

九州地方におけるコーダ Q^{-1} 値の地域変化*

干場充之**

Regionality of Coda Q^{-1} -Values in the Kyushu District, Japan

Mitsuyuki Hoshiba

Fukuoka District Meteorological Observatory

The Qc^{-1} -values are estimated with 130 wave form data in the Kyushu district (and Yamaguchi Pref.), applied to the single isotropic scattering coda model.

The estimated Qc^{-1} -value, at high frequency (4-10Hz), is low in northern kyushu, and high in southern Kyushu. It is especially high in the Kirishima-volcano region. It has also been found that the Qc^{-1} -value estimated from the seismograms, whose epicenters are Unzendake-Tachibanawan earthquakes swarm area, is high.

The frequency dependence of the Qc^{-1} -value is studied, when $Qc^{-1}=Q_0^{-1} \cdot f^n$ is assumed. The obtained n values are $-0.4 \sim -0.7$ in the Kyushu district, whereas they have been found to be $-0.6 \sim -0.9$ in the Kanto-Tokai district.

§ 1. はじめに

地震波は地球内部を伝播していくあいだにそのエネルギーが熱などにかわり、または散乱し減衰する。この地震波減衰の特性は、地球内部の場所によって著しく異なり、特に上部マントルから地殻にかけては鉛直方向の変化ばかりでなく水平方向にも変化する。この減衰度の地域変化は地質構造だけでなく地震活動度とも関連があることが予想される。ところで、九州は北部では地震活動が低く南部では高く、地質的に見れば北部は日本列島内帯にあたり南部は外帯にあたる。また九州は数多くの火山をかかえ、特に桜島を中心とする始良カルデラ付近では地震波の減衰が大きいという報告〔例えば、加茂等(1977)など〕もあり、九州各地の減衰特性の地域変化は興味を持たれるところである。

また最近、大地震と関連した Qc 値の時間的変化が観測されたという報告〔JIN and AKI (1986), SATO (1986) 等〕がある。将来の地震予知に向けて Qc 値の観測が重要になるかも知れない。

ところで、伝播経路の減衰特性を表わすパラメータである Q 値を推定する方法としては次のようなも

のがある。震源スペクトルの形態をなんらかからモデルで仮定し、観測記録の地震波スペクトルとの比較から Q 値を推定する方法〔例えば、岡本・他(1984), 山田・他(1984)〕、直線上に並んだ2つの地震の2観測点で得た記録を用いる二重スペクトル比法〔松沢・他(1984)〕、 P 波と S 波は同じ伝播経路を持つものと仮定し、 P 波スペクトルと S 波スペクトルの比の変化から推定する方法〔A.KOBAYASHI et al. (1986)〕などがある。また、複数個の地震を複数個の観測点で観測し、震源特性・観測点特性・減衰特性をインバージョン法で分離し、 Q 値を求める〔岩田・入倉(1986)〕もある。

さて最近、 S 波相の後に続く波群(S 波コーダ)の形状の研究が多くなされている。 S 波コーダは地球内部の不均質性による一次等方散乱波(Single Isotropic Scattering Wave)と考えられ〔AKI, (1969)〕、このスペクトルは、震源スペクトルの特性に伝播媒質の散乱及び減衰の効果を重ねあわせたものである〔AKI and CHOUET (1975); SATO (1977); 佐藤(1986)〕。なかでも、 S 波コーダの振幅減衰を特徴づける Qc 値(コーダの Q 値なので Qc と書くことにする)は、震源スペクトルとは独立

* Received August 29, 1987.

** 福岡管区気象台(現:気象研究所)

の量であり、ある地域での地震波減衰特性を表わしている。コーダの時間的減衰から Q_c を容易に求めることができ、近年になって世界各地の Q_c 値の報告がふえている〔赤松 (1985), 佐藤 (1986) など〕。今回は九州各地 (および山口県) の Q_c 値を佐藤の方法 (1986) で求めたので報告する。

§ 2. 方法

地震波コーダは地球内部のランダムな不均質性による一次等方散乱波と考えれば、発震時刻後 τ (ラプスタイム) に観測される地震波コーダは震源と観測点を焦点とする回転楕円体面上で反射してきた波であり、平均的なS波の速度を β とすれば、この波の伝播距離は $\tau\beta$ である。

