橄榄石的后尖晶石相变研究进展

翟双猛1) 夏 斌1) 陈汉林2)

1) 中国科学院广州地球化学研究所,510640;2) 浙江大学理学院地球科学系,杭州,310027

摘 要 橄榄石在高温高压条件下分解为钙钛矿和方镁石(后尖晶石相变),这是地幔中最为重要的相变之一,被认为是 660 km 地震波速间断面的成因。现今所取得的重要进展表现在 3 个方面: ① Mg,SiO4 的后尖晶石相变的原位 X 射线高温高压实 验研究;② 水、AbO,以及压力标尺对后尖晶石相变的影响效应;③ 下地幔条件下地幔岩组分中的后尖晶石相变。在对研究 进展进行概述的基础上,对目前存在的问题进行了分析并提出未来可能的研究方向。 关键词 橄榄石 后尖晶石相变 进展

Advances in the Study of Post-Spinel Phase Transformation of Olivine

ZHAI Shuangmeng¹⁾ XIA Bin¹⁾ CHEN Hanlin²⁾

1) Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou, Guangdong, 510640; 2) Department of Earth Science, College of Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, 310027

Abstract Ringwoodite, one of the high-pressure and high-temperature forms of olivine, can be decomposed into perovskite and periclase (post-spinel phase transformation). The process, which seems to be one of the most important transformations in the Earth's mantle, is believed to be the cause of the 660-km seismic discontinuity dividing the mantle into upper and lower parts. The advances made in the researches are shown in three aspects; 1) post-spinel phase transformation of Mg₂SiO₄ at high pressure and high temperature using in situ X-ray diffraction; (2) the effects of H₂O₃ and equation of state of gold on the post-spinel phase transformation; 3) the post-spinel phase transformation in peridotite under lower mantle conditions. On the basis of a summary of recent advances, this paper analyzes the existing problems and indicates possible directions for further studies.

Key words olivine post-spinel phase transformation advance

人们很早就认识到成岩矿物,尤其是橄榄石的 高温高压相变可能与观测到的地幔中地震波速间断 面有关(Birch, 1952; Ringwood, 1958), 这种关联性 的明确验证必须依赖于橄榄石的高温高压实验研究 结果。基于高温高压研究所取得的成果(Ito et al., 1982, 1989; Wood, 1990; Akaogi et al., 1993, 1998; Chopelas et al., 1994;; Fei et al., 1999; Chudinovskikh et al., 2001),基本确立了地幔中地震波速 间断面与岩石矿物高温高压相变的关系,橄榄石是 幔源岩石的主要组分之一,现在一般认为 410 km 和 660 km 波速间断面是由于橄榄石的高压相变引 起的。

作为橄榄石的高温高压形态之一的林伍德石分 解为钙钛矿相加上方镁石相(后尖晶石相变),这被 认为是导致 660 km 地震波速间断面的原因, 而 660 km 地震波速间断面作为上、下地幔的分界面,对地 球内部结构、物质组成、动力学状态、地幔对流方式 和对流尺度等研究都具有重要意义,特别是在涉及 到地幔柱和俯冲板块的区域。因此,对后尖晶石相 变的相关研究就具有极为重要的意义。随着高温高 压实验技术的不断发展和完善,关于后尖晶石相变 的研究已经取得了大量的成果,尤其是近几年在原 位测量以及影响后尖晶石相变的因素等方面取得了 不少成果。

研究讲展 1

橄榄石是幔源岩石的主要组分之一,由于它的 高温高压相变与地幔中的地震波速间断面密切相

改回日期:2005-12-19;责任编辑:刘淑春。

本文为国家自然科学基金项目(编号:40402006)及教育部高等学校优秀青年教师教学和科研奖励计划资助成果。

第一作者简介:翟双猛,男,1975年生,博士后,目前主要从事高温高压实验研究;E-mail:shm-zhai@sohu.com。

关,所以橄榄石的高温高压相变得到了广泛深入的 研究(Ringwood, 1970; Kumazawa et al., 1974; Ming et al., 1974; Liu, 1976; Ito et al., 1982, 1989; Wood, 1990; Akaogi et al., 1993, 1998; Chopelas et al., 1994; Fei et al., 1999; Shim et al., 2001; Chudinovskikh et al., 2001)。根据这些高温高压实验研 究结果,大多数学者认为:660 km 地震波速间断面 是由橄榄石的后尖晶石相变引起的,即高温高压条 件下橄榄石的尖晶石相分解转变为钙钛矿相加上方 镁铁矿。

