



Experimental shock metamorphism of the Allende meteorite(CV3)shocked at various pressure-temperature conditions

桐山, 幸治

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2002-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2568

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002568>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【268】

氏名・(本籍) 桐山 幸治 (大阪府)

博士の専攻分野の名称 博士 (理学)

学位記番号 博い第185号

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の日付 平成14年3月31日

【学位論文題目】

**Experimental shock metamorphism of Allende meteorite (CV3)
at various pressure-temperature conditions**

(様々な衝撃圧力・温度条件におけるアエンデ隕石(CV3)の
衝撃変成実験)

審査委員

主査 教授 留岡 和重

教授 向井 正

教授 宮田 隆夫

コンドライト隕石に観察される様々な組織は、隕石母天体が多様な温度条件で衝撃を受けた可能性を示す。これまで、その衝撃によって起こる衝撃変成作用の詳細を解明するために衝撃実験が行われてきたが、それら実験では類似地球産岩石鉱物や普通コンドライト隕石を用いた実験が主であり、始原的である炭素質コンドライト隕石を用いた実験は少なかった。そのため、炭素質コンドライト隕石の衝撃変成作用に関して未だ不明な点が多い。例えば、太陽系内で起こると考えられる衝撃圧力 30 GPa 以上、及び衝撃前加熱 600°C 以上の高温下での衝撃に関する実験はこれまでにほとんど行われていない。そこで、CV 炭素質コンドライトの衝撃時の物質変化を調べるとともに、それら隕石母天体の太陽系初期の衝撃履歴を明らかにするために、衝撃変成作用を受けておらず最も始原的である炭素質コンドライト“アエンデ (CV3 タイプ)”を試料に常温・高温下 (600-800°C) 衝撃実験を行った。試料には衝撃波発生装置 (一段式火薬銃) 用いて段階的に衝撃圧力を加えた。実験条件は常温で 5 つ、高温下で 7 つである：27 GPa/20 °C, 31 GPa/20 °C, 37 GPa/20 °C, 41 GPa/20 °C, 49 GPa/20 °C, 14 GPa/600 °C, 18 GPa/625 °C, 24 GPa/650 °C, 30 GPa/650 °C, 14 GPa/800 °C, 21 GPa/800 °C, 24 GPa/800 °C。実験回収試料は光学顕微鏡、走査型・透過型電子顕微鏡、電子線マイクロプローブアナライザーで詳細に観察・分析した。

回収試料中には、粗粒隕石構成物であるコンドルールの扁平・配向・割れが観察された。コンドルールは衝撃圧縮軸に垂直な方向に扁平していることがわかった。コンドルールのかんらん石は 1-10 μm に割れているものが多く見られた。また、細粒隕石構成物であるマトリクスの圧密・割れ、ケイ酸塩鉱物及び硫化鉱物の溶融が観察された。マトリクスの割れは太く長い (幅 1-10 μm、長さ 100 μm-1mm)。溶融組織は脈状、塊状を示す。それら溶融組織は、ほぼどれも細粒の硫化鉱物、及び気泡が含まれていた。これらの衝撃効果は、衝撃圧力が上がるほど、それらの程度が増加する傾向がある。特に、コンドルールの扁平、マトリクスの割れ、溶融組織の形成はこの傾向が顕著であった。また、常温での衝撃実験と高温下での衝撃実験と比較すると、どちらでも同様の衝撃効果が確認された。しかし、高温下の実験では、それぞれの衝撃効果が現れる圧力が常温での実験のものとなっていた。特に大きく異なる効果は溶融である。溶融が始まる圧力は、常温よりも高温の方が約 10 GPa 低く、マトリクスが全溶融する圧力は約 20 GPa 低い。この時のエネルギーは、常温、高温実験ともに 1200-1300 J/g に相当する (衝撃時の温度に換算すると摂氏 1500-1600 度となる)。また、どの衝撃圧力においても、常温よりも高温の方が生成する溶融物の量ははるかに大きい。これらのことは、衝撃溶融が起こり始める圧力と溶融物の量は、衝撃圧力だけでなく衝撃前の物質温度に強く依存することを示す。

さらに、注目すべき衝撃効果として、コンドルール内部の割れの減少、マトリクスの細く短い割れ (幅 1-3 μm、長さ 10-50 μm) の形成、ネットワーク状の溶融脈の生成がある。コンドルール内部の割れは、衝撃圧力とともに増加する傾向があるが、49 GPa/20 °C, 30 GPa/650 °C, 24 GPa/800 °C の試料では割れが低圧の試料に比べて減少していた。そのため、

