで、地震波の振幅依存を示すことを試みた。図1に解析に使った地震・観測点分布、Mの差が1の波形例、高周波側のスペクトルの傾きの例を示す。

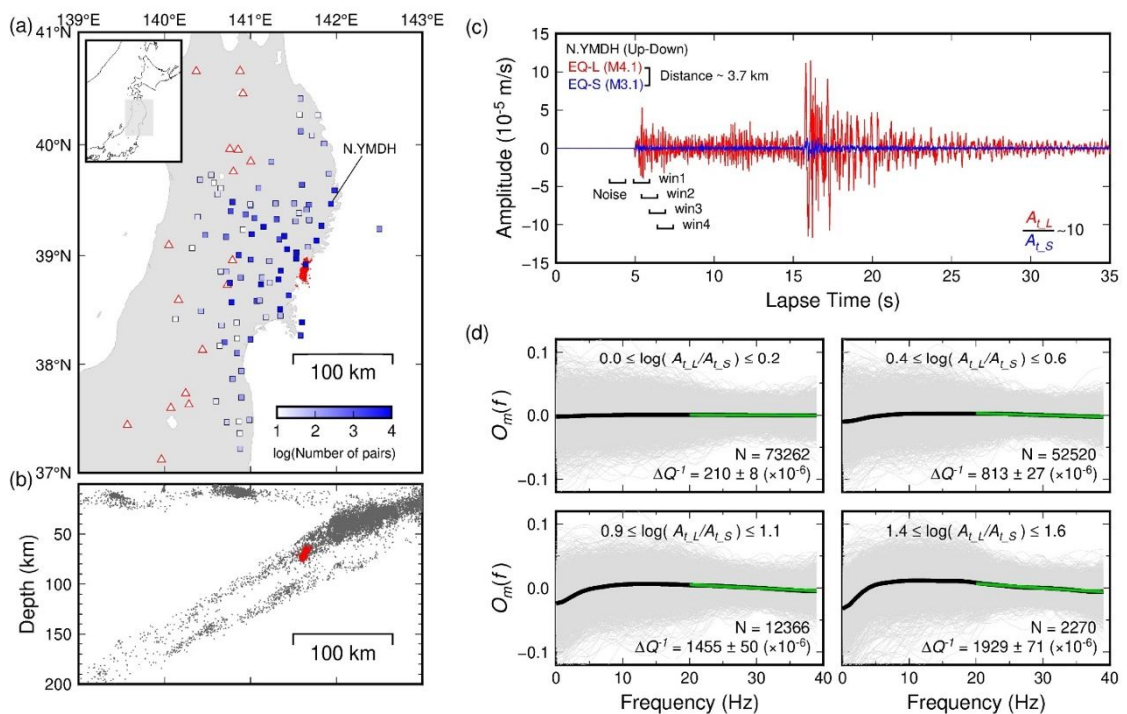


図1. (a) 解析に使った地震(赤点)・観測点分布(□:色は地震ペアの数). (b)鉛直断面図. (c) Mの差が1の波形例と設定した4つの時間窓. (d) 高周波側のスペクトルの傾きの例. 黒が観測平均, 緑は20-40 Hzのフィッティング結果. 4つのパネルは観測振幅比の対数がほぼ0-0.2, 0.4-0.6, 0.9-1.1, 1.4-1.6の範囲にあるペア同士の結果を示す.

#### 4. 研究成果

得られた結果から、振幅比が約30倍の範囲内で地震波減衰は明瞭な振幅依存を示すこと、コーダ波よりも直達波で依存性が大きいことが明らかになった。なお、ペアを取った地震において、小さな地震の振幅は $10^{-6}$ – $10^{-5}$  m/sの範囲に入るものだけを用いた。これにより、観測された振幅依存は主に大きな地震の振幅によって生じていると解釈することができる。

解析では効力降下量、震源モデルなどのいくつかのパラメータを事前に仮定して解析を行っている。そこでそれらのパラメータを変えた場合に結果がどのように変わるかを評価した。その

結果、応力降下量を大きくすると減衰の振幅依存性は小さくなるが、それでも観測されている応力降下量の範囲であれば振幅依存なしでは観測を説明できないことを確認した。

さらに、減衰が振幅の  $n$  乗に比例するというモデルを用いて、得られた減衰の振幅依存性を説明する最適な  $n$  を推定したところ、減衰が振幅の 0.1–0.2 乗に依存すれば観測をうまく説明できることが明らかになった。ある振幅以上では減衰は振幅(歪)に比例して大きくなるという室内実験の結果とは全く異なる結果である。観測と実験の違いについては、引き続き検討していく必要がある。

最後に予備的解析ではあるが、地殻内とプレート境界付近の地震についても減衰の振幅性を調べてみた。得られた結果からは、いずれの地震を用いた解析でも減衰は振幅依存を示すことが明らかになったが、一方で振幅依存性は地震の発生場所(波の伝播経路)によって違いがあることがわかった。振幅依存性の違いは、地震波が伝播する領域の温度・圧力の違い、そしてそれに起因するミクロな変形過程の違いに起因する可能性がある。今後は地殻とプレート境界地震についてもデータを増やした本解析を行い、より精度の高い結果を得たいと考えている。

本研究の最大の成果は、地震波減衰に振幅依存性があることを観測から初めて示すことができたことである。室内実験及び地震波観測の両方に大きなインパクトを与える結果であり、強震動予測の高精度化や地球内部構造の正確な理解に資すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kashiwagi Hirokazu, Nakajima Junichi, Yukutake Yohei, Honda Ryou, Abe Yuki, Sakai Shin'ichi	4. 巻 125
2. 論文標題 Seismic Constraint on the Fluid Bearing Systems Feeding Hakone Volcano, Central Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JB020341	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中島淳一
2. 発表標題 Spectral analysis for precise estimation of seismic attenuation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 手老勇登・中島淳一
2. 発表標題 地震波減衰の振幅依存性について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 手老勇登・中島淳一
2. 発表標題 地震波減衰の振幅依存性について
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------