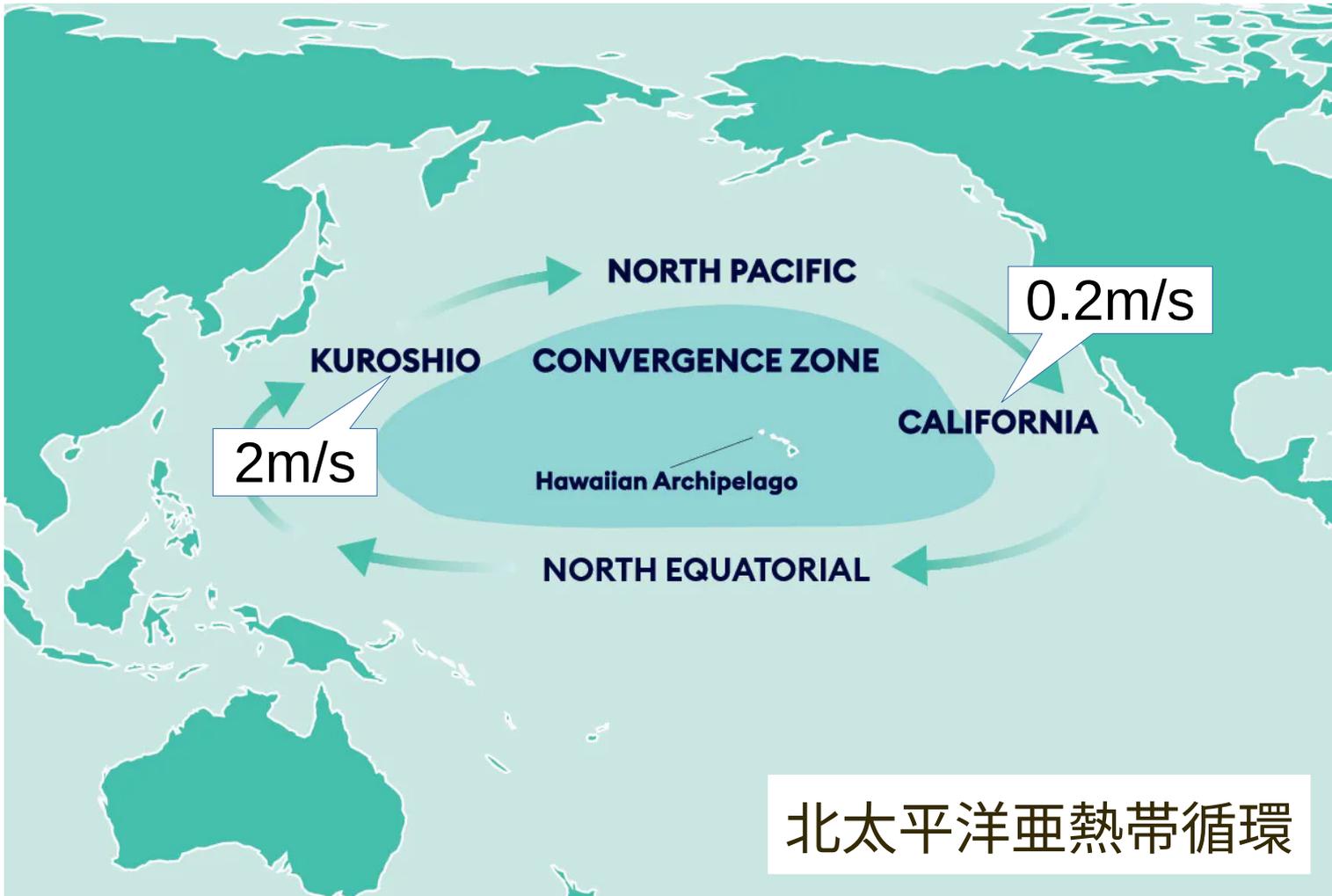


海洋の風成循環理論

—風が吹くと海洋西岸に強い流れができる話—

北太平洋亜熱帯循環と黒潮



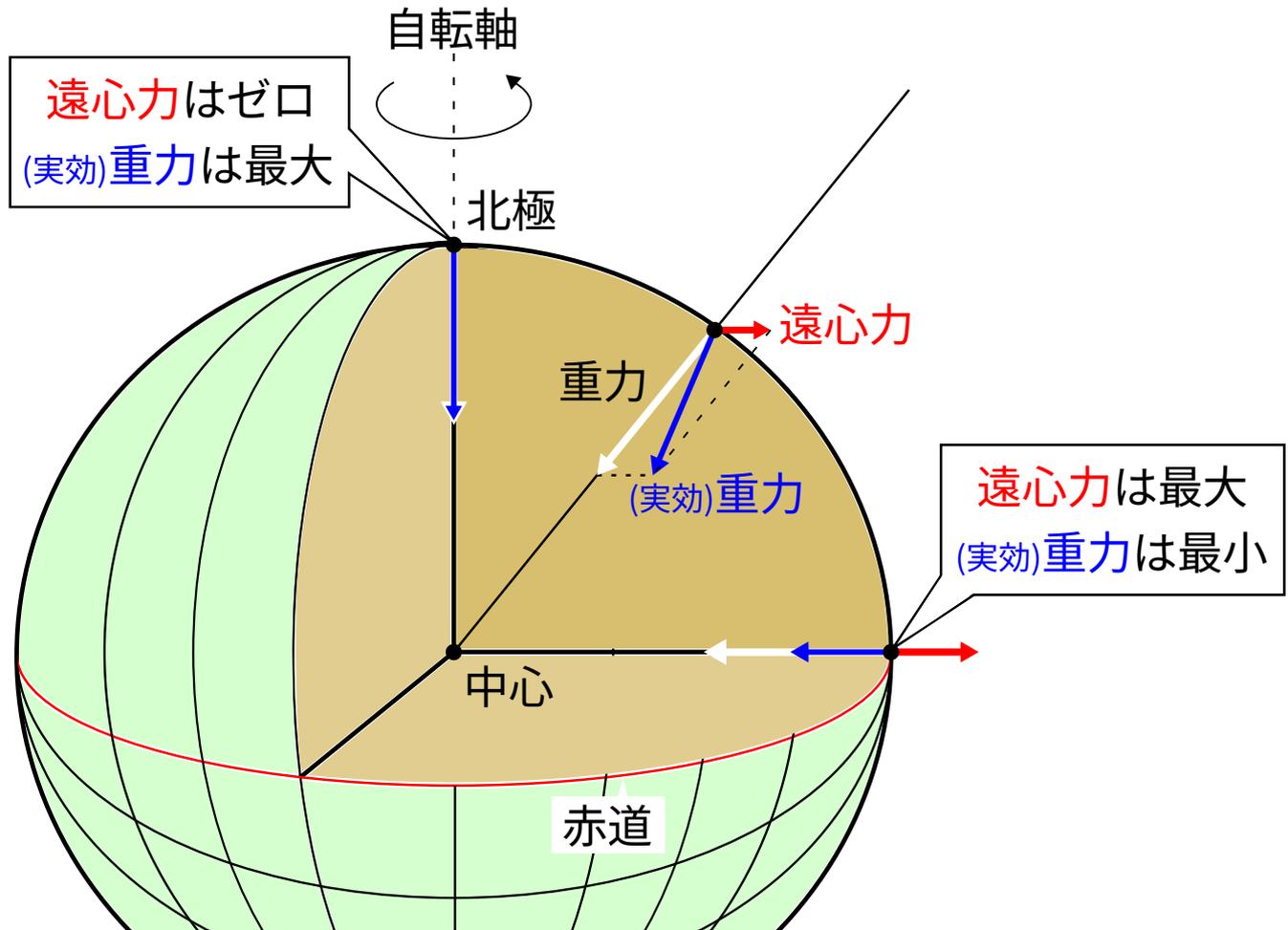
回転系において現れる力

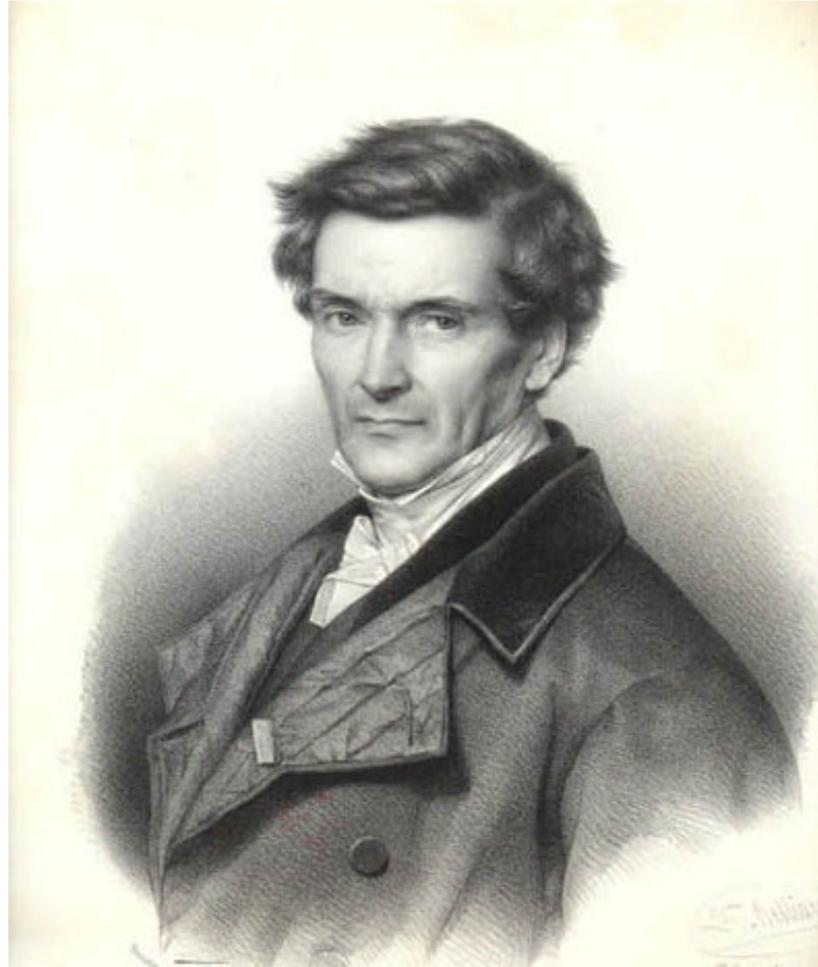


<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Globespin.gif>



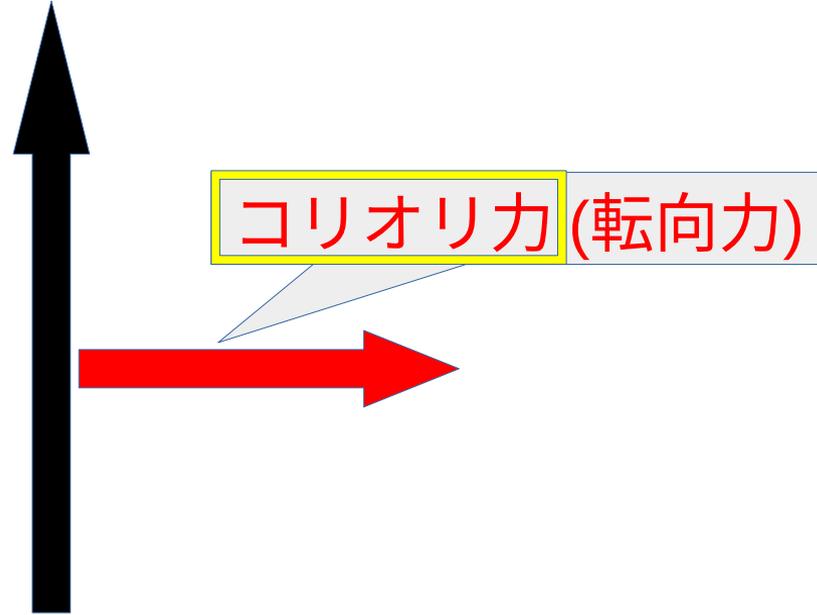
<https://www.yomiuriland.com/attraction/swinger/>





Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gaspard-Gustave_de_Coriolis.jpg



