

界面波による地質学的不連続面の動的すべり

上西幸司¹・H.P. ROSSMANITH²

¹正会員 Dr.rer.nat. 神戸大学助手 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²Dr.phil. Institute of Mechanics, Vienna University of Technology (Wiedner Hauptstr. 8-10/325, 1040 Vienna, Austria)

本論文では、波動と静的荷重を受ける不連続面（界面）の動的干渉について実験、数値解析を行い、地震や山はね被害発生機構について考察する。実験では、高速度カメラを用いた動的弾性法により、波の干渉による弾性ひずみ変化の様子を撮影し、レーリー波の速度で界面を伝わる波により界面のすべりが誘起されることを示す。数値解析では、差分法に基づいた波動伝播シミュレータ・スウィフト (SWIFT) を用い界面波動抵抗比の影響について考察する。その結果、異種材料間の界面がすべりを起こす際、材料の組み合わせによっては、マッハ波の生成により特定の区域に非常に大きな粒子（加）速度が与えられることが示される。この種のマッハ波が兵庫県南部地震の際発生し、所謂「震災の帯」を形成した可能性がある。

Key Words : *acoustic impedance ratio, contact mechanics, dynamic faulting, earthquake rupture mechanism, Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, fault slip, Rayleigh wave interaction*

1. はじめに

地震や、地中構造物、岩盤斜面の崩壊（山はねなど）は突発的に起きるため人類に長い間恐れられ、その発生機構を説明すべく種々のモデルが提唱されてきた¹⁾。科学的には 1884 年のギルバート²⁾の発見以降、綿密な観測、理論研究、実験により、震源の浅い地震や山はね、岩盤斜面崩壊は地質学的不連続面（界面）のすべりにより起こることが示されたが、未だすべりの発生機構については分からないことが多い。古典理論では、界面の剛体モデル、応力やひずみの特異点の分布を仮定するモデル、せん断破壊による亀裂進展のモデルなどが提唱され、各々その妥当性が検討されてきた。研究の多くは、界面は平面状で、そのすべりは摩擦によって大きく支配されるとみなしている³⁾。また、これら古典的モデルは、ある一点で発生したすべりが破壊停止まで界面全体に広がっていく、と仮定している⁴⁾。

これに対し、ヒートン⁵⁾は、地震動の逆解析結果から、すべりは破壊停止まで界面（断層）全体に広がっていくのではなく、パルス的に誘起され、数秒のうちにすべり動は収まっていることを示した⁶⁾。また、剛性の大きく異なる二物体の界面に沿って、

動的な界面剥離の領域を含んだ界面波（以下、界面剥離波と呼ぶ）が伝わるということが知られており⁶⁾、界面剥離波が通過する際に界面の圧縮応力が低減されるため界面のすべりが起きることが実験室における摩擦試験結果から報告されている⁷⁾⁻¹⁰⁾。地震時には、最初の破壊面で発生したレーリー波がこのような界面剥離波に変化する、と考えられている⁴⁾。

しかしながら、この界面剥離波によるすべり発生機構の妥当性については、未だ確固たる結論には至っていない⁴⁾。数学的には、静的圧縮、せん断を受ける界面に沿って界面剥離波が安定して伝わることを示されているが¹¹⁾⁻¹³⁾、この数学解で与えられる波が伝播するには無限のエネルギーが供給されねばならないため、その物理的妥当性が疑問視されている^{8),14)}。数値解析では、静的圧縮応力を受ける性質の類似した二物質の界面に沿って伝播する界面剥離波は急速に減衰するが¹⁵⁾、界面に粗さが存在する場合は界面剥離波は安定して伝わることを示されている¹⁰⁾。また、二次元数値解析により、簡単な摩擦則を満たす平面状の界面に沿って伝わる界面剥離波が瞬時に多数の小パルスにわかれることが報告されている¹⁶⁾。

