

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Origin of the thermal structure recorded in metamorphic rocks of SW Japan: shear heating along the MTL and large-scale folding in the Sanbagawa belt**  
(西南日本に分布する変成岩に記録された温度構造の成因：  
中央構造線の剪断熱と三波川帯の大規模褶曲)

氏 名 森 宏

論 文 内 容 の 要 旨

プレート収束域では、冷たい海洋プレートがマントルへと流入し、この沈み込みによって地球表層物質が深部まで運び込まれる。沈み込み型変成岩は、いったん沈み込み帯の深部まで潜り込み、その後再び地表まで上昇してきた岩石で構成され、大規模な物質循環が発生していることを示す。また、沈み込み境界や関連した大断層におけるずれは、巨大地震の発生原因でもある。これらの激しい地質学的現象は、沈み込み帯温度構造と密接に関連している。沈み込み帯温度構造についての理解は、近年の地球物理学的研究データの蓄積、そして特にコンピュータ技術の発展とともに、確実に進んできている。ただし、モデリングを行う上で必要なパラメータについて、依然として大きな不確かさを持っているものもある。

このモデリング精度を向上させる有用なアプローチの一つとして、変成岩に記録された温度-圧力情報をモデルに組み込むことが注目される。現在地表に露出する変成岩から、直接調べることが困難な沈み込み帯深部における温度-圧力条件の制約が可能である。ただし変成岩は、通常、沈み込み帯深部から上昇する際に延性変形を被っている。これらの変形によって初生的な温度構造も強く改変されてしまう。そのため、沈み込み型変成帯において、これら上昇時の変形作用を理解することが、現在の温度構造と沈み込み帯の初生的構造との関係を明らかにするには不可欠である。

さらに、沈み込み帯の熱モデリングを行う際の大きな不確定要素の一つとして、剪断熱の影響が挙げられる。すなわち変形によって生じる熱源の重要性である。プレート境界上で推定される剪断応力は約 0 MPa–100 MPa の大きな幅を持っており、これは沈み込み境界において温度推定する際に、数 100 °C の幅を生じてしまう。この剪断熱の不確かさは、大断層の強度について統一見解が得られていないことを意味している。大断層周辺に露出する変成岩は、地殻の様々な深度において変形作用を経験している。特に、岩石強度が比較的の高い脆性-延性遷移領域においては、大きな剪断熱の発生が予想される。

そこで本研究では、構造地質学-岩石学的アプローチによる変成岩の解析から、変成岩から温度構造を復元するための手法と剪断熱の重要性について議論する。また、これらの結果を熱モデリングと比較する。

Part 1 では、三波川変成帯の高変成度域の変形に着目する。形成場の温度構造復元のために変成帯の温度-圧力条件を用いるには、変成作用のピーク後に生じた延性変形の影響を検証することが、第一に必要である。

西南日本に分布する三波川帯は、白亜紀中期に形成された沈み込み型変成帯である。四国中央部の三波川帯には、沈み込み帯深部において形成された高压変成岩類が広く分布し、変成ピーク（最高温度およびその圧力）時の詳細な見積りがなされている。これらは、一般的に構造的上位に位置するウェッジマンントル起源の岩体に向かっての変成度の上昇を示す。そのため、三波川帯はウェッジマンントル直下のスラブ内温度構造を保持している可能性がある。しかし、四国中央部では変成度分布の繰り返しが観察され、初生的な温度構造が変成ピーク後の変形の影響を受けたことを明瞭に示す。四国中央部の汗見川は、変成分帯を横切っており、三波川帯の巨視的な地質構造の観察、およびそれらと変成作用との関係究明に適し、長年注目されてきた。ただし、同地域では構造的中位に最高変成度域が位置し、変成度の分布が繰り返して現れる。この説明として、横臥褶曲構造説とスラストによって境されたパイルナップ構造説という対照的なモデルが提唱されているが、統一見解は得られていない。この問題は、現在の構造と沈み込み帯における初生的な構造の関係を考える上で重要である。そこで、汗見川地域における大規模褶曲の有無を検証するため、最高変成度域およびその周辺において、詳細な地質構造解析を行った。

南北 3.5 km、東西 7 km の範囲において野外調査を行った。調査地域では主に、上昇時の主要変形・ $D_s$  変形による東西方向の鉱物線構造を伴う主要面構造が発達する。褶曲構造は、東西方向に褶曲軸をもつ  $D_s$  および post- $D_s$  変形 ( $D_t$ ,  $D_u$ ) 褶曲が観察される。大規模褶曲の検証には、basic-quartz schist の層序関係による上下判定と、m スケールの  $D_s$  褶曲非対称性（フェルゲンツ）を用いた。層序関係と褶曲フェルゲンツはともに、調査地域の中位に分布する厚い basic schist 相を境に逆転する。これらの結果は、 $D_s$  変形時に形成され、北に閉じた大規模褶曲の存在を示す。また、この褶曲軸は変成度の逆転軸に一致し、横臥褶曲構造説とも整合的である。さらに、微細構造解析の結果は、 $D_s$  変形によって、この褶曲の形成とともに初生的な温度構造も逆転したことを示す。

Part 2 では、西南日本の地質構造発達史において重要な中央構造線（MTL）に着目する。MTL は、日本陸上最大の断層でもあり、長期間活動を続ける大断層のずれによる熱影響の検証に適している。本研究では、炭質物ラマン温度計を用いて