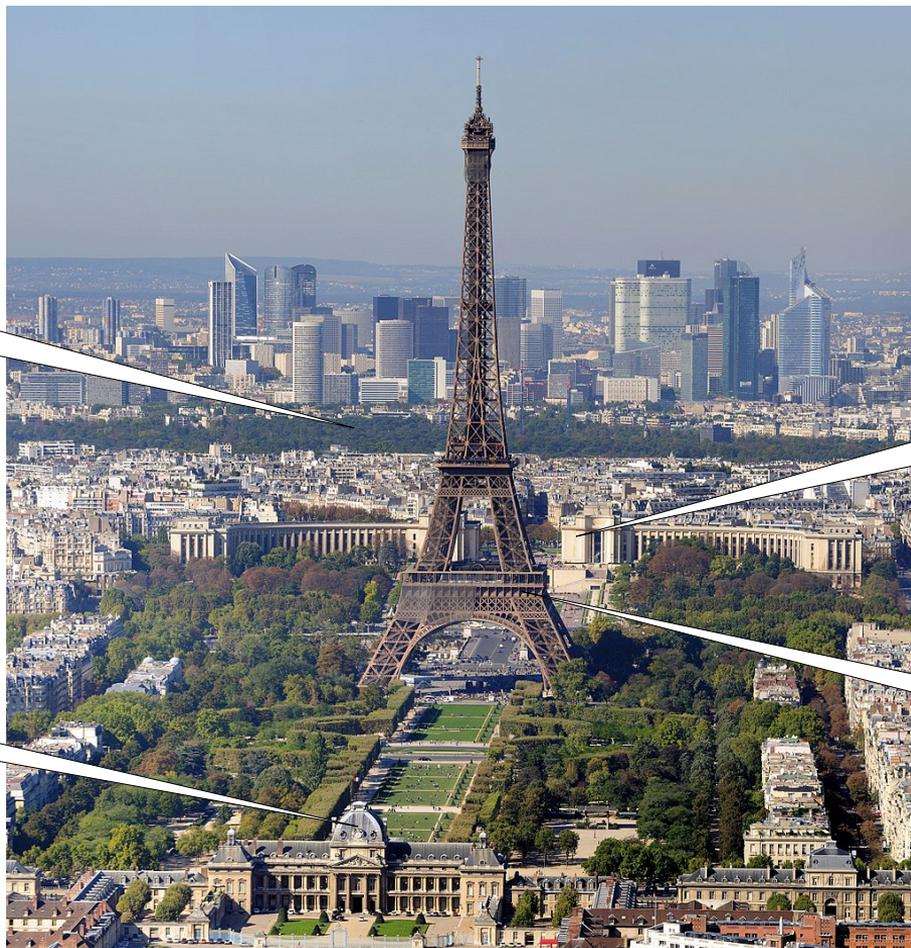
北半球では、物体の運動方向に対して
直角右向きに力が働く

ブローニュの森

旧陸軍士官学校

シャイヨー宮

エッフェル塔



Paris

Parisをパリと読むのなら



Coriolisはコリオリと読むのだろう



ところが実はCoriolisはコリオリスと読む



というわけでコリオリカは日本語である

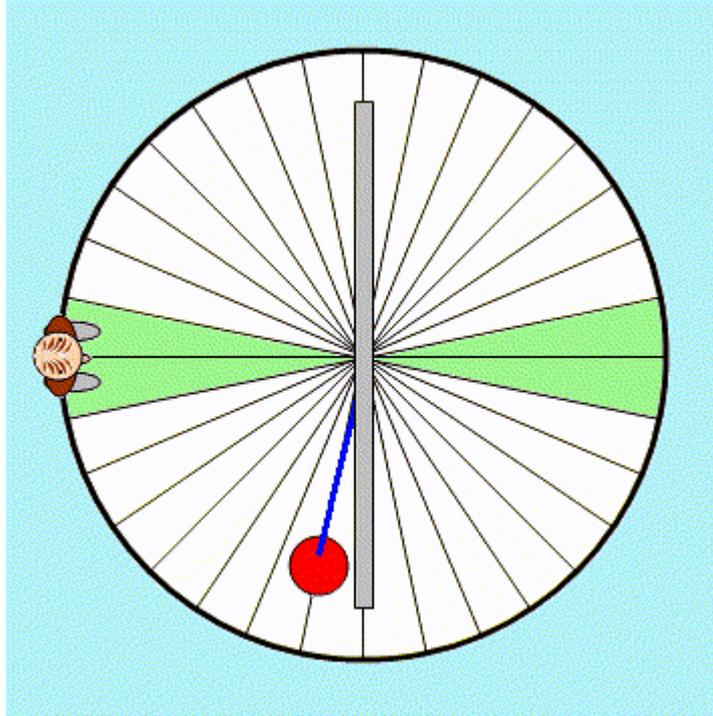
ところでコリオリ力は
日常生活では気付かないほど弱い力である

しかしながら長時間にわたって観察すれば
累積的な効果が現れるのではないか



Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foucault_portre_crop.jpg



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foucault-Wikipedia-3.gif>

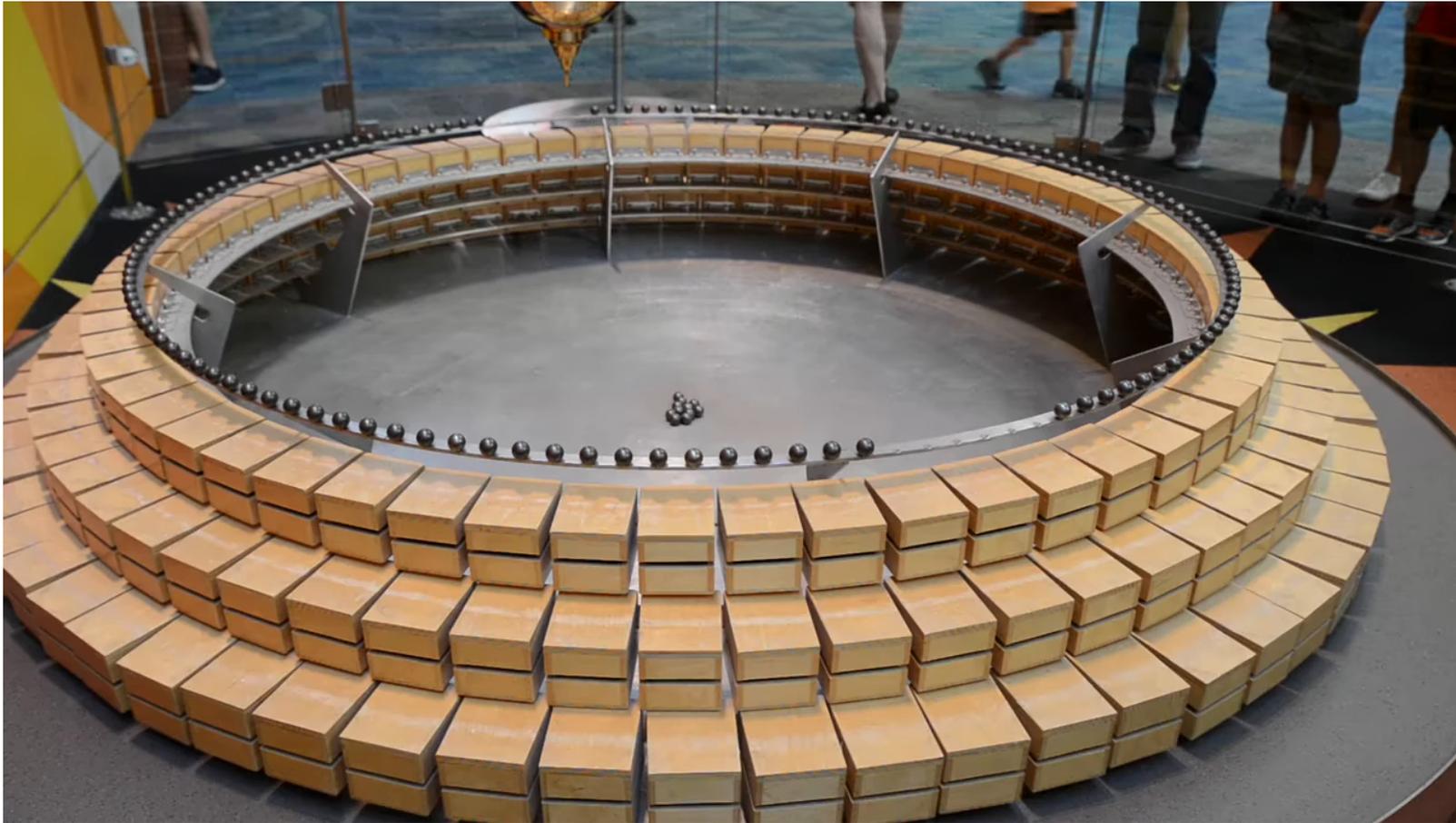


Le Panthéon

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panthéon_of_Paris_007.JPG



https://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_pendulum



https://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_pendulum



国立科学博物館（東京・上野）

<https://artplaza.geidai.ac.jp/sights/13570/>



国立科学博物館のフーコー振り子

By Momotarou2012 - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23521197>

振り子の振動方向が360度回転するのに要する時間

パリ（北緯49度）：約32時間

東京（北緯36度）：約41時間

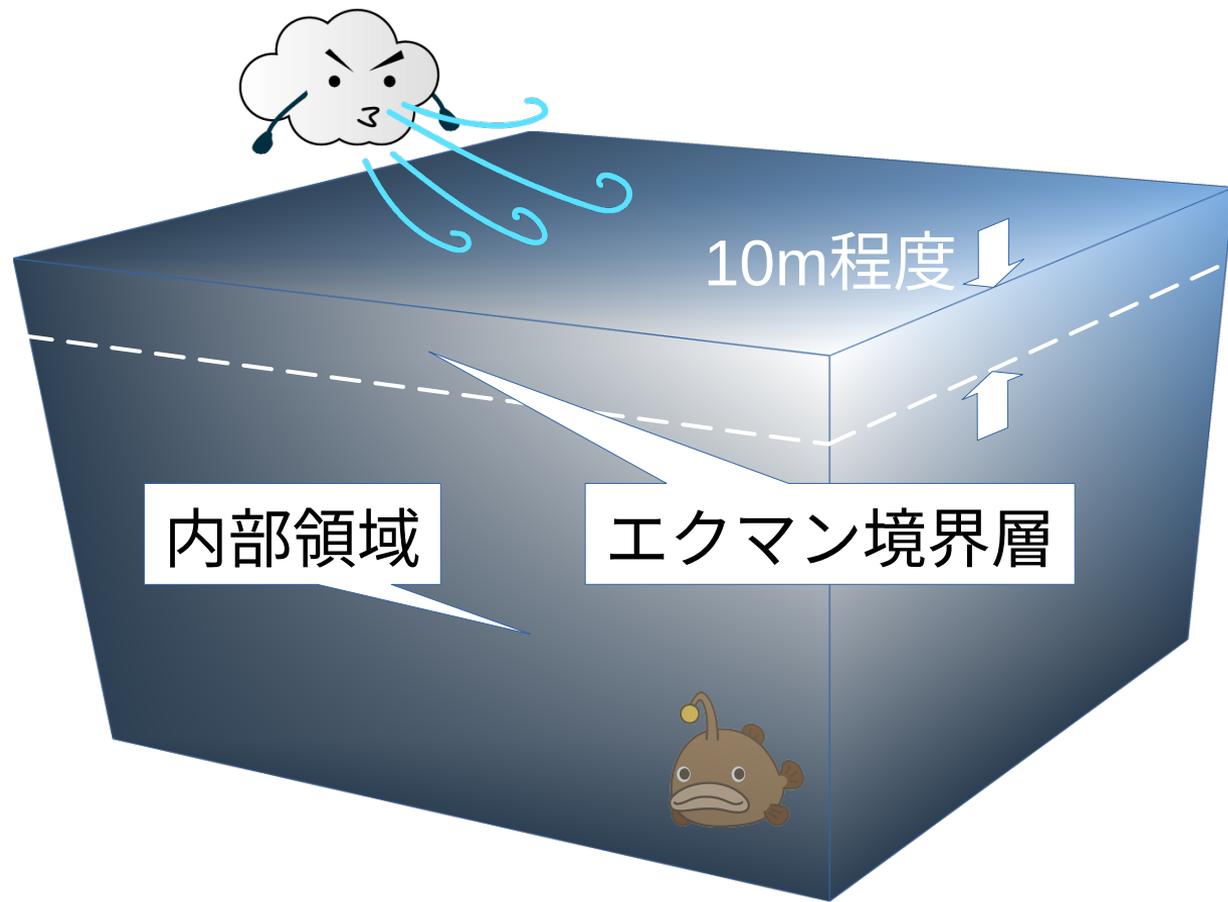


コリオリ力は高緯度ほど強く働く

北半球では、物体の運動方向に対して
直角右向きにコリオリ力が働く

コリオリ力は高緯度ほど強く働く

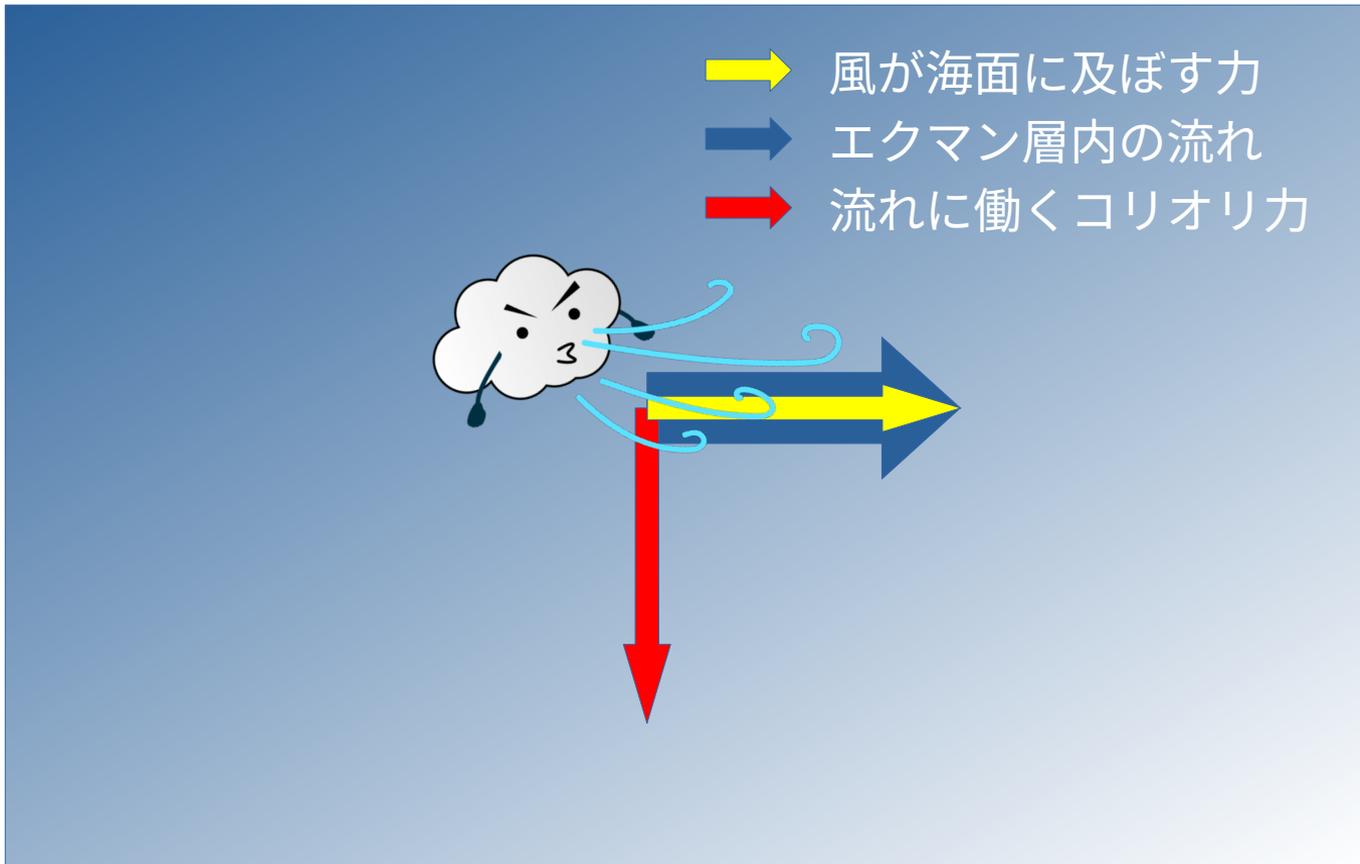
エクマン境界層とエクマン輸送



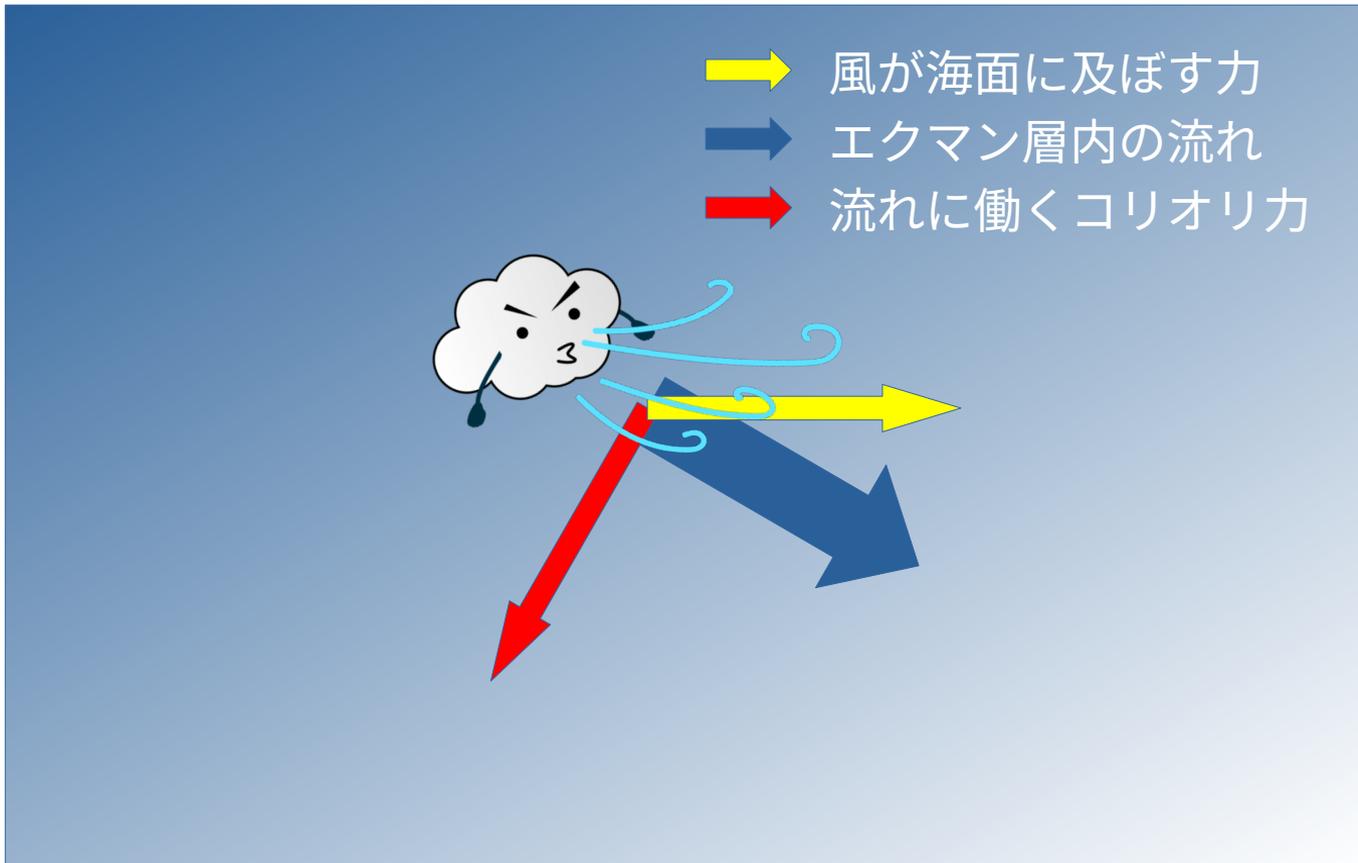


Vagn Walfrid Ekman (1874-1954)

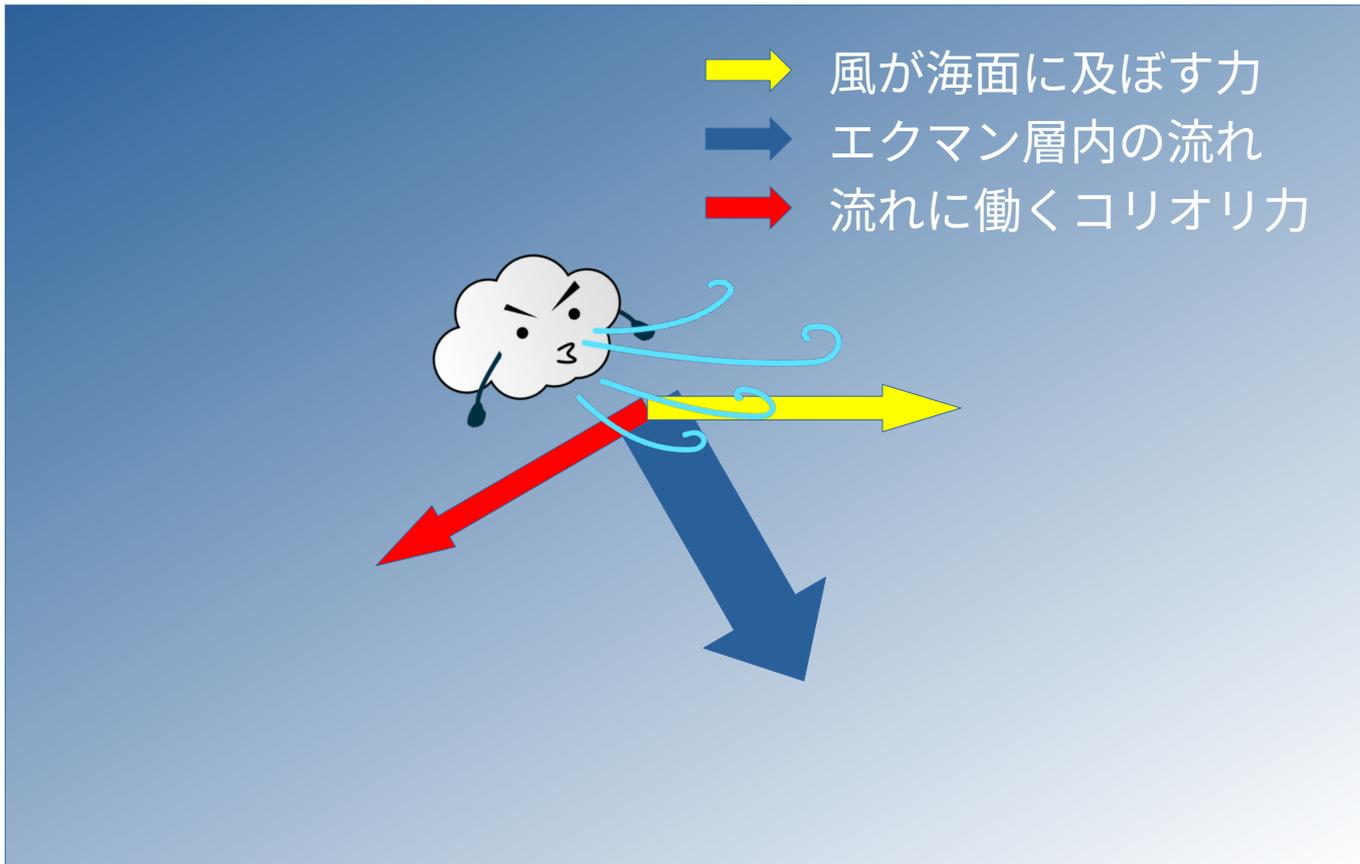
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ekman_Vagn.jpg



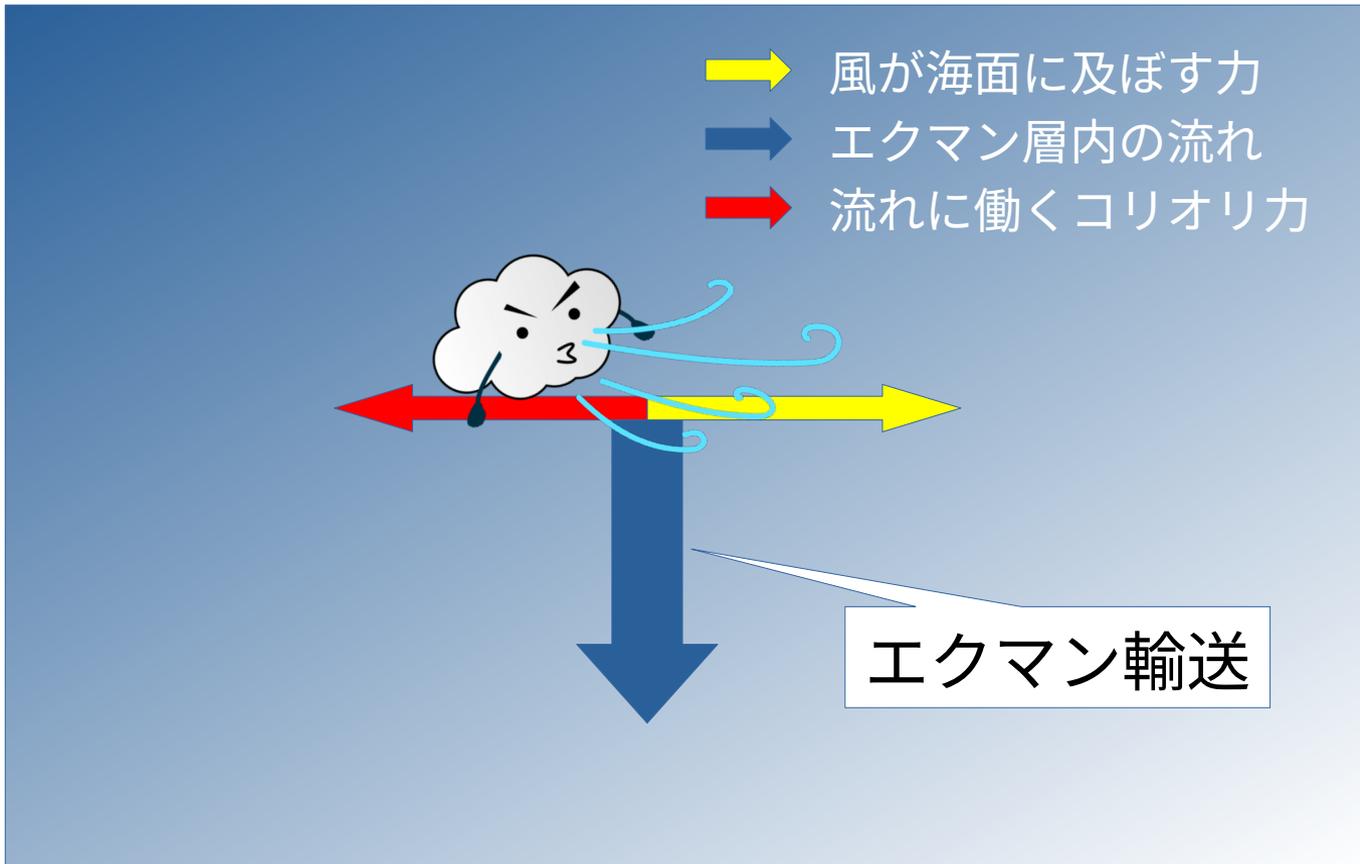
海面を上から見た図



海面を上から見た図



海面を上から見た図



海面を上から見た図

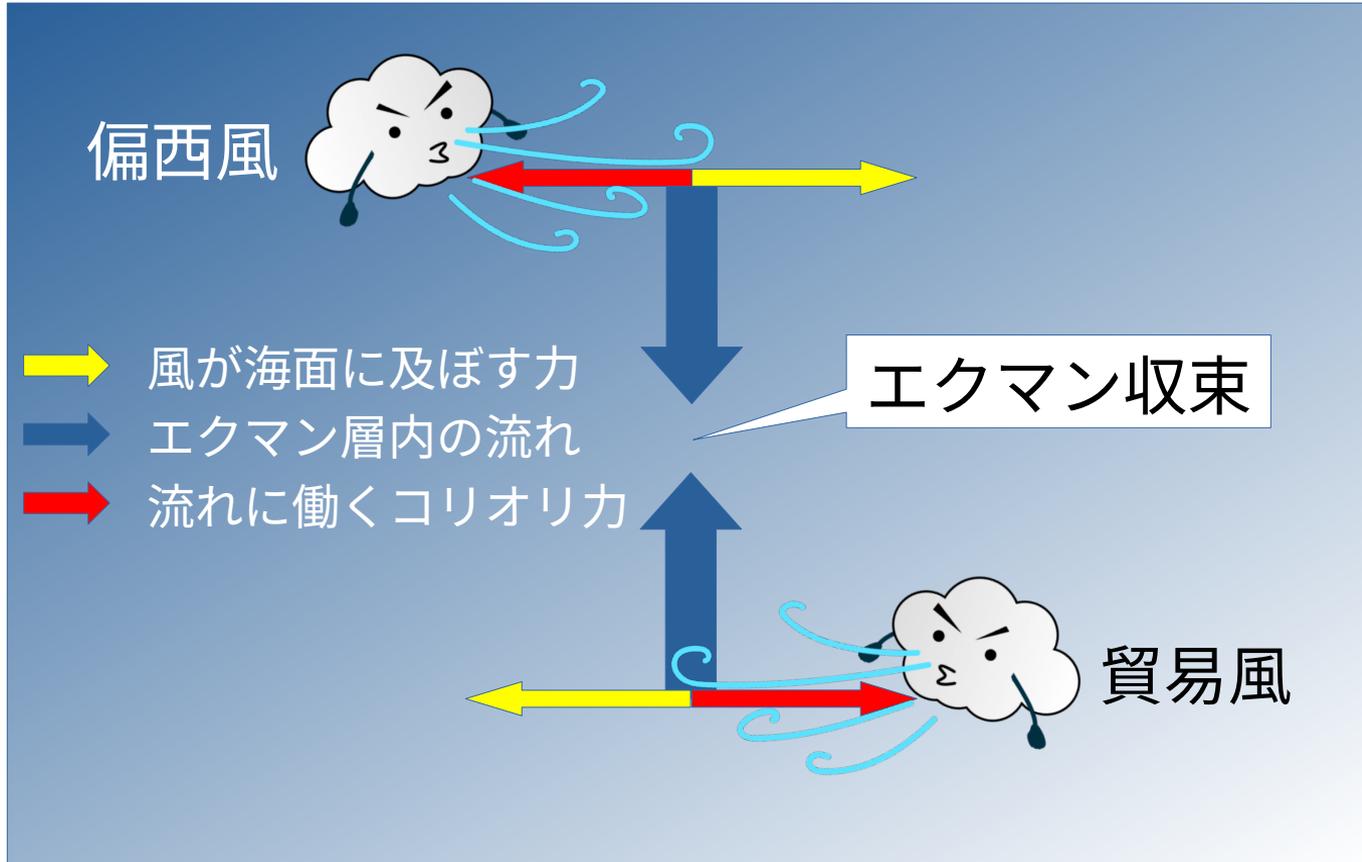
海面に風が吹くとき，その直接的な影響を受けるのは，海面から10m程度の厚さの
エクマン境界層である

恒常的に吹く風により

この層内に生じる正味の流れは
風の向きに対して直角右向きとなる

この流れによる海水の輸送を
エクマン輸送と呼ぶ

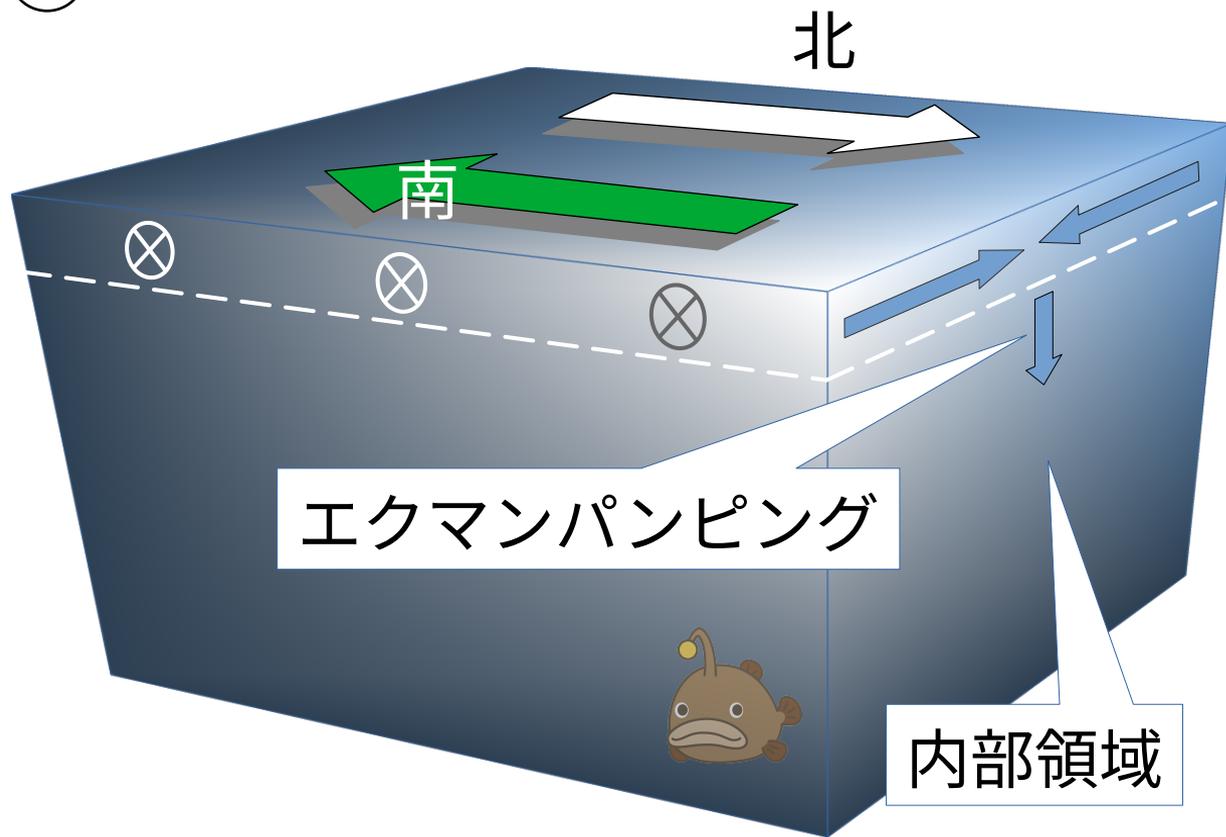
エクマン収束とエクマンパンピング



海面を上から見た図



⊗ 画面の奥に向かう流れ



北太平洋の中緯度には東向きの偏西風が
低緯度には西向きの貿易風が吹いている

偏西風帯では南向き，貿易風帯では北向き
のエクマン輸送が生じる

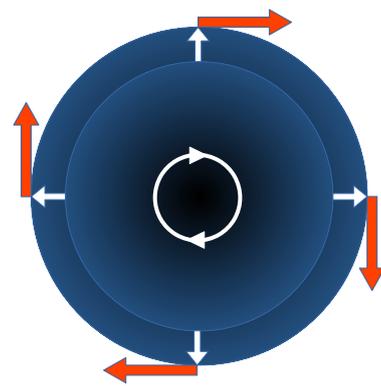
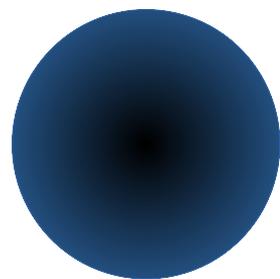
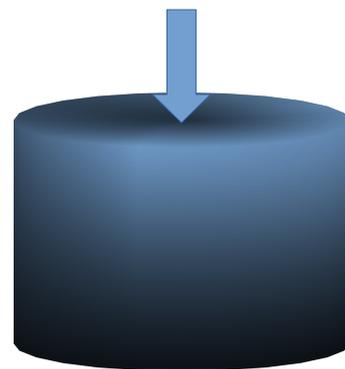
これらのエクマン輸送は
偏西風帯と貿易風帯の境で収束し
海洋内部領域へと流出する

この海洋内部領域への海水の流出を
エクマンポンピングと呼ぶ



海洋内部領域での循環の生成

上面图



海水を上から押し潰すと
海水は外向きに流れ出す

この流れに直角右向きにコリオリ力が働く

その結果、時計回りの循環が発生する



⊗ 内部領域に向かうエクマンポンピング

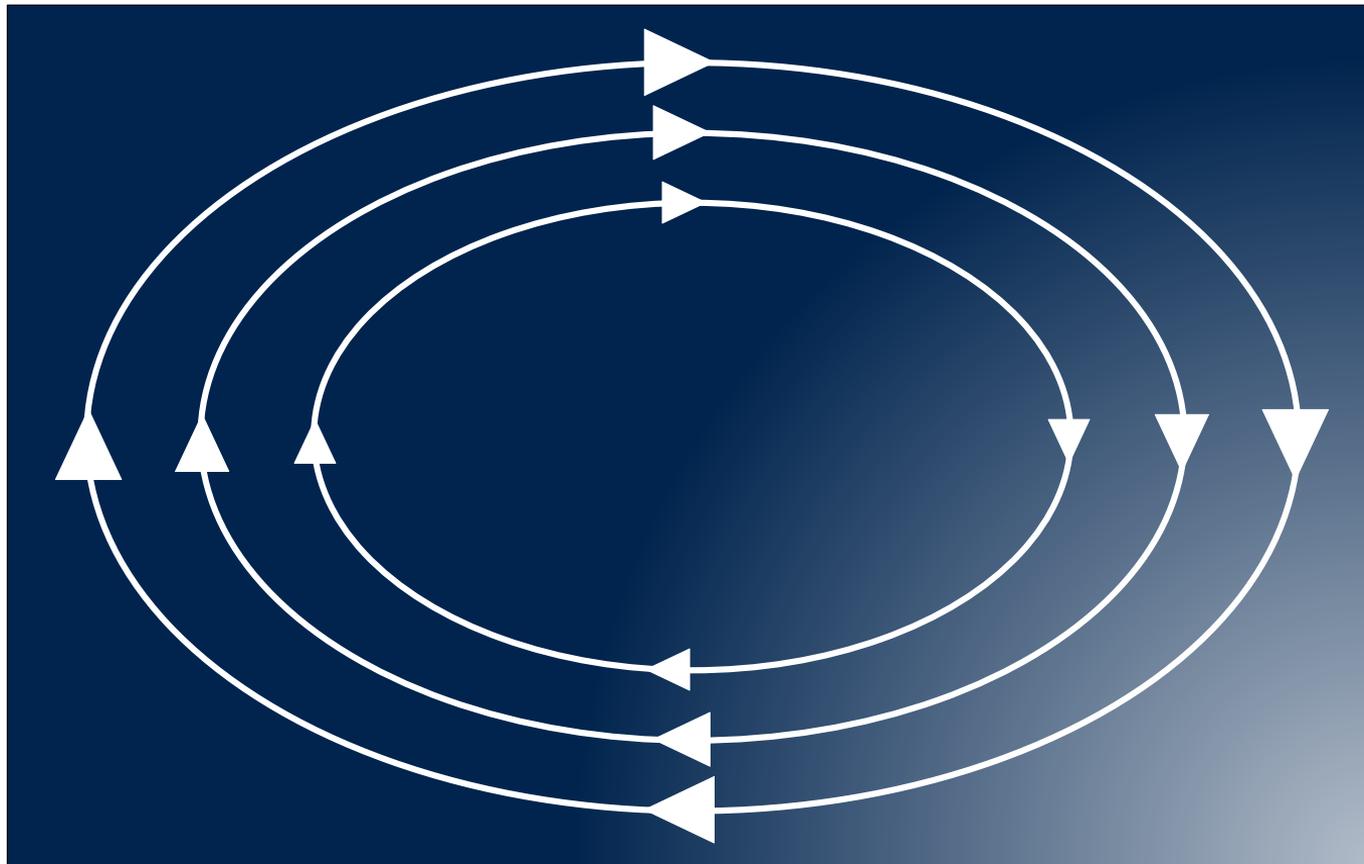


海洋内部領域を上から見た図

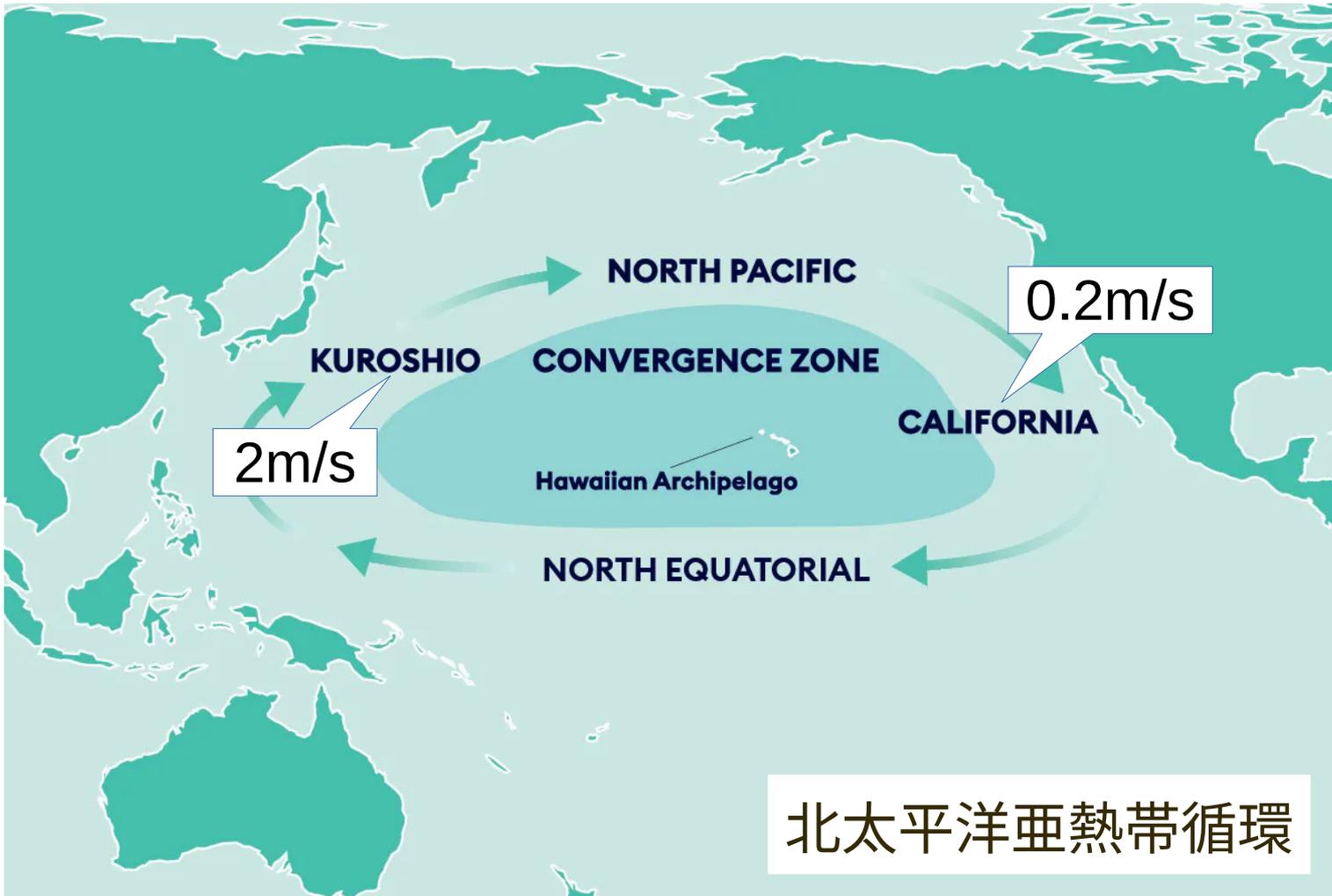
エクマン境界層下の海洋内部領域の海水は
エクマンポンピングに押し潰されて外向きに広がる



