

粘弾塑性体モデルで表現した物体間の相互作用による破壊

本間 達*・若松 秀俊*

Real-time Representation of Destruction Process Considering Interaction between Two Virtual Objects

Satoru HONMA* and Hidetoshi WAKAMATSU*

Virtual objects have been synthesized based on physical phenomena using various kinds of techniques in artificial reality. In most cases, the calculation decreases owing to some kinds of simplified models and/or reduction of their composing elements, by which their drawing of shapes is easily performed in a higher speed. However, the deformation of virtual objects beyond their elastic limit has not been conventionally considered. Thus, it is necessary to take into account plasticity as well as elasticity and viscosity for more accurate representation of dynamical deformation process of materials, for which a new coefficient for positional relation of masses is proposed to represent the various dynamical action of the objects. That is, their interaction is mathematically formulated to simulate their actual action and reaction on the basis of their physical relation. Thus, a virtual object of elasto-visco-plastic model can be applied for the real-time dynamical presentation of the deformation and destruction such as "Crack", "Collapse" and "Smash".

Key Words: elasto-visco-plastic model, interaction of virtual objects, real-time destruction

1. はじめに

電子計算機を用いて人工現実感の世界を構築することは、それと対応する現実の事象を数学的に記述することと等価である。しかしながら、自然界で見られる多くの現象は非線形現象であり、これを正確に数式モデルで表現することは不可能である。したがって、解析上は注目する平衡点付近で線形近似を行ない、特に動特性の解明はこの方法に頼らざるを得ないことから、本質的動態を見失わない範囲で単純化したモデルで物理現象を表わし、物体の変形現象を解明するための研究が広く行なわれてきた。たとえば、材料の性質を扱う場合には、弾性と粘性を組み合わせた Kelvin-Voigt モデルを用いて仮想物体を構築する手法^{1),2)} や、粘性を追加した三要素モデルによりレオロジーを表現する手法³⁾ などが提案されてきた。これらは上記の意味で弾性限界内での動態に限定した線形現象としての物理モデルを積極的に導入しており、破壊を伴わない物体の動態解析に有効であることが示されている。

一方、弾性限界を逸脱した物質動態を表現するために、微分方程式を逐次再構築する手法が有効であることが示さ

れ⁴⁾、同時に演算量の削減が実時間での描画に重要であることが示唆された。また、質点を接続する要素を分割し再構成する手法による仮想物体の破壊表現を試みる⁵⁾ など、実時間で物質の形状変化を表現する可能性も示された。さらに、物体内部に充填した球体を用いて、その体積変化によりひび割れを表現する手法⁶⁾ も提案されている。また建造物の崩壊や土砂などの崩落をシミュレートするために、物体を構成する要素ごとに異なる容積を考慮する拡張個別要素法⁷⁾ も提案されている。しかしながら、これらの手法は種々の力覚表示システム⁸⁾⁻¹⁵⁾ による実時間での意図的な破壊を念頭に置いたものではなかった。

力覚表示システムでの破壊表現を前提としたものとしては、操作デバイスも含めて粘弾性体モデルで表わし、モデルを切離位置で分割する手法¹⁶⁾ や、外部からの切断操作によって物体が分割されたときに要素を並列に追加する手法¹⁷⁾ などが提案されてきた。これらの手法は計算機の演算能力が低い場合に効果的であるが、切離位置に粘弾性体モデルを追加して切離面を形成するので、切断前のモデルと比較して動態が一致しない場合がある。

一方、粘弾性体モデルに状態変数を導入し、運動中の任意の時刻に任意の位置姿勢で物体を分割する手法¹⁸⁾ が提案されている。この手法では、すべての粘弾性体モデルの自然長が一定な正四面体構造を構成し、この連続により仮想物体を構築し、運動中の物体の破壊を表現可能であることを示した。本研究はこれを発展させたもので、より正確な表現のた