本研究では、以上の研究結果を考慮に入れ、界面波（一般レーリー波）による界面のすべりについて

考察を行った¹⁷⁾⁻²¹⁾。まず、動的光弾性法を用いたモデル実験を行い、次に、差分法に基づき開発した波動伝播シミュレータ・スウィフド(SWIFD)^{22),23)}により数値解析を行い、その成果を公表してきた¹⁷⁾⁻²¹⁾。そして、本論文ではこれらのモデル解析で得られた結果を踏まえ、1995年兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)時の所謂「震災の帯」の発生機構について考察する。

2. レーリー型の波の特性

ここで、レーリー型の波の特性についてまとめておく。等方等質の線形弾性体においては、レーリー波は分散することなく、表面近傍にエネルギーを集中した形で、せん断波よりも遅い速度で伝播する^{24),25)}。解析的には、任意のレーリー波の応力場、変位場は、1つの複素ポテンシャルによって記述することができる²⁶⁾。特に、集中荷重によりレーリー波が生成される場合、レーリー波の表面応力は集中荷重の荷重率 $dp(t)/dt$ に比例するので、複素ポテンシャルを一意に決定することができる^{26),27)}。求めた複素ポテンシャルから応力場を計算すれば、レーリー波の面内最大せん断応力の分布図を描くことができる。理論的に予想される最大せん断応力分布の典型例を図-1(a)に示す。図は、爆源で生じた集中荷重により発生したレーリー波が左から右へと自由表面に沿って伝播する様子を示している¹⁹⁾。図中の高密度の縞模様より、レーリー波のエネルギーが表面近傍に集中していることがわかる。なお、計算で用いた集中荷重 $p(t)$ は^{19),26)}

$$p(t) = A \sum_{n=1}^4 B_n (t - t_n)^2 H(t - t_n) \quad (1)$$

と表される。ここで、 A は集中荷重最大値、 $H(t - t_n)$ はヘビサイドの階段関数であり、荷重は時間 $t = t_1$ ($=0$) から t_4 まで作用する。係数 $B_1 \sim B_4$ は

$$\begin{cases} B_1 = \frac{1}{t_0 t_2} \\ B_2 = -\frac{1}{t_2(t_0 - t_2)} \\ B_3 = \frac{t_4 - t_0}{t_0(t_0 - t_2)(t_4 - t_3)} \\ B_4 = -\frac{t_3 - t_0}{t_0(t_0 - t_2)(t_4 - t_3)} \end{cases} \quad (2)$$

