

氏名・(本籍)	いな づ だい すけ 稲 津 大 祐
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2324号
学位授与年月日	平成19年3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Sea level response of the Japan Sea to synoptic atmospheric disturbances (総観規模の大気擾乱に対する日本海の水位応答)
論文審査委員	(主査) 助教授 木津 昭一 教授 花輪 公雄, 川村 宏 助教授 広瀬 直毅, 須賀 利雄, 境田 太樹

論 文 目 次

Abstract	i
Acknowledgment	iv
Contents	vii
1. General introduction	1
2. Sea level response to atmospheric pressure forcing at the Japanese coastal region	6
2.1 Introduction	6
2.2 Data and processing	7
2.2.1 Hourly records of tide gauge and surface air pressure	7
2.2.2 Correction of tides	8
2.2.3 Barometric component in sea level	9
2.3 Results	10
2.3.1 Chichijima -IB response-	10
2.3.2 Regional response	11
2.3.2.1 East coast of Japan	11
2.3.2.2 South coast of Japan	12
2.3.2.3 The Seto Inland Sea	12
2.3.2.4 The Japan Sea	13
2.3.2.5 The Sea of Okhotsk	14
2.3.2.6 Daily mean response around the Japan Sea and the Sea of Okhotsk	14
2.4 Barometric correction around the Japan Sea	14

2.5 Final remarks	18
3. Realistic simulation of sea level in and around the Japan Sea due to meteorological disturbances	36
3.1 Introduction	36
3.2 Model description	37
3.3 Optimization of coefficient of bottom friction	39
3.4 Sea level variation in and around the Japan Sea induced by atmospheric disturbances	41
3.4.1 Regression between sea level and surface air pressure	41
3.4.2 Shelf wave failure along central Honshu coast owing to coarse resolution	42
3.5 Discussion	43
4. Response of the Japan Sea to synoptic pressure forcing	56
4.1 Introduction	56
4.2 Local response of sea level and surface air pressure change	57
4.3 Response of basin-mean sea level	58
4.4 Zonally asymmetric response to traveling forcing	59
4.4.1 Sea level response to idealized traveling forcing	60
4.4.2 Interpretation of the response mechanism using a one-dimensional model	61
4.4.3 Western extension of sea level lag induced by growing pressure forcing	65
4.5 Barometric correction of coastal sea level	66
4.6 Summary and discussion	68
5. Response of the Japan Sea to synoptic wind forcing	82
5.1 Introduction	82
5.2 Relations between basin-mean sea level and volume transport through the straits	84
5.3 Volume transport through the Tsushima Strait preceding along-strait wind	86
5.4 Typical wind field involving regional sea level over the Japan Sea	90
5.5 Response of volume transport through the Tsushima Strait to oscillatory wind forcing	91
5.5.1 Response of the realistic Tsushima Strait to idealized forcing	91
5.5.2 Shelf wave scattering on developed continental shelves	93
5.5.3 Continental shelves enhance volume transport induced by cross-strait wind	96
5.6 Summary	99
6. General conclusions	120
Appendix Wind-induced volume transport through the Straits of Tsugaru and Soya controlled by interbasin sea level differences	123

論文内容要旨

水位は様々な要因で変動する。その要因の一つが総観規模の大気擾乱（気圧・風）に起因する変動である。沿岸域では、気象擾乱に起因する顕著な水位変動を知ることは防災の観点から必要とされる。また、外洋においては、大規模な海洋循環の変動を調べる際に、気象擾乱起源の水位変動が高周波ノイズとなるため、その適切な除去が望まれる。このように、気象擾乱起源の変動を正確に見積もることは重要である。

気圧変動に起因する水位変動について、従来は、1 hPaの気圧減少（上昇）に対し、1 cmの水位上昇（減少）が静力学的に引き起こされるというInverted Barometer（IB）応答（1 cm/hPa）を仮定することが一般的であった。しかし、日本海のような閉鎖的な海域では、海盆全体への気圧強制に対して、狭く浅い海峡を通じた海水交換によって、海盆全体の水位が応答する。この海水交換に海峡の摩擦が強くはたらくため、海盆平均水位の変動は、海盆平均気圧の変動に対して、IB応答から遅れた応答を示すことが知られている。一方、海峡付近の応答の遷移や海盆内部の応答の違いについては過去の研究では言及されていない。

また、風の強制に対しては、主に対馬暖流流量の変動によって、日本海の内海平均水位が変動する。Lyu and Kim (2005) は、日本海を矩形海域と仮定し、古典的な理論に基づき、各海峡の流量変動が海峡に沿う方向の風によって駆動されるとした。一方、Jacobs et al. (2005) は海峡と交差する風の重要性をあげており、両者は矛盾する。そこで本研究では、総観規模の大気擾乱（気圧・風）に対して特異な応答を示す日本海の水位変動を、観測資料の解析、および数値シミュレーション手法によって研究し、気圧起源および風起源それぞれの変動の力学機構を解明することを目的とする。

第2章では、現場潮位資料と海面気圧資料とを回帰解析して、気圧変動に対する日本海内部と外海との応答の違いを、海峡付近の遷移領域を含めて調査した。その結果、日本海は平均的にnon-IB応答をしており、本州の日本海沿岸における地点ごとのIB応答からの遅れ時間が、海峡周辺で小さく、能登半島付近で最大10時間程度に達することを発見した。また、朝鮮半島の東岸に沿っておよそ10時間の遅れ時間が観察された。

