

要 旨

シーバースの一つである一点係留ブイは液体貨物荷役用のブイであり、海底にユニバーサルジョイントで据付けられタンカと係留網で接続される。このブイの不規則な動揺が作業上問題となっている。本研究では、ブイが不動のタンカと係留網で接続されている系に、様々な大きさの定常波浪が作用されたときのブイの挙動を数値解析した。その結果、こうした系では係留網の種類と波浪条件によってはカオス的な振る舞いをする事がわかった。

1. 緒言

近年、原油輸送用のタンカーは輸送コストの低減のために次第に大型化されている。そのため、陸上へ荷揚げする施設は、建設費用や港の安全保証の面からシーバースが選択されるようになった。そのシーバースの一つである一点係留ブイ(図1)は、海底にユニバーサルジョイントで据付けられた鋼製円筒形ブイである。ブイは外力によって自由に動けるようになっているが、ブイの不規則な揺動による荷役作業中の事故の報告がある。こうした事故の原因の究明のためにも、ブイの挙動を明らかにしなければならない。今回、ブイは周期的な波力により駆動されるとした。係留網はブイの動きによって周期的に緩み張力に不連続を生じさせる。本研究では波力と係留網の長さと線密度とを変化させた場合のブイの非線形挙動を数値解析によって明確にする。

2. ブイの運動方程式

一点係留ブイに作用する外力は、重力、浮力、流体による粘性抗力、係留網による張力、波力とする。海上部分の空気抵抗は考慮していない。係留網は、長さ方向には伸びないが、直角方向に自由に曲がる事ができると考えている。波力は微小振幅波理論によって算出した。こうした外力がブイに働くとき、一点係留ブイのジョイント

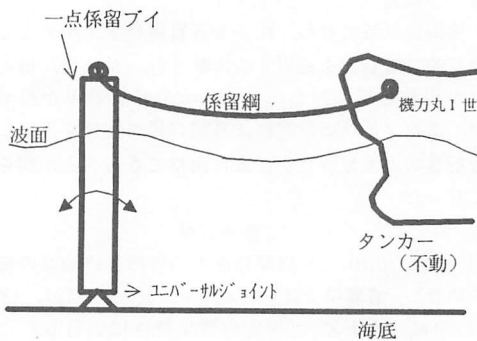


図1 一点係留ブイ

部を支点としたブイの運動方程式を立てると(1)式となる。(タンカーを不動なものとする)

$$I\ddot{\theta} = M_G + M_T - M_B - M_D + M_W \quad (1)$$

右辺の各項は、

$$\text{重力によるモーメント: } M_G = \frac{1}{2} H_A M g \sin \theta \quad (2)$$

浮力によるモーメント:

$$M_B = \frac{1}{8} (DH)^2 \rho g \pi \sin \theta \quad (3)$$

粘性抗力によるモーメント:

$$M_D = \frac{1}{8} C_D \rho D H^4 \dot{\theta}^2 \quad (4)$$

係留網の張力によるモーメント:

$$M_T = H_A (T_x \cos \theta + T_y \sin \theta) \quad (5)$$

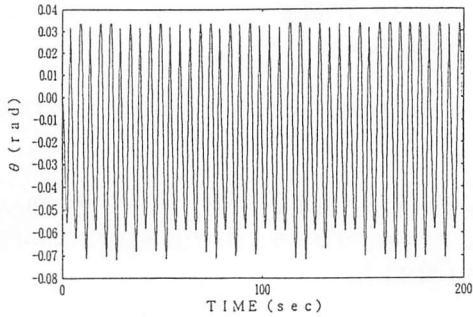
波力によるモーメント⁽¹⁾:

$$M_W = \rho g \pi D^2 A H - \left[\frac{\pi C_l}{4} \left\{ \tanh(kH) + \frac{1 - \cosh(kH)}{kH \cosh(kH)} \right\} \right. \\ \left. \cdot \sin(\omega t) + \frac{C_{DA}}{2D} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{kH}{2 \sin(2kH)} + \frac{1 - \cosh(2kH)}{4kH \sinh(2kH)} \right\} \right. \\ \left. \cdot \cos(\omega t) \cdot |\cos(\omega t)| \right] \quad (6)$$

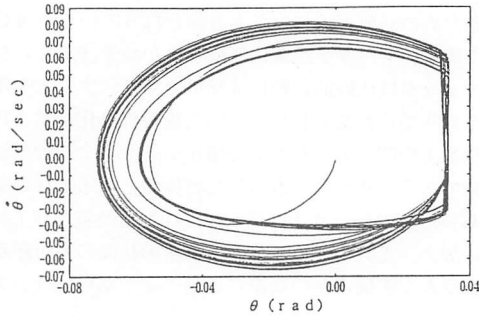
ここで、 I :ブイのジョイント部まわりの慣性モーメント、 θ :ブイの振れ角、 M :ブイの質量、 C_D :抗力係数、 C_l :質量係数、 D :ブイの直径、 H_A :ブイの全長、 T :係留網の張力、 k :波数、 A :1/2波高、 H :水深、 ω :波の角振動数、 g :重力加速度。

