

# 1983 年 11 月 16 日夏威夷 Kaoiki 地震 ( $M_s=6.6$ ) 前后的小震震源机制解

傅 征 祥

(中国北京 100036 国家地震局分析预报中心)

## 摘 要

1983 年 11 月 16 日夏威夷 Kaoiki 6.6 级强震是一次近乎直立断面上的走滑型破裂事件。然而,在主震发生前后,小震 ( $M_L \geq 3.0$ ) 的震源机制解却表现出两种类型: (1) 高倾角断面上的走滑型破裂; (2) 地壳内低倾角间断面上的滑动, 它们随时间交替和系统地变化。

关键词 夏威夷 Kaoiki 地震; 震源机制解

## 一、引 言

美国 Hawaii 岛位于北太平洋上长约 6000 km 的 Hawaiian-Emperor 火山链的东南端, 火山和地震活动都很强烈<sup>[1]</sup>。Hawaii 岛上分布有五个主要的活动火山, 尤以南部的 Kilauea 和 Mauna Loa 火山最为活跃, 相应地, 南部的地震活动较活跃。例如, 1868 年 4 月 2 日, 在南夏威夷的 Hilea 地区发生的 8 级大地震, 它是美国地震史上最强的地震之一<sup>[2]</sup>; 1975 年 11 月 29 日, 在夏威夷东南的 Kalapana 发生 7.2 级地震, 它是夏威夷有记录的地震史上第二个强震(图 1)。所以, 研究夏威夷地区的地震活动、震源机制、震源过程和地震预报等问题, 引起地震学家浓厚的兴趣。

许多研究表明, 夏威夷的地震活动直接或间接地与火山活动过程有密切关系<sup>[3]</sup>。

1. 与岩浆活动-火山喷发系统活动直接有关的地震, 或发生在裂谷系统下面的浅部(深约 1—4 km), 或沿着火山口下面垂直的岩浆通道附近发生。这些事件多以震群形式出现, 空间集中和震级不大为其特征。它们是由于岩浆库和通道中的体积变化或压强变化引起应力集中的结果。

2. 在裂谷带之外 3—15 km 的地壳内部(深度在 6—13 km) 发生的地震, 强度较大, 空间分布比较分散。前述两次 7 级以上的大地震就出现在这些地域中。其力源可能来自侵入到裂谷中的岩浆对两侧产生的强大的侧向压力。在这样的构造环境中, 在火山-岩浆系统之间的地壳岩体中的断裂上, 将作用着强大的剪切力, 在地壳中近乎水平的界面上将承受着水平推力。这样, 夏威夷的构造地震将具有两种破裂机制: (1) 在古老海洋地壳顶部和枕状玄武岩层之间的近乎水平的软弱面上(约深 10 km), 发生低倾角的断层活

1988 年 11 月 15 日收到本文初稿, 1989 年 5 月 10 日决定采用。

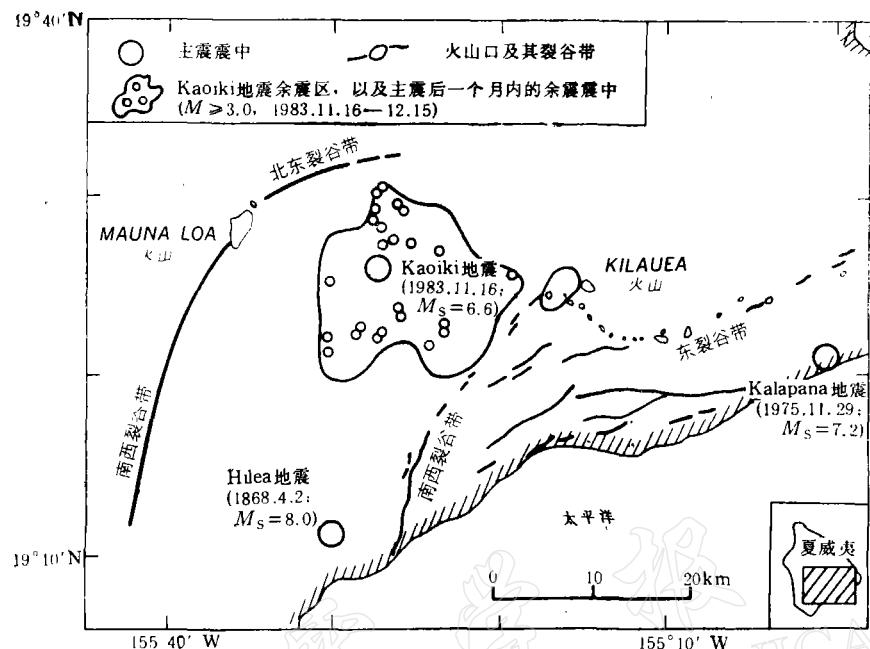


图1 1986年11月16日夏威夷Kaoiki 6.6级的主震震中位置、余震区和构造背景简图。  
图上还标出1868年4月Hilea 8级地震和1975年11月Kalapana 7级地震的震中位置