第3章では、この原因を調べるために、まず、現実的な海岸・海底地形と再解析気象データを用いた数値シミュレーション手法によって、日本海および周辺海域の気象擾乱に起因する潮位変動の再現を試みた。海峡における摩擦は、日本海の水位変動にとって決定的な海盆間の海水移動に強く作用するため、流速の二乗に比例する海底摩擦係数を潮位資料で最適化した。得られた最適摩擦係数は、一般的に用いられる値（0.0026）よりも大きい値（0.01）であり、モデル解像度に依存すると考えられる。

第4章および第5章では、最適化された摩擦係数を用いて、気圧のみ、および風のみを与えたシミュレーション結果について、それぞれ水位や海峡流量の変動を定量的に評価し、その力学機構について考察、議論した。第4章および第5章では、以下のことが明らかになった。

気圧変動に対する水位変動について、潮位資料の解析によって得られた日本海内部における気圧変動に対する水位応答のパターンの大部分が気圧のみで駆動したシミュレーション結果により表現できる。また、気圧変動に対する水位変動の振幅比率は海盆東部で1 cm/hPaより大きく、西部で1 cm/hPaより小さい。応答の遅れ時間は海盆西部で最大値を示し、海盆東部に向かって段々と小さくなる。擾乱の伝播方向を軸とする一次元モデルを用いることで、海盆内の水位変動に見られるこのような東西非対称構造は、

総観規模の時空間スケールの気圧擾乱が発達しながら東進することによって発生することがわかった。

日本海の高気圧平均水位を大きく変動させる風の平均場をコンポジット（合成図）解析によって抽出したところ、対馬暖流が日本海へ入る（から出る）向きの流量偏差をもつとき、東北地方北部付近に高（低）気圧偏差、対馬海峡付近に南東（北西）風偏差という特徴的な大気場となることがわかった。この風偏差は対馬海峡を横切る風であり、Jacobs et al. (2005) の主張と整合する。理想的な風強制力を与える数値実験を行い、海峡を横切る風と海峡に沿う風の影響をそれぞれ定量的に評価したところ、海峡を横切る風がより効率的に流量を駆動することがわかった。両者の合成により、数日程度の周期帯において、対馬海峡の流量は、ほぼ南北方向の風に対して、およそ $4 \text{ Sv N}^{-1} \text{ m}^2$ の最大応答強度を示すことがわかった。対馬海峡を簡略化した地形を用いて、海峡を横切る風と海峡に沿う風の影響を同様に比較することで、対馬海峡に接続する発達した陸棚が、陸棚波の散乱を介して対馬海峡を横切る風の影響を強め、さらに、海峡に沿う風の影響を抑制することがわかった。

本研究により、気象擾乱に対する日本海の水位応答が詳細に記述、議論された。特に、伝播性の総観規模気圧変動に対し、海盆内で応答強度の非対称性ができること、そして、風に対する海峡流量の応答が、これまで理論で考慮されていなかった海峡外の海底地形の影響を大きく受け得ることが示された。

論文審査の結果の要旨

稲津大祐提出の博士論文は、総観規模の気象擾乱（高低気圧）に伴う日本海とその近傍の水位変動のメカニズムを、観測と理論の両面から詳細に議論したものである。

水位は、我々の日常生活に直結する身近なものであると同時に、海洋学的にも様々な信号を含み、古くから多くの研究の対象となってきた。気象擾乱による水位変動は、気圧の変動と風の主に2つの要素を通じてもたらされるが、このうち前者に関しては伝統的に、静力学的なIB（逆気圧計）応答が良く成り立つとされてきた。実際、この近似は外洋の長周期の変動に対しては極めて良く成り立つが、海水の移動に制限のある閉鎖的領域では必ずしも成り立たないことが、近年、指摘されている。

論文では、まず第二章で、気圧変動に対する日本周辺水位の応答を検潮所の観測資料に基づき詳しく分析した。太平洋（外海）側ではIBが実際良く成り立っているが、日本海では全般に水位が気圧変動より遅れ、かつ海盆内にも応答のずれが在ることが初めて示された。

第三～四章では日本海の数値モデリングを行い、現実的な強制の下で駆動される水位変動を要素（気圧変動・風）毎に分離し、各々のメカニズムを詳細に議論した。その結果、①海峡を通しての海水の出入りに時間がかかるため、海盆内の平均気圧変動より平均水位応答が遅れる、②海盆内の気圧分布に対しては十分な重力波速度をもって水位が素早く応答する、という海側の都合の他に、更に③気圧擾乱が発達しながら東進する、という強制場の都合で、海盆全体の応答を説明できることが明快に示された。

第五章では、対馬海峡部の風が同海峡の体積輸送量を通じて日本海内の平均水位を変化させる機構について詳しく分析した。多くの既往研究によって支持されていたような、海峡に沿う方向の風の変動ではなく、海峡と交差する方向の風の変動がより強く流量変動を駆動し、それが日本海の平均水位の変動に反映されていること、ならびに、その過程では対馬付近の発達した陸棚が極めて重要な役割を果たしていることが初めて示された。

以上の成果は、この海域の水位資料を今後我々がどのような目で見なければならぬかを明らかにした点で高く評価されるとともに、提出者が今後自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、稲津大祐提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。