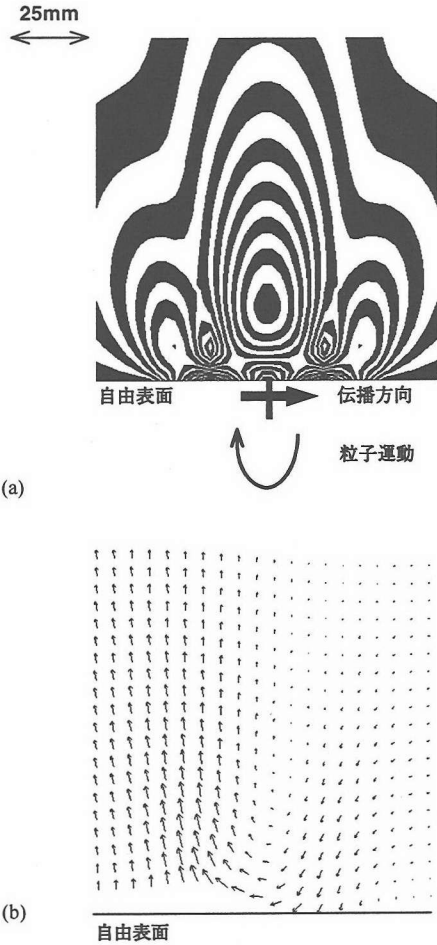


図-1 自由表面に沿って左から右へ伝播するレーリー波。
(a) 最大せん断応力の分布図, (b) 粒子運動のベクトル表示。

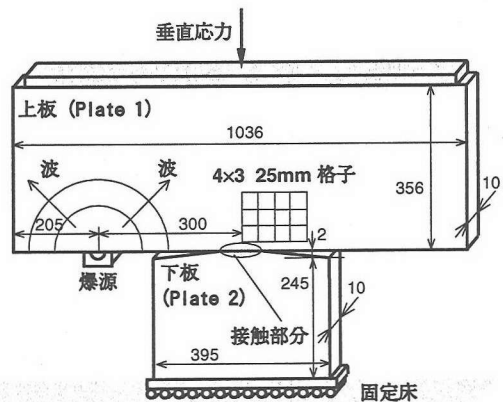


図-2 実験モデルの概略 (単位: mm)。

であり、荷重が最大値 A に到達する時刻 t_0 は、

$$t_0 = \frac{t_3 t_4}{t_3 + t_4 - t_2} \quad (3)$$

で与えられる²⁶⁾。図-1 では簡単のため、 $t_0=2t_2$, $t_3=3t_2$, $t_4=4t_2$ とした場合の結果を示している。

図-1 (a) の場合と同じ集中荷重により生じたレーリー波の粒子運動の様子を図-1 (b) に示す。図に見られる、表面での垂直 (上下) 方向の粒子の動きは、界面などでの接触の問題において重要な働きをすると考えられる。

3. 実験による考察

(1) 実験の概要

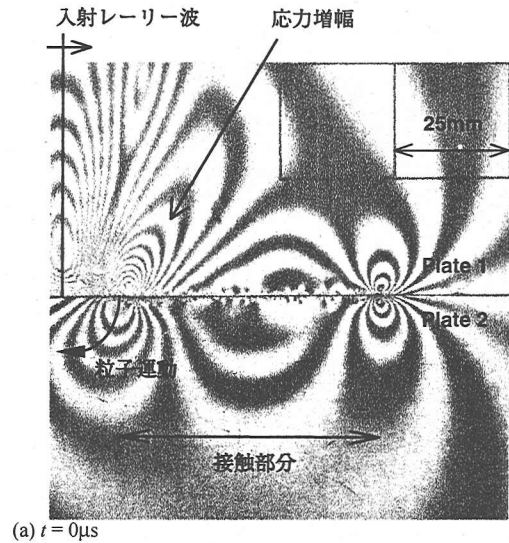
まず、クランツ・シャルディン (Cranz-Schardin) 高速度カメラを用いた動的弾性法により、静荷重を受け、一部が接触している界面と (一般) レーリー波の干渉による光弾性縞変化の様子の撮影を行った。実験モデルの概略を図-2 に示す。実験モデルは、透明、等方等質の2枚のプレキシガラス (Araldite B) からなり、下板 (Plate 2) の上面には、中心部分のみが上板 (Plate 1) に接触するようあらかじめ切り込みが入れている。不要な反射波が干渉して結果を乱さないように上板、下板の寸法を定め、2枚の板にはあらかじめ静的な応力を載荷しておいた。

上板の表面上、接触部分中心から 300mm 離れた地点で少量の火薬を爆発させ、レーリー波を発生させた。接触部分の長さは 55mm であり、発生したレーリー波の波長は 75mm であった。入射する (一般) レーリー波の接触部分に対する相対的な位置により、接触面に働く応力が増大または減少することになる。なお、接触部分は糊付けしなかった。

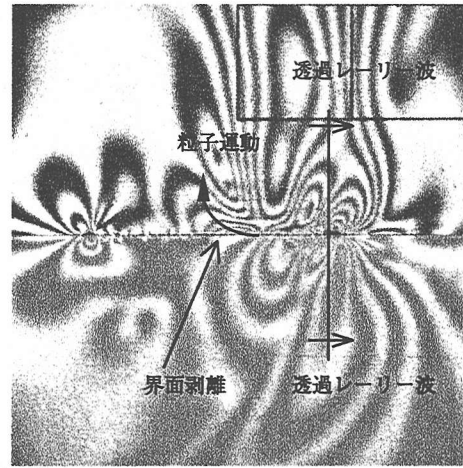
(2) 実験結果

以下、実験結果について考察する。なお、静的なせん断力が加わった場合、接触部分が複数ある場合の実験も行ったが^{18), 19)}、本論文では、接触部分は1箇所、静的なせん断力がなく、垂直方向の静的な荷重が働いている場合の結果についてのみ述べる。

