

インバージョンモデルに基づく震源すべりの不均質性

Characteristics of Fault Heterogeneity Inferred from Inversion Fault Models

池 浦 友 則

要 約

震源過程の不均質性は強震動特性に大きな影響を及ぼすため、特に断層至近距離における強震動評価に際しては震源の不均質性を的確にモデル化することが重要である。本研究では、その基礎的な資料を得るために、既往のインバージョン解析で推定された39地震49個の不均質震源のモデルをもとに、1) 破壊開始点分布の特徴、2) 断層幅方向におけるすべり量分布の特徴、3) 全断層面におけるアスベリティ領域の面積占有率、4) アスベリティ個数の把握を試みた。

目 次

- I. はじめに
- II. 不均質震源のデータ
- III. 断層破壊の全体的な特徴
- IV. アスベリティ特性
- V. むすび

I. はじめに

強震動評価においては、震源からの地震波の励起特性、震源から評価地点への波動伝播特性および評価地点の地盤増幅特性の3つの要因をそれぞれの確に推定することが重要である。このうち、震源から評価地点への波動伝播特性ならびに評価地点の地盤増幅特性は、日常的に発生している小地震の観測記録を用いて経験的あるいは理論的に把握することが可能である。これらに対して震源からの地震波の励起特性は、震源における不規則な破壊過程に依存するため予測が難しく、これをいかにして的確に与えるかが強震動評価における大きな課題である。

この問題に対し、過去の地震における断層破壊がどのような特徴を持っていたのかを考えることは有意義であろう。従来、大地震の震源すべり分布が非常に不均質なものであったことは想像されていたが、それを具体的に議論するだけの情報は乏しかった。しかしながら近年、大地震の地震動データの充実とともにインバージョン解析技術の発展によって、比較的多くの地震について詳細な破壊過程が推定されるようになってきている。そこで本研究では、多様な震源不均質性のモデル化に資するため、それらの推定結果をもとに実地震の震源におけるすべり分布の特徴を検討した。

II. 不均質震源のデータ

インバージョンで求められた不均質震源モデルをTable 1に示す。このうち、1981年10月25日PlayaAzul地震と1986年5月7日AndreanofIsland地震では同一文献内でそれぞれ異なる方法により2

つのモデルが得られている。このためそれらを含めるとモデル総数は49個となる。

表でRegion-Typeは発生位置の分類であり、ILが内陸、PBがプレート境界、ISが海洋性プレート(スラブ)内を意味する。また、Mech. Typeはすべりの向きによる分類であり、SSが横ずれ、RVが逆断層、ROBとNOBがそれぞれ逆断層型・正断層型の斜めずれ、NMが正断層を意味する。インバージョン解析の条件としては、用いられたデータの種類(Inverted-Data)、断層面の数(Nfp)、仮定された断層面の長さ(L)、幅(W)および断層面の平均的な分割サイズ($\sqrt{\Delta S}$)を示した。このうちデータの種類のSM、TL、GDがそれぞれ強震動記録、遠地実体波記録、地殻変動データを意味する。また、L、Wでは断層面が複数ある場合には積算した値を示した。一方、インバージョン解析の結果に関しては、仮定した断層面における平均すべり量(Do)および本研究の検討に用いた分布量(Distribution-Data)とその表現形式([Type])を掲げた。分布量としてはすべり量(Slip)、モーメント(Mo)、短周期地震波放射強度(SPRI)があり、それらの表現形式としてはブロック図(BC)、コンター図(CD)、スリップベクトル図(SV)、表形式(DT)、数値データ(DD)がある。このうち、図で分布が表現されているBCとSVについては図からすべり量を読み取った。また、CDについてはコンターラインを読み取り、コンターライン上における分布値を拘束しながらスプライン補間で断層面上のすべり分布を復元し、インバージョン解析における分割サイズに応じて小領域毎の平均すべり量を算出した。

分類毎のモデル数をTable 2に示す。内陸地震(IL)が31個と最も多く、プレート境界地震(PB)はその半分程度である。また、スラブ内の地震(IS)は2個しかない。一方、すべりの向きで分類すると、プレート境界地震(PB)はすべて逆断層型の縦ずれ成分を有しているが、内陸地震(IL)では縦ずれ成分を有する地震と純粋な横ずれ地震がほぼ半々の構成となっている。

本研究ではこれらのモデルをデータとして震源破壊の統計的な特徴を調べる。分析にあたっては総ての地震が同一の性質を持つとは

キーワード：地震、地震動

Table 1 インバージョン震源モデル
(Inversion Fault Models)

