

粘弾塑性体モデルによる底泥移動量の評価法

柴山 知也*・青木 徹**・佐藤 慎司*

1. 緒 言

波が作用する下での底泥の挙動を明らかにすることは、港湾の建設、管理や大河川の河口付近の環境問題を考える上で重要である。この問題は発展途上国などで人口の圧力から森林の消滅が続き、結果として流出した表土が河川から海岸に達することにより、ますます深刻な問題となりつつある。バングラデシュのガンジス川河口、中国の揚子江河口などはこの例である。

本研究の目的は、中野ら(1987)が Dalrymple and Liu の粘性流体モデル(1987)を拡張して構成した多層モデルに、新たに弾性の影響および弾性限界の効果を加えた粘弾塑性体多層モデルを構築して底泥の挙動を説明することである。さらに本論文ではこのモデルを用いて底泥の波による輸送量を定量的に予測する方法を提案する。

2. 粘弾塑性体多層モデル

(1) 数値モデルの概要

Dalrymple and Liu の粘性流体モデル(1978)を、中野ら(1987)が Bingham 流体に対応するために粘性流体多層モデルに拡張した。これらのモデルでは底泥の含水比が小さいなど層内の応力分布が弾性限度内にはいる場合に底泥の運動を大きく見積りすぎることが柴山ら(1988)により指摘されている。本研究では低い含水比の底泥の挙動を説明するために、さらにこのモデルを粘性係数を複素数化し、境界条件を修正することによって、弾性変形および弾性限界を越えた後の塑性変形をも考慮し得る粘弾塑性体多層モデルに拡張した。

今、第 j 層において、移流項を無視した運動方程式を考える。(水平方向に x 軸、鉛直方向に z 軸をとる)。

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial x} + \nu_{ej} \left(\frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} \right) \cdots (1)$$

$$\frac{\partial w_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial z} + \nu_{ej} \left(\frac{\partial^2 w_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_j}{\partial z^2} \right) \cdots (2)$$

ここで粘性係数 ν_{ej} を Mcpherson(1980) にならって以

下のように複素数で与える。

$$\nu_{ej} = \nu_j + i \frac{G_j}{\rho_j \sigma} \cdots (3)$$

ν_j は粘性係数、 G_j は弾性係数、 ρ_j は密度、 σ は角周波数である。ここで実数部は粘性の影響を、また虚数部は弾性の影響を与えることとなる。以下 u , w , p (圧力) η (界面変位) について (4) に示すような周期解を仮定する。 k を波数として

$$u_j = \hat{u}_j e^{i(kx - \sigma t)}, \quad w_j = \hat{w}_j e^{i(kx - \sigma t)}, \\ p_j = \hat{p}_j e^{i(kx - \sigma t)}, \quad \eta_j = \hat{\eta}_j e^{i(kx - \sigma t)} \cdots (4)$$

他に以下の連続式を用いる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial w_j}{\partial z} = 0 \cdots (5)$$

(1), (2), (5) に (4) を代入し、未知数は以下に示す境界条件を用いて決定する。境界条件の式は多層粘性流体モデル(中野ら, 1987)とほとんど同様に以下のように示される。

水面において ($z = \eta_1 + h_1$)

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial t} = w_1 \cdots (6)$$

$$p_1 - 2\rho_1 \nu_1 \frac{\partial w_1}{\partial z} = 0 \cdots (7)$$

$$\rho_1 \nu_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial w_1}{\partial x} \right) = 0 \cdots (8)$$

界面において ($z = -\sum_{l=2}^j h_l$, $z=0$ は水泥界面を表わす)。

$$\frac{\partial \eta_{j+1}}{\partial t} = w_j \cdots (9)$$

$$u_j = u_{j+1} \cdots (10)$$

$$w_j = w_{j+1} \cdots (11)$$

$$p_j - 2\rho_j \nu_{ej} \frac{\partial w_j}{\partial z} - \rho_j g \eta_j = p_{j+1} - 2\rho_{j+1} \nu_{e(j+1)}$$

