

# Visco-elastic response of joints to transmission waves

吉岡 直人(横浜市大・理学部)、菊池 正幸(東大・地震研)

yoshi@yokohama-cu.ac.jp, kikuchi@eri.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

これまで何度も指摘されてきていることではあるが、地殻はマイクロクラックから断層に至る、さまざまな大きさの割れ目(以下ジョイントと呼ぶ)を含んでおり、これが地殻の物性を大きく特徴づけるものとなっている。もちろん弾性波はこれらのジョイントの影響を大きく受ける。

ところで、逆にたとえばある断層を透過する弾性波の様子を連続観測することによって、もし透過波動の変化を捉えることができれば、それは断層の状態変化を反映していると考えられないであろうか。すなわち、地震予知への一つの手掛りにならないだろうか。

そんなことをも念頭に置きながら、本講演では模擬的な断層を通過する波動を観測した実験について報告する。この実験結果は既に Yoshioka and Kikuchi(1993) として出版されている。興味ある読者は参照されたい。

## 2. 波動透過の理論

一枚のジョイントを通過する波動の理論的考察はこれまで多くの研究者によって行われてきた(たとえば Schoenberg, 1980; Kitsunozaki, 1983)。Pyrak-Nolte et al.(1990) はジョイントにさまざまな角度で入射する P, S V および SH 波の反射波、屈折波、透過波に対する解を導き、波動透過率を求めて、独自の実験によってこれを検証している。これらの解はいずれも、平均的な応力はジョイントの前後で連続であり、これに対して変位は不連続であるという仮定のもとに導かれたものである。また、透過波の波長は、ジョイントにおける個々のアスペリティ接触の平均的間隔に比べて十分長いことを前提としている。以下に Pyrak-Nolte et al.(1990) の求めた解を示し、実験結果と比較する。

### 2-1. Displacement Discontinuity Model(DDM)

以下では、変位を  $u$ 、応力を  $\tau$  で表し、添字 1,2 はジョイントの入射側と透過側をそれぞれ表すものとする。波動方程式を、応力連続、変位不連続という境界条件、すなわち

$$\kappa(u_1 - u_2) = \tau_1 = \tau_2$$

のもとに解くと、ジョイントに垂直に入射する平面波の透過率  $T(\omega)$  は、P 波、S 波ともに同じ形、すなわち

$$\begin{aligned} T(\omega) &= \frac{2(\kappa/Z)}{2(\kappa/Z) - i\omega} \\ &= \frac{2}{2 - i\xi} \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる。ここで  $\omega$  は角周波数、 $Z$  は seismic impedance (phase velocity  $\times$  density)、 $\kappa$  はジョイントのスティフネスであり、P 波、S 波に応じて、normal stiffness、shear stiffness を表す。また  $\xi = \omega/(\kappa/Z)$  である。このモデルを DDM と略称する。

## 2-2. Combined Displacement and Velocity Discontinuity Model(VDM)

Pyrak-Nolte et al.(1990) はジョイントの空隙が液体で満たされた場合のS波に対して、粒子速度も不連続という条件を付加した境界条件、すなわち

$$\kappa(u_1 - u_2) + \eta^* \left( \frac{\partial u_1}{\partial t} - \frac{\partial u_2}{\partial t} \right) = \tau_1 = \tau_2$$

の下に解を求めた。これに対する波動透過率は

$$T(\omega) = \frac{2(\kappa - i\omega\eta^*)}{2\kappa - i\omega(2\eta^* + Z)} \quad (2)$$

$$= \frac{2(1 - i\xi\lambda)}{2 - i\xi(2\lambda + 1)}$$

で与えられる。ここで  $\eta^*$  は specific viscosity と呼ばれる量であり、[粘性率/長さ] の次元をもっている。また  $\lambda = \eta^*/Z$  である。このモデルをVDMと呼ぶことにする。

図1に波動透過率を無次元周波数  $\xi = \omega/(\kappa/Z)$  の関数として示す。  $\lambda = 0$  の時がDDMに相当し、他はさまざまな  $\lambda$  の値にたいするVDMの応答を示す。

