

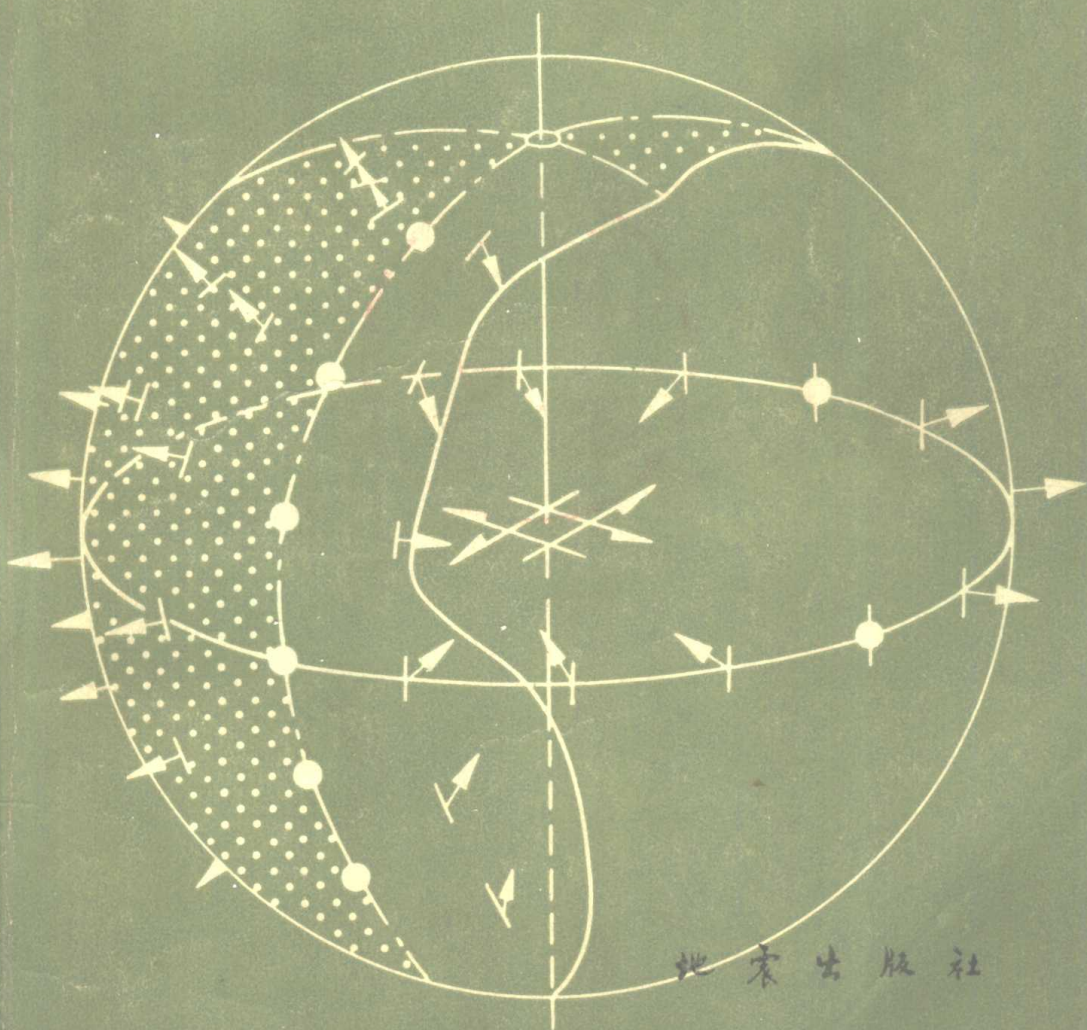
56.25

04667

地震力学

[日] 笠原庆一 著

赵仲和 等译



地震出版社

地 震 力 学

[日] 笠原庆一

赵仲和等 译

许忠淮 校

地 震 出 版 社

1 9 8 4

内 容 介 绍

本书是剑桥大学出版社出版的地球科学丛书之一。全书系统论述了对地震学全部进展奠定基础的基本概念：震源，震源的静力学、动力学、物理学和构造学，以及震源在地球内部所处的环境，并对地震预报问题作了探讨。