动。前述的1975年的Kalapana 7.2级地震和1982年1月21日的Hilea 5.6级地震均属于这种类型的断裂活动<sup>[4]</sup>；(2)在地壳中高倾角或近乎直立的走滑断层上的断裂活动。本文讨论的1983年11月16日Kaoiki 6.6级地震，以及同一地区的1962年6月27日6.1级地震和1974年11月30日的5.5级强震，它们的震源机制解都表现为走滑断裂运动。

本文研究了1983年11月Kaoiki 地震( $M_s = 6.6$ )前后，小震震源机制类型的变化，其结果表明：

1. 在主震前孕育过程的前期(1977—1982年)，小震机制以在地壳中近乎水平的低倾角界面上(深约10 km)的滑动为主；
2. 在主震前孕育过程的后期(1983年1月—1983年11月15日)，地壳中近乎直立的高倾角断面上的走滑型活动占优势；
3. 在主震后余震活动的前期(1983年11月16日—1984年4月)，余震活动机制仍以高倾角断面上的破裂为主；
4. 在余震活动的后期(1984年4月—1985年6月)，余震活动破裂机制又呈现出为低倾角断面上的活动。

上述小震震源机制在主震前后的交替和系统变化，可能是由强震孕育过程中，震源区的应力水平及断面的力学性质所决定。

## 二、研究区域、资料和方法

1. 1983年11月16日 Kaoiki 6.6 级地震, 位于 Mauna Loa 和 Kilauea 火口及其相关裂谷带之间的地域上(图1)。在该主震周围用细线圈出了用微震分布确定的余震区, 形状很不规则<sup>[5]</sup>; 余震区内用小圆圈标出主震后一个月内(至1983年12月15日)三级以上余震的位置。本文研究余震区内, 自1977年至1985年期间小地震( $M_L \geq 3.0$ )的震源机制解。

2. 在美国科罗拉多大学的环境科学合作研究所(Cooperative Institute for Research in Environmental Science, 简称 CIRES), 备有夏威夷火山观象台(HVO)记录和编辑的地震报告和目录。这些资料是1987年 HVO 应用定位程序(Hypo-inverse, 7/85 version)和 Hawaii 的均匀地壳模型(表1)计算获得, 它们包括地震事件的三要素和为求解震源机制所要求的资料(台站方位角, 射线离源角和 P 波初动符号)。由于 Kaoiki 地震及其余震区靠近 HVO 地震台网中心, 余震区微震定位精度小于 2 km<sup>[5]</sup>。

3. 本研究应用 Whitcomb 的震源机制计算机处理程序, 获得 Kaoiki 6.6 级地震前后的小震震源机制解。

表 1 夏威夷的均匀地壳模型

层	层上界面的深度 (km)	P 波速度 (km/s)
1	0	1.9
2	4.6	6.5
3	15.0	6.9
4	16.5	8.3

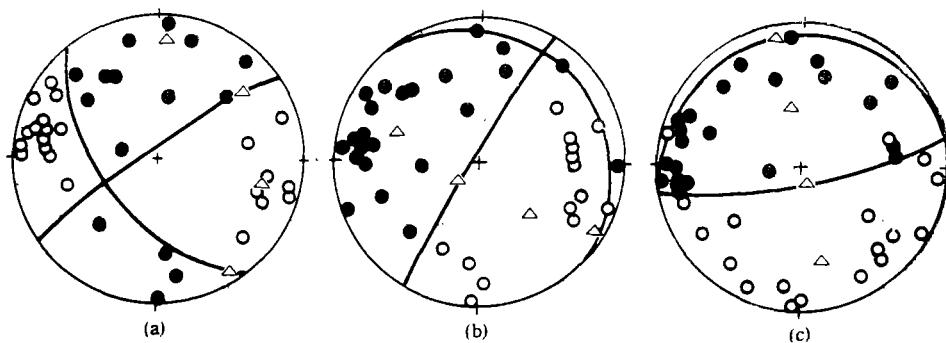


图 2 夏威夷 Kaoiki 主震( $M_s=6.6$ , 1983.11.16)及其前后小震震源机制的典型例子(震源下半球等面积投影)

(a) Kaoiki 主震的走滑型断裂机制(见表 2, No. 25); (b) 低倾角断面上复合性质断裂机制(见表 2, No. 10); (c) 低倾角断面上逆断层断裂机制(见表 2, No. 61)

表 2 夏威夷 Kaoiki 主震及其前后小震震源机制参数 ( $M_L \geq 3.0$ , 1977.1—1985.12)