図-3 は動的な干渉の様子を撮影したものである。図では、光弾性縞 (最大せん断応力の分布) が示されており、上板 (Plate 1) 中を左から右へと伝播する (一般) レーリー波が接触部分と干渉している様子を表している。 t は、レーリー波入射により接触



(a) $t = 0\mu\text{s}$



(b) $t = 53\mu\text{s}$

図-3 実験で得られた光弾性縞。最大せん断応力の分布を表す。

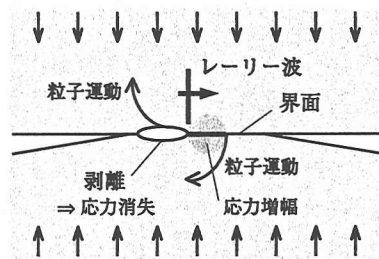


図-4 (一般) レーリー波による界面の動的な剥離。

部分左端での応力（縞の数に比例する）が最大となったときからの時間を示す。

図-3 (a) は入射レーリー波が接触部分の左端に到達したときの様子を示している。縞の数の比較により、接触部左端での応力が、この段階ではまだ動的影響が無視できるほどに小さい接触部右端での応力と比べ、かなり大きいことがわかる。この接触部左端での応力の増大は、レーリー波の伝播に伴う表面での垂直（上下）方向の粒子運動によるものと考えられる。すなわち、図-1 (b) に見られるように、レーリー波の前半部分は進行方向に対し下、後ろ向きの動きを粒子に与えるため、既に接触状態にあった界面上の粒子が下板表面を押す方向に動き、界面における応力を増幅したと考えられる。

レーリー波が接触部分と干渉し始めると、厳密な意味でのレーリー波は界面に沿っては伝わらず、界面波（一般レーリー波）が波動エネルギーを伝搬していく。この界面波が接触部分を通過するとき、波動エネルギーの一部が下板にも伝わるが、その様子を図-3 (b) に示す。図中、レーリー波後半部が与える上、後ろ向きの粒子運動により、界面が剥離している様子が見える。この界面の一時的な剥離（すべりを伴う）は、下板表面近傍に、上板で見られる縞模様に対応する縞がないことからわかる。界面が接触していれば下板でも同じ縞が見られるはずである。

以上の、界面応力の動的な増減、界面の剥離発生機構の概略を図-4 にまとめて示す。

4. 数値解析

次に、差分法に基づき開発した波動伝播シミュレータ・スウィフト(SWIFD: Solids・Wave・Impact・Fracture・Damage)^{22), 23)}を用いて実験モデルと同じ二次元問題につき解析を行った。解析の際、接触部分はモール・クーロンの摩擦則を満たすと仮定し、上述の実験とよく一致する結果を与える物性値（摩擦係数 $\mu=0.3$, 粘着力なし）を用いた。

(1) 波動エネルギーの分配

接触部分での動的な干渉の際、透過、反射したレーリー波のもつ波動エネルギーを計算した結果を、入射レーリー波の波動エネルギーに対する相対的な値で図-5 に示す。図より、入射レーリー波波長が接触部分の長さと同程度の場合、入射波のもつエネルギーのうち、50%以上が疎密波、せん断波として周囲に放

