

何谓慢地震

探索巨大地震预报的可能性

[日] 川崎一郎 著

陈会忠 黄伟 黄建平 卢振恒 等 译

郑斯华 校

地震出版社

何谓慢地震

——探索巨大地震预报的可能性

[日] 川崎一郎 著
陈会忠 黄伟 黄建平 卢振恒 等 译
郑斯华 校

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

何谓慢地震: 探索巨大地震预报的可能性/ (日) 川崎一郎著; 陈会忠等译.

—北京: 地震出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-5028-3972-7

I. ①何… II. ①川… ②陈… III. ①地震预报—研究 IV. ①P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 267689 号

著作权合同登记 图字: 01-2012-2950

WHAT ARE SLOW EARTHQUAKES? by Ichiro Kawasaki

Copyright © Ichiro Kawasaki, 2006

All rights reserved.

Original Japanese edition published by NHK Publishing Inc.

This Simplified Chinese language edition published by arrangement with the author c/o Tuttle-Mori Agency, Inc., Tokyo

地震版 XM2105

何谓慢地震

——探索巨大地震预报的可能性

[日] 川崎一郎 著

陈会忠 黄伟 黄建平 卢振恒 等 译

郑斯华 校

责任编辑: 王 伟

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业图书事业部: 68721991

E-mail: 68721991@sina.com

http: //www. dzpress. com. cn

经销: 全国各地新华书店

印刷: 廊坊市文峰档案印务有限公司

版 (印) 次: 2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 230 千字

印张: 9

印数: 0001 ~ 2000

书号: ISBN 978-7-5028-3972-7/P (4651)

定价: 50.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

目 录

第一章 地震就是位错	1
1. 什么是位错	1
2. 地球是块宝石	4
3. 板块构造学说的出现和地震预报研究的开始	5
4. 板块构造学说的概要以及以此为基础的地震观	6
第二章 什么是慢地震	10
1. 震源时间与地震波的波形	10
2. 慢地震的信号	12
3. 最初的失败	13
4. 地壳变动的连续观测	14
5. 与消减带的理论不一致——慢地震是地球动力学的暗物质	17
6. 震级与矩——测量地震规模的尺子	19
7. 在地方大学的起点	21
8. 在美国留学	23
第三章 三陆远海大型慢地震的发现	25
1. 最早发现的三陆远海大型慢地震	25
2. 持续了一年的争论	29
3. 1989 年和 1994 年三陆远海慢地震	31
4. 从 GPS 资料看到的耦合	34
5. 海啸与慢地震	36
6. 解决了一个问题，又出现了两个谜	37
第四章 兵库县南部地震和地震预报研究的变化	39
1. 兵库县南部地震发生	39
2. 兵库南部地震的概况	40
3. 前震和余震	42
4. 对地震预报研究体制的反思	44
5. 地震预报的新研究计划	46
6. 基础观测网	47
7. 亲眼看到了震灾后的神户	50
第五章 不断发现的慢地震	
——相模海槽和南海海槽	52
1. 1923 年关东大地震	52
2. 1989 年东京湾慢地震	53
3. 1996 年房総慢地震和 1999 年、2000 年桃子近海慢地震	56

4. 南海海槽的巨大地震	58
5. 从 1996 年日向滩地震到 1997 年豊後水道慢地震	60
6. 2000 年三宅岛震群	62
7. 2001 年东海慢地震是大地震的前兆吗	62
8. 南海海槽慢地震的汇总	66
第六章 为什么会发生慢地震	71
1. 速度强化, 速度弱化, $a-b$	71
2. 室内岩石滑动实验	73
3. 断层滑动的数值模拟	74
4. 基于凹凸体的地震图像	77
5. 重复地震	82
6. 2003 年十胜近海地震和“场”的变化	85
第七章 水和慢地震	88
1. 地幔中的水	88
2. 水是怎样进入地幔中的呢	89
3. 低频地震和深部低频微动	91
4. 美洲西海岸 Cascade 的历史地震和慢地震	96
5. 墨西哥的慢地震	97
6. 阿拉斯加的慢地震	100
7. 水可以起哪些作用呢	100
8. 用地球化学的方法来监测水的可能性	102
第八章 预测下一次南海地震和东南海地震	104
1. 地震发生时期的长期评价和灾害预测	104
2. 长周期强震动预测和海啸波高预测	106
3. 积极主动的地震预报研究——寻找慢地震的探寻者	108
4. 数值模拟的尝试	109
5. 积极主动的观测	110
6. 南非的半控制地震发生实验和对 1999 年台湾地震的观测	112
7. 内陆型地震	113
8. 始终以预测为目标	115
第九章 围绕地震预报的讨论	116
1. 地震预报不可能论——自组织临界现象	116
2. 对地震预报不可能论的反驳	117
3. 地震预报是科学吗	118
4. 现状的自我评价	119
5. 保护历史文化财产是防灾科学任务的一部分	120
6. 包含不确定因素的概率风险信息	122
7. 《Nature》的报道和美国重新审视预报的新动向	124
主要引用及参考文献	126
后记	130

第一章 地震就是位错

1. 什么是位错

在我们居住的地球的内部充满着用“秒、分钟、小时、日、月和年等时间尺度”和“毫米、厘米和千米等空间尺度”来描述的事件。按照我的理解，其中把以分钟时间尺度和100km空间尺度描述的突发事件，我们称之为巨大地震。另外，我们可以把在时间上是连续的、空间上像原子大小的微型尺度的庞大集合称为地幔对流。但是，所有尺度的事件并不是均等出现的。正因为这样，地球动力学才充满着探索奥秘的乐趣。也可以说，只有考虑到时间空间这一重要因素，才能理解慢地震的意义。