No.	发震时间		$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度 (km)	震级	$F_1$ (°)	$F_2$ (°)	$P$ (°)	$T$ (°)	$R_1$
	年.月.日	时-分									
01	1977.02.27	18-59	19°28'38	155°27'79	9.2	3.0	120.9	271.8	179.6	3.7	0.09
02	1977.09.16	13-59	19°27'07	155°21'72	7.0	3.2	59.0	308.9	222.9	35.1	0.26
03	1977.11.21	03-37	19°28'23	155°25'59	11.7	3.0	329.5	96.2	206.5	326.6	0.08
04	1978.12.21	16-25	19°27'98	155°23'42	8.5	3.3	246.3	120.9	53.8	196.1	0.06
05	1979.05.17	05-30	19°27'82	155°24'32	10.0	3.4	313.5	120.9	216.0	7.6	0.12
06	1979.07.31	03-30	19°28'20	155°25'76	11.7	4.3	239.0	59.0	149.0	329.0	0.02
07	1979.11.24	21-31	19°24'01	155°27'13	12.7	3.5	113.2	211.2	95.1	324.4	0.14
08	1979.12.05	15-32	19°24'52	155°28'21	11.3	3.8	348.4	223.8	157.1	298.7	0.09
09	1980.02.18	00-13	19°28'23	155°26'51	10.8	3.5	239.0	64.4	154.0	334.8	0.06
10	1981.03.04	16-00	19°24'96	155°28'36	11.1	3.4	315.0	210.2	135.4	286.8	0.02
11	1981.07.24	11-37	19°23'79	155°28'56	10.3	3.0	239.0	18.8	111.3	285.9	0.05
12	1981.08.04	07-47	19°27'80	155°26'88	9.4	3.0	115.0	210.4	88.4	329.5	0.03
13	1981.09.06	22-34	19°24'66	155°29'24	9.9	3.3	120.9	222.9	120.3	324.3	0.05
14	1983.01.26	15-57	19°22'56	155°25'30	10.5	3.2	232.0	141.7	96.8	186.8	0.05
15	1983.03.18	18-45	19°23'29	155°26'61	10.0	3.5	136.7	228.2	93.7	1.2	0.10
16	1983.03.20	23-02	19°21'91	155°25'14	11.3	3.9	161.5	55.7	111.4	13.7	0.11
17	1983.03.21	00-37	19°22'02	155°25'44	11.3	3.4	150.4	59.4	105.8	13.9	0.02
18	1983.03.21	21-36	19°21'22	155°27'80	11.2	3.3	152.6	249.1	114.7	17.8	0.10
19	1983.03.24	02-59	19°25'60	155°28'30	10.9	3.0	124.2	215.5	81.8	347.6	0.19
20	1983.05.31	03-59	19°20'54	155°31'37	23.7	3.4	351.9	101.3	221.8	326.1	0.06
21	1983.07.26	10-21	19°25'61	155°24'61	9.3	3.6	313.6	223.3	268.4	178.4	0.04
22	1983.07.30	07-49	19°25'41	155°24'71	9.8	3.3	13.1	136.0	252.3	352.3	0.07
23	1983.10.04	19-45	19°22'24	155°25'88	10.7	3.1	325.8	234.4	280.9	189.2	0.09
							75.2	84.8	83.2	75.9	