3. 数値計算

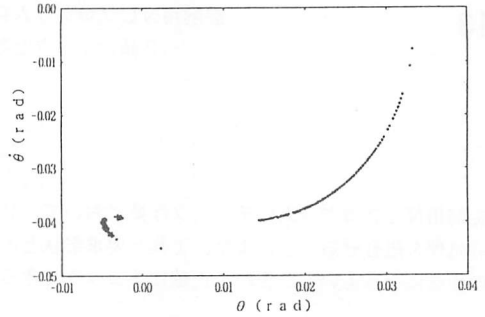
ブイの運動方程式(1)式は、非線形の微分方程式なため Newmark- β 法($\beta=1/6$, 刻み幅 $\Delta t=0.01$)を用いて数値計算する。ブイの諸量は、全長30.0(m)、直径3.0(m)、質量 11.7×10^3 (kg)の鋼製円柱とした。ブイとタンカとの距離は一定で18.0(m)にする。変動パラメータは、係留網の長さ⁽²⁾(18.5(m)から0.5(m)刻みで22.0(m)まで変化させる。)、係留網の線密度⁽²⁾(2.60, 5.31, 11.18, 14.03(kg/m))、波浪条件(気象庁風力階級(ビューフォートスケール)の2~5の4つの階級から求めた4種の波の周期(1.4, 2.4, 3.9, 5.4(sec)), 波長(2.0, 6.0, 16.0, 31.0(m)), 波高(0.09, 0.3, 0.88, 2.1(m))を用いる。⁽²⁾



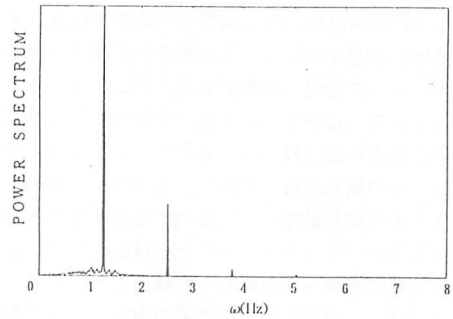
(a) 時系列



(b) 位相平面



(c) ポワソナ像(700点)



(d) パワースペクトル

図2 解析結果の例(波浪条件ビューフォースケール3(波高0.3(m), 波長6.0(m), 周期2.4(sec))
 , 網の長さ19.0(m), 網の密度5.31(kg/m))

初期条件(時間 $t=0$)は, 変位 $0.0(\text{rad})$, 角速度 $0.0(\text{rad}/\text{sec})$ とする. その時, 波の峰がブイの位置にあり右方向へ進行する.

4. 解析結果

数値計算の結果, パラメータを変化させる事によっていくつかの振動パターンに収束する事がわかった. ひとつはリミットサイクルで, 始めの過渡状態が大きくその後一定の周期運動に収束する振動パターンである. 収束速度の違いによって位相空間(位相平面に時間軸を加えた3次元の表現)での挙動が大きく異なるが, いずれにしても定常な挙動に収束し, 1本の閉曲線に収束する. また, 2種類の周期を持った挙動も現われた. この挙動の位相平面での軌道は2本に収束する. しかし最も注目しなければならないのはカオスの挙動である. その一例を図2に示す. この挙動では周期的な波浪にもかかわらず, ブイの振動は一定の挙動に収束する事はない. 時系列では振幅が時間に伴って不規則に変化している事がわかる(図2(a)). 位相平面の軌道はいくつもの軌道に分散し(図2(b)), ポワソナ像(周期的な駆動される振動系の位相空間を取り扱う標準的な方法であり, 時間が外力周期の整数倍になったときの断面をひとつの平面に写像して得られる点列である.)ではそのことを反映してばらけた点

列となる(図2(c)). 時系列データのパワースペクトルをとると, 大きなピークのほかにわずかなノイズが発生している(図2(d)). このノイズの発生は, 様々な周期を持つカオスの挙動の特徴を表すものである.

5. 結言

周期的な波動に駆動される一点係留ブイの挙動を数値解析した結果, 計算の初めに設定するパラメータ(波力, 係留網(長さ, 線密度))の違いによって周期的な挙動とカオス的な挙動が出現することが確認された. 波力がビューフォースケール2のときは周期運動のみが, スケール3~5では一部カオス的な挙動が出現した. 波力がスケール5のときはロープの線密度が小さいとき, 波力がスケール3, 4の時はロープの長さが短いときにカオスの出現の頻度が大きくなる.

カオス状態ではブイは定常振動しない. 定常かつ周期的な駆動力にもかかわらず不規則な振幅を持つ振動が出現するわけである. つまりこの解析の結果, 一点係留ブイの振動系は不規則揺動による事故発生の危険性をはらむと考える事ができる.

参考文献

- (1) 井島, 港湾工学, 朝倉書店
- (2) Jhon J. Myers, 海洋工学ハンドブック, ラテイス