

蓄力機能を有した弾性体を導入した つるべ式波力エネルギー変換装置の力学モデル

A Study on Dynamics for the Float-Counterweight Type Wave Energy Conversion Device with Energy Store

種浦圭輔¹・羽田野袈裟義²・Pallav KOIRALA³・松岡克弥⁴

Keisuke TANEURA, Kesayoshi HADANO, Pallav KOIRALA and Katsuya MATSUOKA

¹正会員 工修 山口大学助教 大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

²フェロー会員 工博 山口大学教授 大学院理工学研究科 (同上)

³学生会員 工修 山口大学 大学院理工学研究科 (同上)

⁴学生会員 山口大学 大学院理工学研究科 (同上)

The present paper gives the dynamics for the float-counterweight type wave energy conversion device which consists of pulley(s), wire(s), floats(s), counterweight(s), ratchet mechanism and tension pulley for the purpose of energy store. So far, authors have developed the mechanical dynamics model of the author's wave energy conversion device without tension pulley. The model has been found to be applicable by the preliminary test in the water tank experiment. However, it was recognized the wire between the driving pulley and the float can be slack in a period when water level is rising. This phenomenon is dangerous in operating the system, since wire suddenly changes form no tension state into stretched state when water level changes from ascending to descending. In this paper, the authors have developed the dynamics model which includes the effect of the tension pulley to prevent from the occurrence of wire slackening, and compared the results with those of the system without tension pulley.

Key Words : Wave conversion device, Tension pulley, Spring constant, dynamics model

1. 研究背景

近年、産業の発達と共に人間の経済活動が活発化し、地球温暖化問題で化石燃料に変わるエネルギー転換が求められる。現在、太陽光・風力・波力等を利用した自然エネルギーの研究が盛んに行われ、新エネルギーの開発が進められている。

当研究グループでは、つるべ式波力発電装置の開発を行っている。原理は図-1 に示す通り、水面上下動から反転を繰り返す駆動プーリの回転に変換し、これをラチェット機構により一定の向きの回転の動力に変換する。これはフレキシブルなワイヤの使用により浮体が柔軟に波に追従し、構造強度上の主要な課題を解決している。これまでの研究により、水面下降時にのみ発電を行なうのが合理的であることを見出した¹⁾。また駆動プーリとフロート間のワイヤ経路の途中にテンションプーリを挿入することで、水面下降時にエネルギーの一部を蓄え、水面上昇時にそのエネルギーを開放する仕組みを考案した。今回、この方式に対して力学モデルを構築し、バネの変位などについて基本的な検討を行っている。

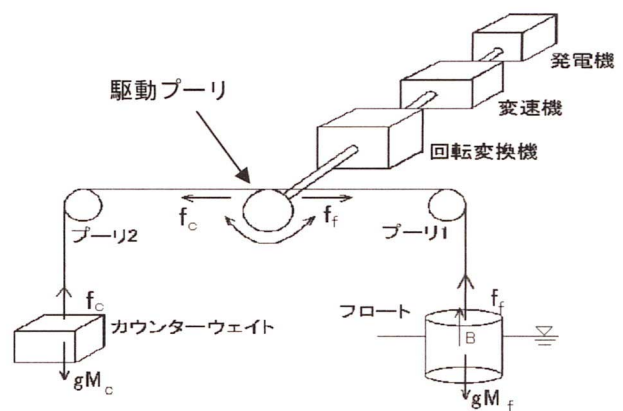


図-1 つるべ式波力発電装置の概略図。

今までに当研究グループによって構築された力学モデルは実験値とほぼ適合していることが確認されている¹⁾。本論では、その力学モデルをベースに、テンションプーリを駆動プーリとプーリ1の間に挿入した後の力学モデルを紹介し、様々な力学量を検討し、今後の装置の設計の参考を提示する。さらにテンションプーリの有用性を想定される発生電力から述べる。

2. 力学モデル

本章では、テンションプーリ挿入前の力学モデルを示す。発電機関連の力学、無負荷・静止状態での釣り合い式、発電機稼動状態におけるフロート・駆動プーリ間の動力学により構成される。これらの力学諸量や基礎式を組み合わせた計算式の誘導で構成されている。