これに伴って生じる流れに働くコリオリ力により
内部領域には時計回りの循環
すなわち亜熱帯循環が生成される



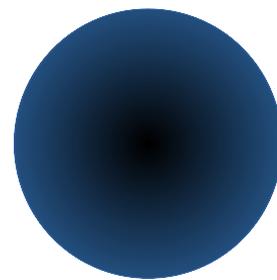
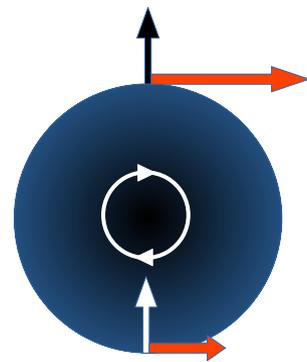
海洋内部領域を上から見た図



惑星ベータ効果と惑星ロスビー波

コリオリ力は高緯度ほど強く働く

この事実を惑星ベータ効果と呼ぶ

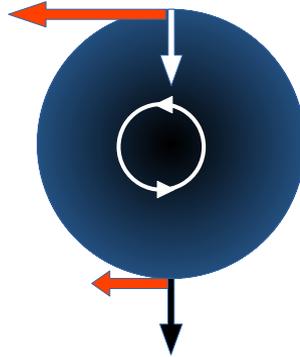
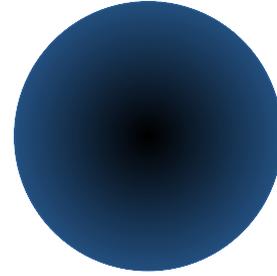


上面图

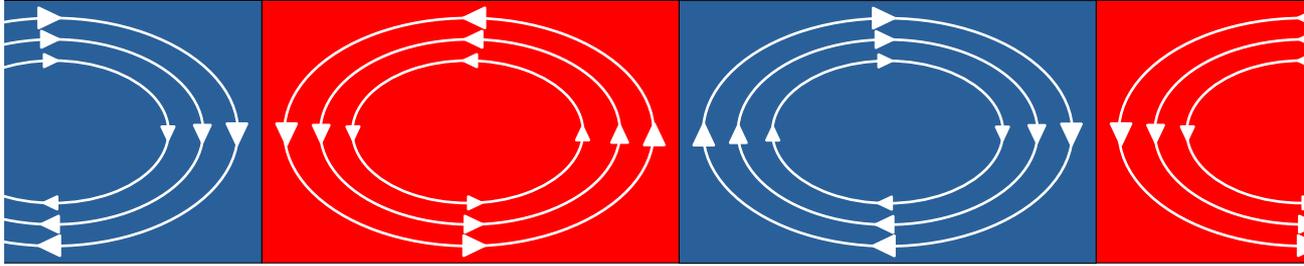
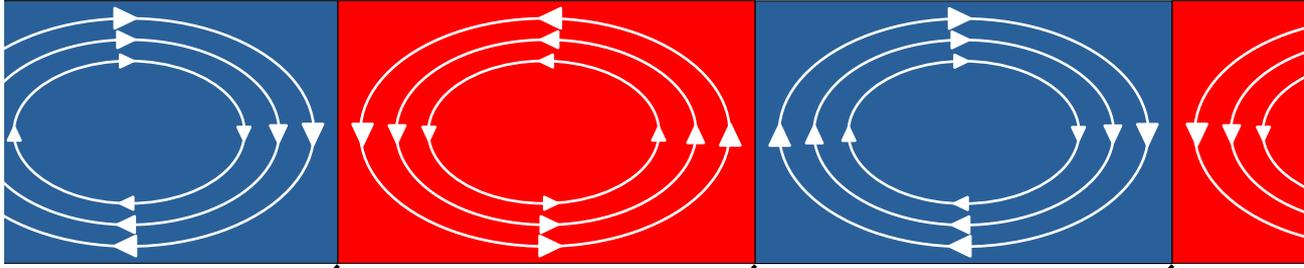
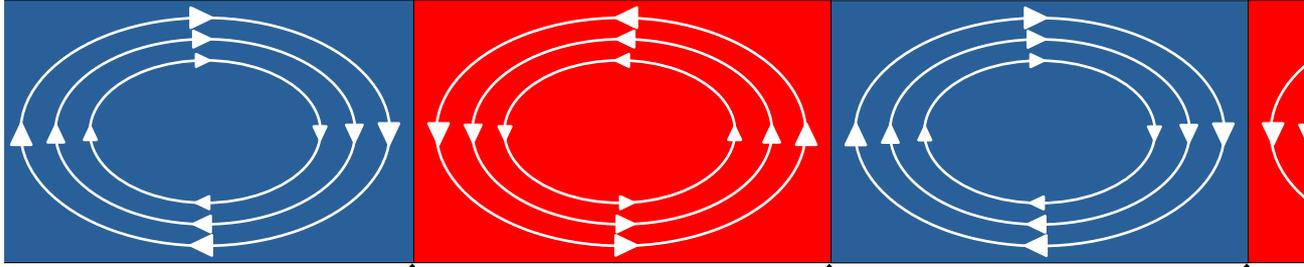
海水が北上すると惑星ベータ効果により
時計回りの循環が発生する



上面図



海水が南下すると惑星ベータ効果により
反時計回りの循環が発生する



惑星ベータ効果により
循環パターンが西向きに移動する現象が発生する

この現象は惑星ロスビー波と呼ばれる

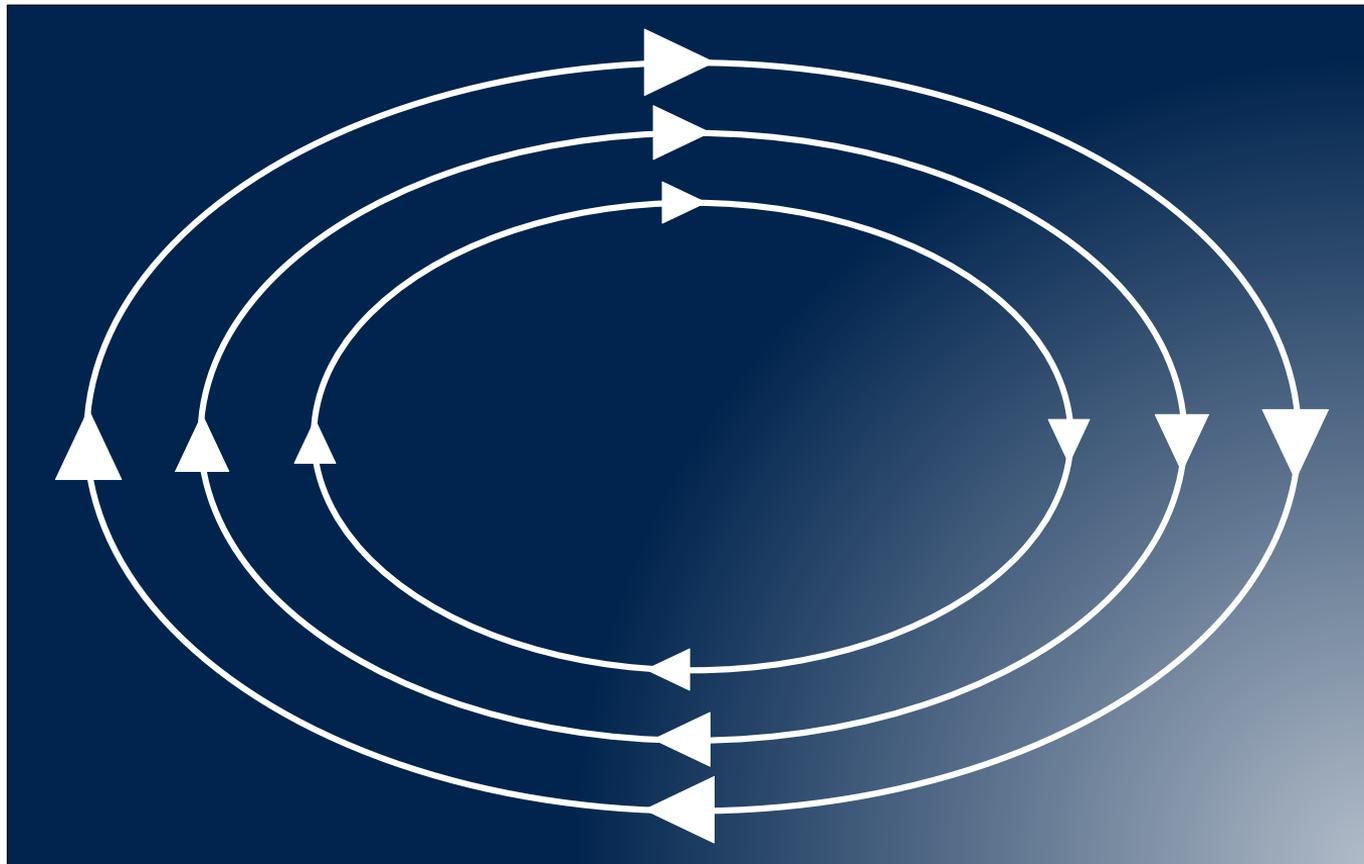


Carl-Gustaf Arvid Rossby (1898-1957)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carl_G._A._Rossby_LCCN2016875745_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carl_G._A._Rossby_LCCN2016875745_(cropped).jpg)

