

ホッケ柱

木村 龍治

1. はじめに

奥尻島の近海は、ホッケの生息地として知られている。ホッケは体長30 cmほどの魚であるが、浮き袋を持たないので、水中でも30 g程度の重量がある。そのため、遊泳するためには、重力に逆らって、水を下に蹴る必要がある。体力を消耗するので、普段は海底に着定し、海面から降ってくるプランクトンの死骸を食べて生活している。ところが、5月中旬、奥尻島近海の海面は、植物プランクトンが大繁殖する。それを食料とする動物プランクトン（主に、カイアシ類）も大繁殖する。ホッケは、この時期、新鮮なプランクトンを補食するために、海面まで上昇しようとする。ところが、海面の上には、カモメの群がホッケを待ちかまえている。海面まで上がれば、プランクトンは食べられるが、自分自身はカモメに食べられる、というジレンマが生じるのである。

カモメに食べられないで、プランクトンを食べるにはどうしたらよいか。ホッケにとって死活問題である。このジレンマを解決するためには、水面のプランクトンを水中に引き込めばよい。もともと、海面近くを遊泳するためには、水を下に蹴る必要があるので、下降する水流が生じる。その水流にプランクトンが巻き込まれてくれれば、海面まで上がらなくとも、プランクトンを補食できる。しかし、1匹の魚が引き起こす下降水流は微々たるもので、プランクトンを引き込むほどの力はない。しかし、1匹では微々たるものであっても、集団で行えば、話は別である。

第1図は、ホッケの群が、水面近くを遊泳している写真である。3万～6万匹が、直径3 m、高さ20 m

ほどの柱のような形になるので、ホッケ柱という。これだけの群になると、水中重量は0.9～1.8トンとなる。その重量を水中に支えるためには、1 m/s近くの下降流が必要になる（横に1列に並ぶのであれば、下降流の大きさは、どれほどの数でも1匹の場合と同じである。しかし、柱のように縦に並ぶ場合は、数によって、必要な下降流の大きさが増加する）。この下降流は、海面に群がっているプランクトンを水中に引き込むことができるだろうか。

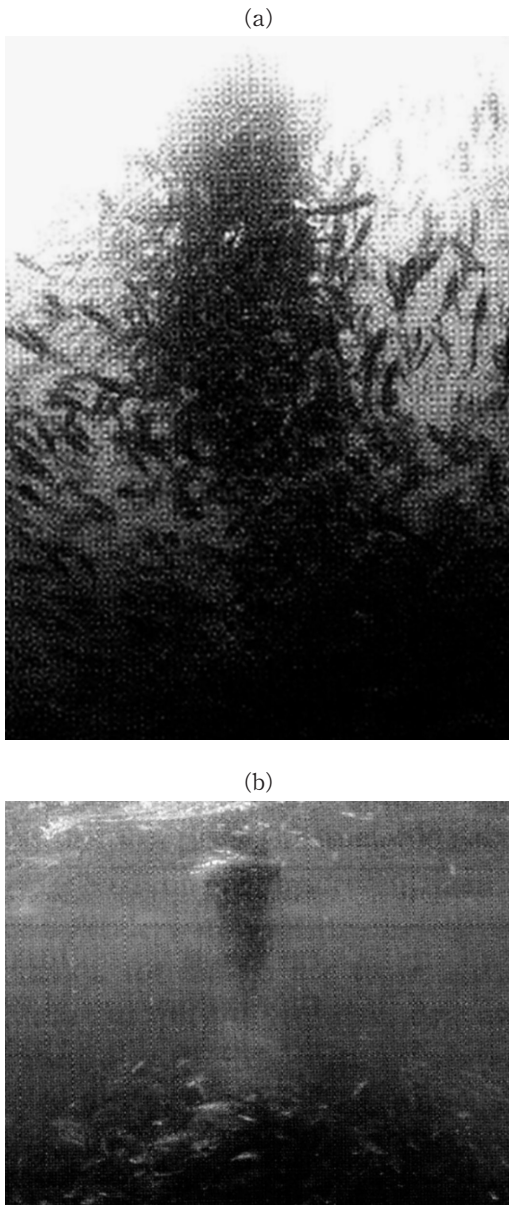
2. 現象のモデル化

現象を単純化するために、ホッケの群をひとつの物体として考えよう。ヘリコプターが空中にホバリングしているようなイメージである。ホバリングするためには、下向き水流を起こすことが必要である。その速度を V とする（第2図 a）。この水流は、まわりの海水に流れを起こす。ホッケ柱の上部では、海水がまわりから集まってくる。流れが集まることを収束という。一方、柱の下端では、下向きに吹き出した海水が四方に広がる。流れが広がることを発散という。ホッケが水を下向きに蹴ることによって、収束流や発散流が発生するのである。その流れはどのような構造になっているのであろうか。

参考になるのが、流体力学の教科書にある円筒周辺の流れであらう。静止している水中に、軸を水平にした円筒を一定速度 V で落下させると、そのまわりには、第2図 b のような流れが発生することが知られている。ホッケが作る下降水流の速度 V と円筒の落下速度 V が対応している。3次元と2次元の違いはあるが、定性的には、似た流れ場になるであらう。ホッケ柱は、上部から水を吸いこみ、下から吐き出すような構造になっている。吸いこむ水は、四方から集