(1) 発電機関連の力学

発電機が駆動プーリに及ぼす反時計方向のトルクを τ 、発電機に発生する電流を i 、発生電圧を e 、駆動プーリの反時計方向の回転角速度を $\dot{\theta}$ とすると、次式で与えられる。

$$\tau = -Gk_{\tau}i \quad (1)$$

$$e = Gk_e\dot{\theta} \quad (2)$$

ここで、 G はギア比、 k_{τ} はトルク係数、 k_e は誘導発電係数である。また、水面下降時のみ発電する場合、 $\tau > 0$ ($e = Gk_{\tau}\dot{\theta}$) となり、水面上昇時は

$\tau \leq 0$ ($\tau = 0, e = 0$) となる。

また、発電機の内部抵抗を r とすると、式 (3) は、オームの法則と式 (1) と (2) の関係より以下のように変形できる。

$$i = \frac{Gk_e\dot{\theta}}{r} \quad (3)$$

式 (3) を式 (1) に代入し整理すると、

$$\tau = -\frac{G^2k_e k_{\tau}}{r}\dot{\theta} \quad (4)$$

したがって、発生電力 P_G は次のようになる。

$$P_G = r \cdot i^2 = r \left(\frac{-Gk_e}{r}\dot{\theta} \right)^2 \dot{\theta}^2 \quad (5)$$

ここで、発生電力は駆動プーリの回転角速度の二乗に比例しているので、回転角速度が分かれば発生電力を求めることができる。

(2) 稼動状態でのフロートの運動方程式

水面静止位置からの上昇量を x_w 、フロート重心静止位置からの上昇量を x_f 、フロートに連結したワイヤ張力を f_f とし発電機を稼動させると、フロートの重心と水面位置の関係より、フロートと水との相対速度に起因する力（流体抵抗）とフロートや水の加速度運動に起因する力（慣性抵抗）が及ぼしあう。

前者は普通、相対速度の2乗に比例し、後者は物体が押しのけた水の質量と物体の加速度に比例する。それらを取り入れた抗力係数 C_D および仮想質量係数 C_M の運動方程式は次のような式になる。

$$M_f \frac{d^2 x}{dt^2} = f_f + \frac{\rho_w \pi d_f^2 g}{4} (h + x_w - x_f) - M_f g + F_1 + F_2 \quad (6)$$

ここで、 F_1 は水とフロートの相対運動により受ける力であり、 F_2 はフロートや水の加速度運動に伴う慣性抵抗である。つまり、式 (7)、(8) のようになる。

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho_w C_D \frac{\pi}{4} d_f^2 (\dot{x}_w - \dot{x}_f) |\dot{x}_w - \dot{x}_f| \quad (7)$$

$$F_2 = -\frac{1}{4} C_M d_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) \frac{d^2 x_f}{dt^2} \quad (8)$$

(3) 回転体の運動方程式

次に、発電状態における駆動プーリの運動方程式を考える。駆動プーリの無負荷・静止状態からの回転角を θ 、機械系の粘性減衰係数を C 、回転体全体の慣性モーメントを I 、プーリの半径を R_m とすると、次式で表すことができる。

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} = \tau + (f_c - f_f) R_m \quad (9)$$

(4) 計算式の誘導

今まで記述した基本式を組み合わせ、駆動プーリの回転角を支配方程式へと誘導することにより、諸量の時系列を求めることができる。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{I}{R_m} + (M_c + M_f) R_m + \left\{ \frac{\rho_w C_M d_f^2}{4} (h + x_w - R_m \theta) \right\} R_m \right] \frac{d^2 \theta}{dt^2} \\ & + \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G^2}{r} k_{\tau} k_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho_w g \pi}{4} d_f^2 R_m \theta \\ & = \frac{\rho_w g \pi}{4} d_f^2 x_w + \frac{1}{8} \rho_w \pi C_D d_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