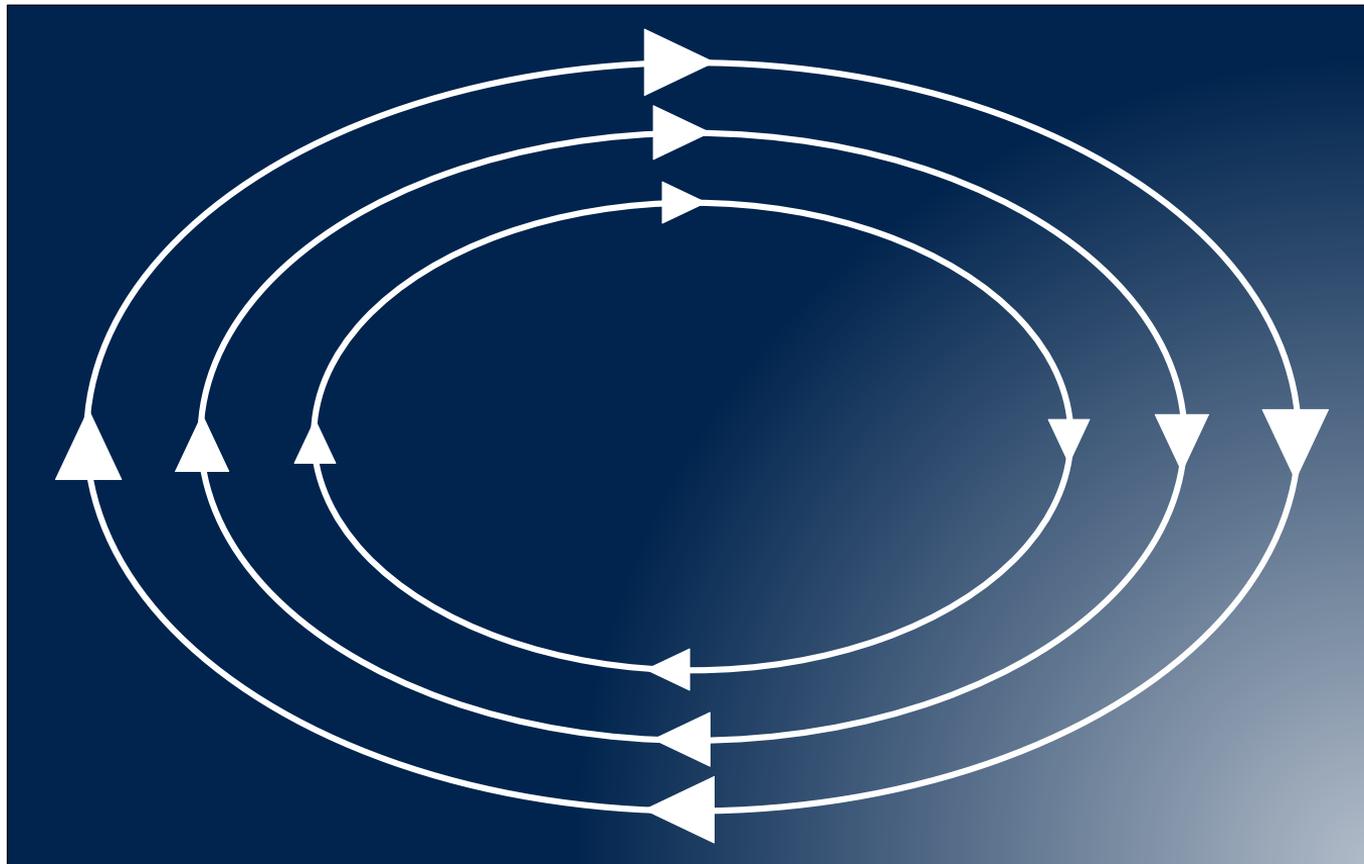
西岸強化

そもそも亜熱帯循環は
エクマン境界層下の海洋内部領域に生成された
時計回りの循環パターンであった

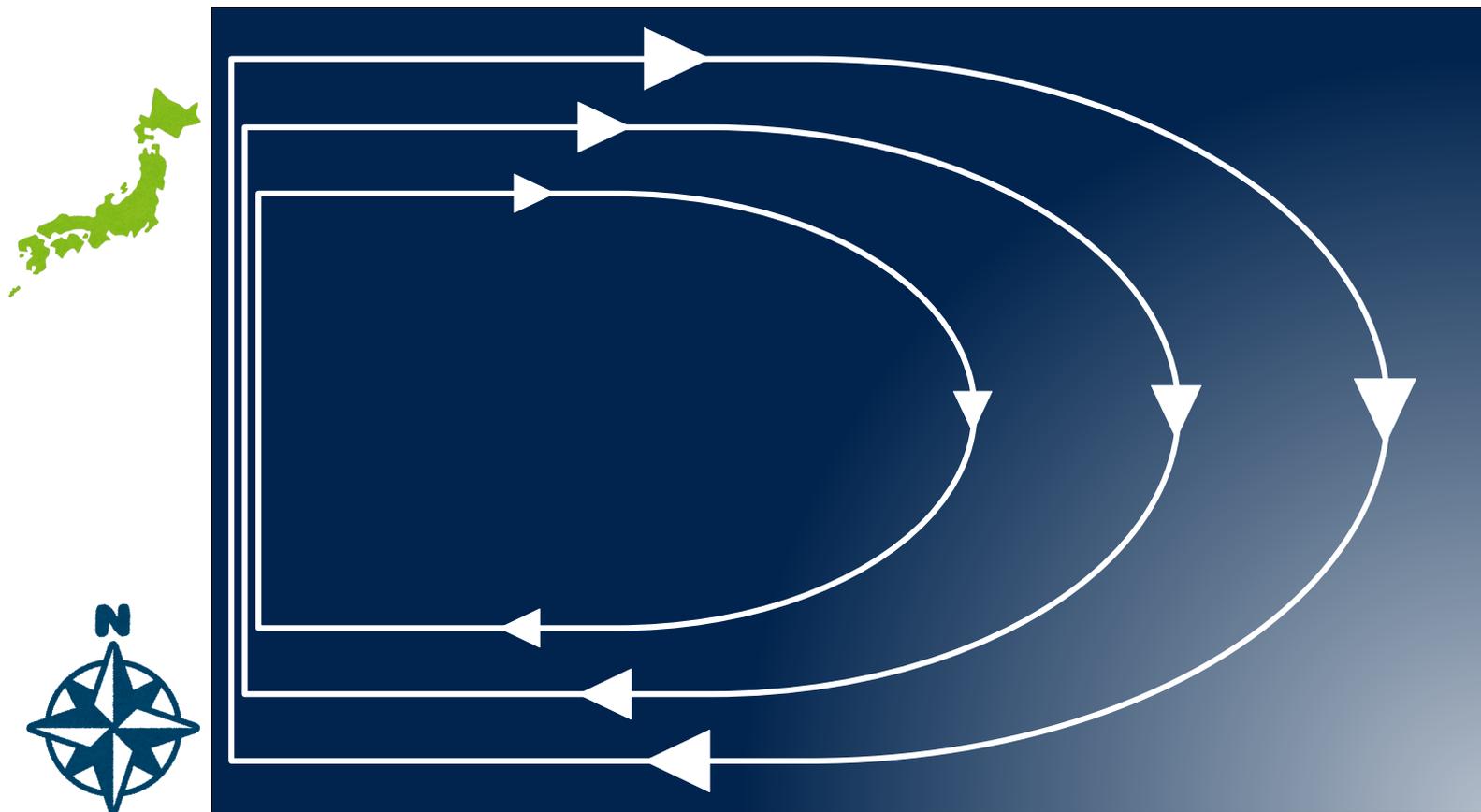


海洋内部領域を上から見た図

この循環パターンは惑星ロスビー波として
西向きに移動し海洋西岸に押し付けられる

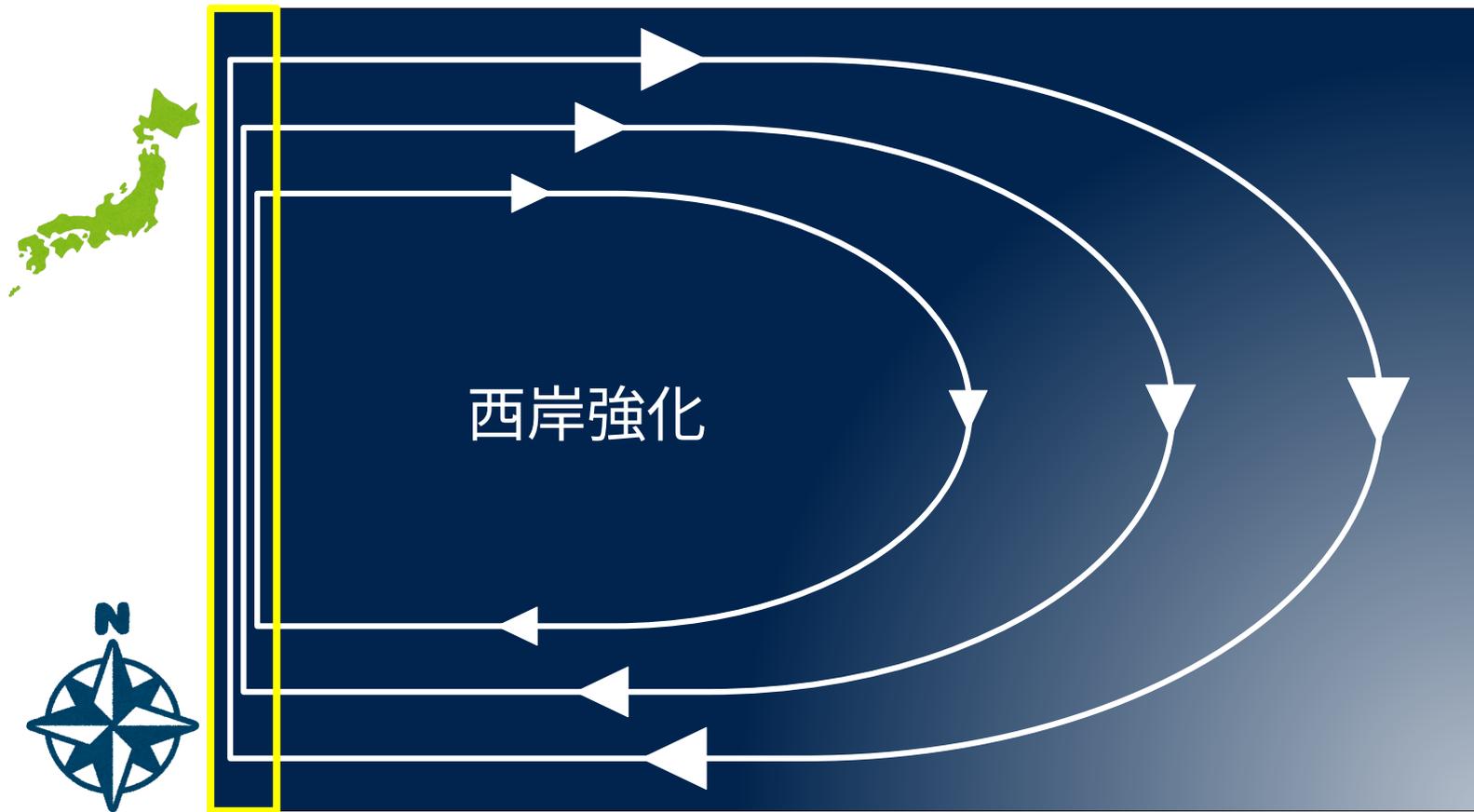


海洋内部領域を上から見た図



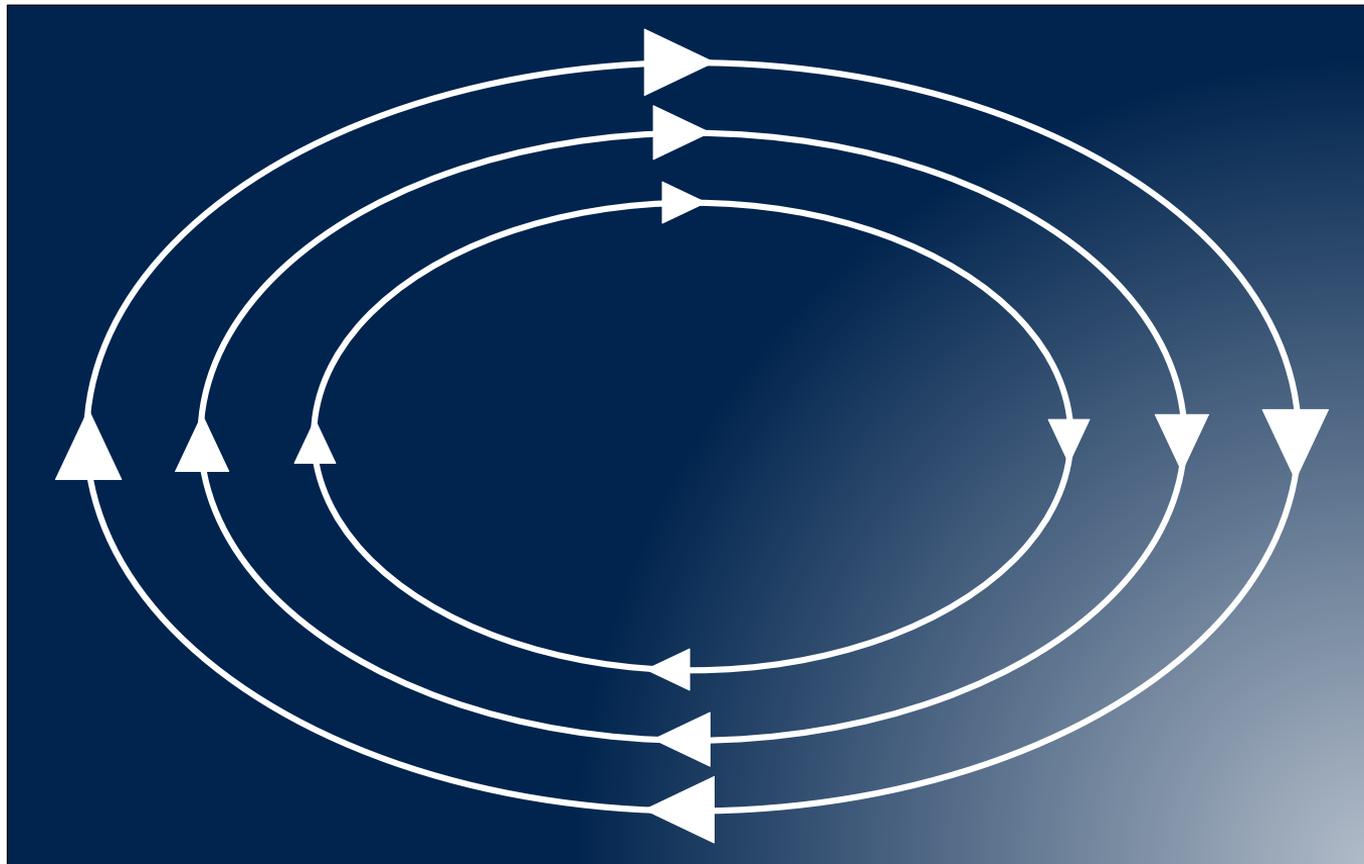
海洋内部領域を上から見た図

その結果，海洋西岸には強い流れが現れる

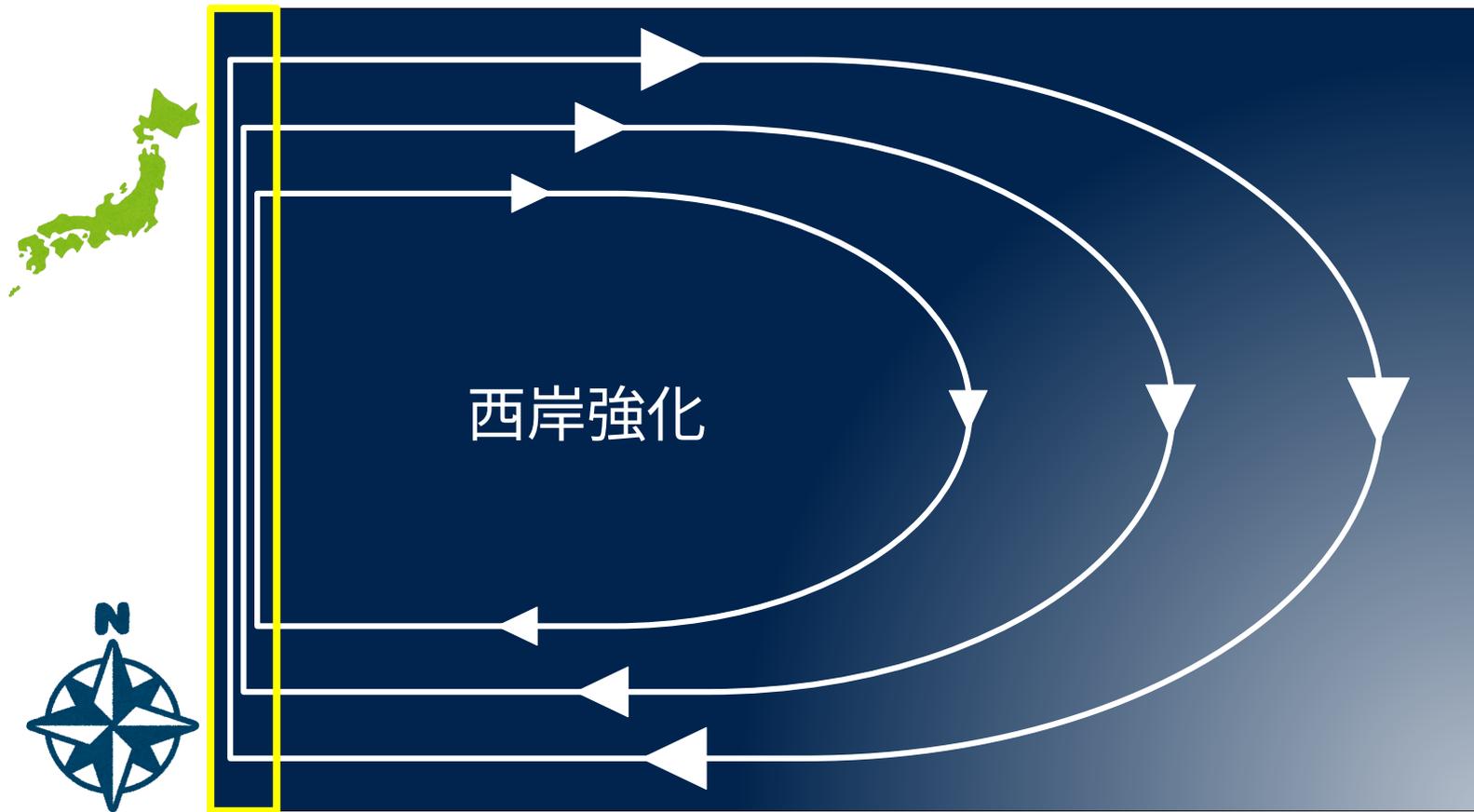


海洋内部領域を上から見た図

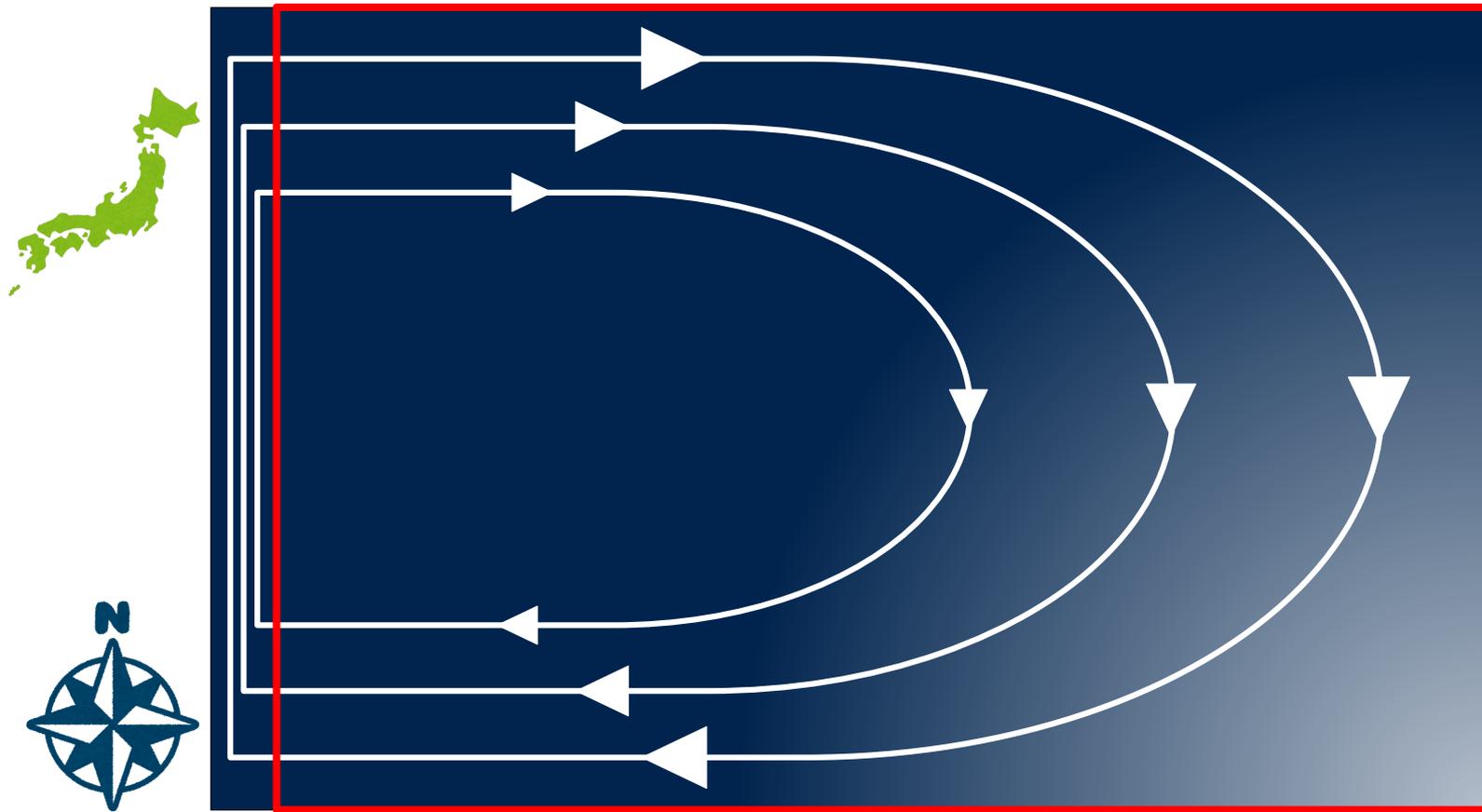
まとめると



海洋内部領域を上から見た図



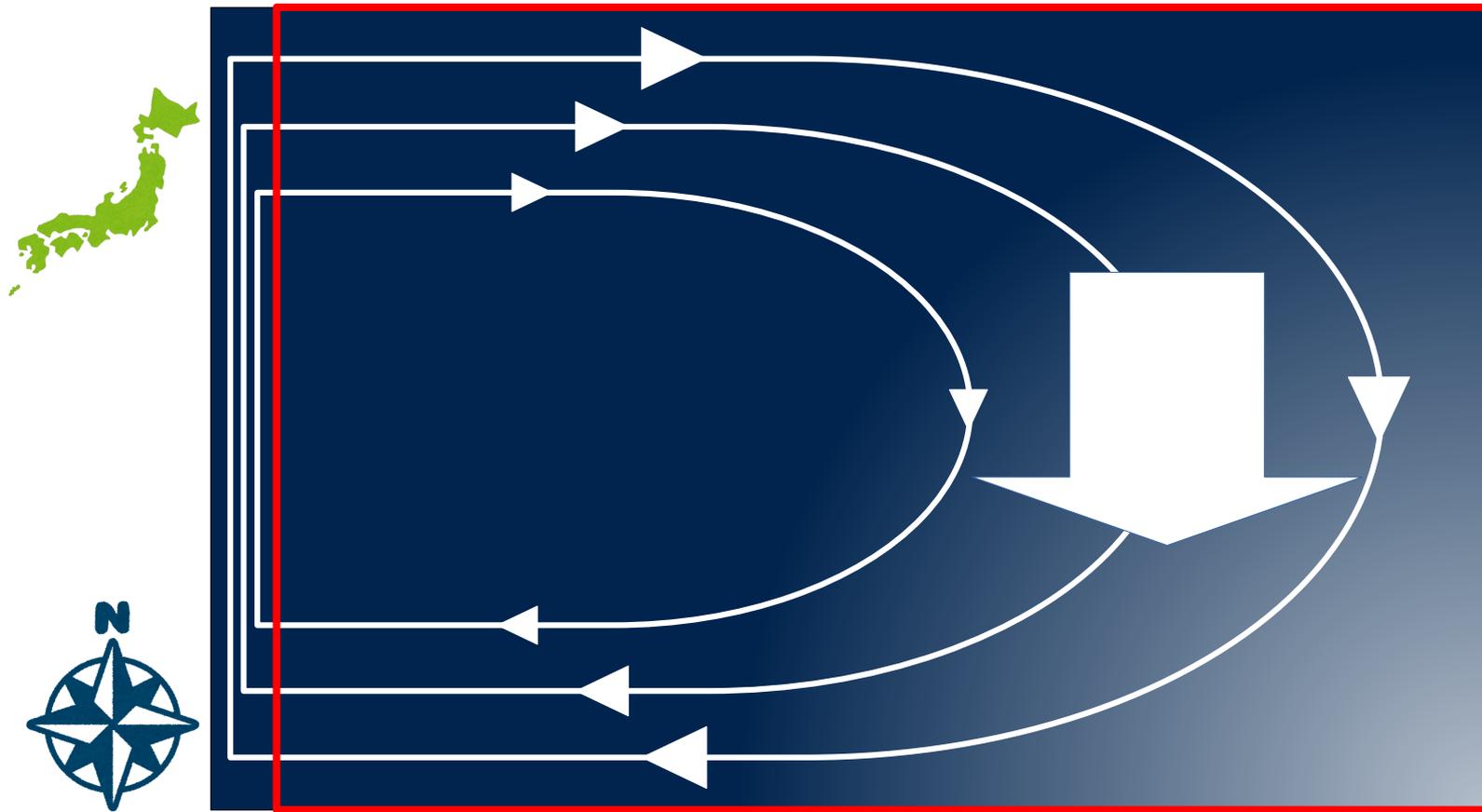
海洋内部領域を上から見た図



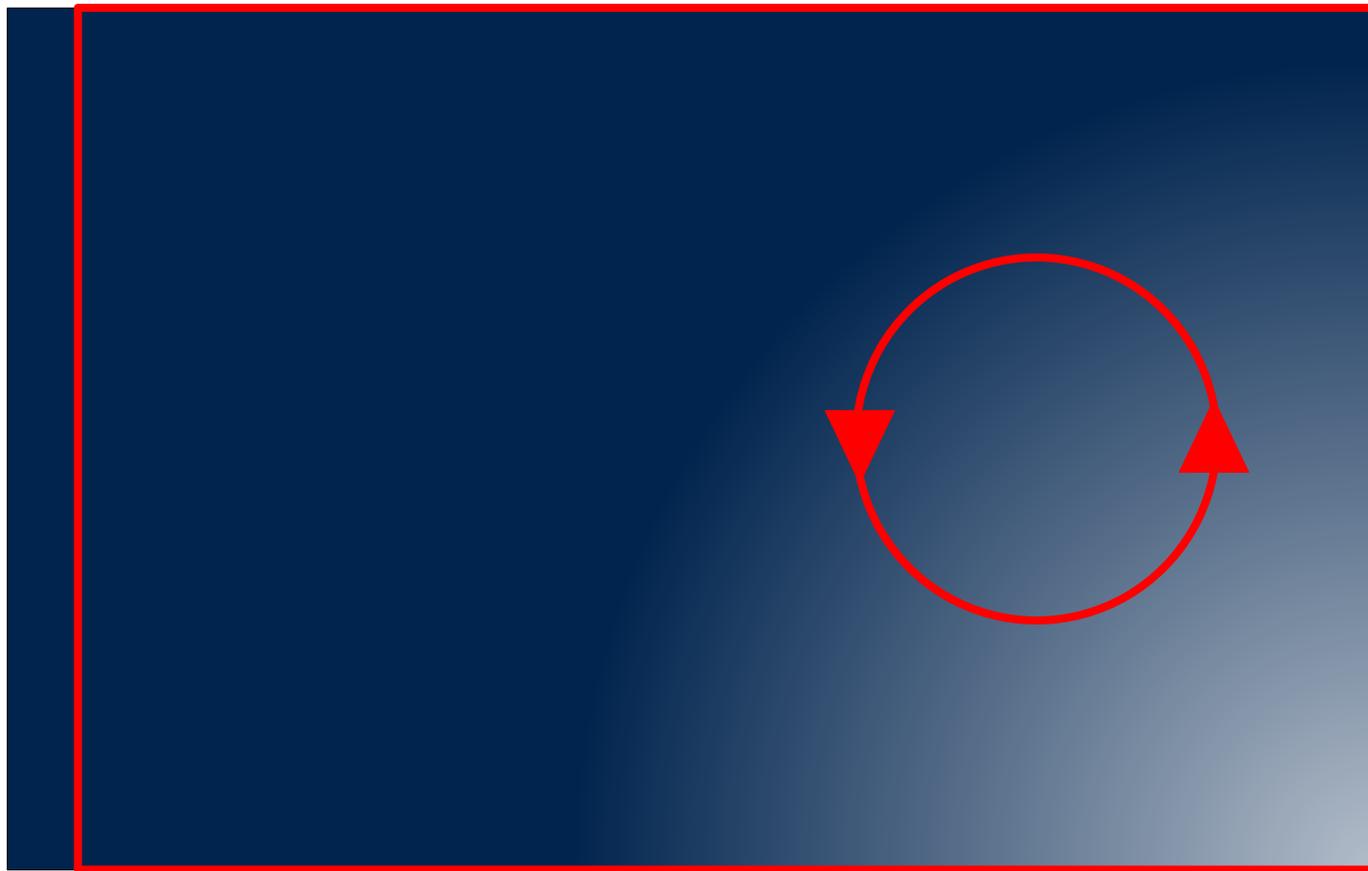
海洋内部領域を上から見た図

スベルドラップ平衡と西岸境界流

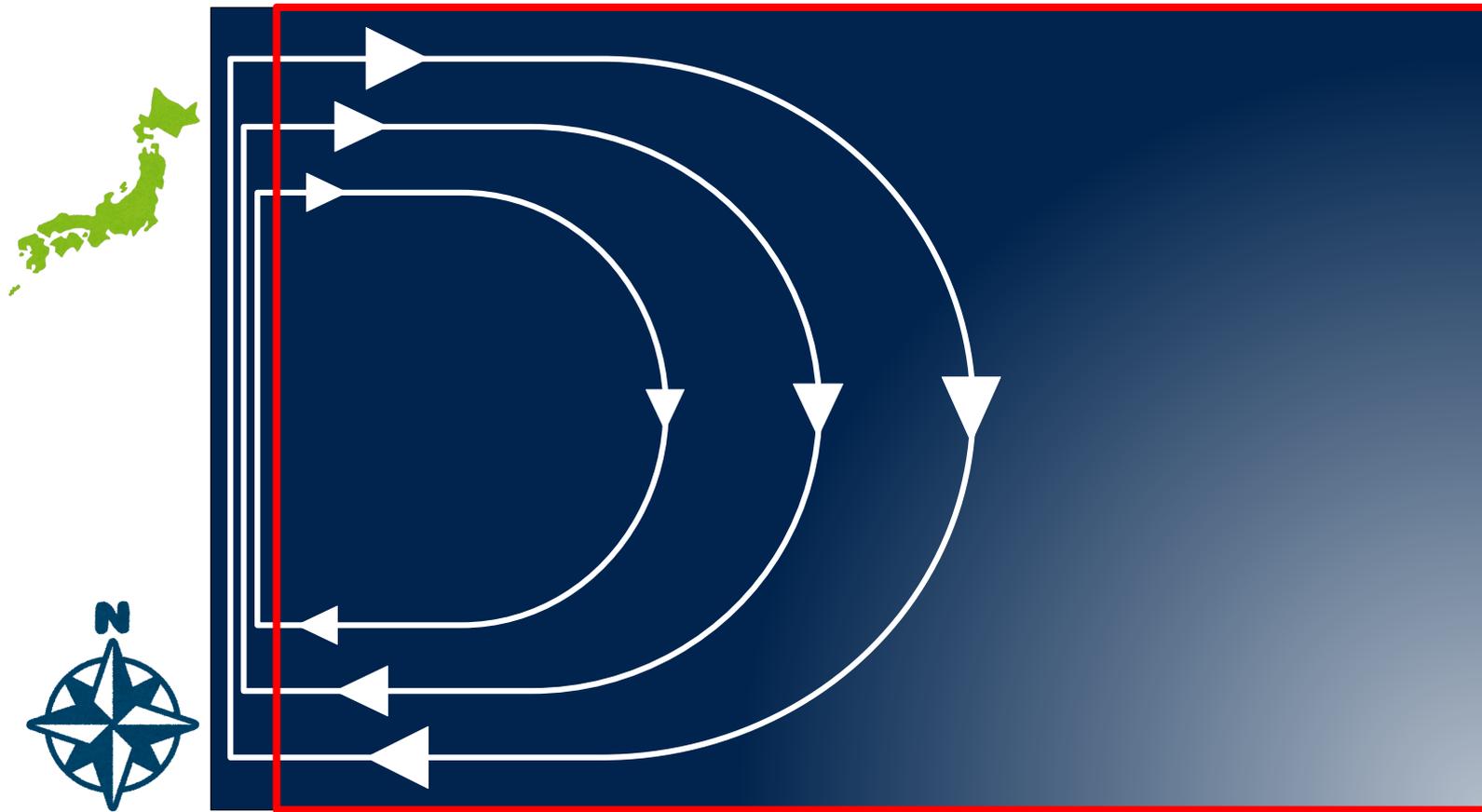
海洋西岸を除く領域では
南下する海水が
反時計回りの循環を生成しようとする働きと
エクマンポンピングが
時計回りの循環を生成しようとする働きと
が釣り合って平衡状態に達している



