

学 位 論 文 題 名

Dynamics of the wind-driven sea level
variation around Antarctica

(風駆動による南極沿岸周りの水位変動の力学)

学位論文内容の要旨

南大洋は地球上で唯一東西の境界がなく、三大洋（インド洋、太平洋、大西洋）を直接連結している海洋である。南大洋上は地球上で最も風が強く吹き、その変動成分も大きい海域である。そのため、主に風応力によって駆動される東向きに流れる南極周極流や南極沿岸を西向きに流れる南極沿岸流などの海流の変動成分も大きい。南大洋の大規模な海洋変動は観測及び数値モデル結果から数日から一年程度の周期帯では風応力によって駆動される順圧的な変動が卓越することが知られている。

南大洋の南限にあたる南極沿岸域は季節海水域であることから直接観測及び衛星による海洋データの取得が難しく、長期連続したデータが少ない海域である。そのなかにあつて南極沿岸に点在する基地の水位データは例外で、南極海沿岸の海洋場を長期間連続的に反映した貴重なデータである。その南極沿岸周囲の水位変動は周極的にコヒーレントに変動するという特徴が観測から示されている。このコヒーレントな水位変動は南半球の大気場の支配的な変動パターンで、環状モードである南極振動と強い負の相関関係にあることが知られている。また、このように大気場の変動とほぼ同位相に変動するためには、何らかの散逸メカニズムが必要であることが定性的に示唆されている。これまで、南極海海洋の応答は定性的な理解にとどまっており、その変動メカニズム及び水位変動そのものがどのような海洋変動場を反映したものなのかは解かっていない。本研究の目的は南極沿岸の水位変動に焦点をあて、観測及び数値モデルからその変動メカニズムを明らかにすることである。さらに、観測及び数値モデル結果を定量的に説明できる解析解の導出することを試みた。

現実的な地形と風応力を取り込んだ順圧数値モデルは数日-200日の周期帯の南極沿岸における観測5地点（Syowa, Mawson, Davis, Casey, Faraday）の水位変動をよく再現した。また、風応力を理想化したいくつかの数値実験から南極沿岸の水位変動は主に陸棚及び陸棚斜面上の風応力によって駆動されていることを確認した。さらに外力との関係を詳しく調べるために、水位変動の駆動力となる岸に平行な風応力とモデル沿岸水位を振動数-波数空間における比較を行なった。外力のパワースペクトルでは、南極振動に対応する波数ゼロの変動成分が20日より低振動数側において卓越している。20日より高振動数側では総観規模の擾乱等の移動に伴う東向き成分も波数ゼロの変動成分と同程度となる。一方、モデル沿岸水位のパワースペクトルでは、波数ゼロ成分が10日より低振動数側で卓越しており、20日より高振動数側では外力とは異なり、西向き伝播成分にパワースペクトルのピークがあった。また、モデル沿岸水位の波数ゼロ成分は低振動数帯程、より支配的な変動成分となっていたが、これは外力の波数ゼロの変動成分だけでは説明できないことがわかった。

観測及び数値モデル結果の両方において、波数ゼロのコヒーレントな水位変動は10日-200日周期の75%程度の変動を説明する支配的な成分であった。このコヒーレントな水位変動は数値モデルにおいて南極沿岸の陸棚及び陸棚斜面の地形に周極的に捕捉された現象であった。数値モデル沿岸域の20日より短い周期の水位変動に対して、伝播現象を抽出できるCEOF解析を行なうと、南極沿岸を波数1, 2, 3で岸を左にみて(西向へ)伝播する水位変動が確認された。これらの波数1, 2, 3の西向に伝播する水位変動はコヒーレントな変動と同様に、南極沿岸の陸棚及び陸棚斜面に捕捉された現象であった。

数値モデルにおいて確認された南極沿岸に捕捉された水位変動のメカニズムを理解するために、南極沿岸の代表的な地形及び風応力を考慮した周期境界条件下における陸棚及び陸棚斜面上での海洋応答の解析解を導出し、観測及び数値モデル結果と比較した。本研究では東西方向に周期境界条件を用いたことにより、伝播モードの陸棚波の解に加えて、コヒーレントモードの波数ゼロの解が得ることができる。

まず、コヒーレントな水位変動に注目して解析を行なった。観測結果から得られたコヒーレントな水位変動と5つの異なるダンピングタイムスケール(ダンピングなし、50日、10日、5日、1日)をもつ解析解の水位変動との比較を行なった。観測のコヒーレントな水位変動は5日-10日ダンピングタイムスケールを含んだコヒーレントモードの解析解によって、その変動を定量的に説明することができることがわかった。このダンピングタイムスケールはおおよそ水深500mでの海底摩擦によるスピンドラウタイムに対応している。解析解の形からコヒーレントモードは外力に対して高振動数帯において振動数に反比例し、低振動数帯(周期:約100日以上)ではほぼ散逸とバランスする応答特性をもつことが示された。観測と数値モデル結果においても解析解と同様の応答特性を示した。この応答特性は南極沿岸のコヒーレントな水位変動が振動数帯程、より支配的な変動となることを説明するものである。次に、西向き伝播モードについて調べた。南極沿岸において陸棚波の伝播方向は西向きであるので、陸棚波は低気圧等の東向きの外力に対してほとんど応答しないのに対し、西向きの外力とは共鳴しうることが解析解から示された。数値モデル沿岸水位における西向き擾乱のパワースペクトルのピークは解析解によって示唆された共鳴する周期(波数1:15日、波数2:7-8日)とおおよそ一致していた。観測5地点の水位を用いて、波数1の西向き波動の抽出を試みた。観測結果から得られた位相関係は数値モデル結果と対応しており、現実においても西向き波動の存在が示唆された。

