特集—高圧地球科学—

高圧下の超音波音速測定法と 新しいデータ解析法

Recent Studies on Ultrasonic Measurements under High Pressure and a New Analytical Methodology for Ultrasonic Velocity Data at Simultaneous High Pressure and High Temperature

米田 明

Akira YONEDA

Basic techniques for ultrasonic measurements are discussed with emphasis placed on accuracy of sound velocity. Recent ultrasonic studies under high pressure are briefly reviewed, and a new analytical methodology called the complete thermodynamic equation of state is introduced. The potential of the method is demonstrated by analyzing a synthetic model data set. The results suggest that the method can be used to constrain thermodynamic parameters, such as heat capacity and thermal expansivity, up to pressures of the core-mantle boundary using experimental data collected only up to 10 Gpa.

[high pressure, high temperature, acoustics, elasticity, ultrasonic, complete thermodynamic equation of state, pressure scale, GHz interferometry]

1. はじめに

高圧地球科学において超音波による鉱物の音速測定的重要性はよく認識されている。その理由の一つは、測定データを地球内部の地震波速度分布と直接比較するためであるが、もう一つ理由は、音速から求まる体積弾性率のデータが鉱物の状態方程式の確立に決定的に重要であることによる。

本稿では(1)高圧下の音速測定技術について基本的な解説を行い、ついで(2)近年のこの分野の代表的な仕事を紹介し、最後に(3)完全熱力学状態方程式なる解析方法とその潜在能力を紹介する。

2. 音速実験法について

2.1 音速測定系の試料構成と装置構成

Fig.1に音速測定系の試料構成を示す。ここで示されているのは、トランスデューサー、バッファロッド、ボンド、サンプルである。トランスデューサーは圧電性物質でつくられており、電気的信号を機械的振動に変換（及びその逆変換）するものである（詳しいことは音速技術の解説書を見て頂きたい）。トランスデューサー

の励起法として、高電圧（数十Vから数百V）の矩形パルスを使う方法と、数VのRFパルスを使う方法がある。

Fig.1. A schematic illustration of sample assembly and ray path of echo pulses in ultrasonic velocity measurements.

技術的には前者のほうが容易である。RFパルス法では、音波の周波数が制御できるので多数の周波数で測定できる利点がある。

トランスデューサーに電圧が印加されると音波が発生し、バッファロッドを経てサンプルに入り、サンプル端面で反射され、再びトランスデューサーに戻ってくる。波の一部はバッファロッドの端面でも反射されるので、幾つかののエコーパルスの系列が観測される。Fig. 1中の矢線は三つのエコーパルスの軌跡を示している。そのうちの近接する二つのエコーパルスの到着時間差が、音波がサンプル中を走った時間（トラベルタイム）に相当する。サンプルの長さ（の2倍）をトラベルタイムで割ったものがサンプルの音速である。

ボンドはバッファロッドとサンプル間で波の伝達をよくするために使われるものである。ボンドも実にさまざまなものが使われており、その都度適当なものを選択する必要がある。高圧下の測定では、ボンドがなくても圧力を利用した圧着で十分音波は透過する。但しこの場合には弾性定数の異なる物質がダイレクトにコンタクトするので、サンプルにストレスが発生する。ボンドに柔らかい物質を使えばこの影響は軽減できる。この理由で静水圧セルを用いた高圧音速測定ではインジウムが使われた[1]。

先ほど述べたようにトランスデューサーは高電圧で駆動されるが、帰ってきた音波がトランスデューサーを励起して発生する電圧は[V レンジである。この微小なシグナルはアンプにより 40-60 dB 程度増幅されてオシロスコープに送られる。高感度な測定系は高電圧が印加されるとしばらく擾乱が起こって、微小なシグナルを測定する能力を失う。この擾乱が治まった後に音波のシグナルが帰ってくるようにするのがバッファロッド（遅延材）の役目である。高圧実験ではサンプルサイズに制約があるからバッファロッドは必須である。

音速測定に用いられる装置としてパルサー、アンプ、オシロスコープは必須である。このほか周波数フィルター、分配器、RF スイッチなどを実験条件にあわせて使用する。（自分の実験目的にあうようにこれらの器材をそろえていくわけであるが、パルサーとオシロスコープは特に高価なので、なるべくデモ機を借りるなどして慎重に機種選定して頂きたい。近年はこれらの機能を一台に組み込んだ高機能の装置も市販されているので検討に値する）。