“事件”是一种微妙的表述。在日文中，“事件”这一表述具人为的色彩，对一般人来说是有奇异的影响。但在英语中，事件（event）是指一种在某一时间发生的、在有限的时间内结束的现象，“事件”这一表述在英语的世界中使用得十分普遍。

如果把地球中所有时间尺度和空间尺度的事件，用一条主线联系起来的话，那么一个基本要素就是位错。

有人把地球内部描述为熔融的、可以形成对流的状态。但是，地幔内部并不全是熔融状态。在地球深部，在100km深处的温度是1000℃左右，在200km深处是1300℃左右，比构成地幔的岩石的熔融温度要低200~300℃，所以这些岩石并不是熔融的。只有在作为地幔流向地表的涌出口的中央海岭的正下方，以及在像日本列岛那样的俯冲带火山的正下方等个别地方存在着大量熔融的岩浆。按人类生活的标准衡量，地幔是固体，地幔完全是以固体的状态在对流。

对于简单的立方晶格结构，我们可以先想象一下如图1-1那样的图像。液体的对流现象是好理解的。由于分子相互之间可以毫无约束地来回运动，因此可以随意地流动。可是，像图1-1那样原子被约束在稳定的位置上的固体，流动是怎么回事呢？

那么，像图1-1那样的结晶“硬度”究竟是由什么确定的呢？首先想到的是连接原子与原子之间的原子结合力。20世纪初，在原子核物理学发展的初期，这一问题使物理学家们感到十分困惑。理论上推定出的原子间结合力，有几十大气压、几百大气压、或者几亿大气压，简直是用人类生活的尺度无法想象的大。如果物质的硬度是由原子间力决定的，而原子间力又是如此之大的话，那么世界上许多物质就不可能用人类的力量来使其破坏和变形。

此后不久，物理学家们也意识到，世界上并不存在完全规则而没有丝毫错乱结晶构造的结晶粒子。结晶构造的错乱被称为晶格缺陷，现实的结晶粒子中充满着晶格缺陷，这就使得物质容易被变形。

如图1-1所示的立方晶格的原子之间的距离比 10^{-9}m （纳米）还小。实际上在这个世界上像图1-1那样简单的立方晶格的结晶是很少见的。但是，我们经常使用的盐就是这种立方晶格的结晶构造，所以并不感到奇怪。尽管最近已看不到了，由于天然的盐的结晶粒子是立方体的，所以破裂很容易沿着结晶构造的对称面发展，对称面很容易成为结晶粒子的外

壁。方解石的结晶是菱形，很容易破裂也是同样道理。

在图 1-1 的中央部存在着构造的错乱。这种结晶构造的错乱，在物理学的专用术语中称为“位错”（英语是 dislocation）。如果查一查英语辞典的话，dislocation 有一个解释是“脱臼”。也就是说“偏离”正常的相互关系，或者“不一致、交错”。在图 1-1 的构造中，原子 b 缺少了结合的对象，处于异常的状态。这种情况是，原子 a 和原子 c 的结合代替了原子 b 和原子 c 的结合，于是，可以用比切断原子 a 和原子 c 的结合小好几个数量级的力就可以切断了。这样，立刻消除了物理学家困惑。

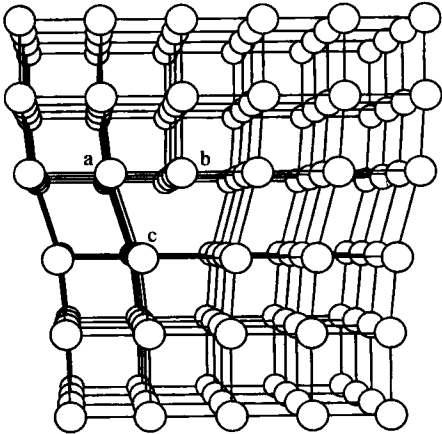


图 1-1 最简单的位错的例子

盐的结晶粒子是立方晶格状的，氯（Cl）和钠（Na）交差排列（ギニエ和ジュリアン，1992）

图 1-2 是晶体形变的示意图。（a）是平衡状态。如果将晶体的下面向左拉，将上面向右拉，加上像要扭曲晶体那样剪切应力，于是发生（b）那样变形。如果像（c）那样位错从外边侵入，像（d）那样扩展、移动、贯通，则成为（e）那样。考察其内部，虽然结晶构造并未变化，但其外形发生了变形，应力被释放。这就是固体的形变。大多数的位错都通过在结晶粒子中的移动、扩展达到结晶粒子的破裂。位错是地球科学重要关键词之一。

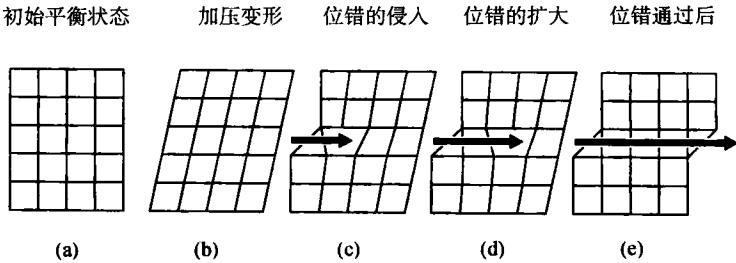


图 1-2 晶体形变的示意图

（a）是平衡状态。如果在晶体上加上剪切应力的话，就会发生（b）那样形变。如果像（c）那样位错从外边侵入，像（d）那样扩展、移动、贯通，则成为（e）那样。虽然结晶粒子的外形发生了形变，但内部的微观结晶保持不变

在我们的生活圈内，多亏有了位错，才能以人类可控制程度的力使许多物质破坏和变形。如果这个世界中的物质都是由无晶格缺陷的结晶体构成的话，那么这个世界中的几乎所有物质都非常坚硬，将一定是难以居住的。