Date	Earthquake Name	Region-Type *1	Mech. Type *2	Magnitude *3	Moment (Nm) *4	Inverted Data *5	Nfp *6	L *7 (km)	W *8 (km)	$\sqrt{\Delta S}$ (km) *9	Do (m) *10	Distribution-Data[Type]*11	Ref.
1923/09/01	Kanto	PB	ROB	MJ7.9	7.8E+20	TS,GD	1	130	70	11	2.4	Slip[SV]	1)
1961/08/19	N.Mino	IL	SS	MJ7.0	9.0E+18	SM	1	16	12	4.0	0.91	Slip[DT]	2)
1968/05/16	Off Tokachi	PB	ROB	MJ7.9	2.8E+21	SM	1	240	120	40	1.6	Mo[BC]	3)
1969/09/09	M.Gifu	IL	SS	MJ6.6	5.4E+18	SM	1	20	11	3.3	0.68	Slip[DT]	2)
1971/02/09	SanFernando	IL	RV	MS6.6	1.4E+19	SM,TS,GD	2	18	27	1.4	0.95	Slip[DD]	4)
1974/05/09	Izu	IS	SS	MJ6.9	7.6E+18	SM	1	25	9.0	3.9	1.1	Slip[DT]	2)
1974/10/03	Peru	PB	RV	MW8.0	1.2E+21	TS	2	250	168	15	0.74	Slip[CD]	5)
1975/04/21	M.Oita	IL	ROB	MJ6.4	3.4E+18	SM	1	10	10	3.3	1.3	Slip[DT]	2)
1978/09/16	Tabas	IL	ROB	MS7.4	1.3E+20	SM,TS	1	95	45	4.5	1.0	Slip[DD]	6)
1979/03/14	Petatlan	PB	RV	MS7.6	1.5E+20	TS	1	60	60	5.0	0.28	Slip[CD]	7)
1979/08/06	CoyoteLake	IL	SS	MS5.7	3.5E+17	SM,TS	1	6.0	6.5	0.31	0.26	Slip[DD]	8)
1979/10/15	ImperialValley	IL	SS	MS6.9	5.0E+18	SM,TS	1	42	11	2.8	0.59	Slip[DD]	9)
1980/06/20	E Off Izu	IS	SS	MJ6.7	7.0E+18	SM	1	20	12	3.5	1.1	Slip[DT]	2)
1981/10/25	PlayaAzul	PB	RV	MS7.3	7.1E+19	TS	1	30	30	2.3	0.50	Slip[CD]	10)
						TS	1	30	30	2.3	0.49	Slip[CD]	10)
1982/01/09	NewBrunswick	IL	RV	MW5.6	2.0E+17	TS	1	8.0	9.0	1.1	0.080	Slip[CD]	11)
1983/05/24	JapanSea	PB	RV	MJ7.7	3.0E+20	SM	2	90	30	11		Mo[DD]	12)
1983/10/28	BorahPeak	IL	NM	MS7.3	2.3E+19	TS	1	52	26	3.3	0.43	Slip[CD]	13)
1984/04/24	MorganHill	IL	SS	MS6.1	2.7E+18	SM	1	30	10	0.93	0.16	Slip[CD]	14)
1984/04/24	MorganHill	IL	SS	MS6.1	2.1E+18	SM,TS	1	32	12	1.5	0.27	Slip[CD]	15)
1984/09/14	W.Nagano	IL	SS	MJ6.8	4.0E+18	SM	1	12	9.0	3.0	0.89	Slip[DT]	2)
1984/09/14	W.Nagano	IL	SS	MJ6.8	2.7E+18	SM,GD	1	15	10	1.0	0.51	Slip[CD]	16)
1985/03/03	Chile	PB	RV	MS7.8	1.0E+21	TS	1	170	90	10	1.5	Slip[CD]	17)
1985/09/19	Michoacan	PB	RV	MS8.1	1.5E+21	SM,TS	1	180	139	14	1.0	Slip[CD]	18)
1985/09/21	Zihuatanejo	PB	RV	MS7.6	1.4E+21	TS	1	90	90	7.5	0.43	Slip[CD]	10)
1985/10/05	Nahanni	IL	RV	MW6.6	1.0E+19	TS	1	40	17	2.2	0.48	Slip[CD]	11)
1985/12/23	Nahanni	IL	RV	MW6.8	1.5E+19	TS	1	48	21	2.5	0.41	Slip[CD]	11)
1986/05/07	AndreanofIslands	PB	RV	MS7.7	1.0E+21	TS	1	270	70	10	1.2	Slip[CD]	17)
						TS	1	280	100	20	0.84	Slip[CD]	17)
1986/07/08	NorthPalmSprings	IL	ROB	MS6.0	1.8E+18	SM,TS	1	22	15	2.0	0.15	Slip[DD]	19)
1987/10/01	WhittierNarrows	IL	RV	ML5.9	1.0E+18	SM	1	10	10	1.0	0.26	Slip[DD]	20)
1987/11/24	SuperstitionHills	IL	SS	MS6.6	4.8E+18	SM	1	20	12	1.1	0.83	Slip[DD]	21)
1987/12/17	E Off Chiba	IS	SS	MJ6.7	1.5E+19	SM	2	16	24	3.6		Slip[DT]	22)
1988/11/25	Saguenay	IL	RV	MW5.9	6.1E+17	TS	1	10	10	1.1	0.15	Slip[CD]	11)
1989/10/18	LomaPrieta	IL	ROB	MS7.1	3.0E+19	SM,TS	1	40	20	2.9	1.4	Slip[DD]	23)
1989/10/18	LomaPrieta	IL	ROB	MS7.1	3.4E+19	SM,GD	1	38	17	2.1	1.1	Slip[DT]	24)
1989/12/25	Ungava	IL	RV	MW6.0	1.3E+18	TS	1	13	6.0	1.0	0.41	Slip[CD]	11)
1991/06/28	SierraMadre	IL	RV	ML5.8	2.8E+17	SM,TS	1	4.9	6.0	0.54	0.17	Slip[DD]	25)
1992/06/28	Landers	IL	SS	MW7.2	9.0E+19	SM	3	80	15	2.5	2.0	Slip[DT]	26)
1992/06/28	Landers	IL	SS	MW7.2	7.7E+19	SM,TS,GD	3	93	15	5.4	2.0	Slip[DD]	27)
1993/01/15	Off Kushiro	IS	NOB	MJ7.8	4.3E+20	SM	1	40	60	10	2.2	Slip[DT]	28)
1993/07/12	SE Off Hokkaido	PB	RV	MJ7.8	1.3E+19	SM	2	152	45	16		SPRI[DT]	29)
1994/01/17	Northridge	IL	RV	MW6.7	9.8E+19	SM,TS,GD	1	18	21	1.4	0.98	Slip[DD]	30)
1995/01/17	S.Hyogo	IL	SS	MJ7.2	2.0E+19	SM	1	45	20	5.0	2.0	Mo[DT]	31)
1995/01/17	S.Hyogo	IL	SS	MJ7.2	1.9E+19	SM	3	60	22	3.0	0.24	Slip[SV]	32)
1995/01/17	S.Hyogo	IL	SS	MJ7.2	2.4E+19	SM,TS,GD	2	60	20	2.9	0.96	Slip[SV]	33)
1995/09/14	Copala	PB	RV	MS7.2	7.3E+19	SM	1	75	55	5.0	0.51	Slip[CD]	34)
1995/09/14	Copala	PB	RV	MS7.2	2.1E+20	TS	1	250	100	10	0.25	Slip[CD]	35)
1995/10/09	Jalisco	PB	RV	MW8.0	5.9E+20	TS	1	180	90	10	1.1	Slip[CD]	36)

