

流体杭を利用した浮体の動揺抑制方法

古川 武彦*

An Oscillation Suppressing Method of Floating Structure by Hydraulic Anchor
by Takehiko Furukawa

Key Words: floating wind-power generation, anti-rolling

1. 緒言

浮体の動揺を防止あるいは抑制するためには、一般に索による係留のほか、浮体が船舶である場合は、投錨、アンチローリングタンク、フィンなどが用いられている。アンチローリングタンクは、左舷および右舷に置かれた一対の水タンクをパイプで接続し、ローリングの向きと逆向きに水を送ってトルクを与えることにより、動揺を抑制している。アンチローリングフィン、舷側にフィンを装備して、ローリングを抑制している。

流体中に置かれた浮体は、浮体に作用する波浪や風などの外力によって動揺するため、その抑制には上述の技術が用いられているが、これらとは全く異なる方法によって、浮体の動揺を防止あるいは抑制する技術が見出されれば、浮体を利用した風力発電プラント、洋上作業、通信塔、養殖などの分野で受ける利益は極めて大きい。また、船舶のローリング抑制に新たな手段を提供できる。

以下は、浮体の動揺を抑制するための「流体杭」についての提案である。

2. 流体杭の基本原理解

流体中に静止する浮体は、アルキメデスの原理を満足するよう力の平衡が成り立っている。Fig.1に示すように、上端が閉じ下端が開いた管体を水中に沈下させた後、管体の上端を懸垂しつつ上方に引き抜いてゆくと、管体の上端が水面より高くなった瞬間から、大気圧によって、水が管体内の上端まで自動的に押し上げられる。

説明の簡便のため、管体の断面積を一定とし、その水面からの高さを H とする。この状態で管体を静止させるためには、管体の自重に、高さ H の管体内の水の重量を加えた力と等しい力で、懸垂する必要がある。このような懸垂状態にある管体を便宜的に「流体杭 (hydraulic anchor)」, また懸垂に必要な力を「流体抗力」と呼ぶ。なお、管体の断面積が一定の場合は、流体抗力は高さ H に比例する。また、その最大値 H_{max} は、その場所の大気圧によって一義的に決まり、1気圧の場合は約10mである。

流体杭を H_{max} を越えて引き抜くと、管体内の上端が真空となるが、流体抗力は最大値のままで、それを超えては増大しない。ちなみに、断面積が 100m^2 の流体杭の上端を水面上、 $H=10\text{m}$ まで懸垂すると、流体抗力は1000トンである。

* 気象コンパス

原稿受付 令和2年3月6日
公開日 令和2年5月18日
春季講演会講演論文として投稿
©日本船舶海洋工学会

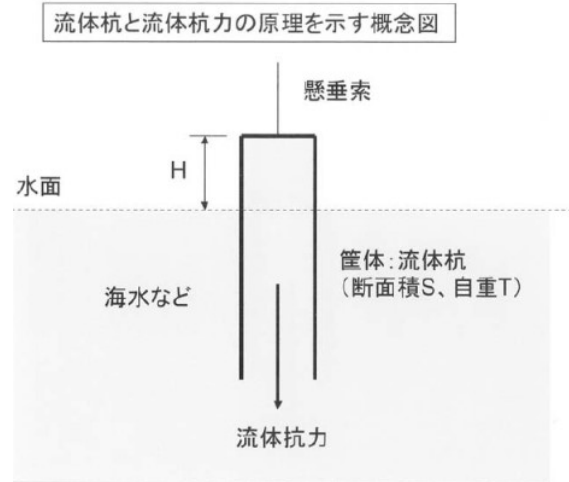


Fig. 1 An image of hydraulic anchor.

3. 流体杭の具体例

3.1 流体杭による浮体の平衡

Fig.2に示すように、あらかじめ浮体 F を任意の深度まで沈めた後、浮体から懸垂支持架を介して、同じ形状の一対の流体杭 $P1, P2$ を腕によって懸垂し、静止させる。

このアイデアは、以下に説明するように、浮体の動揺を抑制および復元する特徴を持つ。

一つは、このような一対の流体杭を利用して、浮体の慣性モーメントを増大させることができるため、外力が浮体を傾斜させようとする回転モーメント (トルクという) を抑止させることができることである。

