

岩石・鉱物の Harper-Dorn クリープ： アセノスフェアのレオロジーにおける新展開

Harper-Dorn Creep in Minerals and Rocks: A New Trend in the Rheology of Asthenosphere

王 健農*・嶋本利彦*

Jian Nong Wang* and Toshihiko Shimamoto*

最近の実験的研究および既に報告されている実験データの再解析によって、金属・セラミックス・鉱物・岩石のかなりの物質が、高応力下における累乗流動則(応力指数 n が 3 ~ 5 の power-law creep)から低応力下における線形クリープ(Newtonian creep)への移行を示すことがわかってきた(文献を参照)。しかもこの線形クリープは、多結晶体の場合でも粒径に依存しないし、単結晶においても認められることから、これまで知られていた粒界拡散によるクリープ(Coble creep)とか超塑性(superplasticity)とは、レオロジー的にみて明瞭に異なっている。

この型のクリープは発見者にちなんで Harper-Dorn creep (HD クリープ)と呼ばれているが、本稿の第一著者らによる最近の研究によって、以前に考えられていたよりも遥かに広い条件下で起こる可能性が高いことが示されつつある。もし HD クリープがマントルおよび下部地殻のアセノスフェアで卓越しているならば、アセノスフェアは流動応力にして 1 桁以上も流動性に富んでいる可能性があり、よく知られた流動応力と転位密度の関係なども成立しなくなる。岩石の高温流動に関するレオロジーの分野では、1960年代の hydrolytic weakening および粒径に依存する線形(またはそれに近い)流

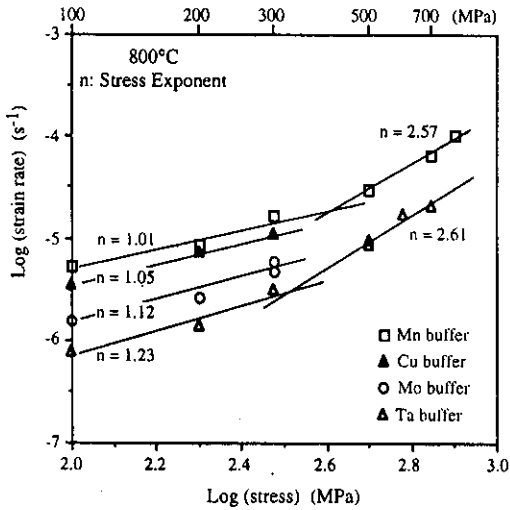
動則以来の大きな変更を迫られていることになる。本稿では、実例を用いて HD クリープの重要性を喚起し、関心をもたれた読者のために関連文献を掲げておいた。

第1図は、珪岩が応力の低下にともなって累乗流動則から線形流動則へ移行する実例である。第2図は、カンラン石単結晶の示す累乗流動則が線形クリープへ変わる例である。この図で主に使用されているのは、有名な Kohlstedt & Goetze (1974) のカンラン石単結晶についてのデータだが、彼らの元論文では全てのデータが累乗則で近似されていた。データを高応力と低応力の領域に分け、活性化エネルギーを使って実験データを 1,400℃ と 1,600℃ に 2 分して示すと、第2図のように低応力側で線形に近い流動領域が認められたのである。第3図は、珪岩に関する累乗流動則と HD クリープ則からの予測を、歪速度が $10^{-12}/s$ の場合について求めたものである。日本列島内陸部の下部地殻で予想されるような 600 ~ 800℃ の温度条件下では、流動応力の予測値が 1 ~ 2 桁も違っている。

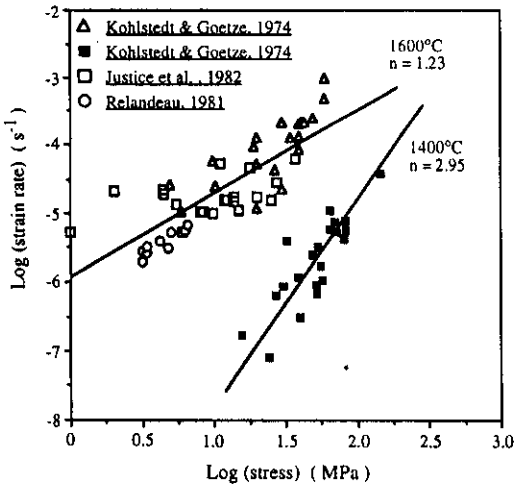
第1図の結果は固体圧式三軸試験機を用いて得られたので、しばしば低応力領域の実験精度が疑問視されてきた。固体圧式試験機も改良されてきているが、低応力下のデータに余りに重

1994年1月21日受付。1994年2月21日受理。

*東京大学地震研究所。Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo.

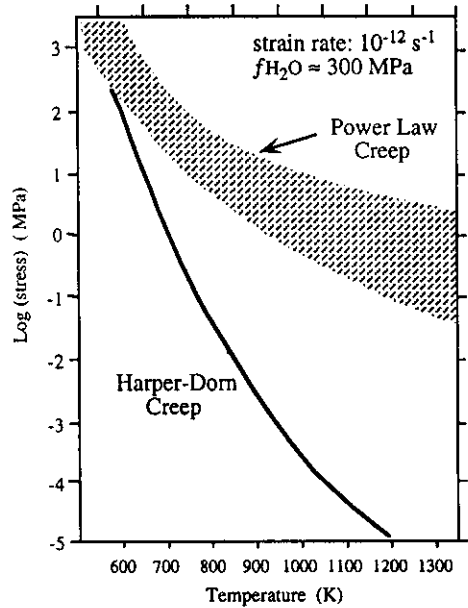


第1図 800°Cの温度下における珪岩のクリープデータ。応力指数 n が1 (線形塑性流動) の領域が、低応力下で明瞭に認められる (Wang, J. N., 1992, Ph. D. thesis, Monash Univ.: 文献[18], [19])。