*1)Region-Type(IL=Inland, PB=Plate-Boundary, IS=Inslab);*2)Mech.Type(SS=Strike-Slip,RV=Reverse,ROB=Reverse-Oblique,NOB=Normal-Oblique, NM=Normal);*3)Magnitude(MW=Moment-Magnitude,MJ=JMA-magnitude,MS=Surface-Magnitude,ML=Local-Magnitude);*4)Moment=Total-Seismic-Moment(Nm);*5)Inverted-Data(SM=Strong-Motion,TS=Telesismic,GD=Geodetic);*6)Nfp=Number of fault planes;*7)L=Iversion-Fault-Length(km);*8)W=Iversion-Fault-Width(km);*9) $\sqrt{\Delta S}$ =Size of Fault Segmentation(km);*10)Do=Average-Slip(m);*11)Distribution-Data(Slip=Slip,Mo=Seismic-Moment,SPRI=Short-Period-Radiation-Intensity); [Type](BC=Block-Chart,CD=Contour-Dist.,DD=Digital-Data,DT=Table-Data,SV=Slip-Vector)

限らない点に注意が必要であるが、モデルの数も限られているため、あまり細かく分類しても安定した傾向は見出し難い。ここではとりあえず内陸地震(IL)とプレート境界地震(PB)といった大まかな分類に従って各々の特徴を調べることにした。上記のとおり、内陸地

震は逆断層型を有する地震と横ずれ地震とが半々であるが、プレート境界地震はほとんどが逆断層型の成分を有する地震であるため、この分類によってメカニズムによる違いもある程度は考慮することができる。なお、2つのスラブ内地震(IS)はいずれも深い地震であ

Table 2 モデル数
(Number of Inversion Models)

Slip Area	SS	RV	ROB	NOB	NM	TOTAL
I L	16	9	5	0	1	31
P B	0	14	2	0	0	16
I S	1	0	0	1	0	2
TOTAL	17	23	7	1	1	49

Table 3 空間分解能
(Spatial Resolution)

$\Delta S/S_o$		NUMBER of MODELS		
max ~ min		IL	PB	TOTAL
0.1585	0.1000	1	0	1
0.1000	0.0631	3	0	3
0.0631	0.0398	2	3	5
0.0398	0.0251	1	2	3
0.0251	0.0158	2	0	2
0.0158	0.0100	7	2	9
0.0100	0.0063	6	4	10
0.0063	0.0040	7	7	14
0.0040	0.0025	1	0	1
0.0025	0.0016	1	0	1
TOTAL		31	18	49

