土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 67，No. 2（応用力学論文集 Vol. 14），I_323-I_334，2011.

円柱形集合体要素を用いた個別要素法による根付き流木の捕捉シミュレーション

Trap simulation of woody debris by using cylindrical assembled element with roots in Distinct Element Method

渋谷一[*]・堀口俊行[**]・香月智[***]・大隅久[****]・石川信隆[*****]
Hajime Shibuya, Toshiyuki Horiguchi, Satoshi Katsuki, Hisashi Ohsumi and Nobutaka Ishikawa

[*]学生会員　修(工)　防衛大学校理工学研究科後期課程　建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
[**]学生会員　防衛大学校理工学研究科前期課程　建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
[***]正会員　工博　防衛大学校教授　建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
[****]非会員　砂防鋼構造物研究会（〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5）
[*****]フェロー　工博　防衛大学校名誉教授　砂防鋼構造物研究会（〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5）

This paper proposes an application of the distinct element method on damming up performance of drift wood capturing structure subjected to woody debris with root. In order to simulate the behavior of drift woods, an assembled element model made of column shape elements is developed. In advance to analysis works, the debris flow experiments, with various combinations of the length of drift woods and the intervals of vertical columns of the structure, were carried out, and those are simulated by the proposed method. Simulation results are in good agreement with the experimental results from the viewpoints of debris flow and the capture mechanism of the capturing structure.

Key Words: *assembled element, woody debris with root, 3-D Distinct Element Method*

1. 緒　言

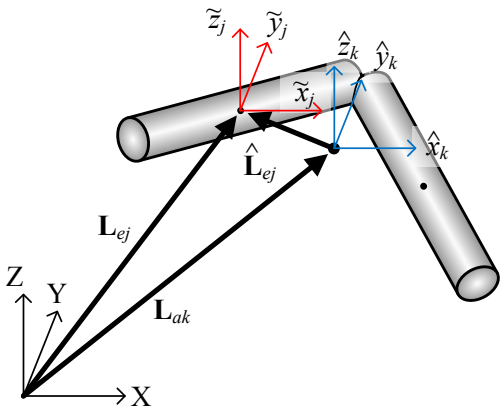
わが国の山々の多くは人工林で覆われているが，過疎化に伴って森林管理が困難になり，山地荒廃が拡大している．このため，台風等の強風により大量の風倒木が産出され，豪雨時に流木として土砂とともに大量に河川に流出し，橋脚に堰き止められることにより橋梁を破壊したり，不要な水位上昇を招き氾濫したり，家屋に衝突して破壊するなど，様々な災害を引き起こす要因となっている[1),2)]．

流木被害を抑制するための対策施設としては，透過型砂防堰堤や流木捕捉工などがあり，設計の考え方は，国土交通省の土石流・流木対策設計技術指針[3)]（以下，指針と呼ぶ）に定められている．流木捕捉工は，写真－1 に示すような主として鋼管製の構造物であり，流木のみの捕捉を目的として，掃流区間[3)]に設置される構造物である．

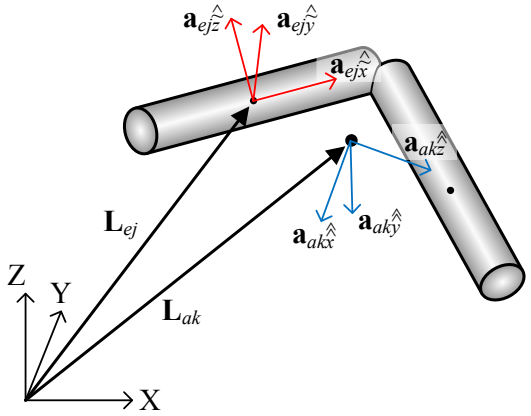
流木対策施設に関する既往研究としては，不透過型砂防堰堤の堤体や副堤上に設置される流木止スクリーンによる流木捕捉に関する研究[4),5)]などが多く見受けられる．しかし，掃流区間において単独設置される流木捕捉工の研究については少なく，縦部材間隔または横部材間隔と流木長との比が，流木の捕捉に与える影響について考察した松村らの研究[6)]以降あまりなされておらず，その捕捉メカニズムについては明らかにされていない．これらの既往研究においては，流木長を一様とし，円柱形状の流木モデルを用いた実験がほとんどであるが，写真－2 に示すように，現地では円柱に近い形状の流木に加えて，根付き流木が多数見受けられる．

写真－1　河床上に単独設置された流木捕捉工

写真－2　根付き流木の捕捉事例



図−1　集合体要素の座標系



図−2　集合体要素の姿勢ベクトル

ところで，流木形状の効果を考慮した既往研究として清水らは，球をつなげた 1 本の棒状要素として流木をモデル化することで，平面 2 次元場において河道内における流木の流動・集積過程の表現[7]を試みるとともに，枝付き形状の流木モデルについても検討を行い，枝を考慮した場合としなかった場合で橋脚付近での流木塊の形成度が異なることを明らかにしている[8]．しかし，流木の捕捉現象という観点からは，根付き流木が円柱形状の流木と比較してどの程度の捕捉効果があるのか明らかにされていない．また，これらの研究は 2 次元計算であるため，流木の立体的な捕捉現象をシミュレーションすることは難しい．この観点からは，後藤ら[9]の，流木の挙動を 3 次元的に表現した橋梁の閉塞に関する研究が見当たるのみである．しかし，後藤らの研究を含め既往研究の流木モデルは球要素を連結して流木要素としているので，球の凹凸により捕捉工と流木，もしくは流木と流木の間のすべり抵抗が過大に評価される可能性がある．

このような背景を踏まえ，著者ら[10]は，流木を円柱形要素によってモデル化した個別要素法を用いて，流木捕捉工の捕捉シミュレーション解析を試み，流木全体の挙動や捕捉率の観点から定量的にも概ね再現可能であることを示した．さらに文献 11)では，少数流木による流速分布モデルの影響について論じるとともに，円柱形要素を用いた場合と球連結要素を用いた場合の差異についても言及している．しかし，ここでは流木を単純な円柱形状でモデル化しているため，根付き流木の形状効果を表現することは出来ない．そこで本研究では，上述の手法を拡張し，根付き流木を円柱形要素からなる集合体要素モデルにより表現することにより，根付き流木の挙動をシミュレートすることを試みたものである．

2. 解析手法

ここでは，円柱形要素を導入した個別要素法[11]をベースとして，複数の球形もしくは円柱形要素を任意の形に剛結させた集合体要素モデルを導入する際の解析手法について示す．本研究においては，複数の要素を剛結させて 1 個の要素として振舞うものを集合体要素と呼び，集合体要素を構成する個々の球形もしくは円柱形要素を構成要素と呼ぶ．解析では，各要素の接触判定および接触力の計算は構成要素を用いて計算し，要素の運動は時々刻々，集合体要素の運動を解くことで，その変位・回転角を求める．

以下，集合体要素の基本情報と運動方程式の解法について示す．なお，ばね力の計算方法は通常の個別要素法と同じである．接触判定の要領は円柱形の幾何学的性質を数式化したものであり，詳細は文献 11)に記す．流体力については，要素の細かい動きとは無関係に位置によって流速分布を与える．ただし，流木が捕捉されて水流を妨げる効果を反映して水深や流速を変化させると同時に乱れを与えるものであり，そのモデル化の要領については文献 10)に従った．

2.1　集合体要素の座標系

本研究では，後述する運動方程式を解く際に，並進方向の運動と回転運動では異なった座標系で解くため，これらの関係を図−1 に示す．

まず，集合体要素の状態とは無関係な一般座標系（X, Y, Z）を設定する．そのうえで，集合体要素の重心位置に一般座標系と平行な局所座標系（$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$）と，構成要素の重心位置に同じく平行な局所座標系（$\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$）を設ける．