南極沿岸の水位変動を特徴づけるコヒーレントな変動は、南極振動に伴う波数ゼロの風応力の変動そのものが卓越していることと、本研究の解析解によって示された低振動数帯においてコヒーレントモードの水位変動は外力に対して大きく応答することの二つのことから支配的な成分となることがわかった。また、数値モデルの沿岸にみられた西向に伝播する水位変動は南極沿岸を左手にみて伝わる陸棚波の共鳴として説明できることがわかった。

学位論文審査の要旨

主 査	助教授	大 島 慶一郎
副 査	教 授	若 土 正 暁
副 査	教 授	久保川 厚
副 査	教 授	三 寺 史 夫
副 査	助教授	青 木 茂
副 査	助教授	広 瀬 直 毅 (九州大学応用力学

研究所)

学 位 論 文 題 名

Dynamics of the wind-driven sea level variation around Antarctica

(風駆動による南極沿岸周りの水位変動の力学)

南大洋は地球上で唯一東西の境界がなく、三大洋(インド洋、太平洋、大西洋)を直接連結している海洋である。また、南大洋は地球上で最も風速が大きく、その変動成分も大きい海域である。そのため、主に風応力によって駆動される東向きに流れる南極周極流や南極沿岸を西向きに流れる南極沿岸流などの海流の変動成分も大きいと考えられる。しかし、南大洋の南限に位置する南極海は、季節氷水域であることから直接観測や衛星による海洋データの取得をすることが難しく、長期連続したデータが少ない海域である。そのなかにあって南極沿岸に点在する基地の水位データは例外で、南極海沿岸の海洋場を長期間連続的に反映した貴重な観測データある。地形的に東西の境界をもたない南極沿岸では周極的にコヒーレントな水位変動が大きく卓越することが最近の研究から明らかになってきた。さらに、南極沿岸の海洋変動を特徴づけるこのコヒーレントな変動は南半球の大気場の支配的な変動パターンである南極振動(環状モード)と強い負の相関関係にあることもわかってきた。しかし、大気に対する海洋の応答に関する力学は定性的な理解にとどまっており、この変動機構はよくわかっていない。申請者の研究は、南極沿岸の水位変動に焦点をあてその変動メカニズムの解明から出発して、南極沿岸海洋を支配する力学機構を明らかにすることを目指したものである。

まず、申請者は現実的な地形と風応力を取り込んだ順圧数値モデルを駆動し、数日-200日の周期帯の南極沿岸における観測5地点(Syowa, Mawson, Davis, Casey, Faraday)の水位変動はよく再現されることを示した。さらに、風応力を理想化したいくつかの数値実験から、南極沿岸の水位変動は主に陸棚及び陸棚斜面上の風応力によって駆動されていることを明らかにした。外力との関係をより詳しく調べるために、水位変動の駆動力となる岸に平行な風応力とモデル沿岸水位の比較を行なった。その結果、南極沿岸水位において卓越する波数ゼロ成分は単純に外力の波数ゼロの成分と対応しているわけで

はないことと、南極沿岸をぐるりと囲む波数 1, 2, 3 の水位変動が岸を左にみて (西向へ) 伝播していることを示した。これらの南極沿岸の水位変動は南極沿岸の陸棚及び陸棚斜面に捕捉された現象であることを数値モデル結果から示された。

次に、数値モデルにおいて示された南極沿岸に捕捉された水位変動のメカニズムを理解するために、南極の周極性に着目して周期境界条件下における陸棚及び陸棚斜面上での海洋応答の解析解を導出した。このような設定のもとでは、伝播モードの陸棚波の解に加えて、コヒーレントモードの波数ゼロの解が得ることができる。

5 日-10 日ダンピングタイムスケールを含んだコヒーレントモードの線形解は、数値モデル結果だけでなく観測されるコヒーレントな水位変動を極めてよく説明することを示した。解析解の形からコヒーレントモードのゲイン (外力に対する応答比) は高振動数帯では振動数に反比例し、低振動数帯 (周期: 約 100 日以上) では外力と散逸とがバランスする応答特性が示された。観測と数値モデル結果においても解析解と同様の応答特性が示される。この応答特性は、南極沿岸のコヒーレントな水位変動が低振動数帯程より支配的な変動となることを説明するものである。

次に、西向き伝播モードについても調べた。南極沿岸において陸棚波の伝播方向は西向きであるので、陸棚波は低気圧等の東向きの外力に対してほとんど応答しないのに対し、西向きの外力とは共鳴することが解析解から示された。数値モデル沿岸水位における西向き擾乱のパワースペクトルのピークは解析解によって示唆された共鳴する周期 (波数 1: 15 日、波数 2: 7-8 日) とおおよそ一致していた。さらに、観測 5 地点の水位を用いて、波数 1 の西向き波動の抽出を試み、現実においても西向き波動の存在が示唆された。

この研究から、南極沿岸の水位変動でコヒーレントな変動が卓越するのは、南極振動に伴う波数ゼロの風応力の変動そのものが卓越していることの他に、低振動数帯においてコヒーレントモードが外力に対して大きく応答する特性が重要であることが明らかになった。また、数値モデルにみられた西向に伝播する水位変動は南極沿岸を左手にみて伝わる陸棚波の共鳴として説明できることを提示し、観測においてもそのようなシグナルがあることを示唆している。申請者の提示した力学機構は水位変動だけでなく南極沿岸流の変動にも適用でき、南極沿岸海洋の最も重要な力学機構を示したものといえる。

審査員一同はこれらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士 (地球環境科学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。