

報告番号 \* 甲 第 1831 号

# 主論文の要旨

題名

SPHERICAL SHELL TECTONICS :  
ON THE BUCKLING OF THE LITHOSPHERE  
AT SUBDUCTION ZONES

(球殻テクトニクス：リソスフェアの沈み込みにおける座屈現象について)

氏名 山岡 耕春

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号氏名

山岡耕春

近年、プレートテクトニクス理論の提唱、検証によって、島弧の発達にとってリソスフェア（いわゆるプレート）の沈み込みが大きな役割を担っていることが認識されてきている。そのアプローチは、主に地質学及び地球物理学的観測によりなされており、それらのデータを総合して地質現象のメカニズムを推論する手法がとられている。しかし、例えばリソスフェアそのものの変形の性質を十分把握せずに推論を行なうと、とんでもない結論を導き出したり、非常に重要な点を見落とししたりする可能性がある。さらにやっかいなことに、リソスフェアは平板ではなく球殻であり、その変形は単純な平板の変形からの類推では全く想像のつかないものが起こり得る。リソスフェアを平板で近似するか、球殻として扱うかの違いは、特に沈み込み帯においては重要となる。それは、沈み込み帯では、リソスフェアは大変形を起こし、非線形性が顕著になるからである。しかし従来は、多くの場合沈み込みを2次元的に平板として考えるにとどまり、リソスフェアが球殻であることはおろか海溝に沿う方向に連続していることさえも、議論の上では全く無視しているものが多い。本論文では、球殻であることの重要性を喚起するために、『プレートテクトニクス』をあえて『球殻テクトニクス』と呼び、リソスフェアが球であることの効果を調べた。

球殻テクトニクスへの最初のアプローチとして、筆者らは、最近、沈み込んだリソスフェア（スラブ）を表わす深発地震面の形状の特徴を世界の主要な沈み込み帯について調べ（副論文1）、リソスフェアは沈み込みの際にほとんど伸び縮み変形をしないことを見いだした。これは、リソスフェアが地球の内側の限られたスペースへ沈み込む際の横方向の圧縮を解放するためには波打たなければならないことを示している。これが座屈である。本論文では、このリソスフェアの座屈現象を系統的に調べ、実際の地球への適用について議論をしている。座屈解析は、典型的な非線形力学の問題であり、解析的アプローチは一般には困難である。本論文では、非線形有限要素法による数値計算を行ない、筆者らの行なったアナログ実験の結果（副論文2）と対比をした。

## リソスフェアのモデル

本論文では沈み込むリソスフェアを非常に単純化したモデルで近似した。それは実際の沈み込むリソスフェアに存在する海山や、断裂帯など、リソスフェアの変形に影響する様々な複雑な要因を取り除いた球殻リソスフェアそのものの変形の基本的な性質を調べるためである。

現在の地球上の沈み込み帯は大円上に分布するという特徴があるので、リソスフェアの沈み込みの理想的な場合として半球殻の周縁を内側に折り曲げるモデルを用いた。また、リソスフェアにかかる力としては2種類の基本的なものを採用した。ひとつはリソスフェアを内側に折り曲げる力であり、半球殻の周縁に様な荷重を内側に向けて加えるようにしている。もうひとつは、アセノスフェアと海水との密度差による浮力で、海溝より海側の部分のみに働く。この力は、リソスフェアの上下変位を妨げる力であるので、半球殻の周縁から、ある距離離れた周縁と平行な小円に沿ってすべての変位と回転をゼロにすることにより近似した。この小円と周縁との距離が沈み込むリソスフェアの長さに対応している。

## 数値計算

計算は豊田高専の桜井孝昌氏より提供を受けた非線形有限要素法のプログラムを、計算の能率をあげられるよう改良を施して使用した。有限要素モデルは先に述べた力学モデルに基づき、球殻を三角形平板シェルの組み合わせとして表わしている。計算は完全弾性体について行ない、Young 率が70GPa、Poisson 比を0.25としている。球殻の半径は地球と同じく6371 kmとし、殻の厚さについては、厚さの影響をみるために20km~100km までいろいろ変えて計算を行なっている。

## 解析と結果

解析は主に次の3点について行なった。(1) 座屈によって現われる波長は、球殻の厚さ及び変形可能な部分の長さによどの様に影響されるか、(2) 座屈を起こした後、球殻はどの様に變形するか、(3) 実際の地球では座屈は起こり得るか、という点である。