我们都知道位错的密度（单位体积的个数）越小的结晶粒子越难破坏，位错越难以移动的结晶构造越是坚硬。石榴石（garnet）比橄榄石（olivine）更硬，是因为与橄榄石相比石榴石具有位错较难移动的复杂的立体结晶构造。碳钢比纯铁更硬的原因是碳的原子进入了铁的结晶构造的空隙间（如图1-1中的原子b下方），因而使得位错更难以移动。

在日本列岛内断层规模密度大的地区之一是中部地区。在这里活动性的活断层非常多，而且容易变形。中部地区是“柔软”的。地球科学中的语言和日常生活中的语言的含意是有很大差别的。

综上所述，控制矿物硬度的因素是：

- （1）位错的密度（单位体积的个数）；
- （2）结晶构造中位错是否难以移动。

于是，如果已知位错的微观分布（ $10^{-9} \sim 10^{-6} \text{m}$ 量级）的话，那就可以知道结晶粒子的宏观（ $\text{mm} \sim \text{m}$ 的量级）的硬度，但这也仅仅只是定性的结果。这与知道了遗传因子（DNA）也还是不知道人的个性是同样的道理。无论是地球，还是生命，微观和宏观之间的联系确实还不太清楚。涉及这类固体力学的科学领域，称之为固体论，是物理学分解出来的研究领域。也可以说，地震学和大地测量学是巨大尺度的固体论。

形成结晶构造的最小单位叫“矿物”。换句话说，矿物粒子中的所有粒子具有相同的结晶构造。

当然，图1-1和图1-2的示意图那样的构造并不是无限地继续着。实际上是由厘米到毫米级的尺度矿物粒子集聚而形成岩石的，并且由于矿物粒子的旋转等因素使状态更复杂。而且，微小裂缝（空隙）的分布和水、碳酸气体等的存在，使得地壳和地幔的硬度弱化。

你注意到你身边的位错的经历吗？从冰箱的冷冻室取出立方体的冰块放进威士忌酒内时，就会发出噼啪的声音。温度的突然变化引起的热应力作用，在冰块内部产生了位错。这就是最典型的地震，噼啪的声音是由地震波产生的。如果根据从震级8级到2级的通常地震所建立的经验关系外推的话，这个冰地震的震级约为负5级或负6级。

从另一方面方面来说，尽管热应力增大，如果应力没有通过位错来释放将会是怎么样呢？加热后热应力则增加，于是结晶粒子的应变不断地扩大。加热速度和热传导作用达到了热释放的临界时，其结果是发生使结晶粒子融化，或者使结晶粒子全部破裂那样突发性的破裂。也可以说，“地震就是将积累的应力逐步地释放，以避免整体破裂的机制”。

到此为止，我们已经多次使用了“地震”这个词，但并没有说明地震是什么。现在总算回到了这第一步。如果用物理学的术语来简单地表述，地震就是“弹性体中的位错发生移动，释放出弹性波的现象”。将这一表述用于地球的情况，那么地震就是“断层突发性地开始高速滑动，滑动面在高速扩展的同时，释放出地震波的现象。”

这里提到了弹性体这一概念，自然会联想到橡皮带。如果用手拉橡皮带，则橡皮带就会伸长，但是手一松开，则橡皮带就会回到原来的状态。像橡皮带那样，具有在力的作用下就变形，一撤去力就恢复原状的特性的物体称为弹性体。像图1-1那样的结晶体在一定的外力限度内也是弹性体。结晶之所以具有这样的构造性质是因为各个原子相互之间处于稳定位

置的缘故。在外力的作用下原子的位置发生错动，使它返回到原来稳定位置是由于原子间力的作用。这就是弹性的本质。

地球中有各种各样的时间和空间尺度位错发生，引起变形（柔软性）。液体的流动是分子与分子之间相互地无序地来回活动。但是，固体的流动则是保持着结晶构造的变形。即使都同样说是流动，在物理上也有着很大差异。地幔对流则是微小位错的庞大集合。在日本海沟和南海海沟那样的板块俯冲带，如果发生急剧地巨大尺度的断层错动，将成为人类社会的重大灾难。简单地说，地幔对流和地震只是空间尺度和速度的不同。

我突然想起，1967年当我还是地球物理专业本科三年级学生时，在佐藤良辅先生（当时东京大学理学部，2004年5月逝世）的地震学习题课中听到的“地震就是弹性体中的位错”这一说明。那一瞬间打破了我过去一直持有的地震学概念。解开这一科学之谜一定是非常有趣的，在我的脑海中闪出了这种意念和灵感。这也就决定了我的命运。

此后，我进入研究生院，在佐藤良辅先生的指导下，全力投入到从位错释放弹性波动（地震波动）的理论计算工作中。武器就是纸、铅笔和卡尔丹著的《复素函数论》（岩波书店）。在1963年丸山卓男（当时东京大学地震研究所）的论文和1964年的Burridge和Knopoff的论文中已给出了从无限连续的弹性体中的位错释放出的弹性波的解析解。在佐藤良辅先生的指导下，我的研究是在世界上最早给出当存在水平地表边界面的情况下的弹性波的解析解。这与无边界面的情况相比，在数学上更为困难。研究成果是1972年写成的论文。我记得当我收到刊登着我的第一篇论文的学术杂志时，我兴奋得彻夜未眠。论文每次被印刷，都感到十分兴奋。这就是研究人员的最大喜悦。

2. 地球是块宝石

地球是一个赤道半径约6371km的球体。正确地说，它是南北方向被压扁的西洋梨形，如果将地球画成半径10cm左右的球，那么与球的偏差只有0.3mm。在铅笔粗细差别的范围内，地球简单的就是一个球。