さて佐藤 (1986) によれば τ に観測される地震波コーダの振幅 D は周波数領域で

$$D \propto \frac{1}{\tau\beta} \cdot \exp(-\pi f\tau/Q_c) \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここに $(\tau\beta)^{-1}$ は波域の空間的な広がりによる減衰の効果、 Q_c は減衰パラメータの Q_c 値を表す。ある周波数 (f_0) に注目し、(1)式の両辺の常用対数をとる。 β は周波数によらず一定なので

$$\log D = -\log \tau - \log e \cdot \pi f_0 \tau / Q_c + \text{Const} \dots\dots(2)$$

となる。Fig. 1 にはいろいろな Q_c における τ に対する $\log D$ の理論曲線を示す。観測データの傾きと最もよく合う $\log D$ の理論曲線の傾きをさがし、この $\log D$ の傾きから Q_c を推測する。

§ 3. データ

解析には九州各地 (山口県を含む) から福岡管区

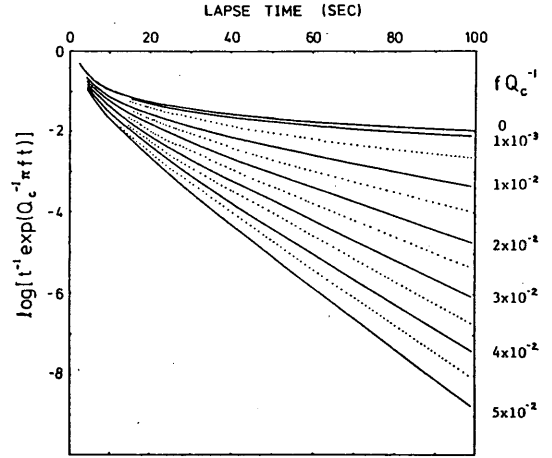


Fig. 1 Temporal decay of the coda amplitude based on single isotropic scattering model (after SATO (1986)).

気象台に電話回線を通しテレメーターされている地震波の記録を用いた。福岡管区気象台では1984年3月以降、九州及び山口県の地震の震源を準リアルタイムで処理すべく観測ネットが整備された〔山本他, (1984)〕。波形データのサンプリングは30Hzで、解析に使用したのは上下動の成分であり11ビットの分解能がある。解析に用いるのはコーダの部分なので、地震波のエネルギーは三成分同様に分配されているものと期待される。

各観測点の地震計の特性および設置状態はTable 1に示す通りであり、変位型、速度型とも減衰定数は0.5であり、固有周期は1秒である。1 Hz より高い周波数に対しては応答がほとんど一定である。

Table. 1 Characteristics of Station.

Characteristics of Station		
Station	Location	Sensor type
SHIMO2	Borehole(-100m)	JMA EMT76 (velocity)
NAGASA	Surface	JMA EMT (velocity)
NOBEOK	Surface	JMA EMT (velocity)
KUMAM2	Borehole(-120m)	JMA EMT76 (velocity)
KIRISH	Surface	JMA 62 (displacement)
KAGOS2	Borehole(-100m)	JMA EMT76 (velocity)

JMA : Japan Meteorological Agency

KIRSHI だけが変位型の地震計であるが、この解析はいわゆる一点法であり、バンドパスフィルターを通すのでこの違いは基本的には影響しない。期間は1986年3月20日から1987年3月6日までの約1年間、用いた地震は震源距離が80Km未満でS/Nが十分にあり、かつ振り切れていないものに限った。震源要

素は福岡管区気象台でルーチン的に決めた値を用いたが、このなかには気象庁の発行する地震月報の載らないものもある。用いた地震波の総数は130波形で、震源の分布はFig. 2に示す。括弧内の数字は各観測点で解析に用いた地震の数を表し、地震の規模はシンボルの大きさ・深さはシンボルの形を変えて