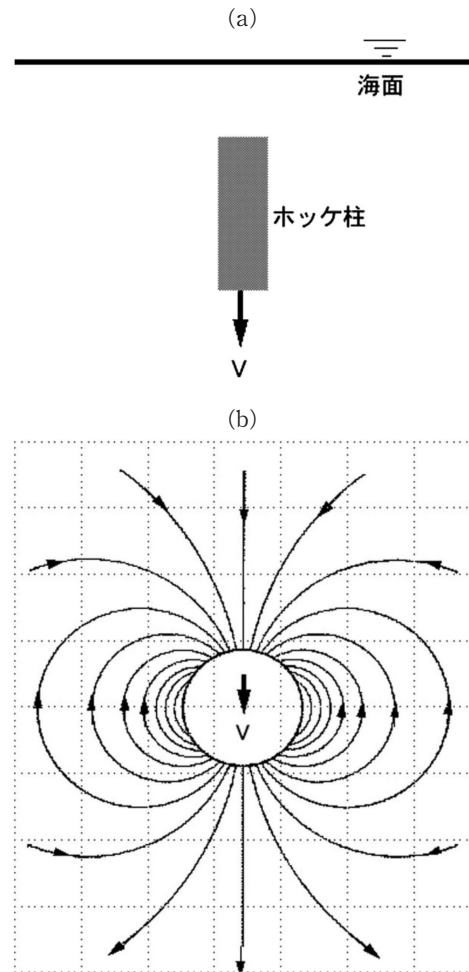
* Ryuji KIMURA, 放送大学.

© 2011 日本気象学会



第1図 ホッケ柱 (中川 隆氏撮影) (Kitagawa *et al.* 2011). (a) ホッケ柱の全体像. (b) ホッケ柱の上部. 柱の上に、竜巻のような渦ができています.

まってくるので、必ずしも、水面から来る水ばかりではない。水中から海水が集まってくるのであれば、そこには、プランクトンはいないので、プランクトンを水中に引き込むという目的を達成することはできない。第2図bの収束流を見ると、とても、水面から



第2図 (a) ホッケ柱のモデル化. (b) 速度 V で落下する円柱周辺の流れ (流線).

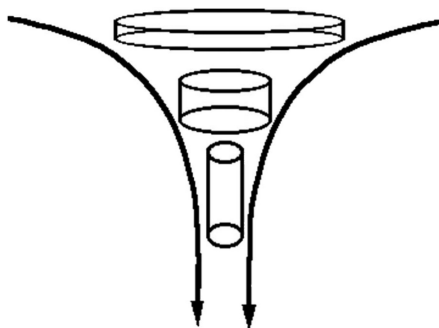
プランクトンを引き込むことができないような気がする。実際はどうか。

第1図bは、ホッケ柱の上部をクローズ・アップした写真である。何と、柱の中心に、竜巻のような渦巻きが発生し、その渦巻きにプランクトンが引き込まれて、ホッケ柱の中に送りこまれているのである。

3. 収束流と渦巻の形成

同じような現象は、風呂の栓を抜いたときにも観察される。一般に、収束する流れは、渦巻を形成しやすい。その理由は、以下のように説明される。

第3図のロート状の線は、収束する流れを示している。その中に引き込まれる流体の円板を考えてみよ



第3図 ロート状の流れに仮想的な円板が、変形しながら引き込まれていく様子。変形しても、体積が変わらない。

う。仮想的に、この円板は、コマのように一定の回転数で回転しているとす。半径によらず、一定に回転することを剛体回転という。円板がロート状の流れに引き込まれるにつれて、円板は変形して円筒形になるであろう。すると、最初はゆっくりした回転であっても、回転が速くなる。この事情は、フィギュア・スケートのスピンドで、スケーターが体を縮めると、回転が速くなるのと同じである（角運動量保存則）^{*)}。

^{*)} 円板の角速度を ω 、円板の厚さを h とするとき、 ω/h の値（渦位）が一定になるように変化する。この性質を渦位保存則という。

海面に竜巻のような渦ができるのは、渦に引き込まれる以前の海水がゆっくり回転していることを意味している。もしも、引き込まれる円板が回転していなければ、渦巻きはできない。そこで、あなたがホッケならば、渦巻きができる海域で、ホッケ柱を作りたいと思うであろう。それでは、海水が回転しているか、回転しないか、見分ける方法はあるだろうか。

4. 渦度の導入

流体力学では、流れを局所的に見て、流れが回転し

ているかどうか判定する。例えば、川の水面に桜の花びらが沢山浮かんでいる状況を考えてほしい。その中のひとつの花びらだけを観察してみよう。花びらは川の流れに流されて下流方向に運ばれていくが、そのとき、花びらが回転しながら流されるのか、回転しないで流されるのかを問題にする。厳密に言えば、水面に直交する軸のまわりの花びらの自転を問題にする。桜の花びらといえども大きさがある。流体力学では、花びらの大きさが無限に小さいと考え、その花びらが水面を埋め尽くしている、と考える。そうすれば、水面のあらゆる場所の微小花びらの自転速度が定義できるわけである。微小花びらの回転速度（厳密に言えば、回転角速度の2倍）を渦度と呼ぶ。渦度のない流体は、収束する流れがあっても、渦巻きができない。渦度のない流体の流れを「渦なし流れ (potential flow)」という。因みに、第2図bの流れは渦なし流れである。渦巻きのように見えるが、流線に乗った花びらは、回転しないで、流線に沿って動く。というわけで、あなたがホッケのリーダーであれば、仲間を渦度のある海域に導くことをお勧めしたい。

5. ホッケ柱に学んだこと

- 1) 鉛直流は収束・発散を伴う。
- 2) 収束流は、渦巻きを作る場合と作らない場合がある。
- 3) 渦度のない流体の中では、収束流があっても、渦巻きはできない。
- 4) 渦度のある流体の中に収束流ができると、渦度が増加して、強い渦巻きになる。

参考文献

Kitagawa, T., T. Nakagawa, R. Kimura, H. Niino and S. Kimura, 2011 : Vortex flow produced by schooling behavior of arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*. Fish. Sci., 77, 217-222.