集合体要素 k と，その構成要素 j の位置ベクトルは，図−1 のように $\mathbf{L}_{ak}, \mathbf{L}_{ej}$ として表される．また，集合体要素座標系における構成要素の位置ベクトル $\hat{\mathbf{L}}_{ej}$ は次式となる．

$$\hat{\mathbf{L}}_{ej} = \mathbf{L}_{ej} - \mathbf{L}_{ak} \tag{1}$$

後述する回転運動の回転量は，集合体要素の局所座標系もしくは構成要素の局所座標系まわりの角度で表すものとする．このとき，回転姿勢を表すために，図−2 に示すように集合体要素および構成要素に姿勢マトリクス[12]を設定する．

$$\mathbf{A}_{ak} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{\mathrm{T}}_{ak\hat{x}} \\ \mathbf{a}^{\mathrm{T}}_{ak\hat{y}} \\ \mathbf{a}^{\mathrm{T}}_{ak\hat{z}} \end{bmatrix}_{3\times 3} \tag{2-a}$$

$$\mathbf{A}_{ej} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{ej\hat{x}}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{a}_{ej\hat{y}}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{a}_{ej\hat{z}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}_{3\times 3} \tag{2-b}$$

ここで，$\mathbf{A}_{ak}$：集合体要素 k の重心点において集合体要素の慣性主軸座標系（$\hat{x},\hat{y},\hat{z}$）に沿った単位ベクトル（$\mathbf{a}_{ak\hat{x}},\mathbf{a}_{ak\hat{y}},\mathbf{a}_{ak\hat{z}}$）によって表される姿勢マトリクス，$\mathbf{A}_{ej}$：構成要素 j の重心点において構成要素の慣性主軸座標系（$\hat{\hat{x}},\hat{\hat{y}},\hat{\hat{z}}$）に沿った単位ベクトル（$\mathbf{a}_{ej\hat{x}},\mathbf{a}_{ej\hat{y}},\mathbf{a}_{ej\hat{z}}$）によって表される姿勢マトリクスである．

姿勢マトリクスは座標変換マトリクスでもあり，各局所座標系でのベクトル $\mathbf{v}$ について，次式の関係が成立する．

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}_{ak}\hat{\mathbf{v}} \tag{3-a}$$

$$\hat{\hat{\mathbf{v}}} = \mathbf{A}_{ej}\tilde{\mathbf{v}} \tag{3-b}$$

ここで，$\hat{\mathbf{v}}$：集合体要素座標系における任意のベクトル，$\hat{\hat{\mathbf{v}}}$：集合体要素の慣性主軸座標系における任意のベクトル，$\tilde{\mathbf{v}}$：構成要素座標系における任意のベクトル，$\hat{\hat{\mathbf{v}}}$：構成要素の慣性主軸座標系における任意のベクトルである．

2.2 集合体要素の質量と重心位置

集合体要素の質量および重心位置は，構成要素の情報をもとに，次式により表される．

$$m_{ak} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} m_{ej} \tag{4}$$

$$m_{ej} = \rho_{ej}\pi r_{ej}^2 l_{ej} \tag{5}$$

$$\mathbf{L}_{ak} = \frac{\sum m_{ej}\mathbf{L}_{ej}}{m_{ak}} \tag{6}$$

ここで，m_{ak}, m_{ej}：それぞれ集合体要素 k または構成要素 j の質量，n_{ak}：集合体要素 k を構成する構成要素の数，ρ_{ej}：構成要素 j の密度，r_{ej}：構成要素 j の半径，l_{ej}：構成要素 j の長さである．

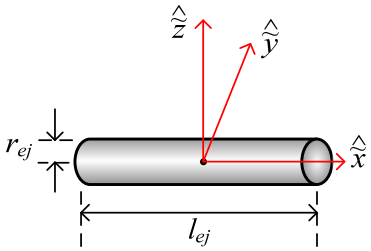
2.3 集合体要素の慣性モーメントと姿勢

構成要素の慣性主軸まわりの慣性モーメントは，図−3を参照して次式で与えられる．

$$\hat{\tilde{\mathbf{I}}}_{ej} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}m_{ej}r_{ej}^2 & & 0 \\ & \frac{1}{12}m_{ej}\left(3r_{ej}^2 + l_{ej}^2\right) & \\ 0 & & \frac{1}{12}m_{ej}\left(3r_{ej}^2 + l_{ej}^2\right) \end{bmatrix}_{3\times 3} \tag{7}$$

ここで，$\hat{\tilde{\mathbf{I}}}_{ej}$：構成要素 j の慣性主軸座標系における慣性モーメントマトリクスである．

よって，構成要素座標系における慣性モーメントは次式



図−3　構成要素の慣性主軸

となる．

$$\tilde{\mathbf{I}}_{ej} = \mathbf{A}_{ej}^{\mathrm{T}}\hat{\tilde{\mathbf{I}}}_{ej}\mathbf{A}_{ej} \tag{8}$$

よって，集合体要素座標系における慣性モーメントは，平行軸の定理より次式によって与えられる．

$$\hat{\mathbf{I}}_{ak} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} \left[\tilde{\mathbf{I}}_{ej} + m_{ej} \begin{bmatrix} \left(\hat{L}_{ejy}\right)^2 + \left(\hat{L}_{ejz}\right)^2 & -\hat{L}_{ejx}\hat{L}_{ejy} & -\hat{L}_{ejx}\hat{L}_{ejz} \\ -\hat{L}_{ejy}\hat{L}_{ejx} & \left(\hat{L}_{ejz}\right)^2 + \left(\hat{L}_{ejx}\right)^2 & -\hat{L}_{ejy}\hat{L}_{ejz} \\ -\hat{L}_{ejz}\hat{L}_{ejx} & -\hat{L}_{ejz}\hat{L}_{ejy} & \left(\hat{L}_{ejx}\right)^2 + \left(\hat{L}_{ejy}\right)^2 \end{bmatrix} \right] \tag{9}$$

ここで，$\hat{L}_{ejx},\hat{L}_{ejy},\hat{L}_{ejz}$：それぞれ集合体要素座標系における構成要素の位置ベクトル $\hat{\mathbf{L}}_{ej}$ の $\hat{x},\hat{y},\hat{z}$ 軸方向成分である．

この集合体要素座標系まわりの集合体要素の慣性モーメント $\hat{\mathbf{I}}_{ak}$ を固有値解析すると，固有ベクトル $\mathbf{a}_{ak1},\mathbf{a}_{ak2},\mathbf{a}_{ak3}$ と，固有値 $\lambda_{ak1},\lambda_{ak2},\lambda_{ak3}$ が得られる．この固有ベクトルと固有値は，それぞれ慣性主軸の方向を表す単位ベクトルと，固有ベクトルに対応する主慣性モーメントである．よって，集合体要素の慣性主軸系を表す姿勢マトリクスは，次式のように与えられる．

$$\mathbf{A}_{ak} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{ak\hat{x}}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{a}_{ak\hat{y}}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{a}_{ak\hat{z}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{ak1}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{a}_{ak2}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{a}_{ak3}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}_{3\times 3} \tag{10}$$

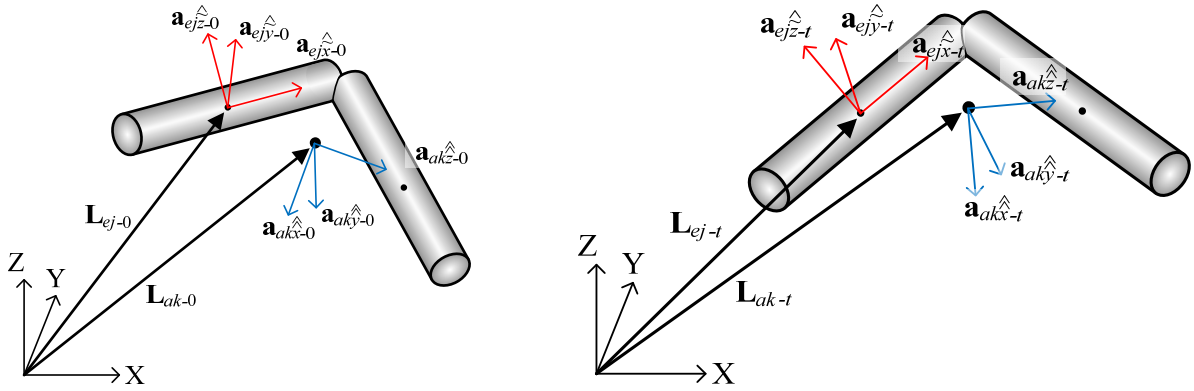
また，集合体要素の慣性主軸系における，慣性主軸まわりの慣性モーメントを，次式で表す．

$$\hat{\hat{\mathbf{I}}}_{ak} = \begin{bmatrix} I_{akx} & & 0 \\ & I_{aky} & \\ 0 & & I_{akz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{ak1} & & 0 \\ & \lambda_{ak2} & \\ 0 & & \lambda_{ak3} \end{bmatrix}_{3\times 3} \tag{11}$$