随着高温高压实验技术的不断发展和完善,特 别是原位 X 射线衍射等技术在高温高压实验中的 应用,大大推动了后尖晶石相变的研究,并取得了与 快冷实验方法不同的一些结果,这些结果又推动了 后尖晶石相变的相关研究。

1.1 原位实验研究结果

Irifune 等(1998b)采用原位 X 射线衍射多砧高 压实验装置研究了 1400~1800 ℃温度下 Mg2SiO4 的后尖晶石相变,实验结果表明:在1600℃时,后尖 晶石相变压力为 21.1±0.2 GPa,这一压力比 660 km 地震波速间断面对应的压力低大约 2 GPa,这是 一个很大的压力差异,相当于大约 60 km 的厚度。 Shim 等(2001)利用原位 X 射线衍射激光加热金刚 石压砧研究了 20~36 GPa 压力下 Mg2SiO4 的后尖 晶石相变,结果表明:Mg2SiO4 尖晶石可以与其分解 转变的产物在 2 GPa 的压力区间中共存, Mg_SiO_4 的后尖晶石相变的压力和温度与 660 km 地震波速 间断面的对应值是一致的。Katsura 等(2003)采用 高温高压原位 X 射线衍射的方法重新研究了 Mg2SiO4的后尖晶石相变,结果表明:在1550~ 2100 K 温度下, Mg₂SiO₄ 的后尖晶石相变压力大约 为22 GPa,这一压力值比660 km 地震波速间断面 对应的压力低 1~1.5 GPa。Kubo 等(2000,2002) 采用同步辐射的原位 X 射线衍射实验在 22.7~ 28.1 GPa 和 860~1200 ℃ 的实验条件下研究了 Mg₂SiO₄的后尖晶石相变机制和动力学机制,并分 析了实验后样品的显微结构。结果表明: Mg2SiO4 尖晶石依次分解为亚稳态的 MgSiO₃ 钛铁矿加上方 镁石以及斯石英加上方镁石,最终形成稳态的 Mg-SiO₃钙钛矿加上方镁石,相关产物的吉布斯自由能 存在如下关系: $G_{sp} > G_{il+pc} > G_{pv+pc}, G_{sp} > G_{st+pc} >$ G_{pv+pc},下标 sp、il、pc、pv、st 分别代表尖晶石、钛铁 矿、方镁石、钙钛矿、斯石英;并观察到了 Mg₂SiO₄ 尖晶石分解为亚稳态的 MgSiO₃ 钛铁矿加上方镁石 的拓扑关系;根据原位观测的动力学数据估算出后 尖晶石相变的动力学参数。

1.2 后尖晶石相变的压力一温度斜度

后尖晶石相变压力在不同的温度下是不同的, 随着温度的升高,相变压力降低,即具有负的压力一 温度斜度(Navrotsky,1980)。尖晶石相变压力一温 度斜度对于探讨地幔对流方式及对流尺度都具有重 要意义。

Ito 等(1982)首次测定的后尖晶石相变压力一 温度斜度 dP/dT = -2.0 MPa/K; Ito 等(1989)对 Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄体系的高温高压实验研究结果表 明:在1000~1600℃温度条件下,后尖晶石相变的 压力—温度关系为 P(GPa) = 27.6 - 0.0028T(℃), 对应的压力—温度斜度 dP/dT = -2.8 MPa/K; Ito 等(1990)通过测定热量数据研究了后 尖晶石相变的热动力学特性,他们得到的后尖晶石 相变的压力—温度斜度 $dP/dT = -4 \pm 2$ MPa/K; Akaogi 等(1993) 通过相关反应焓变的测定结果和 相平衡数据推算出后尖晶石相变的压力—温度斜度 dP/dT = -3±1 MPa/K; Wicks 等(1993)将地震波 速间断面的观测结果和俯冲块体热量模型相结合, 估算出后尖晶石相变的压力一温度斜度 dP/dT = -1.7~-4.4 MPa/K; Chopelas 等(1994)利用在高 压下 γ-Mg₂SiO₄ 的热动力学特性得出后尖晶石相变 的压力—温度斜度 dP/dT = -2.0~-2.8 MPa/ K;Katsura 等(2003)的原位实验研究结果表明:后 尖晶石相变的压力—温度斜度 $dP/dT = -0.4 \sim$ $-2.0 \text{ MPa/K}_{\circ}$

