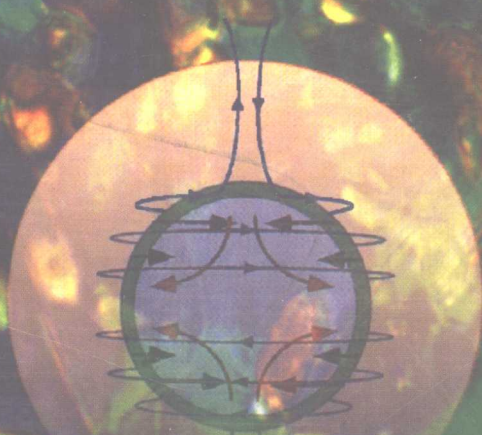


地震科学联合基金资助出版

中国地震局地质研究所译著 (2005F001)

流变与地球动力学

[日] 唐户俊一郎 著
何昌荣 齐庆新 乔春生 译
黄清华 校



地震出版社

地震科学联合基金资助出版

中国地震局地质研究所译著(2005F001)

流变与地球动力学

[日]唐户俊一郎 著
何昌荣 齐庆新 乔春生 译
黄清华 校

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流变与地球动力学/[日]唐户俊一郎著;何昌荣等译. —北京:地震出版社, 2005. 8

ISBN 7-5028-2716-1

I. 流... II. ①唐... ②何... III. ①流变学 ②地球动力学 IV. ①037 ②P541

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 085770 号

地震版 XT200500053

著作权登记号 01-2005-3555

Rheology to Chikyukagaku

Copyright©2000 by Shun-ichiro KARATO

Chinese translation rights in simplified characters arranged with University of Tokyo Press through Japan UNI Agency, Inc., Tokyo

流变与地球动力学

[日] 唐户俊一郎 著

何昌荣 齐庆新 乔春生 译

黄清华 校

责任编辑: 薛广盈

责任校对: 王花芝

出版发行: **地震出版社**

北京民族学院南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68467972

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2005 年 10 月第一版 2005 年 10 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32

字数: 232 千字

印张: 8.375

印数: 001~500

书号: ISBN 7-5028-2716-1/P·1253 (3347)

定价: 35.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

译者序

《流变与地球动力学》是美国明尼苏达大学教授唐户俊一郎用母语日文撰写的专著，2000年由东京大学出版社出版。作者现任耶鲁大学教授。该书以矿物物理和岩石流变为切入点，综合了地球内部结构及物质组成、岩石圈-软流圈的形成机理、地震波层析成像与地幔对流、地幔物质循环与流变、深源地震的发震机理、地核动力学、比较行星学与行星物质的流变等多方面的最新成果，把在地质学中极具研究兴趣同时又相互联系的多个学科有机地融为一体。唐户教授作为活跃在一线的科学工作者，主要从事矿物物理和高温高压岩石流变学研究，同时能够对如此多的科学问题进行综合与归纳，并在某些方面具有自己的独到见解，实属难能可贵。尤其对海洋板块-软流圈系统的创新性阐释给译者留下了深刻印象。该书是一本多学科交叉，且在学术上具有前沿性的参考书，这样的书近年来并不多见。2001年我们看到这本书之后，觉得有必要介绍给国内的学术界，以促进多学科的交流与合作。

本书以日文写作，更能显示出作者的个性。就译者看来，本书的行文具有一种有别于生硬科学专著的文化氛围；对一些科学家的逸闻趣事介绍也是本书的一个亮点，让读者可以读到平时在科学论文中读不到的、类似于科学史的资料。

由于地学中熟识日文的同事不是很多，因此本书的翻

译未能采取团体协作方式，相应地也就占用了更长的时间。书中序言、第 2、3、4、7 章、附录以及插图由何昌荣译，第 1、6 章由齐庆新译，第 5 章由乔春生译。全书由黄清华审校，最后由何昌荣和黄清华共同定稿。由于我们的水平有限，译文中难免出现错误，敬请读者指正。