本书译者为：赵仲和（序言、第一、二、三、四章）、裴申（第五、七章）、蒋乃芳（第六章、附录）、刘艺（第八章）。全部译文由许忠淮校订。

本书可供地震学、地球物理学、地震地质学等方面的科研及教学人员参考。

Earthquake Mechanics

K. KASAHARA

Cambridge University Press

1 9 8 1

地 震 力 学

[日] 笠原庆一

赵仲和等 译

许忠淮 校

责任编辑 宋炳忠

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路 63 号

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

850×1168 1/32 8 1/8印张 210千字

1984年5月北京第一版 1984年5月北京第一次印刷

印数：0001—3000

统一书号：13180·224 定价：1.50元

序 言

现代地震学的最重要成果之一是确认了地震（特别是浅源地震）系由地球内部的断层造成的。这一结论是自地震学诞生以来经过对各种理论的不断修正和扬弃才得出的。将各种假说汇聚而成统一的理论的确是现代地震学的基础，这使得本世纪 60 年代以来的地震学取得了巨大进展。

地震学理论逻辑结构的改进一直伴随着实验技术的显著革新，由此获得的新的观测资料推动了理论的进步和数值计算技术的发展，并把地震学与固体地球科学的各有关学科紧密联系起来。简言之，依我个人之见，必须从逻辑基础的日趋统一和实验技术与仪器的多样化两个不同方面来观察当代地震学的发展。

本书是剑桥地球科学丛书的一卷，其目的主要是向读者介绍当今对地震的理解，重点放在为地震学全部进展奠定基础的那些基本概念上。对一些专题的详细讨论已超出本书范围。大部分章节是基于过去十年我在有关大学对新入学研究生所作的讲演。因此，本书假定读者已熟悉地震学和地球物理学的基本概念。

由本书目录可以看出，对各个问题的讨论大致是按逻辑顺序进行的；从震源的初步研究开始，然后讨论各个具体问题，诸如震源的静力学、动力学、物理学和构造学等方面的问题以及震源在地球内所处的环境。最后一章扼要讨论地震预报问题，这是我们研究领域里一个最新的宽阔前沿，必须尽全力去探索。

因为国际单位制(SI 制)尚未在本领域广泛采用，征得剑桥大学出版社同意，在本书中使用厘米·克·秒制(cgs 制)。第 3 页上给出由 cgs 制变换成 SI 制的换算表。

正文及方程中的表达式 $\log$ 除非特别注明均指常用对数。

文中引用的地震震级类型均取自有关参考文献，但对日本的

地震，一般情况下是用理科年表的震级系统（科学常数年表，丸善出版公司，东京）。

作者感谢剑桥大学的皇家学会会员库克(A. H. Cook)教授邀请我为剑桥地球科学丛书撰写本书，还要感谢他在出版本书过程中不断给予的支持。我还愿感谢地震研究所的同事们，包括丸山卓男博士、里比奇(K. R. Rybicki)博士(由波兰科学院地球物理研究所暂来该所)、肖尔茨(C. H. Scholz)教授(由哥伦比亚大学拉蒙特-多赫蒂观象台暂来该所)和撒切尔(W. Thatcher)博士(由美国地质调查局暂来该所)，以及东京技术研究所的力武常次教授，他们审阅了本书手稿并提出了宝贵建议。特别是第4.3.2节，主要是由于丸山卓男博士的合作才得以写成。我还要十分感谢剑桥大学名誉顾问莱普伍德(E. R. Lapwood)博士，他在地震研究所停留期间仔细阅读了本书手稿并提出了详细的修改建议。