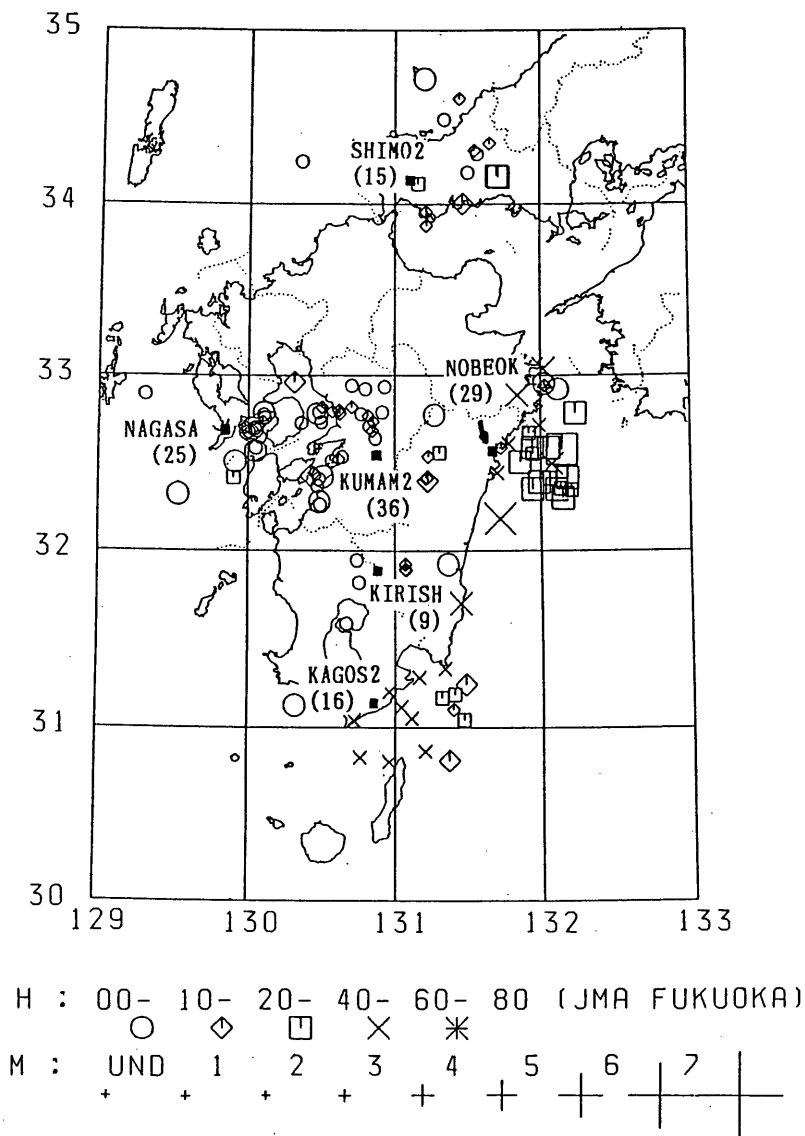


Fig. 2 Earthquakes used for this analysis at 6 stations. Stations are shown as closed boxes, earthquakes' magnitudes are shown by increasing largeness of the symbols and the depths of the hypocenter are shown by various symbols. The numeral in each bracket is the number of earthquakes used in this analysis.

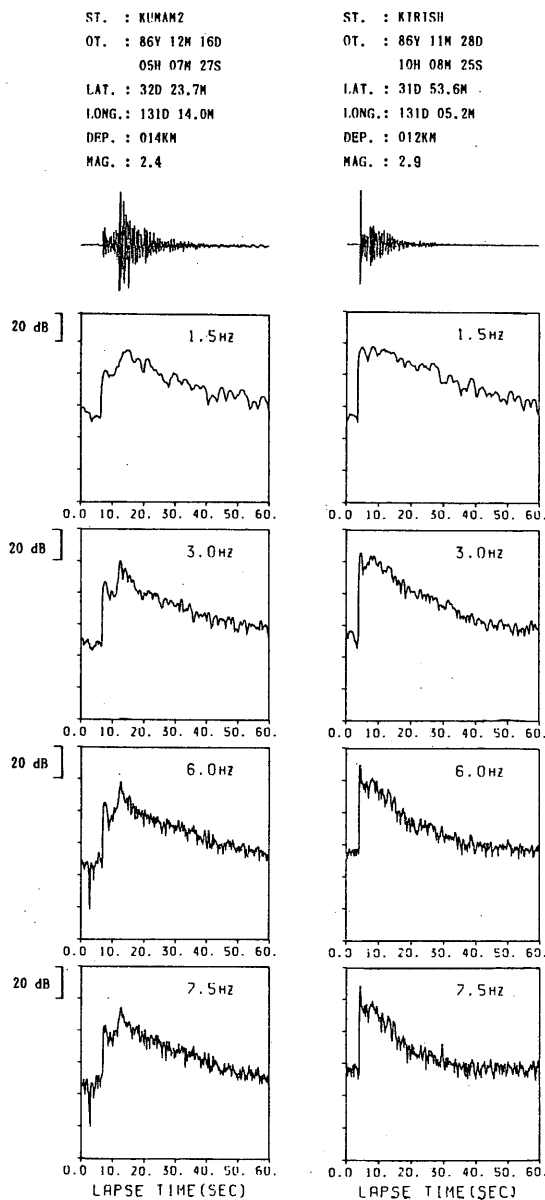


Fig. 3 Examples of band-pass filtered RMS amplitudes against lapse time. The numeral in the upper-right is the central frequency in Hz.

