

丹波地域における b 値の空間分布

荒川浩樹* 平松良浩* 片尾浩

*金沢大学大学院自然科学研究科

要旨

丹波地域における b 値の 3 次元構造と 3 次元地震波速度構造の比較を行った。b 値と P 波速度との間には相関が認められなかったが、b 値と S 波速度との間には弱い正の相関、b 値とポアソン比との間には弱い負の相関が認められた。丹波地域におけるこれらの相関関係は流体の存在により b 値の値が変化していることを示唆している。

キーワード：b 値、ポアソン比、流体、丹波地域

1. はじめに

地震活動を表すパラメータとして最も頻繁に用いられるものの一つに b 値がある。一般に、地震のマグニチュードとその頻度の間には Gutenberg-Richter の式と呼ばれるべき乗則が成り立つ。

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (1)$$

ここで、 $N(M)$ はマグニチュード M 以上の地震の総数、 a と b は定数である。この式の b の値が b 値であり、およそ 1 の値を持つことが知られている。b 値は時間的あるいは空間的に変化するという報告が多数なされており、地震発生場を考える上で重要なパラメータである。岩石実験におけるアコースティック・エミッションにもこのようなべき乗則が存在することが知られている。Mogi (1962) は、岩石の不均質性が増すと、岩石試料から発せられるアコースティック・エミッションの b 値も増すという結果を得た。また、Scholz (1968) は、試料にかかる応力を増すと、試料から発せられるアコースティック・エミッションの b 値が下がるという結果を得た。

地震観測網の充実に伴い、精度の高い b 値の空間変化に関する研究が近年盛んに行われている。Mori and Abercrombie (1997) は、カリフォルニア地域の b 値の深さ変化を調べ、深さを増す毎に b

値が低下することを報告した。彼らはこの結果を破壊の成長性の深さ変化という観点で議論している。Wiemer and Wyss (1997) は、Scholz (1968) の実験結果を援用し、アスペリティでは b 値が低くなることを指摘した。Wyss ら (1997) は、伊東沖の海底火山帯において b 値の 3 次元構造を求め、 b 値の異常に高い領域を Mogi (1962) の結果を用いて不均質性と結びつけマグマだまりであると推定した。Weimer and Katsumata (1999) は大地震の余震域における b 値の空間分布を本震時のすべり解放と比較し、最も大きなすべりの解放があった場所が高い b 値の領域と一致することを示した。また、 b 値は時間的に変化することも知られており、特に大地震前後で変化するという報告が多数ある。丹波地域でも b 値の時間的変化が Hiramatsu ら (2000) によって報告されている。彼らはコーダ Q^{-1} の時間変化と b 値の時間変化の間に負の相関があることを報告し、兵庫県南部地震に伴い丹波地域の応力状態が変化したことがその原因であると述べている。

近年の地震波速度構造、トモグラフィー、の解析が進むにつれて、地震活動と流体の存在する領域の関係が注目を集めている。Zhao and Negishi (1998) はトモグラフィーの結果から兵庫県南部地震の震源がポアソン比の非常に高い領域に位置することを示し、兵庫県南部地震の破壊核形成に

流体が影響している可能性を指摘した。竹田ら (1999) は、 V_p/V_s 比から推定される長野県西部地震の震源域におけるクラック中の流体の飽和度とクラック密度を推定し、震源分布と比較した。地震の発生している領域は低飽和度であるが、その周囲には高飽和度の領域があることから、もともと流体がそれほど存在していない領域に流体が入ることで地震を引き起こしている可能性を指摘している。

破壊核形成に流体が寄与するとすれば、流体の多い地域と少ない地域で地震活動に違いが出てくる、すなわち、流体の影響が b 値の空間分布に表れる可能性が考えられる。よって、 b 値の空間分布は、地震発生領域の構造、応力状態、流体の存在等を知る上で重要な情報となる。そこで、本研究は地震活動と速度構造として表れる物性との関係を調べるために、地震活動を定量的に示すパラメータである b 値の 3 次元構造と 3 次元地震波速度構造の比較を行った。

2. データ

b 値の解析には京都大学防災研究所による震源データを用いた。期間は 1977 年～1997 年、深さ 0～20 km の地震データを用いた。1977 年から 1997 年までの 21 年間における丹波地域周辺の震央分布図を Fig.1 に示す。Fig.1 における四角 (50×35 km²) の枠内が b 値の解析領域であり、地震活動が非常に活発であることが分かる。丹波地域は阿武山観測所の密な地震観測網が敷かれているため精度の良い震源データが長期間に渡って得られている。丹波地域では断層沿いだけに地震が起こるのではなく、それ以外の所でも地震が起こる特徴がある (前田・渡辺, 1984)。これらの地震は 8 km～12 km の深さに集中して発生し、12 km より深くなると急激に地震数が減少する。

b 値を計算する場合、地震カタログに含まれる群発地震や余震が b 値に影響を与えることがある。本研究では、バックグラウンドの地震活動による b 値に関心があるので、本震発生から 30 日