* 東京医科歯科大学大学院保健衛生学研究所
東京都文京区湯島 1-5-45

* Graduate School of Health Sciences, Tokyo Medical and
Dental University, 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo
(Received January 24, 2008)
(Revised May 14, 2008)

めに弾性と粘性のみならず、従来の人工現実感の研究で考慮されなかった破壊を伴う塑性変形をモデル化し、Kelvin-Voigtモデルを拡張する。すなわち、力覚表示システムへの応用を前提として、変形から破壊を連続的に取り扱うために粘弾塑性体モデルで仮想物体を構築し、物体間に及ぼされる相互作用によって「割れる」「潰れる」「砕ける」などの破壊を実時間で演算描画可能なことをシミュレーションによって確認し、その有効性を検討する。

2. 粘弾塑性体モデルの構築

人工現実感で物理モデルを導入する目的は、現実の物体の動態に近づけるためであり、すなわち実時間で物質の形状変化を正確に表現するためである。このために、弾性、粘性のみを考慮した従来の物理モデルに塑性モデルを追加する。なお、実時間での表現のために演算時間を短縮する必要があるため、できるだけ単純にモデル化することが望ましい。ここでは塑性を近似したモデルを構築し、演算を行なう手法について述べる。

2.1 塑性モデルの構築

金属などの物体に伸展方向の力を加えていくと、Fig. 1に太実線で示すようなひずみ変化が測定されることが知られている^{19)~22)}。加える力が弾性限界内にある場合(図中①)、物体は弾性変形するが、降伏点(yield point)、すなわち弾性限界を逸脱して、さらに力を加えると元の状態に復元しないひずみ変化、すなわち塑性変形を生じる(図中②)。この状態から力を加え続けると、やがて物体は破断する(図中③)。このときの限界点を本研究では破断点(breaking point)とする。降伏点における粘弾塑性体モデル(本研究では特に、力の発生が主として弾性によることを考慮して、以下、バネと表現する)の長さ l と自然長 L の比を降伏距離比(Yielding distance ratio)と定義して変数 y_p で表わし、破断点における比を破断距離比(Breaking distance ratio)と定義して変数 b_p で表わす。したがって、 $1 < y_p < b_p$ が成立する。降伏点と破断点の間(図中②)でバネに加えられた力が除かれた場合、弾性限界内のひずみ変化とほぼ等しい弾性定数でバネの長さが小さくなり、完全に力を除いた状態で、バネは自然長 L より長くなる。この増加分 l_c は、塑性ひずみに相当するので、

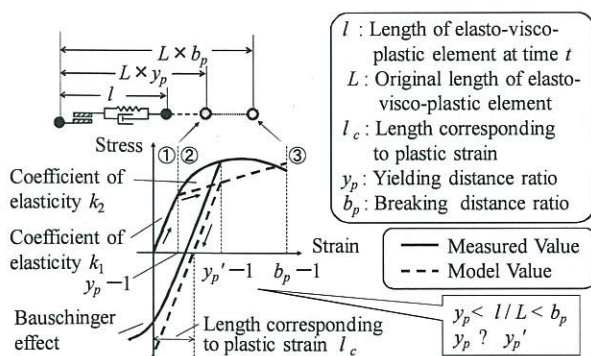


Fig. 1 Plasticity-model based on a measured value

本研究では塑性ひずみ相当長(Length corresponding to plastic strain) l_c と定義する。このとき降伏距離比を示す変数 y_p は、力が除かれた時点のバネの長さ l と自然長 L の比である y_p' になる。

この塑性変形を計算するために、力とひずみ変化の関係を、Fig. 1に破線で示すように折れ線近似してモデル化する手法が知られている^{21),22)}。このモデルは、弾性限界内ではHookeの法則に従って、加えられた力に比例したひずみ変化を生じる。このときの弾性定数を k_1 で表わす。弾性限界を逸脱した力が物体に加えられた場合は、弾性定数が k_2 になる。加えられた力を除いた場合、弾性定数 k_1 で比例して長さが減少する。なお本研究では、現実の物体で自然長近くまで長さが小さくなる時、弾性定数が非線形に変化することが観測されるバウシinger効果は単純化のために考慮しない。このため、モデル単独では現実の物体と完全に対応しないが、その連続的な配置により構築した仮想物体は現実の物体のマクロな特性を近似的に表現可能である。