本书的出版得到了地震科学联合基金会的支持，在此表示感谢。

译 者

2005.3

序

本书是以现今地球动力学为题材，通过综合微观和宏观两个层次的研究，在各种观测数据的基础上，试图确立基础牢固的定量地球科学。与天体物理和生物学等学科一样，地球科学是揭示自然秘密的科学之一，但是迄今为止的(固体)地球科学与这些相邻学科相比却略显逊色。这一方面是由于众多的地质学研究太具文字描述性质，远离基于物理、化学原理的定量科学；另一方面是由于众多的地球物理研究中只是将地球作为应用数学的对象来处理，而观测事实背后的微观物理过程却极少成为研究内容。

相比之下，在天体物理学中却根据原子(核)层次的物理特性讨论了恒星的进化，对元素合成过程进行了理论研究并与观测数据相呼应，从而增进了对大自然的认识。在生物学方面，分子水平的研究将遗传和生物活动的秘密一个接着一个地加以揭示，极其引人注目。这两个领域的共同特点是，在微观水平上的物理(化学)过程研究对于复杂的宏观对象内部秘密的发现起了重要的作用。

同样，在地球科学中，由于对象的复杂性，首先应确立观测事实比任何东西都重要，根据对象(即地球物质)的微观物理研究，将这些观测事实进行解读，进而与宏观物理现象相结合来认识复杂的地球演化与动力学，这才是与天体物理、生物学等学科相匹敌的科学思路，才是地球科学真正应该前行的道路。

在地球科学中,从20世纪60年代后期发展了称为板块构造的学说,从而把以前认为是相互间无关的地学现象(地震、火山、造山运动等)作为坚硬岩体(称为板块)的运动结果而进行了统一的解释。但是,板块构造的理论框架在20世纪70年代的中期得以确立,而从70年代的后半期开始很多人开始探索更新的地球科学理论。超越板块构造理论的(固体)地球科学一时成为学术界共同口号。板块构造理论基本上是运动学,即基于几何观测来试图解释地学现象的学说。作为几何学学说的板块构造理论的长处是可以明确地预言很多现象,而它的局限在于:①即使作为运动学,也只局限于地表附近的2维变化,而深部物质的运动与地表附近地学现象的关系却基本上一无所知;②板块构造这种地学现象以及物质的变形模式是否在任何其它地球型行星上普遍发生也不得而知。

为了构筑一个超越这些局限性的新地球科学,一场地球科学革命从20世纪80年代初悄然兴起。这一新动向的原动力来自:以地震波层析成像等手段为代表的高精度地震学探明了地球深部的结构细节;通过行星探测扩大了对其它类地行星的结构以及地质构造的认识;通过高温高压实验了解了地球深部矿物的性质等等。从20世纪70年代后半期开始着手,继而在80年代得以实质性发展的地震波层析成像研究中,探明了深达地球中心的3维地球内部结构。由于地球的3维结构必然以某种形式反映着对流等物质的运动,这种信息对于研究地球深部的动力学具有极其重要的意义。可以说,正是由于这种地震波层析成像才首次使得地球深部动力学的研究实现了从空想走向科学的

转变。20 世纪 70 年代后半期的麦哲伦(Magellan)计划等行星探测的结果表明,地球是与其它行星不同的、一颗非常独特的行星。例如我们得知,板块构造现象在其它行星上几乎是没有的。特别令人意外的结果是,被认为与地球像孪生子模样的金星上并没有发现板块构造的特征。还有,强磁场的存在也是地球特有的现象,而在其它行星上并没有看到。

将观测结果与地球动力学一起进行解释的基础是矿物、岩石的物理性质研究。在这一方面也取得了相当的进展。地球深部物质的相变研究是所有研究的基础。同样对地球动力学来说至关重要是包含非弹性的流变性质研究。这不仅是因为在地球动力学中占重要地位的能量输送取决于地球物质的流变性质,而且如果不考虑流变性质则难以揭示对流等大规模运动对地震波传播的影响。

边缘学科的最大魅力在于,通过结合不同领域的知识和方法,常常会出乎意料地找到新的突破口。有人说,创新就是从被认为是与问题无关的东西中找到新的关系。在边缘学科中,由于接触的是平常交流很少的领域,因此新颖而有趣的问题非常多。这正像在不同文明的多民族交流的地方会产生急速发展一样。但是,这样的边缘学科也有难以切入的一面。要同时获得许多领域的知识是非常不易的。即使只是在地球科学范围,特别是在地震学领域,要了解其最前沿是非常不易的。