コンドルールの衝撃効果の程度は見た目上低減される。この時の条件は組織が全溶融する状態に近いことから、割れが高温によりアニールしたと考えられる。マトリクスの細かい割れは、41 GPa/20 °C 試料中のマトリクスのいたるところで観察された。これらは、高温での実験試料中には観察されなかった。この細かい割れは、組織を 10-100 μm の細かいドメインに破碎する。このことは常温では 41 GPa 程度の衝撃圧力で細かく割れ、それ以上の圧力ではさらに溶融し飛散してしまうことで、CV 隕石母天体は隕石として残らないことを示唆している。このことは、これまでに 35 GPa 以上の衝撃圧力を受けた CV 隕石が見いだされていないことに調和している。また、ネットワーク状の溶融脈は 24 GPa/800 °C 試料のマトリクスの広い領域で観察された。この組織は強い熱変成をうけた一部の特異な炭素質コンドライト組織に類似していた。

今回のアエンデ隕石を用いた系統的な衝撃回収実験によって、高速度衝突がさまざまな衝撃変成作用をアエンデ隕石組織・組成に与えることがわかった。すなわち、これらのことは衝撃が CV 炭素質コンドライト隕石母天体にも大きな変化を及ぼすことを示している。そして、本研究より次の結論を得た。(1) 常温及び高温での実験において、衝撃効果の程度は衝撃圧力が大きくなるほど増加する。また、高温下での実験で観察される衝撃効果は常温での実験と同様のものであるが、それらが観察される衝撃圧力の範囲は異なる。(2) 計算によるとアエンデ隕石の衝撃回収試料が全溶融し始めると考えられるエネルギーは、1200-1300 J/g 以上である。これらの状態に達する衝撃圧力は、高温下での実験の方が常温実験と比べて低い。すなわち、溶融の効果は衝撃圧力だけでなく衝撃前温度に強く依存している。(3) 衝撃を受けた際に高温になりやすい空隙率の高い隕石や衝撃前に高温状態であったと考えられる隕石は、衝撃によってかんらん石のアニールが生じる。そのため、これまでに広く用いられているかんらん石による隕石の衝撃程度の見積もりには、衝撃前後の加熱の効果を検討する必要がある。(4) 常温・高温実験の衝撃効果の比較より、次のような場合に高温下での衝撃である可能性が考えられる：コンドルールの扁平率が高く、ケイ酸塩の溶融組織、硫化物の溶融脈が顕著であるが、コンドルール内部のかんらん石の衝撃効果が低く、マトリクスに割れが少なく、空隙がなくなるほど圧密されていない。すなわち、これによってある試料の衝撃を受けた温度環境を推測できることが期待される。

また、今回の研究の結果、実験による常温・高温下での各衝撃効果スケールを作成することができた。これは、これまでのかんらん石による衝撃効果の見積もりだけでなく、コンドルールやマトリクスのさまざまな衝撃効果を加味している。これにより、天然炭素質コンドライト隕石試料の衝撃効果の程度を調べることで、それが受けた衝撃圧力をこれまで以上に詳細に見積もることができるだろう。