1.3 水对后尖晶石相变的影响

水是一种重要的挥发分,它可以被俯冲块体带 到深部地幔(Irifune et al.,1998a;Ono,1998)。高温 高压实验结果表明:林伍德石(ringwoodite)的晶体 结构可以容纳大约2%~3%的水(Kohlstedt et al., 1996;Inoue et al.,1998;Yusa et al.,2000;Ohtani et al.,2000)。Higo等(2001)通过高温高压实验考察 了水对后尖晶石相变压力的影响以及水在林伍德石 和钙钛矿中的含量,实验温度为1600℃,压力为 20.8~21.8 GPa。其结果表明:水在一定程度上能 够影响后尖晶石相变压力,可以使其升高大约0.2 GPa;林伍德石中水的含量很高,大约可达1%,而钙 钛矿中水的含量非常低,仅仅只有0.05%。

1.4 Al₂O₃ 对后尖晶石相变的影响

地幔中除了包含主要组分 MgO、SiO2 和 FeO 之外,还包含一定数量的 AbOa。高压实验研究揭 示 Al₂O₃ 在 MgSiO₃ 钙钛矿型中的最大固溶度随着 压力的增加而显著增加。Zhai等(2001)探讨了高温 高压实验条件下 Al₂O₃ 在尖晶橄榄石中的固溶度及 其对尖晶橄榄石分解转变压力的可能影响,实验压 力为 21~22 GPa,温度为 1550~1750 ℃。结果表 明:Al₂O₃在尖晶橄榄石中的固溶度是很低的,在22 GPa和1750℃的实验条件下,尖晶橄榄石相是非常 稳定的, AbO, 在尖晶橄榄石相中的固溶度为 0.790%,在22 GPa 和 1550℃的实验条件下,Al₂O₃ 在尖晶橄榄石相中的固溶度为0.097%,在21 GPa 和1550℃条件下的实验,AbO,在尖晶橄榄石相中 的固溶度为1.282%。可以看出,Al2O3在尖晶橄榄 石相中的固溶度随着温度的降低而下降,随着压力 的增加而下降。由于固溶在尖晶橄榄石中的 Al₂O₃ 非常有限,因此,Al₂O₃对后尖晶石相变的压力可能 不会有很显著的影响。

1.5 压力标尺对后尖晶石相变的影响

目前,Anderson 等(1989)的 Au 的 P-V-T 状态 方程被广泛地作为内压标尺应用在高压技术中,特 别是在采用多砧高压装置进行后尖晶石的原位实验 研究中。

Shim 等(2002)利用准静压倒转实验和冲击波 数据,采用 Mie-Grüneisen 关系式和 Birch-Murnaghan-Debye 方程重新研究了 Au 的状态方程,并 结合其他精确测定的参数计算给定体积和温度条件 下的压力值,在 660 km 的深度条件下,根据新的 Au 的状态方程得到的压力值比基于 Anderson 的状态 方程得到的压力值高 1.0±0.2 GPa。但是,对相关 结果进行校正后,在原位测定的后尖晶石相变压力 仍然比 660 km 地震波速间断面对应的压力低 1.5 GPa。

Tsuchiya(2003)采用第一法则电子结构计算方 法推算了 Au 的状态方程,没有采用经验参数。通 过计算 Au 的热弹性特征以及 Grüneisen 参数,研究 了 Au 的状态方程。在 23 GPa、1800 K时,依据最 新结果得出的压力比根据 Anderson 的状态方程得 到的压力高 1.3 GPa,从而大大减少了后尖晶石相 变压力与 660 km 地震波速间断面对应压力之间的 差异,但仍然存在大约0.7 GPa的压力差异。

1.6 地幔岩的后尖晶石相变

依据地球深部的岩石学、地球化学和地球物理 学资料,提出了两种可能的地幔岩矿物模型:PY-ROLITE 模型(Ringwood, 1962)和 PICLOGITE 模 型(Anderson et al., 1984;Bass et al., 1984)。