るため、ここではプレート境界地震(PB)に組み込むこととした。

さて、これらの不均質分布のデータで空間的にどの程度まで詳細な分布性状が分かるだろうか。Table 3 は断層面全体の面積 So に対する平均的な分割小領域の面積($\Delta S=\Delta L^2$)の割合を指標に、モデル数を調べた結果である。これによれば、内陸地震(IL)では $\Delta S/So=0.0158\sim0.004$ 、プレート境界地震(PB)では $\Delta S/So=0.01\sim0.004$ のモデルが多く、データベースの空間分解能は断層面全体に対しておおよそ面積で1/100、長さのサイズで1/10程度と考えられる。

また、先に述べたようにデータとなるモデルの数が少ないため地震規模毎に震源不均質性を議論することは難しい。このため本研究では地震規模による違いを無視し、断層面の面積 So を1に基準化して不均質すべり分布の平均的な特徴を捉えることを試みる。ただし、インバージョン解析では実際の破壊領域よりも広めの断層面が仮定されることが多い。そこで、インバージョンモデルの断層面積 So と地震モーメント Mo の関係を調べた。結果をFig.1に示す。図で●が内陸地震(IL), ○がプレート境界地震(PB)の分布である。図中には参考としてSato(1979)による $Mo\sim S$ 関係³⁷⁾とその2倍の関係を示している。これによればインバージョンモデルの断層面積はSato(1979)のスケールリングによる断層面積の1~2倍に対応する。

III. 断層破壊の全体的な特徴

1. 破壊開始点の位置

断層破壊の全体的な特徴として、まず破壊開始点が断層面のどの辺りに位置しているかを調べた。Fig.2 a, b では内陸地震(IL)とプレート境界地震(PB)に分けて、それぞれ長さ $L=1$ 、幅 $W=1$ に基準化した断層面上に破壊開始点の位置(+)を重ね書きした。これによれば内陸地震の場合は、破壊開始点(Fig.2a)が断層面の下半分に位置することが多く、概して下から破壊が始まることを示している。これに対してプレート境界地震(PB)では破壊開始点(Fig.2b)がむしろ断層面の上半分に位置する例がやや多い。ただし、この傾向は内陸地震の場合ほど明らかではなく、またデータも少ないので有意性を判断することは難しい。なお、断層長さ方向における破壊開始点の分布については内陸地震、プレート境界地震のいずれについても目立つ特徴

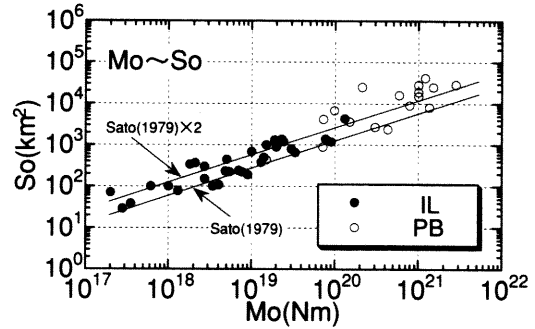


Fig.1 インバージョン領域面積の分布
(Distribution of Inversion Areas)

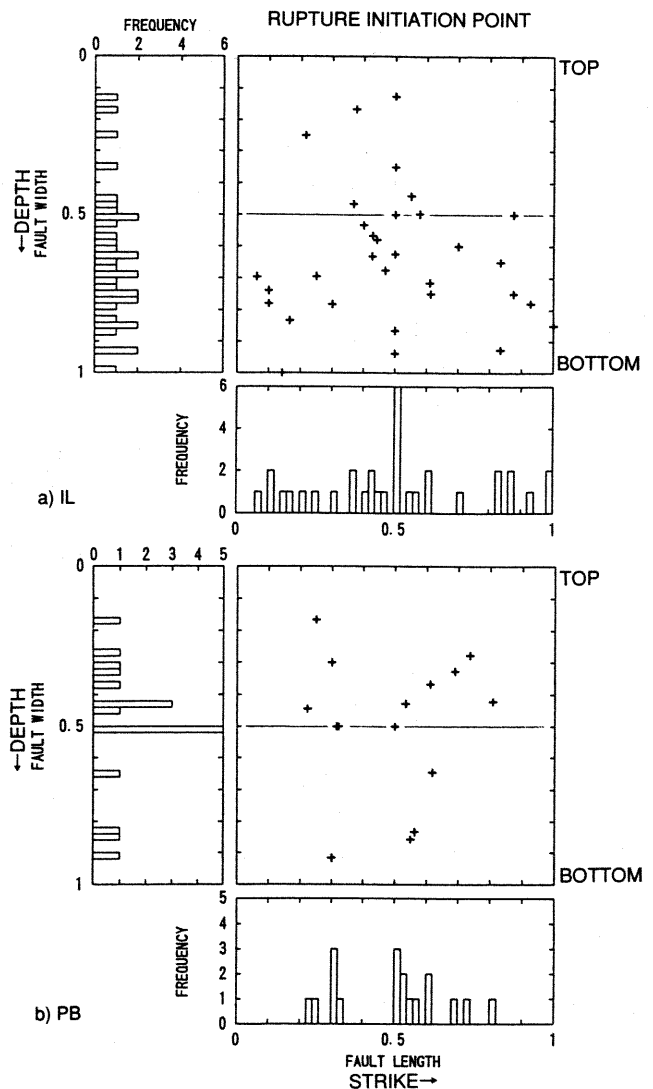


Fig.2 破壊開始点の分布
(Distribution of Fault Initiation Points)