$$\frac{\partial w_{j+1}}{\partial z} - \rho_{j+1} g \eta_{j+1} \cdots (12)$$

$$\rho_j \nu_{ej} \left(\frac{\partial u_j}{\partial z} + \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) = \rho_{j+1} \nu_{e(j+1)} \left(\frac{\partial u_{j+1}}{\partial z} + \frac{\partial w_{j+1}}{\partial x} \right)$$

$$\cdots (13)$$

底面において ($z = -\sum_{l=2}^n h_l$)

$$u_n = 0 \cdots (14)$$

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 正会員 工修 大林組

$$w_n=0 \dots\dots\dots (15)$$

さてこのようなモデルで計算を行うと、柴山ら(1988)に示されているように、泥層厚、波の周期などの条件により、泥層の固有振動周期と一致してしまい、共振現象を起こし泥層の運動が非常に大きくなる場合が生じてくる。ここでは底泥の弾性限界を導入し、これを越えるような応力が作用した場合には降伏して粘塑性体となるものとした。具体的には弾性による応力を計算し、弾性限界を越えた場合には降伏応力で弾性の寄与分を見積ることとなる。

(2) 諸係数の決定

次にこのモデルを用いて計算するために必要な物性値である粘性係数、弾性係数、弾性限界などの値の決定方法について述べる。まず一般の同心円筒二重型の測定器では粘性係数を求めることはできても弾性係数を求めることはできない。さらに界面での no-slip 条件が確保できないなどの問題もある。そこで本研究では Nakagawa (1952) にならって、内円筒を振動型にすることにより弾性係数と粘性係数を各振動周期毎に求めた。図-1 に粘

弾性測定装置の概念図を示す。この測定法の詳細に付いては青木ら(1989)に記述を譲ることとし、ここではモデル計算に必要なことに絞って述べる。本研究においては振動の周期、底泥の含水比、ずり速度別に粘性係数、弾性係数を測定した。図-2 に弾性係数の測定例を周期 1 秒、2 秒および 3 秒の場合について含水比別にずり速度の関数として示す。実際の計算に当たっては粘性係数については鶴谷ら(1986)の結果を参考にしつつ決定し、また弾性係数に付いては今回の測定結果を元に外挿及び内挿をして求めた。

次に降伏応力の決定について述べる。大坪ら(1981)によればカオリナイトの流動曲線には 2 つの流動曲線が存在する。図-3 に彼らの流動曲線の模式図を示す。このうち τ_{y1} は粘土が流動するのに必要なせん断力で Bingham 降伏値に相当する。一方、 τ_{y2} は弾性限界に相当するものと考えられる。従って、ここでは τ_{y2} を降伏値として用いるのが適当であろうと思われる。彼らのデータを横軸を含水比として整理すると図-4 の様に表される。この図から回帰式を求めた。すなわち以下の式で降伏値 τ_y を与えた。(W を含水比として)

$$\tau_y = 1.47 \times 10^8 \times W^{-2.88} \text{ (dyne/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (16)$$

この他にモデルの適用に当たっては、泥層内の鉛直方向の含水比分布、弾性限界に対する周囲拘束圧の影響なども考慮している。泥層内の含水比の鉛直分布については図-5 に示す中西(1987)の結果を参照して粘土層中央での含水比に対して表面で +15%、底面で -15% となるように二次曲線で分布を与えた。また周囲拘束圧の影響に関してはカオリナイトのように圧縮性の低い粘土のせん断定数は拘束圧の平方根に比例すると考えて、自重による有効応力の平方根を弾性係数および粘性係数に乗じて局所的な係数を求めた。

(3) 数値モデルの計算結果の検討

以上の方法により構築したモデルによって計算した結果を示す。図-6 に (1) 底泥層の全層が降伏する場合 (G の値は 20 dyne/cm^2 と非常に小さい)。 (2) 底泥層の