3. テンションプーリの導入

(1) 導入背景と効果

従来型のつるべ式波力エネルギー変換装置は、波高が高い水面波において、速いサイクル時に水面の上下動が起こる。速い水面上下動により一時的に大きなワイヤ張力が発生すると同時に発電機のピークが生じ、これらに対応するためには、発電・充電機容量、平滑回路、動力伝達系を大きくする必要があり、装置全体のコストが高くなる。この不都合を解消するために、回転系のトルクを伝達する部分に対して、ゼンマイバネまたはゼンマイバネと同等の機能を持つコイルバネ等が提案されてきたが、大掛かりな作業で現場での設置に困難を伴い、模型装置に

関してもほとんどテストが行なわれていない状況である。テンションプーリは、ワイヤ張力のみで動力伝達する部分を有する本方式の波力エネルギー変換装置において、水面波の1サイクル中のエネルギー変換率やワイヤ張力の変動を平準化してそれらの極大値を抑え、装置の安全性や耐久性を向上させると共に、エネルギー変換機や動力伝達系の小容量化・経費削減を図ることを目的とする。

また装置は波高が高く、サイクルが速い水面波において、フロートが宙吊りになったり水中に没したりする状態が多く発生する。フロート宙吊り状態では水面が下降してワイヤ張力が過大になる時に生じ、フロート全没水状態では水面上昇時にワイヤが緩みがちとなり、大変危険な状態が続き、装置の故障等を引き起こす原因となる。この問題を解決するために、エネルギー貯蔵施設として駆動プーリとフロート間のワイヤ経路中に「テンションプーリ」を設置し、水面下降時にエネルギーの一部を貯蓄し、水面上昇時に貯蓄されたエネルギーを開放することで、ワイヤ張力の変動が平滑化されるのでフロートが宙吊り状態、全没水する状態が発生しにくい。したがって、エネルギー利得の点で大幅に改善でき、装置の安全性・小容量化や耐久性を向上させる効果があり、装置全体の低コスト化が期待できる。

テンションプーリの基本的な実施形態は、テンションプーリを伸縮部材の支持バネまたはピストンロッドなどの先端部に回動自在に軸支された状態とし、自由に浮遊するフロートが水面波により上下運動する。高い波によりフロートが大きく下降すると、ワイヤ張力も大きくなり、テンションプーリは支持バネを下方に収縮させる。このときワイヤが移動し、圧縮力が働きエネルギーが貯蔵され、フロート上昇時に貯蓄されたエネルギーを放出する「圧縮バネ方式」と、フロートの上昇下降をテンションプーリによりワイヤ張力を平滑化させ、特にワイヤ移動を安定させる効果がある「引張バネ方式」がある。設置方法は、駆動プーリ・固定プーリ・テンションプーリの支持部を1つの桁（架台）に固定し、フロート側の駆動プーリと固定プーリ間に設置する。また、防波堤に設置することも可能である。

(2) テンションプーリ導入後の力学モデル

ここでは、テンションプーリの力学モデルを説明する。水面とフロートが下降してワイヤ張力が過大になる時、駆動プーリからテンションプーリまでワイヤが移動した長さを l_1 、テンションプーリから固定プーリ2までワイヤが移動した長さを l_2 、駆動プーリからテンションプーリ間の支持バネにより変位したワイヤの長さを Δl_1 、テンションプーリから固定プーリ2間の支持バネにより変位したワイヤの長さを Δl_2 、テンションプーリから駆動プーリにか