Wood(2000)在 1900 K、19~25 GPa 温压条件 下研究了地幔橄榄岩(peridotite)的相变,结果表明: 后尖晶石相变的压力为 22.5~23 GPa,这与 660 km 地震波速间断面对应的温度压力是一致的,相变产 物钙钛矿中含有少量 Al₂O₃(≤1%)。Nishiyama 等 (2003)采用原位 X 射线衍射实验技术在 1600 ℃、 20~25 GPa 温压条件下研究了地幔岩(pyrolite)中 的矿物随压力增加而发生的相变,结果表明:后尖晶 石相变压力为 22.0±0.2 GPa,在 22.5 GPa 时,相 变产物钙钛矿中 Al₂O₃ 的含量为 2.8%。

1.7 660 km 地震波速间断面的可能成因

关于 660 km 地震波速间断面的性质,目前大 多数学者认为主要是由于橄榄石的相变导致的相变 边界。但是,在这个问题上存在着争议。在林伍德 的地幔岩模型中,上地幔主要由橄榄石和斜方辉石 组成,其中橄榄石约占61%(体积百分含量),在660 km间断面处,γ尖晶橄榄石分解转变为方镁铁矿加 上钙钛矿相,因此认为 660 km 间断面是相变界面。 Ai 等(2003)对中国东北地幔 660 km 地震波速间断 面进行研究后,认为 660 km 地震波速间断面并不 是简单地由尖晶橄榄石分解转变引起的,非尖晶石 组分的相变也有一定的影响,如石榴子石-钛铁矿相 变、钛铁矿-钙钛矿相变等;而在 Anderson 等(1989) 的球粒陨石模型中,上地幔主要由橄榄石和单斜辉 石组成,其中橄榄石的体积含量低于 50%,下地幔 则富含铁和硅,因此认为 660 km 间断面是化学界 面。还有一种综合的观点认为 660 km 间断面是相 变界面和化学界面兼而有之。

鉴于原位高温高压实验结果和 660 km 地震波 速间断面之间存在的压力差异, Irifune 等(1998b)曾 提出这一压力差异可能是起因于:① 其他相关次要 元素的影响效应;② 目前采用的压力标尺的精确 性;③ 深部地幔可能的化学成分不均匀性。依据目 前所取得的研究成果, 其他相关次要元素的影响效 应的确存在, 压力标尺的精确性也有待于进一步加 以修正, 但这些都不足以解释原位测量的尖晶橄榄 石分解转变压力与 660 km 地震波速间断面对应压 力之间存在的压力差异。因此,原位研究的尖晶橄 榄石分解转变压力与 660 km 地震波速间断面的对 应压力之间存在的 2 GPa 的压力差异主要不是由于 相关次要元素的影响和目前采用的压力标尺的精确 性所引起的,而可能主要是由于深部地幔可能的化 学成分不均匀性所引起的。

2 未来展望

后尖晶石相变的实验研究具有重要的地质意 义,高温高压实验已经取得了大量的成果。然而,在 有些问题上还存在着疑问,例如,目前还没有精确的 原位测得的后尖晶石相变边界,也不能合理地解释 原位测量的后尖晶石相变压力与 660 km 间断面对 应压力之间存在的压力差异,高温高压条件下压力 标定的精确性在多大程度上影响着实验结果的精度 等。鉴于存在的上述问题,在此提出今后可能的研 究方向。

(1)精确测定后尖晶石相变的相边界和压力一 温度斜度。这是解决目前存在问题的关键,虽然 Katsura等(1989)利用快冷技术测定了后尖晶石相 变的边界,但其精确性有待于详细的原位测量结果 的进一步确认和校正。

(2)进一步探讨原位测量的后尖晶石相变压力 与 660 km 间断面对应压力之间存在的压力差异, 可以通过研究压力对热电偶的影响效应、压力标定 物的状态方程和压力标定的精确性以及后尖晶石相 变的压力一温度斜度等,得出合理的解释。

(3) 含 Fe 橄榄石的原位实验研究,目前的原位 实验都是研究 Mg₂SiO₄ 的相变。含 Fe 体系中的后 尖晶石相变不同于单一的镁橄榄石的后尖晶石相 变,它们在相变压力、相变速率、动力学参数等方面 都不会相同,详细的铁橄榄石原位实验研究结果将 会加深我们对橄榄石的后尖晶石相变的了解和认 识。