续表 2

No.	发震时间		$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度 (km)	震级	$F_1$ ( $^{\circ}$ )	$F_2$ ( $^{\circ}$ )	$P$ ( $^{\circ}$ )	$T$ ( $^{\circ}$ )	$R_1$
	年.月.日	时-分									
24	1983.10.30	15-49	19°27'06	155°27'19	9.7	3.9	116.1	230.4	95.1	348.3	0.04
25	1983.11.16	06-13	19°25'79	155°27'09	10.9	6.6	44.8	67.6	39.6	76.5	
							58.2	83.8	63.3	72.7	
26	1983.11.16	14-23	19°23'60	155°26'09	11.1	3.3	300.9	81.0	181.5	332.5	0.07
							20.9	73.6	62.5	30.7	
27	1983.11.16	14-57	19°27'23	155°23'51	9.1	3.1	351.8	102.4	218.4	334.8	0.21
							37.9	74.6	68.2	41.8	
28	1983.11.16	16-08	19°25'62	155°19'44	6.4	3.5	243.6	339.3	110.2	203.1	0.12
							67.6	76.5	83.9	64.1	
29	1983.11.16	16-18	19°28'12	155°27'13	8.1	3.0	288.7	194.1	243.0	149.6	0.19
							67.7	79.0	82.3	66.2	
30	1983.11.16	21-17	19°30'13	155°27'16	3.4	3.0	49.5	143.2	270.4	13.2	0.15
							52.6	85.2	68.3	60.7	
31	1983.11.17	12-12	19°22'17	155°28'63	8.7	3.7	289.2	77.0	278.6	182.6	0.17
							45.6	49.1	16.8	88.1	
32	1983.11.19	06-32	19°29'13	155°26'02	9.3	3.0	109.8	210.2	101.3	317.1	0.04
							19.0	86.4	44.5	51.3	
33	1983.11.19	09-18	19°25'04	155°30'03	10.3	3.2	120.9	18.4	97.0	300.9	0.02
							12.5	87.2	48.9	43.5	
34	1983.11.20	03-56	19°22'38	155°28'39	6.9	3.2	41.4	175.2	288.2	18.4	0.17
							50.1	50.3	89.9	25.2	
35	1983.11.23	00-38	19°27'80	155°26'88	8.6	3.1	93.1	247.6	105.3	349.0	0.15
							40.1	52.7	14.3	83.5	
36	1983.11.23	02-33	19°23'57	155°26'05	11.2	3.8	315.0	61.9	165.0	316.6	0.10
							15.1	85.4	51.1	42.4	
37	1983.11.26	17-08	19°28'28	155°27'33	9.1	3.0	278.9	11.5	236.1	144.4	0.15
							73.6	81.1	72.0	84.8	
38	1983.11.27	13-01	19°21'69	155°24'13	13.7	3.1	185.0	331.0	76.3	184.9	0.12
							41.7	54.4	83.8	18.5	
39	1983.11.27	15-20	19°22'38	155°27'45	10.8	3.4	123.8	33.3	79.0	348.0	0.08
							79.2	90.0	82.4	82.3	
40	1983.11.27	15-39	19°22'29	155°27'50	9.7	3.1	210.9	301.9	73.9	169.0	0.14
							66.0	87.7	74.9	71.6	
41	1983.11.27	19-33	19°29'18	155°27'42	7.1	3.7	300.9	37.6	264.6	165.0	0.08
							56.3	80.1	59.1	74.3	
42	1983.11.27	21-29	19°21'41	155°30'27	9.5	3.3	349.5	252.2	181.5	324.4	0.06
							19.7	87.4	45.7	50.6	
43	1983.11.29	10-19	19°22'55	155°23'23	14.1	3.7	193.3	329.6	80.8	175.7	0.09
							47.6	51.6	87.8	23.7	
44	1983.11.29	15-43	19°22'54	155°23'23	13.5	3.1	338.6	153.1	245.2	53.7	0.00
							32.4	57.6	77.3	12.8	
45	1983.12.04	07-39	19°28'80	155°27'80	6.9	3.2	36.5	300.9	257.3	349.9	0.11
							68.1	76.3	64.5	84.5	

续表 2

No.	发震时间		$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度 (km)	震级	$F_1$ (°)	$F_2$ (°)	$P$ (°)	$T$ (°)	$R_1$
	年.月.日	时-分									
46	1983.12.04	19-15	19°27'55	155°25'46	8.2	3.7	15.2	138.8	252.9	1.1	0.12
							42.8	62.8	78.7	32.6	
47	1983.12.06	01-20	19°29'07	155°26'21	7.6	3.0	247.4	135.5	95.8	194.1	0.20
							52.0	64.4	42.2	82.5	
48	1983.12.11	01-47	19°30'36	155°27'34	3.7	3.1	5.5	192.1	279.3	121.7	0.17
							37.2	52.9	82.1	8.4	
49	1983.12.14	20-56	19°22'00	155°30'11	10.0	3.6	78.6	210.3	111.0	307.5	0.11
							10.9	82.6	38.3	52.8	
50	1983.12.18	21-11	19°29'13	155°26'60	8.3	3.2	225.8	135.5	90.6	180.7	0.09
							85.0	90.0	86.5	86.5	
51	1983.12.18	23-41	19°21'50	155°30'08	9.6	3.3	258.6	18.9	117.4	278.6	0.06
							10.9	84.4	51.2	40.2	
52	1983.12.21	15-06	19°21'03	155°30'07	2.7	3.2	52.7	146.2	278.6	10.5	0.15
							71.9	79.3	84.9	69.4	
53	1983.12.21	15-32	19°20'88	155°29'97	2.5	3.3	147.1	53.0	100.7	9.4	0.17
							72.5	77.2	86.8	68.4	
54	1984.01.26	07-16	19°26'00	155°21'28	9.6	3.0	228.4	130.0	85.9	181.7	0.18
							61.0	75.2	58.4	80.6	
55	1984.02.13	10-27	19°24'00	155°26'10	9.1	3.1	7.2	162.8	261.2	49.8	0.12
							28.4	63.7	71.9	20.8	
56	1984.02.15	07-22	19°23'98	155°27'22	11.6	3.5	325.5	218.8	135.0	302.9	0.02
							6.3	88.1	43.4	47.1	
57	1984.02.16	06-52	19°28'94	155°26'80	12.0	3.2	130.0	240.5	126.7	348.8	0.09
							23.4	81.3	40.9	57.1	
58	1984.02.23	20-59	19°25'01	155°30'16	12.0	3.2	166.6	38.8	118.4	323.2	0.10
							15.4	80.3	55.7	36.9	
59	1984.03.27	09-14	19°21'15	155°29'65	6.7	3.1	230.3	324.1	81.2	205.0	0.22
							32.1	87.6	55.2	51.0	
60	1984.04.01	02-22	19°27'27	155°29'51	10.1	3.2	189.2	49.9	129.9	336.5	0.15
							19.1	75.2	60.8	32.0	
61	1984.05.09	15-45	19°22'28	155°29'11	10.2	3.0	258.6	78.1	168.2	347.9	0.04
							10.9	79.0	55.9	34.0	
62	1984.06.12	17-03	19°21'08	155°30'09	9.6	3.6	258.6	60.3	153.2	326.1	0.04
							10.9	79.6	55.4	34.7	
63	1984.06.17	11-05	19°21'41	155°30'10	9.7	3.1	265.0	44.9	140.3	308.0	0.13
							9.4	82.7	52.5	38.1	
64	1984.08.11	23-29	19°27'48	155°29'33	9.7	3.0	142.8	277.5	155.9	23.0	0.19
							29.9	67.9	28.5	69.6	
65	1984.10.16	14-45	19°24'45	155°29'35	10.2	3.5	239.0	43.9	134.9	312.7	0.04
							4.1	85.9	49.0	40.9	
66	1984.11.16	01-01	19°22'24	155°28'84	9.5	3.0	239.0	77.0	165.8	348.4	0.09
							4.1	86.0	48.9	41.0	
67	1985.01.06	09-38	19°22'33	155°28'71	10.0	3.1	269.8	7.6	107.6	267.2	0.08
							10.4	88.5	47.3	44.5	