从地表到深度大约为2891km的这部分称为地幔，充满了“硅酸盐矿物”。从地幔到地球中心部是以铁为主的地核（在日本语中称为“核”或“中心核”）。在一定意义上讲，地球是极其简单的二层构造。如果再仔细地分类的话，那么地幔又分可以为“地壳”、“上地幔”、和“下地幔”三部分；地核又可以分为流体铁的“外核”和固体铁的“内核”二部分，这样地球可以分成五层。

构成地幔的岩石是橄榄岩，英语叫 peridotite。由于橄榄树的果实是青绿色的，所以橄榄岩这一名称是由颜色联想而命名的。橄榄树是在地中海地区到处都可看到的普通树木，其果实也可以用来制造食用油。

橄榄岩是由橄榄石（olivine）、辉石（pyroxene）和石榴石（garnet）这三种“硅酸盐矿物”粒子大致以60%、30%和10%~15%左右的比例混合而成的。换句话说，橄榄石、辉石、石榴石三种“矿物”粒子集合而形成称作为橄榄岩的“岩石”。

橄榄石（olivine）的名字也来源于与橄榄树相似的青绿色，是橄榄“岩”（peridotite），还是橄榄“石”（olivine），这区别是十分困难的。即使是地球科学的学生，最初也是很容易混淆的。我在写本书时，究竟是采用 olivine，还是采用橄榄岩，也感到十分为难，但最终在本书中采用了 olivine。（在中文中，olivine 常译成橄榄石——译者注）

橄榄石以及硅酸盐矿物的结晶的最小要素是硅（硅，silicon，Si）的原子周围有四个氧结合起来的硅酸基（ SiO_4 ）⁴。让我们想象一下沿海岸躺着四足动物的情况，四足动物的四个脚的端部是氧的原子，硅元素的原子位于重心上，四足动物以其脚端部的氧元素为共有，依此连接起来。橄榄石等硅酸盐矿物的结构就像是连接起来的四足动物。

尽管地幔几乎全是由硅酸盐矿物质组成的，十分单纯。但我们日常看到的大地却是十分多样和变化繁多。这是因为像四足动物以各种方式连接那样，硅酸盐矿物质可以具有各种晶格的立体构造。并且，由于以不同的比例混入镁（Mg）、铁（Fe）、铝（Al）和钙（Ca）等微量金属，可以组合成各种各样的硅酸盐矿物。此外，由于温度、压力的作用，以及水和二氧化碳气体的存在，这些矿物质也会呈现出各种特性。因此，地球动力学成为一个非常复杂的体系，正因为如此，它成为充满着探索奥秘乐趣的研究对象。但另一方面，灾害的预测和对策也变得十分困难。

作为地幔的主要成分橄榄岩的美丽结晶粒子，就是商店中出售的叫做“橄榄石”的宝石，也就是八月的诞生石。辉石（pyroxene）具有高密度的复杂的结晶构造，我们虽然对辉石不太熟悉，但含有较多钠成分的它的同类矿物，也就是呈现乳白色的翡翠。此外，一月诞生石榴石，二月诞生石紫水晶、十月诞生石谷白石、十一月诞生石黄玉也都是硅酸盐矿物。

我很想深入到地下深部 100km 处，看一看充满着矿物的地幔对流的现场。也很想深入 3000 ~ 4000km 深处，看一看地核对流现场。这是每一个地球科学人员的梦想。但是，在当前的科学技术下，最深的钻井也只能达十几公里左右，人类还无法到达地幔的。

既然人类无法到达地幔，但又可以得到构成地幔矿物的橄榄岩和石榴石这样的宝石，这不是矛盾的吗？实际上，这种宝石的供给源之一是像夏威夷火山那样在地幔中具有很深的根的火山。这种火山称之为“热点”（hot spots），在火山喷发时喷出了地幔的捕获岩。

另一个供给源就是作为地幔化石的蛇绿岩块（ophiolite，古代海洋地壳的残片——校者注）。在几亿年前由于大陆和大陆碰撞推挤上来的一部分海洋地幔出露于地表的地方，可以产出丰富的蛇绿岩块。亚洲和欧洲交界处的乌拉尔山脉就是一例。蛇绿岩块也是地球科学工作者充满着向往的地方。

在陆地部分从地表到 35km 左右深处（有的地方，像喜马拉雅山一带到 70km 左右），在海洋部分则从深海底到 5 ~ 15km 左右的深度叫地壳。地壳的下面就是地幔，两者的边界面叫莫霍洛维奇不连续面（以下简称莫霍面）。当构成地幔的橄榄岩变成构成海洋地壳的玄武岩和作为陆地地壳主要岩石的花岗岩时，就变白发轻。这是由于在玄武岩和花岗岩中，硅的比例较大，铁和镁等的金属原子减少的原因。六甲山和飞驒山脉几乎全是花岗岩。对于像神户那样由花岗岩风化后的砂土组成的土地，明显地感觉到原来的花岗岩是白色的。

3. 板块构造学说的出现和地震预报研究的开始

至今我都记忆犹新的是 1968 年我在理学部四年级的事。浅田敏先生（当时东京大学理学部，2003 年去逝）在地震学讲课时，极其兴奋地对学生说：“如今，板块构造学说在美国十分轰动。根据板块构造学说，可以十分清楚地理解为什么日本东北的海岸和海沟之间没有互相重叠，而可以发生低倾角的逆断层型的巨大地震（图 1-4）。今后如果能设置密集的地震观测网，认真地进行观测，从原理上说，地震预报将是可能的。”对于当时的地震学界来说，板块构造学说的出现是十分引人注目的。这学说对于当时地震学者认为不可思议的全球

尺度的许多观测事实，给出了简明的容易理解的新模式。也许在地球科学中从未有过如此强烈的模式转换。

也许由于这种学说太过于引人注目，所以“只要认真观测，从原理上讲预报将是可能的”这一想法持续了很久。当然，在现在可以十分简单地批评当时对地震预测前景的天真想法，但人总是免不了受时代的制约。我十分敬重那些想通过地震预报来减轻灾害而在地震观测上倾注了巨大热情的老师们。