表してある。

バンドパスフィルターにはチェビシェフ型のもの(斎藤, 1978)を使用し, パスバンドは1~2Hz(ストップバンドは2.5Hz), 2~4Hz(5Hz), 4~8Hz(10Hz), 5~10Hz(12.5Hz)の4種類のものを用いた。フィルターをかけた記録から, さらに各中

心周波数に対応する周期の2倍の期間($2f_0^{-1}$ sec)で2乗平均平方根(Root Mean Square, RMS)をとったものをその時間での値Dとして代表させるものとする。Fig. 3に例を示すが, 各RMS記録の右上の数字は中心周波数 f_0 を表わす。KIRISHの記録はKUMAM2の記録より傾きが大きく, すなわち減衰が大きいことがわかる。

$\log D$ の傾きを読み取る期間はS波の走時の2倍から, ノイズレベルになるまで, あるいは発震後60秒までとした。

§ 4. 結果

各観測点ごとの Q_c 値(Q_c^{-1})の周波数依存性をTable. 2およびFig. 4に示す。KIRISHの7.5Hzの値は減衰が大きすぎ, S波の走時の2倍になるまでにノイズレベルになってしまうので求めることができなかった。各値における縦棒は標準偏差の範囲を示す。

$$Q_0^{-1} \text{ および } n \text{ は}$$

$$Q_c^{-1} = Q_0^{-1} \cdot f^n$$

として, 最小2乗法によって求めた値である。佐藤(1984)では世界各地のQ値がまとめられているが, 今回の結果では, KAGOS2で-0.39という(絶対値の)小さい値になったほか最大大きいNAGASAでも-0.71であり, これは上記の佐藤の値よりも, やや小さい。nの絶対値が小さいということは Q_c 値の周波数依存性が小さいということである。佐藤によれば Q_s^{-1} (S波に関してのQ値なので添字にsをつける)は1Hz付近で 10^{-2} 程度, 30Hz付近で 10^{-3} 程度となっているが, 今回得られた結果もだいたいにおいてこれにあっている。なお, 佐藤の値はコーダが主にS波後方散乱波であるとし, さらにS波の減衰は主に散乱によると考えて $Q_s \sim Q_c$ として求められたものも多く含んでいる。したがって, この Q_s は本研究の Q_c とほとんど同等である。

観測点が少ないが, 総じて高周波数においては九州北部(山口県, SHIMO2)では Q_c^{-1} 値が小さく(つまり減衰が小さい), 南部(KAGOS2)では Q_c^{-1} 値が大きく(つまり減衰が大きい), 中部(KUMAM2, NOBEOK)ではそれらの中間の値を取ることが読み取れる。NAGASAは九州中部に位置するが例外的に減衰が大きい。またKIRISHも減衰が大きい。