MTL 近傍・三波川帯において温度見積りを行い、MTL 周辺での剪断熱の検出およびその定量評価を目指している。そして、熱モデリング結果との比較によって断層強度を議論するとともに、大断層周辺岩石の剪断熱の保存ポテンシャルの評価を行う。

大断層の強度（摩擦係数： $\mu$ ）は、地殻の変形機構や地震の発生に関する一つの重要なパラメータである。断層運動時のエネルギーの大部分は、熱エネルギー（剪断熱）として放出され、断層周囲の熱イベントの認識は断層強度を知る手掛かりとなり得る。断層岩の変形実験結果が示す  $\mu$  より、長期間活動を続ける大断層では、大きな剪断熱の発生が予想される。そのため、これまでにサンアンドレアス断層（SAF）では、詳細な地表熱流量測定による剪断熱検出が試みられてきた。しかし、断層周辺での明瞭な剪断熱発生の証拠は確認されていない。この観測と実験結果の不一致は未解決であり、断層強度を解明する上で重要な研究課題である。

MTL は長期間活動を続ける大断層であり、SAF との比較対象に適している。また熱年代解析より、MTL 北・領家帯では MTL にかけての広域的な熱異常が報告され、剪断熱の証拠と解釈されている。しかし MTL 近傍、特に南の三波川帯における熱構造の詳細は不明である。近年、MTL を貫通するボーリングコアが得られ、MTL 近傍での詳細解析が可能となった。また、炭質物ラマン分光分析による最高到達温度見積り手法（炭質物ラマン温度計）が開発され、コア掘削地点周辺・三波川帯の主要岩石である泥質岩の熱履歴解明への見込みがでてきた。そこで本研究では、炭質物ラマン温度計によって MTL 近傍・三波川帯における最高到達温度を明らかにし、これらの結果より、MTL の活動に関連した熱異常の有無を検証した。

サンプリングは、コア解析と野外調査を併用して、MTL 周辺において詳細かつ広域的に行った。ラマン分光分析より得られた結果は、MTL から離れた地点では約 340 °C のほぼ一定の値（低温）であるのに対し、MTL 付近の 150 m 以内では、MTL にかけて約 60 °C の温度上昇（高温）を示す。このことは MTL 近傍での大きな熱の発生を意味し、この高温領域と MTL の空間的關係は、検出された熱異常が剪断熱によって発生したことを強く支持する。また、これらのデータを用いて best-fit カーブを求めることにより得られた結果は、検出された熱異常を説明するには、約 80 mm/year 以上の断層運動速度（ $V$ ）が必要であり、現実的な  $V$  では説明困難であることを示す。このことは一つの説明として、剪断熱発生後の伸長変形（正断層運動）により、形成された熱異常の一部が欠落したと考えられる。さらに、領家帯において検出されている熱異常分布範囲を上限として、断層面での 60 °C の温度上昇のみを考えて行ったモデリング結果は、 $\mu$  が約 0.4 以上の値を示す。

Part 3 では、MTL 近傍・北の領家帯において先行研究により示される熱年代データを用いて、熱モデリングを行い、MTL の断層強度および変位量について議論

する。

Part 2 では、MTL 南・三波川帯において、狭い範囲（MTL から 150 m 以内）での剪断熱の証拠を示した。一方、MTL 北の領家帯においては、*Tagami et al.* [1988, *JGR*]によって、MTL 近傍に集中する相対的に若いアパタイト・フィッシュントラック（Ap-FT）年代から、数 km 以上の幅をもった広域的な熱異常が示され、剪断熱による熱異常と結論づけられている。ただし、これらのデータと断層強度との関係についての定量的な評価はなされていない。そこで本研究では、MTL における剪断熱の一次元熱モデリングを行い、これら Ap-FT 年代データとのフィッティングによって、MTL の断層強度および累積変位量を検証した。

Ap-FT 解析では、MTL から離れた地点ではほぼ一定の約 54 Ma（old 年代）であるのに対し、MTL に近い地点では約 11 Ma–29 Ma（young 年代）の値が得られている。そこで、old 年代の地点では Ap の annealing- $T$ （約 105 °C）以下、young 年代の地点では annealing- $T$ 以上となり得る熱モデルを検証した。このモデルを説明可能な断層運動速度（ $V$ ）と摩擦係数（ $\mu$ ）の関係に着目し、観測によって得られている  $V$ との比較より、MTL における  $\mu$  の制約を試みた。得られた結果は、総変位量 100km を超える横ずれ断層運動時の剪断熱によってのみ、Ap-FT 年代の熱構造を説明可能であるとともに、 $\mu$  は 約 0.22 以上の値を示す。この結果は、Part 2 の三波川帯の結果と整合的であり、MTL が総変位量数百 km の相対的に強い大断層であることを示す。

上記 Part 2 と 3 の結果および先行研究より、MTL および周辺の三波川帯・領家帯における地質構造発達史を以下のように考察した。

【ステージ 1 (20 Ma 以前)】 MTL において剪断熱をともなう左横ずれ断層運動が起こり、この剪断熱によって MTL の両側に km スケールの熱異常が形成された。

【ステージ 2 (20 Ma–15 Ma)】 MTL の活動が横ずれから正断層運動に変化した。

この正断層運動は、下盤の三波川帯岩石の上昇を促進するとともに、三波川帯の熱異常の一部を欠落させた。このことにより、MTL の南に現在観察される数 100m 以内の熱異常分布が形成された。

【ステージ 3 (15 Ma 以降)】 削剝により、MTL を挟んで南北に非対称な熱構造が地表に露出した。