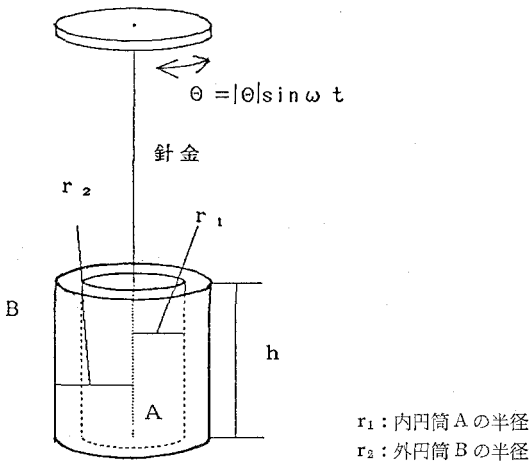


図-1 粘弾性測定用の振動型同心二重円筒装置

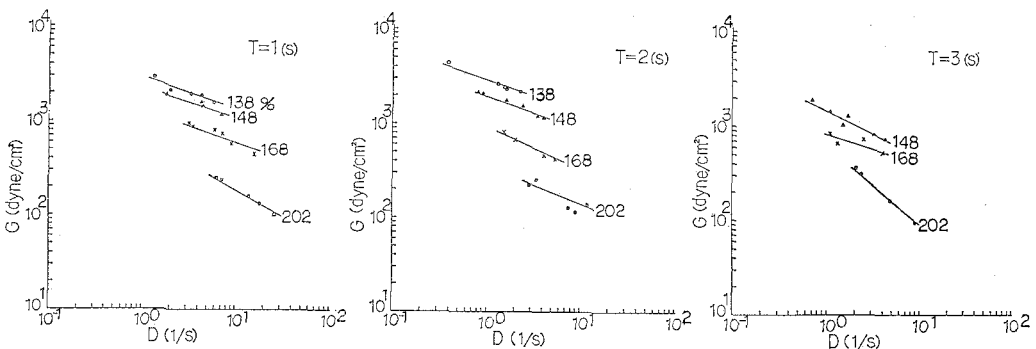


図-2 弾性係数の測定例 (図中の数字は含水比を表わす)。D : ずり速度

上層が降伏する場合 (3) 底泥層の中間層で降伏が起こる場合 (4) 全層が降伏しない場合に分けてそれぞれの含水比分布, 粘性係数分布, 弾性係数分布, 底泥粒子の軌道振幅 (u_{xx} は水平方向, u_{zz} は鉛直方向を表す) を示してある. この図より本モデルが各種の条件に対して適用

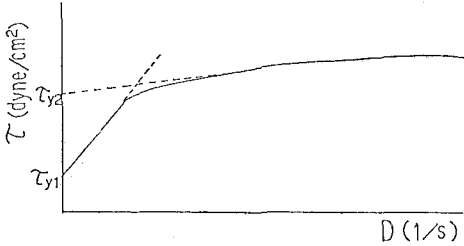


図-3 カオリナイトの流動曲線(大坪・村岡, 1985)