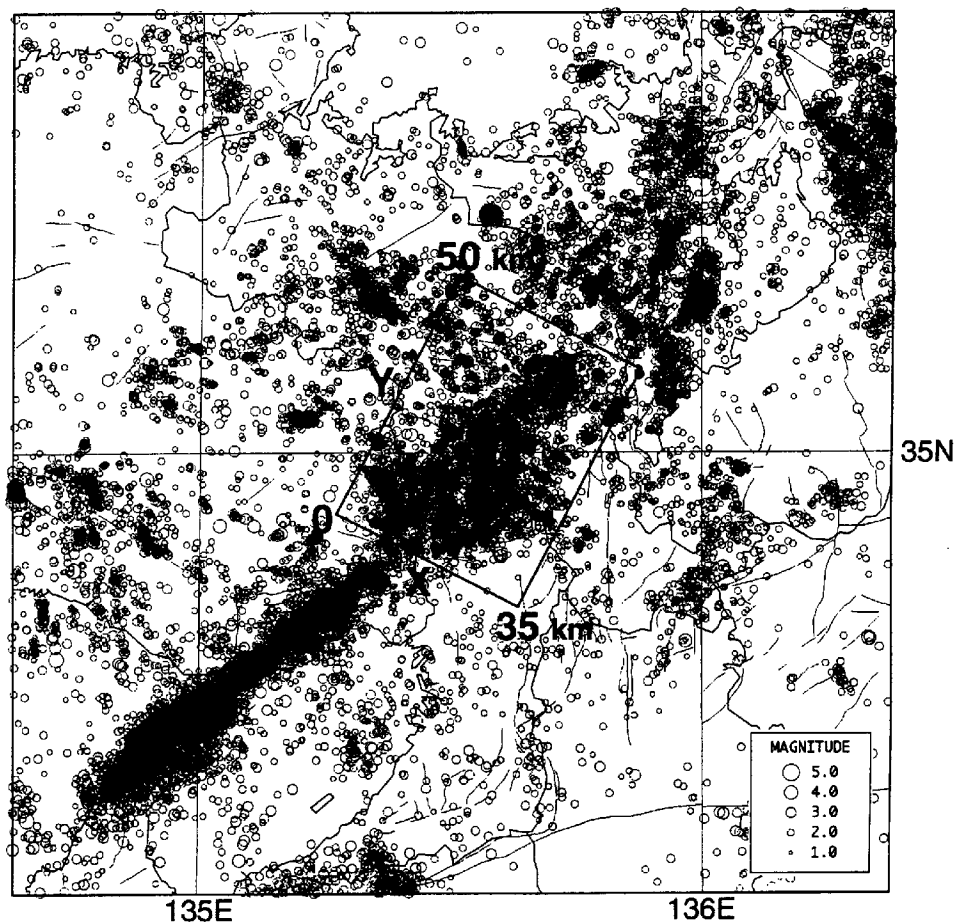
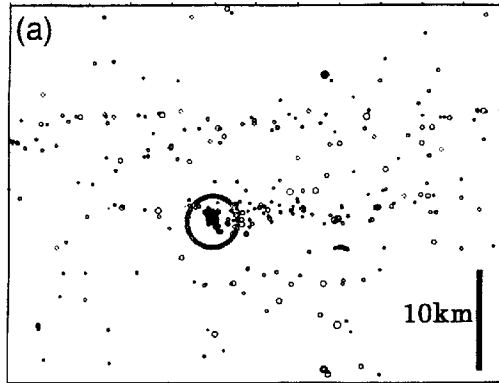


Fig. 1. Seismicity map in the Tamba region. The rectangle area shows the area for the analysis of three dimensional b -value structure. X and Y are the coordinate axis of the cross-sections shown in Fig. 3 and Fig. 4.