2.4 姿勢の変化と適合条件

本手法では，運動方程式は一般座標系での並進運動と，集合体要素の慣性主軸系での回転運動について解くものとする．このため，この解を構成要素の運動に変換する適合条件式が必要である．

今，図−4 に示すように，解析初期(t=0)における姿勢ベ



(a) $t=0$ の状態　　(b) $t=t$ の状態

図−4　姿勢マトリクスの変化

クトルと，時刻(t)における姿勢ベクトルが与えられているものとする．このとき，集合体要素の慣性主軸の回転に伴う変化を次式で表すものとする．

$$\mathbf{A}_{ak-t} = \hat{\mathbf{A}}_{ak-t}\mathbf{A}_{ak-0} \tag{12}$$

ここで，$\mathbf{A}_{ak\text{-}0}$, $\mathbf{A}_{ak\text{-}t}$：それぞれ時刻(t=0)または(t)における集合体要素 k の姿勢マトリクス，$\hat{\mathbf{A}}_{ak-t}$：時刻(t=0)から(t)間の集合体要素 k の姿勢マトリクスの変化分を表す座標変換マトリクスである．

なお，集合体要素は剛体であるので，次式が成立する．

$$\mathbf{A}_{ej-t}\mathbf{A}_{ak-t}^{\mathrm{T}} = \mathbf{A}_{ej-0}\mathbf{A}_{ak-0}^{\mathrm{T}} = \hat{\hat{\mathbf{A}}}_{aej} \tag{13}$$

$$\hat{\mathbf{L}}_{ej-t} = \hat{\mathbf{A}}_{ak-t}^{\mathrm{T}}\hat{\hat{\mathbf{L}}}_{ej} \tag{14}$$

ここで，$\mathbf{A}_{ej\text{-}0}$, $\mathbf{A}_{ej\text{-}t}$：それぞれ時刻(t=0)または時刻(t)における構成要素 j の姿勢マトリクス，$\hat{\hat{\mathbf{A}}}_{aej}$：集合体要素 k の慣性主軸座標系における構成要素 j の姿勢マトリクス，$\hat{\mathbf{L}}_{ej-t}$：集合体要素座標系における時刻(t)の構成要素 j の重心位置ベクトル，$\hat{\hat{\mathbf{L}}}_{ej}$：集合体要素の慣性主軸座標系における構成要素 j の重心位置ベクトルであり，$\hat{\hat{\mathbf{A}}}_{aej}$ と $\hat{\hat{\mathbf{L}}}_{ej}$ は運動に関わらず不変量である．

よって，構成要素の重心位置ベクトルおよび姿勢マトリクスは次式となる．

$$\mathbf{L}_{ej-t} = \mathbf{L}_{ak-t} + \hat{\mathbf{L}}_{ej-t} \tag{15}$$

$$\mathbf{A}_{ej-t} = \hat{\hat{\mathbf{A}}}_{aej}\mathbf{A}_{ak-t} \tag{16}$$

ここで，$\mathbf{L}_{ak\text{-}t}$, $\mathbf{L}_{ej\text{-}t}$：それぞれ時刻(t)における集合体要素 k または構成要素 j の重心位置ベクトルである．

よって，式(15), (16)では，$\mathbf{A}_{ak\text{-}t}$ を更新することにより，他のベクトルおよびマトリクスの更新が可能となる．

また，速度ベクトルと角速度ベクトルは次式で表される．

$$\dot{\mathbf{u}}_{ej-t} = \dot{\mathbf{u}}_{ak-t} + \boldsymbol{\omega}_{ak-t} \times \hat{\mathbf{L}}_{ej-t} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{ej-t} = \boldsymbol{\omega}_{ak-t} \tag{18}$$

ここで，$\dot{\mathbf{u}}_{ak-t}, \dot{\mathbf{u}}_{ej-t}$：それぞれ時刻($t$)における集合体要素 k または構成要素 j の速度ベクトル（ただし，式(26)で代用される），$\boldsymbol{\omega}_{ak\text{-}t}$, $\boldsymbol{\omega}_{ej\text{-}t}$：それぞれ時刻($t$)における集合体要素 k または構成要素 j の角速度ベクトルである．

2.5　構成要素と集合体要素の力の釣合マトリクス

本解析では，運動方程式を集合体要素重心点に関して解くために，各要素の接触判定および接触力の計算は構成要素を用いて計算を行った後，各構成要素の重心点に作用する力を集合体重心点に集成する．この際，構成要素座標系における作用力 $\tilde{\mathbf{f}}_{ej}$ と等価な，集合体要素座標系における力 $\hat{\mathbf{f}}_{ak}$ には，次式の関係がある．

$$\hat{\mathbf{f}}_{ak} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} \tilde{\mathbf{f}}_{ej} \tag{19}$$

また，それぞれに対応するモーメントに関しては，次式の関係がある．

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{M}}_{ak} &= \sum_{j=1}^{n_{ak}} \tilde{\mathbf{M}}_{ej} + \tilde{\mathbf{f}}_{ej} \times \hat{\mathbf{L}}_{ej-t} \\ &= \sum_{j=1}^{n_{ak}} \tilde{\mathbf{M}}_{ej} + \tilde{\mathbf{f}}_{ej} \times \mathbf{A}_{ak-t}^{\mathrm{T}}\hat{\hat{\mathbf{L}}}_{ej}\end{aligned} \tag{20}$$

ここで，$\tilde{\mathbf{M}}_{ej}$：構成要素座標系において作用するモーメント，$\hat{\mathbf{M}}_{ak}$：構成要素に作用する力およびモーメントと等価な集合体要素座標系におけるモーメントである．

2.6　運動方程式

(1)　並進運動の運動方程式の解法

まず，時刻(t)における集合体要素 k の位置ベクトル $\mathbf{L}_{ak\text{-}t}$ を，次式により表す．

$$\mathbf{L}_{ak-t} = \mathbf{L}_{ak-0} + \mathbf{u}(t) \tag{21}$$

ここで，$\mathbf{L}_{ak\text{-}0}$：時刻(t=0)における集合体要素 k の重心位置ベクトル，$\mathbf{u}(t)$：時刻(t)における変位ベクトルである．

この変位ベクトルを用いて，集合体要素の並進方向の運

動方程式を，次のように表す.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}}(t)+\mathbf{D}_{\mathrm{p}}\dot{\mathbf{u}}(t)+\sum\mathbf{f}_{\mathrm{k}}(t)=\mathbf{f}_{\mathrm{ex}}(t) \tag{22}$$

$$\mathbf{f}_{\mathrm{ex}}(t)=\mathbf{mg}+\mathbf{f}_{\mathrm{W}}(t) \tag{23}$$

ここで，$\mathbf{m}$：質量マトリクス，$\mathbf{D}_{\mathrm{p}}$：並進運動の減衰マトリクス，$\mathbf{f}_{\mathrm{k}}$：ばね力の重心点等価力ベクトル，$\mathbf{f}_{\mathrm{ex}}$：外力ベクトルの総和，$\mathbf{g}$：重力加速度ベクトル，$\mathbf{f}_{\mathrm{W}}$：並進運動に作用する流体力ベクトル，$(\dot{\ })$,$(\ddot{\ })$：それぞれ時間に関する 1 次微分および2 次微分である.