は認められない。

2. 断層幅方向のすべり分布

次に、断層面におけるすべり量分布の特徴を調べた。なお、以降の解析では、 Mo やSPRIの分布データもすべり分布に比例するものとして取り込んでいる。Fig.3は内陸の横ずれ地震(IL-SS)、内陸の逆

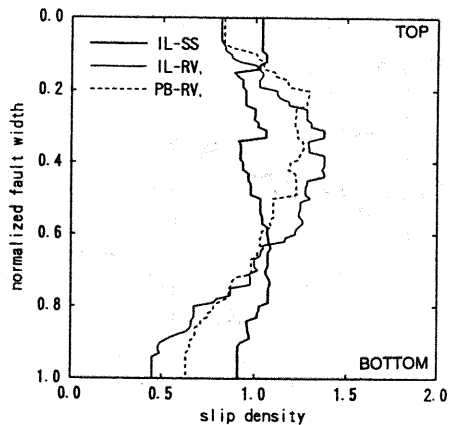


Fig.3 断層幅方向の相対すべり量分布
(Relative Slip Distribution along the Fault Width)

断層地震(IL-RV)およびプレート境界の逆断層地震(PB-RV)の3種類について断層幅方向のすべり量分布密度の平均を調べた結果である。ここで逆断層地震には逆断層型の斜めずれ地震も含んでいる。Fig.3によれば、内陸の横ずれ地震(IL-SS)におけるすべり量分布密度では幅方向における系統的な変化は見られず、上端から下端までおおむね一様に分布する傾向である。これに対して、同じ内陸地震でも逆断層型の地震(IL-RV)のすべり量分布は断層幅の中央付近で大きく、断層の上端と下端で小さくなる特徴を示す。また、プレート境界地震の逆断層地震(PB-RV)も断層面上から1/3~1/4の位置で最も大きくなる分布形状であり、内陸地震の逆断層型地震(IL-RV)と共通した特徴を持つ。この結果は、断層面上における幅方向のすべり量の分布形状が、内陸地震(IL)かプレート境界地震(PB)かといった発生場所による分類よりも、むしろ横ずれ型(SS)か逆断層型(RV or ROB)かというメカニズム型式に支配されることを示唆する。

IV. アスベリティ特性

1. アスベリティの定義と有効モデル数

これまでインバージョン解析で明らかにされた実地震の震源過程をみると、いずれの地震でも断層面上のすべり分布は一様ではなく、すべりの大きな領域が局在する特徴が見い出される。このような微視的な特徴は、十分に遠方の観測点では地震動強さを大きく変える要因とはならないが、震源近傍においては地震動強さに大きな違いを生じる原因となる。断層面の中で特に大きなすべりが生じる部分はアスベリティと呼ばれており、強震動予測においてもアスベリティを考慮することが提案されるようになっている³⁹⁾。そこで以降では、インバージョンモデルをもとに実地震におけるアスベリティ特性の把握を試みる。

アスベリティの特性を調べるにあたって、まずどのようにアスベリティを定義づけるかが問題である。内陸地震のアスベリティ特性を調べた既往検討³⁹⁾⁴⁰⁾では断層面上ですべり量 D が平均すべり量 Do あるいはその1.5倍を超える部分でアスベリティ領域を規定している。ただし、 Do の1倍あるいは1.5倍といった閾値には物理的な意味が見い出せない。そこで本研究では、 D が Do の k (≥ 0)倍を越える部分をアスベリティとし、アスベリティ領域を任意の閾値 $k=D/Do$ の関数と

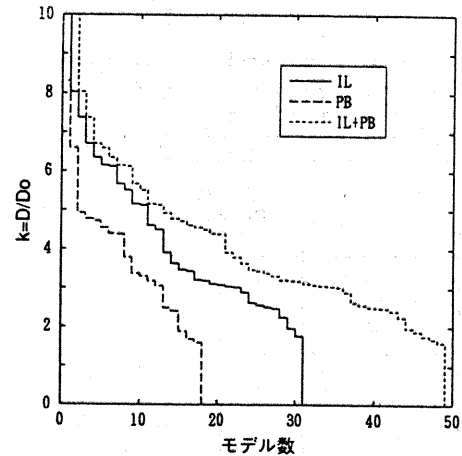


Fig.4 $k=D/Do$ とモデル数の関係
(Relation between $k=D/Do$ and Number of Models)