2.2 モデル式の構築

上述の折れ線モデルを数学的に記述するために、時刻 t における h 番目のバネの長さ l_h と自然長 L_h の比 l_h/L_h を考慮して、以下の3段階に区分し、それぞれの力学的動態について記述する。

- ①比 l_h/L_h が y_{ph} より小さい、すなわちバネの伸びが弾性限界内にある場合。
- ②比 l_h/L_h が y_{ph} より大きく b_{ph} より小さい、すなわちバネの伸びが弾性限界を逸脱して破断していない場合。
- ③比 l_h/L_h が b_{ph} より大きい、すなわち破断した場合。

2.2.1 弾性限界内でのバネの力学的動態

上述①の場合、すなわちバネの伸展が弾性限界内にある場合、もしくは弾性限界を逸脱後にバネが切断されることなく除荷し、バネに加えられた力とバネの伸びが比例関係にある場合、バネが及ぼす力 f_h は、固有の弾性定数 k_{h1} および粘性定数 γ_h を用いて以下の(1)式で表現する。ただし、塑性ひずみ相当長を表わす l_{ch} は、そのバネが弾性限界を逸脱した履歴のない場合は0である。

$$f_h = k_{h1}(l_h - L_h - l_{ch}) - \gamma_h dl_h/dt \quad (1)$$

2.2.2 弾性限界を逸脱して破断していないバネの力学的動態

上述②の場合、すなわちバネが弾性限界を逸脱し、かつ切断していない場合、バネが及ぼす力 f_h は降伏前の弾性定数 k_{h1} と降伏後の弾性定数 k_{h2} を用いて、以下の(2)式で表現する。

$$f_h = k_{h1}\{(y_{ph}-1)L_h - l_{ch}\} + k_{h2}(l_h - y_{ph}L_h) - \gamma_h dl_h/dt \quad (2)$$

ただし、(2)式にて導出後、降伏距離比を表わす変数 y_{ph} は $y_{ph}' = l_h/L_h$ として補正し、さらに塑性ひずみ相当長 l_{ch} は $l_{ch} = l_h - L_h - f_h/k_{h1}$ になる。

2.2.3 バネが破断した場合の力学的動態

上述③の場合は、バネの切断を意味する。したがってバネ

は質点に力を及ぼさないで、 f_h は以下の(3)式のように0になる。

$$f_h = 0 \quad (3)$$

このとき、バネの接続状態を表す接続状態変数 η_{ch} は1から0に変わる。 $\eta_{ch}=0$ の場合、バネの力学的動態の計算および表示は行なわない。

2.3 仮想物体の構築について

仮想物体は Fig. 2 に示すように弾性と粘性が並列に接続した Kelvin-Voigt モデルに、塑性が直列に接続したバネおよび質点で構築する。質点が正四面体の頂点に位置し、バネがその間を接続した構造を基本とする。

この基本構造を x , y , z 軸方向に連続的に配置して組み合わせ、直方体構造を構成する。その内部に含まれる任意の形状の空間内の質点とそれらを接続するバネのみを残し、外部の質点およびこれと接続するバネを消去して、任意形状の仮想物体を構築する。たとえば直方体の内部に存在する球状の空間を考えれば、仮想球状物体を構築可能である。

2.4 仮想物体同士の接触

複数の仮想物体が運動中に接触し、相互に作用する力によって、物体の変形・破壊を生ずる場合の力学動態について検討する。このとき、1つの物体が破壊されて生じる破片同士の接触も考慮する。これを実現するためには、仮想物体を構成する質点ごとに位置関係を考慮しなければならない。