第2図 カンラン石単結晶のクリープデータのコンパイル図 (実験データの出典も含めて文献[5], [12]を参照)。Relandeau (1981) によるフォルステライト多結晶のデータも比較のために図示されている。

要性をもたせるわけにはいかない。しかし、Luan & Paterson (1992) による高温ガス圧装置を用いた人工珪岩についての結果も、低応力側



第3図 珪岩の流動応力に関する Harper-Dorn Creep と power-law creep の予測 (歪速度 = $10^{-12}/s$, H_2O 分圧 = 約 300 MPa と仮定; 文献[18])。斜線領域は Paterson & Luan (1990) によってまとめられた power-law creep の予測範囲。

で粒径に依存しないで線形に近い挙動を示している (文献[18])。これまでの体系が変わるかも知れない以上、HDクリープに着目したより詳細な研究によって、本稿第1著者のWangによる問題提起が正しいかどうかを、確かめるべきであろう。残念ながら、HDクリープは新しい可能性として岩石の高温レオロジーの研究者に歓迎されているとは言えないようである。

Wangによる様々な物質の流動に関する既存の実験データの再解析によって、累乗則・HDクリープ・拡散クリープ (粒径依存型線形クリープ) の間の相互関係の概要が明らかになりつつある。これらの結果によると、HDクリープは流動応力が転位のパイエルス応力より小さい時にほぼ一定の転位密度下で起こり、拡散クリープへの移行の条件もパイエルス応力に依存しているらしい。

今後は、高温・低応力下で精度の高い実験をおこなってそれぞれの機構の関係を確立し、転

位密度と応力の関係なども再検討する必要がある。とくに HD クリープに関しては、1,500°C を越える高温下で、重要鉱物を用いた流動の実験をおこなう必要がある。東京大学には、唐戸俊一郎氏が渡米前に設計・製作された高温・軸試験機があり、筆者らもそれを調整して実験を始めたところである。また、同大学理学部地質学教室には近く透過電顕が設置される予定になっているので、1994年以降には HD クリープのより体系的な研究が開始できると思われる。

文 献

- [1] Wang, J. N., 1993, On the transition from power law creep to Harper-Dorn creep. *Scrip. Metall. Mater.*, **29**, 733-736.
- [2] _____, 1993, Comments on the internal stress model of Harper-Dorn Creep. *Scrip. Metall. Mater.*, **29**, 1267-1270.
- [3] _____, 1993, Dependence of dislocation density in Harper-Dorn creep on the Peierls stress. *Scrip. Metall. Mater.*, **29**, 1505-1508.
- [4] _____, in press, Harper-Dorn creep in olivine. *Mater. Sci. Engng.*
- [5] _____, in press, The effect of grain size distribution on the rheological behaviors of polycrystalline materials. *J. Struct. Geol.*
- [6] _____, in press, Experimental evidence for Harper-Dorn creep in Mn-Zn ferrite. *J. Amer. Ceramic Soc.*
- [7] _____, in press, Harper-Dorn creep in polycrystalline ferrite, beryllia, alumina, calcite and olivine. *Scrip. Metall. Mater.*
- [8] _____, in review, Newtonian flow process in polycrystalline silicon carbides: diffusional creep or Harper-Dorn creep? *J. Mater. Sci.*
- [9] _____, in review, Effects of the Peierls stress on the transition from Harper-Dorn creep to diffusional creep. *Philos. Mag.*
- [10] _____, in review, Establishment of a steady dislocation density in Harper-Dorn creep by the Peierls stress. *Philos. Mag. (A)*.
- [11] _____, in review, Harper-Dorn creep in single crystals of lead, rutile and ice. *Philos. Mag. Lett.*
- [12] _____, in review, Creep of single crystals of olivine at low stresses, linear or non-linear? *J. Struct. Geol.*
- [13] _____, in review, Effects of the Peierls stress on power law creep. *Acta Metall. Mater.*
- [14] _____, Boland, J. N., Ord, A., and Hobbs, B. E., 1993, Microstructures and defects in heat treated only quartzite. In: J. N. Boland and J. D. Fitz Gerald, eds., *Defects and processes in the solid state: geoscience applications*, The McLaren Volume, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- [15] _____, and Langdon, T. G., in press, An evaluation of the rate-controlling process in Harper-Dorn creep. *Acta Metall. Mater.*
- [16] _____, and Toriumi, M., in press, Harper-Dorn creep in feldspar. *Mater. Sci. Engng.*
- [17] _____, and Shimamoto, T., in press, On Newtonian viscoplastic dislocation creep in crystalline materials. *Mater. Sci. Engng.*
- [18] _____, Hobbs, B. E., Ord, A., Shimamoto, T. and Toriumi, M., in press, Newtonian dislocation creep in quartzite: implication for the rheology of the lower crust. *Science*.
- [19] _____, Hobbs, B. E., Ord, A. and Boland, J. N., in review, Creep of a quartzite in controlled chemical environments. *J. Geophys. Res.*
- [20] _____, Shimamoto, T., and Toriumi, M., in review, Experimental evidence for Harper-Dorn creep in polycrystalline $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $CaTiO_3$ and $(Co_{0.5}Mg_{0.5})O$. *J. Mater. Sci. Lett.*