续表 2

No.	发震时间		$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度 (km)	震级	$F_1$	$F_2$	$P$	$T$	$R_1$
	年.月.日	时-分					( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )			
68	1985.03.04	21-09	19°22'10	155°28'92	9.9	3.0	258.6 10.9	41.8 81.2	137.5	304.0	0.00
69	1985.03.06	22-27	19°22'16	155°28'60	10.3	3.0	265.0 9.4	44.9 82.7	140.3	308.0	0.11
70	1985.04.09	16-54	19°22'96	155°30'42	9.5	3.1	275.1 13.5	70.8 77.6	165.4	333.6	0.13
71	1985.06.17	07-37	19°22'20	155°28'69	10.1	3.1	120.9 12.5	218.7 88.2	116.3 44.6	320.5	0.17
72	1985.12.25	19-06	19°22'31	155°28'56	11.0	3.1	265.0 9.4	44.9 82.7	140.3	308.0	0.06
73	1985.12.31	13-35	19°25'70	155°19'25	4.0	3.1	330.9 7.3	84.0 87.0	347.0 42.5	180.4	0.22
74	1985.12.31	15-33	19°25'13	155°19'37	6.1	3.0	284.2 8.4	91.6 81.7	359.4 36.8	183.2	0.26

注:  $F_1, F_2$ —节面, 上行为节面方位角, 下行为节面倾角;  $P$ —主压应力轴, 上行为轴方位角, 下行为轴仰角;  $T$ —主张应力轴, 上行为轴方位角, 下行为轴仰角;  $R_1$ —矛盾符号比

对于基于 P 波初动资料的震源机制解, P 波初动符号的读数能否保证正确, 是微震台网工作的困难任务之一。为保证地震图记录的运动方向能真实地反映地面运动的方向, 其前提是台站极性必须正确无误<sup>[6]</sup>。本文应用文献[4]的方法, 对台站极性是否正确进行判别。

首先, 根据 HVO 的原始资料, 获得 1983 年 11 月 16 日 Kaoiki 6.6 级主震及其前后 74 个地震 ( $M_L \geq 3.0$ ) 的震源机制解的初步结果, 按照文献[4]的方法, 对该结果进行台站极性是否正确的检查和校正。然后, 在台站极性校正基础上, 重新计算上述的地震震源机制解(表 2)。在图 2 中绘出其中典型的震源机制类型, 它们是震源下半球等面积投影图, 图中的实心圆表示压缩 P 波, 空心圆表示膨胀 P 波, 三角形表示力轴。在表 2 中, 除了列出每一个地震的基本时、空、强参数外, 还给出震源机制两个节面  $F_1$  和  $F_2$  的方位角和倾角, 以及主应力轴  $P$  轴和  $T$  轴的方位角和倾伏角, 表中最后一列是参数  $R_1$ , 表示极性校正后震源机制解中 P 波初动记录符号的矛盾比。所研究的 74 个震源机制中, 86% 的解具有 35 个以上的 P 波初动符号资料。

对一次地震的机制而言, 在较好的定位前提下, 记录到 P 波有效初动符号数目的多少和矛盾比的大小, 有可能作为评价机制解可靠性的指标。本文选用  $R_1 \leq 0.15$  的机制解(共 59 个)作为分析 1983 年 11 月 16 日 Kaoiki 地震 ( $M_s = 6.6$ ) 前后, 余震区内小震震源机制类型变化特征的基本资料。