1987

JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC



1987

JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC

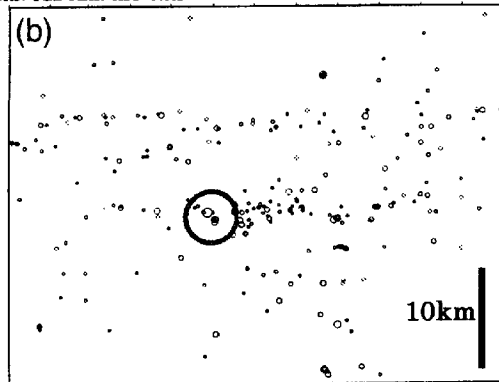


Fig. 2. An example of the removal of aftershocks: (a) before the removal and (b) after the removal.

以内、本震の震源から 5~10 km 以内の地震をカタログから除去した。なお、この基準は Utsu (1969) の基準 (本震発生から 30 日以内、震源からの距離 $10^{0.5M-1.5}$ km 以内に発生した地震) を十分満たしている。Fig. 2 に 1987 年に発生した地震 (M3.5) の余震を除去している例を示す。最終的に解析に用いた地震総数は 15454 個である。

3次元地震波速度構造については、Zhao and Negishi (1998) によるトモグラフィの結果を用いた。彼らの結果の丹波地域における分解能は十分に高く、本研究の目的や議論にえられるものである。

3. 解析方法

b 値の解析には Fig.1 に示す解析領域内に、 $7 \times 7 \times 3$ km³ のブロックを作成し、ブロックを水平方向に 3.5km 毎、鉛直方向に 1.5km 毎移動させ、b 値の 3 次元構造を求めた。b 値の決定には最尤法 (Aki, 1965) を用いた。式は次の通りである。

$$b = \frac{\log_{10} e}{M_{ave} - M_{min}} \quad (2)$$

ここで M_{ave} はマグニチュードの平均値、 M_{min} は b 値を推定する際のマグニチュードの最小値である全てのブロックの規模別頻度分布 (G-R ダイアグラム) を調べた結果、その直線性が M1.5 以下で失われていた。したがって、本研究では M1.5 以上の地震データを b 値の解析に用いた。なお、本研究で用いているデータのマグニチュードは 0.1 毎に与えられているため (例えば、M1.5 は 1.45 ~ 1.55 を意味している)、 M_{min} は 1.45 とした。

地震波速度構造は Zhao and Negishi (1998) によるトモグラフィの結果を用いた。彼等の解析結果の水平方向と深さ方向のグリッド間隔はそれぞれ 4~5km、2~4km である。ポアソン比 ν は次式を用いて求めた。

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (3)$$

基準値 (0%) を 0.25 とし、 V_p 、 V_s と同様に、パータベーションとしてポアソン比を求めた。b 値の解析と同様に、 $7 \times 7 \times 3$ km³ のブロックを作成し、ブロックを水平方向そして鉛直方向にそれぞれ半分ずつ移動させ、ブロック内に含まれる水平方向に 0025° 、鉛直方向に 0.5 km のグリッド間隔を持った V_p 、 V_s 、ポアソン比の値を平均した値をブロックの中心点の値として、 V_p 、 V_s 、ポアソン比それぞれの 3 次元構造を作成した。以上の解析によって得られた b 値の 3 次元構造と地震波速度構造を比較した。

4. 結果

4-1. b 値の空間分布と地震活動

Fig. 3 と Fig. 4 に b 値、 V_p 、 V_s 、ポアソン比の水平断面図と垂直断面図の例をそれぞれ示す。ただし、b 値についてはその誤差が 0.3 より小さな領域のみを図示している。これらの図より、水平方向および鉛直方向にも b 値は 0.7~1.3 の間で様々な値をとって分布していることが分かる。また、本研究の結果からは Mori and Abercrombie (1997) が報告しているような深さと共に b 値が下がるという傾向は見られない。丹波地域においては M3.5 以上の地震は相対的に大地震であると見なして良い。そこで、Fig. 3a と Fig. 4a において、M3.5 以上の地震の震源と b 値の対応を見ると、M3.5 以上の地震と b 値の分布に関係は見ら