本研究では、Fig. 2 に示すように質点を頂点に配置し、各辺をバネで接続した正四面体構造の連続的な配置で物体を構築するので、互いにバネで接続していない質点同士が接触したときに、その質点を含む物体同士が接触したと考えることができる。このとき質点同士が接触したとみなす計算上の距離を接触距離として定義する。具体的には、質点間の距離があらかじめ定めた接触距離以下のとき接触が生じたと考え、質点同士は完全弾性衝突すると考える。複数の質点が接触距離以下に存在する場合、最も近い距離にある質点同士に接触を生じたとする。接触距離が小さいほど物体同士の距離が近づくと、より現実に近い状態の接触を表現可能となる。しかし、モデルで構築する仮想物体の場合、過小な接触距離が設定されると、構造のすき間をすり抜け、質点同士が接触し

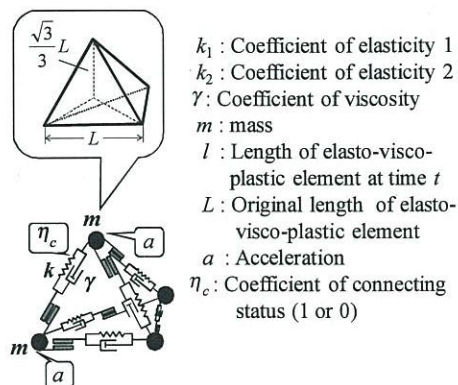


Fig. 2 Basic structure of the unit elasto-visco-plastic model

ていないと判定される場合がある。一方、接触距離が大きいと、物体が外力で変形した場合に、同一物体内で質点同士が接触したと判定されて、不自然な力学動態を生じる場合がある。これらの点を考慮して本研究では、接近する質点が一辺の長さをバネの自然長 L とする正四面体の一面、すなわち正三角形の重心をすり抜けて通過することがないようにするため、Fig. 2 に示すように接触距離を $\sqrt{3}L/3$ と設定する。

なお、離散時間で計算すると、接触距離の設定値以下の位置で質点同士が接触と判定される場合がある。このとき質点の速度、加速度などの条件により接触距離の設定値以上に離れず、計算上、接触が繰り返され続けているように判定される場合がある。これを回避するために、質点間の距離が接触距離以下となった場合には、該当する2質点間の距離が接触距離を維持しつつ他の質点が運動し、サンプリング時刻において接触を生じたとみなして計算する。

2.5 接触判定の高速化

物体を正四面体構造の基本モデルの連続で配置した場合、その頂点にある質点は最大で12のバネと接続する。したがって、質点に接続するバネの数が12であれば、その質点が物体内部に存在し、他の質点との接触を生じない。バネの数が1以上12未満である場合は、質点が物体の外部表面もしくは内部に形成される空洞表面に存在し、他の質点と接触する可能性がある。この条件に従って、判定する質点を構成要素として含む物体内部に存在する他の質点を含め、互いにバネと接続していない接触可能なすべての質点の組み合わせについて逐次探索により接触判定を行なう。このようすを2次元で表現したのが Fig. 3 である。ただし、探索中にすでに他の質点と接触すると判定された質点については、その時刻の探索の対象とせず接触判定を行なわない。また本研究では質点を接続するバネの質量の重心としてとらえるので、バネの数が0である場合、その質点の質量を0とみなして接触判定を行なわない。

2.6 シミュレーションのパターン設定

仮想物体の変形・破壊が表現可能であることを確認するために、物体が単独で衝撃を受けた場合の変形と、物体同士の相互作用によって衝撃を受けた場合の変形について検討する。