### 三、震源机制参数的时空变化

研究强震前后震源区内小震震源机制解的时空变化, 有助于了解震源孕育的力学过

程。通常,岩体内断层断裂活动主要有走滑、逆和正断层断裂活动等,它们取决于介质性质、区域作用力的方向、断面的产状及力学性质等因素。实际上,大多数断层的断裂活动往往表现为复合类型。众所周知,由 P 波初动记录求解的震源机制,可以推断主应力的方向和给出两个可能的共轭节面,至于哪一个代表断裂面则是未知的,需要利用其它地学资料和断裂力学知识等加以推断和证明。对于大地震而言,利用大量的余震分布和地表断裂的痕迹可以判断地震断裂面。对于小地震,由于震源体小,几乎不可能在地表上找到断裂。某些文献指出,可以利用 S 波初动和振幅去研究偏振特性,以确定断裂面,但会遇到 S 波初动不易辨别的困难。

本研究对 1983 年 11 月 Kaoiki 走滑型主震前后的小地震是否存在低倾角断层活动类型感兴趣,企图了解强震孕育过程中是否存在断裂类型的系统变化。

在表 2 震源机制解的参数中,将两个节面中倾角较小的一个,编在  $F_1$  一列中的下行。由于主震的地震断裂出露地表,按其走向判断,高倾角的节面是断裂面,它被列在  $F_2$  列中的下行。至于如何判断小地震机制中哪一个节面代表断裂面,将在下面描述中讨论。

### 1. 节面倾角随时间的变化

为了叙述方便,将节面倾角  $\alpha_d$  划分为三个等级: 低倾角 ( $0^\circ \leq \alpha_d \leq 30^\circ$ )、中等倾角 ( $30^\circ < \alpha_d \leq 60^\circ$ ) 和高倾角 ( $60^\circ < \alpha_d \leq 90^\circ$ )。

图 3a 和 b 分别绘出了 Kaoiki 主震前后小震机制节面  $F_2$  和  $F_1$  的倾角随时间变化曲线。从总体上看,  $F_1$  节面的倾角呈现出随时间的系统变化,它可以划分为四个阶段:

(I) 自 1977 年 2 月至 1982 年间,称为孕育过程前期。此间绝大多数事件的  $F_1$  节面倾角  $\alpha_d(F_1)$  都小于  $30^\circ$ ,全部十二个事件的平均值  $\bar{\alpha}_d(F_1)$  为  $18.6 \pm 12.4^\circ$ ;

(II) 自 1983 年 1 月至主震前夕 (1983 年 10 月 30 日),称之为孕育过程后期。此间共有 10 个机制解,  $\bar{\alpha}_d(F_1) = 64.9 \pm 15.0^\circ$ 。和第 (I) 阶段相比较,应用样本平均数差异的  $t$  检验 (在 1% 的显著性水平上),表明这两个阶段之间  $F_1$  节面倾角的差异十分显著;

(III) 自 1983 年 11 月 16 日主震发生后至 1983 年 12 月 21 日,称为余震活动前期。有 22 个余震机制解,其  $F_1$  节面倾角均值  $\bar{\alpha}_d(F_1)$  为  $45.0 \pm 23.8^\circ$ 。由图 3b 可见,此间交错发生倾角差异较大的地震。对比第 III 和第 II 期之间倾角均值的差别,同上的  $t$  检验表明,它们的差异不显著;

(IV) 自 1984 年初至 1984 年 12 月,称为余震活动后期。此间 15 个余震机制  $F_1$  节面倾角的均值为  $12.3 \pm 6.5^\circ$ 。同样应用  $t$  检验,证明余震活动的前期和后期之间,  $F_1$  节面的倾角均值差别很大。

另外,在上述四个阶段中,  $F_2$  节面的倾角都大于  $50^\circ$  (见图 3a) 其均值为  $79.0 \pm 10.2^\circ$ 。这表明在本文研究的小震震源机制中,主要有两种类型,一种是两个节面的倾角都较高,另一种是其中一个节面的倾角较低。具有低倾角节面的震源机制绝大部分出现在主震孕育过程的前期 (I) 和余震活动的后期 (IV)。仔细考察含有低倾角节面的那些地震机制解,它们又可分为二种类型: (1) 纯粹的逆断层断裂活动。典型例子是 1979 年 7 月 31 日、1980 年 2 月 18 日、1984 年 5 月 9 日 (图 2c) 和 1984 年 10 月 16 日的震例。按照它们的震源机制解,地震可能是在低倾角的  $F_1$  节面上的纯粹逆断层运动,也可能是在