海洋内部領域を上から見た図



海洋内部領域を上から見た図



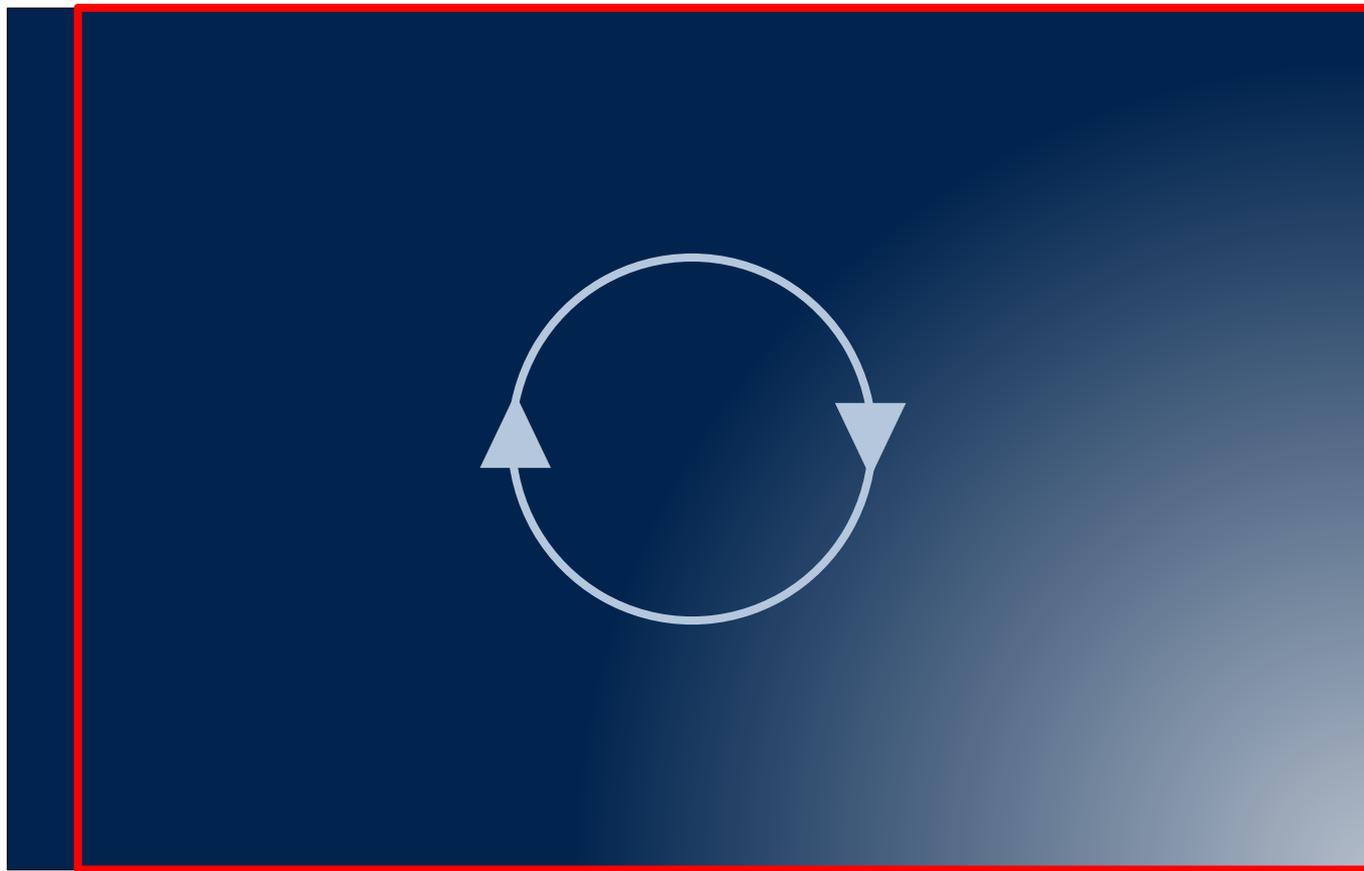
海洋内部領域を上から見た図



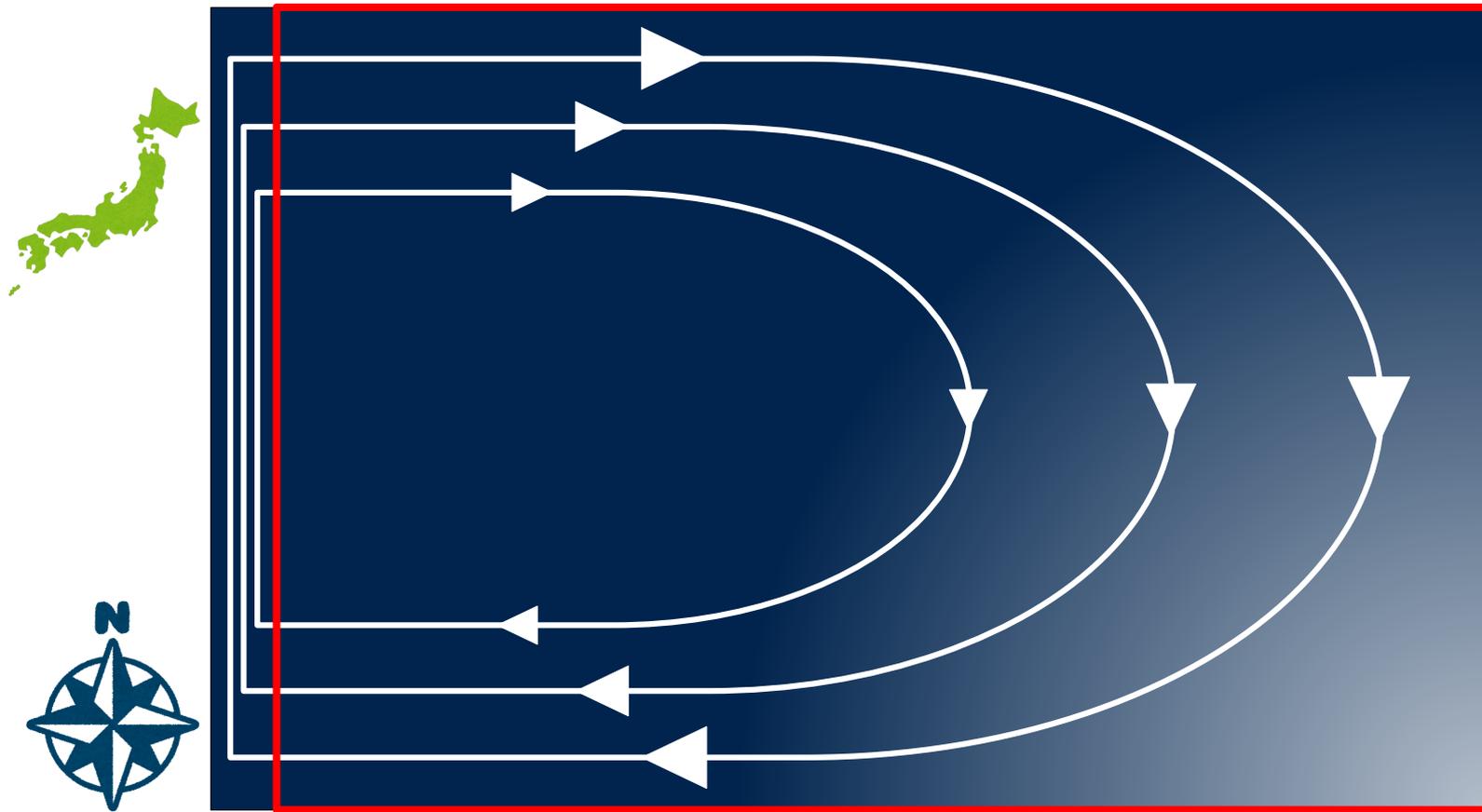
⊗ エクマンパンピング



海洋内部領域を上から見た図

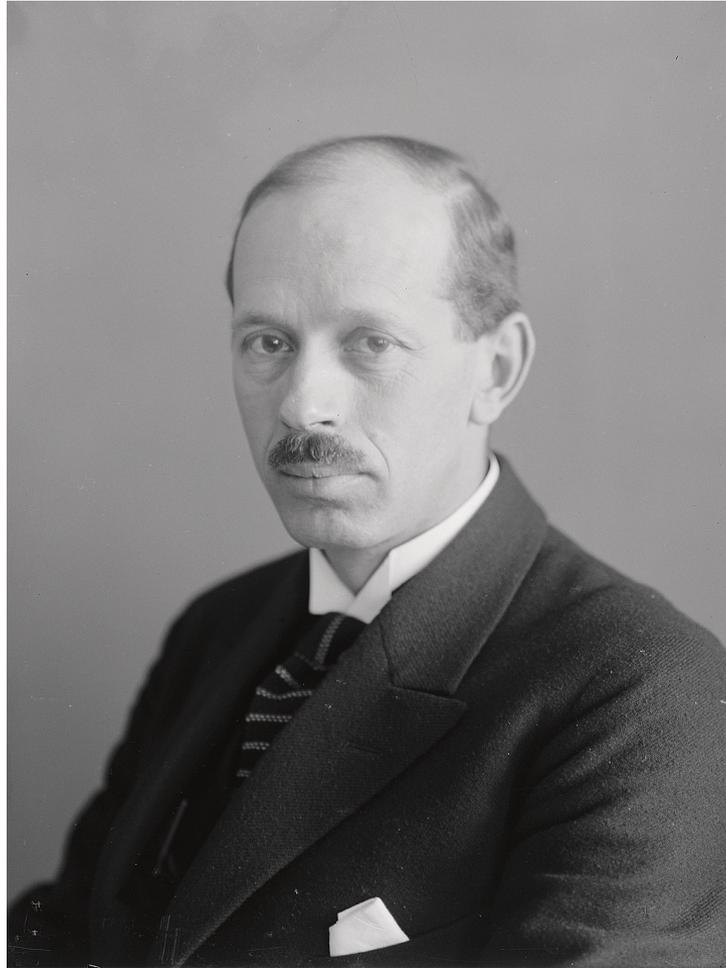


海洋内部領域を上から見た図



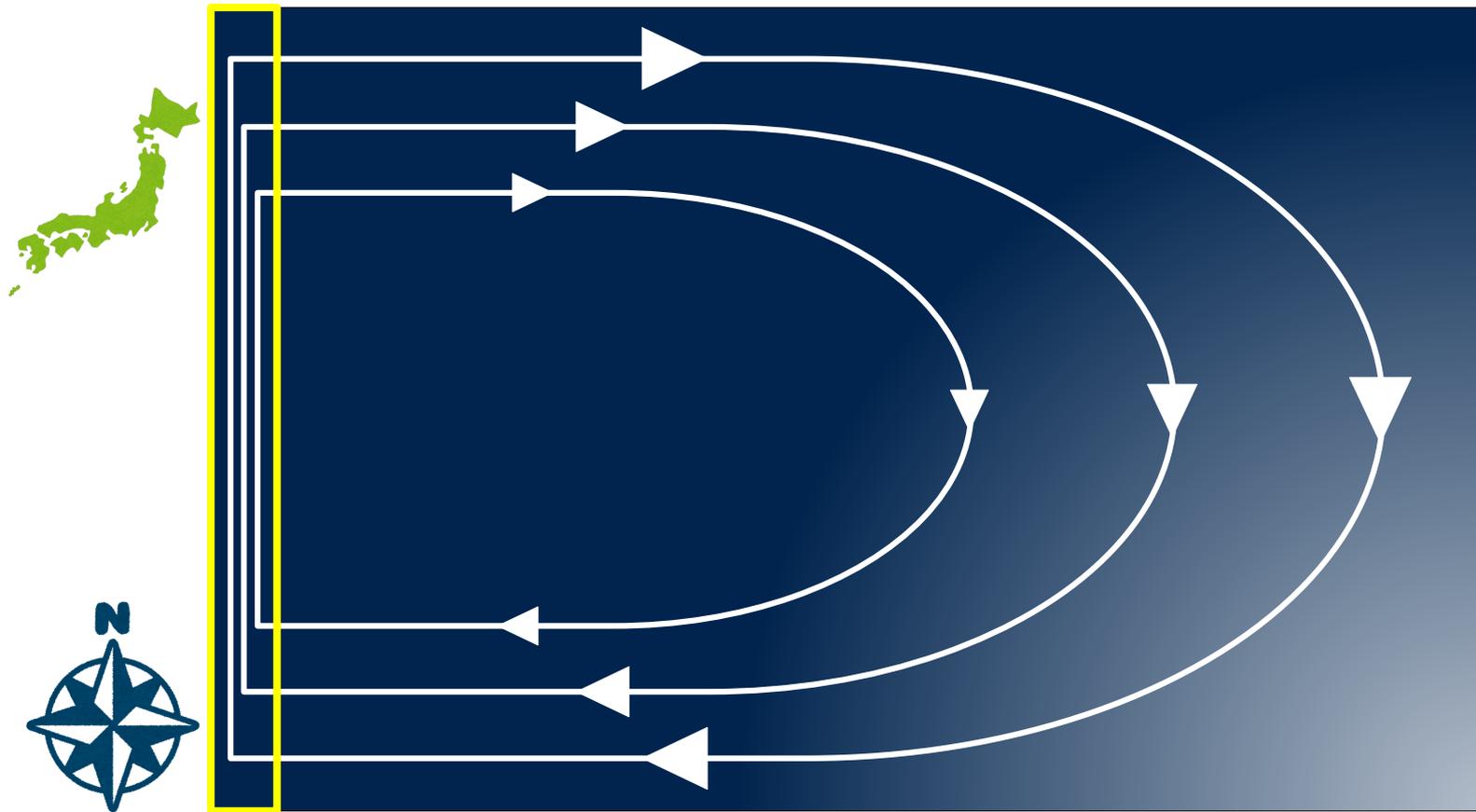
海洋内部領域を上から見た図

南下する海水が反時計回りの循環を生成しようとする働きと
エクマンポンピングが時計回りの循環を生成しようとする働きと
の釣り合いをスベルドラップ平衡と呼ぶ



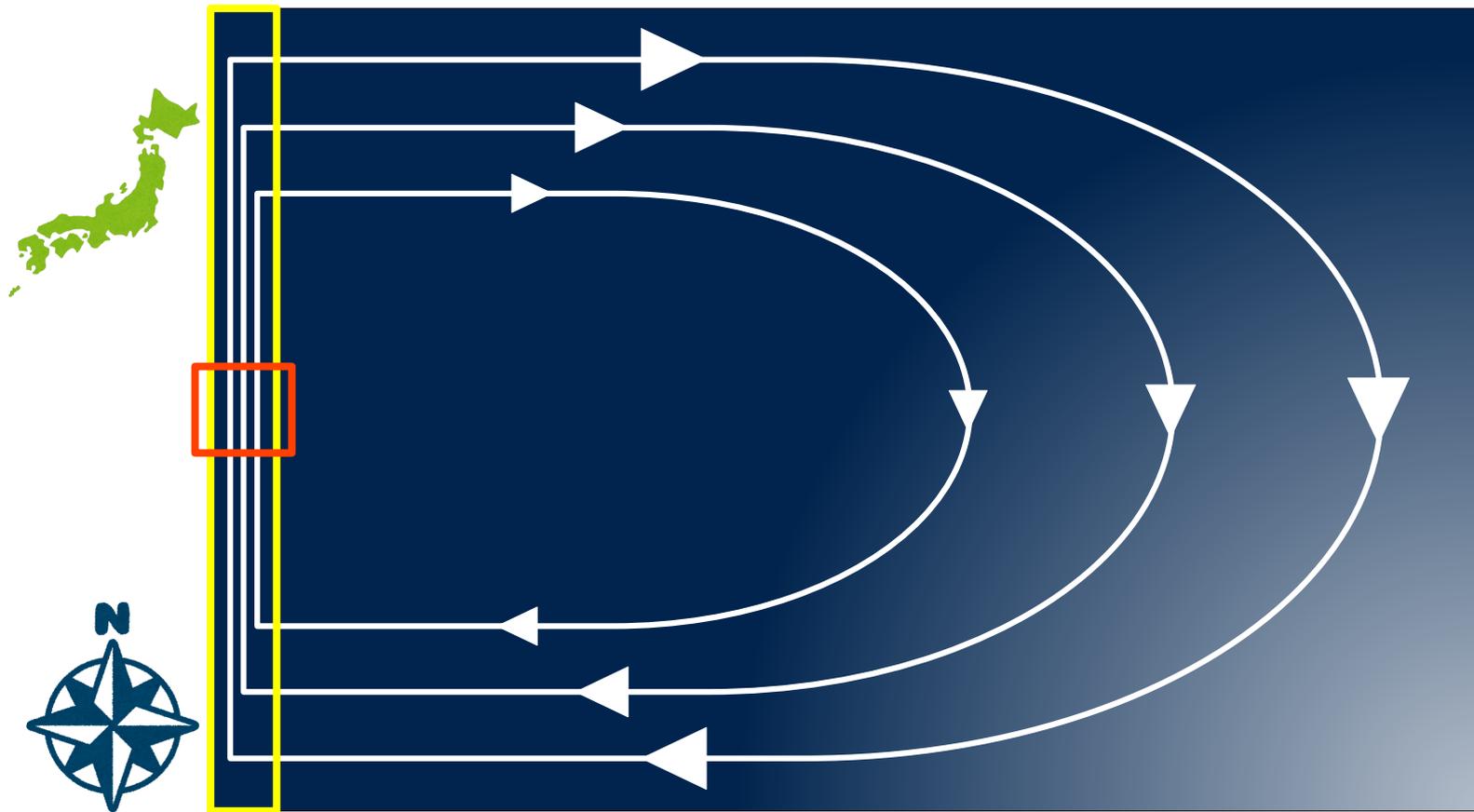
Harald Ulrik Sverdrup (1888-1957)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harald_Ulrik_Sverdrup_-_Alvin_\(167683\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harald_Ulrik_Sverdrup_-_Alvin_(167683).jpg)

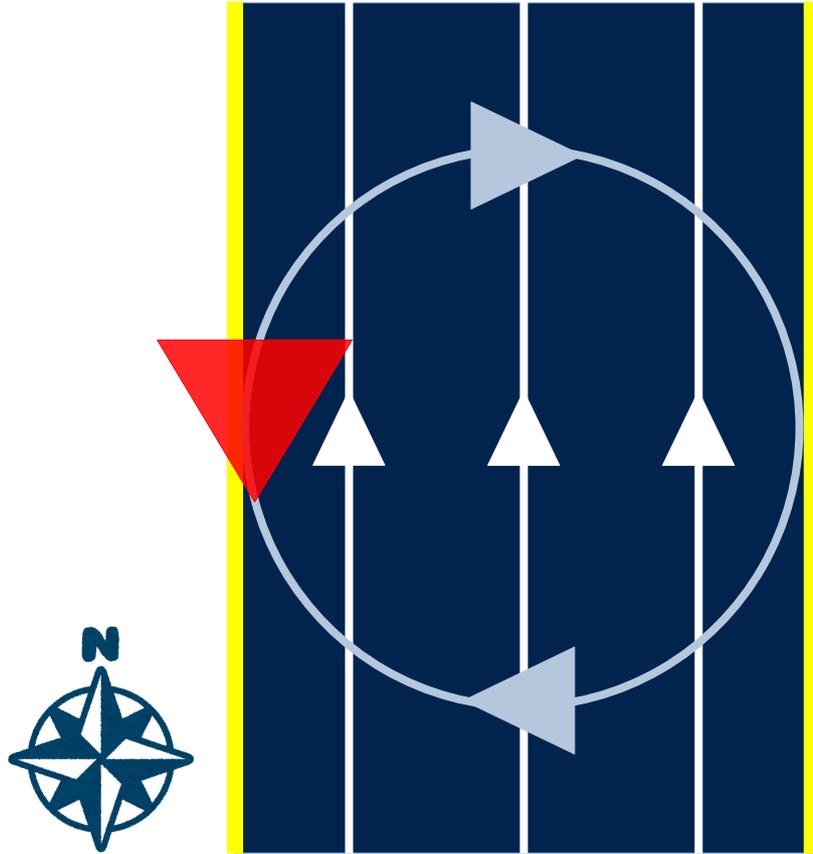


海洋内部領域を上から見た図

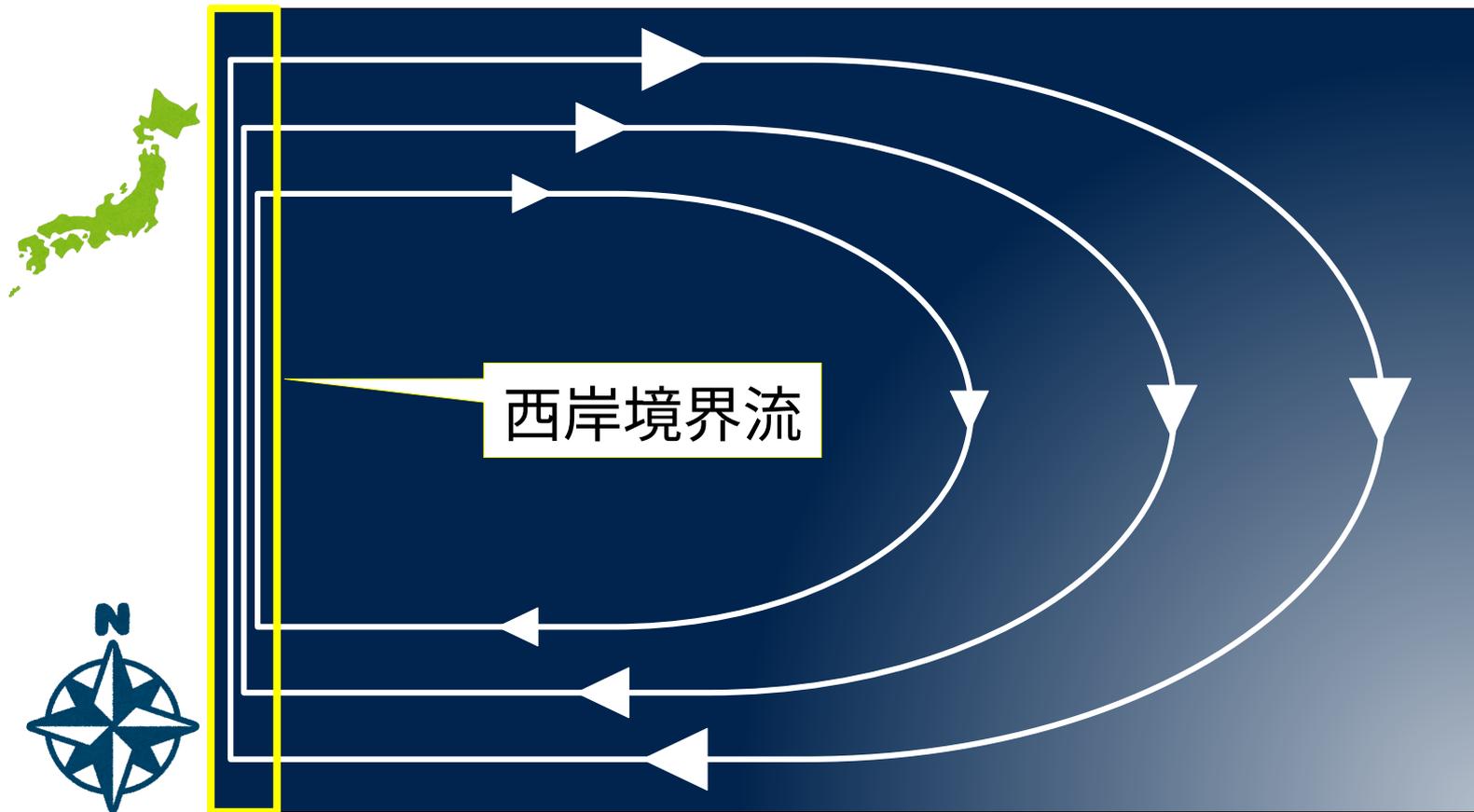
海洋西岸に現れる強い流れでは
北上する海水が
時計回りの循環を強めようとする働きと
西岸との摩擦抵抗が
時計回りの循環を弱めようとする働きと
が釣り合って平衡状態に達している



海洋内部領域を上から見た図



海洋西岸付近の拡大図



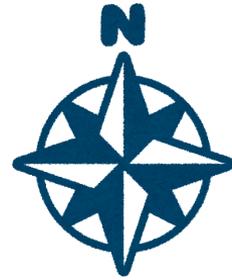
海洋内部領域を上から見た図



Henry Melson Stommel (1920-1992)

https://stommel100.whoi.edu/wp-content/uploads/sites/17/2019/03/AtlantisII_1965.jpg





海洋の風成循環理論

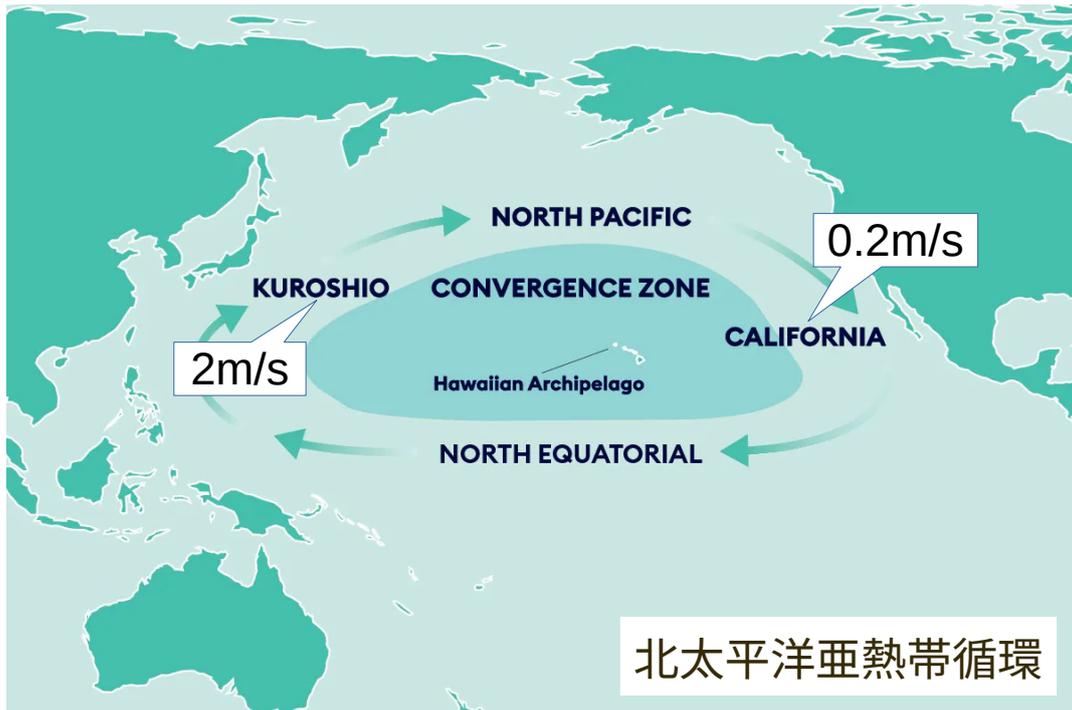
—風が吹くと海洋西岸に強い流れができる話—

今日は「海洋の風成循環理論」について話をしようと思います。

この理論は、一言で言えば「風が吹くと海洋西岸に強い流れができる」というものですが、「風が吹けば桶屋が儲かる」ような、少々回りくどいところのある理論です。

北太平洋亜熱帯循環と黒潮

まず最初に，北太平洋に存在する亜熱帯循環と呼ばれる海水の循環と，その循環の一部をなす黒潮について見てみたいと思います．



<https://encounteredu.com/multimedia/images/where-is-the-north-pacific-gyre>

北太平洋には、北赤道海流を南縁、北太平洋海流を北縁とする時計回りの海水の循環が存在します。

この循環は北太平洋亜熱帯循環と呼ばれます。

北太平洋亜熱帯循環の東側にはカリフォルニア海流が、西側には黒潮と呼ばれる海流が存在します。

海洋東岸のカリフォルニア海流の流速が0.2m/s程度であるのに対して、海洋西岸の黒潮の流速は2m/sに達し、文字通り桁違いに強い流れであることがわかります。

我々の目標は、いかなるメカニズムで時計回りの北太平洋亜熱帯循環が形成され、その西側に強い流れが現れるのかを明らかにすることです。

回転系において現れる力

そのためにはまず，回転系において現れる力を明らかにする必要があります．

その理由は…



今や誰もが知っているとおり、地球が回っているからです。

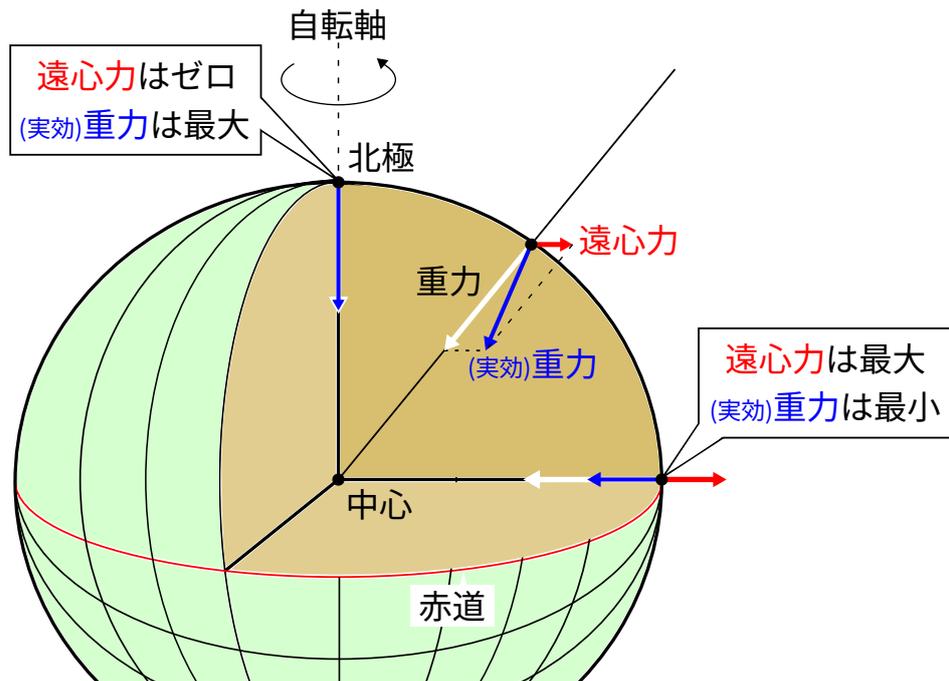


<https://www.yomiuriland.com/attraction/swinger/>

回転系において現れる力と聞いて、まず思い浮かべるのは遠心力でしょう。

回転空中ブランコで、ぶら下げられた椅子が外側に膨らむのは遠心力によるものです。

しかしながら、地球上では多くの場合、遠心力の効果を考える必要はありません。その理由は…

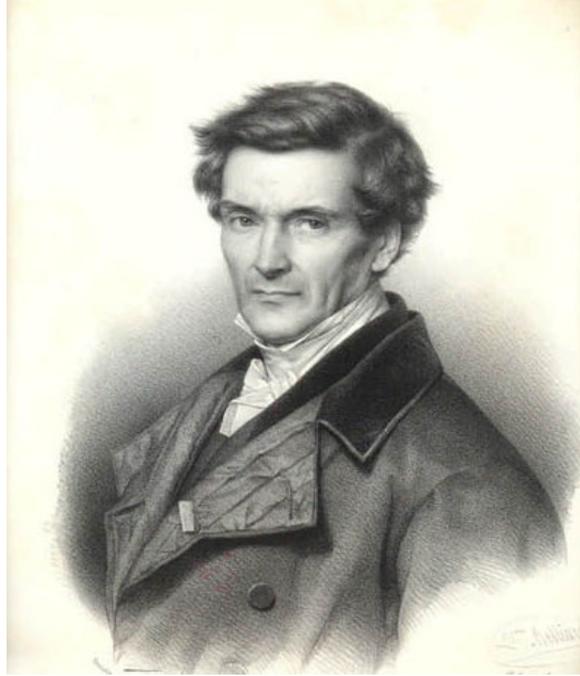


地球の重力は、本来の重力と地球の回転に由来する遠心力の合力だからです。

このため地球上では、遠心力が働いていても、本来の重力のみが働いているのと大差無いわけです。

遠心力の効果は、図からわかるように、地球の重力が極では大きく、赤道では小さいという現象として現れますが、今回の話には関係ありません。

関係するのは、回転系で働くもう一つの力です。この力の存在を最初に指摘したのは…



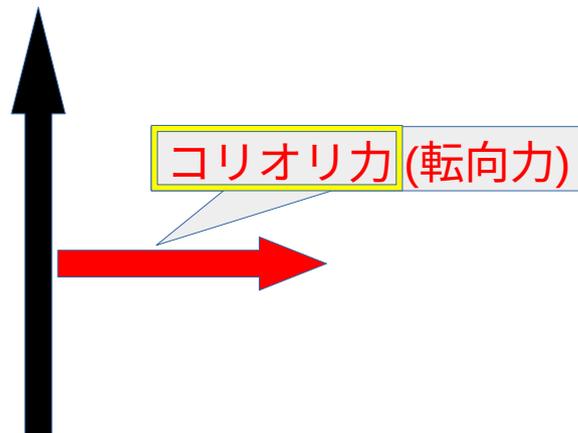
Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gaspard-Gustave_de_Coriolis.jpg

このGaspard-Gustave de Coriolisという人です。

フランスの物理学者で、江戸時代後期に天保の改革を行った水野忠邦や、桜吹雪でおなじみの遠山の金さんこと遠山左衛門尉景元と同世代です。

この人は…



北半球では、物体の運動方向に対して
直角右向きに力が働く

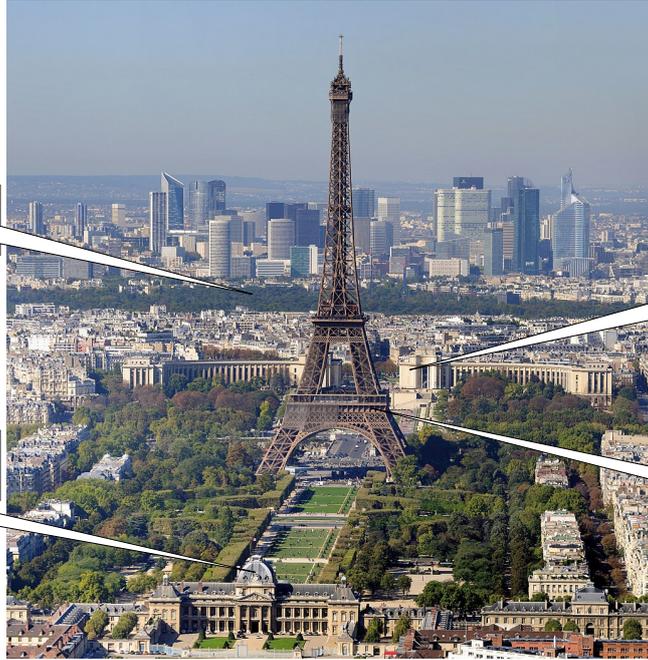
北半球では、物体の運動方向に対して…

直角右向きに力が働くことを指摘しました。

この力は、コリオリ力とか偏向力と呼ばれます。

なお、この「コリオリ力」という用語にはちょっとした注意が必要です。

まず、この写真を見てください…



ブローニュの森

シャイヨー宮

旧陸軍士官学校

エッフェル塔

Paris

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paris_-_Eiffelturm_und_Marsfeld2.jpg

これは、フランスの首都パリの写真です。

これが有名なエッフェル塔ですね。

そしてこれが旧陸軍士官学校，エコール・ミリテールです。かのナポレオン・ボナパルトもここで学んだそうです。

エッフェル塔の向こうには、シャイヨー宮が写っています。第二次大戦初期に占領下のパリを訪れたアドルフ・ヒトラーが記念写真を撮った場所です。

その先に写っている緑地がブローニュの森です。

問題はこのパリの綴りです。最後に「s」がついていますが、よくご存知のように、これは黙字で発音しません。

そこで、昔の人々はこう考えました…

Parisをパリと読むのなら



Coriolisはコリオリと読むのだろう



ところが実はCoriolisはコリオリスと読む



というわけでコリオリカは日本語である

Parisをパリと読むのなら…

Coriolisはコリオリと読むのだろうと。

ところが実はCoriolisはコリオリスと読むのです。今でこそネットで調べればすぐに分かることですが、ネットの無い時代には無理からぬことでした。

というわけでコリオリカは、転向力と同様に、日本語であるということに注意しておいてください。

さて、ところで…

ところでコリオリ力は
日常生活では気付かないほど弱い力である

しかしながら長時間にわたって観察すれば
累積的な効果が現れるのではないか

コリオリ力は日常生活では気付かないほど弱い力です。

実際、歩いているときに右側に引っ張られるように感じたり、ボールを投げたときにボールが自然に右へ右へと曲がってゆく、というようなことは起こりません。

しかしながら、長時間にわたって観察すれば、累積的な効果が現れるのではないか、と考えた人がいました。それは…



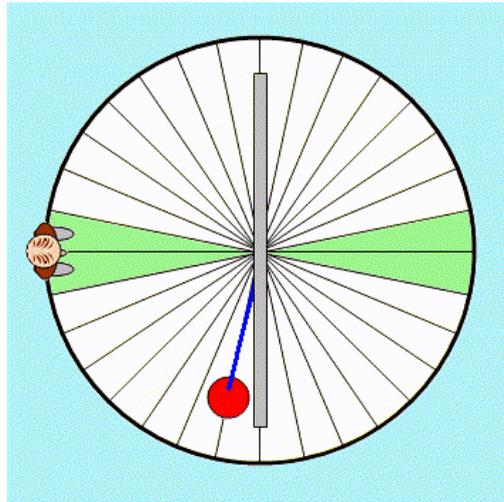
Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foucault_portre_crop.jpg