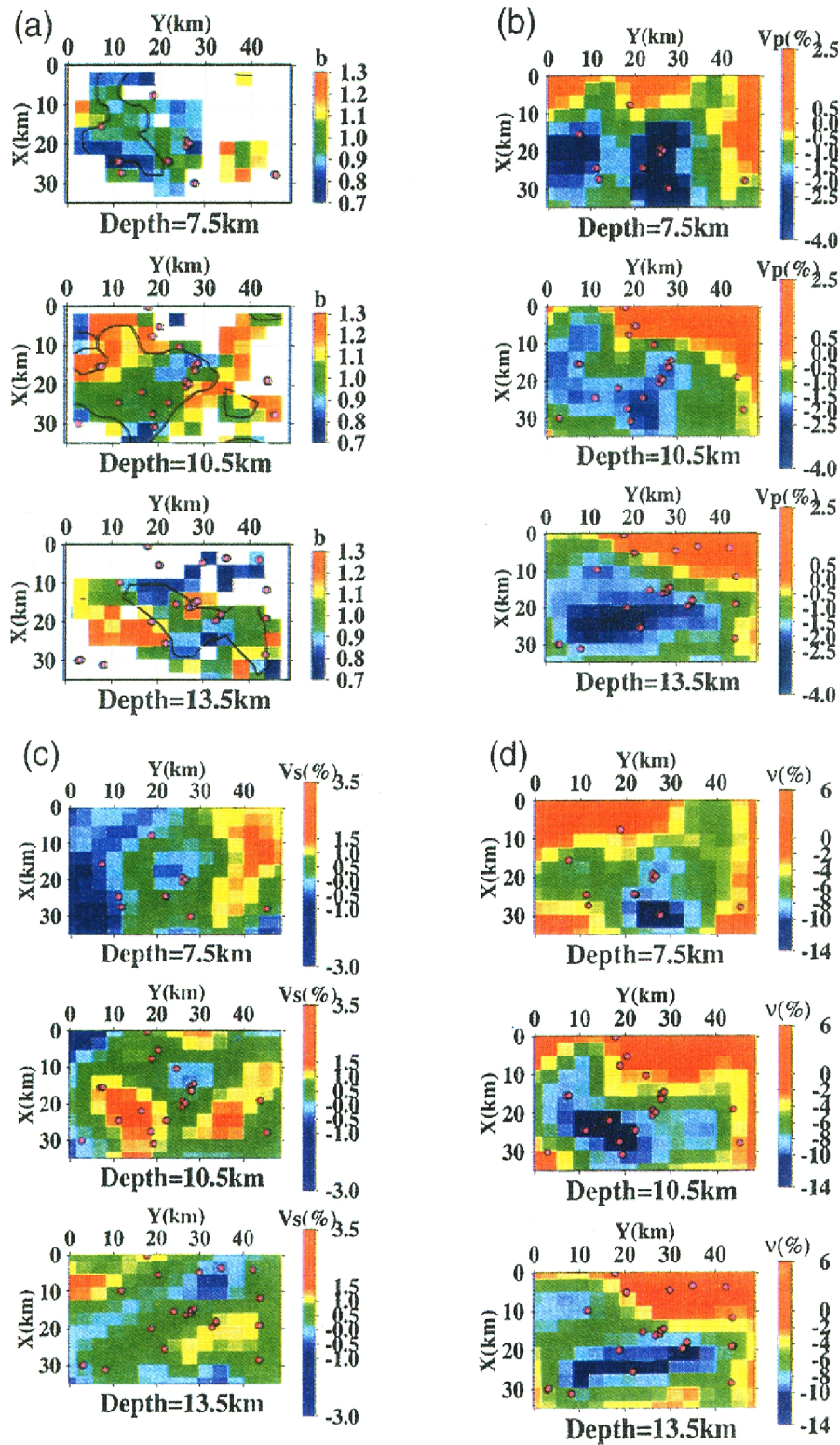


Fig. 3. Examples of horizontal cross sections of (a) b -value, (b) P-wave velocity, (c) S-wave velocity, and (d) Poisson's ratio. The maps of b -value in (a) are drawn using the subblock in which the error of b -value is smaller than 0.3. Black lines in (a) show the boundary at which the error of b -value is smaller than 0.15. Pink circles show events whose magnitudes are greater than and equal to 3.5. The coordinates of X and Y are shown in Fig. 1.