高倾角的  $F_2$  节面上作近乎垂直的逆冲运动。在本文前言中, 我们已经指出, 在 Kaoiki 地区的地壳中, 承受着由于岩浆侵入到 Mauna Loa 和 Kilauea 火山通道及其相应的裂谷带中形成的水平侧向挤压。在这样的构造环境中, 在低倾角的  $F_1$  节面上发生断裂运动的可能性远远超过在  $F_2$  节面上的运动; (2) 复合型的断裂活动。典型例子如 1981 年 3 月 4 日(图 2b)、1981 年 9 月 6 日、1984 年 2 月 15 日和 1985 年 1 月 6 日的地震, 它们的机制解表明, 地震可能在低倾角  $F_1$  节面上的正或逆断层断裂活动, 并兼有旋转运动的分量; 也可能是在高倾角  $F_2$  节面上作近乎垂直的剪切断裂运动。与上述的分析相仿, 在 Kaoiki 地壳的构造环境中, 这种类型机制的地震滑动发生在低倾角  $F_1$  节面上的可能性最大。根据这样的初步分析, 本文认为, 在震前孕育的前期和震后余震活动的后期, 震源区小地震表现为在地壳中低倾角界面上的断裂活动。

其次, 两个节面都是高倾角或接近高倾角的地震机制, 集中出现在 Kaoiki 主震前的孕育过程后期(第 II 阶段), 主要表现为走滑型断裂活动(图 3)。

最后, 在主震后的余震活动前期(第 III 阶段)内, 地壳中低倾角界面上的断裂活动和

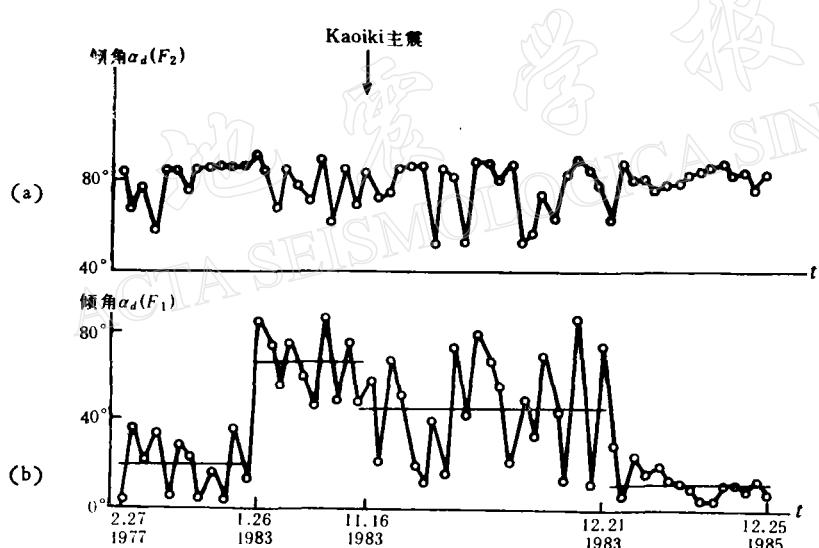


图 3 1983 年 11 月 16 日 Kaoiki 地震前后小震震源机制参数变化

(a)  $F_2$  节面倾角随时间的变化; (b)  $F_1$  节面倾角随时间的变化

在高倾角断面上的走滑型断裂活动交错发生。

## 2. 以节面倾角为参数的震源深度随时间变化

根据上述的分析,  $F_1$  节面倾角随时间的变化, 基本上代表了真实地震断面破裂类型随时间的变化。所以, 在下面我们选择  $F_1$  节面倾角作为参数去讨论地震深度随时间的变化, 实质上是讨论主震前后小震破裂类型空间分布随时间的演化。图 4a, b 和 c 分别绘出了三个时间段内的分布图。

(1) 在主震前孕育过程前期和后期(1977. 2—1983. 11. 16) 的地震深度分布。它表明不论地震破裂面倾角大小, 所有小地震都集中分布在 8—12 km 的范围内, 主震发生在

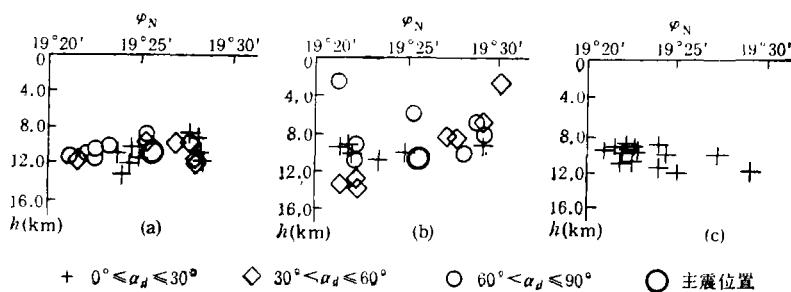


图 4 1983 年 11 月 16 日 Kaoiki 地震前后震源深度分布剖面图

(a) 主震发生前 (1977.2—1983.11.16); (b) 余震活动前期 (1983.11.16—1983.12.21);  
(c) 余震活动后期 (1984.1—1985.12)

其中(图 4a)。

(2) 余震活动前期 (1983.11.16—1983.12.21) 内, 余震深度分布范围变宽了, 具有低倾角破裂面的地震仍集中在 8—12 km 范围内, 而在浅部出现了一些中等和高倾角破裂面的余震活动, 在约 14 km 深处, 发生三个中等倾角破裂面的逆断层断裂活动(图 3, 图 4b)。

