

マントル捕獲岩に包有された液体二酸化炭素の振動に残された深さの記憶

New geobarometer applicable to mantle-derived xenolith

山本 順司[1], 兼岡 一郎[2], 鍵 裕之[3], 頼 勇[4], 荒井 章司[5]

Junji Yamamoto[1], Ichiro Kaneoka[1], Hiroyuki Kagi[2], Yong Lai[3], Shoji Arai[4]

[1] 東大・地震研, [2] 東大地震研, [3] 東大院・理・地殻化学, [4] 東大・工・地球システム, [5] 金沢大・理・地球

[1] ERI, Univ. Tokyo, [2] Lab. Earthquake Chem., Grad. School Sci. Univ. Tokyo, [3] Geosystem Engineering, Univ. Tokyo, [4] Dept. Earth Sci., Kanazawa Univ.

二酸化炭素の伸縮振動は、フェルミ共鳴によって二本のピークに分離し、その強度比と波数の差に、圧力相関があることが実験室内での二酸化炭素のスペクトル測定で報告されている。そこで、マントル捕獲岩中の二酸化炭素包有物を対象に、この関係を地質圧力計として天然に応用することを試みた。二酸化炭素の振動は顕微ラマン分光分析で測定した。その結果、気体・気液共存・液体の二酸化炭素包有物の間に系統的な圧力増加を意味するスペクトルの変化が観察された。その二酸化炭素の密度を均質化温度測定で求めたところ、この手法は二酸化炭素の3%以内の密度差をも検出できる超高精度の地質圧力計として天然に適用できることが確認できた。

“深さ”は地球深部の描像を得るために不可欠の指標である。鉱物が最後に記憶している圧力を知るために地質圧力計というものがある。しかし、スピネル相のマントル物質には有効な地質圧力計が存在しないため、スピネル（クロムスピネル）の安定圧力範囲を越える解像度の深さ方向の議論が殆ど不可能であった。スピネルの安定圧力範囲は深さにすると30km~60km程の範囲に過ぎないが、日本に産出するマントル捕獲岩の殆どはこの相のものであり、マントルの研究では化学的にも物性的にもかなり理解が進んでおり、三次元的な議論やモデルを構築するため、この相に適応できる高精度な地質圧力計の開発が囑望されてきた。そこでこの相に精度の高い圧力軸を入れるべく地質圧力計の開発に挑んだ。

二酸化炭素の伸縮振動は、変角振動の倍音との干渉（フェルミ共鳴）によって二本のピークに分離する。その分離した二つのピークの強度比と波数の差に、圧力相関があることが実験室内で高圧下での二酸化炭素のスペクトル測定で報告されている。そこで、シベリア東部に産するマントル捕獲岩に含まれる二酸化炭素包有物を対象に、この関係を地質圧力計として天然に応用することを試みた。二酸化炭素の振動は顕微ラマン分光法で測定した。宇宙線や試料から発する蛍光による干渉など様々な困難があったが、気体・気液共存・液体の二酸化炭素包有物の間に系統的な圧力増加を意味するスペクトルの変化が観測された。地質圧力計としての精度を確認するために、流体包有物中の二酸化炭素の密度を均質化温度測定で求めたところ、この手法は二酸化炭素の3%以内の密度差をも検出できる超高精度の地質圧力計として天然に適用できることが確認できた。

マントル捕獲岩に含まれる流体包有物がマントルで封入されたものならば、流体包有物中の二酸化炭素密度はマントルの圧力に調和的な密度であるはずであり、構成鉱物種間に密度差はないはずである。しかし、上部マントルの最も主要な鉱物であるカンラン石は、共存する輝石やスピネルに比べ、流体包有物中の二酸化炭素密度が系統的に低いことが明らかになった。この原因としては、マントル捕獲岩の噴出時における構成鉱物の二次的な変形が考えられる。そこで、マントル物質が捕獲岩として地表へ運ばれる間に受けた弾性的な変形を計算してみたところ、捕獲岩の噴出、及び冷却過程に起こる弾性的な変形は、互いに打ち消しあうようにはたらくため、変形率は数パーセントに抑えられ、10パーセントに及ぶ二酸化炭素密度の鉱物種間較差は説明できない。また、深さ30km・温度1000の上部マントルから地表付近まで捕獲岩が上昇する際に被る構成鉱物の弾性的な変形では、カンラン石の方が共存する他の鉱物（斜方輝石、単斜輝石、スピネル）より収縮するという計算結果になったため、カンラン石に含まれる流体包有物中の二酸化炭素密度の低さは定性的にも説明できない。そこで次に塑性変形を考えてみた。

マントル捕獲岩の構成鉱物に含まれる流体包有物は、捕獲岩が地表付近にもたらされた後も、高温の状態ではマントルと同程度の内圧を保持すると考えられる。それ故、地表付近の捕獲岩の構成鉱物と内包される流体包有物の間には数kbarに及ぶ差応力が生じると考えられる。この状態の歪み率を計算すると、カンラン石は $1E-8$ (1/s)程度の歪み率で塑性変形を被ることになる。しかし、斜方輝石の歪み率は桁違いに小さく、この条件下ではカンラン石が選択的に塑性変形を被ると考えられる。このような状態が例えば10日間続いたとすると、カンラン石に含まれる流体包有物は約10パーセント膨張することになり、カンラン石に含まれる流体包有物中の二酸化炭素密度の約10パーセントの低さを説明できる。この10日間というマントル捕獲岩の焼きなまし期間は、転位密度の減少率などから実際に推測されている焼きなまし期間の範囲に入るため、やはりカンラン石で見られた低い二酸化炭素密度は、マントル捕獲岩が地表へ噴出する際に被った塑性変形に因るものと考えられるかもしれない。それ故、殆ど変形していないと考えられる輝石やスピネルを用いれば、マントル物質の“深さ”を精確に得ることができそうである。

シベリア東部のマントル捕獲岩を構成する斜方輝石に内包される流体包有物には、均質化温度測定の結果、凡そ 1.14 (g/cm³)の二酸化炭素が含まれていることが分かった。輝石温度計から求めたこのマントル捕獲岩の平衡温度は凡そ 950 °C であったため、二酸化炭素の状態方程式から計算すると、この流体包有物は 950 °C で 10kbar 以上の圧力を有していたことになる。シベリア東部の地殻の厚さは凡そ 30km であるため、つまり、このマントル捕獲岩は上部マントル最上部から由来した岩石と考えられる。