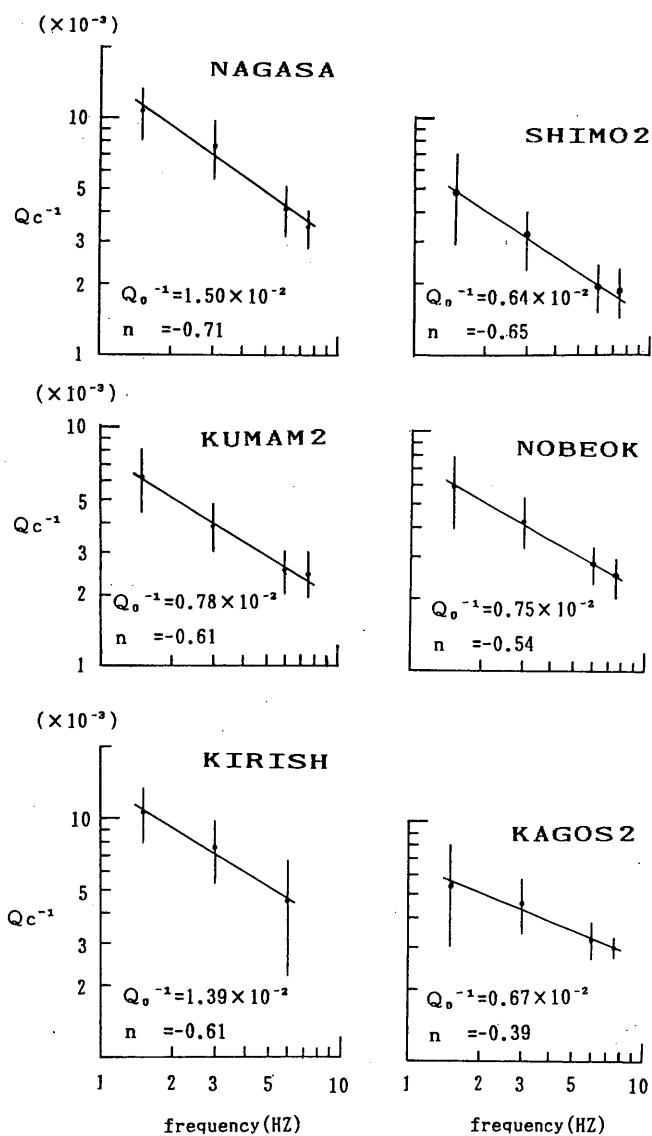


Fig. 4 Frequency dependences of Q_c^{-1} and the linear regression lines at 6 stations. Standard deviation is given by the bar at each frequency. Q_0^{-1} and n are given by least-square method if we assume $Q_c^{-1} = Q_0^{-1} \cdot f^n$.

Table. 2 Qc^{-1} -value (and the Standard Deviation) of each frequency.

($\times 10^{-3}$)

Station	1.5 Hz	3.0 Hz	6.0 Hz	7.5 Hz
SHIMO2	4.9 (2.1)	3.2 (0.9)	1.9 (0.5)	1.8 (0.5)
NAGASA	10.7 (2.7)	7.6 (2.2)	4.2 (1.0)	3.5 (0.7)
NOBEOK	5.9 (2.0)	4.3 (1.1)	2.8 (0.6)	2.5 (0.5)
KUMAM2	6.2 (1.8)	3.9 (0.9)	2.5 (0.5)	2.4 (0.5)
KIRISH	10.5 (2.7)	7.5 (2.3)	4.5 (2.3)	
KAGOS2	5.5 (2.5)	4.6 (1.2)	3.2 (0.6)	3.0 (0.3)

§ 5. 議論

NAGASA の減衰が例外的に大きくなったのは、解析に用いた地震がほとんど雲仙岳から橘湾にかけての地震多発地帯で起こったものであるからであろう。つまり Fig. 5 に示す通り、この地域では1984年8月6日から始まる群発地震(気象庁, 1985)等をはじめとして、一連の地震活動によって地殻がかなり破碎されている可能性が強い。この地域内で発生した地震の波は、この破碎された領域を抜け出るまでに強度の散乱・反射を受けかなり減衰するものと考えられる。2次散乱の効果が大きいかもしれない。SUZUKI (1972) は群発地震域での著しく大きな Q^{-1} 値の例を報告し、また大竹 (1986) も長野県西部地震の余震群発域では大きな Q^{-1} 値を得ている。実際、数は少ないがこの地域外で発生した地震のみ Fig. 6 で解析すれば Qc^{-1} 値は Table. 3 および Fig. 7 のようになり KUMAM2, NOBEOK より少し大きい程度で九州中部での標準的な値に近づく。この結果を用い各周波数ごとに Qc^{-1} 値の地域分布を Fig.

8 に示す。

赤松 (1985) によれば近畿地方では日本列島内帯にあたる部分では減衰が小さく、外帯にあたる部分では減衰が大きいという。九州でも高周波数においては内帯にあたる北部地域では Qc^{-1} が小さくて減衰が小さく、外帯にあたる南部ほど Qc^{-1} が大きく減衰が大きくなっている。

しかし、前述のように地震活動度が Q 値に大きな影響を与えるとすればこの北部と南部の違いは地質的な違いよりも地震活動度によるものかも知れない。

桜島を中心とする始良カルデラの減衰特性については、KIRISH の Qc^{-1} が KAGOS2, KUMAM2 に比べてもかなり大きいことより減衰が大きいことがわかる。桜島上にも観測点があるのだが、桜島近辺にはこの期間構造性地震が少なく、またあったとしても十分な S/N がある状態ではなかったか振り切れていたのでは今回の解析から外した。今後この地域に適度の構造性地震が起こることを期待する。

Table. 3 Qc^{-1} -value (and the Standard Deviation) of each frequency at NAGASA, not including Tachibanawan and Unzendake.