那么怎样在边缘领域学科中学习呢?试图从相关学科的所有基础开始学习是低效率的。如果试图将地球科学的相关学科全部学一遍的话,恐怕花上一生的时间也是不够

的。首先,当对地球科学中某一问题产生兴趣时,先粗略阅读一下与此问题可能有关领域的入门书籍(像百科全书类的书就行),对该领域的梗概有一个大致的了解。然后根据个人的爱好和素质进行相应的学习和研究。并不是获得所有知识之后才可以展开研究。在一定程度上了解了该领域的概况就可以马上动手做些什么。尽早与实际情况相接触是很重要的,通过观测数据和实验室测定、观察与自然进行接触,就可以涌现出许许多多的疑问。接着就是带着问题进一步进行相关学科的学习。

本书作为边缘学科之一的地球内部动力学,读者群定位在地球科学相关学科以及材料科学相关学科等大学本科生及研究生。但是本书不仅对于学生,也一定会对地球科学及材料科学研究人员有参考价值。所需知识只是简单的热力学,而且将最前沿的课题用尽量通俗的语言进行了解说。但是,本书并不是对一个已经建立起来的体系进行解说的教科书,而是试图描述一种学问建立过程的模样。因此学习、研究所需的技术性事项没有作详细解说,而将阅读本书所需的最小限度的知识归纳于卷末的附录中。另外,由于所介绍的是这一领域最前沿的问题,因此解说不一定完全客观。这是因为在很多最前沿的问题上,研究者之间还没有达成一致的见解。在这种情况下,在介绍各种各样见解的同时,很多时候强调了我个人的思考。

由于不是一个既成体系的教科书,从任何一章读起都没有问题,但由于第1章解说了地球结构的基本内容,特别对于地球科学以外学科的读者最好先阅读完第1章,再阅读其它章节。这样的书在世界上也是初次尝试。作为微

观材料科学的矿物物理书籍以及宏观的地球科学的解说书籍很多，而将宏观和微观两方面有机结合进行解说的书却未见出版。通过本书，如果读者能够领略到这一科学有趣之处的一部分，就实现了我的愿望。

本书是在东京大学出版社的清水惠女士的倡议下所著。友田好文先生和山崎大辅君阅读了原稿并提出了宝贵意见。这里我向他们以及一直支持我的家人，特别是妻子洋子表示感谢。本书的大半内容是在鸿宝基金会资助下访问德国拜罗伊特地球科学研究所时完成的。

目 录

第 1 章 地球的结构与构造	(1)
1.1 地球内部结构:层状结构、化学组成和相变	(1)
1.1.1 地球化学模型	(2)
1.1.2 地球物理学模型	(6)
1.1.3 地球结构的综合模型	(15)
1.2 地球内部的温度分布	(24)
1.3 流变学结构:地震波衰减与粘性系数分布	(29)
第 2 章 板块的形成:部分熔融和水的作用	(36)
2.1 岩石圈和软流圈:地球物理观测的事实	(36)
2.2 岩石圈-软流圈结构的成因	(38)
2.2.1 板块的形成与成长:经典模型	(38)
2.2.2 部分熔融和软流圈:经典模型的缺陷	(41)
2.2.3 非弹性:地震学与流变学的交点	(45)
2.2.4 水:Maxwell 之魔	(47)
2.2.5 新的岩石圈-软流圈模型	(52)
2.2.6 大陆岩石圈:大地构造圈(tectosphere)	(56)
第 3 章 地震波成像与地幔对流	(60)
3.1 地震波层析成像	(60)
3.2 非均匀性	(61)