これらの装置は普通同軸ケーブル（特性インピーダンス 50 Ω ）でつながれる。インピーダンス整合には十

分な配慮を払って頂きたい。音速測定に限らず、高周波測定機器を使いこなすための常識である。

オシロスコープを使ってトラベルタイムを測定するわけだが、アナログオシロの時代は干渉法とか重ね合わせ法と呼ばれるテクニックが使われてきた。デジタルオシロが使えれば、波形をそのままデジタルデータとして取り込んでおき、測定後にソフト的に解析することも可能である（筆者もこちらに切替えている）。

2.2 音速測定の精度

適切な装置がそろっていれば、サンプルからの反射波を観測することは簡単である。ここでは観測データから各種の補正を行ってできるだけ正確な音速をもとめるために必要な事項を述べる。

音速測定において試料サイズは重要な制約条件である。10 GPa 程度の高圧下の実験を想定すると、マルチアンビル装置とダイヤモンドアンビル装置では、試料のサイズはそれぞれ 1 mm と 0.1 mm のオーダーになる。

トランスデューサーには固有振動数があり、矩形パルスで叩くと固有振動数成分が卓越した音波が励起される。固有振動数は厚さに反比例するので、高周波用ほど薄く削られる。薄くなると割れるなどの操作性が悪くなるから、使いやすいところで 0.1 mm 程度の厚さ、周波数に直して 50 MHz 程度が最も容易である。

仮に試料サイズを 1 mm、音速を 10 km/s、音波の卓越周波数を 50 MHz とする。マイクロメーターより高級な機器を使えば試料の長さは 10^{-4} の精度で求まらう。トラベルタイム 200 ns にたいし音波の 1 周期は 20 ns であるが、良好なシグナルが得られていれば、0.2 ns 程度、すなわち 10^{-3} の時間分解能は容易である。干渉法などの洗練された方法、あるいは密に取ったデジタルデータを解析するなどの方法で、一桁の上の 10^{-4} の分解能も可能である。

それ以上の分解能をだすには、やはりもっと高い周波数での測定が必要であらう。そのためにはさらに薄いトランスデューサーを使うか、あるいはオーバートーン仕様のトランスデューサーを使う必要がある。

さて音速測定で注意して欲しいのは分解能即精度ではないということである。トラベルタイム測定で常に問題になるのは、試料をバッファロッドに固定するために使うボンドの影響である。ボンド効果はある種のセルフコンシステントな補正法で取り除くことができる（かなり煩雑ではあるが）。筆者が過去にやった補正例をみると、補正量は 1 ns 程度になっている。

さらに音波の回折効果の補正も必要になる。回折効

果は、トランスデューサーが有限の面積を持つことによる幾何学的な効果である。これらは測定システムに依存するが、やはり 1 ns 程度の影響を持つ場合がある。ここで音速測定における近距離音場とか遠距離音場という概念にふれる。要するにトランスデューサーが有限の面積であることに起因する幾何学的効果である。トランスデューサーのすぐ近く（近距離場）では音波ビームはほぼ直進するが、遠くなる（遠距離場）とビームは広がって行く。近距離場と遠距離場の境は

$$N = \frac{d^2}{4\lambda} \quad (d: \text{トランスデューサーの直径}, \lambda: \text{波長})$$

で与えられる。

遠距離音場ではかなりの回折効果がある。筆者の過去の測定をみると（500-1000 ns のトラベルタイムに対し）1 ns 程度の補正量になっている。

音速測定の精度向上の最大の鍵はこれらの補正を愚直に実行するかどうかにかかっている。ボンド効果や回折効果については既存の超音波技術の解説書をみてもそう詳しくは書かれていない。結局参考文献[1-3]を参照しつつ自分で考えて頂くしかない。

近年のこの分野の進歩の一つに、コロラド大学のスペッツラーのグループの GHz 超音波干渉法開発[3]がある。高周波を使っているのでもととの時間分解能は高いわけであるが、彼らも結局はボンド効果や回折効果の補正を徹底的に行って 10^{-5} 以上の高精度を達成し

Fig. 2. Travel time data on the b-axis of a San Carlos olivine sample at 293 K. The filled circles are the observed travel times and the filled squares are the travel times corrected for the effect of the bond. Cited from [4].

