

## 論文審査の結果の要旨

氏名 永田 広平

地震などの断層のすべり過程を支配しているのは、断層面にはたらく摩擦である。従って、断層のすべり過程を正確に記述し予測するためには、断層面にはたらく応力、摩擦強度、すべり速度の関係、および時間やすべりの進行に依存する摩擦強度変化を知らなければならない。これらを記述するものとして、速度・状態依存摩擦則がよく知られており、実験室における摩擦すべり過程の理解だけではなく、プレート境界地震のモデル化など、地震学でも盛んに利用されている。速度・状態依存摩擦則は応力、摩擦強度、すべり速度の関係を記述する構成則と、強度の変化を記述する発展則からなるが、このうち発展則については、その物理的意味が不明確であり、また、実験結果を正確に記述できないという欠点があることが知られている。本論文では、実験室において、断層面を透過する弾性波により断層面での接触状態を推定し、これと摩擦強度との関係を明らかにした。これまで間接的に推定されていた摩擦強度を透過弾性波により直接測定したことにより、摩擦強度と速度や応力との関係が格段に精度良く観察できるようになった。この結果を利用して、実験データを良く説明する発展則が提案された。

本論文は次のように構成されている。第1章では、速度・状態依存摩擦則に関連する主要な研究が紹介された後、本論文の構成が述べられている。第2章では、構成則とその物理的意味について述べられた後、これまでに提案されている主な発展則とその問題点がまとめられている。さらに、断層を透過する弾性波から断層面での接触状態を推定する手法の原理が述べられる。第3章では、応力または変位速度を制御して摩擦すべりを発生させ、その間に断層面を透過する弾性波を測定する実験が行われる。種類の異なる複数の実験において、弾性波の透過率と摩擦強度の間に1対1の関係があることがわかり、透過弾性波により摩擦強度が推定可能であることが示される。第4章では、実験室における従来の摩擦パラメータ推定に大きな問題があることが指摘される。摩擦の速度依存性を示すパラメータ $a$ は、試験機を制御して速度を急変させた際の摩擦変化から推定されていた。しかし、試験機の剛性が有限であるために理想的な速度変化を実現できず、発展則を仮定した数値シミュレーションと実験データを

比較することにより  $\alpha$  を推定してきた。発展則に問題があることがわかっている以上、この推定手法にも問題があることは明らかである。摩擦強度変化が極めて小さくなるような実験を行えば、発展則の不確かさの影響を抑えることができる。本研究では、このような条件を満たす新たな実験手法により、真の  $\alpha$  の値は従来の推定値よりも数倍大きいことが示される。第5章では、摩擦強度実測値と発展則による予想のずれの解析により、摩擦強度が応力に依存して変化することを発見する。この効果を発展則にとり入れることによって、従来の発展則がうまく予測できなかった種々の摩擦実験の結果は、ほぼすべて説明可能になる。さらに、新たな応力依存効果の直接的な検証もなされている。第5章までは、断層内にガウジ（破碎された岩石屑）を含まない条件での摩擦について扱われるが、現実の断層やプレート境界ではガウジ層内の変形が摩擦に大きな影響を及ぼすと考えられる。第6章では、ガウジを含む断層での摩擦すべり実験の際に透過弾性波を測定し、摩擦強度変化が推定される。時間依存性の強度回復とガウジ粒子配置の変化による非時間依存の強度回復それぞれに対応する透過弾性波変化を検出されるが、それらは応力と変位のみを測定する従来の摩擦実験では完全には分離できなかったものである。透過弾性波を利用することにより、それぞれの強度回復過程の詳細が明らかにされる。

本論文は、すべり実験中の摩擦強度変化を透過弾性波によりモニターできることを示し、これを利用して、摩擦の理解や地震断層運動のモデル化を行う際に長い間問題となっていた発展則の不完全性を克服する、極めて学術的価値の高いものである。透過弾性波による摩擦強度モニターは、摩擦の微視的過程の理解に有効であるため、今後の摩擦実験でも有効な手法として利用されるであろう。また、現実の断層やプレート境界における摩擦強度変化の弾性波によるモニタリング可能性をも示すものである。さらに、本論文で提案された発展則は、地震発生サイクルのモデルでの利用も期待される。このように、本論文の成果は実験室にとどまらず、地震学の様々な面で利用可能な発展性のある重要なものである。なお、本論文は、中谷正生と吉田真吾との共同研究を含むが、実験の計画と遂行および実験データの解析と解釈などすべての面で論文提出者が主導的な役割を果たしてきたもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。