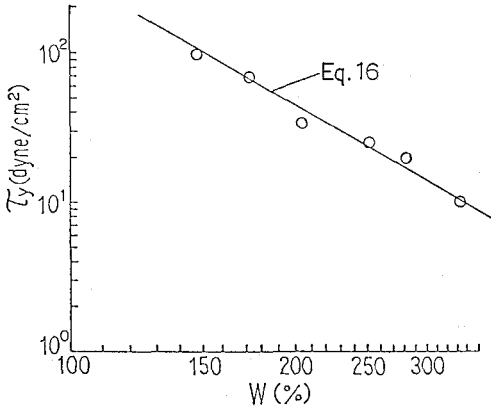


図-4 弾性限界と含水比の関係

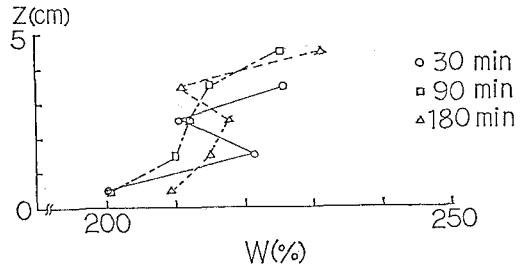


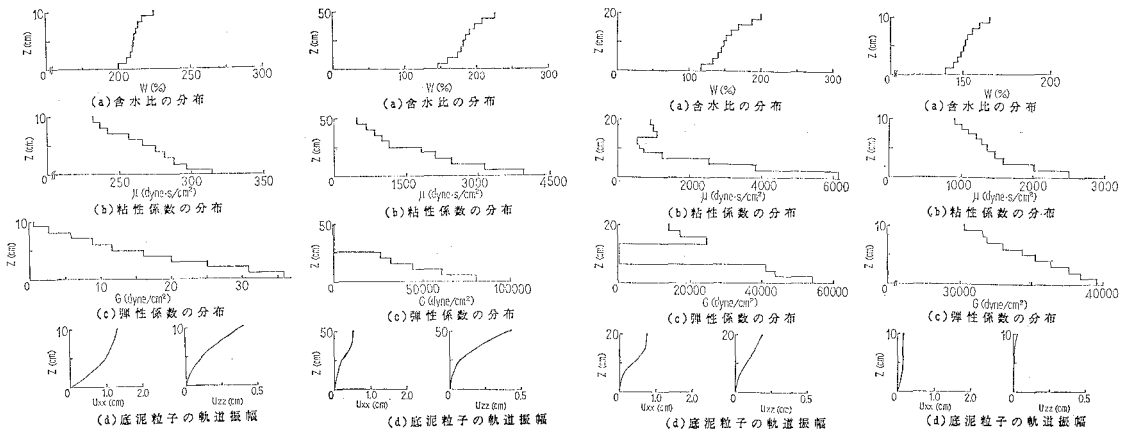
図-5 底泥層内の含水比鉛直分布(中西, 1987)

可能であることがわかる. またこのモデルは粘性流体モデルの1つの欠点であった層厚が厚くなっても最低層まで底泥が運動してしまうという点も解決しており, 下層において泥層が降伏しない場合, 運動は上層に比べて著しく小さくなる.

次に実験結果との比較について述べる. ここでは過去の研究の実測値および新たに本研究で低含水比領域について実施した室内実験結果と比較検討した. 図-7 は平均含水比 168% の場合についての底泥粒子の軌道振幅に付いての中野ら(1987)の実験値を, 多層粘性流体モデル(破線) 多層粘弾塑性体モデル(実線)と比較したものである. 図よりこれらの低含水比の領域では粘弾塑性体モデルが実験値をよく説明できることがわかる.

3. 底泥輸送量の評価法

次に輸送量の評価法に付いて検討した. 図-8 (1)~(6)は柴山ら(1988)の実験条件に即して計算を行い, 水平方向軌道振幅, 鉛直方向軌道振幅, 層内質量輸送速度について計算(実線)と実験値(○)とを比較したもので



- | | | | |
|--|---|--|--|
| (1) 全層降伏の場合
周期 $T=1.0(s)$, 水波波高 $H=10.0(cm)$, 水深 $h=35.0(cm)$, 粘土層厚 $d=10.0(cm)$ | (2) 上層のみ降伏の場合
$T=1.0$, $H=3.5$
$h=35.0$, $d=50.0$ | (3) 中間層で降伏がおこる場合
$T=1.0$, $H=3.0$
$h=35.0$, $d=20.0$ | (4) 全層が降伏しない場合
$T=1.0$, $H=2.0$
$h=35.0$, $d=10.0$ |
|--|---|--|--|

図-6 数値モデルの計算例

ある。質量輸送速度の計算に当たっては柴山らに習って Euler 流, Lagrange 流それぞれの計算を行ってしあわせ, さらに戻り流れを差し引いている。戻り流れの鉛直

方向流速分布の計算に当たっては戻り流れが層流であると仮定して, 移流項を省略した運動方程式に底面で流速が 0 の条件を与え, さらに断面平均流速が与えられているものとして計算している。図より本モデルが, 従来のモデルでは説明できなかった低含水比領域での泥粒子軌道振幅, 層内質量輸送量をよく説明することがわかる。

また図-9 に本モデルで算定した無次元掃流力を用いて柴山ら(1987)および楠田ら(1988)の計測した底泥の界面から水層への飛び出し率を整理した結果を載せる。ここで界面せん断力は本モデルを用いて計算して求め, 粘着力は含水比別にカオリナイト粘土を用いて実測している。飛び出し率は図中の直線で表せるようである。

