

学 位 論 文 題 名

CRUSTAL STRESS DISTRIBUTION : A STUDY OF ITS CHARACTERISTICS AND
MECHANISM BASED ON HYDRAULIC FRACTURING STRESS MEASUREMENTS

(地殻応力分布：水圧破壊応力測定に基づく
その特徴とメカニズムに関する研究)

学位論文内容の要旨

地殻応力は、地震の発生や地殻変動の原因となる最も基本的な力である。したがって、地殻内部の応力分布を明らかにすることは、地球科学上の多くの問題を説明するために極めて重要である。しかし、応力分布に関する物理機構および支配因子についての解析はこれまで殆どなされていなかった。その理由の一つは、原位置応力測定データが十分な数だけなかったことであり、もう一つの理由は、測定された応力値には各測定点の地質的、テクトニクス的条件が複雑に影響しているために分析が困難であったためである。これらのことを踏まえ、本論文では、水圧破壊法によって求められた精度の高い応力測定値を用いた解析から、地殻浅部の応力値分布の特徴を明らかにし、それを支配している主な物理機構を明らかにすることに主眼を置いた。さらに、その特徴と物理機構をより正確に理解するために、応力値分布に関与していると考えられる岩盤の物性変化に関する考察を行った。また、これらの結果を総合的に応用してテクトニクス研究に有効な「応力値分布図」を提案した。

深い孔井内で原位置応力を求める方法としては、今のところ水圧破壊法が最も優れている。水圧破壊法は、孔井内の1～2 mの区間をパッカー（栓）で区切り、その間に高水圧をかけて割れ目を発生させる。このとき得られる圧力－時間記録上から割れ目の開口圧、閉口圧を検出し応力値を算出する。さらに、割れ目の発生方向から応力方位が求められる。この方法を1978年に日本で初めて試みて以来、関東－東海地域の20地点、21測定井において応力測定を実施した。この地域は太平洋、ユーラシア、フィリッピン海の3つのプレートが会合する場所に位置し、テクトニクスの

大変複雑な地域であることが予想されている。測定地点の岩質も砂岩、泥岩、凝灰岩、花崗岩などと多様である。このような地域に深さ100mから900mの測定井を掘削し、それぞれから応力データ、すなわち応力の方向と大きさを得ることに成功した。これだけ平面的、鉛直的に密に行われた測定は世界でも例が無い。その過程で、数々の新しい測定技術の開発、改良を行ってきた。高圧ポンプシステム、多連式型どりパッカーなどである。また、圧力-時間曲線上の割れ目閉口圧を検出するために、間隙水圧の効果を考慮にいたした“CURVE FITTING METHOD”（曲線重ね合わせ法）を考案し、1,000m級の測定井でも応力値が精度良く求められるようになった。

応力の空間的分布の特徴が、各地の応力値分布を総合的に解釈することによって明らかにされた。関東-東海地域は、逆断層型の応力状態が卓越している。平均水平圧縮応力（ S_{Hav} ）の深さ分布は、全てのデータについての最小自乗法によると、

$$S_{Hav} = 0.035h + 0.1$$

で表される。ここで、応力の単位はMPa、深さ（ h ）の単位はmである。ここで重要な事実が見いだされた。この直線を境にして応力値の高い側には、比較的硬い岩石（岩石密度にして $2.3g/cm^3$ 以上）の地点が属することである。また、個々の地点について見ると、深くなるに従い応力値が単調に増加している場合もあれば、ある深度周辺の応力が異常に高くなっている場合もある。岩質や層序などの小さな地質学単位の不均質性に影響されて、応力値の分布も不均一となっていると考えられる。硬岩中で得られたデータは、軟岩中よりも一般に応力値の深さ分布の変動が激しい。

軟岩と硬岩の二つの場合に分けて、応力値分布の物理機構について研究した。この際の着眼点は、せん断応力と法線応力との関係である。その結果、地殻浅部の応力状態をコントロールしている主要な物理機構は、微小クラックの摩擦すべりに支配された岩盤の降伏であることが明らかとなった。これを「臨界降伏応力モデル」として説明した。この応力降伏の際の摩擦係数は、硬岩も軟岩も含めた全測定点について平均すると $\mu = 0.57$ である。この値は、岩石コアの室内実験から求められている摩擦係数と調和的である。しかし、 μ の値はそれぞれの地点で特有の値となり、ある程度長い区間で測定された結果から評価されなければならないことが示唆される。また、周囲に比べ応力が高いなどの特異な応力状態は、岩盤の不均質性のコントラストが著しい硬岩中で顕著であることも裏付された。

上記の物理機構について、応力値分布と岩石の物性変化との関連からより詳細に研究した。地殻応力値分布と、良く知られている岩盤の物性常数、さらに、それを測定した地球物理学的データとが対応付けられれば、より深部の応力値分布を推定することも可能になる。硬岩地域の測定地点（芦川と塩山）から得られた岩石コアと物理検層データを用いた解析により、クラック密度とせん断応力値分布との比較が行われた。解析には、O'CONNELL and BUDIANSKY (1974) による弾性波速度とクラック密度および飽和度との関係式を用いた。その結果、弾性波速度の変化で与えられる地質層序の不均質性が、応力集中のような異常な応力分布に大きく寄与していることが次のような現象から明かとなった。摩擦すべりが起こる前の高せん断応力下では、クラック密度が小さい。応力が降伏して摩擦すべりが起こっている過程では、クラック密度が増加する。応力の降伏の後の段階では、開いたクラック、閉じたクラックが混在するようになる。これらの現象から異常な応力状態（応力集中など）が出現するための因子を考察できる。すなわち、降伏による応力降下は亀裂の多い部分で大きく、それを亀裂の少ない部分が補償しているために応力集中のような応力の高い部分が出現する。この異常な応力状態が出現するためには、芦川測定井の例から推定されるように少なくとも30 m位連続して、亀裂の少ないあるいは殆ど無い比較的硬い部分が存在することが必要である。