我还要感谢剑桥大学出版社工作人员，特别是帕克(A. K. Parker)博士和朗(C. A. Lang)博士对出版本书给予的关心。

东京大学地震研究所

笠原庆一

1978年2月

单 位 换 算 表

物理量	cgs 单 位	SI 单位(换算后)
长 度	1 厘米	10^{-2} 米
质 量	1 克	10^{-3} 公斤
时 间	1 秒	1 秒
能 量	1 克·厘米 ² /秒 ² (尔格)	10^{-7} 焦耳(米 ² ·公斤/秒 ²)
力	1 克·厘米/秒 ² (达因)	10^{-5} 牛顿(米·公斤/秒 ²)
压 强	1 达因/厘米 ² (10^{-6} 巴)	10^{-1} 帕(公斤/米·秒 ²)
面 积	1 厘米 ²	10^{-4} 米 ²
体 积	1 厘米 ³ (cc)	10^{-6} 米 ³
密 度	1 克/厘米 ³	10^3 公斤/米 ³
速 度	1 厘米/秒	10^{-2} 米/秒
加速度	1 厘米/秒 ² (伽)	10^{-2} 米/秒 ²
力 矩	1 达因·厘米	10^{-7} 牛顿·米
粘 度	1 达因·秒/厘米 ² (泊)	10^{-1} 帕·秒

目 录

序言	(I)
单位换算表	(III)
第一章 地震学的研究范围	(1)
1.1 地震学中的地震力学研究	(1)
1.2 “地震机”	(3)
1.3 宽频带地震学在地壳动力学中的应用	(6)
第二章 震级和震源体积	(10)
2.1 地震震级	(10)
2.2 地震能量	(13)
2.3 震源体	(15)
2.3.1 对震源的双重看法	(15)
2.3.2 几何特征	(16)
余震区面积	(16)
地表观测证据	(17)
2.3.3 地震波的频谱	(19)
2.3.4 极限应变和应变能	(20)
2.3.5 震源体积的概念	(21)
2.4 地震统计学	(22)
2.4.1 地震总体特征和能量分配	(22)
2.4.2 地震的地理分布	(24)
2.4.3 地震序列释放的能量	(24)
第三章 辐射图象与震源机制	(27)
3.1 辐射图象	(27)
3.1.1 观测	(27)
3.1.2 点源力系	(28)
3.1.3 辐射图象	(32)
3.2 断层面解	(36)
3.2.1 基本考虑	(36)

3.2.2	作图法	(37)
3.2.3	基本参数及其解释	(40)
3.2.4	方法的局限性	(43)
3.3	单力偶和双力偶模型	(43)
3.3.1	震源机制研究方面的不同观点 (历史概述)	(43)
3.3.2	S 波及其偏振角	(44)
3.3.3	面波的应用	(46)
3.4	断层面解的应用	(49)
3.4.1	断层面解资料与地球构造	(49)
3.4.2	计算机方法	(50)
第四章	地震断层	(52)
4.1	地震断层及其产生的位移场	(52)
4.1.1	断层的特征	(52)
4.1.2	断层统计分析	(54)
4.1.3	断层运动产生的位移场	(56)
4.2	二维断层模型	(58)
4.2.1	基本考虑	(58)
4.2.2	等宽度模型	(59)
4.2.3	断层参数的确定	(62)
4.3	弹性位错理论	(64)
4.3.1	剪切位错面	(64)
4.3.2	力和位错的等价性	(66)
4.3.3	三维断层模型	(70)
4.3.4	自由表面上的位移场	(73)
第五章	运动位错	(80)
5.1	破裂传播的远震证据	(80)
5.1.1	相位对比法	(80)
5.1.2	方向函数法	(83)
5.2	有限运动源产生的体波	(87)
5.2.1	运动位错模式	(87)
5.2.2	停止相	(88)