シミュレーションは、EPSON Direct 社製 Endeavor

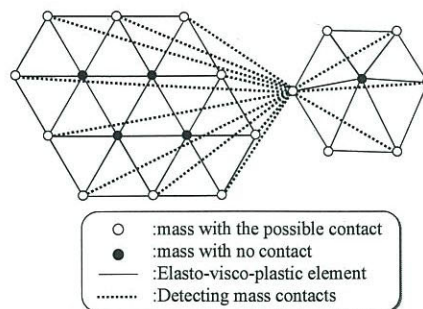


Fig. 3 Detecting mass contacts in collision

Pro4000(OS: Windows XP SP2, CPU: Core 2 Duo E6700, グラフィックボード: Radeon X1950 PRO, メモリ: 2 GB)で行ない, プログラムは VisualC++2005 Express Edition と Windows Platform SDK の組み合わせで開発し, DirectX9.0C を用いて描画した. 基本的に演算の際のサンプル間隔は 1[msec] として差分法¹⁸⁾ によって演算を行なうとした.

2.6.1 球状物体の床面との衝突による破壊の表現

降伏距離比と破断距離比を決定する2つのパラメータ y_p と b_p の適切な設定により, 任意の破壊状態を表現可能であることを確認する. このために本項では, Fig. 4 のように球状の仮想物体を構築し, 仮想的に設定した床面と単独で衝突させたときの変形・破壊について検討する. 具体的には, 上述の手法により1つのバネの長さ $L=0.01$ [m] で, 半径 0.04 [m] の範囲内で最大となるように球状物体を構築する. すなわち上述の正四面体構造を立体的に連続し, 上述の範囲外にある質点およびこれに接続するバネが存在しないように仮想物体を構築する. この条件で球状物体に含まれる質点の数 n は 381 である. また, すべてのバネについて, 弾性定数 $k_1=45$ [N/m], $k_2=0.45$ [N/m], 粘性定数 $\gamma=10$ [Ns/m] とし, 質点の質量を $m=0.0001$ [kg] で一定とした. この球体を構築する質点すべてに床面方向の速度 $v_0=0.6$ [m/s] を与えて, 床面に衝突したときの物体の変形と破壊の様子をシミュレーションによって確認する. 落下の衝撃による床面の変形・破壊は生じないとして, 床面の物性値は考慮しない.

本研究では質点単独で, 床面との反発係数をもつのではなく, 構成される仮想物体内部での力の伝達により, 結果として反発係数が生じると考えるので, 質点と床面の衝突時についても質点同士の場合と同様に完全弾性衝突とする.

2.6.2 仮想物体同士の相互作用による変形のシミュレーション

つぎに, 仮想物体同士が接触した際に及ぼす相互作用による物体の動態について検討する. 仮想物体の形状, 大きさ, 運動方向を変えて, Fig. 5 に示す4パターンについてシミュレーションを行なう.

- 相対的に小型の球状物体 A_1 が球状物体 A_2 方向に一定速度で水平移動して物体同士の衝突を生ずる場合.
- 球状物体 B_1 が球状物体 B_2 方向に一定速度で水平移動して物体同士の衝突を生ずる場合.
- 球状物体 C_1 が床面上に置かれた直方体 C_2 方向に一定速度で垂直移動して, C_2 表面の任意の部分に物体同士の衝突を生ずる場合.
- 球状物体 D_1 が仮想床面上に置かれた球状物体 D_2 に一定速度で垂直移動して, 物体同士の衝突を生ずる場合.