(3) 余震活动后期 (1984.1—1985.12.31) 内, 所有余震表现为低倾角面上的破裂活动, 都分布在 9—12 km 的范围内(图 4c)。

#### 四、分析和讨论

根据本文引言的概说, 以及图 3 和图 4 的观测结果, 可以获得关于 Kaoiki 强震孕育环境的一些认识。首先, 夏威夷 Kaoiki 地区的地体中承受着由于岩浆侵入到裂谷中产生的强大水平侧向压力。其次, 1983 年 11 月 16 日 Kaoiki 6.6 级主震前后, 具有低倾角破裂面机制的小震集中发生在 10 km 左右的深度上, 它与该地区深部枕状玄武岩层和古老海洋地壳之间的软弱水平界面埋深相一致; 同时, 在这个深度上还发生一些中等和高倾角破裂面的小震活动, 以及主震破裂。这些事实说明, 10 km 左右深度上除了存在一个水平界面外, 还有高倾角的断裂面在这里交汇, 形成 Kaoiki 强震孕育的构造背景。

一般说来, 地震的孕育、发生和发展的过程, 主要与区域作用力的方式、震源区内断面的几何学和力学性质等有密切关系。一种较易被接受的假说是假定区域作用力逐渐增强, 强震孕育区内摩擦力低的地点不易积累强大的应力而在前期破裂, 摩擦力稍大的随后破裂。而在能积累大量势能的强固点上, 最终以主震形式释放能量。在主震发生后, 震源区仍在短期内维持较高的应力水平, 在余震活动后期逐渐回复到低应力状态, 从而完成一次应力积累、释放和调整的强震孕育、发生和发展的过程。

把这个假说应用到 Kaoiki 6.6 级强震的孕育过程中。在孕育过程前期, 小震集中分布在 10 km 左右的深度上。机制解表明, 它们是低倾角面上的破裂, 这可能说明区域作用力强度较低情况下, 在地壳中近乎水平的软弱界面上滑动; 在孕育过程后期, 小震仍集中发生在 10 km 左右的深度上, 但是破裂是高倾角的断面上走滑运动, 这可能说明区域

作用力逐渐增强,使与水平界面交汇的强度较高的断面破裂;而强度最大的断面破裂(主震)后,震源区内应力调整,导致余震区活动前期上述两种类型断裂活动交错发生;最后,震源区的应力水平回复到低水平状态时,地震活动只出现在水平的软弱界面附近。总之,在 Kaoiki 强震震源区内,主震发生前后小地震空间位置变化和破裂类型的更替,基本上可以利用上述通常的应力积累、释放和调整的模式去理解,也就是说,研究强震前后小震活动的时空变化及其破裂机制的特征,的确是理解强震孕育过程的重要途径。

应该指出,由于 Kaoiki 强震前 1977—1982 年间的资料不够完整,对客观和细致地理解震源孕育过程说来,毕竟是一个缺陷。

感谢美国科罗拉多大学 CIRES, M. Wyss 教授及其指导下的地震学研究室为本项研究提供必要的研究资料和手段,协助完成台站极性校正工作,及进行了有益的讨论。

### 参 考 文 献

- [1] Clague, D. A. and Dalrymple, G. B., 1987. The Hawaiian-Emperor volcanic chain. *Volcanism in Hawaii*, 1, 5—84, U. S. Government Printing Office, Washington.
- [2] Wood, H. D., 1914. On the earthquakes of 1868 in Hawaii. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 4, 169—203.
- [3] Decker, R. W., 1987. Dynamic of Hawaiian volcanoes: An overview. *Volcanism in Hawaii*, 2, 997—1018, U. S. Government Printing Office, Washington.
- [4] Crosson, R. S. and Endo, E. T., 1982. Focal mechanisms and location of earthquakes in the vicinity of the 1975 Kalapana earthquake aftershock zone 1970—1979. *Tectonics*, 1, 495—542.
- [5] Wyss, M., 1986. Seismic quiescence precursor to the 1983 Kaoiki ( $M_s=6.6$ ), Hawaii, earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 76, 786—800.
- [6] Lee, W. H. and Stewart, S. W., 1981. *Principle and application of microearthquake network*. Advanced in geophysics, Supple. 2, Academic Press, New York.

## FOCAL MECHANISMS OF SMALL QUAKES BEFORE AND AFTER THE KAOIKI, HAWAII, EARTHQUAKE ( $M_s=6.6$ ), NOVEMBER 16, 1983

Zhengxiang Fu

(Center for Analysis and Prediction, State Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

### Abstract

The Kaoiki, Hawaii earthquake with magnitude 6.6 of November 16, 1983 was a strike-slip faulting event on a fault with large dip angle. The mechanisms of smaller events before and after the Kaoiki mainshock show that there were two kinds of mechanisms: (1) strike-slip on the fault with large dip angle; (2) slip on the crustal discontinuity plane with small dip angle. Systematic and alternative change of the mechanisms was observed.