5.2.3	拐角频率	(90)
5.3	地震矩	(92)
5.3.1	长周期面波的应用	(92)
5.3.2	地震矩的含意	(95)
	平均位错	(95)
	能量释放与应力降	(96)
5.4	震源时间函数	(97)
5.4.1	运动学考虑	(97)
	哈斯凯尔模式	(98)
	布龙模式	(98)
	地震研究中的模式	(100)
5.4.2	破裂过程的特征时间	(101)
5.4.3	上升时间	(106)
5.4.4	时间过程极长的海啸地震	(109)
5.5	地震效应的合成	(112)
5.5.1	一般考虑	(112)
5.5.2	强震运动谱	(113)
5.5.3	靠近断层的地震位移	(115)
	断层运动的模拟	(115)
	对近场地面运动的贡献主要来自最近的断层段	(122)
5.5.4	合成地震图	(124)
第六章	震源的物理过程	(127)
6.1	断层成因说	(127)
6.1.1	弹性回跳理论	(127)
6.1.2	震源的静力学和动力学特征 (归纳)	(127)
6.1.3	标度定律	(129)
6.2	岩石的破裂	(135)
6.2.1	地震学中的破坏问题	(135)
6.2.2	破裂准则	(135)
	宏观考虑	(135)
	格里菲思理论及其修正	(137)

6.2.3	断层面上的摩擦和应力	(140)
	断层错动的应力变化	(140)
	大地震的应力降	(142)
	地震效率	(143)
6.3	膨胀与粘滑	(145)
6.3.1	实验探讨	(145)
6.3.2	膨胀模式	(146)
	湿模式	(147)
	干模式	(149)
6.3.3	粘滑	(151)
6.4	深源地震物理	(153)
6.4.1	基本考虑	(153)
6.4.2	压力作用下的脆性破裂	(154)
	粘滑	(155)
	脱水作用	(155)
6.4.3	压力作用下的延性破裂	(156)
	剪切熔化	(156)
	部分熔化	(157)
6.4.4	相变	(157)
第七章	地震和构造运动	(159)
7.1	大断层地震带	(159)
7.1.1	圣安德烈斯断层的特征	(159)
	地质时期内积累的断层错动	(160)
	连续断层错动	(161)
	断层上的地震	(162)
	应变释放的两种不同方式	(162)
	大地构造环境	(162)
7.1.2	大断层的滑动速率	(163)
7.1.3	地震和板块构造	(166)
	板块的概念	(166)
	运动板块的轮廓	(168)

消减带的演化	(169)
板块边界地震和板内地震	(172)
7.2 地震的重复发生	(173)
7.2.1 应变积累	(173)
断层两侧的应变和应力	(173)
应变场和应力场	(175)
7.2.2 地震活动周期	(178)
地震复发的证据	(178)
一次地震活动周期内的变化	(179)
近代地壳运动的历史	(181)
活断层	(183)
7.2.3 地震空区	(185)
板块边界地震序列	(185)
地震空区的识别	(187)
7.3 地壳运动的非弹性特征	(188)
7.3.1 地壳的无震运动	(188)
7.3.2 地震及地壳形变的缓慢迁移	(190)
观测	(190)
模型	(194)
进一步的含意	(195)
第八章 地震预报	(198)
8.1 地震预报研究的格架	(198)
8.1.1 实现地震预报的途径	(198)
8.1.2 地震预报的结构	(198)
统计预报	(198)
构造预报	(198)
物理预报 (或精确预报)	(199)
临震警报	(199)
8.2 统计预报和构造预报	(200)
8.2.1 分区	(200)
地震活动性	(200)