運動方程式の減衰項については, 比例減衰モデル[13]の構造減衰項のみを取り扱うものとし, 要素間ばねに並行して設置したダッシュポットにより生じる力の重心点等価力ベクトル $\mathbf{f}_{\mathrm{D}}$ によって表されるものとする．よって，式(22)は次のように表せる.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}}(t)+\left\{\sum\mathbf{f}_{\mathrm{D}}(t)+\sum\mathbf{f}_{\mathrm{k}}(t)\right\}=\mathbf{f}_{\mathrm{ex}}(t) \tag{24}$$

この運動方程式を，中心差分法を用いて解く．ただし，速度項は後進差分とした.

$$\ddot{\mathbf{u}}(t)=\frac{\mathbf{u}(t+\Delta t)-2\mathbf{u}(t)+\mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t^{2}} \tag{25}$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t)=\frac{\mathbf{u}(t)-\mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t} \tag{26}$$

よって，時刻(t+Δt)における変位ベクトル $\mathbf{u}(t+\Delta t)$は次式となる.

$$\mathbf{u}(t+\Delta t)=\mathbf{m}^{-1}\left\{\mathbf{f}_{\mathrm{ex}}(t)-\sum\mathbf{f}_{\mathrm{D}}(t)-\sum\mathbf{f}_{\mathrm{k}}(t)\right\}\Delta t^{2}+2\mathbf{u}(t)-\mathbf{u}(t-\Delta t) \tag{27}$$

(2) 回転運動の運動方程式の解法

回転運動の方程式は, 集合体要素の慣性主軸座標系で解くため，まず作用力等を変換する.

$$\hat{\mathbf{M}}_{ak}(t)=\mathbf{A}_{ak-t}\hat{\mathbf{M}}_{ak}(t) \tag{28-a}$$

$$\hat{\dot{\mathbf{P}}}_{ak}(t)=\mathbf{A}_{ak-t}\hat{\mathbf{P}}_{ak}(t) \tag{28-b}$$

$$\hat{\dot{\boldsymbol{\omega}}}_{ak}(t)=\mathbf{A}_{ak-t}\hat{\boldsymbol{\omega}}_{ak}(t) \tag{28-c}$$

ここで，$\mathbf{P}$：角運動量ベクトルである.

そのうえで, 集合体要素の慣性主軸座標系に関するオイラーの運動方程式が，次のように与えられる.

$$\left\{\hat{\mathbf{I}}\hat{\dot{\boldsymbol{\omega}}}(t)-\hat{\mathbf{P}}(t)\times\hat{\boldsymbol{\omega}}(t)\right\}+\left\{\sum\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{D}}(t)+\sum\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{k}}(t)\right\}=\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{ex}}(t) \tag{29}$$

$$\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{ex}}(t)=\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{W}}(t) \tag{30}$$

ここで，$\mathbf{I}$：慣性モーメントマトリクス，$\mathbf{M}_{\mathrm{k}}$, $\mathbf{M}_{\mathrm{D}}$：それぞればね力およびダッシュポットより生ずる力の重心点等価モーメントベクトル，$\mathbf{M}_{\mathrm{ex}}$：外モーメントベクトルの総和，$\mathbf{M}_{\mathrm{W}}$：回転運動に作用する流体力によるモーメントベクトルである.

同様に，中心差分法を用いて解く．ただし，速度項は後進差分とした.

$$\hat{\dot{\boldsymbol{\omega}}}(t)=\frac{\hat{\boldsymbol{\theta}}(t+\Delta t)-\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)}{\Delta t^{2}} \tag{31}$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}(t)=\frac{\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)}{\Delta t} \tag{32}$$

ここで，$\boldsymbol{\theta}(t)$：時刻(t-Δt)から(t)の間の回転角の増分ベクトルである.

よって，時刻(t)から(t+Δt)間での慣性主軸まわりの回転角の増分ベクトル $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t+\Delta t)$ は，次式によって与えられる.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t+\Delta t)=\hat{\mathbf{I}}^{-1}\left\{\left(\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{ex}}(t)+\hat{\mathbf{P}}(t)\times\hat{\boldsymbol{\omega}}(t)\right)-\sum\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{D}}(t)-\sum\hat{\mathbf{M}}_{\mathrm{k}}(t)\right\}\Delta t^{2}+\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) \tag{33}$$

また，集合体要素座標系での回転角の増分ベクトルは，次式によって与えられる.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t+\Delta t)=\mathbf{A}_{ak-t}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\theta}}(t+\Delta t) \tag{34}$$

この $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t+\Delta t)$ を使って，集合体要素の慣性主軸を表す姿勢マトリクス $\mathbf{A}_{ak\text{-}t}$ を, その単位ベクトル性とそれぞれの直交性を保つように更新した．ここでは便宜上，次式のように表すこととし，細部は付録で述べる.

$$\mathbf{A}_{ak-(t+\Delta t)}=f\left(\mathbf{A}_{ak-t},\hat{\boldsymbol{\theta}}(t+\Delta t)\right) \tag{35}$$

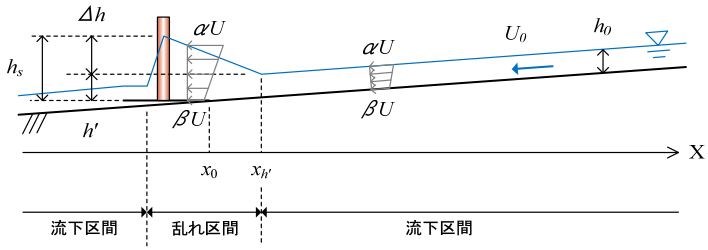
2.7 流体力モデル

本来, 流体力は水の流れと流木の運動との相互作用により変化する流れを解析し，その流体力を求めて，作用させる方法が望ましい．その場合，本研究の趣旨に沿った流木捕捉率に影響する流体運動を解析するには, 絡まりあう流木の中を通り抜ける流体運動を解く必要があり, 高度で膨大な計算量を要する解析となる．そこで，本解析においては計算負担を軽減するため, 以下のように簡略化して各要素に流体力を与えるものとした.

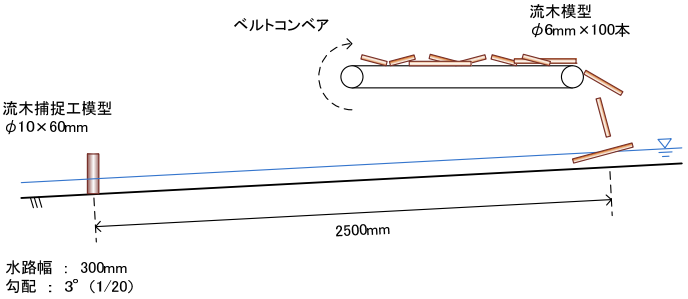
(1) 流体力の評価

本解析においては計算負担を軽減するため, 以下のように簡略化して各要素に流体力を与えるものとした.