1.5 Hz	3.0 Hz	6.0 Hz	7.5 Hz
7.2 (2.1)	4.8 (1.1)	3.0 (0.7)	2.6 (0.4)

($\times 10^{-3}$)

1984 3 14 --- 1986 1 31

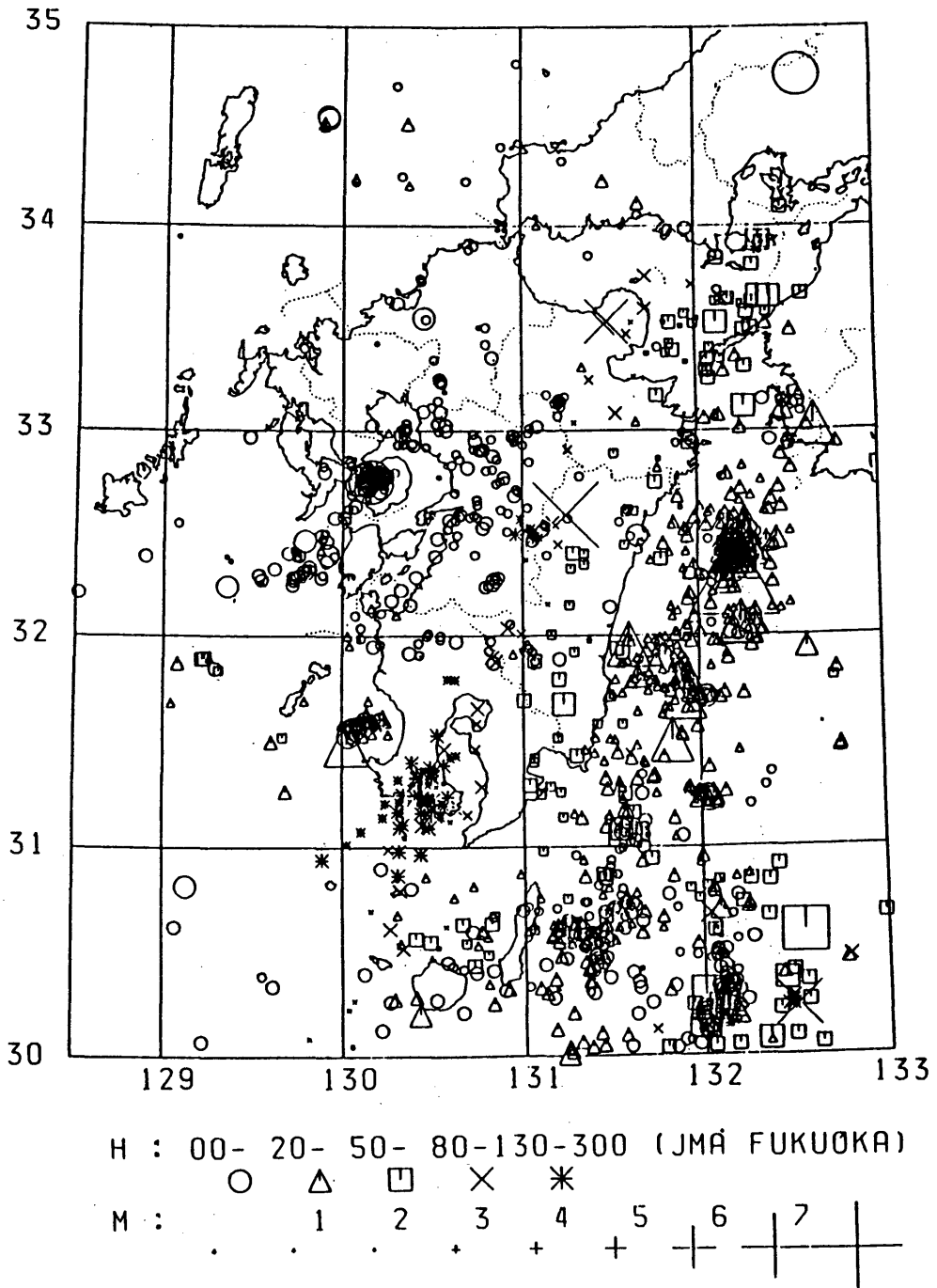
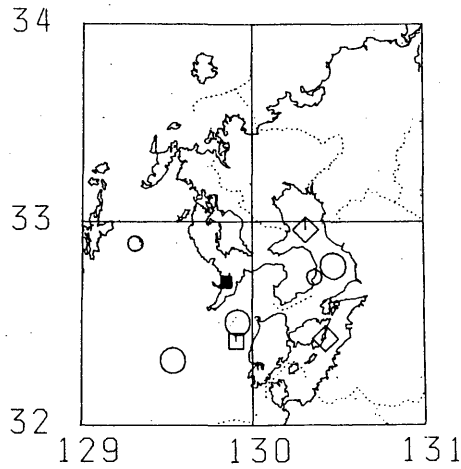


Fig. 5 Epicentral distribution (Mar. 14, 1984–Jan. 31, 1986)
 (after Japan Meteorological Agency (1985))



H :	00-	10-	20-	40-	60
	○	◇	□	×	
M :	UND	1	2	3	4
	+	+	+	+	+

Fig. 6 Earthquakes at NAGASA, not including Tachibanawan and Unzendake.

