

## 海が流れる方向はどう決まる？太平洋と日本付近の海洋循環

木田新一郎（九州大学応用力学研究所）

### 1. はじめに

海は大気と接する海面で暖められ、冷やされ、かき混ぜられながら、西や東、北や南へと動いている。日本列島には南から黒潮と対馬海流が、北から親潮が流れてくることは、小学校の社会で学ぶように多くの人に知られている。しかし黒潮はなぜ南から流れてくるのだろうか？九州から沖縄へ逆向きに流れないのはなぜだろうか？海流が生じる理由としてまず頭に浮かぶのは風、であろう。もし風が吹いたら海流ができるのであれば、風が強いところは海流が速いはずである。しかしこの関係性が成り立っていないことは日本周辺の風速の分布と海流の分布（図 1）をみれば明らかである。冬、日本周辺の風は北風だが黒潮は南からの流れであり、黒潮が流れる空間スケールは風を持つ広い空間スケールとは大きく違う。日本海へと流れこむ対馬海流についても風の弱い夏から秋にかけて一番強くなることが知られている(Takikawa et al., 2005)。

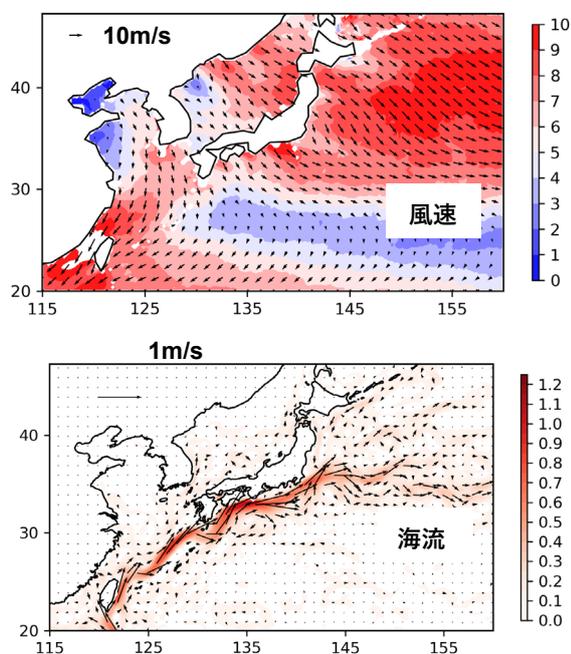


図 1 [上] 衛星 (QuikSCAT) から観測された 2 月の海上平均風[m/s] (矢印) と風速 (色). [下] 海面高度差 (AVISO) から求めた 2 月の海面地衡流[m/s]の向き (矢印) と流速 (色).

海流の向きとその強さを決めるのは何か。この講義では、海の基本的な循環の成り立ち方、そして太平洋・日本海・オホーツク海・東シナ海、と流れの仕組みが全く異なる海に囲まれている日本付近の循環構造について紹介する。

### 2. 海洋循環の成り立ち

海の流れ場を規定しているのは、その器（海盆）である。同じ緯度帯をぐるっと一周できる大気と比べて、海水は同じ緯度帯を流ることができない。海流は必ず陸にブロックされる。その結果、太平洋・大西洋・インド洋と各海では「環流」が生じることになる。当たり前すぎる話だと感じるかもしれないが、「環流」であることは海洋循環を理解するには東西方向と南北方向の流れを同時に説明できないといけないことを示している。この点こそが海洋循環の原理の解明が大気に比べて多くの年月がかかった理由だろうと推測する。海洋分野でようやく海洋循環の礎となるスベルドラップ流(Sverdrup, 1947)と西岸境界流(Stommel, 1949; Munk, 1950)の理論が発表された頃は、大気では既にコンピューターを利用した天気予報への取り組みが始まっていた頃である。

#### 2. 1 外洋域：西岸境界域と内部領域

海洋は大陸斜面を境に外洋域と沿岸域に分けられる。外洋域はさらに内部領域と西岸境界域に分けられ(図 2)、太平洋の 9 割以上は内部領域に属し、平均流は数 cm/s にも満たない弱さである。一方、黒潮や親潮は数百キロほどの幅しかない西岸境界域に属