(1) については、厚さ ( $h$ ) 及び変形可能な部分の長さ ( $L$ ) をいろいろと変化させて計算を行なった。球殻を円筒殻で近似したアナログ実験と

対照する目的で、円筒殻についても計算を行なった。その結果座屈波長は  $\lambda = \lambda / \sqrt{(h/R)}$  と規格化され、 $\bar{L} = L/R / \sqrt{(h/R)}$  (Rは球殻の半径) に依存する。従って薄い殻ほど、Lが小さいほど座屈波長は短くなる。また円筒殻と球殻との座屈波長の違いは、 $\bar{L}$  が短くなるほど小さくなり、後に述べるように現実の沈み込みスラブの長さに対応する領域ではその差は無視できる程度になる。さらに座屈波長に対する不均質性の影響についても調べてみた。リソスフェア上の海山の沈み込みに対応する不均質性を与えた場合、座屈前の変位には影響を及ぼすものの、座屈後の最終的な波長は不均質性のない場合とあまり変わりはない。また球殻にその周縁に垂直な裂け目がある場合も、その影響は裂け目のごく周辺に限られ、まわりへの波及は少ない。

(2) については、まず、座屈後ある程度大きな変位まで計算を行ない、変形部の形状がどの様に変化していくかを調べた。その結果、短い円筒及び球殻の変形において特徴ある形状が認められた。座屈後の変位が小さいうちは、座屈波形は内側及び外側に向けて対称なきれいな正弦波状になっている。しかし、変位が大きくなるにつれて対称性はくずれ、外側に向けて鋭くとがり、内側に向けてはゆるやかな弧状になる。この形状は、きわめて現実の島弧の形状と類似しており、島弧の形状の成因を考えるうえで、注目に値する。また、従来は島弧会合部の *c u s p* の成因は密度の小さい海山の海溝への衝突により前進し、その部分に陸側に向けてとがった部分をつくるためと考えられていたが、この解析結果は、海山の様なものがなくても *c u s p* の形状はリソスフェアの座屈後の変形により自動的にできることを示している。

またアナログ実験において、座屈後の変位が大きくなるに従い、座屈波が短波長のものから長波長のものへ転移するという興味ある現象が見られた。これは有限要素法の変形の解析結果から次の様に説明される。座屈後の変形のモードは同一の条件(パラメタ)に対して複数の波長の異なったモードを持つ。そのうち、実現するための荷重が最も小さなモードが安定であると考えられる。その他のものは準安定であり、たとえ何らかの状況で実現したとしても、外的擾乱により、より安定なモードに移行してしま

うと考えられる。実験における波長の変化も、この様なモードの転移を表わしているのであろう。

さて(3)の問題であるが、実際のリソスフェアで本当にこの様な座屈が起こり得るかどうかというのは重要な問題である。この点を議論するために、球殻を座屈させるのに必要な荷重、座屈時の殻の面内応力と殻の変位、そして座屈後の波長について、実際の地球の条件にあてはめて吟味してみた。現実の典型的な沈み込み帯に対応する条件として、実効弾性厚25km、長さ780kmのスラブに対応する球殻モデルについて計算した。まず座屈荷重は球殻の断面におけるせん断応力に換算すると4.6MPaとなり、浅い地震の応力降下の値と同程度となる。さらに現実には線荷重ではなく面荷重と考えられるためせん断応力はさらに小さくなる。また座屈時の殻の面内圧縮応力も180MPaとなり、リソスフェアの降伏圧縮応力(約500MPa)よりもかなり小さな値になっている。殻の変位も最大17kmとなり、殻の厚さよりも小さい変位で座屈を起こすことになる。以上の値は均質な球殻の場合であり、不均質な場合にはこの値に達する前に座屈を起こす。座屈波長を現実の島弧の1つの弧の長さに対応させ、現実の沈み込み帯について厚さとスラブの長さから座屈波長と同じパラメタを用いて整理した。その結果、ややばらつくもののアナログ実験や有限要素法の結果と一致する。

これらの結果は島弧が弧状をなすのはリソスフェアが沈み込みに伴って座屈を起こしたためであることを示唆している。

#### おわりに

島弧活動への球殻テクトニクスの応用は非常に興味のあるところである。本論文ではその一例として背弧海盆拡大のメカニズムについて説明を試み、背弧海盆は座屈モードの転移によって起きるとしている。島弧における様々な地質現象について球殻テクトニクスの観点より見直してみる必要がある。