在那次讲课之后不久，1970年出版了将板块构造学说很好地应用于消减带的《弧状列岛》一书（上田诚也、杉村新著，岩波书店），1971年出版了说明板块构造学说诞生现场的《新地球观》（上田诚也著，岩波书店）。这些新出版的书和以前出版的解释大陆漂移学说的《地球科学》（竹内均、上田诚也著，1964年NHK书店）都是有志于地球科学研究的学生的必读书籍。

再往上追溯到1962年，日本地震学会在经过了长时间的讨论以后，有志于地震预报者组成了“地震预报研究计划小组”，发表了题为“地震预报——现状及其推进计划”，此计划后来被称为“蓝皮书”。1964年秋，日本学术会议提出“关于推进地震预报研究”的建议，1964年夏测地学审议会批准了“关于地震预报研究计划的实施”的建议，并在正常研究预算之外编制了1965年前的研究预算。

正好在此时，1964年当地时间2月27日（日本时间为2月28日）阿拉斯加发生了9.2级大地震，在日本6月16日也发生了新潟7.5级大地震，在学术界内对于地震预报的讨论更加热烈。

由于从1963年起日本全国各大学联合开展了微小地震观测的三年计划，微小地震和极微小地震的观测技术以及记录分析的方法普及到了全国各大学。当时的记录系统是直径25cm左右的盘式磁带方式，但是还没有对地震观测来说十分必要的能连续观测几十小时的记录器等。研究者就把市场上出售的模拟磁带记录器改造成旋转变慢100倍的磁带记录器。

那个年代之后的30年，也就是1995年1月，一个7.3级的大地震袭击了神户及其周边地区，夺去了6433人的生命。这个地震无论是对于日本社会还是对于地震学界，都是沉重的打击。特别是京都大学地震研究者们心情十分沉重，总在想着：自己从事的观测和研究却不能挽救6000多人的生命，那么自己以前所从事的研究到底是什么呢？！这种心情也是全国地震研究者共同的心情。当时，由于我正在远离关西的北陆地方，虽然并不了解更多的情况，但十分清楚地觉察到他们带着沉重的心情忙于观测的情景。

地震究竟是什么？地震研究又是什么？地震预报是可能的吗？这些问题至少从地震预报计划开始实施以来，包括不从事地震专门研究的人在内，都一直在反复地询问这些问题。然而，由于我基本上是生活在远离地震预报研究体制的地方，因此，对于这30年我似乎还不能说什么。但是关于神户地震以后的十年的发展，我想我还是可以议论的。

4. 板块构造学说的概要以及以此为基础的地震观

地球是活动的。地幔是以固体形态进行对流运动，在地球的外核熔融的铁进行对流运动来维持地球磁场。可以说，多样性的地球动力学过程，如存在地幔对流涌出口、俯冲带和热点以及发生多种多样巨大地震，之所以能维持几十亿年，都是由于地球内部对流的缘故。由地幔对流产生的地壳的应变在局部集聚，则就发生地震和火山喷发。尽管会有“希望没有

地幔对流，那也就不会有地震灾害和火山灾害了”的想法，但是如果没有了地幔对流，那就无法向地球表面供给二氧化碳、甲烷等气体，这些气体在大气中的含量也随之减少，温室效应降低，那就成为像火星和月球那样，生命无法生存的环境。如果在地球上没有地幔对流的话，那也就不会形成生命可能生存的环境，即使形成了这样的环境，那也不可能维持几十亿年。

图 1-3 是主要板块的分布图。箭头长度表示扩展速度，从深部涌上来的地幔对流的一部分在东太平洋海岭处涌到地球表面。近地表部分向西扩展形成太平洋板块和向东扩展形成纳斯卡板块，以每年 10cm 的高速扩展。太平洋板块到达日本海沟后，向欧亚板块下俯冲，并且发生了许多大大小小的地震。

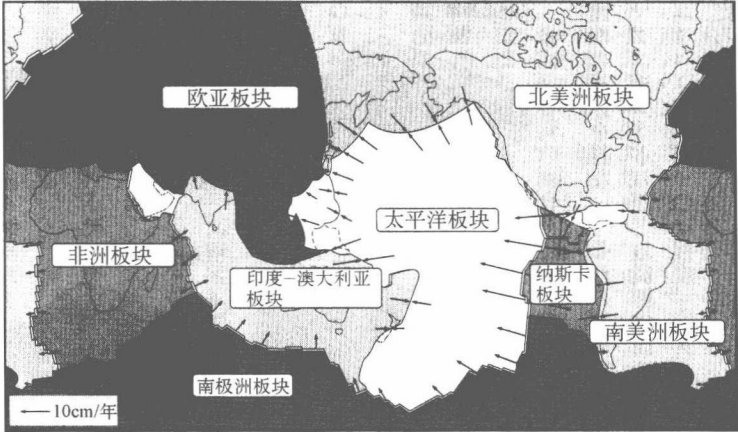


图 1-3 地球上主要板块的分布
(在山科健一郎原图上有所修改)

规模仅次于太平洋板块的欧亚板块承载着巨大的欧亚大陆，移动速度是每年 1cm，比海洋的太平洋板块慢一个数量级。另外，在欧亚板块中从贝加尔湖以东部分，很多情况下将它作为阿摩尔板块，与欧亚板块分别处理。