このJean Bernard Léon Foucaultという人です。

彼はフランスの物理学者で非常に優れた実験家でした。光の速度を精密に測定し，光が波であることを証明したことで有名です。

Foucaultは，次のような実験を考えました…



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foucault-Wikipedia-3.gif>

大きな振り子を作って，それを振動させます．

Foucaultは，振り子の振動方向が，コリオリ力の効果で，右へ右へと回ってゆくはずだと考えました．

もちろん，一往復程度の時間では，振動方向の変化は微々たるものでしょう．

しかし，十分な時間にわたって観察すれば，振り子の振動方向は目に見えて回転するはずで

というわけで，彼は実際にやってみました…



Le Panthéon

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panthéon_of_Paris_007.JPG

パリにパンテオンという建造物があります。

ここはフランスの偉人たちの遺体を祀る霊廟です。

ヴォルテールやルソーといった哲学者，ラグランジュやキュリー夫妻といった科学者など，フランスに貢献した人々が祀られています。

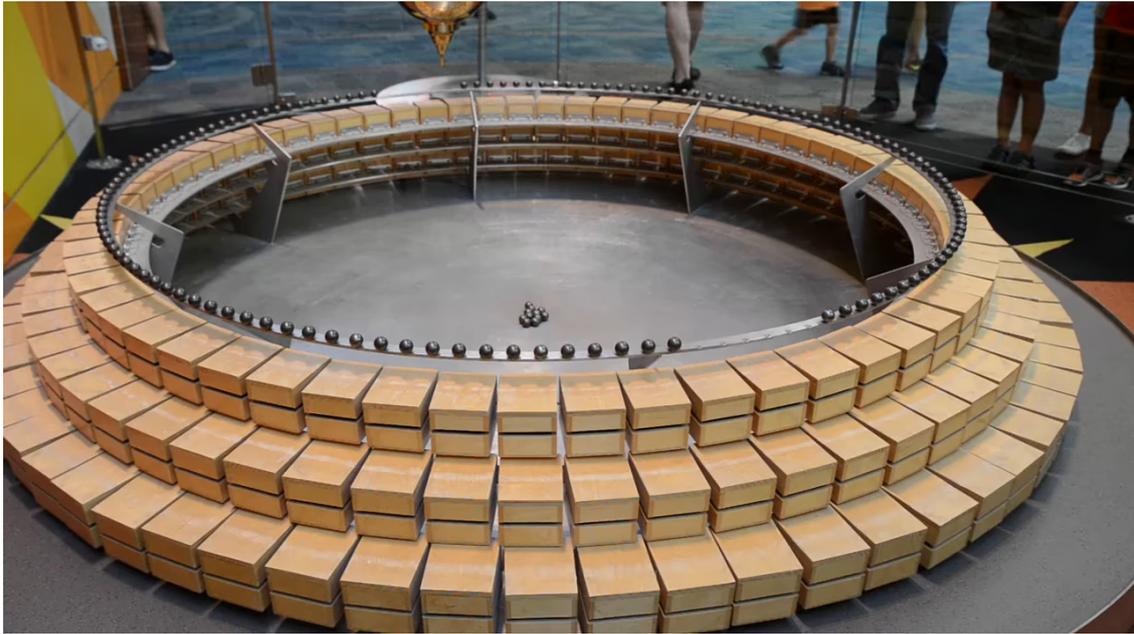
この建物の天井から28kgの錘を67mのワイヤーで吊るして振り子を作りました。



https://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_pendulum

現在，パンテオンの内部には，その振り子が再現されているそうです。

これを振動させた結果…



https://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_pendulum

期待したとおり，振り子の振動方向が右向きに回転する様子が確認されました．

このフーコーの振り子は，単純ですが極めて興味深いものであることから，世界中の様々な場所に設置されました．

日本では，例えば…



国立科学博物館（東京・上野）

<https://artplaza.geidai.ac.jp/sights/13570/>

東京上野の国立科学博物館に設置されています。



国立科学博物館のフーコー振り子

By Momotarou2012 - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23521197>

ここのフーコーの振り子は、錘の通過を検知してランプが点灯する仕組みになっています。

ところが、東京上野の振り子の振る舞いと、パリのそれとの間には、決定的な違いがあります。

それは何かというと…

振り子の振動方向が360度回転するのに要する時間

パリ（北緯49度）：約32時間

東京（北緯36度）：約41時間



コリオリ力は高緯度ほど強く働く

振り子の振動方向が一周するのに要する時間です。

パリでは約32時間で一周するのに対して…

東京では約41時間、つまり9時間ほど多くの時間を要します。

その原因は…

北緯49度に位置するパリと、北緯36度に位置する東京の緯度差にあります。

実は、コリオリ力は高緯度ほど強く働くのです。

例えば、北極にフーコーの振り子を設置したとすると、それは約24時間で一周することになります。

以上の結果をまとめておきましょう…

北半球では，物体の運動方向に対して
直角右向きにコリオリ力が働く

コリオリ力は高緯度ほど強く働く

北半球では，物体の運動方向に対して直角右向きにコリオリ力が働く．

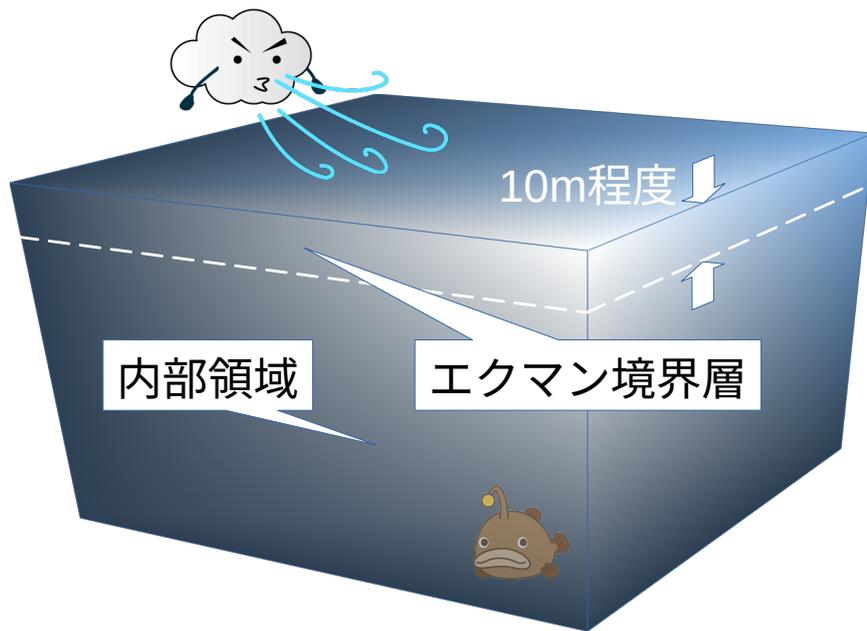
コリオリ力は高緯度ほど強く働く．

これら2つの事実に基づいて，以下では，なぜ風が吹くと海洋西岸に強い流れができるのかを，順を追って説明していきたいと思います．

まず最初は…

エクマン境界層とエクマン輸送

エクマン境界層とエクマン輸送について説明しなければなりません。



海面に風が吹いたとき…

直接流れが生じるのは、実は海面付近のごく浅い層に限られます。

この層の厚さは10m程度で…

エクマン境界層と呼ばれます。

一方、その下に広がる海の大部分を占める領域は、内部領域と呼ばれます。

ちなみに、エクマンというのは…



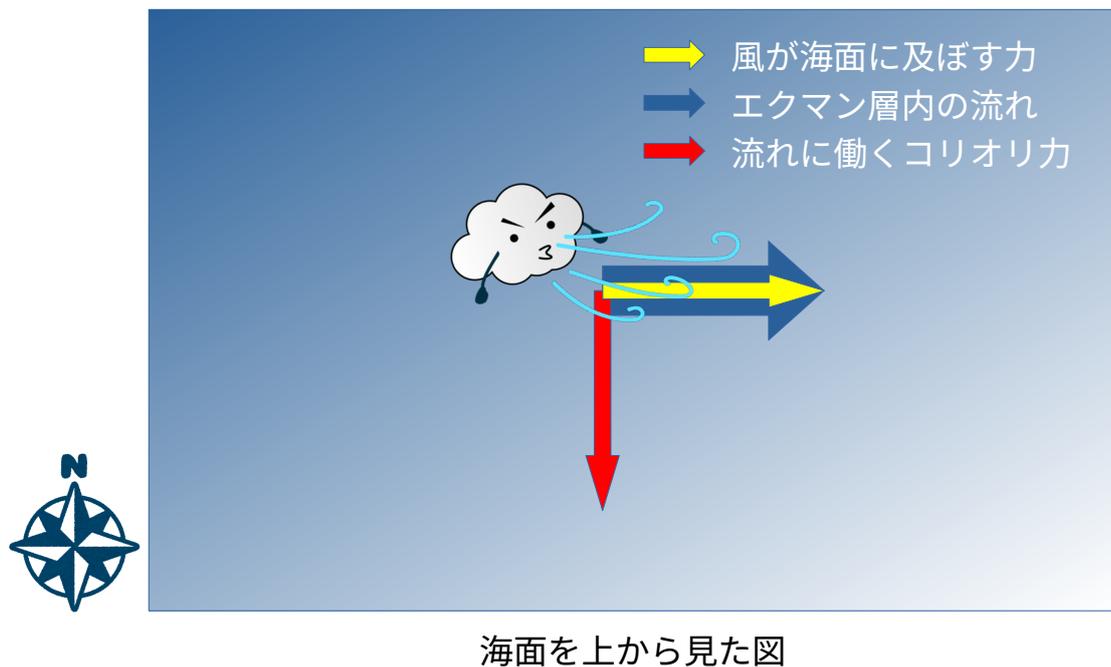
Vagn Walfrid Ekman (1874-1954)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ekman_Vagn.jpg

この人です。

スウェーデンの海洋物理学者で、ノルウェーの有名な探検家であるナンセンに依頼され、風によって海面付近に生じる流れの研究を行いました。

彼の研究によれば、海面に風が吹くとき、エクマン境界層内では次のような過程が生じます。

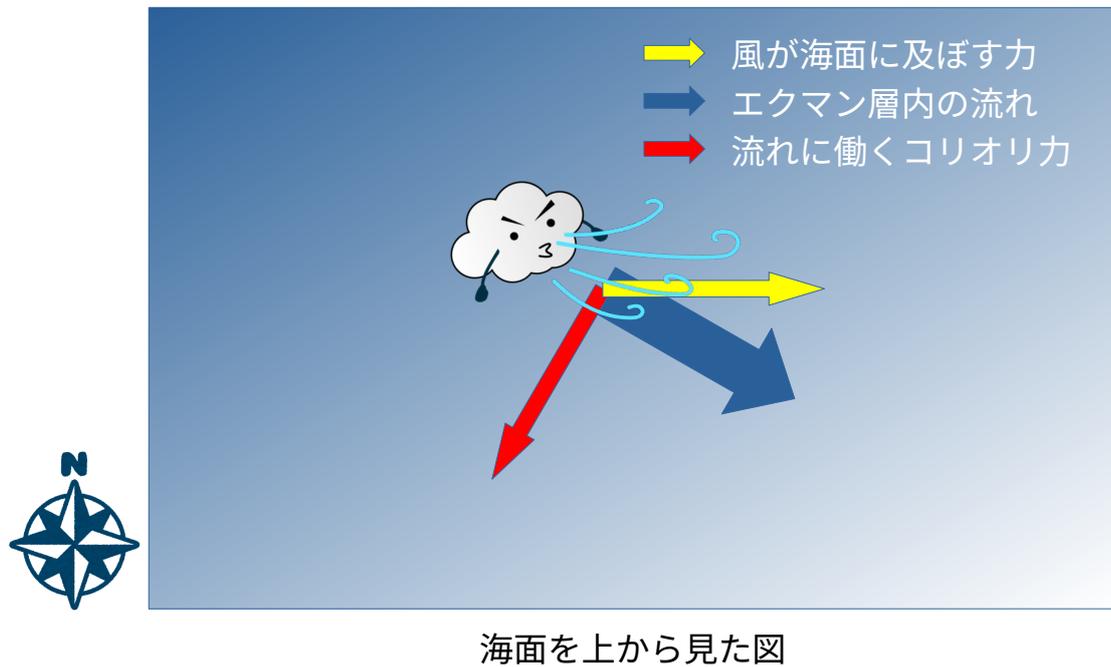


海面に風が吹くと…

海面に力を及ぼします．それに引きずられて…

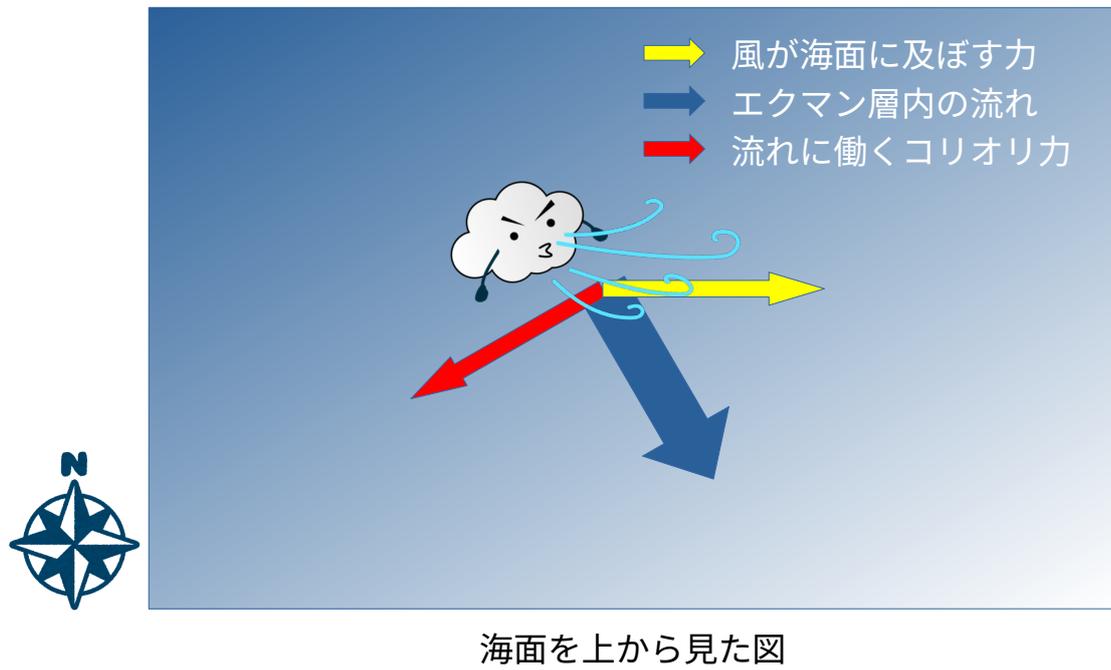
エクマン層内に流れが生じます．

この流れに対して，直角右向きにコリオリ力が働きます．その結果，時間が経つと…

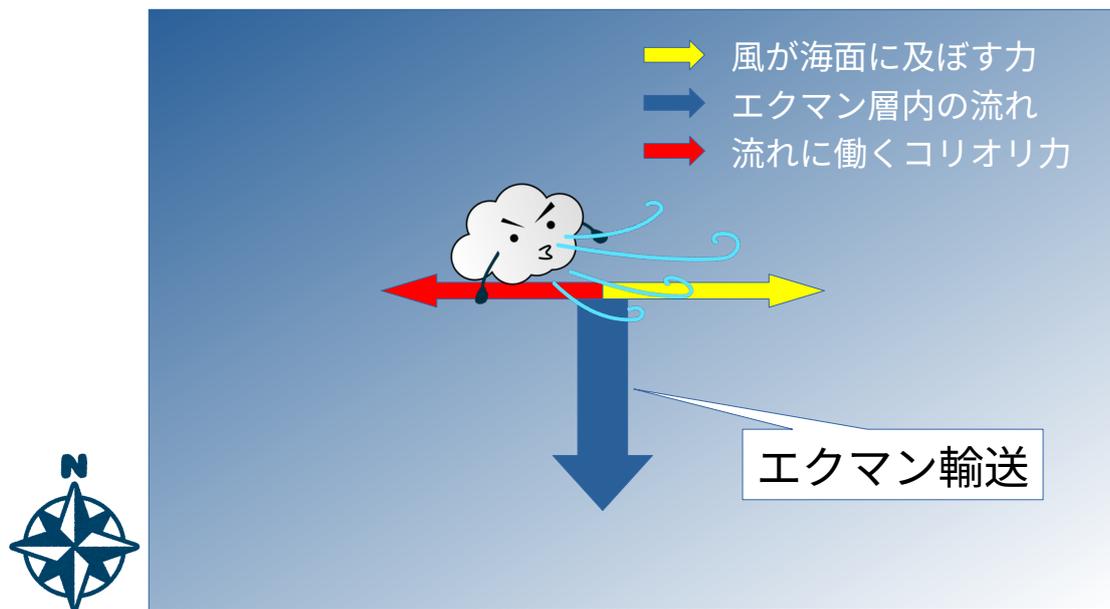


流れは，右に向きを変えます。

この流れにも，依然として直角右向きにコリオリカが働いていますので，時間が経つと…



流れは、さらに右へと向きを変えます。さらに時間が経つと、最終的に…



海面を上から見た図

エクマン層内の流れは，風向きに対して直角右向きになって落ち着きます。

流れを右向きに回そうとするコリオリカが，流れを引きずろうとする風の力と釣り合って，無効化されてしまうからです。

この流れによって生じる海水の輸送を，エクマン輸送と呼んでいます。

以上の結果をまとめると…

海面に風が吹くとき，その直接的な影響を受けるのは，海面から10m 程度の厚さの
エクマン境界層である

恒常的に吹く風により

この層内に生じる正味の流れは
風の向きに対して直角右向きとなる

この流れによる海水の輸送を
エクマン輸送と呼ぶ

海面に風が吹くとき，その直接的な影響を受けるのは，海面から10m 程度の厚さのエクマン境界層である。

恒常的に吹く風によりこの層内に生じる正味の流れは，風の向きに対して直角右向きとなる。

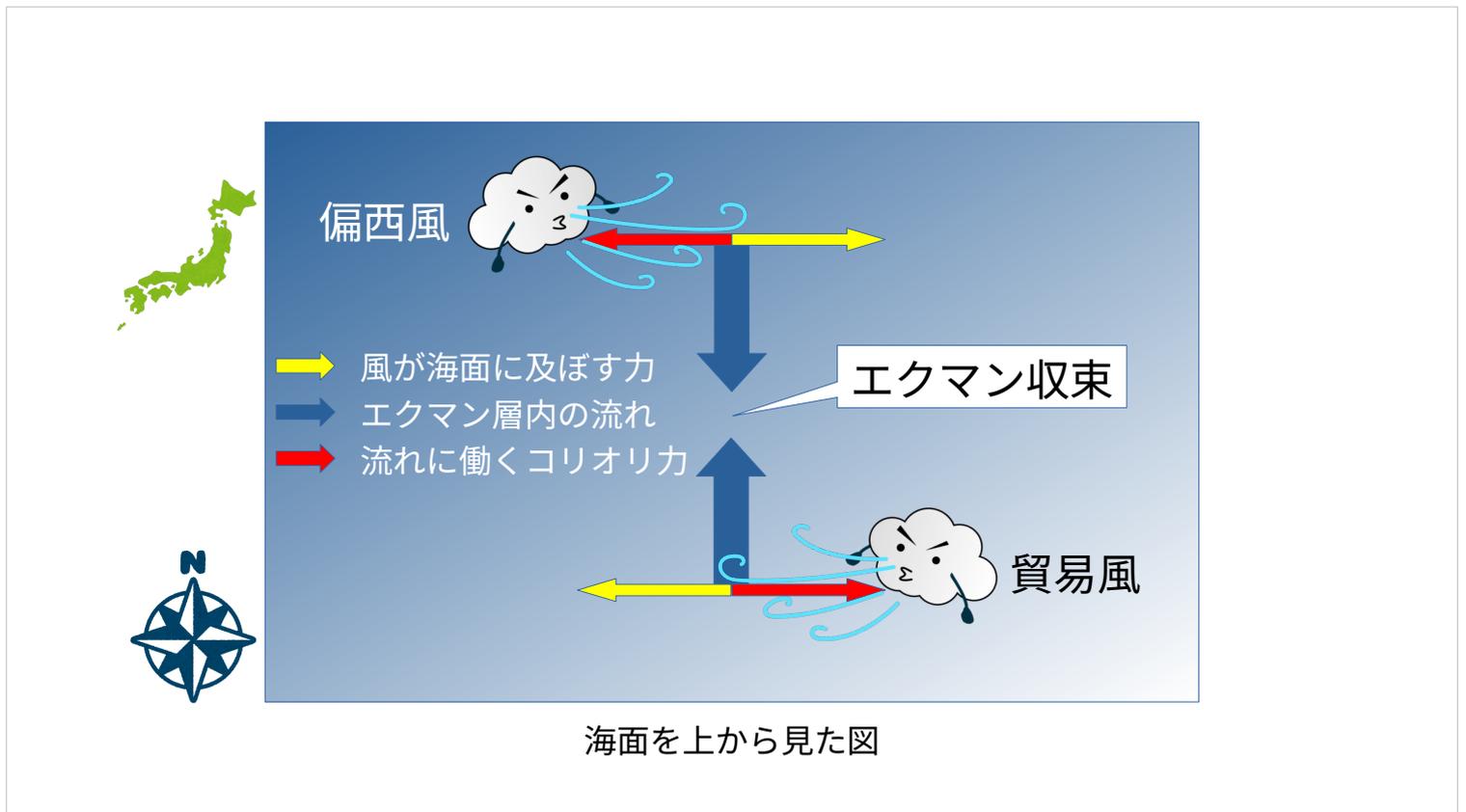
この流れによる海水の輸送をエクマン輸送と呼ぶ。

ここで「恒常的に吹く」という言葉の意味は「フーコーの振り子が一周するのに要する時間よりも長い時間吹く」という意味です。コリオリ力の効果が現れるには時間がかかるので，このような但し書きが必要なのです。

恒常的ではない，すなわち，フーコーの振り子が一周するのに要する時間よりも短い時間しか吹かない風に対しては，コリオリ力の効果は顕著には現れず，海水の輸送は風向きと概ね一致することになりますので注意してください。

エクマン収束とエクマンパンピング

以上の結果を踏まえて、次はエクマン収束とエクマンパンピングについて説明したいと思います。



日本がある中緯度には…

偏西風と呼ばれる東向きの風が恒常的に吹いています。

これに伴って、南向きのエクマン輸送が生じることとなります。

一方、低緯度には貿易風と呼ばれる西向きの風が恒常的に吹いていますので…

北向きのエクマン輸送が発生します。

その結果、偏西風と貿易風の境に海水の収束が起こります。これをエクマン収束と呼んでいます。



<https://encounteredu.com/multimedia/images/where-is-the-north-pacific-gyre>

最初に見せた北太平洋亜熱帯循環の図で…

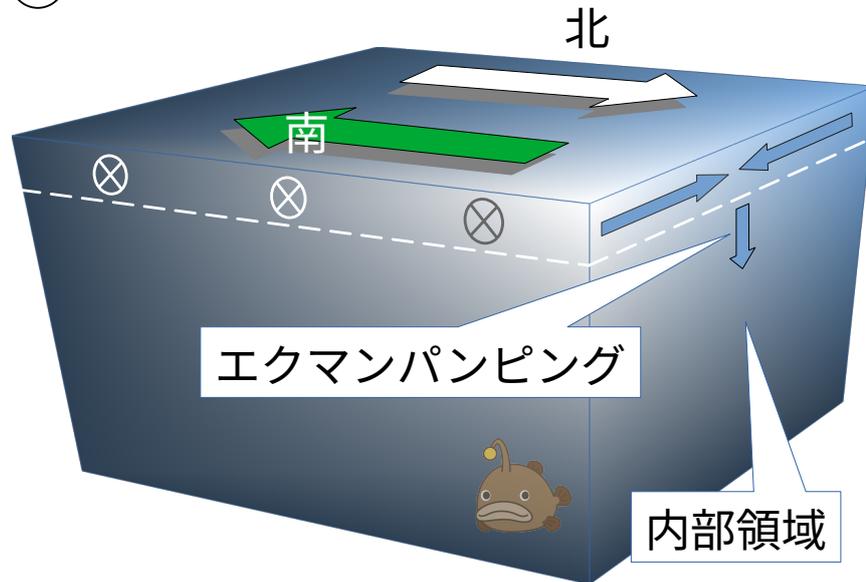
CONVERGENCE ZONEと書かれているのは、このエクマン収束を指しています。

