

氏 名 武 田 昌 尚
 学位(専攻分野) 博 士 (理 学)
 学位記番号 論 理 博 第 1352 号
 学位授与の日付 平 成 11 年 3 月 23 日
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
 学位論文題目 Theoretical study for flow of bimineralic rocks
 (二相岩の流動に関する理論的研究)

(主査)

論文調査委員 教授 小畑 正明 教授 嶋本利彦 教授 山路 敦

論 文 内 容 の 要 旨

混相連続体の概念に基づいて、二相からなる岩石の流動特性を理論的に導いた。混相連続体としての岩石の流動においては、運動量の加法性、エントロピー生成速度の加法性、応力の加法性が仮定できる。これらの加法関係から得られる関係式と次の仮定：(1) 構成各相は非圧縮なニュートン流体として振る舞う、(2) 全岩としても線形流動すること、(3) 二相は均一に混ざっており、空間的に一様である、(4) 流動の際の各相のvorticity vectorは平行であることから、次の三種類の関係式が導出される。第一は全岩粘性率と各相の粘性率、密度および体積分率との関係である。これにより、全岩粘性率と体積分率との間には、2種類の関係が存在することが示される。一つは、低粘性相の体積分率の増加に伴い全岩粘性率が線形的に減少する (Mode 1)。もう一つは、低粘性相の体積分率の増加に伴い全岩粘性率は非線形的に減少する (Mode 2)。とくに低粘性相の密度が小さい場合には減少速度は急激になる、Mode 2の挙動はJordan (1987 1988) およびPrice (1982) の実験結果をよく説明する。第二は全岩の変形速度 (歪速度) と各相の変形速度 (歪速度) の関係を与える。この関係式はそれぞれの相に全岩の変形速度がどのように分配されるかを示す。Mode 1とMode 2では分配様式が異なる。Mode 1では分配がない、すなわち各相の変形速度は全岩の変形速度と一致する。Mode 2での分配の様式は二相の密度と粘性率の関係によりさらに次の二つに分けられる。密度比 (低粘性相の密度に対する高粘性相の密度の比) が粘性率比 (低粘性相の粘性率に対する高粘性相の粘性率の比) より小さい時は全岩の変形速度は低粘性相により多く分配される (これをmode 2 aとよぶ)。一方、密度比が粘性率比より大きい時は高粘性相により多く分配される (これをmode 2 bとよぶ)。密度比と粘性率比が一致している時は分配はない。各相はニュートン流体と仮定されているので、この変形速度分配の決定により、粘性応力の分配もまた決定される。Mode 2においては、密度比が1以下の時、つまり低粘性相が高密度のときには、粘性応力は低粘性相に多く分配される。密度比が1以上の時には粘性応力は高粘性相に多く分配される。そして、密度比が1のとき、つまり二相の密度が一致する時には両相の粘性応力は全岩の粘性応力と一致することが示される。Bloomfield and Covey-Crump (1993) の実験結果はmode 2 aの挙動に調和的である。第三は全岩のvorticityと各相のvorticityとの関係を与えるものである。この関係式はそれぞれの相に全岩のvorticityがどのように分配されるかを示す。Mode 1では、各相間のvorticity分配はなく、全岩のvorticityと各相のvorticityは一致する。すなわちMode 1では各相は変形速度もvorticityも全岩のそれと一致する。Mode 2でのvorticityの分配様式には、二とおり存在しえることが示される。第一をtype 1 partitioning、第二をtype 2 partitioningと呼ぶ。Type 1 partitioningでは、高粘性相へより多くのvorticityが分配される。すなわち高粘性相は全岩よりも大きな回転速度をもつ。一方type 2 partitioningでは低粘性相へより多くのvorticityが分配される。すなわち低粘性相は全岩よりも大きな回転速度をもつ。さらに、どちらの分配様式も全岩のkinematical vorticity numberに依存していることが示される。全岩のkinematical vorticity numberが小さい時には、type 1 partitioningでは低粘性相、type 2 partitioningでは高粘性相が、全岩の回転方向とは反対方向に回転し得る。vorticityの分配において、type 1 partitioningとtype 2 partitioningのどちらが妥当であるかはこの理論からは決定できないが、これまでなされた二相岩の変形実験との比