## 3. 波動透過実験

以下に実験の概要を示す。図2に実験装置の概要を示す。PZT振動子(T,R)を取り付けるためにホルダー(H)を介して試料(M)に加圧する仕組みとなっている。試料は直方体(3x1x1cm<sup>3</sup>)の真鍮であり、これを2つ重ねて接触面(ジョイント)を形成した。

受信側の振動子によって捕らえられた波動は、サンプルオシロによってP波の場合、およそ3nsec、S波の場合12nsecのサンプリング間隔で採取され、フロッピーディスクに取り込まれる。初動部分はタイムドメインで適当なウインドウをかけた後、FFTにより振幅スペクトルを計算した。なお、ジョイントを含まない無垢のサンプルに対しても同様の実験を行い、この波形を基準波形として以下の処理を行った。

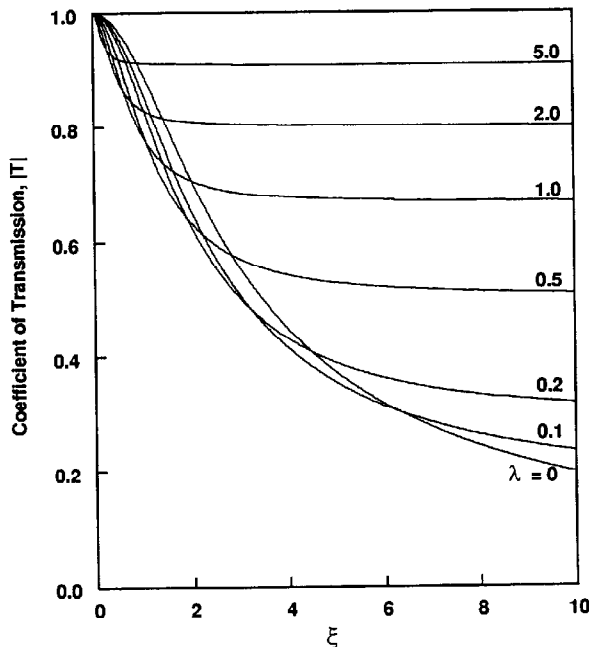


図1. 波動透過率

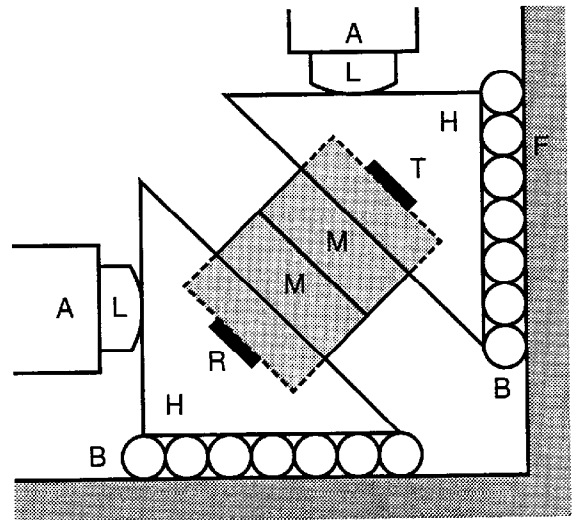


図2. 波動透過実験装置の概要

#### 4. 実験結果

図3および図4にP波およびS波の初動部分の振幅スペクトルを示す(法線応力10MPa). (a)および(b)は、それぞれDDM、VDMに対応している. 太い実線が観測波のスペクトル、細い実線は無垢の真鍮を透過した波動のスペクトルで、これに透過率(破線)をかけたもの(点線)が理論スペクトルである. 最小二乗法により、一点鎖線の周波数範囲内で観測値に最も合うように透過率のパラメータ( $\kappa$ および $\eta^*$ )を定めた. こうして求めた各パラメータと相関係数 $r$ 、標準偏差誤差 $\epsilon$ を表1に示す. 明らかにP波、S波とも、観測されたスペクトルはDDMよりもVDMとよりよい一致を示す.