さらに底泥の浮遊送量を算定する際には水層内の質量輸送速度の鉛直分布を求める必要がある。これについては青木ら(1988)が粘性流体モデルを用いて行ったのと同様の考え方の下に, 底面境界層内をも含めて本モデルを適用し, 実験観察との比較を行い定性的には現象と一致する結果を得ている。

以上本モデルで求めた層内質量輸送量, 底泥の飛び出

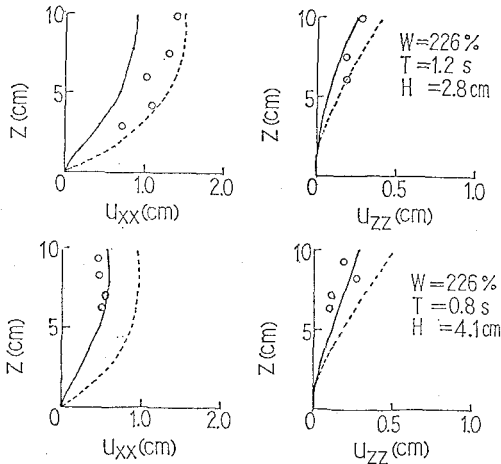


図-7 底泥粒子軌道振幅の計算値と実験値の比較

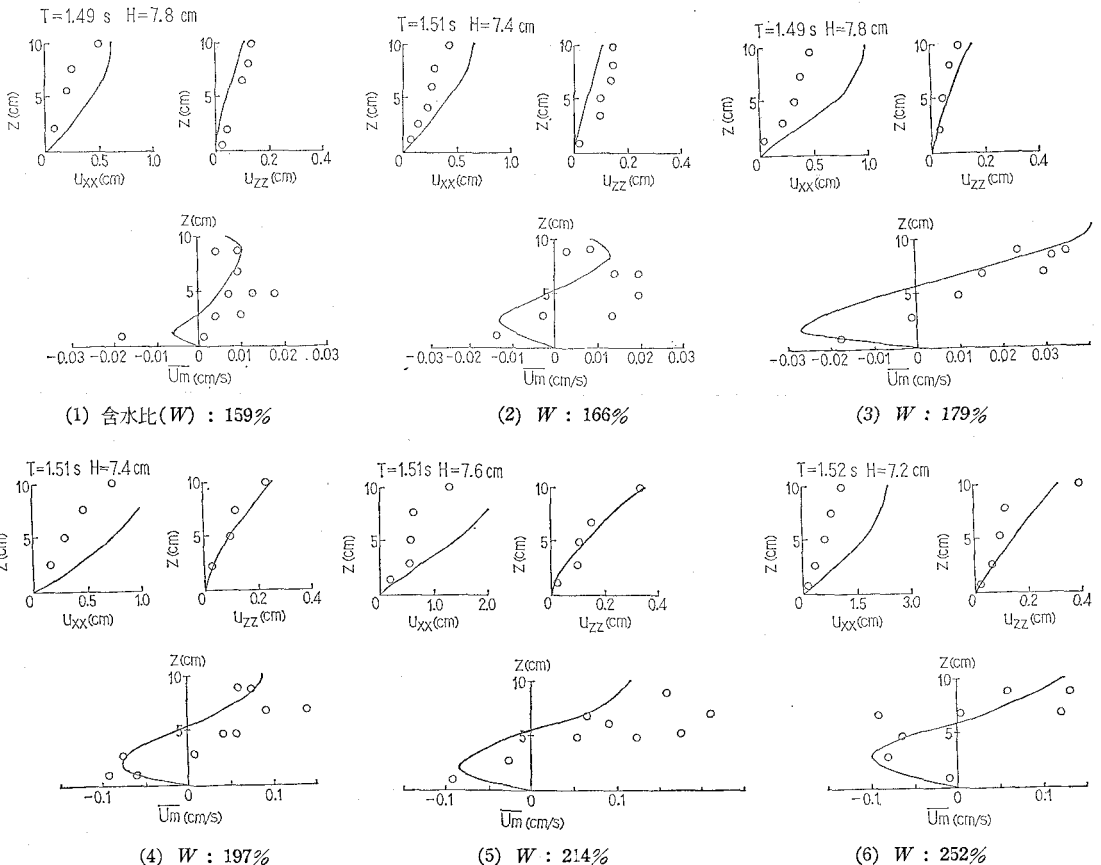


図-8 数値モデルの計算結果と実験結果の比較 ($\bar{U}_m$: 質量輸送速度, u_{xx} : 水平軌道振幅, u_{zz} : 鉛直軌道振幅)
(いずれも水深 35 cm, 泥層厚 10 cm)

