

学 位 論 文 題 名

A Numerical Investigation of Effects of Westerlies Variability on the Circulation of Subducted Water

（偏西風の変動が沈み込んだ海水循環に及ぼす影響に関する数値的研究）

学位論文内容の要旨

高緯度から低緯度への海洋循環は、気候変動を考える上で重要な役割を担っていると考えられる。なぜなら、高緯度の大気場の変動が subduction（沈み込み）によって海洋表層から内部へと伝わり、最終的には低緯度の海洋の温度構造を変化させ、大気への熱放出量に変化すると予想されるからである。その大気→海洋表層→海洋内部 という流れのうち、中高緯度大気場である偏西風と海面水温が共に 10 年スケールで変動していることが、観測からは示されている。しかし、そのメカニズム及び海洋内部への伝播は明らかではない。本研究では、10 年スケールの偏西風の変動として経路と強度の変化に着目し、海洋大循環モデルを用いてその変動に対する海洋の応答を調べた。

経路の変化として Ekman pumping が zero になる zero wind stress curl line (ZWCL) の位置の変化に着目した。ZWCL を Sverdrup 流で決まる循環境界線に対して東西に傾くと、その二本の線に囲まれた亜熱帯循環系には upwelling の領域が、亜寒帯循環系には downwelling の領域ができる。その領域が原因で、亜熱帯循環系では 1) pool region が狭く、2) ventilated region が深く、3) 沈み込む水の密度が多様化する、ことを示した。

次に、偏西風の強化、ここでは風による stress の強化と、それによって熱を奪う冷却の強化の双方に着目した。10 年スケールで変動させる前に、突然風応力を変化させ 15 年間その値に保ち、海洋の応答を調べた。

風応力を強化すると、偏西風帯で混合層が深くなり、より低渦位の水が密度面に沿って南西方向へ沈み込むため、直接偏西風の変動がない低緯度側でも変動が見られる。この時に、thermocline では従来のモデルでも予測されるように、風応力を強化すると等密度面が下がる。これに対し、thermocline より浅い subsurface では風応力を強化すると、より低渦位の水が沈み込むことで密度面があがる。それが南西部へと沈み込んでいくので、結果として低温化する。これは従来のモデルでは予測されなかったことである。

これに対し冷却を強化すると、表層で温度が下がることによって、強化前よりも密度の大きい水が沈み込むことになる。風はこの場合変化していないので、風応力強化の場合と

違い、thermocline の変動はほとんどなく、密度の大きな水が亜熱帯循環系の ventilated region 全体に広がり、結果として低温化する。この低温化は、風を強化した場合と違い、北東側を中心に ventilated region に存在していることがわかった。

水塊形成上興味深い、亜寒帯から亜熱帯への水の輸送をトレーサーを用いて可視化した。風を強化した場合は、エクマン輸送による亜寒帯から亜熱帯への輸送が増大する。さらに亜熱帯循環系に流入してからは、亜熱帯北西部で混合層が風応力強化により深くなり、ある密度の水の量が増大する。この両方の過程によって、亜熱帯循環系の ventilated region では濃度が増大し、同時にトレーサーの分布域も広がる。冷却を強化した場合は、輸送はほとんど変化せずに密度面の露出緯度が南下するので、最も多く輸送される水の密度が増大する。さらに風、冷却双方を強化した場合は、輸送される水の濃度、密度が共に増大し、風を強化した場合と冷却を強化した場合の双方の線形和で表せることが示された。

最後に偏西風帯の風を周期的に変動させた場合に、海洋の応答の周期依存性を調べた。subduction の時間スケールより短い 5 年スケールの変動 (EN) を与えても低緯度側では顕著な変動はみられず、subduction の時間スケール程度の 10 年スケールの変動 (DC) を与えると、突然偏西風を変化させた場合と同様、亜熱帯循環系の南西部に顕著な変動領域ができることがわかった。風が強化 (弱化) することによって、突然強化した場合と同様、thermocline は深く (浅く) なり、subsurface は浅く (深く) なる。これによって交差領域で作られた低 (高) 渦位の水、すなわち層厚が大きな (小さな) 水が南西方向へ伝わることによって、低 (高) 温化する。この低温化が DC の場合は顕著であることに對し、EN の場合は、南西方向へ伝わる間に風の符号が逆になり、亜熱帯循環系南西部全域で、十分な応答がみられない。さらに、混合層の深さの応答をみると、等密度面の露出と混合層フロントとの交差領域付近で DC の場合は変動が大きく、EN の場合は変動が小さい。すなわち、subduction の時間スケールより短い風の変動では、低渦位 (高渦位) の水の生成の変動が、DC の場合は十分に応答し、EN の場合はそうではない。海洋の応答、風の応答という二つの時間スケールから、EN と DC の場合の亜熱帯循環系南西部での応答の違いが説明された。