(4)后尖晶石相变的反应物及其产物在高温高 压条件下各种物性参数的精确测定。通过物性参数 的测定可以进一步确定后尖晶石相变的各种特征, 并可以修正和约束高温高压实验结果。

(5)高温高压条件下不同组分和体系中后尖晶 石相变及其产物的特征,特别是在存在挥发性组分 的体系中,后尖晶石相变的压力与组分以及挥发份 之间可能存在的对应关系,这些研究可以进一步补 充和完善地幔矿物模型。

References

- Akaogi M, Ito E. 1993. Refinement of enthalpy measurement of Mg-SiO₃ perovskite and negative pressure-temperature slopes for perovskite-forming reactions. Geophys. Res. Lett., 20: 1839 ~ 1842.
- Akaogi M, Kojitani H, Matsuzaka K, et al. 1998. Postspinel transformations in the system Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄: element partitioning, calorimetry, and thermodynamic calculation. In: Manghnani M H, Yagi T, eds. Properties of Earth and Planetary Materials at High Pressure and Temperature, Geophys. Monogr., 101:373~ 384.
- Ai Y, Zheng T, Xu W, et al. 2003. A complex 660 km discontinuity beneath northeast China. Earth Planet. Sci. Lett., 212: 63~71.
- Anderson D L, Bass J D. 1984. Mineralogy and composition of the upper mantle. Geophys. Res. Lett., 11: 637~640.
- Anderson O L, Isaak D G, Yamamoto S. 1989. Anharmonicity and the equation of state for gold. J. Appl. Phys., 65: 1534~1543.
- Bass J D, Anderson D L. 1984: Composition of the upper mantle: Geophysical tests of two petrological models. Geophys. Res. Lett., 11: 237~240.
- Birch F. 1952. Elasticity and constitution of the Earth's interior. J. Geophys. Res., 57: 227~286.
- Chopelas A, Boehler R, Ko T. 1994. Thermodynamics and behavior of γ-Mg₂SiO₄ at high pressure: implications for Mg₂SiO₄ phase equilibrium. Phys. Chem. Mineral., 21: 352~359.
- Chudinovskikh L, Boehler R. 2001. High-pressure polymorphs of olivine and the 660 km seismic discontinuity. Nature, 411: 574~ 577.
- Fei Y, Bertka C M. 1999. Phase transitions in the Earth's mantle and mantle mineralogy. In: Fei Y, Bertka C M, Mysen B O, eds. Mantle Petrology: Field Observations at High Pressure Experimentation: A Tribute to Francis R. (Joe) Boyd, The Geochemical Society, Special Publication, 6:189~207.
- Higo Y, Inoue T, Irifune T. 2001. Effect of water on the spinel-post-spinel transformation in $Mg_2SiO_4.$ Geophys. Res. Lett., 28: $3505\sim3508.$
- Inoue T, Weidner D J, Northrup P A, et al. 1998. Elastic properties of hydrous ringwoodite (γ -phase) in Mg₂SiO₄. Earth Planet. Sci. Lett., 160: 107 \sim 113.
- Irifune T, Kubo N, Isshiki M, et al. 1998a. Phase transformations in serpentine and transportation of water into the lower mantle. Geophys. Res. Lett., 25: 203~206.
- Irifune T, Nishiyama N, Kuroda K, et al. 1998b. The postspinel phase boundary in Mg₂SiO₄ determined by in situ X-ray diffraction. Science, 279: 1698~1700.
- Ito E, Yamada H. 1982. Stability relations of silicate spinels, ilmenites and perovskites, advances in earth and planetary sciences. In: Akimoto S, Manghnani M H, eds. High Pressure Research in Geophysics, vol. 12. Center for Academic Publications Japan, Tokyo, 405~419.
- Ito E, Takahashi E. 1989. Postspinel transformations in the system

 $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ and some geophysical implications. J. Geophys. Res. , 94: 10637 $\sim\!10646.$