氏名	桐山幸治		
論文題目	Experimental shock metamorphism of Allende meteorite (CV3) at various pressure-temperature conditions (様々な衝撃圧力・温度条件におけるアエンデ隕石 (CV3) の衝撃変成実験)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	留岡和重
	副査	教授	向井正
	副査	教授	宮田隆夫
	副査		
印			
要 旨			
<p>太陽系生成初期には微惑星が無数に存在し、それらがお互いに衝突・合体することによって、より大きな天体へと成長・進化して行ったと考えられている。それゆえ、衝突による天体構成物の変化(衝撃変成作用)は、初期太陽系における重要な物質進化過程だと言える。本研究は、初期微惑星を構成していたと思われる炭素質コンドライト隕石に、衝撃波発生装置によって衝撃圧力を与え、微惑星の衝撃変成作用を実験的に再現し、その影響を分析電子顕微鏡で詳しく調べたものである。</p> <p>第1章は序論である。これまで、隕石の衝撃変成作用に関して数多くの研究があるが、最も化学的に始原的な炭素質コンドライト隕石に関する研究例は少ない。また、隕石の多くは、高温(500-1000℃)において衝撃を受けたと考えられるが、その影響に関してはほとんどわかっていない。これらのことを考慮して、本研究では、衝撃変成の影響の少ないアエンデ炭素質コンドライト隕石試料に、常温だけでなく、600-800℃の高温下で、20-50 GPaの衝撃圧力を与える実験を行った。</p> <p>第2章は試料・実験方法に関する記述である。衝撃波発生装置(一段式火薬銃)によって、以下のように12の異なる条件下(常温下で5つ、高温下で7つ)で実験を行った: 27 GPa/20℃, 31 GPa/20℃, 37 GPa/20℃, 41 GPa/20℃, 49 GPa/20℃, 14 GPa/600℃, 18 GPa/625℃, 24 GPa/650℃, 30 GPa/650℃, 14 GPa/800℃, 21 GPa/800℃, 24 GPa/800℃。回収試料は光学顕微鏡、走査型、透過型電子顕微鏡、電子線マイクロプローブアナライザーを用いて観察・分析した。</p> <p>第3章は回収試料の観察・分析結果の記述である。常温下の衝撃では、もともと球形であったコンドラジュールが圧縮軸に垂直な方向に扁平し、顕著な配向を示す。扁平の度合いは圧力とともに大きくなる。多孔質のマトリックスは圧縮され、大きな割れができる。40 GPaまではその他に組織的に大きな変化は認められないが、40 GPa以上では劇的な変化が起こり始める。それは、マトリックス中に衝撃圧縮軸に垂直方向に細かい無数の割れができること、さらにSi-Mg-Fe-Oに富む溶融脈や溶融ポケットができることである。溶融物は無数の微小な球形の硫化物粒子と気泡(<10 μm)を含んでいる。49 GPaでは、コンドラジュールは破壊され、マトリックスはほぼ全溶融する。この圧力では、溶融物中の気泡は非常に大きくなっている(数10-100 μm)。</p> <p>一方、高温下での衝撃では、コンドラジュールは常温下と同様に扁平し、扁平の程度も圧力とともに増える。しかし、同じ圧力では扁平の度合いは常温下より大きい。マトリックスは圧縮され、割れができるが、常温下とは異なり、600-650℃では、18 GPaという低い圧力で溶融脈ができ始める。そして、圧力とともに溶融物の量は急激に増える。溶融物の試料全体に対する量は、24 GPa/650℃で3.5 vol%だが、30 GPa/650℃では83 vol%に達し、マトリックスは全溶融する。また24 GPa/800℃で68 vol%であることから、800℃では、30 GPa以下でマトリックスが全溶融すると思われる。常温下で40 GPaから見られたマトリックスの細かい割れは、高温下の実験では見られなかった。</p>			

氏名	桐山幸治		
<p>第4章は実験結果の議論と総括である。常温下では、40 GPaの辺りに組織変化の大きなthresholdがあることがわかった。40 GPa以下では、隕石の組織に大きな変化は見られないが、それ以上では、マトリックスには細かい割れが全体にでき、溶融物の発生量は劇的に増加する。このことは、隕石の細分化とともに大きな熱が発生することを意味する。それゆえ、もしCV隕石母天体に40 GPa以上の衝撃圧力が加わると、物質は細かく粉碎され、衝撃圧力解放と同時に起こる爆発的な膨張によって吹き飛ばされ、隕石としては生き残れないと考えられる。この結果は、これまで35 GPa以上の衝撃圧力を受けたCV隕石が見られないことに調和的であり、この事実の理由を始めて実験的に説明するものと言える。</p> <p>常温の衝撃実験で見られたほとんどの衝撃効果が高温下での衝撃実験でも見られたが、それぞれの衝撃効果が現れる圧力は両者でかなり異なっている。特に大きく異なるのは加熱の効果である。加熱による溶融が始まる圧力は、常温よりも高温の方が約10 GPa低く、マトリックスが全溶融する圧力は約20 GPa低い。また、どの衝撃圧力においても、常温よりも高温の方が生成する溶融物の量は大きい。これらのことは、高温では、常温よりもはるかに低い衝撃圧力で、大規模な溶融とそれにもなうカラストロフィックな崩壊が起こることを意味する。この結果は、上記と同じような理由で、衝撃溶融したCV隕石がほとんど見られないことと調和的である。</p> <p>また、今回の実験結果は、衝撃溶融が起こり始める圧力と溶融物の量は、衝撃圧力だけでなく衝撃を受ける前の温度に強く依存することを示している。現在、隕石の衝撃の見積もりにはStöffler et al. (1991)の衝撃分類法が広く用いられているが、この分類法では隕石の衝撃時の温度は考慮されていない。今回の結果から、Stöffler et al.の衝撃分類法では、加熱された隕石母天体での衝撃の影響は正しく見積ることができないことは明らかであり、新たな分類法の構築が必要だと思われる。</p> <p>以上のように、本研究は、最始原隕石である炭素質コンドライトに、20-50 GPaの衝撃圧力を与え、その変化を詳細に調べたものである。特に、高温(600-800℃)下で衝撃実験を行ったことに特筆すべき特色がある。その結果、天然の隕石試料からは知ることのできなかつたさまざまな衝撃効果が明らかになり、その定量的な解釈を可能にした。さらに、微惑星の衝撃による物質進化の謎を解読する上で、多くの有益な情報を得ることができた。</p> <p>よって、学位申請者の桐山幸治は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。</p>			