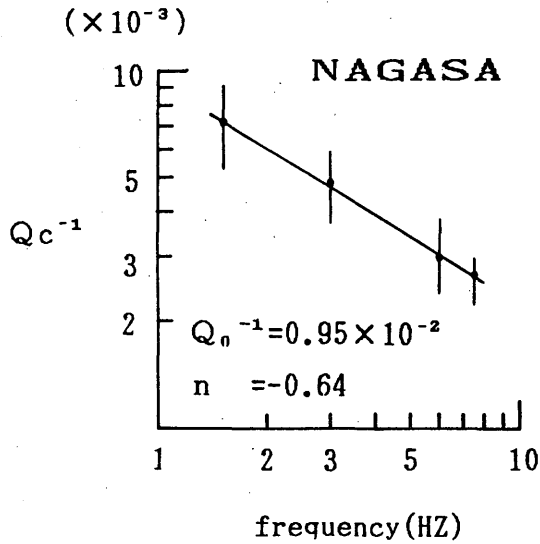
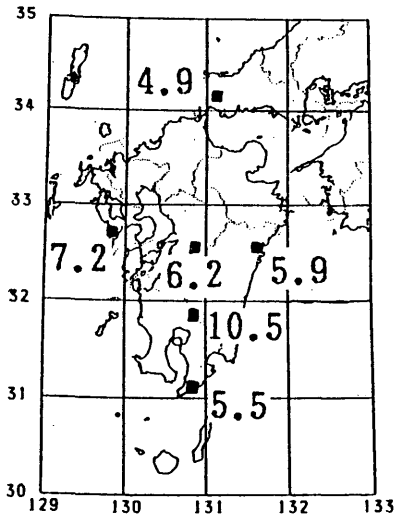


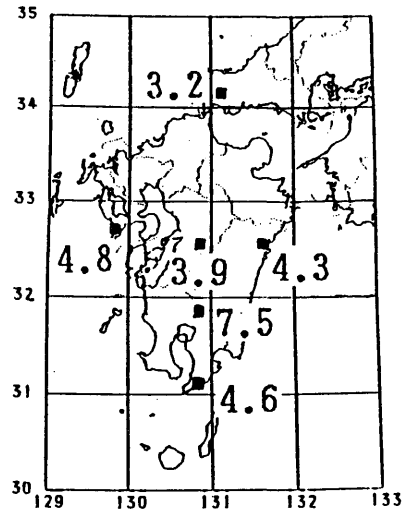
Fig. 7 Frequency dependence of Q_c^{-1} at NAGASA, not including Tachibanawan and Unzendake.

Q_c^{-1} -Value in the Kyusyu District
(and Yamaguchi Pref.), Japan
($\times 10^{-3}$)

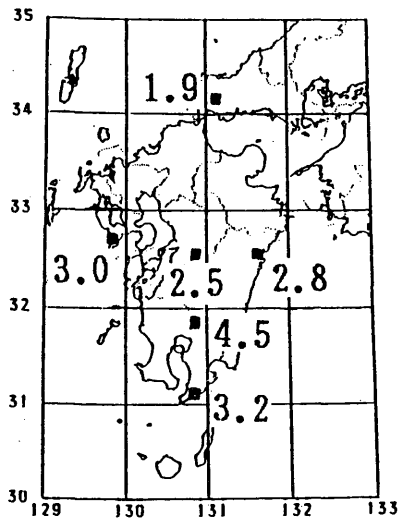
at 1.5 Hz



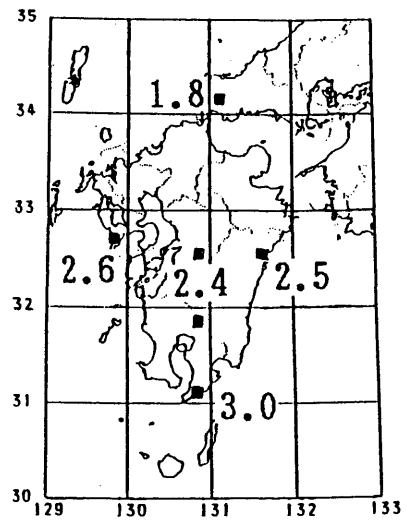
at 3.0 Hz



at 6.0 Hz



at 7.5 Hz

Fig. 8 Q_c^{-1} -values in the Kyushu district (and Yamaguchi Pref.) at each frequency