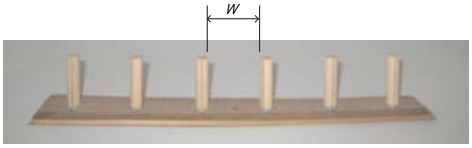
まず，円柱形要素が流水から受ける流体力は，円柱の中心軸上にある 5 点を代表点（積分点）とし，各代表点における速度と流水の速度との相対速度からそれぞれ流体力を算出し, Gauss の積分公式を用いて積分することにより，円柱形要素の重心点に作用する流体力として評価した. す



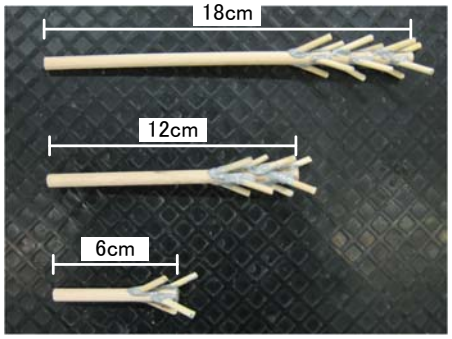
図−5　流速分布モデルの概要



図−6　実験装置の概要



写真−3　流木捕捉工模型の一例



写真−4　根付き流木模型

なわち，要素 j の局所座標系における，積分点 i に作用する流体力 $\mathbf{f}_{Wji}$ は，後述の流速分布モデルを用いて算定した流速 $\mathbf{U}_{ji}$ ($\mathbf{U}_{ji}^{T}=[U_{xji}\quad U_{yji}\quad U_{zji}]$) をもとに，次式により表す．

$$\mathbf{f}_{Wji}=\frac{1}{2}C_D\rho A_{ji}\begin{bmatrix}\dot{u}_{Rxji}|\dot{u}_{Rxji}|\\ \dot{u}_{Ryji}|\dot{u}_{Ryji}|\\ \dot{u}_{Rzji}|\dot{u}_{Rzji}|\end{bmatrix}+\mathbf{f}_{Bji} \tag{36}$$

ここで，C_D：抗力係数，ρ：水の密度，A_{ji}：積分点 i の重み w_i をかけた要素 j の流れ方向への投影面積，$\dot{u}_{Rxji}$，$\dot{u}_{Ryji}$，$\dot{u}_{Rzji}$：それぞれ要素 j の積分点 i における流水の速度 $\mathbf{U}_{ji}$ との相対速度ベクトルの x, y, z 軸方向成分，$\mathbf{f}_{Bji}$：要素 j の積分点 i に作用する浮力である．

(2)　流速分布モデル

図−5 に捕捉工周辺の流速分布モデルの概要を示す．ここでは，捕捉工および捕捉された流木により堰上げが生じることや，流速が急激に低下することによる乱れが発生することから，次の手順により流速を与えるものとした．

① 流木捕捉による水深 h' の算定
② 堰上げ水深 h_s の算定
③ 流木に作用する基本流速ベクトルの算定
④ 捕捉工回避流れの流速ベクトルの算定
⑤ 流速の乱れ成分ベクトルの算定

なお，詳細は文献 10)に述べるが，流木捕捉による水深 h' の算定において，根付き流木の捕捉状況が根なし流木の捕捉状況に比して，その堆積塊が疎になることを考慮して，流木投影面積と水深との関係式を補正した．

$$\begin{cases}h'=h_0 & \left(\Sigma A_{di}/A_0<0.2\right)\\ h'=\dfrac{H-h_0}{2.3}\left(\dfrac{\sum A_{di}}{A_0}-0.2\right)+h_0 & \left(0.2\le\Sigma A_{di}/A_0\le 2.5\right)\\ h'=H & \left(2.5<\Sigma A_{di}/A_0\right)\end{cases} \tag{37}$$

ここで，H：捕捉工高さ，$\sum A_{di}$：捕捉された流木の投影面積の総和，A_0：水路の断面積($A_0=BH$)，B：水路幅である．

3.　実験概要 [14)]

解析に先立ち，実験水路を用いて，根モデルを付加した流木の捕捉実験を行い，流木長や捕捉工間隔の変化が捕捉効果に与える影響について基礎情報を得た．

3.1　実験装置等概要

図−6 に，実験に用いた実験装置の概要を示す．この実験装置は，勾配可変（0°~20°）の矩形水路であり，その寸法は，流下長さ 2.5m，幅 0.3m，高さ 0.5m，底面はステンレス製，側面はガラス製で観察が可能となっている．また，水路上流部には流木供給用のベルトコンベアを設置している．

写真−3 に，実験に用いた流木捕捉工模型の一例を示す．流木捕捉工模型は直径φ10mm の木製円柱を垂直に立てたものであり，この捕捉工柱材の純間隔 W を変化させた．捕捉工柱材の高さについては，実際の現場では 2, 3m のものが多く用いられていることから，実物高さ 3m に対応する 6cm を模型の高さとした．

写真−4 に，実験に用いた流木試料を示す．流木模型は円柱形の木材であり，流木長は 6, 12, 18cm の 3 種類，幹部の直径は 6mm である．また，それぞれの長さに応じて根モデルを付加している．なお，この樹根部の形状は，苅住の報告 [15)]におけるスギの項を参考に，下向きに発達している垂下根と根株から分岐する斜出根をモデル化したものである．

表－1　実験条件

項　目		実　物	模　型
水路	勾配 θ	3°	3°
	長さ	125 m	2500 mm
	流量 Q	95.5 m^3/s	5.4 ℓ/s
	給水時間	105 s	15 s
捕捉工模型	高さ H	3 m	6 cm
	直径	50 cm	10 mm
	捕捉工間隔 W	W/l=1/3, 1/2, 3/4 および l に応じて設定	
流木模型	流木長 l	3, 6, 9 m	6, 12, 18 cm
	直径 d	30 cm	6 mm
	本数	100 本	100 本
	投入要領	100 本/ 35 秒	100 本/ 5 秒

表－2　実験ケース

流木長 l(cm)	捕捉工間隔比 W/l	根の有無	ケース数
6 12 18	1/3 1/2 3/4	あり（9 ケース） なし（9 ケース）	18

表－3　解析基本値

項　　目			値
流水	初期流速 U_0		0.8 m/s
	初期水深 h_0		8 mm
	抗力係数 C_D		1.0
要素	要素数		100
	密度 ρ		950 kg/m^3
要素間ばね	ばね定数	法線方向 K_n	1.0×10^6 N/m
		接線方向 K_s	1.5×10^5 N/m
	減衰定数 h		0.2
	粘着力 c		0 N
	摩擦角 tanφ		0.404
計算条件	時間刻み Δt		1.0×10^{-7} s

図－7　根付き流木モデル

3.2　実験条件

表－1 に実験条件を示す．実験においてはフルードの相似則を適用し，実物大の高さを 3m，鋼管径を 50cm と仮定して，1:50 の縮尺で設定した．

表－2 に実験ケースを示す．実験は，捕捉工の純間隔 W と流木長 l の比である捕捉工間隔比 W/l を変化させたうえで，根の有無が捕捉率に及ぼす影響を観察した．

4.　解析結果および考察

4.1　計算条件

(1)　解析パラメータ

表－3 に解析基本値を示す．水路諸元および要素の条件については実験と同条件とし，初期流速 U_0 や初期水深 h_0 についても実験における流速，水深を用いた．

抗力係数 C_D については，概ね Re=1.0×10^3~1.0×10^5 の範囲で，C_D≒1.0 が得られている[16]ことから，C_D=1.0 を用いるものとした．

法線方向ばね定数 K_n は，実験で流木試料に用いた木材に対し，別途行った載荷試験の荷重～変形関係をもとに，K_n=1.0×10^6 N/m とした．また，接線方向ばね定数 K_s は，次式で表す接線方向ばね定数 K_s と法線方向ばね定数 K_n の比 K_s/K_n の関係[10]より，算定した．

$$\frac{K_s}{K_n}=\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \tag{38}$$

一般に杉材のポアソン比は ν=0.4 が得られている[17]ことから，ここでは材料の異方性を無視するものとし，式(38)より K_s/K_n= 0.15 として，法線方向ばね定数 K_n より K_s を算定した．

要素間ばねの減衰については，要素接触時に発生する振動を抑えて計算を安定させるため，減衰定数を h=0.2 とし，次式により減衰係数 c_n，c_s を与えた．

$$c_n=2h\sqrt{\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}K_n},\quad c_s=2h\sqrt{\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}K_s} \tag{39}$$

ここで，m_1, m_2 : 接触する円柱形要素の質量である．

また粘着力および摩擦角は，実験で流木試料に用いた木材をもとに c=0 N，tan φ=0.404 (φ=22°)とした．

時間刻み Δt は次式より求まる Δt の 1/10 以下[18]とした．

$$\Delta t=2\sqrt{\frac{m}{K_n}} \tag{40}$$

(2)　解析ケース

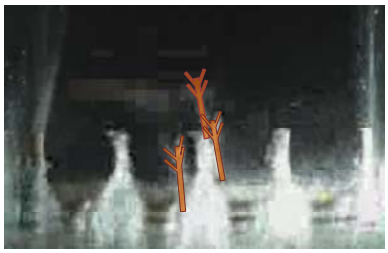
解析ケースは実験と同様に，表－2 に示す根付きのケースについて捕捉シミュレーションを行った．