二つは、浮体が外力によって傾斜しようとする時、必ずその傾斜と逆向きのトルクが生じることを利用して、浮体の動揺を抑制できることである。

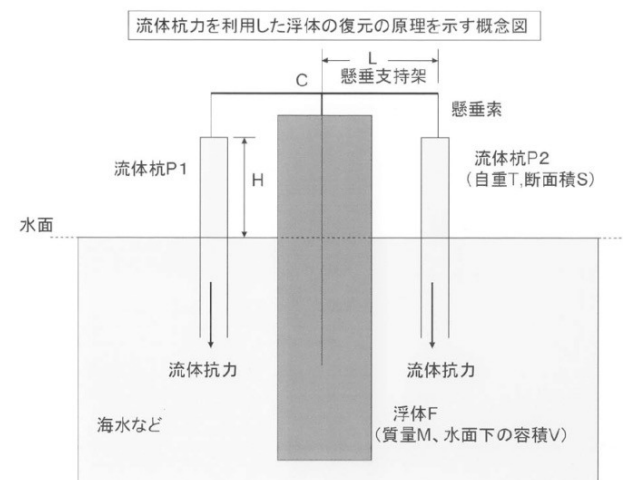


Fig. 2 An image of hydraulic anchor balance.

説明の簡便のため、浮体 F は円筒で自重は M、水面下の容積は V、流体杭 P1, P2 は同じ形状の円筒で断面積は S、自重は T、流体杭の腕の長さは L で、腕の自重はゼロとそれぞれ仮定する。また、流体杭の水面からの高さを H、流体の密度を ρ 、重力加速度を g とする。

Fig.2 で示す浮体を含む系を静止させるためには、系全体の鉛直方向の合力がゼロ、浮体の中心を通る水平軸および鉛直軸の周りのトルクの合力が、それぞれゼロとなるように調整することによって、実現できることは明白である。

すなわち、この系が静止するためには、鉛直方向の釣り合いは次の式が満たされる必要がある。

$$(M+2T+2SH\rho)g= V\rho g \quad (1)$$

次に、一对の流体杭 P1, P2 が持つ抗力による水平軸の周りのトルクはゼロであることは明白である。また、鉛直軸の周りのトルクもゼロであることは自明である。

したがって、この浮体に、風や波浪などの外力が働いて、浮体を傾斜あるいは回転させようとする力が加わった時、それを打ち消すような逆方向のトルクが常に自動的に生じれば、それらが復元力として働くので、浮体の傾斜および回転による動揺を抑止できる。

3.2 鉛直面内の動揺抑制

浮体の傾斜が抑制される様子を Fig.3 に示す。浮体 F が僅かに回転し傾斜した場合（回転角を θ とする）を考える。この時、流体杭 P1 は水中に沈下しようとし、P2 は逆に水中から引き抜かれようとする。P2 の水位 H2 は、P1 の水位 H1 に比べて必ず高くなるので、P2 による流体抗力は必ず P1 より大きくなる。したがって、必ず P2 を引き下げようとする方向にトルクが生じるので、外力による浮体の傾斜を元の状態に戻そうとする復元力が働く。すなわち、一对の流体杭が外的な鉛直面内の回転力に対して、常に復元力として作用するので、浮体を回転させようとする外力は抑制される。

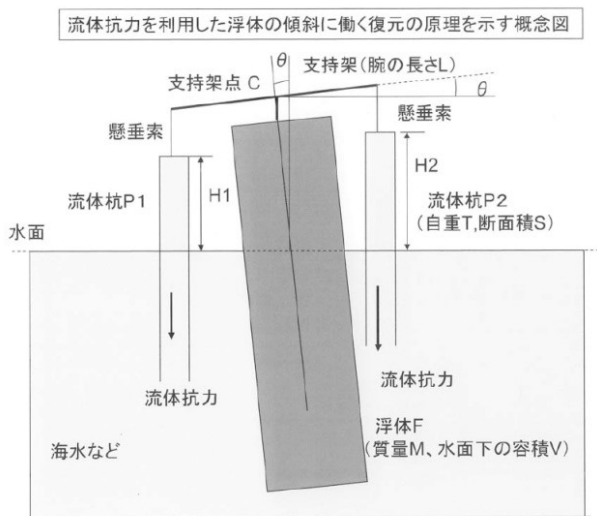


Fig. 3 Restoring torque by hydraulic anchor.