图 1-4 表示正断层、逆断层、走滑断层的示意图。许多巨大地震是低倾角逆断层。所谓低倾角是指断层面倾斜度较小（近乎水平），逆断层是指上盘冲到下盘之上类型的断层。正断层与此相反，是上盘向下滑落的类型。当然日本列岛上逆断层地震比正断层地震多得多。但是很不可思议的是，为什么把数量较多的类型并不称为“正”，而称为“逆”呢。这是因为在 19 世纪，在最初开始断层研究的英国有很多正断层，于是把较多的类型起名为“正”。站在断层的一侧，相对的一侧向右运动的称为右旋走滑断层，向左运动的叫左旋走滑断层。

震级是根据世界范围布设的地震仪记录的振幅，对其进行地震仪的灵敏度和震源距离的修正，取对数后，再取其平均值得到的。虽然从专业上讲比较复杂，但大致上说，8 级震级的地震断层面的长度可达 100km 左右，7 级地震可达 30km 左右，6 级地震为 10km 左右，而 5 级地震只有 3km 左右。

以断层为边界，上盘相对于下盘的相对运动的大小 D_0 称为“断层滑动量”或“错动

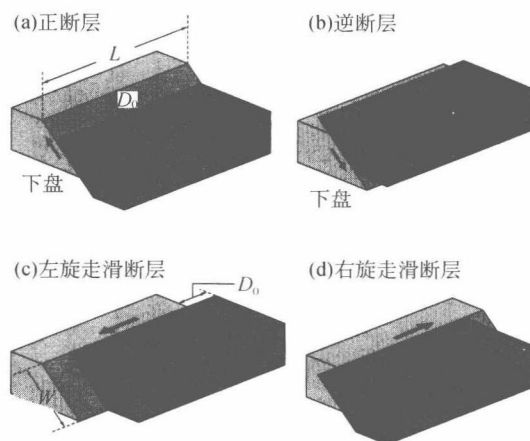


图 1-4 (a) 正断层；(b) 逆断层；(c) 左旋走滑断层；(d) 右旋走滑断层的示意图

逆断层是上盘在下盘的上面向上移动的类型，而正断层则是相反，是上盘向下移动的类型。

L 为断层面长度， W 为幅度， D_0 为断层的滑动量（据冈田义光）

量”。对于震级为 8 级的巨大地震，错动量为 3 ~ 5m 左右、7 级大地震为 1 ~ 2m 左右、6 级地震为 0.3 ~ 0.5m 左右。对于图 1-2 的情况，错动量是原子间的距离。

地震断层面的幅度、断层滑动量与地震断层面的长度一样，震级每变小 1 级，则它们变小 1/3，如果震级变小 2 级，则它们变为原来的 1/10。

很容易使非专业人员感到迷惑的是，对于一个地震可以好几个种类的震级，数值上也有小的差别。在本书中，对于板块俯冲边界型的地震采用矩震级 M_w 、对于内陆地震则采用日本气象厅震级 M_J 。有关 M_w 与 M_J 两者的定义将在第二章中说明。

在板块构造学说出现之后的大约 5 年间，以金森博雄（当时东京大学地震研究所，1972 年后在加州理工大学）为中心，用板块构造论的观点解释了 1923 年的 M_w 7.9 关东大地震（震灾名为关东大震灾）、1944 年的 M_w 8.1 东南海地震、1946 年的 M_w 8.1 南海地震以及 1964 年的 M_w 9.2 阿拉斯加地震等海沟型巨大地震的震源机制，完成了巨大地震论的基础。其要点是这些逆断层的巨大地震，并不互相重叠，而是在以较小的倾角向大陆下深处插入的断层面上发生的。

既然地震发生在地下几十公里的深处，那么是否可以知道地震断层面从什么地方开始到什么地方为止呢？这可根据一般认为由主震的残余滑动引起的余震的分布来推定。不管怎么样，余震当然不可能离开主震的断层面发生，在这里我们把它称之为“余震分布区域等于地震断层面的假说”。

从巨大地震理论引出的一个重要概念就是“地震耦合”。可能对于这一术语还不太熟悉，所谓的 seismic 就是形容词“地震的”。本来 seismo 在希腊语中是“振动的”意思。地震学是 seismology。美国人如果没有在高中学习过的话，那他不知道 seismology 是关于地震的知识和理论。对于英语来说，它来源于希腊语和法语，必须在学校里才能学习这些学术用语。但对于日语来说，一看到地震学这个词，即使没有在学校里特别学习过，也可知道地震学是关于地震的理论。

在从千岛近海到北海道近海的板块俯冲边界面上，从1950年代到1960年代的20年间，接连发生了1952年的十胜近海地震，1958年的千岛地震，1963年的千岛地震，1968年的十胜近海地震，1969年的千岛地震和1973年的根室近海地震等震级为8级左右的巨大地震，在那里巨大地震的复发间隔为100年。

如果太平洋板块每年以约8cm的速度俯冲，那么到下次巨大地震之前，板块则将俯冲8m（每年8cm×100年），如果上盘同样地被牵动的话，上盘积累了大量的地壳应变。因此，当地壳应变一次释放，发生巨大地震时，断层滑动量必须是8m才合理。但是，根据地震波、海啸、地壳变动等的分析，巨大地震时断层的滑动量仅仅是3~4m。与每年约8cm的俯冲，和100年间积累的俯冲量的8m相比，地震时滑动的3~4m，仅仅是全部俯冲量的0.4~0.5，这就是从千岛到北海道的俯冲板块边界上的地震耦合。换句话说，地震耦合就是“以巨大地震为参照的板块俯冲边界面的粘附程度”。

图1-5是全球的边界板块俯冲边界的地震耦合分布图。由图可知，千岛（库页岛）是25%，在日本海沟是40%。在阿留申的地震耦合是100%，也就是板块俯冲边界面是完全粘附的，这就会发生根据俯冲的速度所期待那样的巨大地震。在像伊豆—小笠原和玛利亚那海沟那样完全不发生板块间巨大地震的地方，地震耦合是0%，在那里板块俯冲边界面完全处于缓慢的滑动状态。因此无论是对于理解板块俯冲带的动力学性质，还是对于板块边界型巨大地震的预测，地震耦合都是一个非常重要的参数。