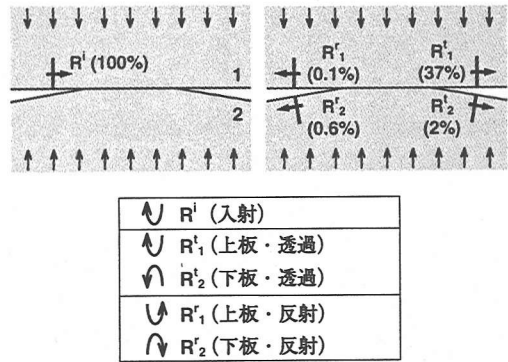


図-5 透過、反射レーリー波のもつ波動エネルギー。

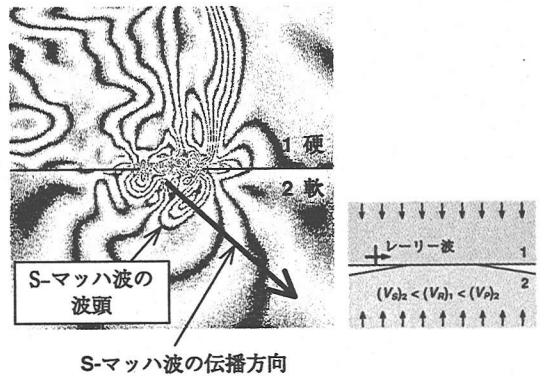


図-6 異種材料間の界面のすべりにより発生した S-マツハ波の伝播。

射され、ごく一部のみが透過レーリー波として更に伝わっていくことがわかる。また、反射波により運ばれるエネルギーは無視できるほどに小さい。

(2) 波動抵抗比の影響

続いて、形状は同じであるが、界面が異種材料間にある場合の動的な干渉について解析を行った。その結果、材料の波動抵抗の比により波の透過、反射の干渉パターンが大きく変わることがわかった。

図-6 は数値計算により得られた最大せん断応力分布図であり、入射レーリー波の速度 $(V_R)_1$ 、材料 2 のせん断波速度 $(V_S)_2$ と疎密波速度 $(V_P)_2$ が、 $(V_S)_2 < (V_R)_1 < (V_P)_2$ （具体的には、 $(V_R)_1 / (V_S)_2 = 1.379$ 、 $(V_R)_1 / (V_P)_2 = 0.796$ ）の関係を満たす場合を示している。なお、図-6 は図-3 (b) の段階に相当する。

図-6 の場合、一般レーリー波は、波動抵抗の大きい材料 1 のレーリー波速度(V_{R1})で伝わるので、接触面では、波のエネルギーは波動抵抗の小さい材料 2 に対して遷音速的に供給される。そのため、せん断型のマッハ波 (S-マッハ波) が形成され、エネルギーが集中した形で界面から遠方へと伝わっていく。

5. 結果の考察とモデルの応用

(1) 不連続面形状の影響

実際の不連続面は完全な平面ではなく、あらゆる規模において粗さ、凹凸が存在し、例えば、地震をモデル化するときには、断層のアスぺリティ (asperity) という概念が用いられる。断層のアスぺリティ部分は、すべりを起こしにくい、すべる際、その程度が大きく、高エネルギーの高周波を発生するため、地震被害の解析、予想において非常に重要である^{28), 29)}。

本研究では、界面接触部の剥離 (すべり) により、比較的大きな波動エネルギーが疎密波、せん断波として遠方へと放射されることが示された。すなわち、スケールを大きくすれば、モデルの界面接触部は断層のアスぺリティに対応すると考えられる。従って、数値解析で求めた波動エネルギーの分配パターンは実際の地震被害の解析、予想においても重要な意味をもつと考えられる。以下、具体例を挙げて考察する。

(2) 1995 年兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災)

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災) においては、断層のすべりは浅い震源から野島断層に沿って淡路島方向へ、また同時に須磨・諏訪山断層に沿って神戸市中心部の方向へと伝わったと考えられている (図-7 (a))^{30), 31)}。

地震の際、須磨・諏訪山断層の近くで大きな被害が発生したが、帯状の被害領域は断層とは平行ではなかった (図-7 (b) 濃灰色部)。この所謂「震災の帯」は沿岸部特有の地質構造により発生したと考えられている³²⁾⁻³⁵⁾が、ここでは、本研究で用いたモデルの解析結果を応用して「震災の帯」発生機構について考察してみる。

須磨・諏訪山断層面は水平面に対しほぼ垂直であることが知られている^{30), 31)}ので、解析の第一段階としては、断層面に直交する面を考慮した二次元モデルで十分であると考えられる。震災の帯の左 (西) 端 (図-7 (b)) 部地下では比較的大きなすべりが起