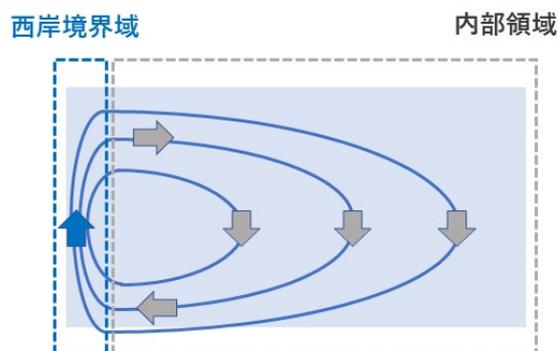


図 2 外洋の表層循環：内部領域+西岸境界域

し、平均流は強いところでは 1m/s 近くになる。日本のみに注目していると忘れてしまいがちだが、日本の周りの海域は世界的に見ても特異的な流れの速い海域である。

## 2. 2 海洋循環の三原則

平均場としての表層の海水の流れ方は以下の 3 つのルールに基づいて決まる。

- ① 北に行くほど西風が強いとき、外洋の内部領域では南向きの流れが生じる（北半球）。逆に西風が弱くなるときは北向きに流れる。
- ② 東西方向には自由に流れることができる
- ③ 南北方向に自由に流れることができるのは西岸沿いのみ

ルール①はスベルドラップ流と呼ばれ、海洋循環の基盤となる流れである。南半球、または東風であれば流れは逆になる。ルール②は大気的基本的な流れと似ており、渦位の保存則から導出できる。ルール③は西岸境界流に関するものであり、ルール②と③は風の有無に関係なく成立するルールである。スベルドラップ流がなぜ南（北）向きなのか、なぜ西岸沿いなのか、これらの原則のより詳細な過程については花輪(2017)等を参考にしてほしい。

## 2. 3 黒潮と親潮の流れの向き

海洋循環の三原則を使うとなぜ黒潮が北向き、親潮が南向きの流れになるのかが見えてくる（図 3）。

ステップ 1：まず風の分布から考えよう。黒潮が存在する亜熱帯は、南側では貿易風、北側では偏西風が吹く緯度帯である。親潮が存在する亜寒帯は、南側に偏西風、北側に極東風が吹く緯度帯となる。この風の分布はルール①に基づくと亜熱帯の内部領域では南向きの海流、そして亜寒帯の内部領域では北向きの海流、を作り出すことになる。

ステップ 2：このままでは偏西風の真下から海水がなくなり、貿易風・極東風の真下では海水があふれることになる。流れを維持するには海水をどこからか運び込み、そしてどこかへと運び出す必要がある。これを内部領域で実現するにはルール②の東西流を使うしかない。ただ東岸・西岸のどちらから水を運びこみ、そして運び出せばよいのかは不明なままである。

ステップ 3：最後にルール③を使うと東西方向の

流れは西岸沿いで作ることでできる南北方向の流れで補償すればよいことがわかる。この結果、亜熱帯では北向きの西岸境界流を伴う時計回りの流れ、亜寒帯では南向きの西岸境界流を伴う反時計回りの流れが形成される。この 2 つの西岸境界流が黒潮・親潮である。

三原則を組み合わせれば黒潮や親潮に限らず世界中の多くの外洋域の循環を推測することができる。そして重要なポイントは黒潮・親潮のような西岸境界流は自ら駆動されている流れではなく、内部領域へ応答するようにその流れの向きが決定している点にある。黒潮が北向きになる理由は、そして南から温かい海水を運んでくる理由は、太平洋の内部領域の流れが南向きだから、ということである。流れの

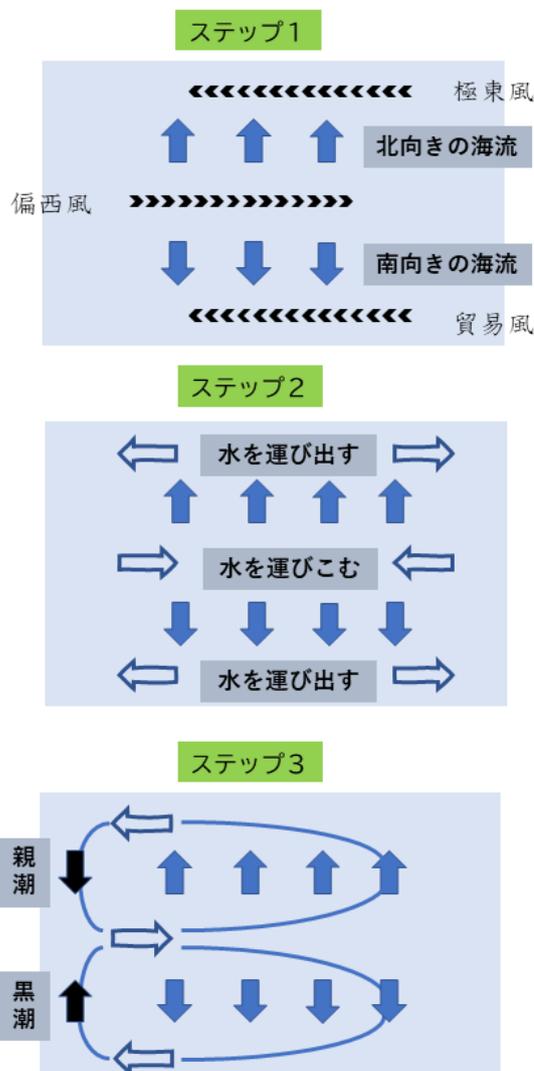


図 3 黒潮と親潮の流れの向きが決まる原理

早い黒潮のような流れが海洋循環のエンジンではなく、ゆっくりと動く内部領域がエンジンであることは、外洋の内部領域で何が起こるかで黒潮が将来どう変化するのが決まることも意味し、黒潮の予測が難しい理由のひとつである。