たのである。彼らの流儀で教訓的なのは、300 MHz から 1.4 GHz まで 100 MHz の間隔で測定し各周波数毎にボンド補正を実行したトラベルタイムのばらつきの範囲をトラベルタイムの精度と主張していることである (Fig. 2)。多数周波数での測定結果のバラツキを押さえることは、音速法においてトラベルタイムの絶対精度を客観的に主張できる唯一の方法である。

以上をまとめると、

(1) トラベルタイムの生データの精度は、1 mm 程度のサンプルサイズなら、 10^{-2} 程度である、

(2) 多数周波数で測定されたトラベルタイムに各種の補正を施した後のバラツキの程度がトラベルタイムの決定精度である。

2.3 高圧実験上の制約

最大の制約はやはり試料サイズの制約であるが、これはすでに触れた。

次に重要な問題は、試料の静水圧性の問題である。試料の静水圧性が問題になる理由は、

(1) サンプル内に圧力勾配やストレスがあると実験データの解析が困難になることと、(2) 試料の塑性変形があるとトラベルタイムから音速への変換に支障をきたすことである。

実際にどの程度問題になるかであるが、ニューヨーク州立大グループは、自分たちの実験での圧力勾配 (約 0.1 GPa/mm) に起因するトラベルタイムの測定誤差を 10^{-3} としている。

トランスデューサーを置く場所として圧媒体内と圧媒体外がある。近年は圧媒体外におくやり方が主流になっている。実際、次節で紹介する二例も外に置いている。技術的にも外に置いた方が簡単であるから、特段の理由がないかぎり外に置くべきであろう。

3 最近の高圧下の音速測定

近年の高圧下の音速測定研究として二つのグループの研究をあげる。それぞれ、DAC とマルチアンビルでの代表的な仕事といえる。

3.1 DAC による GHz 音速測定法

さきに触れたスペッツラーのグループが手がけているものである。

彼らは、GHz という高い搬送周波数を導入しさらに各種の補正を徹底的に行い 10^{-5} の精度を達成した。この高精度を生かした成果がすでに幾つかでている。一つは、ガーネットとフォスフェイトの音速の組成依存性を決定したものである [7]。Fig. 3 はかれらの論文

Fig. 3. Travel time normalized to that measured at the ambient conditions for olivine and garnet. The symbols are results after correcting for the bond effect. The straight lines are least square fits. Cited from [4].

Fig. 4. Cross-section through the central portion of the new diamond anvil cell. A) transducer, B) buffer rod, C) upper diamond anvil, D) sample, E) alignment rocker, F) lower platen, G) lower heater, H) upper heater, I) alignment slider, J) upper platen. Cited from [8].

中から引用したものである。もう一つは、オリビンの音速を 0.5 GPa、500 K の範囲で測定し C_{22} の温度圧力微係数を決定したものである[5]。いずれも 10^{-4} よりも高い精度を実現して可能となった仕事である。

彼らは当初は 4 GPa ガス圧装置と組み合わせて使うつもりであったが、X 線密度との同時測定による絶対圧力スケール確立のアイデアがでたため[6]、急速 X 線との同時測定が可能な外熱式 DAC での実験を開始した。Fig.4 はその概念図である。

現時点で 5 GPa、700 K 程度の条件まで測定可能になっている[7, 8]。DAC の場合マルチアンビル装置以上にサンプルサイズの制約は大きい。現在のサンプルの厚さは 50-200 μm のある。今後高圧を目指すならば、もっと薄いサンプルが必要であろう。GHz 音速法の潜在能力は素晴らしいが、現在のところ P 波しか測れないようである[1, 5, 6]。P 波用の GHz トランスデューサーは、サファイア上に ZnO を蒸着したものを購入できるが、S 波用は自主開発せざるを得ない。S 波用ニオブ酸リチウムをサファイアに貼り付けて薄く研磨することを試みているが、満足のいくものはできていないようである。また P 波を斜め方向から境界面に入射させ P-S 変換を利用して S 波を発生する方法も検討しているようである[7]。いずれにしても S 波用トランスデューサーの開発が待たれる。

3.2 マルチアンビル中での音速測定

ニューヨーク州立大のリーバーマンのグループは遷移層から下部マントルでの温度圧力下での鉱物の音速測定を目指したプロジェクトを 1995 年頃から開始した[9-12]。彼らはトランスデューサーを圧媒体の外、すなわち一個のアンビルの背面に貼り付けた（アンビルがバッファロッドの役目も果たしている）。トランスデューサー（搬送周波数 20-70 MHz）は常温常圧下にあるので終始安定に動作すると期待される。