- Ito E, Akaogi M, Topor L, et al. 1990. Negative pressure-temperature slopes for reactions forming MgSiO₃ perovskite from calorimetry. Science, 249: 1275~1278.
- Katsura T, Ito E. 1989. The system Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄ at high pressures and temperatures: precise determination of stabilities of olivine, modified spinel and spinel. J. Geophys. Res., 94: 15663 ~15670.
- Katsura T, Yamada H, Shinmei T, et al. 2003. Post-spinel transition in Mg_2SiO_4 determined by high *P-T* in situ X-ray diffractometry. Phys. Earth Planet. Inter., 136: $11 \sim 24$.
- Kohlstedt D L, Keppler H, Rubie D C. 1996. Solubility of water in the α , β and γ phases of (Mg, Fe)₂SiO₄. Contrib. Mineral. Petrol., 123: 345~357.
- Kubo T, Ohtani E, Kato T, et al. 2000. Formation of metastable assemblages and mechanisms of the grain-size reduction in the postspinel transformation of Mg₂SiO₄. Geophys. Res. Lett., 27: 807 \sim 810.
- Kubo T, Ohtani E, Kato T, et al. 2002. Mechanisms and kinetics of the post-spinel transformation in Mg₂SiO₄. Phys. Earth Planet. Inter., 129: 153~171.
- Kumazawa M, Sawamoto H, Ohtani E, et al. 1974. Postspinel phase of forsterite and evolution of the Earth's mantle. Nature, 247: 356 ~358.
- Liu L G. 1976. The post-spinel phase of forsterite. Nature, 262: 770 $\sim 772.$
- Ming L C, Bassett W A. 1974. The postspinel phases in the Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄ system. Science, 187: 66~68.
- Navrotsky A. 1980. Lower mantle phase transitions may generally have negative pressure-temperature slopes. Geophys. Res. Lett., 7: 709~711.
- Nishiyama N, Irifune T, Inoue T, et al. 2003. Precise determination of phase relations in pyrolite across the 660 km seismic discontinuity by in-situ X-ray diffraction and quench experiments. Submit to Phys. Earth Planet. Inter.
- Ohtani E, Mizobata H, Yurimoto H. 2000. Stability of dense hydrous magnesium silicate phases in the system Mg₂SiO₄-H₂O and Mg-

 $SiO_3\text{-}H_2O$ at pressures up to 27 GPa. Phys. Chem. Minerals, 27: $533{\sim}544.$

- Ono S. 1998. Stability limits of hydrous minerals in sediment and midocean ridge basalt compositions: Implication for water transport in subduction zones. J. Geophys. Res., 103: 18253~18267.
- Ringwood A E. 1958. Constitution of the mantle, III. Consequences of the olivine-spinel transition. Geochim. Cosmochim. Acta, 15: 195 ~212.
- Ringwood A E. 1962. A model for the upper mantle. J. Geophys. Res., 67: 857~866.
- Ringwood A E. 1970. Phase transformations and the constitution of the mantle. Phys. Earth Planet. Inter., 3: 109~155.
- Shim S, Duffy T S, Shen G. 2001. The post-spinel transformation in Mg_2SiO_4 and its relation to the 660-km seismic discontinuity. Nature, 411: 571~574.
- Shim S, Duffy T S, Kenichi T. 2002. Equation of state of gold and its application to the phase boundaries near 660 km depth in Earth's mantle. Earth Planet. Sci. Lett., 203: 729~739.
- Tsuchiya T. 2003. First-principles prediction of the P-V-T equation of state of gold and the 660-km discontinuity in Earth's mantle. J. Geophy. Res., 108: 2462, doi:10.1029/2003JB002446.
- Wicks C W, Richards M A. 1993. A detailed map of the 660-kilometer discontinuity beneath the Izu-Bonin subduction zone. Science, 261: 1424~1427.
- Wood B J. 1990. Postspinel transformations and the width of the 670km discontinuity: a comment on "Postspinel transformations in the system Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄ and some geophysical implications" by E. Ito and E. Takahashi. J. Geophys. Res., 95: 12681~12685.
- Wood B J. 2000. Phase transformations and partitioning relations in peridotite under lower mantle conditions. Earth Planet. Sci. Lett., 174: 341~354.
- Yusa H, Inoue T, Ohishi Y. 2000. Isothermal compressibility of hydrous ringwoodite and its relation to the mantle discontinuities, Geophys. Res. Lett., 27: 413~416.
- Zhai S, Fei Y. 2001. Phase relations in the system Mg₂SiO₄-MgAl₂O₄ at 22 GPa. EOS Trans. AGU, 82(47), 2001 AGU Fall Meet. Suppl.

79