較, および通常の岩石の密度比が1前後(0.8-0.2)であることから, 天然の岩石の流動はmode 2 aの挙動をとると考えられる。

第二章では, mode 2 a挙動に基づいて, 拡散クリープ(粒径依存クリープ)する二相岩の全岩粘性率の挙動を解析した。二相岩は, 各相はそれぞれ単一の粒径をもつが, 二相間では粒径は異なる, すなわち全体としてはバイモーダルな粒径分布をもつとする。そのような拡散クリープする二相岩の全岩粘性率の振る舞いに関してR.C.G.R. (Rheological critical grain-size ratio) が定義される。R.C.G.R.は, 二相岩の全岩粘性率が含まれる細粒相の体積分率に依存しなくなる粒径比(粗粒相の粒径に対する細粒相の粒径の比)として定義される。R.C.G.R.の値は, 粗粒相でのNabarro-Herring Creep(の粘性率)に対するCoble creep(の粘性率)の相対比, と細粒相に対する粗粒相のCoble creep(の粘性率)の比に大きく依存する。前者が大きくなるに従いR.C.G.R.は小さくなる。拡散クリープする二相岩の全岩粘性率に対する細粒相の効果は, その粒径がR.C.G.R.より与えられる粒径より小さいか大きいかで異なる。細粒相がR.C.G.R.より小さい時は細粒相の存在は常に全岩粘性率を引き下げ(softening mode), 細粒相がR.C.G.R.より大きい時細粒相の存在は常に全岩粘性率を高める(hardening mode)。また拡散クリープする二相岩に対しては, 三つの見かけの粒径依存指数が定義しえる。一つは粒径比と体積分率を一定にしたときの平均粒径変化への依存性として, 第二は, 粗粒相の粒径と体積分率を一定としたときの平均粒径変化への依存性として, 第三は, 粒径比および粗粒相の粒径を一定としたときの平均粒径変化への依存性としてえられる。単一のクリープメカニズム(Nabarro-Herring CreepかCoble creep)が両相で支配的なときには, このうち第一のもの, 粒径比と体積分率を一定にしたときの見かけの粒径依存指数は, 単一の粒径を持つ単相岩における粒径依存指数と一致する。さらに, 相転移の間の, 粒径依存クリープ(Coble creep)する二相岩の全岩粘性率の挙動を解析した。核の形成と成長に伴い生成相は粒径と体積分率を変化させる。粒径の増加は生成相の粘性率を上昇させ, 体積分率の増加は生成相の粘性率の全岩粘性率への寄与を変化させる。これらの二つの効果が全岩粘性率に与える影響が見積もられた。核形成は初期に限られ, 成長速度と温度は一定の場合, 相転移における粒径依存クリープする二相岩の全岩粘性率の挙動は, 母相のクリープメカニズムに強く依存する。生成相と母相がともに粒径依存クリープする時には, 相転移の間の全岩粘性率は核形成時に引き下げられた後では変化しない。一方, 生成相は粒径依存クリープするが, 母相は非粒径依存のクリープをする時には, その全岩粘性率の時間変化はひとつのcritical parameterに依存する。このcritical parameterは生成相と母相の粒子数比と生成相の単位粒径でのクリープの粘性率に対する母相のクリープの粘性率の比により決まる。生成相の粒子数が十分に大きく母相のクリープの粘性率が大きい時は, 相転移の間の全岩粘性率は核形成時に大きく引き下げられた後非常にゆっくりとしか上昇しない。生成相の粒子数が少なく母相のクリープの粘性率小さい時は, 全岩粘性率は核形成時に若干引き下げられた後, 急激に上昇する。

この場合には母相のクリープメカニズムの違いは全岩粘性率の挙動に極めて大きな違いをもたらすことがわかった。

論文審査の結果の要旨

岩石は一般に複数種の鉱物からなる多結晶多相集合体である。本研究は, 二相からなる岩石の流動特性に関する理論的研究と, その地質学的意義の検討を行ったものである。学位論文は二部構成からなる。第一部は二相岩の流動特性に関する基礎理論, 第二部はその応用編である。第一部の基礎編では, 混相連続体(super-imposed continuum)の概念とアプローチを用いて, 岩石全体としての流動特性を構成各相の流動特性と各相の体積分率関数として導出した。用いた基本的な関係式は運動量, エントロピー生成速度, 応力の加法性と, 次の4つの仮定である。(1)構成各相は非圧縮なニュートン流体として振る舞う, (2)全岩としても線形流動する, (3)二相は均一に混ざっており, 空間的に一様である, (4)流動の際の各相のvorticity vectorは平行である。その結果, 全岩粘性率と各相の粘性率, 密度および体積分率との関係には次の2種類の関係が得られた。一つは, 低粘性相の体積分率の増加に伴い全岩粘性率が線形的に減少する(Mode 1)。他の一つは, 低粘性相の体積分率の増加に伴い全岩粘性率は非線形的に減少する(Mode 2)。特に低粘性相の密度が小さい場合には減少速度は急激になる。Mode 2の挙動はJordan (1987 1988) およびPrice (1982)の実験結果と調和的である。全岩の変形速度(歪速度)と各相の変形速度(歪速度)の関係, すなわち変形速度の分配については, Mode 1では各相の変形速度は全岩の変形速度と一致すること, Mode 2では, 密度比(低粘性相対高粘性相)が粘性率比より小さい時は全岩の変形速度は低粘性