して与えることにした。

ところで、このように $k=D/Do$ によって平均的なアスベリティ特性を調べるとすれば、断層面上における最大の D/Do がモデル毎に異なるため、 k の上限もモデル数による制限を受ける。そこで $k=D/Do$ とモデル数の関係を調べた。結果をFig.4に示す。これによれば内陸地震(IL)とプレート境界地震(PB)のいずれも $k=3\sim 4$ 程度でデータ数が半減する。さらに $k=4$ 以上になると内陸地震(IL)の場合は $k=7\sim 8$ 、プレート境界地震(PB)は $k=5$ 程度に向かってそれぞれ徐々に減少する。

この図で検討できる k の範囲を考えると、 $k=8$ を超えるモデルは内陸地震とプレート境界地震で各々1モデルずつあるが、この程度の数では、もともとインバージョンの手法やデータの違いもあるので、平均特性を調べる上ではあまり参考にできない。データに基づくとはいっても、比較的安心して議論ができるのは $k\leq 3$ 程度の範囲であり、多少冒険を覚悟したところで $k\leq 6$ 程度と考えられる。

2. アスベリティ面積占有率

アスベリティ領域が全断層面の中に占める割合を明らかにするために、個々のモデル毎に $D\geq kDo$ を満足する領域の面積 Sa を求め、断層面(面積 So)に占める割合(アスベリティ面積占有率) Sa/So を算定した。それらの結果から求めた内陸地震(IL)、プレート境界地震(PB)のグループ毎の平均値と土標準偏差($\pm s$)の幅をFig.5に示す。全体的な特徴を見ると、まず $k=0$ から $k=3\sim 4$ までの範囲では、内陸地震(IL)とプレート境界地震(PB)の平均アスベリティ面積占有率はほぼ一致しており、この範囲では地震のタイプによる違いはそれほど大きくない。一方、 $k=4\sim 6$ の区間では、有効なモデルが少ないプレート境界地震(PB)は平均値がやや大きく変動するが、有効なモデルが10個程度ある内陸地震(IL)では単調に減少し比較的安定している。

なお、内陸地震(IL)に関しては $k=1.5$ で $Sa/So=0.22$ ⁴⁰⁾、 $k=2$ で $Sa/So=0.136$ ⁴¹⁾との結果がある。図中にはそれらの結果を◎で示したが今回の結果はこれらとも良く対応している。

3. アスベリティ個数

$D/Do\geq k$ を満足するアスベリティ領域は、 k が十分小さいうちは一固まりの領域となるが、 k が大きくなると断層面の中で島状に分かれて分布する。1995年兵庫県南部地震(MJ7.2)においては、大きなすべりが発生したアスベリティ領域が2~3箇所あり、その各々が震源

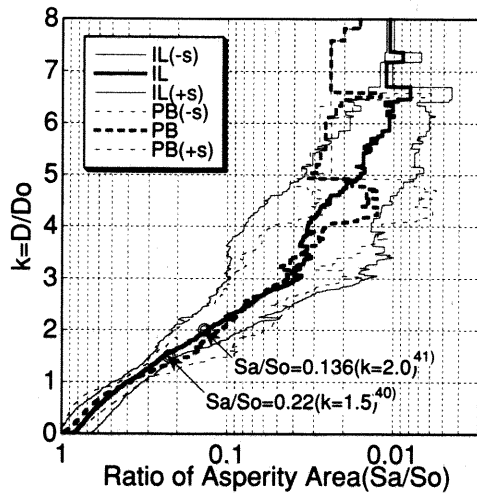


Fig.5 アスぺリティ面積占有率
(Ratio of Asperity Area to Whole Fault Area)

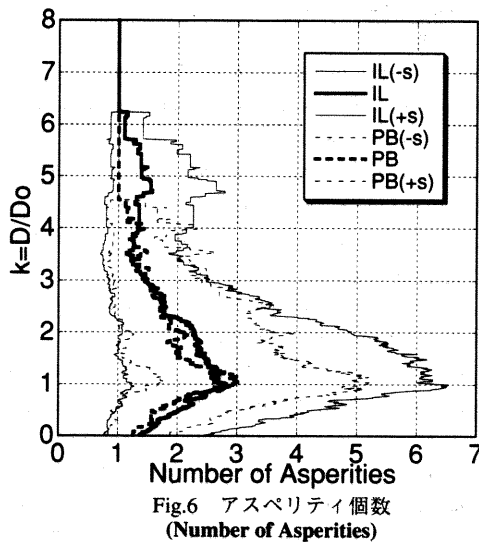


Fig.6 アスぺリティ個数
(Number of Asperities)