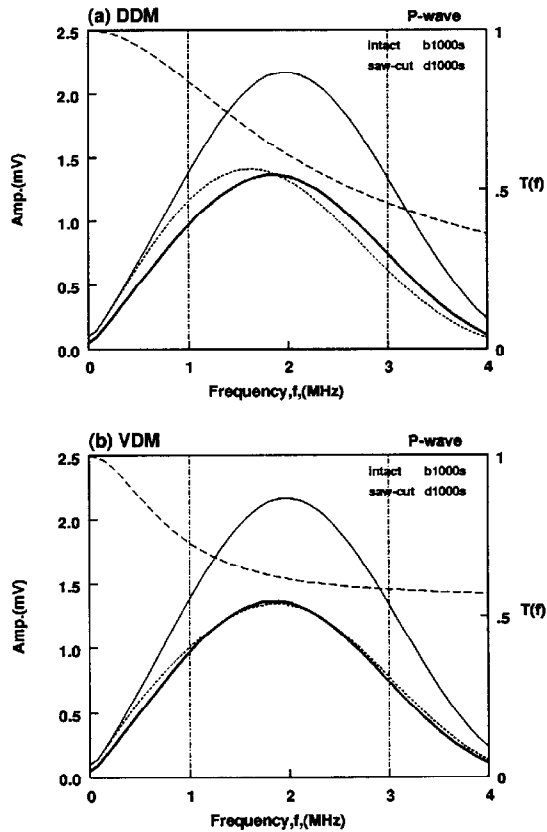


図3. P波の初動部分の振幅スペクトル.

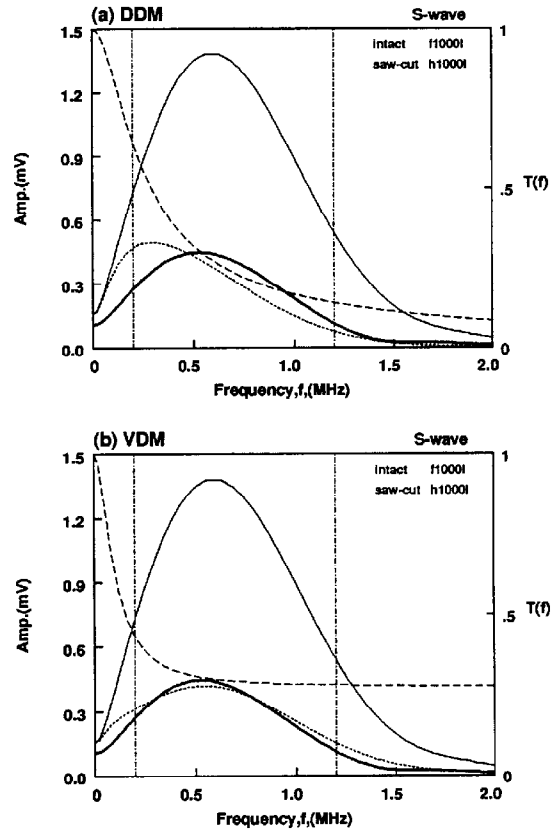


図4. S波の初動部分の振幅スペクトル.

表1. 波動透過法により求めた接触面(ジョイント)の性質.  $\sigma_n$ :法線応力(MPa)、 $\kappa$ :ステイフネス( $10^7$  MPa/m)、 $\eta^*$ :specific viscosity(N-sec/m<sup>3</sup>)、 $r$ :相関係数、 $\epsilon$ :最小二乗誤差.