3.2.1 地震学的观测事实	(61)
3.2.2 非均匀性在地球内部动力学上的意义: 矿物 物理基础	(67)
3.3 各向异性	(78)
3.3.1 地震学观测	(78)
3.3.2 各向异性的矿物岩石物理基础	(84)
3.4 展望	(96)
第4章 地幔物质循环与流变	(97)
4.1 历史背景, 问题的设定	(97)
4.2 俯冲海洋板块和 660 km 边界的相互作用	(99)
4.2.1 相变与对流	(99)
4.2.2 流变对对流形式的影响	(106)
4.2.3 海洋地壳与板块本体的分离	(113)
4.3 对流柱	(118)
4.3.1 对流柱的产生	(118)
4.3.2 对流柱的形状	(120)
4.3.3 对流柱与其背景流动的相互作用: 热点 为何不动	(121)
4.3.4 对流柱输送的热量	(123)
4.3.5 有关对流柱的观测	(123)
4.4 流变和物质的混合	(124)
4.4.1 地球化学观测	(124)
4.4.2 物质的混合	(126)
4.4.3 流变对物质混合的影响	(128)
4.5 展望	(130)

第 5 章 深源地震的发生机理	(131)
5.1 深源地震的发现	(131)
5.2 深源地震的特征	(133)
5.2.1 震源的深度分布	(134)
5.2.2 震源机制	(135)
5.2.3 余震	(136)
5.2.4 地震效率	(137)
5.3 岩石力学与地震:脆性—延性转化	(137)
5.4 深源地震的发生机理	(140)
5.4.1 应力的产生原因	(140)
5.4.2 断层形成机理	(141)
5.5 展望	(149)
第 6 章 地核动力学	(151)
6.1 地核的结构和动力学	(151)
6.1.1 地核的结构	(151)
6.1.2 地核的演化	(153)
6.2 外核动力学:发电机模型	(155)
6.2.1 能源	(155)
6.2.2 发电机理论	(157)
6.3 内核动力学	(166)
6.3.1 地震学观测	(166)
6.3.2 各向异性的成因	(169)
6.3.3 内核超旋转的原因	(174)
6.4 展望	(175)

第 7 章 比较行星学和行星物质的流变	(177)
7.1 地球型行星的内部结构和大气组成	(177)
7.1.1 内部结构	(177)
7.1.2 大气的组成	(181)
7.2 行星的热进化与成层结构、磁场.....	(185)
7.2.1 层状结构的形成和岩浆海	(185)
7.2.2 核的热演化与磁场	(190)
7.3 地球型行星的构造学	(192)
7.3.1 对流的类型	(195)
7.3.2 板块构造和水	(196)
7.4 作为独特行星的地球:地球行星科学展望.....	(201)
附录	(203)
参考、引用文献	(237)

第 1 章 地球的结构与构造

如何调查地球内部的结构？

地球内部是由什么物质构成的？

地幔、地核等部分在化学上的均质程度如何？

地球内部的温度和压力等是如何变化的？

高温高压条件下物质的状态变化如何？

1.1 地球内部结构：层状结构、化学组成和相变

为了解地球等行星的演化与动力学特征，首先必须清楚这些行星是由什么物质构成的。这个问题并不那么简单，因为我们不能从地球(或其它行星)的深部采集到样品。迄今世界上最深的钻孔(俄罗斯的科拉半岛)也只不过约 12 km。即使某些火山能够将地幔深部的物质运送到地表，其深度通常大约不超过 200 km。因此，关于地球内部结构的讨论不得不基于一些间接的信息，这些信息包括地球化学和地球物理学两方面。在本章中，首先总结过去的基本观测事实，然后介绍一些根据观测事实推测的地球结构模型。正如下面所要阐明的那样，尽管这些讨论是间接的，但是根据迄今为止的研究已对地球内部结构的某些方面了解得很清楚了，其中也有相当多臆测的成分。这种状况在其它科学领域也是共通的，最重要的是要牢牢把握已经确定的事实，以及还不怎么清楚但与本质问题相联系的重要事项之间的区别。充分理解基本事实和方法，找到重要但还没弄明白的问题，并为此做出一点贡献，这才是科学研究工作的精髓。

1.1.1 地球化学模型

地球内部的化学组成,可根据在地球表面发现的岩石来推测,这种推测并不那么简单。因为,在地表附近发现的岩石,是经过了很多多样化的分化过程而形成的,根据这些岩石物质的化学组成来推测地球深部物质的化学组成时,有必要理解岩石的分化过程。例如,在地表我们可以看到,在大陆地区是花岗岩,在海洋地区则是玄武岩。由于这些物质的密度和弹性波速度与地幔的密度和地震波速度不一致,因而不能认为这些物质就是构成这一区域地幔的物质。