近傍に大振幅の地震波をもたらしたとされる⁴²⁾。したがって、強震動を再現する不均質震源モデルを考える際には、アスぺリティ領域が複数に分かれて存在することを前提としなければならない。そこで各モデルについてそれぞれ $D/Do \geq k$ を満足する領域のうち連続するものを単位としてアスぺリティの個数を調べ、次いで、内陸地震(IL)・プレート境界地震(PB)のグループ毎にそれぞれ対数平均を求めた。対数平均を採用したのは0個以下のサンプルがあり得ないことによる。内陸地震(IL)・プレート境界地震(PB)のグループ毎の平均アスぺリティ個数を±標準偏差(±s)の幅とともにFig.6に示す。図で有効データが比較的多い $k \leq 4$ 程度の範囲に注目し、内陸地震(IL)とプレート境界地震(PB)のアスぺリティ個数を比較すると、 $k=1.5 \sim 2$ 付近では両者の間に若干の違いがあるが、その違いも最大で0.5程度であり、これらを丸めて整数化して考えればアスぺリティ個数は内陸地震とプレート境界地震とでそれほど変わらないといえる。

V. むすび

既往のインバージョン解析で推定された不均質な震源モデルをデータベース化し、それらをもとに1) 破壊開始点分布の特徴、2) 断

層幅方向におけるすべり量分布の特徴、3) 全断層面におけるアスぺリティ領域の面積占有率、4) アスぺリティ個数を把握した。

なお、今回はすべり量分布をもとにアスぺリティ特性を調べたが、地震波の励起という点では地震モーメントの方がより直接的な指標となるとの指摘⁴³⁾もある。このため、地震モーメント分布に着目した場合にアスぺリティ特性がどのようになるか興味を持たれる。

また、いずれにしても、これまでのインバージョン解析の多くは周期1~2s以上の地震動記録に基づいている。このため、それらから得られる震源像は周期数秒以上の地震波の励起特性を示すものであり、工学的に必要な周期帯域を全てカバーするものではない。しかしながら、このようにして得られる結果は、現実的な不均質震源をモデル化する上で一定の拘束条件として活用することができる。今後、短周期地震波の震源像に関するデータの蓄積に伴い、より詳細なモデル化の方法を探っていくことを考えている。

参考文献

- 1) Wald, D. J., and P. G. Somerville; Variable-slip rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan, earthquake: Geopdetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85(1995), pp.159-177.
- 2) Takeo, M., and N. Mikami; Fault heterogeneity of inland earthquake in Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 65(1990), pp.541-569.
- 3) Mori, J., and K. Shimazaki; Inversion of Intermediate-period Rayleigh waves for source characteristics of the 1968 Tokachi-Oki earthquake, *J. Geophys. Res.*, 90(1985), pp.11374-11382.
- 4) Heaton, T. H.; The 1971 San Fernando earthquake: A double event?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72(1982), pp.2037-2062.
- 5) Hartzell, S., and C. Langer; Importance of model parametrization in finite Fault Inversions: Application to the 1974 Mw 8.0 Peru earthquake, *J. Geophys. Res.*, 98, B12(1993), pp.22123-22134.
- 6) Hartzell, S. and C. Mendoza; Application of an iterative least-squares waveform inversion of strong-motion and teleseismic records to the 1978 Tabas, Iran, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81(1991), pp. 305-331.
- 7) Mendoza, C.; Finite fault analysis of the 1979 March 14 Petatlan, Mexico, earthquake using teleseismic P waveforms, *Geophys. J. Int.*, 121(1995), pp.675-683.
- 8) Liu, H.-L., and D. V. Helmberger; The near-source ground motion of the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73(1983), pp.201-218.
- 9) Hartzell S. H., and T. H. Heaton; Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73 (1983), pp.1553-1583.
- 10) Mendoza, C.; Coseismic slip of two Mexican earthquakes from teleseismic body waveforms: Implications for asperity interaction in the Michoacan plate boundary segment, *J. Geophys. Res.*, 98, B5(1993), pp.8197-8210.
- 11) Hartzell, S., C. Langer, and C. mendoza; Rupture histories of Eastern North American earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84(1994), pp. 1703-1724.