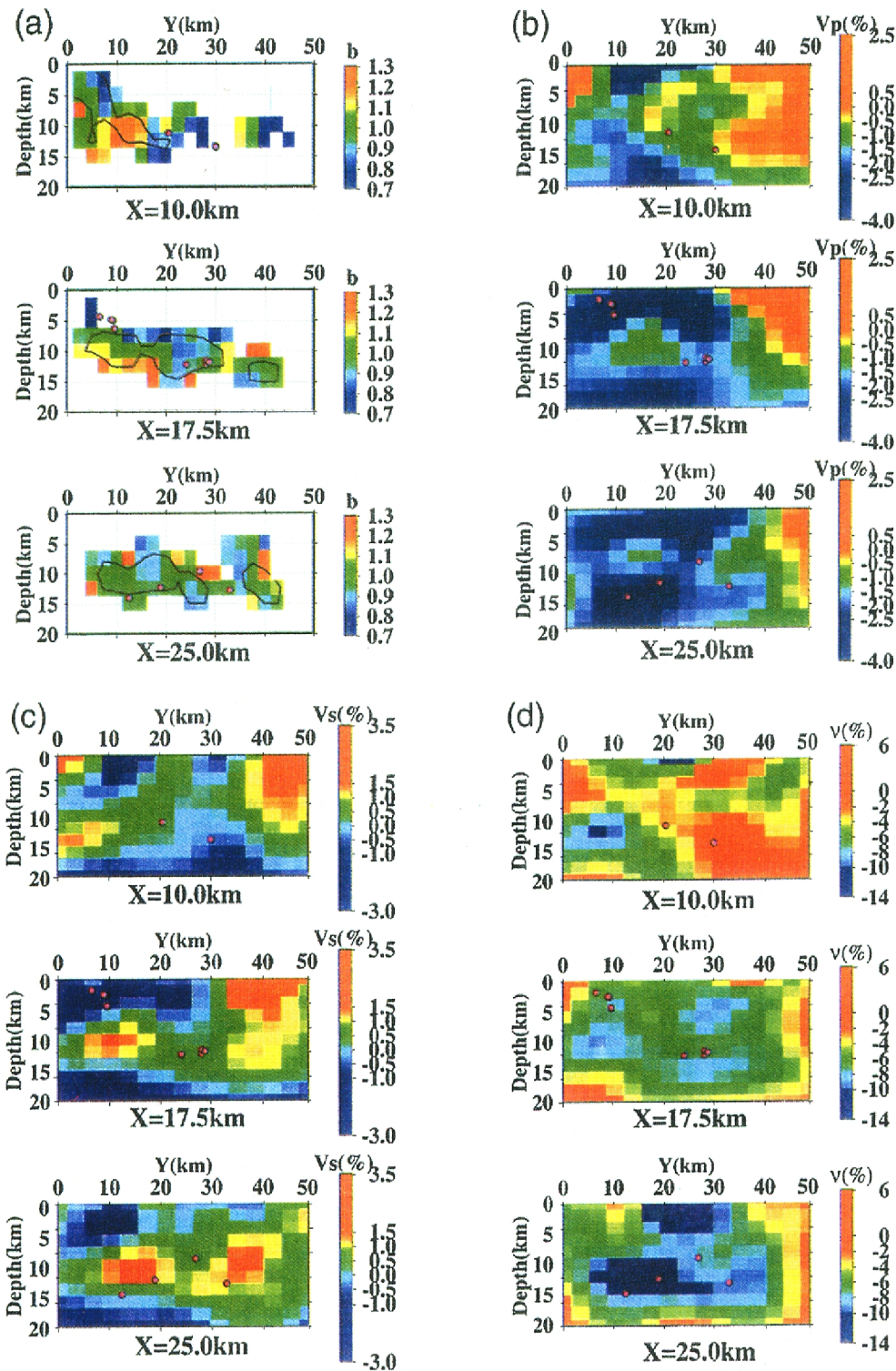


Fig. 4. Examples of vertical cross sections of (a) b-value, (b) P-wave velocity, (c) S-wave velocity, and (d) Poisson's ratio. The maps of b-value in (a) are drawn using the subblock in which the error of b-value is smaller than 0.3. Black lines in (a) show the boundary at which the error of b-value is smaller than 0.15. Pink circles show events whose magnitudes are greater than and equal to 3.5. The coordinates of X and Y are shown in Fig. 1.

れなかった。したがって本研究の結果は b 値の低い領域がアスペリティに一致するという研究結果 (Wiemer and Wyss, 1997; Sylvander, 1999) と調和的ではない。

大きな地震が何個か起こると見かけ上 G-R ダイアグラムの傾きが変わることがある。M3.5 以上の地震が b 値に影響を与えているか否かを確認するために、全ての G-R ダイアグラムを調べた。その結果、低い b 値のブロックの G-R ダイアグラム (Fig.5a) を見てみると、最小マグニチュード (M1.5) から G-R ダイアグラムの傾き (b 値) が低かった。また、高い b 値のブロックの場合 (Fig.5b) はこの逆であった。このことは、 b 値の違いは M3.5 以上の地震の影響による見かけのものではなく、地震活動の性質そのものの違いであることを意味している。