彼らはこの方法により従来の高温高圧音速測定よりも高い圧力温度条件（10 GPa、1600 K）でのアルミナ焼結体[9]や MgO 単結晶の音速測定[12]に成功した。MgO の測定では、放射光 X 線により NaCl の格子定数から圧力を決定している。Fig. 5 はその実験での試料構成である。MgO の論文[12]では多数周波数での測定データを基にボンド補正も行っており、最終的な音速測定精度は 10^{-2} としている。

彼らの方法の特徴は、高い温度圧力領域で比較的簡単に音速測定ができることである。

Fig. 5. Acoustic transducer tungsten carbide anvil setup (left) and the sample cell assembly (right) for the simultaneous ultrasonic and x-ray experiment at high pressure and high temperature. Cited from [12].

4. 完全熱力学状態方程式の応用

完全熱力学状態方程式は温度圧力平面上で測定された音速データを熱力学量まで含めて解析する手法である。大変に魅力的な方法であるので、その概要と潜在能力について紹介する。現在のところ完全熱力学状態方程式を適用できる音速測定データは皆無である(温度圧力平面上で面的に測定されたデータがない)。

Fig. 6. Required quantities in order to conduct the complete thermodynamic EOS. Note that travel times have to be measured on a certain area in the pressure-temperature field.

従って完全熱力学状態方程式の潜在能力の検証は人工合成データを用いて行った。この意味で、ここでの解析結果は“予測”である。

4.1 完全熱力学状態方程式

完全熱力学状態方程式[13]を展開するために必要なデータは、

- (1) 標準状態におけるサンプルの密度 ρ_0 と長さ l_0
- (2) 1気圧における熱膨張率 $\alpha(T)$ と等圧比熱 $C_p(T)$
- (3) 温度圧力平面上での縦波と横波のトラベルタイム $t_r(T, P)$, $t_s(T, P)$

である(Fig.6)。ここで標準状態は温度圧力測定領域の原点に相当するもので、具体的には1気圧(事実上0 GPa), 300Kとしてよい。

1気圧ではサンプルの密度 ρ と長さ l は ρ_0, l_0 と $\alpha(T)$ から温度の関数として求まる。 $t_r(T, 0)$, $t_s(T, 0)$ も測定されているから1気圧での音速は

$$v_p(T) = \frac{2l}{t_p}, v_s(T) = \frac{2l}{t_s} \quad (1)$$

と温度の関数として求まる。断熱体積弾性率 K_s も

$$K_s(T) = \rho \left(v_p^2 - \frac{4}{3} v_s^2 \right) \quad (2)$$

と1気圧で温度の関数として与えられる。

完全熱力学状態方程式では以下の熱力学恒等式を活用する。

$$\gamma = \frac{\alpha K_s}{\rho C_p} \quad (3)$$

$$K_T = \frac{K_s}{(1 + \alpha \gamma T)} \quad (4)$$

ここで γ はグリュナイゼンパラメーターと呼ばれる無次元量である。1気圧では等圧比熱 $C_p(T)$ は分かっているし、断熱体積弾性率 $K_s(T)$ も音速データから求まっているから、(2), (3), (4)式を使って1気圧で $\gamma(T)$ と等温体積弾性率 $K_T(T)$ が求まる。この等温体積弾性率から1気圧より少し高圧下 $\square P$ での密度 $\rho(T, \square P)$ が求まる。サンプルの長さ l や α (及びその温度微係数)も $\rho(T, \square P)$ から求まる。この圧力での K_s はトラベルデータとサンプルの長さ及び密度からわかる。等圧比熱 C_p の圧力依存性は次の式で与えられる。

$$\left(\frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_T = -V \left\{ \alpha^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_P \right\} \quad (5)$$

α とその温度微係数はすでに分かっているから、1気圧での等圧比熱 $C_p(T, 0)$ に(5)式を適用すればこの圧力での $C_p(T, \square P)$ が求まる。

こうして $\square P$ で必要な全てのパラメーターが求まり、さらに次の圧力 $2\square P$ での解析に進める。以下は以上のサイクルの繰り返しになる。