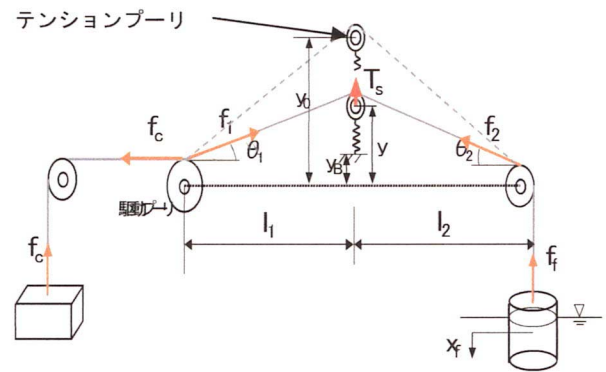


図-2 蓄力機能のある弾性体を導入したつるべ式波力発電装置の動力変換図

かるワイヤ張力を f_1 、テンションプーリから固定プーリ2にかかるワイヤ張力を f_2 とする。蓄力エネルギーを開放する力 T_s の式は、図-2のテンションプーリ導入後の機械力学より、水平成分と鉛直成分の力はそれぞれ以下ようになる。

$$f_1 \cos \alpha_1 = f_2 \cos \alpha_2 \quad (11)$$

$$T_s = f_1 \sin \alpha_1 + f_2 \sin \alpha_2 \quad (12)$$

ここで、駆動プーリ側のテンションプーリの回転角を α_1 、固定プーリ側のテンションプーリの回転角を α_2 とする。またワイヤ移動量とワイヤ減少量の関係より、次式が成り立つ。

$$l_1 + \Delta l_1 = \sqrt{l_1^2 + y^2} = l_1 \sqrt{1 + \left(\frac{y}{l_1}\right)^2} \quad (13)$$

ここで、テイラー展開をすると、

$$l_1 + \Delta l_1 = l_1 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{l_1} \quad (14)$$

同様に、

$$l_2 + \Delta l_2 = l_2 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{l_2} \quad (15)$$

したがって、式(12)は次のようになる。

$$T_s = f_1 \sin \alpha_1 + f_2 \sin \alpha_2 = f_1 \frac{y}{l_1 + \Delta l_1} + f_2 \frac{y}{l_2 + \Delta l_2} \quad (16)$$

式(14)、(15)を代入すると、次のような式が得られる。

$$T_s = f_1 \frac{y}{l_1 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2 \right\}} + f_2 \frac{y}{l_2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_2} \right)^2 \right\}} \quad (17)$$

さらにHookの法則から、

$$T_s = k(y_0 - y)$$

$$= f_1 \frac{y}{l_1 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2 \right\}} + f_2 \frac{y}{l_2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_2} \right)^2 \right\}} \quad (18)$$

ここで、式 (11) は次のような関係となる.

$$f_2 = \frac{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_2} \right)^2}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2} f_1 \quad (19)$$

式 (18) に式 (19) を代入し、整理すると平衡点 y の式が得られる.

$$y = \frac{k}{\frac{f_1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2} \cdot \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) + k} y_0 \quad (20)$$

ここで、 y は平衡点、 y_0 は支持バネの自然長、 k はバネ定数である. ただし、バネ定数 k は支持バネの材質によって変化し、逐次計算により平衡点 y を求めることができる.

(3) 計算条件

最も基本的な波として正弦波を与え、初期条件 ($t=0$) までは発電機との連結をクラッチ・オフの状態になり、発電機が稼動するものとする. また定常な水面波で発電機の稼動を開始するとき、解は初期の過渡的なものから定常的なものへと変化していく. 本システムは水面最高時を初期時刻としている. この場合、水面変動は式 (21)、初期条件は式 (22) となる.

$$x_w = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (21)$$

$$\theta(0) = \frac{H}{2R_m}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \quad (22)$$

となる. またこの時フロートのワイヤ張力は、

$f_f = f(x_c, y_s, \Delta l_s, q_1)$ の関係が成り立つ.

② 静止つりあい時の $y = y_s$ を計算

式 (20) の平衡点 y の式より、駆動プーリからテンションプーリまでワイヤが移動した長さ l_1 、テンションプーリから固定プーリ2までワイヤが移動した長さ l_2 、支持バネの自然長 y_0 、バネ定数 k の値を与え、逐次計算より平衡点 y を決定する. そして Δl は式 (23) を得る.