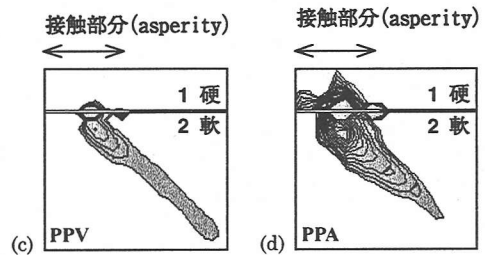
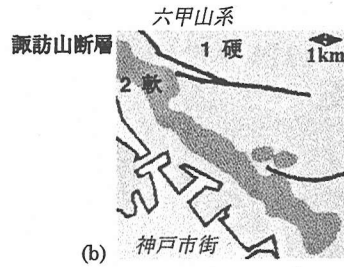
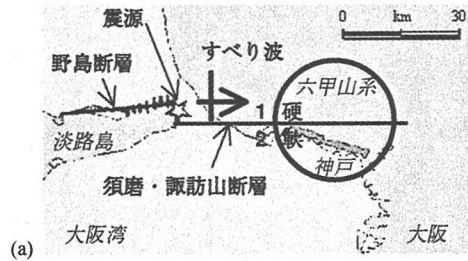


図-7 兵庫県南部地震と数値解析結果 (最大粒子速度 PPV, 最大粒子加速度 PPA の特に大きい領域) の比較。

こった、すなわちアスぺリティが存在していたと考えられ^{30), 31)}、また、せん断の擾乱が神戸中心部に集中した形で伝播し、そのために大きな粒子 (加) 速度が生じたことが記録されている^{36), 37)}。このことは、アスぺリティの破壊により生じたせん断波がマッハ型の波であったことを意味すると考えられる。

上で述べたように、断層面上のアスぺリティは実験モデルの接触部分に対応する。また、図-6 において異種材料間 ($(V_s)_2 < (V_R)_1 < (V_p)_2$) 界面接触部分が界面波によりすべるときに、S-マッハ波が生じることが示された。モデルの材料 1 は、花崗岩主体で波動抵抗が大きく、地震による被害が比較的小さかった六甲山系に、材料 2 は主に沖積土から成り波動抵抗が小さい地域に相当する。「震災の帯」は波動抵抗の小さい地域 (材料 2) にのみ見られた。

動的な干渉過程において、対象とする材料の各点が受ける速度、加速度の最大値は、最大粒子速度 (PPV)、最大粒子加速度 (PPA) と呼ばれ、鉱山や採石場での発破や地震工学において重要なパラメータとなっている。図-7(c), (d) は、数値解析図-6 の場合 ($(V_s)_2 < (V_R)_1 < (V_P)_2$) において、高 PPV (図-7(c)), PPA (図-7(d)) を示す領域を図示したものである。図より、異種材料間界面の動的なすべりの結果生じる PPV, PPA の特に大きい領域が、神戸地区で見られた「震災の帯」の形状 (図-7(b)) に似た分布をすることがわかる。断層 (界面) と高 PPV (PPA) 領域のなす角度は動的なすべりの際発生する S-マッハ波 (図-6) の伝播方向の影響を受ける。さらに詳しい解析は現地より正確な地質状況も含めた三次元モデルに基づかなければならないが、簡単な二次元モデルを用いても地震における断層のすべりとその結果生じる波動現象についての情報を得ることができることが以上の結果により示された。

6. おわりに

本研究の目的は、静的な応力を受け、一部分のみが接触している界面の、一般レーリー (界面) 波による動的なすべりの発生機構に関するより詳細なる知見を得ることであった。観察された界面応力の増幅、消失、界面のすべりは一般レーリー波の伝播に伴う粒子の動きにより説明されることが示された。このような界面波が高い圧縮力の働く地殻中の界面において存在すれば、地震や山はねに関して長い間謎とされてきた以下の現象が説明できると考えられる^{7), 8), 9), 10)}: 界面のすべりはパルス的に起こること、すべりが時間的にも空間的にも複雑であること³⁸⁾⁻³⁹⁾、すべり時に、せん断破壊理論に基づいた予想よりもはるかに多くの疎密波が発生すること、せん断破壊ならば生じるはずの摩擦熱が検知されないこと、実際の断層において静的なせん断応力がせん断力によるすべりを起こし得ないほど低レベルであること。また、(一般) レーリー波は弾性表面波 (SAW) デバイスをはじめさまざまな分野で応用、利用されているので、本研究で得られた結果は実用的にも重要であると考えられる。