活断层	(200)
8.2.2 地震序列的预报	(203)
简单统计学方法	(203)
消减带地震的重复发生	(203)
8.2.3 地震构造运动参数的预测	(205)
8.3 物理预报	(207)
8.3.1 基本认识	(207)
地震构造运动的积累规律	(207)
极限应变	(207)
地震空区	(207)
地壳活动的迁移	(208)
8.3.2 实现精确预报的线索	(209)
震前地面运动	(209)
前震	(209)
地球物理前兆	(211)
前兆时间	(213)
膨胀模式	(214)
8.4 地震预报实践	(215)
8.4.1 监视	(215)
8.4.2 对地震预报的评价	(216)
地震的物理预报途径	(216)
用“记分”评定地震预报	(216)
地震预报的效果因子	(218)
可预报的地震	(219)
8.5 进一步的问题	(222)
附录一 震源参数	(224)
附录二 震级 M 与地表断层及形变的关系(经验公式)	(228)
附录三 世界标准地震台网(WWSSN) 台站代码和地点	(229)
参考文献	(231)

第一章 地震学的研究范围

1.1 地震学中的地震力学研究

地震学主要是研究地震。人类总是期望更好地了解地震的本质，正是这种愿望使地震学自开创以来不断取得进展。随着研究活动的不断增加，地震学所涉及的范围已经显著扩大；从地震学领域的任何近期的会刊或杂志的内容即可看出这一点。

在图 1.1 中，用三方面的主要研究工作来说明地震学的研究范围。第一方面的工作是利用地震波作为探测器来研究地球的内部。自上个世纪以来，地震波在地球内部传播的理论与观测，以及用地球内部结构来解释地震波的传播成为地震学中的主要研究课题。后来，这类研究又扩展到与地球有关的更多的课题，从而扩大了我们对地球的物理状态、地球作为一个行星的发展历史和地球表面的构造运动史等方面的知识。

图 1.1 中，第三方面的研究是地震学知识在人类活动中的应用，包括灾害预防、自然资源的地震勘探和地下核爆炸的侦察等等。地震预报也可以加在这一项下，尽管它与地震本质的基础性研究是分不开的。

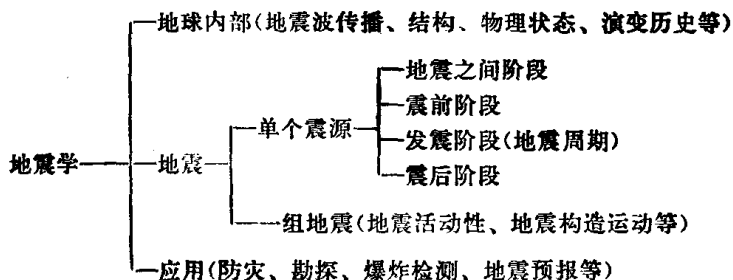


图 1.1 地震学的主要分支

地震的本质(图 1.1 中的第二方面)大概是地震学中的最根本

的问题。这方面的研究可分为两个分支。头一个分支研究地震的一般特征，即分析单个地震的震源，从而给出一幅地震现象的总的全面的图画。而第二个分支的主要兴趣是研究一组地震的活动特征。例如，地震之间的相互关系，地震的发生对构造环境的依赖性等都属这类问题。这一分支带有地理学和地质学的特点。与此相比，可以认为第一分支偏重于物理学方面。

第二方面的研究工作，即关于地震力学(这是本书的书名)的研究，主要涉及与单个震源有关的问题。以后各章中的讨论主要沿这一条主线发展。然而，必要时讨论的范围可能要扩大并包括更多的论题，以便为理解地震的本质打下广泛的基础。

可以用各种不同方式来表征震源的特性，这取决于我们对地震现象最关心的是哪一个方面。当我们宏观地研究地震波源时，“震源”(focus 或 hypocentre)一词是指地球内辐射地震波的一个点(“震中”是震源在地面上的垂直投影)。当我们更关心其物理机制时，根据我们在讨论中所做的规定，可使用“断层”、“断裂”或“破裂”等字眼。也可以在最一般意义上使用“震源(source 或 origin)一词。当我们从物理学观点对震源进行精细研究时，就不能把它看作是一个几何点了。因此，为了说明震源有一定尺度，我们常使用“震源区”(source region, focal region 等)一类名词。对震源的这种双重看法，即有时把它看成一点，有时又看做有限尺度的震源体，表面上也许会引起混淆。然而，我们的合理的理解是：由地震观测所确定的震源代表震源区(或震源体)中的一个点，破裂由这一点开始，从这一点最先发出地震 P 波(2.3.1)。