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 \quad (23)$$

次に駆動プーリの回転角 θ からフロートのワイヤ張力 f_f を求め、フロートのワイヤ張力 f_f と平衡点 y から、全体のワイヤ減少量 Δl を算出する.

$$\Delta \theta = \frac{\Delta l_{NEW} - \Delta l_{OLD}}{R_m} \quad (24)$$

ここで Δl_{NEW} は追加されたワイヤ減少量、 Δl_{OLD} は従来のワイヤ減少量である. よって式 (24) より回転角 θ の決定する.

$$\theta = \theta + \Delta \theta \quad (25)$$

4. テンションプーリ導入後の力学量

(1) 装置稼動時における平衡点の変動比較

図-3、図-4 にバネ定数が異なる場合の平衡点とフロート・水面変位の時系列変化を、図-5 に平衡点振幅・ワイヤ長の時系列変化を示す. ある装置稼働時間における平衡点、フロート・水面変位の変動比較、またバネ定数が変化すると平衡点振幅・ワイヤ長の変化量がどのような変動が見られるか検証を行なった.

図-3 よりバネ定数 $k=1\text{kN/m}$ の場合、フロート上昇時の波形が平衡点の波形と一致することから、支持バネが伸び、フロート下降時についても平衡点の波形と一致することから、支持バネが圧縮していることが確認できる. また、水面上昇下降時についても同様な効果が見られた. さらに、平衡点の変動が大きいので、支持バネにエネルギーが貯蓄されやすい. それに対し図-4 に示すバネ定数 $k=50\text{kN/m}$ の場合、平衡点の変動が小さく、平衡点 y がバネ自然長 y_0 に近づくことから支持バネにエネルギーが貯蓄されにくい. また図-5 について、平衡点振幅とワイヤ長の変化量が類似した曲線を描いている. 両者ともにバネ定数 k が 20kN/m 以上になると振幅が小さくなることから、支持バネの効果はあまり期待できない. したがって、平衡点振幅とワイヤ長の変化量が大きい部分、バネ定数 k が $1 \sim 5\text{kN/m}$ の支持バネを適用すると、テンションプーリの効果を高く評価することができる.

(2) テンションプーリ導入による発生電力評価

テンションプーリの優位性として、導入前と導入後の電力評価を行う. 装置諸元は駆動プーリ半径 $R_m=0.28\text{m}$ 、慣性モーメント $I=1.976\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、機械系の減衰係数 $C=567\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 、発電機の誘導発電係数 $k_e=0.764\text{V/rpm}$ 、トルク係数 $k_t=1.284\text{N}\cdot\text{m/A}$ 、内部抵抗 $r=0.26\Omega$ に設定した. また比重 0.9 のフロートを

使用し、直径と高さを3mにし、実機を想定して検討を行った。またバネ定数を種々変化させ、最も効果的なバネ定数の検討を行っている。その結果を図-6に示す。図中の縦軸は発生電力であり、最小値14.44 kWはテンションプーリを導入する前の平均発生電力の値である。バネ定数が大きくなると、バネの効果が小さくなり、テンションプーリ導入前の発生電力の値に漸近する。またバネ定数が小さすぎても同様な結果が得られる。これはテンションプーリが非常に大きく揺れ、電力獲得を阻害しているのではないかと推測できる。つまり、バネ定数は最適な値が存在し、この装置の場合、バネ定数は約5kN/mである。

次にテンションプーリ導入後の電力の時間変化を示す。特に波浪の変化によって、電力がどのように推移しているのか判断する。図-7は同じ装置の諸元を用い、各周期での電力変化を示している。また波高は1.0mと設定した。これにより周期4秒の時、発生電力は最大であった。これはこのシステムの固有周期と波の周期が一致したためだと考えられる。この共振特性による評価は、本研究グループによって、現在様々なアプローチが行われている。