4-2. b 値の 3 次元構造と地震波速度構造の相関

次に b 値の 3 次元構造と地震波速度構造を比較した (Fig. 3, Fig. 4)。 b 値と V_p の間には何らかの対応があるようには見えない。 b 値と V_s の間には、 b 値が小さいと V_s も小さく b 値が大きいと V_s も大きくなる傾向があるように見える。また、 b 値とポアソン比の間には b 値が低いとポアソン比が大きく b 値が高いとポアソン比が小さいという傾向があるように見える。これらの関係を定量的に評価するために、それぞれについて相関をとった。S 波速度とは弱い正の相関 (相関係数=0.31)、ポアソン比とは弱い負の相関 (相関係数=-0.34) を見出した (Fig.6)。

しかしながら、相関計数がそれほど大きくはないため本当に意味があるかどうか疑問が残る。そのため、これらの相関係数に対し、その値が統計学的に有意であるか検定を行った。方法としては、 b 値と、 V_p 、 V_s 、ポアソン比の分布から求められる標本相関係数 C_{xy} をもとにし、母集団が 2 次元正規分布に従っているものと仮定をした上で、その中の ρ_{xy} を母相関係数と考え行う。まず $\rho_{xy}=0$ の時には、 x と y はそれぞれ独立に 1 次元正規分布に従うことになるので次のことが成り立つ。 $\rho_{xy}=0$ の 2 次元正規分布に従う母集団から大きさ n の標本を無作為抽出したときの標本相関係数 C_{xy} は、確率密度が

$$f(C_{xy}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma((n-1)/2)}{\Gamma((n-2)/2)} (1-C_{xy}^2)^{\frac{n-4}{2}} \quad (4)$$

の分布に従い、

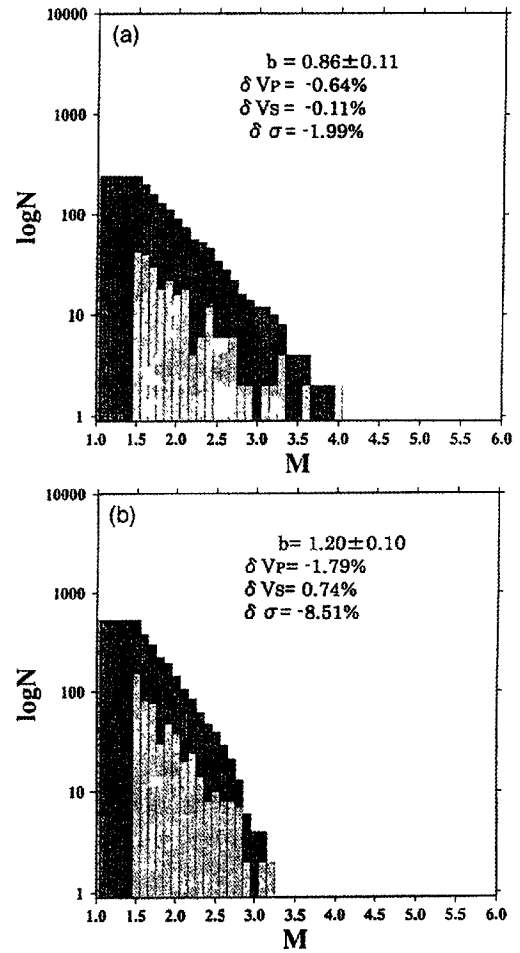


Fig. 5. Examples of the frequency-magnitude distribution (G-R diagram): (a) low b -value and (b) high b -value. Dark gray bars represent the number of earthquakes whose magnitudes are greater than and equal to M . Light gray ones represent the number of earthquakes of each magnitude range.

$$T = \sqrt{\frac{(n-2)C_{xy}^2}{1-C_{xy}^2}} \quad (5)$$

をつくると、 T は自由度 $n-2$ の t 分布に従う。そこで帰無仮説「 $\rho_{xy}=0$ 」、対立仮説「 $\rho_{xy} \neq 0$ 」において両側検定を行えばよい。検定を行ったところ、 b 値と V_s の場合は 1% の危険率において有意であった。すなわち、 b 値と V_s との間には 99% の確率で正の相関があると言える。また、 b 値とポアソン比の場合は 0.1% の危険率において有意であった。すなわち、 b 値とポアソン比の間には 99.9% の確率で負の相関があると言える。