謝辞: オーストリア科学財団 (Austrian National Science Foundation: FWF) の研究プロジェクト No P10326-GEO による支援に感謝致します。

参考文献

- 1) Bolt, B.A.: *Earthquakes and Geological Discovery*, Scientific American Library, New York, 1993.
- 2) Gilbert, G.K.: A theory of earthquakes of the great basin with a practical application, *Am. J. Sci.*, vol.27, pp.49-54, 1884.
- 3) Scheidegger, A.E.: *Principles of Geodynamics*, Third, Completely Revised Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- 4) Turcotte, D.L.: Earthquakes, fracture, complexity, *Proceedings of the IUTAM Symposium on Nonlinear Analysis of Fracture*, Willis, J.R., ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.163-175, 1997.
- 5) Heaton, T.H.: Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture, *Phys. Earth Planet. Int.*, vol.64, pp.1-20, 1990.
- 6) Schallamach, A.: How does rubber slide? *Wear*, vol.17, pp.301-312, 1971.
- 7) Brunc, J.N., Brown, S., and Johnson, P.A.: Rupture mechanism and interface separation in foam rubber models of earthquakes: a possible solution to the heat flow paradox and the paradox of large overthrusts, *Tectonophysics*, vol.218, pp.59-67, 1993.
- 8) Anooshehpour, A., and Brunc, J.N.: Frictional heat generation and seismic radiation in a foam rubber model of earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, vol.143, pp.735-747, 1994.
- 9) Brune, J.N.: Particle motions in a physical model of shallow angle thrust faulting, *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, vol.105, L197-L206, 1996.
- 10) Mora, P., and Place, D.: Simulation of the frictional stick-slip instability, *Pure Appl. Geophys.*, vol.143, pp.61-87, 1994.
- 11) Comninou, M., and Dundurs, J.: Elastic interface waves involving separation, *J. Appl. Mech.*, vol.44, pp.222-226, 1977.
- 12) Comninou, M., and Dundurs, J.: Can two solids slide without slipping? *Int. J. Solids Structures*, vol.14, pp.251-260, 1978.
- 13) Comninou, M., and Dundurs, J.: Elastic interface waves and sliding between two solids, *J. Appl. Mech.*, vol.45, pp.325-330, 1978.
- 14) Freund, L.B.: Discussion: elastic interface waves involving separation, *J. Appl. Mech.*, vol.45, pp.226-228, 1978.
- 15) Day, S.M.: Numerical simulation of fault propagation with interface separation (abstract), *EOS Trans. AGU*, vol.72(44), p.486, 1991.
- 16) Andrews, D.J., and Ben-Zion, Y.: Wrinkle-like slip pulse on a fault between different materials, *J. Geophys. Res.*, vol.102, pp.553-571, 1997.
- 17) Uenishi, K., Rossmanith, H.P., and Knasmillner, R.E.: Interaction of Rayleigh pulse with non-uniformly contacting interfaces, *Proceedings of the International Conference on Materials and Mechanics '97*, The Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, pp.95-100, 1997.
- 18) Uenishi, K., Rossmanith, H.P., Knasmillner, R.E., and Böswarth, C.: Rayleigh pulse interaction with partially contacting dissimilar interfaces, *Damage and Failure of Interfaces*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.305-314, 1997.
- 19) Uenishi, K.: Rayleigh pulse - dynamic triggering of interface slip, Ph.D. Thesis, Vienna University of Technology, Vienna, 1997.
- 20) Rossmanith, H.P., and Uenishi, K.: Fault dynamics - dynamic triggering of fault slip, *Proceedings of the International Symposium on Rock Stress*, Sugawara, K. and Obara, Y. eds., A.A. Balkema, Rotterdam, pp.27-34, 1997.
- 21) Uenishi, K., Rossmanith, H.P., and Knasmillner, R.E.: Rayleigh pulse-induced fault slip: model and application, *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.249-254, 1998.
- 22) Rossmanith, H.P., and Uenishi, K.: *SWIFD User's Manual*