(5)式は少しこみいっているが、結局はマックスウェルの恒等式

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (6)$$

を変形したものである。

このような仕組みで、高温高圧下の音速データから熱膨張率や比熱などの熱力学量がもとまるのである。音速データから密度とその温度微係数である熱膨張率が求まることは容易に理解できよう。比熱まで求まるのは、(6)式、すなわちエントロピーの圧力微分が体積の温度微分で決まることによる。

4.2 仮想的“高温高圧音速データ”

まずMgOに近い“弾性的等方性鉱物”の物性を決定し、コアマントル境界までの熱力学量を決定した (本計算に用いた数式と数値パラメータは文献[13]のTable 1を参照して頂きたい)。

ところで式(1)は等方弾性体におけるものであるが、現実の単結晶は3個以上の独立な弾性定数をもつ。その場合必要な測定回数が増えるが、本質的な部分は等方弾性体と同様である。

4.3 数値モデル実験の方法

数値モデル実験は、誤差を含む有限個の実験データから各物性値がどのぐらいの精度で再現できるかをみるものである。今回の数値モデル実験では、“実験誤差”を正規分布の乱数として発生させた。このようにして生成した誤差付き実験データを20回解析し、各物性量の各データ点毎に20回の結果の平均値と標準偏差を求めた。

標準状態でのサンプルの密度と長さは 10^{-4} で測定できると仮定した。従って数値モデル実験では 10^{-4} の乱数(ノイズ)を“真の値”に付け加えた。1気圧の比熱と熱膨張率には 10^{-2} のノイズをあたえた。高圧下のトラベルタイムの測定精度を 10^{-3} から 10^{-6} まで変えて見て、各種の熱力学量がどの程度求まるかを評価した。この数値モデル実験の手法は、筆者がコロラド大学滞在中に、ガス圧装置(最高圧力4 GPa)におけるGHz干渉法による測定データの外挿能力の評価に使ったものである。今回の趣旨はマルチアンビル装置での音速実験の可能性評価にある。

現実の測定では温度や圧力の測定誤差もある。今回の数値モデル実験では温度・圧力には誤差をあたえていない。温度圧力に誤差があれば、見かけ上トラベルタイムの誤差として認識されるからである。ちなみに今回のモデル物質では、圧力で0.01 GPa、温度で2 Kの誤差がトラベルタイムで 10^{-4} の誤差を引き起こす。従ってそれぞれの音速測定の精度に対して要求される圧力温度の決定精度は上記の関係から比例計算で見積もって頂きたい。

本数値モデル実験では、元になるデータはバーチマナハーンの状態方程式を使って生成したものである。完全熱力学状態方程式で解析された“実験データ”はバーチマナハーンの状態方程式でフィッティングされて、高圧側への外挿に使われる。これは言うてみれば、状態方程式の関数形をカンニングしているようなものである。現実の物質がバーチマナハーンの状態方程式に適合する保証はないので、実際の実験データを解析する場合は適切な状態方程式を選択する必要がある (詳しくは文献[13]を参照して頂きたい)。

4.4 状態方程式の決定精度の予測

マルチアンビル装置で比較的安定に発生可能な10 GPa、1200 Kの範囲でトラベルタイムのデータを生成し、それを完全熱力学状態方程式で解析した。0 GPaから10 GPaまで1.0 GPa間隔で、300 Kから1200 Kまで100 K間隔で測定すると仮定した。Fig. 7を見て頂くと非常に分かりやすい関係がみいだされる。温度

Fig. 7. Results of the complete thermodynamic analysis on the synthetic experimental data up to 10 GPa.

- (a) normalized error of density. The standard deviation of 20 times trial is divided by that mean value.
 (b) that for thermal expansivity.
 (c) that for heat capacity.

Note that symbols 'o', '*', and '□' are used to specify 10^{-4} , 10^{-5} , and 10^{-6} accuracies of the travel time, respectively; no symbol in (a) corresponds to 10^{-3} . Four lines for each accuracy correspond to different temperatures (300, 600, 900, and 1200 K).