この場合の系の回転角加速度と復元のトルクの関係を述べる。Fig.3 において、 $\Delta H=H2-H1$ とすれば、P1 と P2

の流体抗力の差は $\Delta H \cdot Spg$ となるので、復元に寄与する正味のトルク N は、 $N=L \cdot \text{Cos}\theta \cdot \Delta H \cdot Spg$ となる。

一方、この系の懸垂支持架点 C の周りの慣性モーメント I は、浮体自体の慣性モーメントと一对の流体杭の慣性モーメントの和となる。

したがって、系は次式を満足するように運動する。

$$I \cdot d^2\theta/dt^2=N=L \cdot \text{Cos}\theta \cdot \Delta H \cdot Spg \quad (2)$$

なお、ここでは浮体の傾斜により浮心が変化することによる復元力は考えていないが、その力は、浮体を復元する方向に作用することは自明である。

強調すべきことは、この系では、復元のトルクは、一对の流体杭の水面からの高さ H の差に依存することである。したがって、初期の H がゼロでも、 ΔH が同じであれば、同じトルクを生じる。

このような系では、流体杭の懸垂支持架点 C の周りの慣性モーメントは、流体杭の高さ H が大きいほど、C の位置が高いほど、懸垂支持架の腕 L が長いほど、それぞれ大きくなる。したがって、流体杭の持つ慣性モーメントは、与えられた復元トルク N に対して、回転角加速度が小さくなるので、浮体の回転をより緩慢にすることができる。

3.3 鉛直軸の周りの回転の抑制

浮体とその中心を通る鉛直軸の周りに水平面内で回転するのを抑止する技術について説明する。説明の簡便のため、Fig.4 に示すように、浮体は外半径が L の円筒、流体杭を P とする。また、P を浮体側面に固定する際には、その接平面内で、鉛直から角度 α 傾斜させる。反時計回りの傾斜を正とする。

浮体の水平面内の運動を考える。1 個の流体抗力を F とすると、その水平成分は $F \cdot \text{Sin}\alpha$ だから、トルク N は $F \cdot L \cdot \text{Sin}\alpha$ となる。したがって、浮体および流体杭の鉛直軸の周りの慣性モーメントを I、回転角を θ とすると、一对の流体杭を持つ浮体は、次式を満足するように回転運動をする。

$$I \cdot d^2\theta/dt^2=N=2F \cdot L \cdot \text{Sin}\alpha \quad (3)$$

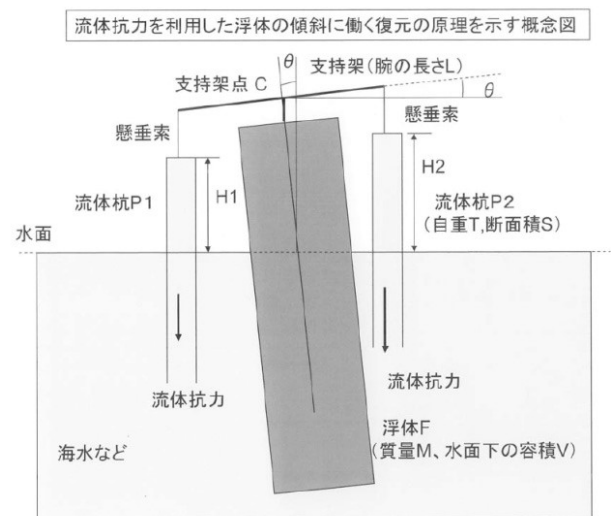


Fig. 4 An effect against rotation by hydraulic anchor.

このような浮体に、鉛直軸の周りに回転させようとする外力が加わった場合を考える。反時計回りの外力の場合を考える。この時、回転の向きは流体杭には上方に引き抜く方向に回転が生じるので、流体抗力が生まれる。と同時に流体杭は傾きを持っているので、流体抗力は水平成分を持つ。この水平成分は時計回りなので、外力による反時計回りの回転を妨げるように働く。したがって、外力に対する復元のトルクを生じる。

しかしながら、このような浮体に時計回りの外力が加わる場合は、流体抗力は生じない。この場合は、流体杭を逆に傾斜させておけば、上述の議論から、やはり復元のトルクが生まれる。詰まるところ、反時計回りあるいは時計回りの外力を抑制するためには、一对の流体杭を傾斜の方向が対称となるように配置すれば良いことがわかる。例えば、Fig.5のような配置が考えられる。