相により多く分配され (mode 2 a), 逆の時は高粘性相により多く分配される (mode 2 b) ことが示された。また密度比と粘性率比が一致している時は分配はない。各相はニュートン流体と仮定されているので, この変形速度分配の決定により, 粘性応力の分配もまた決定される。すなわちMode 2においては, 密度比が1以下の時, つまり低粘性相が高密度のときには, 粘性応力は低粘性相に多く分配され, 密度比が1以上の時には粘性応力は高粘性相に多く分配される。密度比が1のときには両相の粘性応力は全岩の粘性応力と一致する。Bloomfield and Covey-Crump (1993) の実験結果はmode 2 aに調和的である。次に, 全岩のvorticityと各相のvorticityとの関係, すなわちvorticityの分配に関しては, Mode 1では, 各相間のvorticity分配はなく, 全岩のvorticityと各相のvorticityは一致すること, Mode 2でのvorticityの分配様式には, 高粘性相へより多くのvorticityが分配される場合 (Type 1) と, 低粘性相へより多くのvorticityが分配される場合 (Type 2) が存在しうる事が示された。どちらの分配様式も全岩のkinematical vorticity numberに依存する。全岩のkinematical vorticity numberが小さい時には, type 1 Partitioningでは低粘性相, type 2 Partitioningでは高粘性相が, 全岩の回転方向とは反対方向に回転し得る。vorticityの分配において, type 1とtype 2のどちらが実現するかはこの理論からは一義的に決定はできないが, これまでの限られた二相岩の変形実験はmode 2 aが起こることを示唆する。

第二章では, mode 2 a挙動に基づいて, 拡散クリープ (粒径依存クリープ) する二相岩の全岩粘性率の挙動を扱う。二相岩は, 各相はそれぞれ単一の粒径をもつが, 二相間では粒径は異なる, すなわち全体としてはバイモーダルな粒径分布を持つとする。そのような拡散クリープする二相岩の全岩粘性率のふるまいに関してR.C.G.R. (Rheological critical grain-size ratio) が定義される。R.C.G.R.は, 二相岩の全岩粘性率が含まれる細粒相の体積分率に依存しなくなる粒径比 (粗粒相の粒径に対する細粒相の粒径の比) として定義される。R.C.G.R.の値は, 粗粒相でのNabarro-Herring Creep (の粘性率) に対するCoble creep (の粘性率) の相対比と, 細粒相に対する粗粒相のCoble creep (の粘性率) の比に大きく依存する。前者が大きくなるに従い, 或いは後者が小さくなるに従いR.C.G.R.は小さくなる。拡散クリープする二相岩の全岩粘性率に対する細粒相の効果は, その粒径がR.C.G.R.より与えられる粒径より小さいか大きいかで異なる。細粒相がR.C.G.R.より小さい時は細粒相の存在は常に全岩粘性率を引き下げ (softening mode), 細粒相がR.C.G.R.より大きい時細粒相の存在は常に全岩粘性率を高める (hardening mode)。

二章の後半は, 相転移の際, 粒径依存クリープ (Coble creep) する二相岩の全岩粘性率のダイナミックな挙動を扱っている。核の形成と成長に伴い生成相は粒径と体積分率が增大する。粒径の増加は生成相の粘性率を上昇させ, 体積分率の増加は生成相の粘性率の全岩粘性率への寄与を変化させる。これらの二つの効果が全岩粘性率に与える影響を見積もった。その結果, 相転移における粒径依存クリープする二相岩の全岩粘性率の挙動は, 母相のクリープメカニズムに強く依存する。生成相と母相がともに粒径依存クリープする時には, 相転移の間の全岩粘性率は核形成時に引き下げられた後では変化しないが, 生成相は粒径依存クリープする。母相は非粒径依存のクリープをする時には, その全岩粘性率の時間変化はひとつのcritical parameterに依存する。このcritical parameterは生成相と母相の粒子数比と生成相の単位粒径でのクリープの粘性率に対する母相のクリープの粘性率の比により決まる。生成相の粒子数が充分に大きく母相のクリープの粘性率が大きい時は, 相転移の間の全岩粘性率は核形成時に大きく引き下げられた後非常にゆっくりとしか上昇しない。したがって, この場合には全岩粘性率の挙動は母相のクリープメカニズムが粒径依存であろうと非粒径依存であろうとあまり変わらない。生成相の粒子数が少なく母相のクリープの粘性率小さい時は, 全岩粘性率は核形成時に若干引き下げられた後, 急激に上昇する。この場合には母相のクリープメカニズムの違いは全岩粘性率の挙動に極めて大きな違いをもたらすことを示せた。

以上のように, 本研究は構造岩石学と岩石のレオロジーの基礎的問題に取り組んだもので, 重要な貢献を含むものであると判断される。審査委員会は以上の審査結果を総合して, 本論文が理学博士の学位取得に十分な内容を持つものと認定した。また, 平成11年2月10日, 論文内容とそれに関連した口頭試問もあわせて行った結果合格と認めた。