一方、海洋表層の海水が収束するのに伴って、当然ゴミも集まってきます。

そのため、このHawaiian Archipelago…

つまりハワイ諸島付近は、残念ながら海洋ゴミの集積地になってしまっています。

⊗ 画面の奥に向かう流れ



さてここで、もう一度エクマン層内の流れについて3次元的に考えてみましょう。先程も言ったように…

低緯度には貿易風が吹いていますので…

北向きのエクマン輸送が…

中緯度には偏西風が吹いていますから…

南向きのエクマン輸送が発生し、境目で海水が収束します。

この収束した海水は、エクマン層の下に広がる海洋内部領域へと流出することになります。

この海水の海洋内部領域への流出をエクマンパンピングと呼んでいます。後で説明するように、このエクマンパンピングが、北太平洋亜熱帯循環を生成することになります。

北太平洋の中緯度には東向きの偏西風が
低緯度には西向きの貿易風が吹いている

偏西風帯では南向き，貿易風帯では北向き
のエクマン輸送が生じる

これらのエクマン輸送は
偏西風帯と貿易風帯の境で収束し
海洋内部領域へと流出する

この海洋内部領域への海水の流出を
エクマンパンピングと呼ぶ

以上の結果をまとめておきます。

北太平洋の中緯度には東向きの偏西風が，低緯度には西向きの貿易風が吹いている。

偏西風帯では南向き，貿易風帯では北向きのエクマン輸送が生じる。

これらのエクマン輸送は，偏西風帯と貿易風帯の境で収束し，海洋内部領域へと流出する。

この海水の海洋内部領域への海水の流出をエクマンパンピングと呼ぶ。



<https://encounteredu.com/multimedia/images/where-is-the-north-pacific-gyre>

ところで今までの話は，海面下10m程度の深さのエクマン境界層内での海水の運動についてでした．

ところが，例えばこの黒潮は，深さ1000mにまで及ぶ海流です．

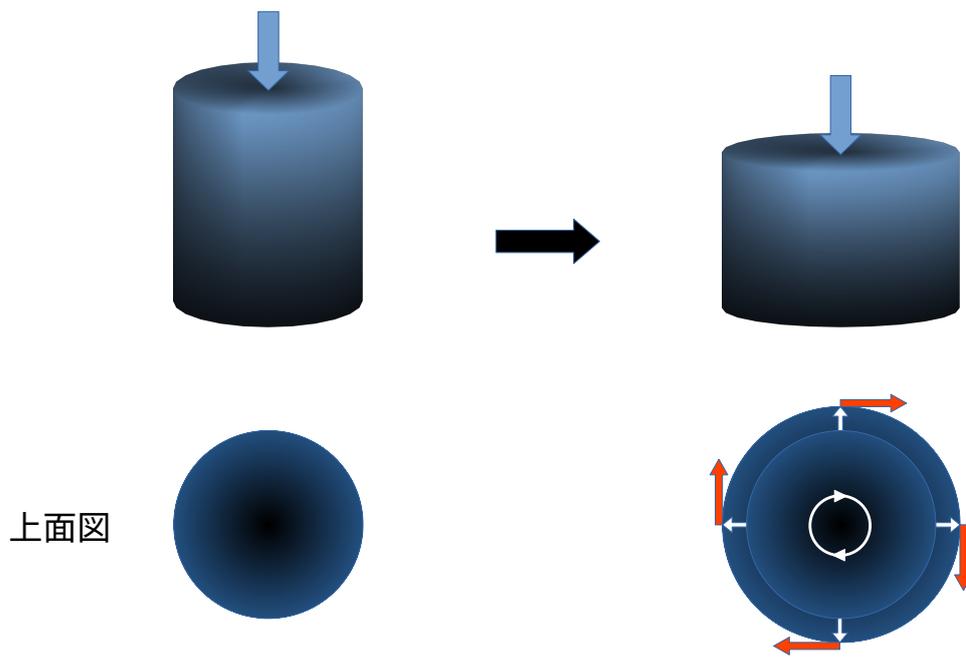
ということはつまり，北太平洋亜熱帯循環は…

エクマン境界層の下に広がる海洋内部領域の流れである，ということになります．

海洋内部領域での循環の生成

では、一体どのようなメカニズムで、海洋内部領域に時計回りの北太平洋亜熱帯循環が生成されるのでしょうか。

そのメカニズムを明らかにするために、次のような思考実験を行ってみましょう。



海水の柱を考え…

それを上から押してみます。すると…

海水は押し潰されて、外向きに流れ出します。

この流れに直角右向きにコリオリ力が働き…

その結果、時計回りの循環が発生します。

まとめると…

海水を上から押し潰すと
海水は外向きに流れ出す

この流れに直角右向きにコリオリ力が働く

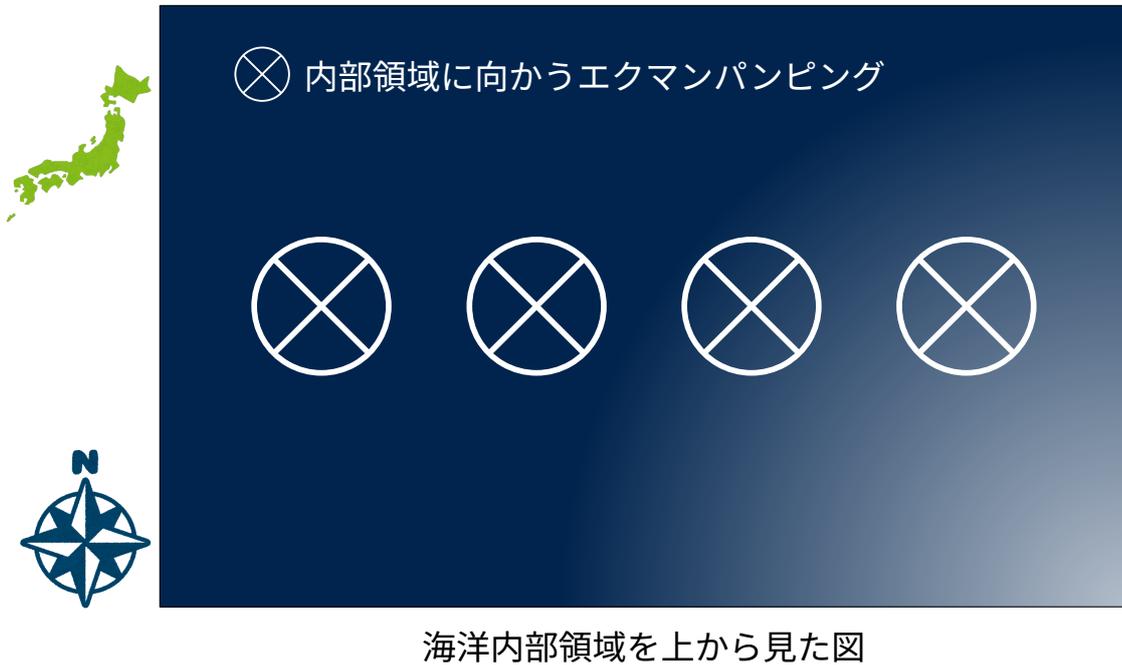
その結果、時計回りの循環が発生する

海水を上から押し潰すと海水は外向きに流れ出す。

この流れに直角右向きにコリオリ力が働く。

その結果、時計回りの循環が発生する。

実はこれこそが、エクマン境界層下の海洋内部領域に時計回りの北太平洋亜熱帯循環が生成されるメカニズムなのです。どういふことか説明しましょう。



すでに見たとおり，海洋内部領域には…

その上に広がるエクマン境界層から，エクマンパンピングによって海水が流入してきた，ということを思い出してください．

その結果…

エクマン境界層下の海洋内部領域の海水は
エクマンポンピングに押し潰されて外向きに広がる

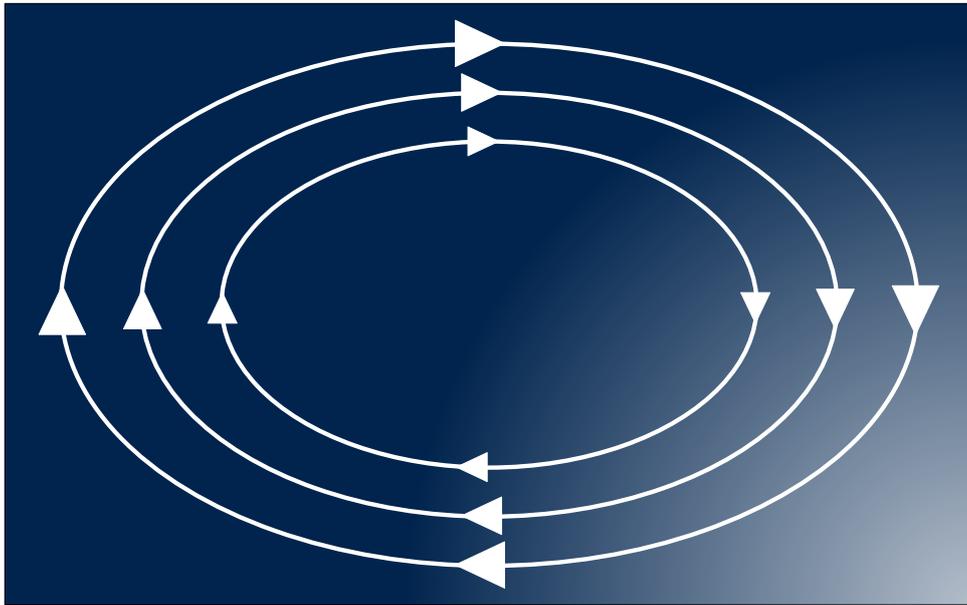


これに伴って生じる流れに働くコリオリ力により
内部領域には時計回りの循環
すなわち亜熱帯循環が生成される

エクマン境界層下の海洋内部領域の海水は、エクマンポンピングに押し潰されて外向きに広がり…

これに伴って生じる流れに働くコリオリ力により、内部領域には時計回りの循環、すなわち亜熱帯循環が生成されることとなります。

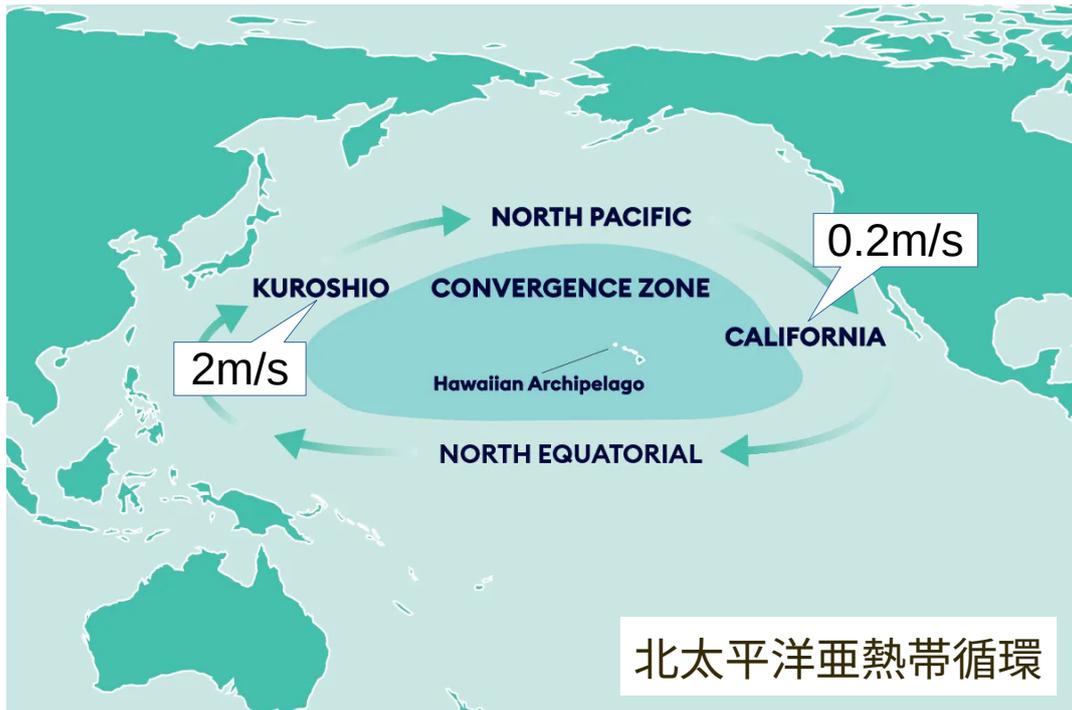
つまり…



海洋内部領域を上から見た図

このような流れが海洋内部領域に生成されることになるのです。

かくして…



<https://encounteredu.com/multimedia/images/where-is-the-north-pacific-gyre>

時計回りの北太平洋亜熱帯循環の生成メカニズムは明らかになりました。

しかしながら、まだ問題が残っています。それは…
循環の西側に強い流れが現れるメカニズムです。

これを明らかにするためには…

惑星ベータ効果と惑星ロスビー波

惑星ベータ効果と惑星ロスビー波について説明する
必要があります。

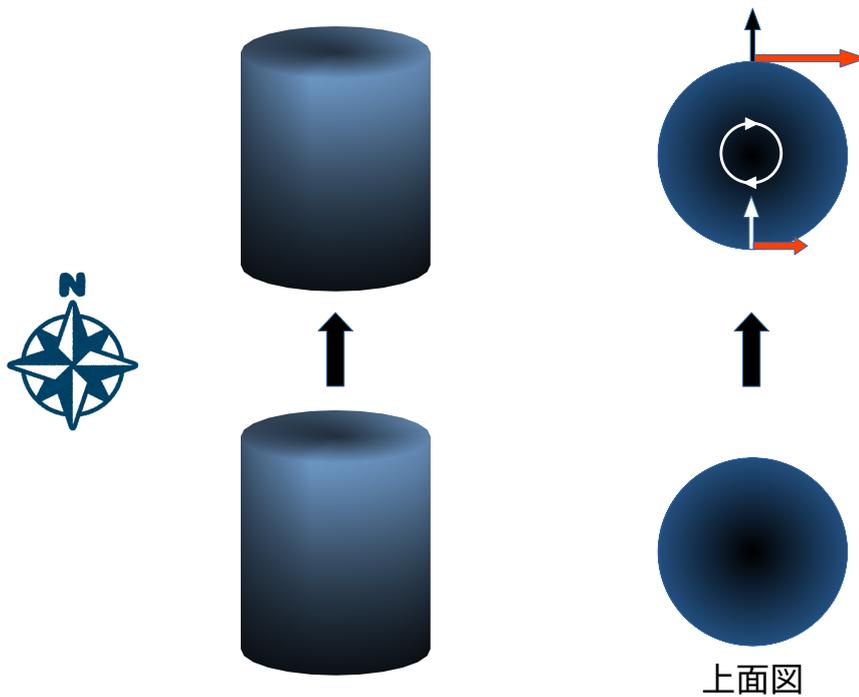
コリオリ力は高緯度ほど強く働く

この事実を惑星ベータ効果と呼ぶ

ここで、コリオリ力は高緯度ほど強く働く，という事実を思い出してください。

この事実は惑星ベータ効果と呼ばれています。

惑星ベータ効果が存在することで，次のような興味深い現象が起こります。



再び海水の柱を考え…

これを北に移動させてみましょう。その結果…

このような海水の運動が生じますが…

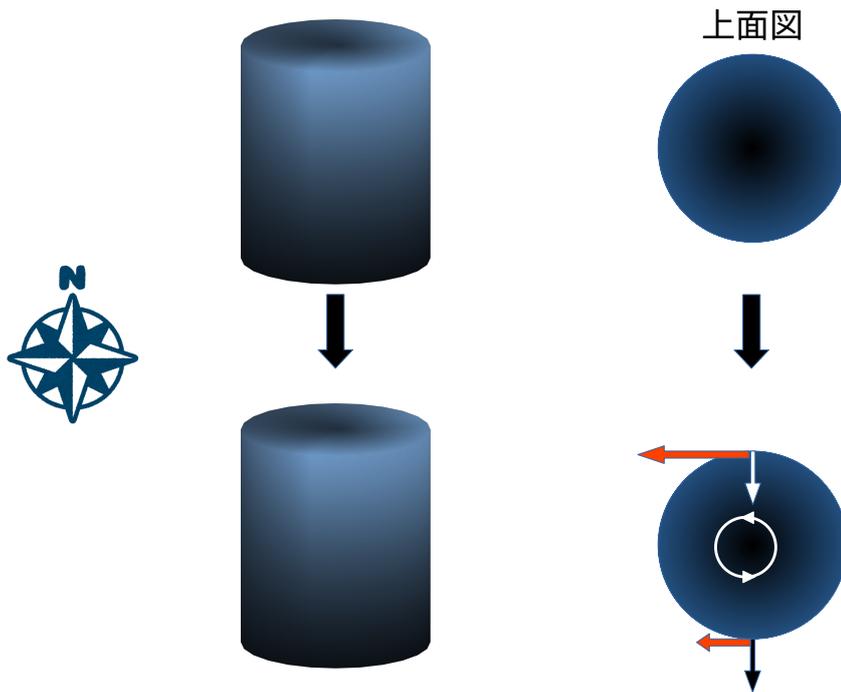
この運動にかかるコリオリ力は、惑星ベータ効果により、北側で大きくなります。

そのため、海水には時計回りの循環が発生することになります。

すなわち…

海水が北上すると惑星ベータ効果により
時計回りの循環が発生する

海水が北上すると、惑星ベータ効果により、時計回りの循環が発生するわけです。



今度は逆に海水の柱を…

南に移動させてみましょう。その結果…

このような海水の運動が生じますが…

この運動にかかるコリオリ力は、前と同様に、惑星ベータ効果によって、北側で大きくなります。

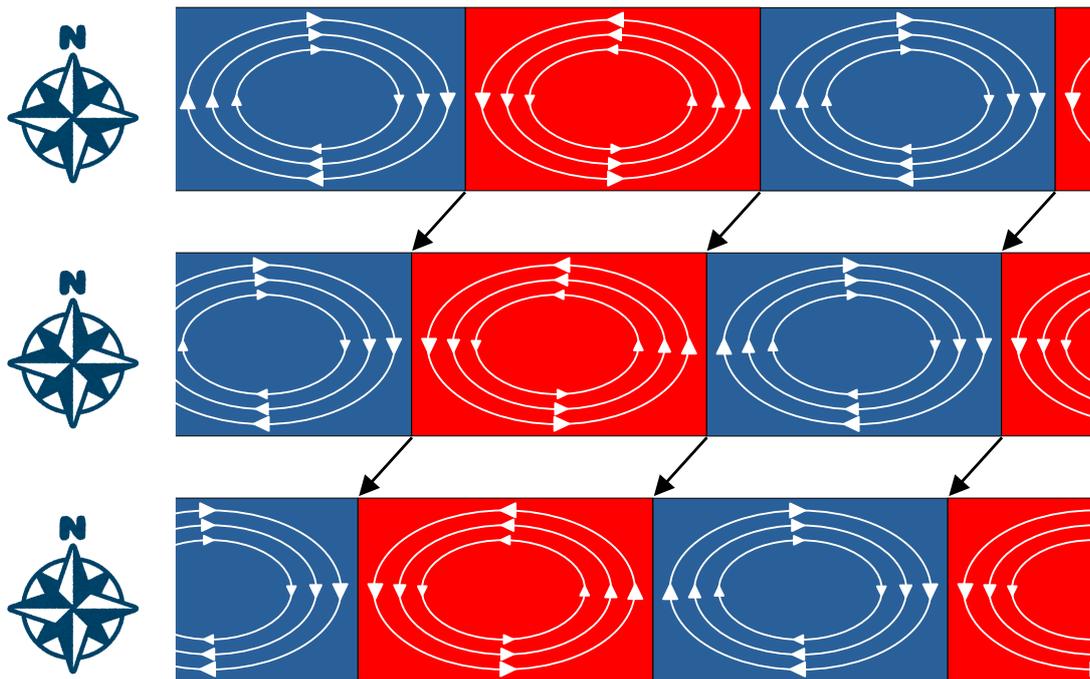
しかしながら今度は、反時計回りの循環が発生することになります。

すなわち…

海水が南下すると惑星ベータ効果により
反時計回りの循環が発生する

海水が南下すると、惑星ベータ効果により、反時計回りの循環が発生するのです。

以上の結果に基づいて、次のような状況を考えてみましょう。



時計回りと半時計回りの循環が交互に東西方向に並んでいるとします。

時間が経つと、この循環パターンは西へと移動するはずでず。

南下流が存在する領域では半時計回りの循環が、北上流が存在する領域では時計回りの循環が、それぞれ生成されるからです。

同じ理由で、循環パターンは、さらに時間が経つと、さらに西へと移動して行きます。

つまり…

惑星ベータ効果により
循環パターンが西向きに移動する現象が発生する
この現象は惑星ロスビー波と呼ばれる

惑星ベータ効果により，循環のパターンが西向きに移動する現象が発生します．

この現象は惑星ロスビー波と呼ばれています．

ちなみに，ロスビーというのは…



Carl-Gustaf Arvid Rossby (1898-1957)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carl_G._A._Rossby_LCCN2016875745_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carl_G._A._Rossby_LCCN2016875745_(cropped).jpg)

この人です。

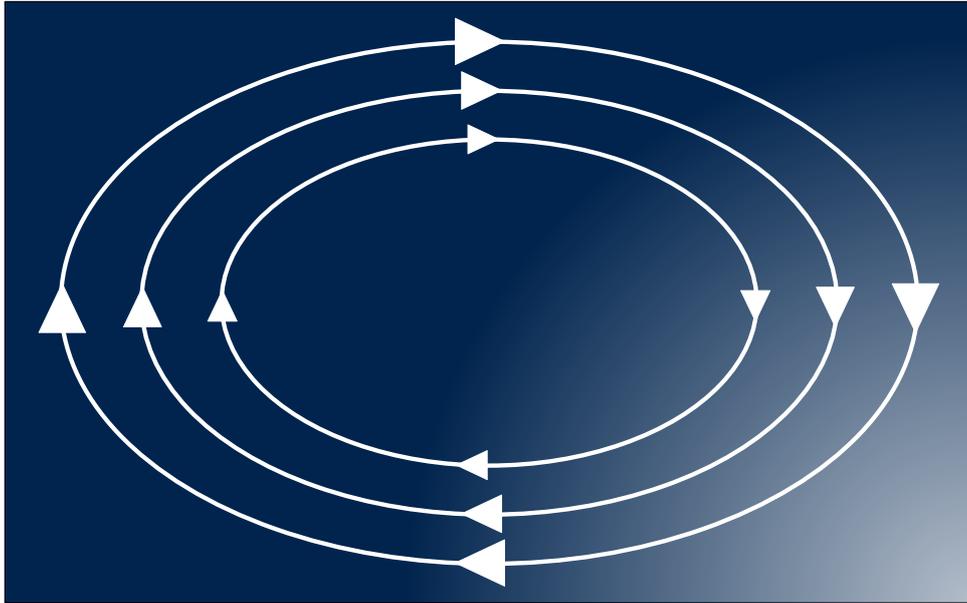
スウェーデンで生まれアメリカに帰化した気象学者で、気象力学に数多くの業績を残し、近代気象学の父と呼ばれています。

西岸強化

さて、このロスビー波という現象の存在を認めると
亜熱帯循環の西側に強い流れが現れるメカニズムが
理解できるようになります。

そもそも亜熱帯循環は
エクマン境界層下の海洋内部領域に生成された
時計回りの循環パターンであった

そもそも亜熱帯循環は，エクマン境界層下の海洋内部領域に生成された時計回りの循環パターンであったことを思い出してください．つまり…



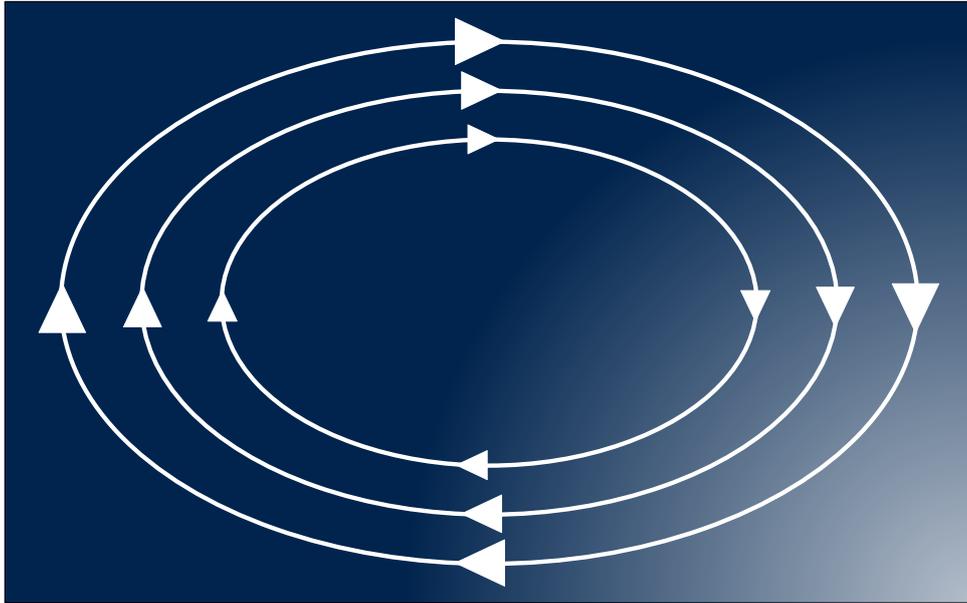
海洋内部領域を上から見た図

こういう循環パターンです。

この循環パターンは惑星ロスビー波として
西向きに移動し海洋西岸に押し付けられる

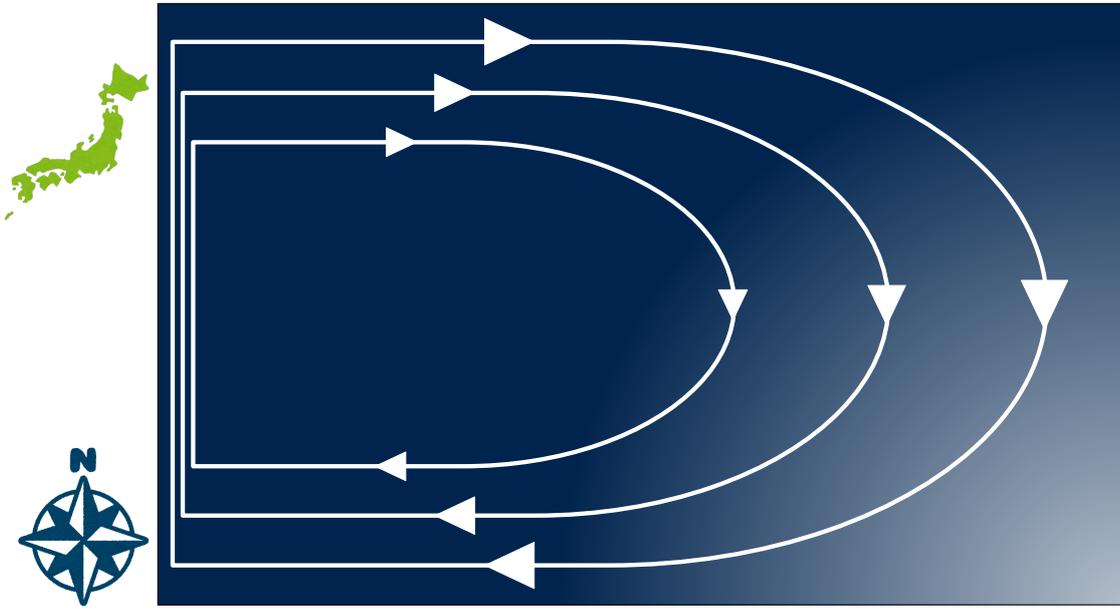
この循環パターンは，惑星ロスビー波として西向き
に移動し，海洋西岸に押し付けられるはずです．