地震研究与许多学科有关。除了物理学和数学等基础科学外，与当前的研究有密切联系的学科还有大地测量学(研究大地的运动)、地理学和地质学(研究地震的发生与地震区的地理和地质特征的关系)、岩石力学(为更好地理解破裂机制)、工程学(与预防灾害问题有关)等。如果要把地震预报付诸实践，甚至还与

政府政策有关。就象许多其他地学学科一样，地震研究实质上是一门边缘学科。

1.2 “地震机”

人们往往将震源过程与机器的运转过程相比较，它从更深处的能源得到能量，逐步积累，并在瞬时将它的一部分能量转变成动能，即地震扰动(Matuzawa, 1964)。图 1.2 是这样一部“地震机”的结构示意图(Kasahara, 1969)。

位于图中央的地震场相应于这部地震机的主机。以 S 表示临震前的物理状态，于是，地震的发生可用 S 状态突变到 S' 状态来代表。因此，对地震过程的研究首先要解决的问题应当是正确理解从 S 到 S' 的过渡。原则上，这一过渡过程要由震源区中每一点上的全部物理量来确定。这些物理量当中有些是头等重要的，如应力 σ 和温度 T 等。而其他物理量，如偏压力 $\Delta\sigma$ 、衰耗因子 Q 等，可能是次要的。然而，在实践中，我们会在讨论时略去那些对地震过程不敏感的物理量。迫切需要研究确定哪些物理量是最重要的。

地震场是更深处能源所提供能量的接收器。它积累势能直至达到某种临界状态。不难想象，提供能量的方式不会是超距作用，而是通过某种介质来实现能量的传递。因此，我们需要从密度 ρ 、弹性 c 、非弹性 η 和电学性质 γ 等方面来了解介质的结构。同时，我们还需要认识能量积累过程的背景情况，也就是介质中相邻部分之间的相互作用以及该地区的构造运动历史。

当这一地区的物理状态满足某些临界条件时，破裂就将发生，导致状态 S 过渡到状态 S' 。影响这一过渡的一个临界因素是来自外部或内部的触发力。一旦发生突变性破裂，它也可能触发同一地区的另一个破裂，如同图 1.2 中的反馈迴线所示。这一过程在“震后期”将继续进行，直到该地区达到新的平衡为止。