領域が狭いため、温度に関する熱膨張率や比熱は (10^{-6} の精度を仮定しても) せいぜい 40 GPa ぐらいまでしか信頼できないが、密度や体積弾性率は 10^{-4} の精度を確保すると CMB まで十分な精度で見積もれることが分かる。この点において、この温度圧力条件では、音速精度 10^{-3} と 10^{-4} では価値が決定的に違うのである。幾つかの結論をまとめると

- (1) 10^{-3} の音速測定では密度についてはほとんど外挿能力はない。
- (2) 10^{-4} の音速測定では密度について CMB まで 1% 程度の精度でもとまる。
- (3) 10^{-5} の音速測定では熱膨張率と比熱は 50 GPa まで 10% の精度でもとまる。
- (4) 10^{-6} の音速測定では熱膨張率と比熱は CMB においても 10% の精度でもとまる。

本モデル実験は、マントル深部の熱力学量を決定するための完全熱力学状態方程式の潜在能力を実証し、そのために必要な高圧実験技術と音速測定技術の到達目標点を明確化したものである。

参考文献

- [1] A. Yoneda, J. Phys. Earth, **38**, 19-55 (1990), "Pressure derivatives of elastic constants of single crystal MgO and MgAl_2O_4 ".
- [2] I. Jackson, H. Niesler, D. Weidner, J. Geophys. Res., **86**, 3736-3748 (1981), "Explicit correction of ultrasonically determined elastic wave velocities for transducer-bond phase shift."
- [3] H. Spetzler, G. Chen, S. Whitehead, I. Getting, Pure Appl. Geophys., **141**, 341-377 (1993), "A new ultrasonic interferometer for the determination of

- equation of state parameter of sub-millimeter single crystal".
- [4] G. Chen, H. Spetzler, I. Getting, A. Yoneda: *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 5-8 (1996), "Selected elastic moduli and their temperature derivatives for olivine and garnet with different Mg/(Mg+Fe) constants: Results from GHz ultrasonic interferometry".
- [5] G. Chen, A. Yoneda, I. Getting, H. Spetzler: *J. Geophys. Res.*, **101**, 25161-25171 (1996), "Cross pressure and temperature derivatives of selected elastic moduli for olivine from gigahertz ultrasonic interferometry".
- [6] A. Yoneda, I. Getting, H. Spetzler: in *High-Pressure Science and Technology*, eds. S. Schmid, I. Shaner, G. Samara, and M. Ross., AIP press, New York, pp. 1609-1612 (1993), "Implication of the complete travel time equation of state for a new pressure scale".
- [7] W. Bassett, H. Spetzler, R. Angel, G. Chen, A. Shen, H. Reichmann, A. Yoneda, in *The Rev. of High Press. Sci. and Technology*, **7**, 142-144 (1998), "Simultaneous Gigahertz ultrasonic interferometry and x-ray diffraction in a new diamond anvil cell".
- [8] A. Shen, H. Reichmann, G. Chen, R. Angel, W. Bassett, H. Spetzler, in *Properties of earth and planetary materials*, eds. M. Manghnani and T. Yagi, American Geophysical Union, Washington, pp. 71-77 (1998), "GHz ultrasonic interferometry in a diamond anvil cell: P-wave velocity in periclase to 4.4 GPa and 207 °C".
- [9] B. Li, I. Jackson, T. Gasparik, R. Liebermann, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **98**, 79-91 (1996), "Elastic wave velocity measurement in multi-anvil apparatus to 10 GPa using ultrasonic interferometry".
- [10] R. Liebermann, G. Chen, B. Li, G. D. Gwanmesia, J. Chen, M. Vaughan, D. Weidner, in *The Rev. of High Press. Sci. and Technology*, **7**, 75-78 (1998), "Sound velocity measurements in oxides and silicates at simultaneous high pressure and temperature using ultrasonic techniques in multi-anvil apparatus in conjunction with synchrotron x-radiation determination of equation of state".
- [11] B. Li, G. Chen, G. Gwanmesia, R. Liebermann, in *Properties of earth and planetary materials*, eds. M. Manghnani and T. Yagi, American Geophysical Union, Washington, pp. 41-61 (1998), "Sound velocity measurements at mantle transition zone conditions of pressure and temperature using ultrasonic interferometry in a multi-anvil apparatus".
- [12] G. Chen, R. Liebermann, D. Weidner, *Science*, **280**, 1913-1916 (1998), "Elasticity of Single Crystal MgO to 8 Gigapascals and 1600 Kelvin".
- [13] H. Spetzler and A. Yoneda: *Pure and Appl. Geophys.*, **141**, 379-392 (1993), "Performance of the Complete Travel-time Equation of State at Simultaneous High Pressure and Temperature".

[1998年10月1日受理]