さらに、これらの物理機構を反映した応力値分布図を提案した。応力の地域的な分布図はテクトニックな問題を考察する上で欠かすことが出来ない。これまで応力の方位については、応力測定データと地震の発震機構や他の地学的現象から得られた情報を加味することによって「応力区分図」として示してきた。しかし、応力値に関しては、分布図としては未だまとめられていなかった。深部の応力測定値データが充分でなかったことと、地質学的条件の複雑さをどう解決するか、明かでなかったためである。本研究で明かとなった応力値分布の特徴と物理機構に基づき「応力値分布図」として提案した。それは、それぞれの地点特有の摩擦係数を考慮したせん断応力の深さ勾配を示す図である。一見して各地域の応力値分布の特徴がよく表されている。この応力値分布図は、応力方位図と合わせ考えることによって、地震や地殻変動を引き起こす基本的な力を考察する上で有効なものとなるであろう。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	岡 田	廣
副 査	助教授	笠 原	稔
副 査	助教授	中 西	一 郎
副 査	講 師	笹 谷	努

学 位 論 文 題 名

CRUSTAL STRESS DISTRIBUTION: A STUDY OF ITS CHARACTERISTICS AND MECHANISM
BASED ON HYDRAULIC FRACTURING STRESS MEASUREMENTS

(地殻応力分布：水圧破壊応力測定に基づくその特徴とメカニズムに関する研究)

地殻内部の応力状態は地震発生やテクトニクスの研究にとって重要な情報となる。しかし、今まで地殻内応力の原位置測定が困難だったために、そのデータも解析結果も非常に少なく、地殻内の応力状態の推定に必要不可欠な応力値分布、またその物理機構や支配因子、いずれもほとんど知られていない。

本研究は、テクトニクス的に大変複雑な、太平洋、ユーラシア、フィリッピン海の3つのプレートが会合する一地域；関東一東海地域の20地点、21測定井において応力測定を行い、①地殻浅部応力の空間分布とその特徴、②応力値分布の物理機構などを明らかにし、③その物理機構を反映した応力値分布図を作成したものである。

測定地点の岩質は砂岩、泥岩、凝灰岩、花崗岩など多種多様である。各地点に深さ100m から900mの測定井を掘削し、それぞれ応力の方向と大きさを測定した。平面的かつ鉛直的にこのように密な測定は世界でも例が無い。測定は、現在最も優れているという水圧破壊法によった。

まず、申請者は水圧破壊法について種々の基礎実験を試み、新しい測定技術の開発・改良を行った。圧力ポンプシステム、多連式型どりパッカーなどがそうである。そ

のデータ解析では、圧力－時間曲線上の割れ目閉口圧を検出するために、間隙水圧の効果考慮にいたした“CURVE FITTING METHOD”（曲線重ね合わせ法）を提案した。これにより、1,000m級の測定井でも精度良く応力値が求められるようになった。

応力値の空間分布の特徴については、①関東－東海地域は逆断層型の応力状態が卓越していること、また平均水平圧縮応力の深さ分布について一つの実験式を求め、②比較的硬い岩石（岩石密度にして 2.3g/cm^3 以上）のところではこの実験式より高い方に応力値があること、③個々の地点について見ると、応力値が深さとともに単調に増加するところや、ある深度周辺で異常に高くなるところがあること、④硬岩中では軟岩中よりも一般に応力値の深さ分布の変動が激しいこと、などを明らかにした。

応力値分布の物理機構すなわちせん断応力と法線応力との関係については、軟岩と硬岩の二つの場合に分けて考察し、これより地殻浅部の応力状態をコントロールしている主要な物理機構は、微小クラックの摩擦すべりに支配された岩盤の降伏であることを明らかにした。これを「臨界降伏応力モデル」として説明している。

この物理機構については、応力値分布と岩石の物性変化との関連から、より詳しく考察した。すなわち、硬岩地域の測定地点（芦川と塩谷）の岩石コアと物理検層データとの併合解析、またクラック密度とせん断応力分布との比較から、地層の弾性波速度不連続は応力集約のような異常な応力分布の原因になり得ると推論した。

最後に、我国で初めて、これらの物理機構を反映した応力値分布図を作成した。今まで、応力の方位が応力測定データと地震の発震機構や他の地学的現象の情報を考慮した「応力区分図」で示されていたが、応力値は分布図としては未だまとめられていなかった。深部の応力測定値データが不十分で、かつ地学的条件の複雑さをどう解決するか、明らかでなかったからである。本研究で得た応力分布図は、各地点特有の摩擦係数を考慮したせん断応力の深さ勾配で示しているが、これを見ると、各地域の応力値分布の特徴がよく読み取れる。この分布図は、応力方位図と併用すれば、地震や地殻変動を引き起こす力学的機構の理解に大いに役立つだろう。

以上、申請者は地殻応力分布の研究で、測定法の開発、データ解析法の工夫、多地点での測定など多くの点で優れた研究成果を挙げた。

審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。