§ 6. おわりに

今回の解析に当って京都大学防災研究所の岩田知孝氏には数多くの助言を頂いた。バンドパスフィルターの制作にあたっては京都大学理学部の堀家正則博士に全面的な協力を頂いた。高橋道夫主任技術専門官はじめ福岡管区気象台観測課の地震担当の同僚には多大な協力と励ましを頂いた。また、気象研究所の岡田正実室長と後藤和彦研究官には原稿を読んでいただき有益なコメントを頂いた。これらの方々に感謝します。なお主たる計算には福岡管区気象台L-ADESSの地震処理機能を使用した。

参考文献

- 赤松純平 (1985) : 近畿地方における地震波減衰の地域性, 地震学会講演予稿集, No 2, A-72.
- AKI, K., (1969) : Analysis of the Seismic Coda of Local Earthquake as Scattered waves, J. Geophys. Res., 74, 615-631.
- AKI, K. and B. CHOUET, (1975) : Origin of Coda Waves : Source, Attenuation and Scattering Effects, J. Geophys. Res., 80, 3322-3342.
- 岩田知孝・入倉孝次郎 (1986) : 観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, 39, 579-594.
- JIN, A. and K. AKI, (1986) : Temporal Changes in Coda Q before the Tangshan Earthquake of 1976 and the Haicheng Earthquake of 1975, J. Geophys. Res., 91, 665-673.
- 加茂幸介・西 潔・吉沢 保・赤松純平・菊池茂智・小野博慰・須藤靖明・高木章雄・海野徳仁・堀修一郎・佐藤泰夫・角田寿喜 (1977) : 始良カルデラ周辺の地震活動と地震波の異常伝搬の検出について, 第2回桜島火山の集中総合観測, 13-20.
- 気象庁 (1985) : 1984年8月雲仙岳付近の地震活動, 地震予知連絡会会報, 33, 389-392.
- A. KOBAYASHI・I. FURUYA・K. UHIRA, (1986) Reexamination of Magma Reservoirs by Spectral Analysis P and S Waves, Geophysical Magazine, 41, 173-187.
- 松沢 暢・長谷川昭・高木章雄 (1984) : 二重スペクトル比法によるQの推定, 地震学会講演予稿集, No 2, C-75.
- 岡本拓夫・渡辺邦彦・黒磯章夫 (1984) : 日本海南北部の上部マントルを地震波の減衰特性, 地震学会講演予稿集, No 1, B-87.
- 大竹政和 (1986) : 1984年長野県西部地震震源域の低Q, 地震学会講演予稿集, No 2, C-13.
- 斎藤正徳 (1978) : 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, 物理探鉱, 31, 4, 240-263.
- SATO, H., (1977) : Energy Propagation Including Scattering Effects; Single Isotropic Scattering Approximation, J. Phys. Earth, 25, 27-41.
- 佐藤春夫 (1984) : リソスフェアにおける地震波の散乱と減衰 — ランダムな不均質構造による一次散乱理論 —, 国立防災科学技術センター研究報告, 33, 101-186.
- 佐藤春夫 (1986) : 関東・東海地域におけるコーダ Q^{-1} の地域性, 地震 2, 39, 241-150.
- SATO, H. (1986) : Temporal changes attenuation intensity before and after the Eastern Yamanashi Earthquake of 1983 in central Japan, J. Geophys. Res., 91, 2049-2061.
- SUZUKI, S., (1972) : Anomalous attenuation of P waves in the Matsushiro earthquake swarm area., J. Phys. Earth, 20, 1-21.
- 山田尚幸・小菅正裕・佐藤 裕, (1984) : 東北地方北部日本海沿岸のQs構造 — 日本海中部地震の余震を用いて —, 地震学会講演予稿集, No 1, B-84.
- 山本雅博・後藤主夫・豊田正昭・永岡 修 (1985) : 福岡管区気象台地震波形テレメータシステム整備とそれに伴う地震探知能力の改善について, 験震時報, 49, 27-38.