相信这一地震系列是会在同一地区重复发生的。换句话说，一个地区的地震历史可概括为地震周期(seismic cycle)的重现。

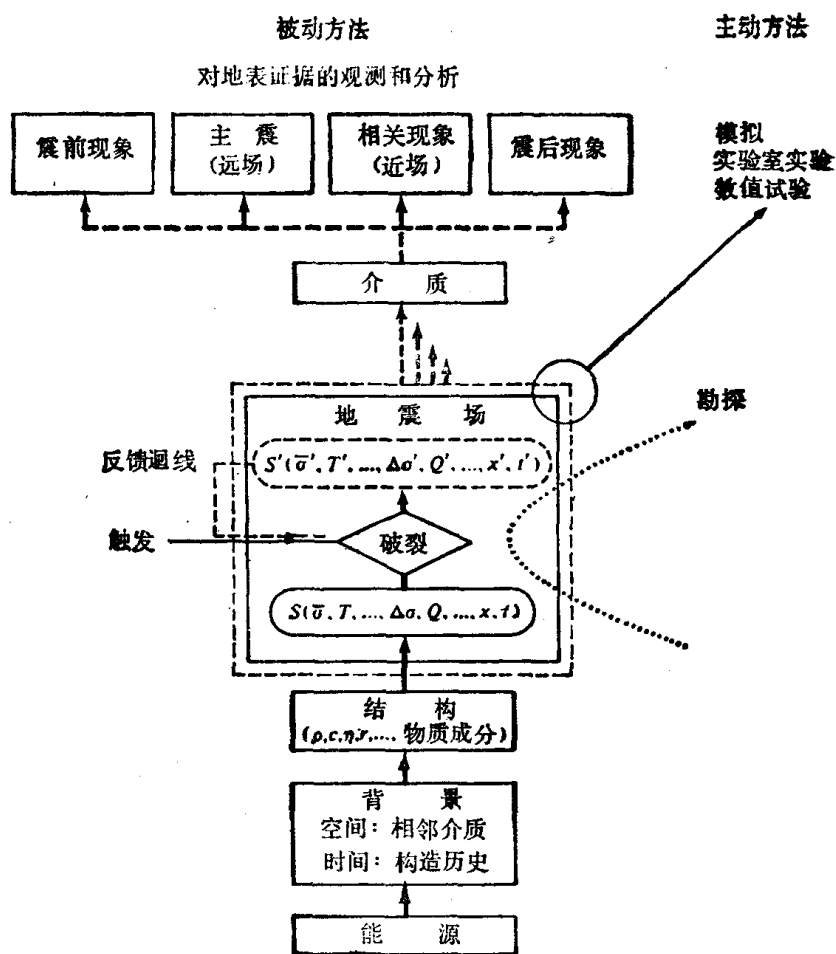


图 1.2 “地震机”以及认识其力学机制的各种途径
(引自 Kasahara, 1969)

一个地震周期依次由地震之间、发震和震后三个阶段组成。也可假定发震阶段之前有一个震前阶段，这点在 7.2.2 中作了讨论。图 1.3 表示一个地区的地震周期，并给出每个阶段的主要问题。

地震之间阶段的特征是如前所述的势能积累。为了理解这一阶段的机理，必须弄清楚能量来源、能量积累机制（包括积累速率和空间分布）以及物理状态的前兆性变化等问题。

地震之间	震前	发震	震后
积累势能 问题： 能源 积累机制，积累速率，空间分布 物理状态的有关变化	临界应力状态下介质的非弹性性质 问题： 识别地震前兆及其发生机制	势能转化为动能 问题： 触发机制，以前该处的地震 破裂：类型，几何特征，破裂发展（破裂速度）地震波辐射，停止机制 震源区状态和性质的变化	向新平衡态过渡 问题： 余震及其他震后现象的机制 改变了的状态和物性的恢复 滞后作用
能量分配（效率，损耗，相邻区域的相互作用）			
构造运动历史			

图 1.3 地震周期的各个阶段以及各种有关问题
(引自 Kasahara, 1969)

下一个是发震阶段，或者叫主破裂阶段，其特征是势能转变成动能。在发震阶段之前，还可能有一个过渡的震前阶段。与这一阶段有关的问题很多，主要有：(a) 触发机制，包括以前地震产生的断层的影响；(b) 破裂机制，包括破裂类型、几何特征、破裂发展过程（破裂传播速度）、地震波辐射以及破裂的停止机制；(c) 震源区状态和性质的变化。

向新的平衡状态的过渡发生在震后阶段。与这一阶段有关的问题有余震和其他震后现象的机制、震源区物理状态的恢复和滞后等。这是三个阶段中的最后一个阶段，但这仅是指一个地震周期的结束。构造运动和地震活动历史表明，在一个地区，类型相似的地震活动会周期性地重复。震后阶段的结束正是下一个周期的地震之间阶段的开始。

能量的平衡与分配是震源物理过程的最基本的问题。能量转换效率，各阶段的能量损失以及与邻近区域的相互作用是这三个