(3)　根付き流木のモデル化

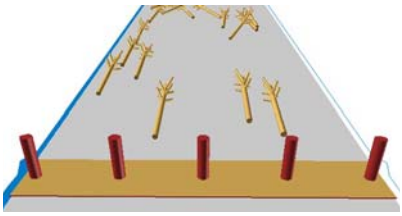
解析では，写真－4 に示す根付き流木模型を再現するため，図－7 に示すように円柱形要素を剛結した集合体要素によりモデル化した．参考までに，これらの慣性主軸の $\hat{x}$ 軸は，幹部円柱と同方向で，偏角はない．

4.2　流下状況の比較

図－8 に，流下状況について下流側から撮影した状況を実験と比較して示す．ここで，図－8(a)に示す実験時の流下状況の写真では，流水により流木が見えにくくなってい

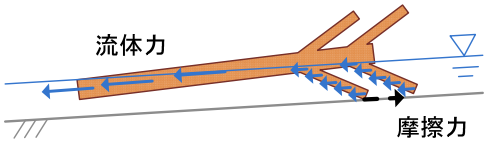


(a)　実験結果



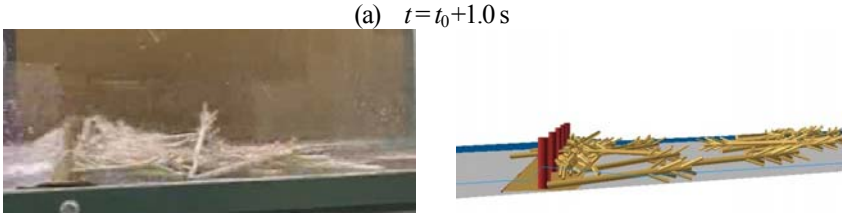
(b)　解析結果

図－8　流下状況の比較（下流側より）



図－9　根付き流木に作用する力

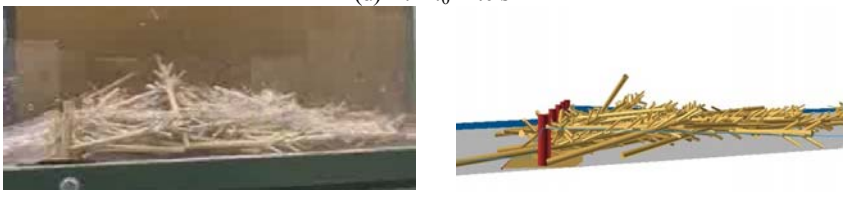
(a)　$t=t_0$+1.0 s



(b)　$t=t_0$+2.0 s

(c)　$t=t_0$+3.0 s

(d)　$t=t_0$+4.0 s



(e)　$t=t_0$+5.0 s

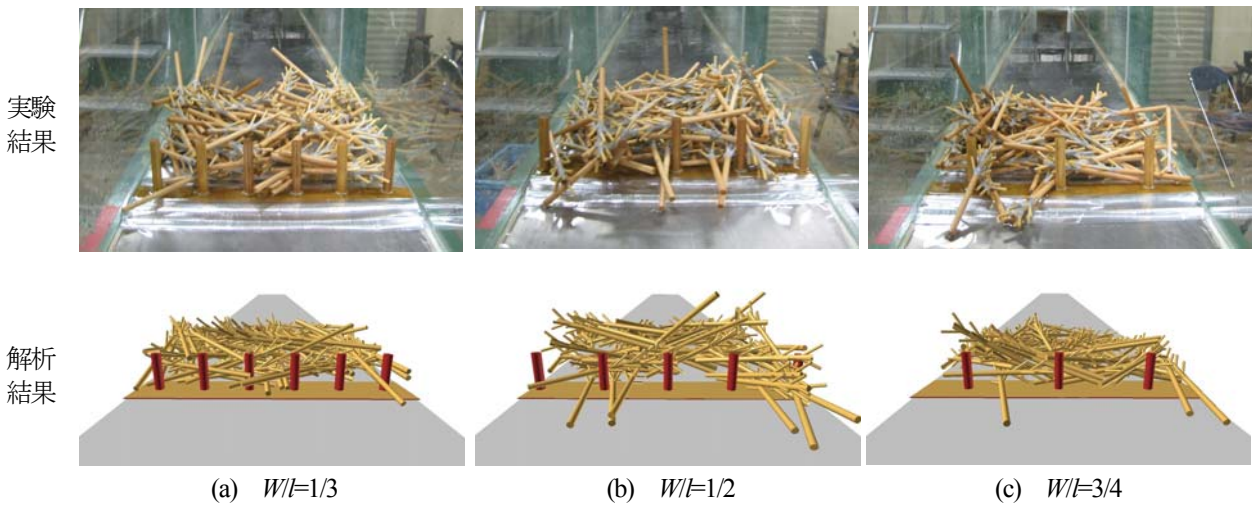
(f)　$t=t_0$+6.0 s

実験結果　　解析結果

図－10　捕捉時の状況の比較（l=12cm，W/l=1/2，左岸側より）

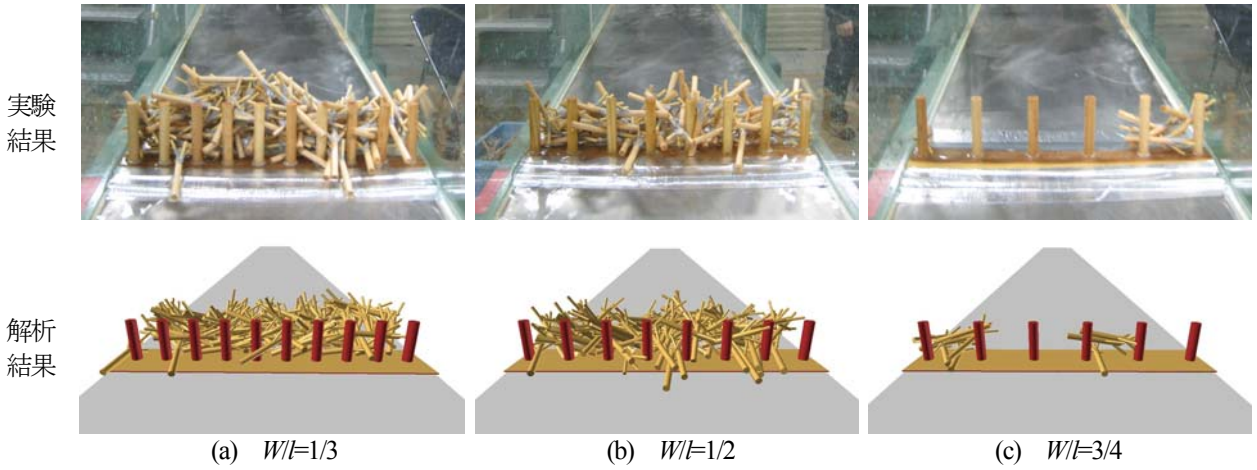
るため，流木の位置を強調して描き加えている．

これより，実験では，根付き流木は捕捉工に対し，根の付いていない方の端部を先頭に，ほぼまっすぐに流下してきていることがわかる．一方，図－8(b)に示す解析結果



(a) W/l=1/3　　(b) W/l=1/2　　(c) W/l=3/4

図－11　捕捉後の状況の比較（l=12cm，下流側より）



(a) W/l=1/3　　(b) W/l=1/2　　(c) W/l=3/4

図－12　捕捉後の状況の比較（l=6cm，下流側より）

についても実験結果と同様に，捕捉工に対して根付き流木がまっすぐに流下している．これは，図－9 に示すように，根付き部分の直径に対して水深が浅いため，水中にある各積分点にかかる流体力が円柱形要素の中心軸に沿って作用するのに対して，水路底面に接触する根の先端に摩擦力が生じ，根付き部分が流れの後方に引っ張られるためである．試みに，解析において水路底面の摩擦力を無くして流下させると，まっすぐに流下する現象は見られなくなり，むしろ流体力を多く受ける根の部分の方が流下方向に先行する傾向が見受けられた．