		$\sigma_n$	5	10	15	20	5	10	15	20
P	DDM	$\kappa$	11.9	19.5	26.7	30.4	0.78	0.95	1.05	1.09
		$r$	0.7239	0.8214	0.8990	0.9230	0.6949	0.7398	0.7307	0.7613
		$\epsilon$	0.130	0.118	0.0956	0.0884	0.0865	0.0956	0.104	0.105
	VDM	$\kappa$	9.6	19.6	32.6	39.8	0.43	0.58	0.60	0.65
		$\eta^*$	13	25	36	44	2.9	3.4	4.0	4.2
		$\eta^*/\kappa$	1.4	1.3	1.1	1.1	6.7	5.9	6.7	6.5
		$r$	0.9985	0.9995	0.9998	0.9999	0.9955	0.9944	0.9961	0.9970
		$\epsilon$	0.0145	0.0194	0.0165	0.0149	0.0232	0.0229	0.0250	0.0243
S	DDM	$\kappa$	11.9	19.5	26.7	30.4	0.78	0.95	1.05	1.09
		$r$	0.7239	0.8214	0.8990	0.9230	0.6949	0.7398	0.7307	0.7613
		$\epsilon$	0.130	0.118	0.0956	0.0884	0.0865	0.0956	0.104	0.105
	VDM	$\kappa$	9.6	19.6	32.6	39.8	0.43	0.58	0.60	0.65
		$\eta^*$	13	25	36	44	2.9	3.4	4.0	4.2
		$\eta^*/\kappa$	1.4	1.3	1.1	1.1	6.7	5.9	6.7	6.5
		$r$	0.9985	0.9995	0.9998	0.9999	0.9955	0.9944	0.9961	0.9970
		$\epsilon$	0.0145	0.0194	0.0165	0.0149	0.0232	0.0229	0.0250	0.0243

## 5. 考察

Pyrak-Nolte et al.(1990)は、specific viscosity は間隙を満たす流体の粘性と仮定し、さらにS波にたいしてのみ影響を及ぼすと仮定してVDMを導いたのであるが、我々の実験は乾燥状態の真鍮を用いて行ったにも関わらず、VDMの方がよりよく実験結果を説明した。これは何を意味するのであろうか。

よく知られているように、ジョイントの接触は多くの局所的なマイクロな接触から成り立っている。真実接触面積は見かけの接触面積に比べて著しく小さい。2つの面はこのマイクロな接触をとおしてのみ相互作用を及ぼしあっている。したがって、透過波動に対しても、このマイクロな接触部における物性が大きく影響すると考えられる。求められたスティフネスや粘性も、マイクロな接触部の物性の平均的な値である。

マイクロなアスペリティ接触における局所的な応力を、ヘルツの弾性接触理論にもとづいて計算してみると(Yoshioka, 1994a,b)、見かけの法線応力が1MPaであっても、局所的には8GPaに達していることがわかる。そしてこの局所的応力は見かけの法線応力が増大しても一定値を保つ。真鍮の硬さ(hardness)は、1GPaのオーダーなので、局所的にははるかに弾性限界を超えていて、塑性変形が進行していることが予想される。これが乾燥した固体における粘性の意味であろう。

Marsh(1964)は脆性を示す代表的な物質であるガラスにおいても、インデンテーションにおける圧子直下の局所的な高圧状態下では、塑性流動が起きていることをさまざまな観察により指摘している。またDouglas(1958)は、物質(ガラス)のactivation processの考察により、非常な高圧下では、たとえ室温であっても粘性が圧力とともに急速に減少すると主張している。最近、Yoshioka and Yoshioka(1995, 1996a, b)はインデンテーションの初期過程を詳しく観察することにより、物質の変形は粘性的性質を含むプロセスであることを示した。

このように固体が接触した場合、真実接触部では我々の日常的な感覚を超えた現象が進行していることを強調しておきたい。

## 6. 参考文献

- Douglas, R.W., *J. Soc. Glass Tech.*, 42, 145-157, 1958.
- Kitsunozaki, C., *J. Mining Coll. Akita Univ., Ser. A*, 6(3), 173-187, 1983.
- Marsh, D.M., *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 279, 420-435, 1964.
- Pyrak-Nolte, L.J., L.R. Myer, and N.G.W. Cook, *J. Geophys. Res.*, 95, 8617-8638, 1990.
- Schoenberg, M., *J. Acoust. Soc. Am.*, 68, 1516-1521, 1980.
- Yoshioka, N., *J. Geophys. Res.*, 99, 15549-15560, 1994a.
- Yoshioka, N., *J. Geophys. Res.*, 99, 15561-15568, 1994b.
- Yoshioka, N., and M. Kikuchi, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 1143-1146, 1993.
- Yoshioka, N., and M. Yoshioka, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 113-116, 1995.
- Yoshioka, M., and N. Yoshioka, *J. Appl. Phys.*, 78, 3431-3437, 1996a.
- Yoshioka, N., and M. Yoshioka, *Philosophical Mag.*, A, 74, 1273-1286, 1996b.