### 3. 日本周辺の海流

#### 3.1 東シナ海

東シナ海では黒潮が台湾から九州南岸へと続く大陸斜面に沿って北上する。三原則のルール③に基づけば黒潮は中国の沿岸に流れてもよさそうだが、そうならないのは東シナ海の水深が浅いためである(200m 以下)。先程示した三原則は水深の深い外洋域における原則のため、水深の浅い沿岸域ではルール②の「東西方向 (=等緯度線)」を「等深線」に置き換える必要がある。この沿岸域ならではのルールがあるために黒潮は大陸棚上へ移動することなく大陸斜面の等深線に沿って北上することになる。東シナ海の黒潮の特徴は、大きく蛇行する本州

南岸の黒潮と違い、その位置が安定している点である(Guo et al., 2006)。

東シナ海の水温場は黒潮を境に大きく変化し、太平洋側で暖かく東シナ海側で冷たい(図 4)。この差は冬季に特に明瞭になり(Xie et al., 2002)、黒潮の流軸上では移流によって周辺海域よりさらに暖かい。一方、夏季は直上の大気・放射によって海面付近で温められる効果が強くなるため、流れ場や水深の効果は見えにくくなる。黒潮の流軸上は周辺海域より暖かい構造はみえるものの、全体として東シナ海から太平洋にかけて温まっている。ただこの傾向は海面に限られており、夏季であっても東シナ海の水面下には冷たい海水が隠れている。

#### 3.2 オホーツク海

オホーツク海は千島列島と呼ばれる海の中にそびえ立つ細長い島々がつくる火山列島によって太平洋から遮断されている海である。太平洋と通ずる南部は水深が 1000m より深く、水深が 200m 以下の浅い海になるのは北部を中心とした海岸線沿いのみである。よって 3 原則がそのまま適応でき、大陸からオホーツク海の南部を通過する北西風によって海域全体に反時計回りの循環が駆動される。樺太の東岸には南向きの流れが生じ、この流れは沿岸成分も持ち合わせつつ、前節で示した親潮と似た原理で形成される西岸境界流である(Ohshima et al., 2004)。

オホーツク海の海面水温で特徴的なのは夏季である。海面が温まる夏季は北ほど海面水温が冷たくなるのが通常だがオホーツク海は南ほど冷たい(図 4)。このような空間分布は海洋循環だけでは説明することは難しく、千島列島で起こる潮汐混合の影響が大きいと考えられている。潮汐によって海面の水と直下の低温の水が混合することで低く保たれる海面水温によって、この海域では霧が多く発生することが指摘されている(Tokinaga and Xie, 2009)。

#### 3.3 日本海

日本海の流れ場は沿岸域と外洋域の両方の要素を持ち合わせている。まず黒潮から分岐した対馬海流は太平洋の暖かい海水を日本海へもたらし、同時に日本海の海水は津軽海峡を中心に太平洋へと流出する。この流出入から推測される日本海の流れ場は対馬海流が西岸境界流として朝鮮半島の東岸を北上したのち津軽海峡の緯度で東向きとなって日本海を

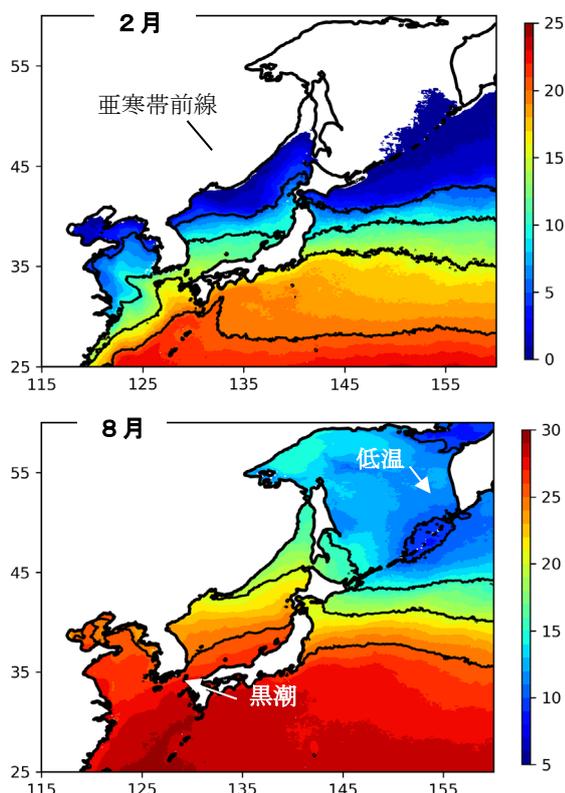


図 4 日本周辺の海面水温 (°C) : 夏季 (8 月) と冬季 (2 月). [データ: 衛星観測 (AVHRR) の月気候値]. 冬季のオホーツク海の空白域は海面水温が 0 度以下で海水域に相当する。