4.3　捕捉時の状況の比較

図－10 に，捕捉時の状況について左岸側から撮影した状況を，実験と比較して示す．なお，図中の t_0 秒とは，先頭の流木が捕捉工に到達したときの時間である．

まず，実験では，最初に根付き流木が捕捉工の間隔を閉塞し（(a)～(b)），水位の上昇とともに流木の堆積高さもやや上昇し（(b)～(d)），水深と流木堆積高さがほぼ一定になった後，後続の流木が上流側に堆積していく（(d)～(f)）．

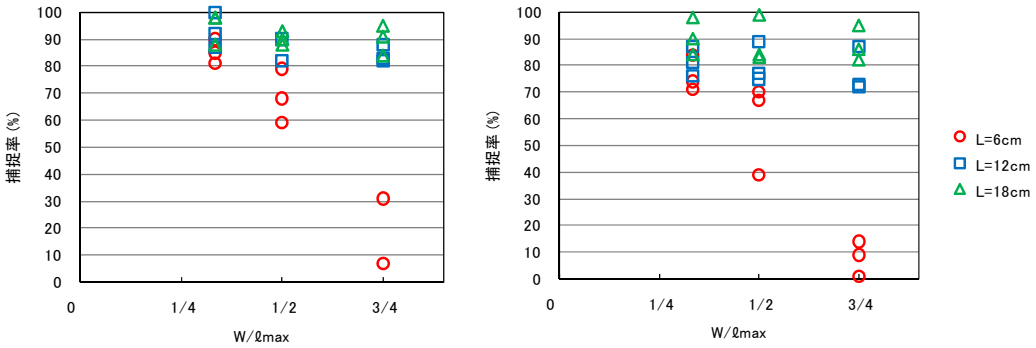
一方，解析においても，ほぼ同様の捕捉の経過が見られ，捕捉に伴う時間変化を概ね表現できていることがわかる．また，この解析結果を細かく観察すると，根付き流木の捕捉においては，捕捉工に衝突してから回転し，2 本の捕捉工柱の間に架橋構造が形成されることが，その後の捕捉に大きく影響していることがわかった．

4.4　捕捉後の状況の比較

(1)　堆積状況

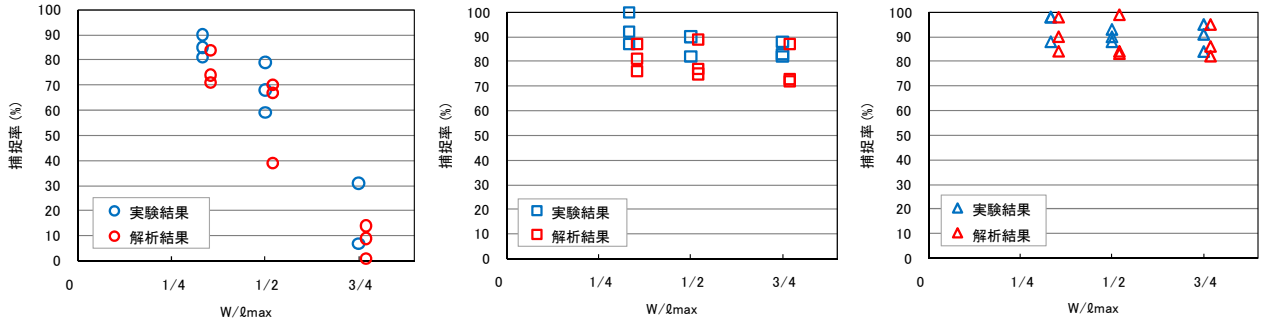
図－11, 12 に，捕捉後の堆積状況について下流側から撮影した状況を，実験と比較して示す．なお，図－11 に流木長 l=12cm の結果を，また，図－12 に流木長 l=6cm の結果をそれぞれ示している，

まず，図－11 に示す流木長 l=12cm の実験結果は，捕捉された流木が根によって全体的に絡まって捕捉されている．特に，捕捉工柱部材の間から流下しそうな流木が，その根が後続の流木と絡み合うことで捕捉されている様子



(a)　実験結果　　(b)　解析結果

図－13　捕捉率と捕捉工間隔比 *W/l* の関係



(a)　流木長 *l*=6cm　　(b)　流木長 *l*=12cm　　(c)　流木長 *l*=18cm

図－14　流木長ごとの捕捉率と捕捉工間隔比 *W/l* の関係の比較

がわかる．また，捕捉工間隔比 *W/l* の増加に伴い捕捉される本数がやや減少している．一方，解析結果でも，捕捉されている根付き流木の全体的な堆積状況や，1 本では捕捉工を通過しそうな流木が，後続の流木と絡み合うことで捕捉されている様子が，よく再現できている．また，捕捉工間隔比 *W/l* の増加に伴い捕捉される本数が少なくなる様子も再現できている．

次に，図－12 に示す流木長 *l*=6cm の実験結果では，捕捉された流木が根によって全体的に絡まって捕捉されている様子は流木長 *l*=12cm の場合とほぼ同様であるが，捕捉工間隔比 *W/l* の増加に伴い捕捉される本数が明らかに少なくなっており，*W/l*=3/4 ではほとんど捕捉されていない．一方，解析結果でも，捕捉状況や捕捉工間隔比 *W/l* の増加に伴う捕捉本数の減少傾向を概ね再現できている．

これより，集合体要素モデルを用いることにより，根付き流木の捕捉後の堆積状況を概ね表現できていることがわかる．

(2)　流木捕捉率による比較

図－13 に，流木捕捉率（＝捕捉本数／流下総本数）と捕捉工間隔比 *W/l* の関係を実験結果と比較して示す．なお，グラフには 3 回行った実験・解析の結果を全てプロットしている．

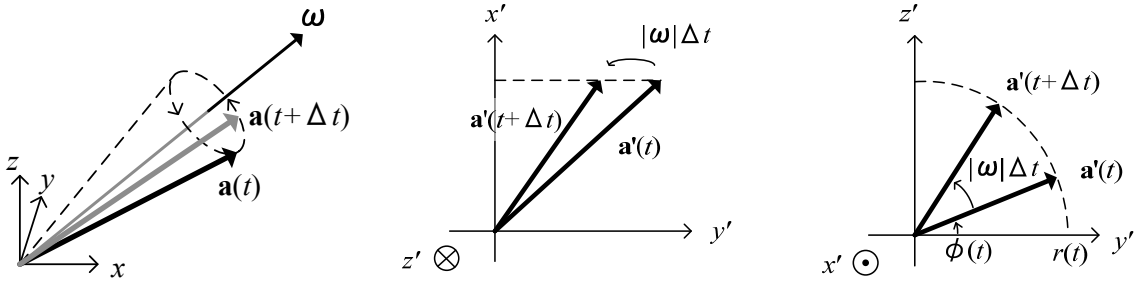
まず，実験結果では，流木長 *l*=6cm では捕捉工間隔比 *W/l* の増加に伴う捕捉率の減少傾向が顕著にみられるが，流木長 *l*=12, 18cm では捕捉率の減少傾向が小さい．また，同じ捕捉工間隔比であっても，流木長が長くなるほど捕捉率が上昇する傾向があることがわかる．

一方，解析結果についても，捕捉工間隔比 *W/l* の増加に伴い捕捉率が減少する傾向や，同じ捕捉工間隔比であっても，流木長が長くなるほど捕捉率が上昇する傾向があることが，概ね再現できている．

図－14 に，流木捕捉率と捕捉工間隔比 *W/l* の関係について，流木長ごとに実験結果と比較して示す．

これより，図－14(a), (c)に示す，流木長 6, 18cm では実験結果の傾向をよく捉えていることがわかる．また，流木長 12cm の解析結果は，実験結果をやや下回っているものの，捕捉率のばらつきの範囲は重なっており，概ね表現できていることがわかる．前述のように，根付き流木の捕捉においては，捕捉工に衝突・回転し，2 本の捕捉工柱の間に架橋構造が形成されるかどうかが，その後の捕捉に大きく影響していることから，最初のきっかけとなる流木の捕捉工への衝突・回転のタイミングが，捕捉率のばらつきに影響を与えていることが伺える．

なお，これらの根付き流木の実験による捕捉率が根なし流木のものより極めて大きくなることは文献 14)で示した通りであり，また，根なしの直円柱流木のシミュレーションも実験と同様になることを文献 10)に示している．このことより，本解析によって根付き効果が適切に表現されていることがわかる．



(a) 角速度 **ω**　　(b) y'－x'平面　　(c) y'－z'平面

図－15　ベクトルの回転

5. 結　言

本研究は, 流木捕捉工による根付き流木の捕捉について, 円柱形要素からなる集合体要素を導入した 3 次元個別要素法を適用し, 模型実験のシミュレーション解析を試みたものである. 本研究の成果をまとめると以下のようになる.