5. 議論

本研究結果から丹波地域では b 値とポアソン

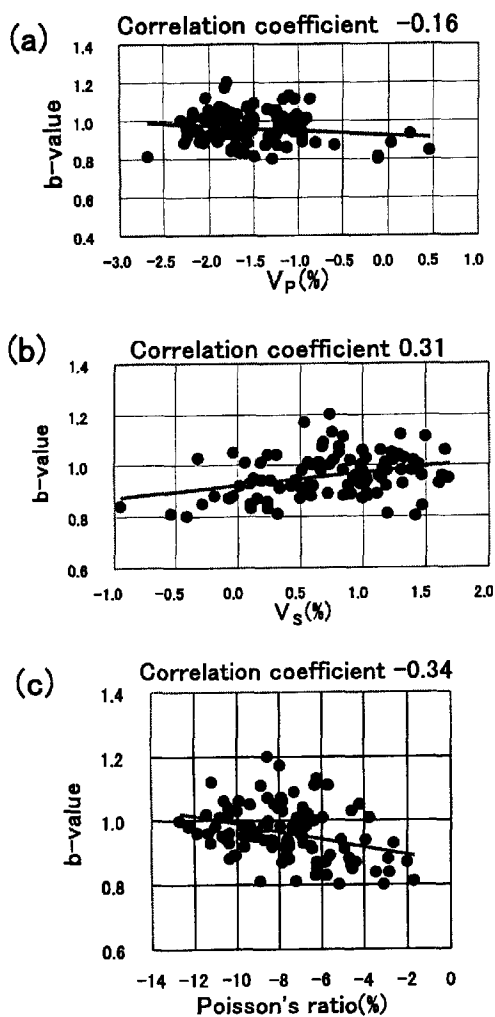


Fig. 6. Plots of (a) P-wave velocity versus b-value, (b) S-wave velocity versus b-value, and (c) Poisson's ratio versus b-value. Solid line is fitted by the least squares method. A weak positive correlation is found between S-wave velocity and b-value. A weak negative correlation is found between Poisson's ratio and b-value.

比の間に負の相関があることが示された。しかし、b 値の値は解析する領域の選び方にも依存する。前章の結果を確認するために $5 \times 5 \times 3 \text{ km}^3$ 、 $10 \times 10 \times 3 \text{ km}^3$ と異なるブロックサイズで同様の解析を行った。b 値の空間分布の傾向はどのブロックサイズでも同じであった。また、b 値と S 波速度の間に弱い正の相関があり、b 値とポアソン比の間に弱い負の相関があることもブロックサイズにより変化することは無かった。

局所的にポアソン比を変化させる要因として、流体（水）、マグマ等の影響が考えられる。丹波地域は熱流量が低く、地温勾配も小さいことから、地温が低いことが分かっている（田中ら, 1999）。また地表に火山がないことから、マグマの影響は

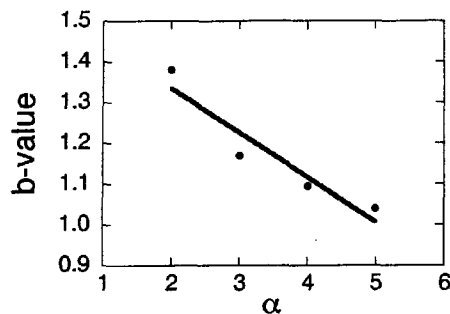


Fig. 7. Plot of dynamic friction parameter α versus b-value. b-value decreases as α increases. Solid line is fitted by the least squares method.

考えにくい。ポアソン比は流体の存在に敏感である (O'Connell and Budiansky, 1974)。したがってポアソン比が高い領域は、流体が存在する可能性が考えられる。

次に、流体の存在が b 値に与える影響について考察する。定性的には断層間に流体が存在した場合、間隙水圧の効果および化学的な効果により、断層面の動摩擦が低下し、すべりが促進されやすくなる。これは速度弱化的摩擦則では、動摩擦パラメータ α (Brune, 1970) が大きくなることに相当すると考えて良い。この効果を確認するために、Carlson ら(1991) にならい、速度弱化的摩擦則を持った 1 次元バネブロックモデルを用いて、数値実験を行った。その結果、b 値と動摩擦パラメータ α の間に負の相関があることを見出した (Fig. 7)。この結果は Kumagai ら(1999) の結果と調和的であり、流体の存在が動摩擦パラメータ α を介して b 値に影響を及ぼし得ることを示している。

b 値とポアソン比の関係を直接的に示す岩石実験の報告例は無い。しかし、Sammonds ら (1992) の結果はこの問題を考える上で有用である。彼らの岩石実験結果によると間隙水圧体積を一定に保った場合、岩石試料の間隙水圧が約 20MPa、岩石にかかっている応力が 180MPa の時、b 値は 0.8 の値を取っている。一方、間隙水圧一定 (7MPa) に保った場合、岩石試料にかかる応力が 180MPa の時、b 値は 1.5 の値をとっている。間隙水圧が高い時は岩石中の含水率も高くなり、ポアソン比も高くなる。したがって、この実験結果は b 値とポアソン比が負の相関になることを支持するものである。