横断し、津軽海峡から太平洋へ流出する流れである。日本海の亜寒帯前線はまさにこの流れの一部であり、亜寒帯前線より南には太平洋から日本海へ運び込まれた暖かい海水が 200m くらいの厚みで蓄積されている (図 4)。冬季、大陸から強い季節風が吹いても日本海の海面水温が冷えきることなく大気へ水蒸気を提供し続けることができるのは、この分厚く暖かい海水の存在が大きい。

対馬海流は朝鮮半島だけでなく日本の沿岸域に沿って流れる。この流れは東シナ海でも紹介した沿岸域特有の等深線に沿った流れである。対馬海流は古くからその存在が知られているものの、その流れは「外洋的」に振る舞う成分と「沿岸的」に振る舞う成分の両方を持ち合わせている複雑な海流である。対馬海流は日本周辺の気候場の形成に重要だと指摘されているものの (Hirose and Fukudome, 2006), その流量の変動予測は難しく、日本周辺海域の風や黒潮によって変動するメカニズムの理解が進んだのはまだこの 10 年程である (Tsuji no et al., 2008)。

## 5. おわりに

海洋の流れ場が 3 つのルールに基づいて推測できること、そして日本周辺域の海流とその海面水温への影響を紹介した。日本を囲む西太平洋では現在、地球温暖化に伴って海面水温が他の海域よりも急激に上昇しつつある (日本の気候変動, 2020)。黒潮や親潮のような西岸境界流の影響を強く受けるこの海域の水温上昇が今後どう進行していくのかを予測するには、直上大気に加えて外洋域の変化を予測する必要があることは基本ルールから明らかであろう。高解像度化が進む衛星観測からは日本の沿岸域近くの水溫・塩分等の変化が捉えられるようになり、海洋熱波と呼ばれる大きな水温上昇 (Miyama et al., 2021) の存在も明らかになりつつある。黒潮の蛇行が日本の気象に影響するように、今後日本周辺の海流の変化が大気、そして気象場へ波及するメカニズムがますます明らかになることが期待される。

## 参考文献

Guo, X., Miyazawa, Y., & Yamagata, T. (2006). The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: The origin of the Tsushima Warm Current. *Journal of Physical Oceanography*, 36(12), 2205-2231.

- 花輪公雄 (2017). 海洋の物理学(現代地球科学入門シリーズ), 共立出版
- Hirose, N., & Fukudome, K.I. (2006). Monitoring the Tsushima Warm Current improves seasonal prediction of the regional snowfall. *Sola*, 2, 61-63.
- 文部科学省及び気象庁「日本の気候変動 2020」
- Miyama, T., Minobe, S., & Goto, H. (2021). Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010–2016. *Frontiers in Marine Science*.
- Munk, W. H. (1950). On the wind-driven ocean circulation. *Journal of Atmospheric Sciences*, 7(2), 80-93.
- Ohshima, K.I., Simizu, D., Itoh, M., Mizuta, G., Fukamachi, Y., Riser, S.C., & Wakatsuchi, M. (2004). Sverdrup balance and the cyclonic gyre in the Sea of Okhotsk. *Journal of Physical Oceanography*, 34(2), 513-525.
- Stommel, H. (1948). The westward intensification of wind - driven ocean currents. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 29(2), 202-206.
- Sverdrup, H.U. (1947). Wind-driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial currents of the eastern Pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 33(11), 318.
- Takikawa, T., Yoon, J.H., & Cho, K.D. (2005). The Tsushima warm current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data. *Journal of Physical Oceanography*, 35(6), 1154-1168.
- Tokinaga, H., & Xie, S.P. (2009). Ocean tidal cooling effect on summer sea fog over the Okhotsk Sea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D14).
- Tsuji no, H., Nakano, H., & Motoi, T. (2008). Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: Mean state and seasonal variation. *Journal of Oceanography*, 64(1), 141-161.
- Xie, S. P., Hafner, J., Tanimoto, Y., Liu, W. T., Tokinaga, H., & Xu, H. (2002). Bathymetric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas. *Geophysical Research Letters*, 29(24), 81-1.