

7. 海洋の運動と循環

7-1 海洋の大規模な流れ

海水の大規模な運動のことを海流という。太平洋、大西洋、インド洋に共通して、緯度 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ の領域に、上空からみて時計まわりに運動する亜熱帯循環が存在する。その運動の特徴は、

- 中緯度の偏西風帯では東向きに運動
- 低緯度の貿易風帯では西向きに運動
- 海洋の西側で高緯度方向に向かう強い流れが存在（西岸強化）

太平洋北部には上空から見て反時計回り亜寒帯循環があり、大西洋北部にも同様の海流（北大西洋海流）が存在する。他方南極大陸周辺には、大陸を一周するように南極環流が存在する。

これらの海流は、主に海上風の応力が原因となって生じている。このような風が原因で生じる海流を風成循環と呼ぶ。風成循環の到達深度はおおよそ温度躍層のあたりまでである。

深層にも弱い海流が存在する。このゆっくりとした深層循環は、海水の密度差が原因になって駆動されている。密度差は塩分と温度の差により生じるため、このような循環は熱塩循環とよばれる。地球上の限られた領域、具体的にはグリーンランド沖と南極海で生じた低温で高密度の海水が沈み込んで全海洋の深層に行き渡り、約千年から2千年かけて海洋表層に戻る運動を起こしている。これを海洋コンベアベルトと呼ぶ。

7-2 海洋の運動の基礎

吹送流：風の応力による流れ

簡単のために水平方向に無限に広がった一定の深さの海水があるものとする。また海水の粘性を考慮する。

コリオリ力がない場合、風が吹くと海水はそれに引きずられて同じ方向に流れるようになる。海底の粘着条件を考えると、定常状態では流速は深さとともに一定

の割合で減少して、海底で速度がゼロとなる。ある深さの微小水塊（上面と底面が海面に平行な立方体とする）に着目すると、この水塊の上面と下面に大ききの等しい粘性力が互いに反対向きに働き、全体として力のつり合いが成り立った状態になっている。

コリオリ力が働く場合、定常状態での海水の流れは、コリオリ力のない場合から一変する。まず最表層の微小水塊（同様に立方体とする）に着目すると、これにかかる力は上面の風の応力（風の向きに一致）、海水の運動方向に直交するコリオリ力、下面から受ける粘性力となる。これらが全体として釣り合うためには海水の運動方向は、風の向きに対して傾く必要がある。地球の北半球の場合には風向きに対して海水の運動方向は右向きに傾く。

より深い位置の水塊にも同様の考えを適用すると、海水の運動方向は深さとともに向きを右へ右へと変え、またその流速は指数関数的に減少する。この流速の急激に減少する層のことを、初めて理論的にその存在を証明した学者の名前をとってエクマン層とよび、その典型的な厚さは数 10m 程度である。粘性の鉛直方向の平均をとると、海水は風の向きに対して 90° 直交する方向に輸送される。これをエクマン輸送と呼ぶ。その大きさは風の応力に比例し、コリオリ因子（コリオリ力の速度に対する比）に反比例する。

地衡流

コリオリ力と圧力傾度力が釣り合っている流れを地衡流と呼ぶ。このタイプの流れは、大気においても存在し、地衡風と呼んでいる。北半球では高気圧を右に見るように風が吹くことを思い出しておこう。これは海の流れにも当てはまる。

海洋における圧力傾度力は、例えば海面に大規模な水位差が存在することによって生じる。この場合、コリオリ力がなければ、盛り上がった海水が周りに発散するような流れが生じるが、コリオリ力が働く場合には、圧力傾度力に直交する流れが生じる。北半球では海面の高まりを右に見るような流れが生じる。

7-3 風成循環のしくみ

大気循環によるエクマン輸送

西へ向かって吹く貿易風により高緯度方向に向かうエクマン輸送が起きる。また東へ向かって吹く偏西風により、低緯度方向にエクマン輸送が起きる。すると海水が貿易風帯と偏西風帯の中間領域に集まって高まりをつくることになる。こうして南北方向に圧力傾度力が生じ、これによる地衡流が発生する。その流れの方

向は貿易風帯では、貿易風の方向、偏西風帯では偏西風の方向に一致する。南極大陸を一周している南極環流はそのように理解することができる。

一方でエクマン輸送が起き続けると、貿易風帯や偏西風帯からは海水がどんどん移動し、やがてはなくなってしまうのではと疑問が湧くかもしれない。これは鉛直流の効果も考えると解決できる。エクマン輸送で海水が収束する領域ではゆっくりとした下降流が生じ、海水が発散している領域ではゆっくりとした上昇流が生じることで水位が一定に保たれる。

西岸強化

海洋の東西が岸で囲まれている場合、東西方向の海流はそこを突き切れない。そのため沿岸で南北方向の流れが生じ、全体として閉じた循環を形成する。

亜熱帯循環では大洋の西岸に黒潮や湾流といった、最大流速が2m/sにも達する強い海流が生じ、逆に東岸の流れは弱い。この西岸強化は、地球が球形でコリオリ因子が緯度によって異なることに起因している。

西岸強化の説明の前に、コリオリ因子が緯度によらず一定だった場合にどのような循環が生じるか考察する。コリオリ力は進行方向右側に働くものとし、海洋の形を各辺が東西と南北に平行な矩形とする。この南部に西向きの風応力、北部に東向きの風応力を加える。すると上から見て時計回りの循環が形成され、その中心は矩形の中心と一致する。この時の流れは、摩擦力が重要になる沿岸や底面付近を除くと、ほぼ地衡流になっており、循環の中心に水位のピークが生じる。

これを踏まえて、西岸強化はつぎのように説明される。コリオリ因子の緯度による違いを考慮すると、等圧線に沿って循環する地衡流の流速は、コリオリ因子の小さな低緯度ほど大きくなる。そのため循環の東側からは海水が取り除かれ西側には海水が追加されることになる。こうして水位のピーク位置が西側に偏る。循環の中心が西側にずれると、その西側に強い圧力傾度力が生じることになる。こうして強い海流が西側に形成される。