- 12) Fukuyama, E., and K. Irikura; Rupture process of the 1983 Japan Sea (Akita-oki) earthquake using a waveform inversion method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76(1986), pp.1623-1640.
- 13) Mendoza, C., and S. H. Hartzell; Inversion for slip distribution using teleseismic P waveforms: North Palm Springs, Borah Peak, and Michoacan earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78(1988), pp.1092-1111.
- 14) Mikumo, T., and T. Miyatake; Heterogeneous distribution of dynamic stress drop and relative fault strength recovered from the results of waveform inversion: the 1984 Morgan Hill, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85(1995), pp.178-193.
- 15) Hartzell, S. H., and T. Heaton; Rupture history of the 1984 Morgan Hill, California, earthquake, from the inversion of strong motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76(1986), pp.649-674.
- 16) Yoshida, S., and K. Koketsu; Simultaneous inversion of waveform and geodetic data for the rupture process of the 1984 Naganoken-Seibu, Japan, earthquake, *Geophys. J. Int.*, 103(1990), pp.355-362.
- 17) Yoshida, S.; Waveform inversion for rupture process using a non-flat seafloor model: application to 1986 Andreanof islands and 1985 Chile earthquake, *Tectonophysics*, 211(1992), pp.45-59.
- 18) Mendoza, C., and S. H. Hartzell; Inversion for slip distribution using teleseismic P waveforms: North Palm Springs, Borah Peak, and Michoacan earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78(1988), pp.1092-1111.
- 19) Hartzell, S.; Comparison of seismic waveform inversion results for the rupture history of a finite fault: Application to the 1986 North Palm Springs, California, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 94(1989), pp.7515-7534.
- 20) Hartzell, S., and M. Iida; Source complexity of the 1987 Whittier Narrows, California, earthquake from the inversion of strong motion records, *J. Geophys. Res.*, 95(1990), pp.12475-12485.
- 21) Wald, D. J., D. V. Helmberger, and S. H. Hartzell; Rupture process of the 1987 Superstition Hills earthquake from the inversion of strong-motion data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80(1990), pp.1079-1098.
- 22) Fukuyama, E.; Inversin for the rupture details of the 1987 East Chiba earthquake, Japan, using a fault model based on the distribution of relocated aftershocks, *J. Geophys. Res.*, 96(1991), pp.8205-8217.
- 23) Wald, D. J., D. V. Helmberger, and T. H. Heaton; Strong-motion and broadband teleseismic analysis of the earthquake for rupture-process modeling and hazard assessment, 'Tha Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989---Main-shock characteristics', Ed. by P. Spudich, U. S. Geological Survey Professional Paper 1550-A(1996), pp.A235-A262.
- 24) Steidl, J. H., and R. J. Archuleta; Are rupture models consistent with geodetic measurements?, 'Tha Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989---Main-shock ccharacteristics', Ed. by P. Spudich, U. S. Geological Survey Professional Paper 1550-A(1996), pp.A195-A208.
- 25) Wald, D. J.; Strong motion and broadband teleseismic analysis of the 1991 Sierra Madre, California, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 97(1992), pp.11033-11046.
- 26) Cotton, F., and M. Campillo; Fequency domain inverson of strong motions: Appication to the 1992 Landers earthquake, *Geophys. Res.*, 100, B3(1995), pp.3961-3975.
- 27) Wald, D. J., and T. H. Heaton; Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California, earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84(1994), pp.668-691.
- 28) Ide, S., and M. Takeo; The dynamic rupture process of the 1993 Kushiro-oki earthquake, *J. Geophys. Res.*, 101, B3(1996), pp.5661-5675.
- 29) Kakehi, Y., and K. Irikura; High-frequency radiation process during earthquake faulting-Envelope inversion of acceleration seismograms from the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki, Japan, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87(1997), pp.904-917.
- 30) Wald, D. J., T. H. Heaton, and K. W. Hudnut; The slip history of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86(1996), pp.S49-S70.
- 31) Ide, S., M. Takeo, and Y. Yoshida; Source process of the 1995 Kobe Earthquake: Determination of spatio-temporal slip distribution by Bayesian modeling, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86(1996), pp.547-566.
- 32) Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi, and M. Hoshiba; Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records, *J. Phys. Earth*, 44(1996), pp.473-487.
- 33) Wald, D. J.; Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, 44(1996), pp.489-503.
- 34) Courboux, F., M. A. Santoyo, J. F. Pacheco, and S. K. Singh; The 14 September 1995(M=7.3) Copala, Mexico, earthquake: A source study using teleseismic, regional, and local data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87(1997), pp.999-1010.
- 35) Mendoza, C.; Rapid derivation of rupture history for large earthquakes, *Seism. Res. Letters*, 67(1996), pp.19-26.
- 36) Zobin, V. M.; The rupture history of the Mw 8.0 Jalisco, Mexico, earthquake of 1995 October 9, *Geophys.J. Int.*, 130(1997), pp.220-228.
- 37) Sato, R.; Theoretical basis on relationships between focal parameters and earthquake magnitude, *J. Phys. Earth*, 27(1979), pp.353-372.
- 38) 入倉孝次郎・香川敬生・釜江克宏・関口春子; 強震動予測のためのレシピ, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム(1998), pp.125-128.
- 39) Somerville, P. G.・香川敬生・入倉孝次郎・澤田純男・巽誉樹; 断層面上のすべり分布の経験的なモデル化の検討, 第10回日本地震工学シンポジウム(1998), pp.123-128.
- 40) Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada; Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 1(1999), pp.59-80.
- 41) Somerville, P.; Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, 日本地震学会シンポジウム「強震動予測による地震災害の軽減をめざして」, 日本地震学会・強震動委員会(1997), pp.7-10.
- 42) 釜江克宏・入倉孝次郎; 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 500(1997), pp.29-36.
- 43) 石井透・佐藤俊明・P. G. Somerville; 強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出, 日本建築学会構造系論文集, 527(2000), 61-70.