(1) 複数の要素からなる剛結集合体要素の運動を解く基本式を定式化し，プログラム化した.

(2) 根付き流木の流下状況について，根が水路底面を擦ることにより, 流木が流下方向を向いて流下する様子を再現することができた.

(3) 根付き流木の捕捉過程について，柱部材間が閉塞した後，水位上昇とともに堆積流木がやや高くなり，その後, 後続の流木が上流側に堆積していく様子を概ね再現することができた.

(4) 根付き流木の捕捉状況について，全体の堆積状況に加え, 捕捉率と捕捉工間隔比の関係についても概ね定量的に評価できることを示した.

(5) 著者らは，文献 14)において流木の長さや柱部材の間隔, 流速などを考慮した流木捕捉率推定式を提案しているが, 本解析手法を援用することにより流木捕捉率推定のさらなる信頼性向上が図れるものと考える.

今後は，円柱形集合体要素だけでなく，球形要素を連結した集合体要素を用いた根付き流木の解析による比較・検討も必要である．さらに，流木捕捉工の捕捉性能についても, 既往の土石流の捕捉に関する確率的な評価に関する研究[19]のような主因子・パラメータのばらつきを考慮した検討が必要である.

付　録

ここでは, 回転に伴う姿勢マトリクスの更新要領について示す.

一般に，あるベクトル **a**(t)を角速度 **ω** で微小時間 Δt だけ回転させる場合，回転後のベクトル **a**(t+Δt)は次のように表される.

$$\mathbf{a}(t+\Delta t)=\mathbf{a}(t)+\left(\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{a}(t)\right)\Delta t \tag{A-1}$$

しかし式(A-1)は，各軸回りの回転運動を並進方向の運動に置き換えて近似したものであるため, 本研究で用いる円柱のような長い形状では十分な精度を確保できない可能性がある.

そこで，角速度ベクトル **ω** の性質に着目する．角速度ベクトル **ω** は, **ω** ベクトルを回転軸とし, その軸回りに|**ω**|回転させる意味を持つ．これより，姿勢マトリクスを構成する各軸ベクトルを **ω** 回転させることにより，姿勢の更新が達成される.

まず, **ω** ベクトルと同じ方向の単位ベクトルを局所の x' 軸とする局所座標系（以下，回転の局所座標系と呼ぶ）を考えると，**a** ベクトルは図－15 のように表される．これより，あるベクトル **a** が **ω** 回転するとは，**ω** ベクトルを中心軸とし，**a** が作る側面を持つ円錐の回転と同じように考えることができる．ここではまず，**a** ベクトルを回転の局所座標系に変換する.

$$\mathbf{a}'(t)=\begin{bmatrix}x'_a(t)\\ y'_a(t)\\ z'_a(t)\end{bmatrix}=\mathbf{A}_\omega\mathbf{a}(t) \tag{A-2}$$

ここで, **a**’ : 回転の局所座標系における **a** ベクトル, x_a’, y_a’, z_a’ : それぞれ **a**’ベクトルの x', y', z'軸方向成分，$\mathbf{A}_\omega$: 回転の局所座標系に変換する座標変換マトリクスである.

ここで，**a**’ベクトルを次のように置き換える.

$$\mathbf{a}'(t)=\begin{bmatrix}x'_a(t)\\ r(t)\cos\left(\varphi(t)\right)\\ r(t)\sin\left(\varphi(t)\right)\end{bmatrix} \tag{A-3}$$

ただし，$r(t)=\sqrt{\left(y'_a(t)\right)^2+\left(z'_a(t)\right)^2}$，$\varphi(t)=\cos^{-1}\left(\dfrac{z'_a(t)}{y'_a(t)}\right)$

ω ベクトルの定義より, 回転の局所座標系における回転後のベクトル **a**’ (t+Δt)は，次のように表せる.

$$\mathbf{a}'(t+\Delta t)=\begin{bmatrix}x'_a(t)\\ r(t)\cos\left(\varphi(t)+|\boldsymbol{\omega}|\Delta t\right)\\ r(t)\sin\left(\varphi(t)+|\boldsymbol{\omega}|\Delta t\right)\end{bmatrix} \tag{A-4}$$

これより, 全体座標系における回転後のベクトル **a**(t+Δt)は次のように表される.

$$\mathbf{a}(t+\Delta t)=\mathbf{A}_\omega^{\mathrm{T}}\mathbf{a}'(t+\Delta t) \tag{A-5}$$

以上の方法により, 姿勢マトリクスを構成する各軸ベクトルを回転させると, 単位ベクトル性とそれぞれの直交性を保ったまま，姿勢の更新が成される.

参考文献

1) 土木学会:平成 16 年度 7 月北陸豪雨災害調査報告書, pp.206-220，2005.
2) 防災科学技術研究所 : 主要災害調査 40 号, pp.33-75, 2006.
3) 国土交通省砂防部, 国土交通省国土技術政策総合研究所 : 土石流・流木対策設計技術指針及び同解説，2007.
4) 水山高久，石川芳治，矢島重美 : 透過型砂防ダムによる流木捕捉効果，土木技術資料，Vol.30，No.11，pp.47-52，1988.
5) 石川芳治，水山高久，福澤誠 : 砂防ダムおよび流木止スクリーンによる流木捕捉効果，土木技術資料，Vol.31，No.9，pp.41-47，1989.
6) 松村和樹，橋田芳朗，葛西俊一郎 : 格子型砂防ダムによる流木捕捉効果，新砂防，Vol.43，No.3，pp.9-12，1990.
7) 清水義彦，長田健吾，高梨智子 : 個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面 2 次元数値解析, 水工学論文集，Vol.50，pp.787-792，2006.
8) 清水義彦，長田健吾 : 流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集，Vol.51，pp.829-834，2007.
9) 後藤仁志，五十里洋行，酒井哲郎，奥謙介 : 山地橋梁の流木閉塞過程の 3 次元シミュレーション, 水工学論文集，Vol.51，pp.835-840，2007.
10) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆 : 3D-DEM による流木捕捉工の捕捉シミュレーション解析, 砂防学会誌，Vol.63，No.6，pp.13-22，2011.
11) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆：円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析，土木学会論文集 A2（応用力学）（査読中）
12) 原木大輔，香月智 : 円柱形鉄筋要素導入型三次元個別要素法による RC はりの衝撃応答解析, 構造工学論文集，Vol.55A，pp.1238-1249，2009.
13) 戸川隼人：有限要素法による振動解析，サイエンス社，pp.23-27, 1997.
14) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆：根付き流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1087-1094，2011.
15) 苅住昇 : 樹木の根の形態と分布，森林総合研究所研究報告，No.94，pp.1-197，1957.
16) 吉川秀夫 : 水理学，技報堂出版，pp.87-88，1976.
17) 森林総合研究所：改訂 4 版　木材工業ハンドブック，丸善，pp.134-135，2004.
18) 伯野元彦：破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー，森北出版，pp.40-53，1997.
19) 片出亮，香月智，嶋丈示：巨礫粒径分布の砂防堰堤閉塞確率に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.57A，pp.209-220，2011.

(2011 年 3 月 8 日受付)