- Version 1995, Fracture and Photo-Mechanics Laboratory, Vienna University of Technology, Vienna, 1995.
- 23) Rossmannith, H.P., and Uenishi, K.: PC software assisted teaching and learning of dynamic fracture and wave propagation phenomena, *Teaching and Education in Fracture and Fatigue*, E & FN Spon, London, pp.253-262, 1996.
 - 24) Rayleigh, J.W.S.: On waves propagated along the plane surface of an elastic solid, *The Proceedings of the London Mathematical Society*, vol.17, pp.4-11, 1885.
 - 25) Lamb, H.: On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol.A203, pp.1-42, 1904.
 - 26) Cardenas-Garcia, J.F.: On Rayleigh waves and Rayleigh wave extension of surface micro-cracks, Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, 1983.
 - 27) Dally, J.W., and Thau, S.A.: Observations of stress wave propagation in a half-plane with boundary loading, *Int. J. Solids Structures*, vol.3, pp.293-308, 1967.
 - 28) Lay, T., and Wallace, T.C.: *Modern Global Seismology*, Academic Press, San Diego, 1995.
 - 29) Morrissey, J.W., and Rice, J.R.: Crack front waves, *J. Mech. Phys. Solids*, vol.46, pp.467-487, 1998.
 - 30) Wald, D.J.: A preliminary dislocation model for the 1995 Kobe (Hyogo-Ken Nanbu), Japan, earthquake determined from strong motion and teleseismic waveforms, *Seism. Res. Let.*, vol.66, pp.22-28, 1995.
 - 31) Wald, D.J.: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, vol.44, pp.489-503, 1996.
 - 32) Kawase, H.: Site effects observed during the Hyogo-Ken Nanbu earthquake of 1995 and strong motion simulation including the basin-edge effect, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Elsevier Science, Oxford, paper No.2031, 1996.
 - 33) Kawase, H.: The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect", Constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted / Rayleigh waves, *Seism. Res. Let.*, Vol.67, pp.25-35, 1996.
 - 34) Suzuki, T., Hakuno, M., and Igarashi, S.: Numerical simulation on magnification of the ground motion in the irregular surface layer, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Elsevier Science, Oxford, paper No.305, 1996.
 - 35) Pitarka, A., Irikura, K., Iwata, T., and Sekiguchi, H.: Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol.88, pp.428-440, 1998.
 - 36) Nakamura, Y.: Waveform and its analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu earthquake, *JR Earthquake Information*, vol.23c, Railway Technical Research Institute, 1995.
 - 37) Toki, K., Irikura, K., and Kagawa, T.: Strong motion data recorded in the source area of the Hyogo-Ken-Nanbu earthquake, January 17, 1995, Japan, *J. Nat. Disas. Sci.*, vol.16, pp.23-30, 1995.
 - 38) Rice, J.R.: Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, vol.98, pp.9885-9907, 1993.
 - 39) Ben-Zion, Y., and Rice, J.R.: Slip patterns and earthquake populations along different classes of faults in elastic solids, *J. Geophys. Res.*, vol.100, pp.12,959-12,983, 1995.

(1999.5.14 受付)

PULSE-INDUCED SLIP OF A PLANE OF WEAKNESS

Koji UENISHI and H.P. ROSSMANITH

Pulse interaction with a partially contacting plane of weakness (interface) is investigated experimentally as well as numerically. The interface is subjected to static pre-stresses. Using dynamic photoelasticity in conjunction with high speed cinematography, the evolution of the dynamic interaction is recorded by means of isochromatic fringe patterns (contours of maximum shear stress). It is shown that interface slip can be triggered by a pulse that propagates along the interface at the relevant Rayleigh wave speed. Numerically, a finite difference wave propagation simulator SWIFD is used to discuss dynamic rupture in laterally heterogeneous structures by considering the effect of acoustic impedance mismatch. The results indicate that upon interface rupture, Mach waves, which carry a relatively large amount of concentrated energy, can be generated and propagated off the interface contact region (asperity). Such Mach waves can cause concentrated wave-induced damage in a particular region. It is possible that the "damage belt" found in Kobe, Japan, on the occasion of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, was generated by Mach waves.