那么，为什么地震耦合不是100%呢？对于地震耦合不是100%的地区，在其余的部分发生了什么？一个可能发生的现象就是慢地震。

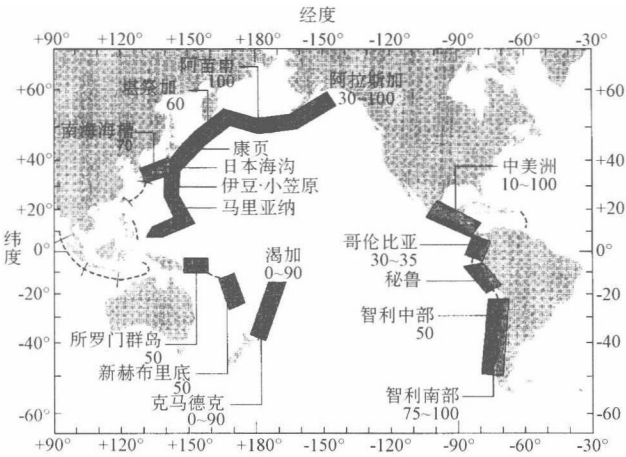


图1-5 全球板块俯冲带边界的地震耦合（Lay and Kanamori, 1981）

第二章 什么是慢地震

1. 震源时间与地震波的波形

慢地震之所以难以发现，原因在于慢地震的信号很不容易被发现。

为了理解这种一点，让我们先了解一下一般地震的地震波的特征。关键词是“地震断层面的扩展速度”、“震源时间”、“震级”和“地震矩”等。为此，或多或少还要应用对数、周期和频率等自然科学的术语。

首先让我们考虑一下地震波是什么。

像图 1-2 (a) 那样，如果在结晶上施加一个力，则就发生像 (b) 那样的形变，除去施加的力以后，由于恢复力的作用结晶又弹回到 (a) 的状态。其振动向四面八方传播出去，这就是波。也就是说，振动的“状态”的传播就是地震波。

像图 1-2 (a) 那样，在结晶体的上下方向上施加压缩，只发生体积的疏密状态变化时，发生的是 P 波，体积的变化被传播。当在结晶上施加使其扭的力时，所产生的则是 S 波，扭曲被传播。在结晶体上施加使其上下压缩的力时的恢复力，比施加使其扭曲的力时的恢复力要大。恢复力越大，地震波的传播速度也就越快。因此，P 波的传播速度比 S 波的传播速度要快。

由于日本列岛的地壳主体是花岗岩，P 波传播速度约为 6km/s ，S 波传播速度约为 3.4km/s 。由于发生地震的原因大多是并不伴随体积变化的断层滑动，能量的主要部分是以 S 波形式释放的。因此对于地震的情况，P 波初动的振幅小；S 波是主要的振动，振幅较大。与此相关的是，对于震源只发生体积变化的炸药爆炸的情况，P 波则成为主要的振动。

其次是表示地震动力学的两种速度：

(1) “地震断层的扩展速度”，大约为 $2\sim3\text{km/s}$ 。

(2) “断层滑动速度”，大约为 1m/s 左右。

但是，其数值因地点不同、地震不同有相当大的差异。

“地震断层面的扩展速度”是指在地震断层面的前端发生裂缝这一“状态”所传播的速度，由于发生裂缝需要额外的能量，所以“地震断层面的扩展速度”比地震波传播速度慢。不能超过 S 波传播速度。“地震断层面的扩展速度”在 $2\sim3\text{km/s}$ 左右，2004 年 12 月的苏门答腊海底大地震的“地震断层面的扩展速度”是 2.8km/s 。假定我们在地表跨地震断层站立，当地震断层面扩展的前端达到脚下时，脚下的基岩开始向相互反方向运动，两只脚的距离达到 D_0 时停止运动。这个 D_0 就是断层滑动（错动）的大小。此时的断层面两侧的基岩的运动速度也就是“断层滑动速度”。在这种情况下，基岩这样的现实的物质以一定的速度运动时，将需要很大的运动能量。因此，与“地震波传播速度”和“地震断层面的扩展速度”相比，“断层滑动速度”要小三个数量级。

在这本书里，很多情况下并没有区别“地震断层面的扩展速度”和“断层滑动速度”。一个理由是根据地震数据还无法独立地确定这两个参数。另一个理由是二者存在着相关性，也就

是说如果一个速度慢的话，另一个速度也慢。因此即使二者混用，也不会导致大的错误。

像图 2-1 所示那样，假定地震断层面的一端为滑动扩展的开始端，另一端为终止端。假设是一个 7 级地震，并设从地震断层面的开始端到终止端的距离（地震断层面的长度）为 30km，断面的扩展速度为 3km/s，那么断层滑动从开始端开始到终止端停止的时间为 10s。这就是为理解地震动力学的一个重要参数“震源时间”。由于当断层滑动扩展时连续不断地发出地震波，P 波和 S 波的脉冲宽度和震源时间相同是 10s（因此，传播地震波波动能量的主要部分的卓越周期是两倍，即 20s）。但是，严格地讲，还与其他许多因素有关。从震源发射出来的地震波的波动能量的主要部分是由与震源时间差不多相同脉冲宽度的单纯地震波来传播的。脉冲宽与周期的关系在直观上还有些不太好理解。我们可以联想一下以下的三角函数的循环过程，也就是振幅从 0 开始增大达到极限之后再减少，在 10s 后振幅又回到 0，然后又进一步减少变成负值，再达到极小值，在 20s 后振幅恢复到 0。这种情况的周期当然是 20s。可以说，图 2-1 (a) 那样宽度为 10s 的脉冲，就是周期为 20s 的波的最初的一半。