以上のように、数値モデルを用いて、直接偏西風が変動している領域より低緯度側への変動の伝わるメカニズム、およびその周波数依存性が、力学的にも、水塊形成の立場からも解釈できた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	竹内謙介
副査	教授	久保川 厚
副査	助教授	安田 一郎
副査	助教授	謝 尚平
副査	教授	花輪 公雄 (東北大学理学研究科)

学位論文題名

A Numerical Investigation of Effects of Westerlies Variability on the Circulation of Subducted Water

(偏西風の変動が沈み込んだ海水循環に及ぼす影響に関する数値的研究)

最近、大気や海洋に10年程度の時間スケールの変動が卓越していることが多くの研究によって明らかにされてきた。また、数年の時間スケールを持っている ENSO (El Nino and Southern Oscillation) の頻度等が、10年程度の時間スケールで変化している事が解って来た。この様な時間変動のメカニズム、ENSO との関連等については明らかになっていない。しかし、時間スケールから、海洋がかなりの役割を果たしていることは当然考えられる。その一つの可能性として、subduction の役割が注目される。特に、北太平洋における偏西風にも10年の時間スケールの変動があることが解ってきたが、この海域は subduction が起きている場所でもあり、その意味からも重要性が示唆される。この研究はその subduction の実態や偏西風の変動に対する subduction の反応とその海洋構造変動における役割を数値実験によって明らかにしたものである。

この研究の主な成果の内、特に注目されるのが以下の4点である。

1. 風応力の curl の正負の境界が傾いていることによる効果を明らかにした。
2. 偏西風の強化には、応力が増大することと、海洋から大気への熱流量が増大することの二つの効果があるが、それぞれの効果を分離した。
3. 偏西風に伴う風応力が強化するときの海洋の応答が、これまで予想されたものとは全く異なることを明らかにした。
4. 偏西風の変動の時間スケールが10年程度であるか数年程度 (ENSO スケール) であるかによって海洋の応答が異なることを明らかにした。

先ず第一の点であるが、通常、風応力の curl の正負の境界が亜熱帯循環と亜寒帯循環の境界でもあると扱われているが、実際 curl の境界が経度線から傾いているため一

致はしない。この研究ではこの事に注目し、この不一致が subduction を強め、沈み込んだ海水が特性を保持したままより遠くまで到達できることを示した。

第2点であるが、一般に風が強くなると、それに伴ってより多くの運動量が大气から海洋に輸送されるが、それだけでなく、海洋と大気間の潜熱や顕熱の輸送も増加する。実際の観測ではこの効果を分離することは出来ないが、この研究では風応力だけ、あるいは海面の熱条件だけを変化させた数値モデルにより、それぞれの効果を分離する事が出来、また両者が同時に働く場合はそれぞれの効果の重ね合わせとしてほぼ理解できることを示した。

それによると、冷却が強化される場合には、海面水温が低下する影響が subduction によって広い範囲から亜熱帯循環の亜表層に侵入する。この過程は比較的単純で、いわゆる LPS モデルと呼ばれる理論から予想される結果と言って良い。しかし、風応力の強化の場合には、それぞれの等密度面上で見た場合、ある特定の点から亜熱帯に侵入することが見いだされた。そして、この点は混合層フロントとその等密度面が交差する点に相当することを示した。その結果、水温躍層に相当する等密度面は深くなるのに対し、亜表層の等密度面は浅くなる事が示された。これらは従来の理論からは推測できなかったことである。また、混合層の変動が、広い範囲に渡る海洋内部の構造の変動に寄与していることが示された点も注目に値する。これが第3点である。

第4点として、偏西風の変動に対する海洋の応答の時間スケール依存性が示された。10年の周期で偏西風が変動する場合は、上記のメカニズムにより比較的大きな変動が亜熱帯循環系亜表層部に見られたのに対し、3年の周期の変動に対しては変動が著しく小さくなることが示された。これは subduction による海水の循環の時間スケールと混合層の変動の時間スケールの両者に比較し、10年という時間はほぼ同等あるいはより長い時間スケールであるのに対し、3年の周期では追従出来ないことによることが示された。

本研究の成果は、様々な周期における偏西風の変動に対する海洋の応答とその機構について貴重な示唆を与えるもので、特に10年スケールの気候変動の研究の進展への大きな貢献として高く評価される。

以上の結果は、申請者が研究者として研究活動を行うために必要な高度な研究能力と学力を有していることを示している。よって審査員一同は申請者が博士(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。