つまり…



海洋内部領域を上から見た図

このパターンが、ロスビー波として西へ移動し…

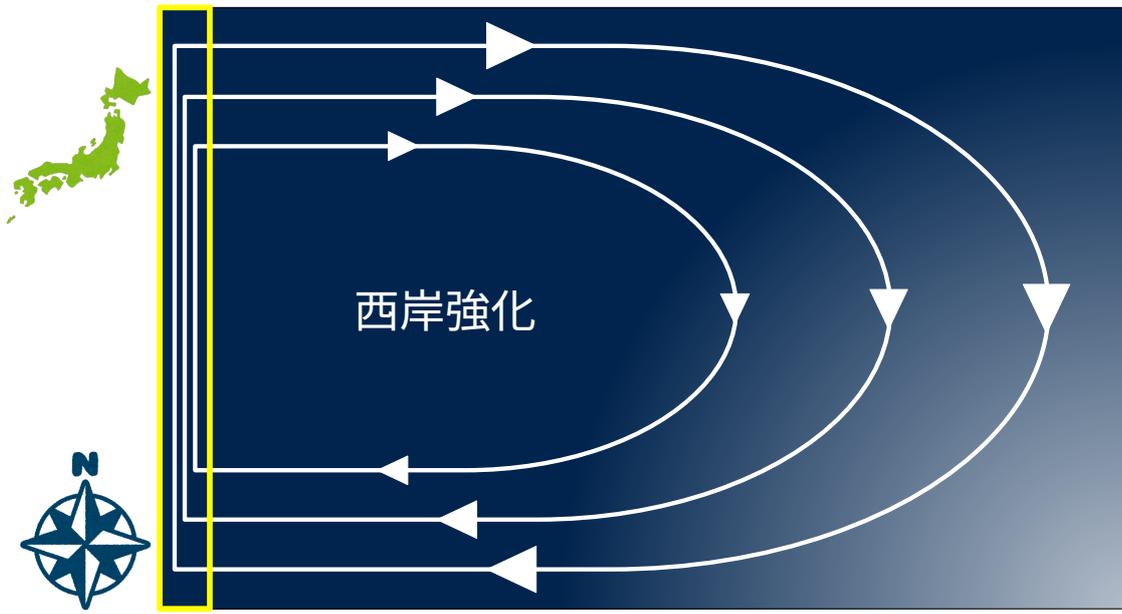


海洋内部領域を上から見た図

海洋西岸に押し付けられます。

その結果、**海洋西岸には強い流れが現れる**

その結果、海洋西岸には強い流れが現れることとなります。



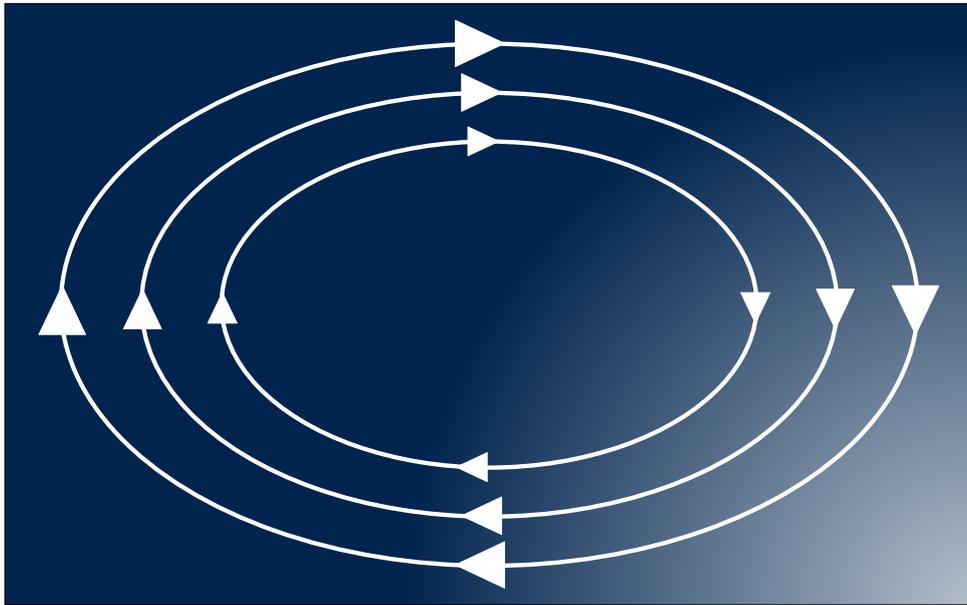
海洋内部領域を上から見た図

ここです。

この海洋西岸に強い流れが現れる現象を，西岸強化と呼んでいます。

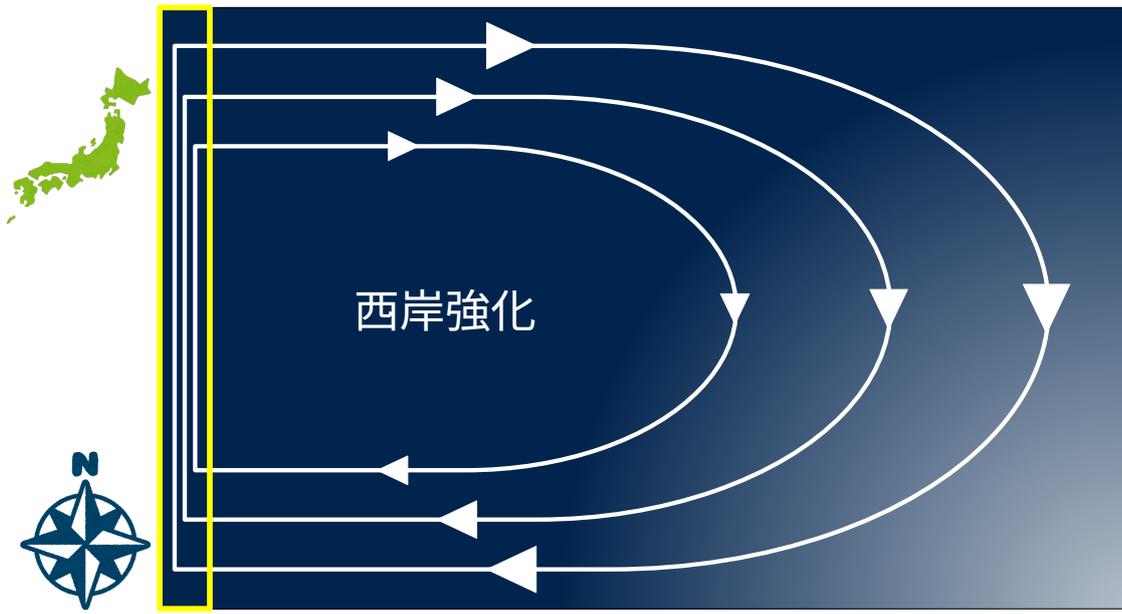
まとめると

まとめますと…



海洋内部領域を上から見た図

エクマン境界層下の海洋内部領域に生成された時計回りの循環パターンが，惑星ロスビー波として西向きに移動し…

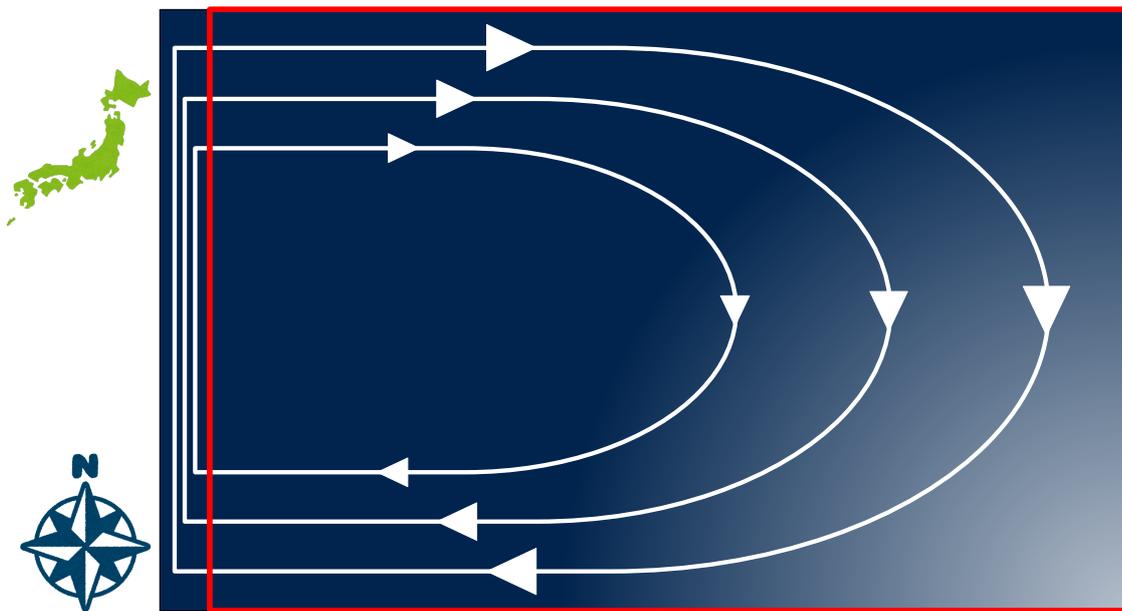


海洋内部領域を上から見た図

西岸に押し付けられて，西岸強化が起こります．

以上で，亜熱帯循環の西側に強い流れが現れるメカニズムが明らかになりました．

しかしながら，まだ問題が残っています．それは…



海洋内部領域を上から見た図

海洋の西岸付近を除いた，この領域です．

この領域には，時計回りの循環の右半分が，左半分とは対照的に，西へと押し付けられることなく，残されています．

この領域に循環の右半分が残される理由を…

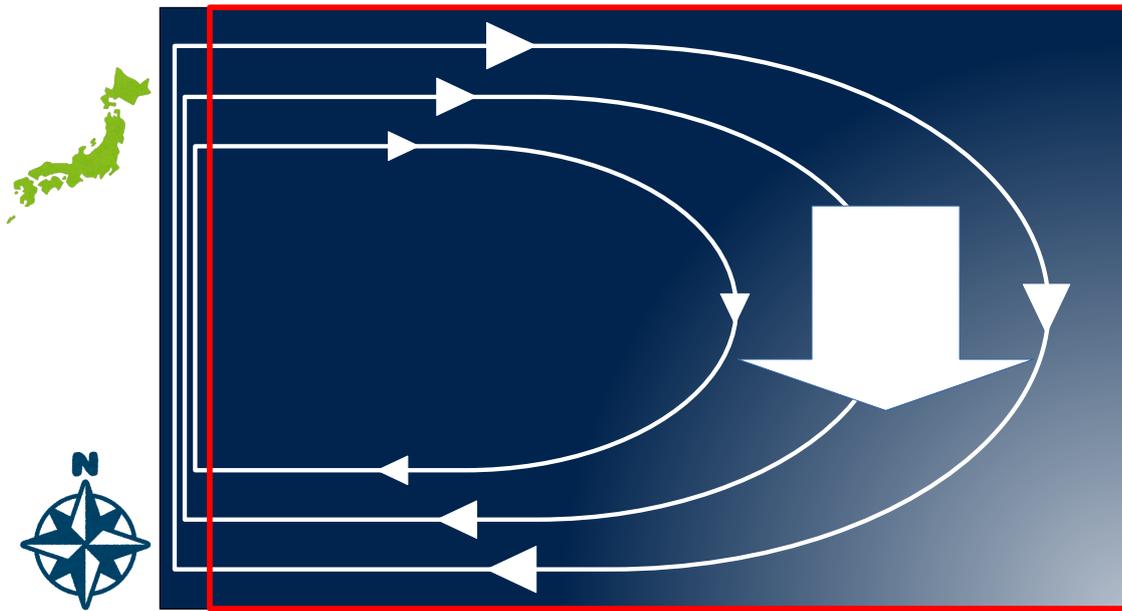
スベルドラップ平衡と西岸境界流

次に説明したいと思います。実は…

海洋西岸を除く領域では
南下する海水が
反時計回りの循環を生成しようとする働きと
エクマンポンピングが
時計回りの循環を生成しようとする働きと
が釣り合って平衡状態に達している

海洋西岸を除く領域では，南下する海水が反時計回りの循環を生成しようとする働きと，エクマンポンピングが時計回りの循環を生成しようとする働きとが釣り合って，平衡状態に達しているのです。

もう少し詳しく説明すると…

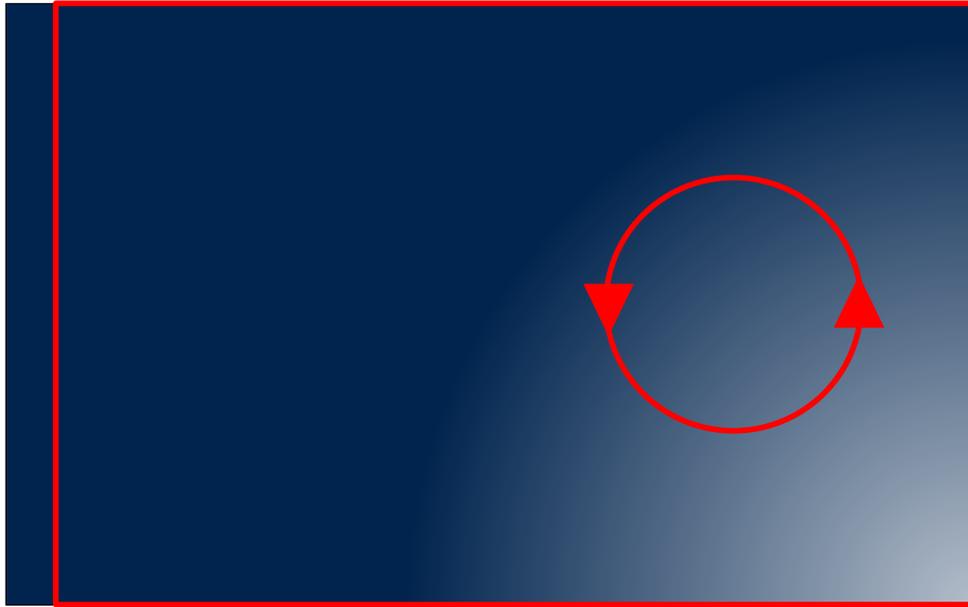


海洋内部領域を上から見た図

時計回りの循環の右半分には…

南下流が存在します。

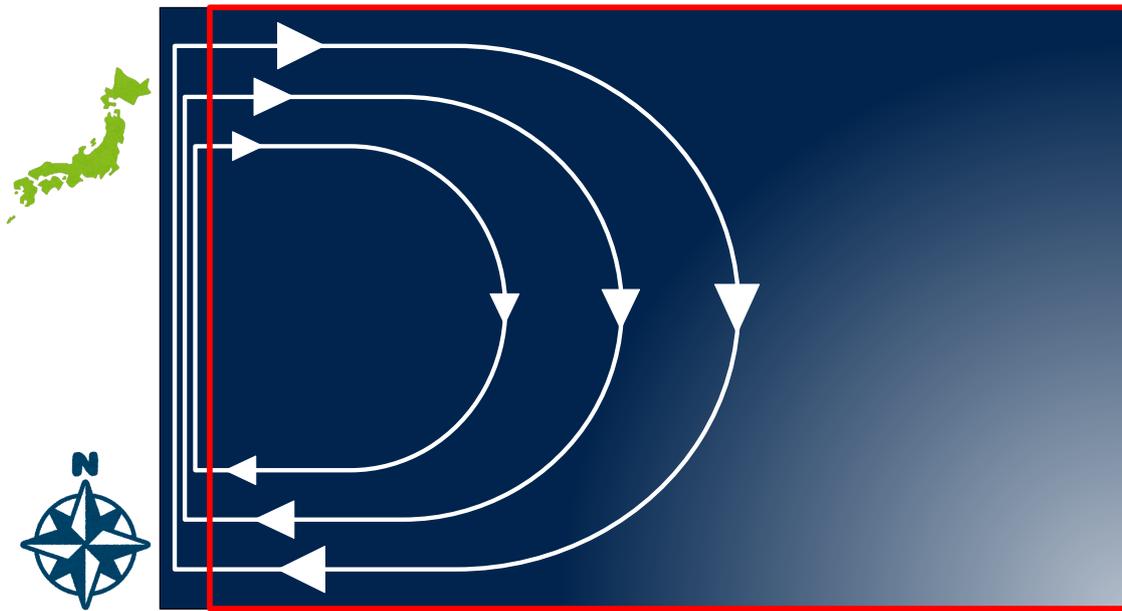
この南下流は，惑星ベータ効果により…



海洋内部領域を上から見た図

半時計回りの循環を生成しようとしています。

この半時計回りの循環を生成しようとする働きを妨げるものが存在しなければ…



海洋内部領域を上から見た図

時計回りの循環は，西へと追いやられてしまうでしょう。

しかしながら，海洋内部領域には…



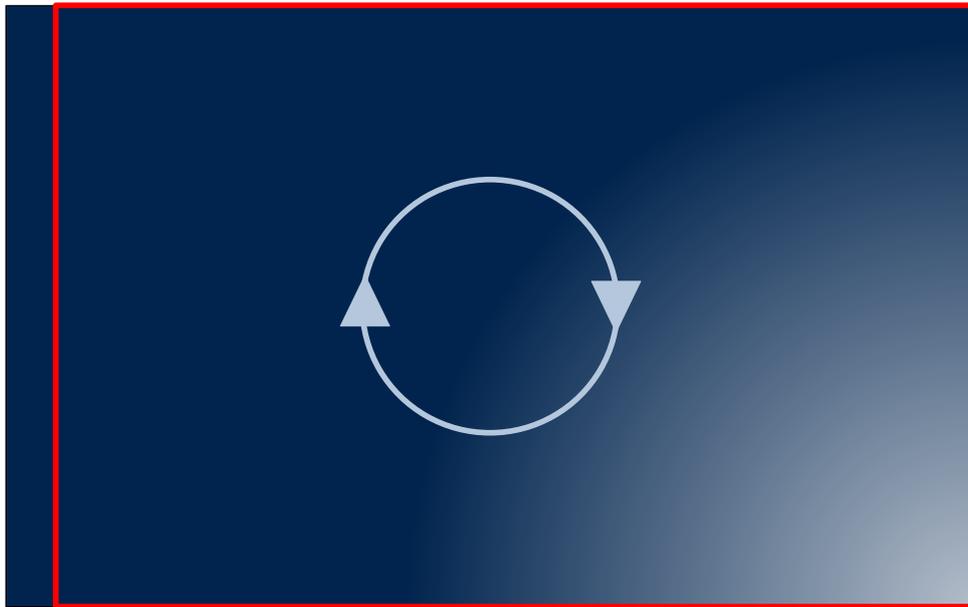
⊗ エクマンパンピング



海洋内部領域を上から見た図

その上に広がるエクマン境界層から，エクマンパンピングによって海水が流入して来ることを思い出してください。

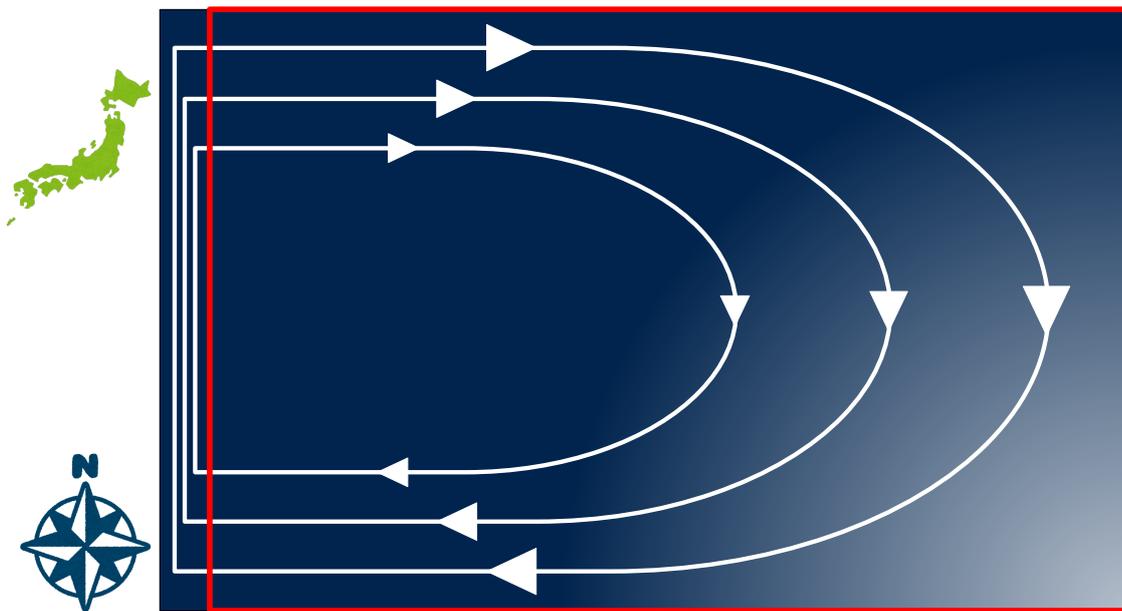
このエクマンパンピングは…



海洋内部領域を上から見た図

内部領域に時計回りの循環を生成しようとしています。

このエクマンポンピングが時計回りの循環を生成しようとする働きが，南下流が半時計回りの循環を生成しようとする働きを打ち消すことにより…



海洋内部領域を上から見た図

時計回りの循環の右半分は、西へと押し付けられることなく、残されるのです。

南下する海水が反時計回りの循環を生成しようとする働きと
エクマンポンピングが時計回りの循環を生成しようとする働きと
の釣り合いを **スベルドラップ平衡** と呼ぶ

この南下する海水が反時計回りの循環を生成しよう
とする働きと，エクマンポンピングが時計回りの循
環を生成しようとする働きとの釣り合いを，スベル
ドラップ平衡と呼んでいます。

ちなみに，スベルドラップというのは…



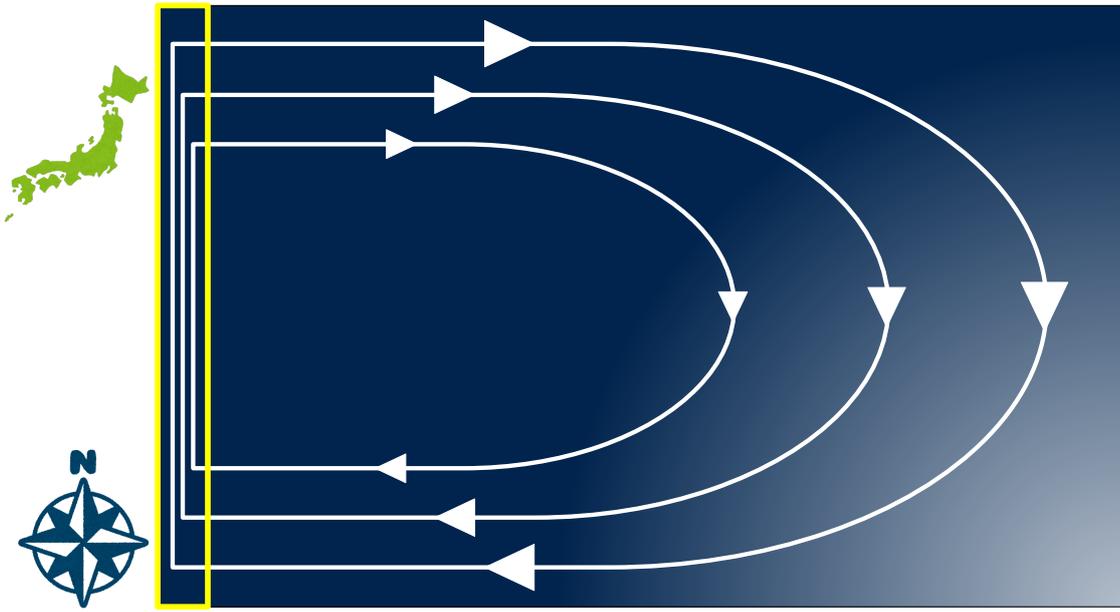
Harald Ulrik Sverdrup (1888-1957)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harald_Ulrik_Sverdrup_-_Alvin_\(167683\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harald_Ulrik_Sverdrup_-_Alvin_(167683).jpg)

この人です。

ノルウェーの海洋物理学者で、海流の体積流量の単位、スベルドラップ、は彼にちなんでいます。

なお、1スベルドラップは $10^6\text{m}^3/\text{s}$ です。



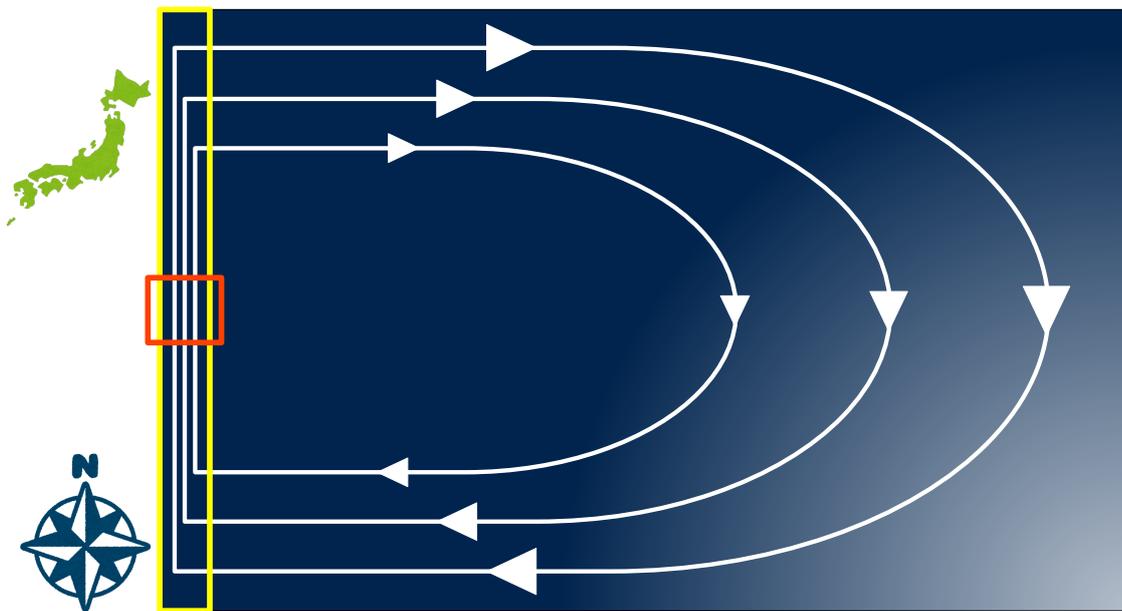
海洋内部領域を上から見た図

一方，西岸強化によって海洋西岸に現れる強い流れ
に目を転じると…

海洋西岸に現れる強い流れでは
北上する海水が
時計回りの循環を強めようとする働きと
西岸との摩擦抵抗が
時計回りの循環を弱めようとする働きと
が釣り合って平衡状態に達している

ここでは、北上する海水が時計回りの循環を強めようとする働きと、西岸との摩擦抵抗が時計回りの循環を弱めようとする働きとが釣り合って、平衡状態に達しています。

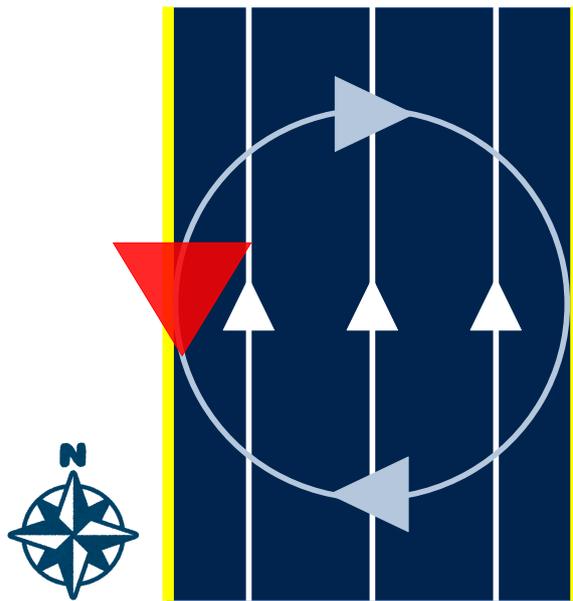
もう少し詳しく説明するために…



海洋内部領域を上から見た図

流れのこの部分を…

拡大してみます。



海洋西岸付近の拡大図

ここに存在する北上流は，惑星ベータ効果により…

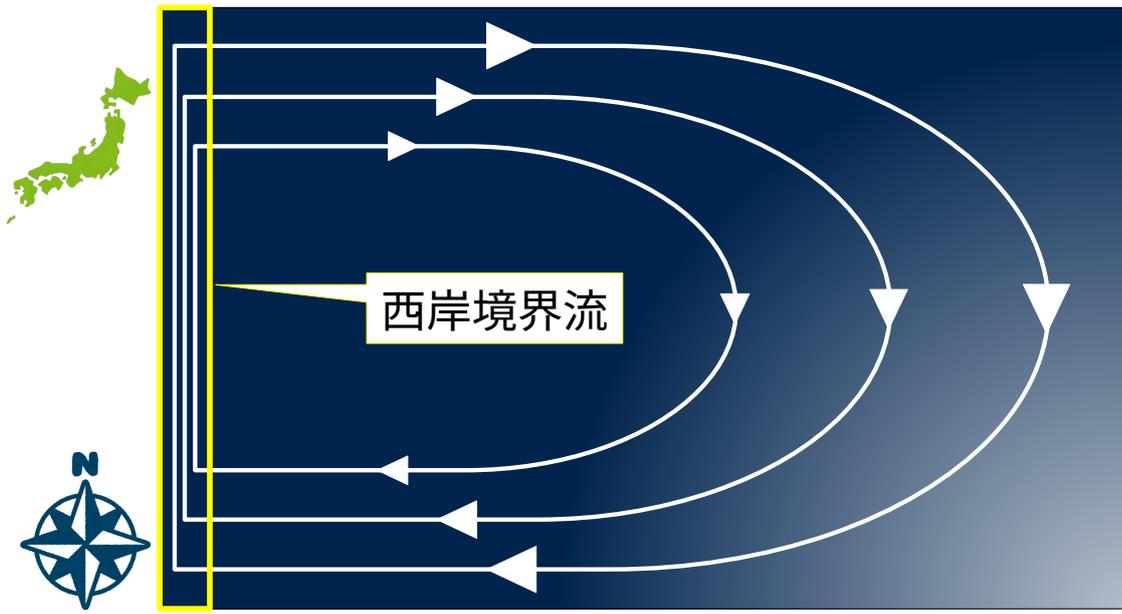
時計回りの循環を生成しようとしています．

一方，西岸が及ぼす摩擦抵抗は…

この時計回りの循環の生成を妨げようとしています．

これら2つの拮抗する作用が釣り合って，平衡状態が実現されているのです．

このような釣り合いのもとで流れる海洋西岸の強い流れを…



海洋内部領域を上から見た図

西岸境界流と呼んでいます。

そして、このような釣り合いのもとで西岸境界流が維持されていることを明らかにしたのは…



Henry Melson Stommel (1920-1992)

https://stommel100.whoi.edu/wp-content/uploads/sites/17/2019/03/AtlantisII_1965.jpg

このHenry Melson Stommelという人です。

アメリカの海洋物理学者で，惑星ベータ効果によって西岸強化が生じることを示したのも彼でした。



<https://encounteredu.com/multimedia/images/where-is-the-north-pacific-gyre>

以上で、如何にして時計回りの北太平洋亜熱帯循環が形成され、何故その西側に強い流れが現れるのかが明らかになりました。

古来より我々が親しんできた黒潮は、北太平洋亜熱帯循環の西岸境界流であったというわけです。



おしまい.

なお，下記webサイトにて提供されているイラストを使用させていただきました。

<https://www.irasutoya.com/>

<https://frame-illust.com/>

<https://chicodeza.com/>