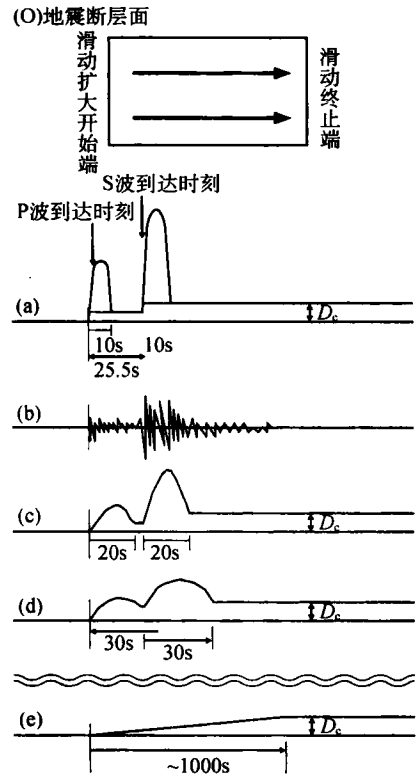


图 2-1 地震波形随震源时间的长度变化的示意图

(O) 滑动从开始端（左端）到终止端传播的示意图。并设观测点离震源的距离为 200km，P 波传播速度为 6km/s，S 波传播速度为 3.4km/s，振幅为任意。(a) 为地震断层面扩展速度为 3km/s 时的波形，(c) 为地震断层面扩大速度为 1.5km/s 时的波形，(d) 为地震断层面扩大速度为 1km/s 时的波形。地震断层面扩大速度更慢的话，就成为 (e)。D_c 是观测到的地壳变动。(b) 是通常短周期地震记录的示意图。需要注意的是 (a) ~ (d) 和 (e) 中横轴采用了完全不同的时间尺度

然后，我们设想观测点离开震源的距离为 200km，P 波（传播速度 6km/s）在地震发生后 33s 到达观测点，S 波（传播速度 3.4km/s）在 59s 后到达观测点。因此，P 波和 S 波到达时间差的 S—P 时间是 26s。如图 2-1（a）那样，波形的整体性特征，是由“脉冲宽度为 10s”和“S—P 时间为 26s”两者综合决定的。

一般常见的地震波记录要比图 2-1（a）复杂得多。这是由于地震断层面不均匀扩展时所产生的短周期分量互相迭加，再加反射波等，通过短周期地震仪时，进一步突出了短周期成分，就形成像图 2-1（b）那样振动多次重复的地震波动。随着远离震源，就可能加上面波和在周围边界面的反射波等，形成更加复杂的波形。

震级和地震断层面长度之间，存在着震级减小 1.0 级，地震断层面的长度约减少为 1/3 关系。如果震级减小 2.0 级，则地震断层面长度约减小为 1/10。由于震源时间是断层长度除以地震断层面的扩展速度所得到的值，所以卓越周期是其两倍。因此，如果设定地震断层面的扩大速度为 3km/s，用不同震级的断层长度除以这地震断层面的扩大速度，则得到对于震级 8 级是 70s、7 级是 20s、6 级是 7s、5 级是 2s、4 级是 0.7s、3 级是 0.2s 这样的对应关系。但是，自然界是非常复杂的，所以，与其认为“8 级地震的震源时间大约为 70s”，还不如理解为“8 级地震的震源时间大约在 35~140s 之间”更合适一些。

到目前为止，我们所说的都是一般性地震的情况。

2. 慢地震的信号

这里再回到 7 级地震。设地震断层面的长度为 30km、地震断层面的扩展速度为 3km/s，断层滑动从开始端开始到终端停止的震源时间则是 10s。如果地震断层面的扩展速度小到 1.5km/s，震源时间与地震断层面的扩展速度成反比例，则为 20s。P 波和 S 波的脉冲宽度如同图 2-1（c）那样。如果地震断层面的扩展速度更小，例如为 1km/s，则震源时间为 30s、比 S—P 时间 26s 更长，所以在 P 波终止前，S 波就到达了。就像图 2-1（d）那样，波形的形态非常不同。

如果地震矩是一定的话，从理论上讲，脉冲的面积（波形与横轴所夹的面积）与震源时间无关，也是一定的。因此，地震断层面扩展速度越慢，震源时间就越长，脉冲的振幅也就越小，这就是慢地震发出的信号。由于震源时间长和脉冲振幅小这两方面的原因，所以在地震仪记录图上就很难发现慢地震的脉冲信号。

其中，“地震矩”是指用地震断层的长度、宽度、断层滑动的大小，以及地壳或地幔的剪切模量的乘积来定义的参数。在本章的后半部分将详细说明。

如果地震断层面的扩展速度慢到 0.3km/s，则震源时间为 100s；如果慢到 30m/s、3m/s 和 30cm/s，则震源时间到分别为 1000s（17 分）、10000s（约 3 小时）、和 100000s（约 1 日）。于是，脉冲的宽度就比 S—P 时间 26s 长了几个数量级，就成为像图 2-1（e）那样的单调增加的倾斜阶梯状波形。在这种情况下，P 波或 S 波的区别已经毫无意义。而且，需要注意的是图 2-1（e）与（a）至（d）中的横轴的时间尺度有着几个数量级的差别。

图 2-1（a）至（e）中都表明的 D_c 即使在地震断层面扩展过程终止也会存在。而且，即使震源时间变化， D_c 的大小也不变。该 D_c 根据所处理记录不同分别称为“位移阶跃”，“应变阶跃”或“倾斜阶跃”。虽然 D_0 和 D_c 是十分相似的参数，很难区分，但是， D_0 是地震断层面滑动的大小， D_c 是观测点的位移。这两个量在地震终止以后都不回到零。