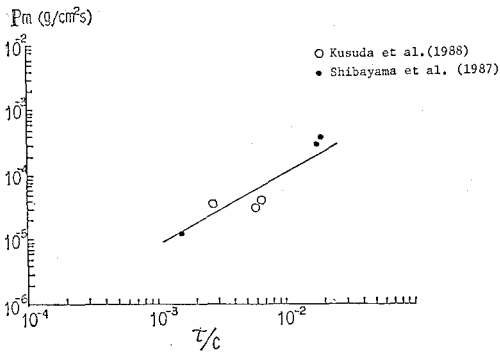


図-9 底面飛び出し率(P_m)と τ/c
(τ : 界面せん断力, c : 粘着力)

し率, 水層内質量輸送速度の3量により, 底泥の総輸送量をすべて評価することが可能となる。

4. 結 論

底泥の挙動を説明する粘弾塑性体モデルを構築し, 以下の結論を得た。

1) 本研究で開発した粘弾塑性体多層モデルを用いることによって, 従来のモデルよりも広い範囲の含水比の底泥に対して底泥粒子の軌道振幅, 底泥の層内質量輸送速度などの挙動を明らかにできる。2) 底泥粒子の水層への飛び出し率は, 本モデルで計算した泥水界面のせん断応力と実験により計測した底泥の粘着力の比で整理することができ, この飛び出し率と本モデルで算定する水層底面の境界層内の質量輸送速度をかけあわせることにより, 水層内に巻き上げられた浮泥の輸送量を評価することができる。3) 上記の泥層内質量輸送速度, 水層内に浮遊した底泥の輸送量を足し合わせることで, 底泥輸送の総量を算定することができる。

本研究は文部省科学研究費奨励研究 A, No. 63750519 (代表者, 柴山知也) および五洋建設株式会社よりの研究費による研究であることを付記する。

参 考 文 献

- 青木 徹・佐藤慎司・柴山知也 (1988): 底泥上を進行する水粒子質量輸送速度, 第43回土木学会年次学術講演会, Vol. II, pp. 772~773.
- 青木 徹・柴山知也・佐藤慎司 (1989): 正弦振動型同心二重円筒を用いた底泥の粘弾性体係数の測定例, 第44回土木学会年次学術講演会, Vol. II, pp. 800~801.
- 大坪国順・村岡浩嗣 (1985): 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第363号, pp. 225~234.
- 楠田哲也・山西 博幸・川添正寿・二渡 了 (1988): 波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 352~356.
- 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司 (1987): 波による底泥の浮遊機構に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 271~275.
- 柴山知也・佐藤慎司・平出和也・青木 徹 (1988): 波による底泥の質量輸送速度, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 347~351.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤 (1986): 回転粘土計による底泥の流動特性の検討, 港湾技研資料, No. 556, 29 pp.
- 中西雅明 (1987): 波による底質粘土の浮遊機構に関する研究, 東京大学卒業論文, 104 p.
- 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤 (1987): 相当粘度を用いた波と底泥の相互干渉についての計算, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 266~270.
- 中野 晋・鶴谷広一 (1988): 底泥床上の底面せん断応力と底泥運動, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 342~346.
- Dalrymple, A. R. and P. L. F. Liu (1978): Waves over soft muds: a two-layer fluid model, Jour. of physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121~1131, 1978.
- Mcpherson, H. (1980): The attenuation of waves over a non-rigid bed, J. F. M., Vol. 97, Part. 4, pp. 721~742, 1980.
- Nakagawa T. (1952): Spinnability of liquid, A visco-elastic state II, Spinnability and visco-elastic property, Bull. of Chemical Society of Japan, Vol. 25, pp. 93~97.