6. 結論

丹波地域において、b 値の 3 次元構造を求め、

地震波速度構造と比較した。その結果、 b 値と S 波速度との間に弱い正の相関、 b 値とポアソン比との間に弱い負の相関を見出した。これらの相関は統計的に有意である。局所的にポアソン比を変化させる要因として、流体、マグマ等の影響が考えられる。丹波地域は、熱流量が低く、地温勾配も小さく、地表に火山がないことから、マグマの影響は考えにくい。従って丹波地域におけるポアソン比の高低は流体の影響による可能性が高い。流体が存在すると断層間の動摩擦が減少し破壊の成長は促進されるため、相対的に大きな地震が多くなり b 値が低くなることが考えられる。したがって本研究の結果は、丹波地域における b 値の空間的变化は流体の影響により生じていると解釈できる。

謝辞

愛媛大学の趙大鵬教授、防災科学技術研究所の根岸弘明博士には、3次元地震波速度構造のデータを頂きました。金沢大学理学部の古本宗充教授には有益な議論をして頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

- Aki, K. (1965): Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - b M$ and its confidence limits, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 43, 237-239.
- Brune, J. (1970): Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.
- Carlson, J. M., J. S. Langer, B. E. Shaw, and C. Tang, Intrinsic properties of a Burridge-Knopoff model of an earthquake fault, *Phys. Rev. A*, 44, 884-897, 1991.
- Hiramatsu, Y., N., Hayashi, and M. Furumoto, H. Katao (2000): Temporal changes in coda Q^{-1} and b value due to the static stress change associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *J. Geophys. Res.*, 105, 6141-6151.
- Kumagai, H., Y. Fukao, S. Watanabe, and Y. Baba (1999): A self-organized model of earthquakes with constant stress drops and the b -value of 1, *Geophys. Res. Lett.* 26, 2817-2820.
- 前田直樹・渡辺晃 (1984): 微小地震の活動様式—近畿地方中北部の微小地震活動—, *地震*, 37, 579-598.
- Mogi, K. (1962): Magnitude-frequency relations for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 40, 831-853.
- Mori, J., and R. E. Abercrombie (1997): Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: Implications for rupture initiation, *J. Geophysical. Res.* 102, 15081-15090.
- O'Connell, R. J., and B. Budiansky (1974): Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, *J. Geophys. Res.*, 79, 5412-5426.
- Sammonds, P. R., P. G. Meredith, and I. G. Main (1992): Role of pore fluids in the generation of seismic precursors to shear fracture, *Nature*, 359, 228-230.
- Scholz, C. H. (1968): The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 399-415.
- Sylvander, M. (1999): Identifying an asperity through 3-D mapping of the frequency-magnitude distribution, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2657-2660.
- 竹田順子・飯尾能久・小林洋二・山本清彦・佐藤春夫・大見士朗・伊藤久男・池田隆司・山本英二 (1999): V_p/V_s 比から推定される震源域の飽和度とサイズミシティーの関係—長野県西部地域稠密観測データを用いて—, *地震*, 51, 419-430.
- 田中明子・矢野雄策・笹田政克・大久保泰邦・梅田浩司・中司昇・秋田藤夫 (1999): 坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル, *地質調査所月報*, 50, 7, 457-487.
- Utsu, T. (1969): Aftershocks and earthquake statistics (I) — Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelations —, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, 3, 129-195.
- Wiemer, S., and K. Katsumata (1999): Spatial variability of seismicity parameters in aftershock zones, *J. Geophys. Res.*, 104, 13135-13151.
- Weimer, S., and M. Wyss (1997): Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?, *J. Geophys. Res.*, 102, 15115-15128.
- Wyss, M., K. Shimazaki, and S. Wiemer (1997): Mapping active magma chambers by b values beneath the off-Ito volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 102, 20413-20422.
- Zhao, D., and H. Negishi (1998): The 1995 Kobe

earthquake: Seismic image of the source zone and its implication for the rupture nucleation, J. Geophys. Res., 103, 9967-9986.

Spatial distribution of b-value in the Tamba region

Hiroki ARAKAWA*, Yoshihiro HIRAMATSU*, Hiroshi KATAO

*Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University.

Synopsis

We compare the three dimensional structure of b-value to that of seismic velocity in the Tamba region. No correlation is recognized between b-value and P-wave velocity. However, we can recognize a weak positive correlation between b-value and S-wave velocity and a weak negative correlation between b-value and Poisson's ratio. These correlations suggest that b-value can be affected by the existence of fluid in the Tamba region.

Keywords: b-value, Poisson's ratio, fluid, Tamba region