流体抗力による浮体の回転を抑制する流体杭の配置例

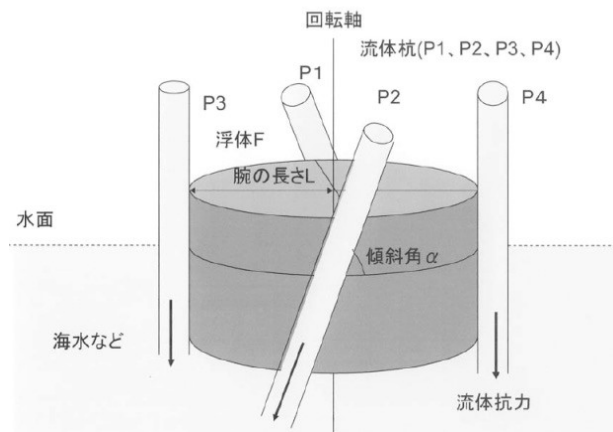


Fig. 5 An example of hydraulic anchor against rotation.

4. 動揺抑制システムの応用例

このアイデアを利用することによって、浮体を利用した風力発電プラント、波浪発電、浮体上での建築物、船舶のローリング抑制、浮体を利用した洋上作業、養殖施設などが可能となる。

Fig.6は浮体式洋上風力発電への応用例(鉛直断面)を示し、Fig.7は3次元の場合を示す。船舶のローリング抑制のためには、Fig.8に示すように、左舷と右舷に流体杭を装着することに可能となる。また、ピッチング抑制には、船首と船尾などに装着する。

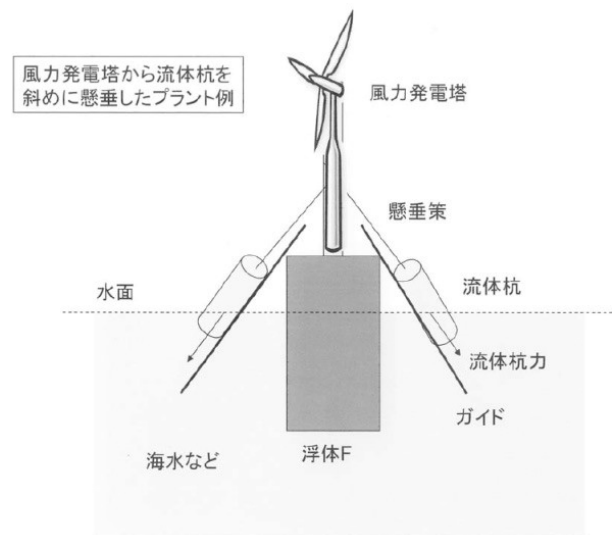


Fig. 6 An example for wind-power generation.

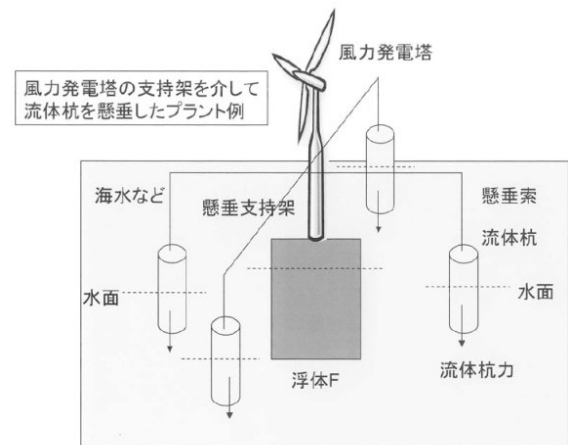


Fig. 7 A sample of hydraulic anchor for wind-power generation.

流体抗力を利用した船舶のローリング抑制概念図

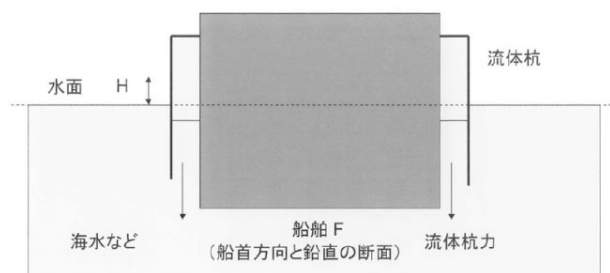


Fig. 8 An anti-rolling effect by hydraulic anchor.