正如以下所述那样,地幔的密度和地震波速度表明,地幔是由硅含量更少的岩石构成的,尽管含量极少但在地表也能见到从地幔被运送上来的岩石,它含硅量少但却富含镁和铁。基于这一观测事实和部分熔融而形成的岩石理论,澳大利亚的 Ringwood 提出了地幔岩(pyrolite)模型(Ringwood, 1975)。这个模型首先确认了这样一个认识:即作为地球火山活动的结果,玄武岩的形成是最重要的;假定玄武岩是由地幔物质中的部分熔融所形成的,则地幔物质在部分熔融时,必定会生成玄武岩(更确切地说是洋中脊玄武岩)。根据这一观点, Ringwood 认为地幔物质部分熔融时生成的洋中脊玄武岩是由被称之为地幔岩的假想岩石构成的,它是地幔岩石的主要部分。地幔岩具有与富含镁和铁的地幔中岩石相似的成分,只是硅含量略多而已。这个模型中,把偶尔看到的地幔中的岩石解释为地幔岩部分熔融后剩下的岩石, Ringwood 提出了整个地幔(包括上、下地幔)都具有地幔岩的化学成分的假说。对于该假说,地幔内的密度和弹性性质随深度变化的规律必须解释为因全部相同的物质的相变、压缩和热膨胀引起的。

另一种观点认为,地球具有与太阳系中平均化学组成相同的化学组成。尽管对太阳系中平均的化学组成的推测也并非易事,但通常进行如下的讨论:一方面认为,因太阳的上层大气的强对流作用而使其物质充分混合,因此其化学组成接近于太阳的平均化学组成

(太阳大气的化学组成可以通过分光观测推得)。另一方面,在陨石中,存在着被称之为炭质球粒陨石(chondrite)的物质,它是原始的,没有受到较大的化学分化影响。这种陨石的形成年代是太阳系物质中最古老的(约45.6亿年)。因此,可以认为,炭质球粒陨石记录了太阳系形成时没有怎么变更的化学成分。实际上,除去氢等挥发性元素以外,炭质球粒陨石的化学组成与太阳上层大气的化学组成具有很好的一致性。因此,可以将炭质球粒陨石作为太阳系平均化学组成的代表。如果地球具有与太阳系平均化学组成相同的化学组成,那么地球的化学组成应该与炭质球粒陨石的成分相近。这一关于地球化学组成的模型被称之为球粒陨石模型。

表1-1为对应于地幔岩模型和球粒陨石模型的地球化学组成。这两个模型的最大差别就是 $(\text{Mg} + \text{Fe})/\text{Si}$ 的比值。在球粒陨石模型中,地幔中的硅含量必然比地幔岩模型多。另一方面,基于多方面的资料,可以认为地幔上部的物质的化学组成接近于地幔岩,只是硅的含量比地幔岩略少。因此,如果地球具有球粒陨石的化学组成,那么在地球深部,硅的含量一定会比浅部增加。也有一些学者认为,一种可能性

表1-1 地球的化学成分组成(重量%)

化学成分	大陆地壳	上地幔	地幔岩模型	球粒陨石模型(1)	球粒陨石模型(2)
MgO	4.4	36.6	38.1	26.3	38.1
Al ₂ O ₃	15.8	4.6	4.6	2.7	3.9
SiO ₂	59.1	45.4	45.1	29.8	43.2
CaO	6.4	3.7	3.1	2.6	3.9
FeO	6.6	8.1	7.9	6.4	9.3
其它氧化物	7.7	1.4	1.2		5.5
Fe				25.8	
Ni				1.7	
Si				3.5	

注:表1-1数据引自Ringwood(1975)等。在球粒陨石模型(1)中,认为地核中的硅是熔化的;在球粒陨石模型(2)中,地幔的化学组成是根据这一地核模型并将整个地球的化学组成按与炭质球粒陨石相同的模型计算得到的。