5. 結語

つるべ式波力エネルギー変換装置について、力学モデル、テンションプーリの概要と力学概念について検討を行なった。その結果を記す。

- (1) テンションプーリを導入することで、従来のワイヤ張力の問題を解消でき、装置の安全性・小容量化や寿命を向上させ、装置全体の低コスト化が見込まれる。
- (2) テンションプーリ導入後の機械力学モデルを構築し、テンションプーリ導入後のシミュレーション計算を行い、バネ定数 $k=5\text{kN/m}$ 、駆動プーリからテンションプーリまでワイヤが移動した長さを $l_1=2\text{m}$ 、テンションプーリから固定プーリ2までワイヤが移動した長さを $l_2=2\text{m}$ の時、支持バネに貯蔵されるエネルギーが最も大きく、テンションプーリの効果を高く評価した。
- (3) テンションプーリを導入することにより、獲得電力は大きくなった。しかしその電力は期待していたより小さかった。これはテンションプーリの規格と装置の規格が適合していないためだと考える。今後、さらにこの検証を行う必要がある。
- (4) 各周期による電力評価を行った。それによると、ある周期で電力が大きくなることが確認され、本システムの固有周期と波の周期が一致し、共振運動に近い現象が起こっていることが確認された。

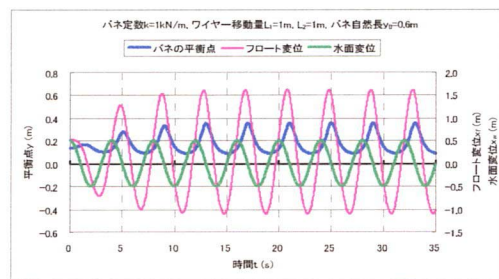


図-3 フロート・水面変位と平衡点の時系列 (バネ定数 $k=1\text{kN/m}$)

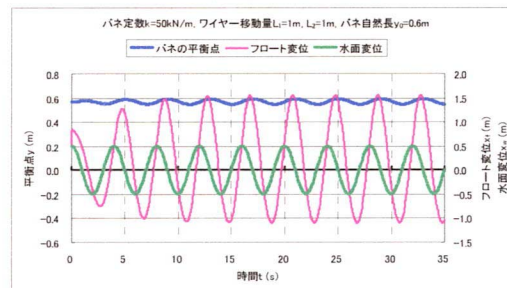


図-4 フロート・水面変位と平衡点の時系列 (バネ定数 $k=50\text{kN/m}$)

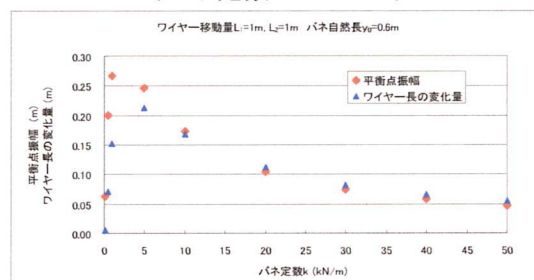


図-5 平衡点振幅とワイヤ長の時系列変化

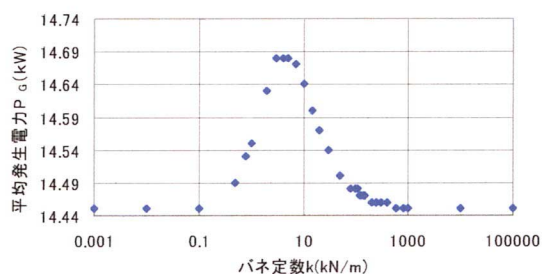


図-6 種々のバネ定数における平均発生電力

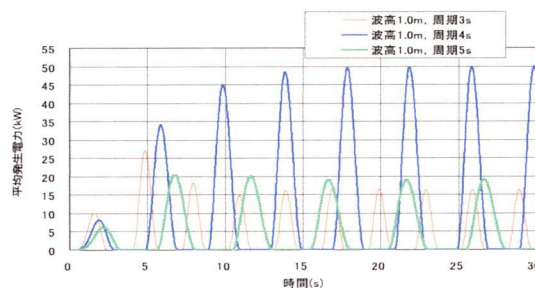


図-7 各周期による平均発生電力の時間変化

参考文献

- 1) 羽田野袈裟義, 種浦圭輔, 渡邊誠, 中野公彦, 斉藤俊, 松浦正己: 浮体式波力エネルギー変換の力学, 土木学会論文集 B Vol.62 No.3, 270-283, 2006.8