ここで, 球状物体は前項と同様の形状とし, 小型球状物体は半径 0.011 [m] の範囲内で最大となるようにした. この条

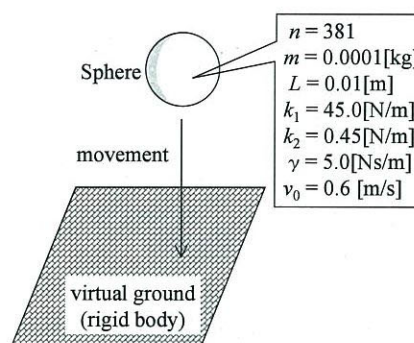


Fig. 4 Condition for the simulation of collision

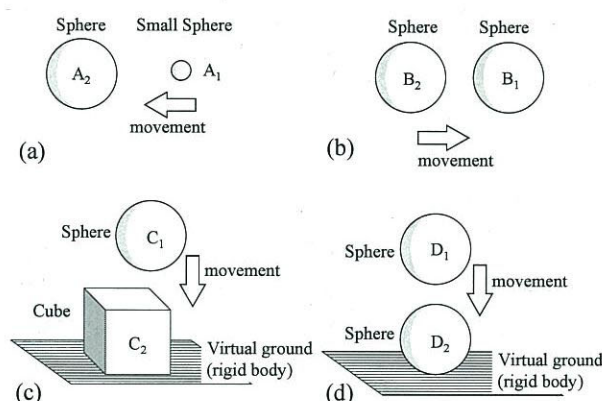


Fig. 5 Illustration of 4 kinds of collision-patterns

件で小型球状物体に含まれる質点の数 n は 13 である. 直方体は質点が x, y, z 軸方向にそれぞれ $10 \times 10 \times 10$ 個並ぶように設定した. この条件で直方体に含まれる質点の数 n は 1000 である. また, 基本的なパラメータとして, バネの弾性定数 k_h, k_h , 粘性定数 γ , 質点の質量 m については前項と同様に設定する. また, シミュレーションパターンごとに, 降伏距離比を表現するパラメータ y_p , 破断距離比を表現するパラメータ b_p , 運動初速度 v_0 を任意に変更する.

3. 結 果

3.1 塑性を表わすパラメータによる破壊の分類

物体の塑性変形は粉碎(smash), 分裂(disunion), 亀裂(crack), 崩潰(crush)の4種類に大別することができる. 弾性限界内で変形した物体は元の形状に戻り安定(stability)であるので, 2.6.1項のシミュレーションの結果に基づき, 仮想球状物体の床面への衝突後の状態を上述の5種類に分類する. 5つの状態の一例を, 比較のために変形前の画像と並べて Fig. 6 に示す.

図中青緑の線で描画したのが, 初期設定の弾性限界内でのみ運動しているバネであり, 赤い線で描画したのが, 初期設定の弾性限界を逸脱して破断していないバネである. 粉碎は破断がほぼ全体に広がり, 球状物体が多数の小物体に断片化している. これは y_p が小さく, かつ y_p と b_p の差が小さい

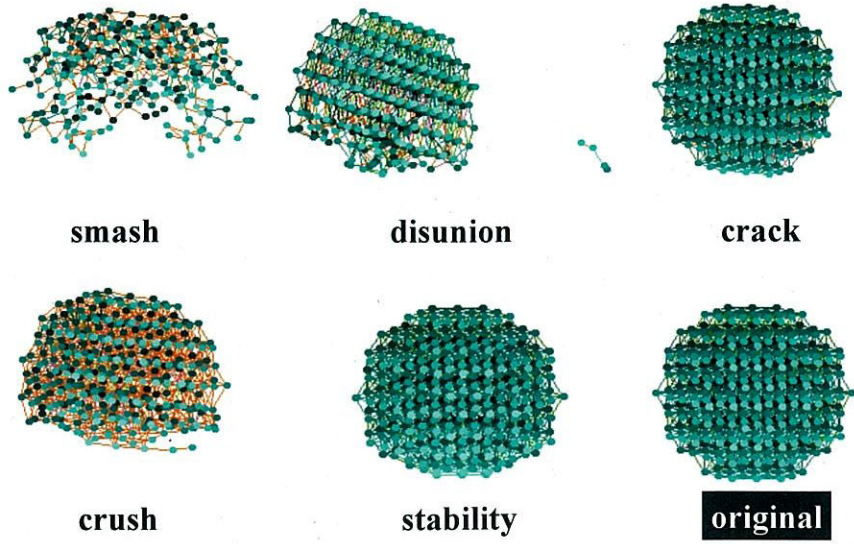


Fig. 6 Classification of destruction, in the collision with the ground

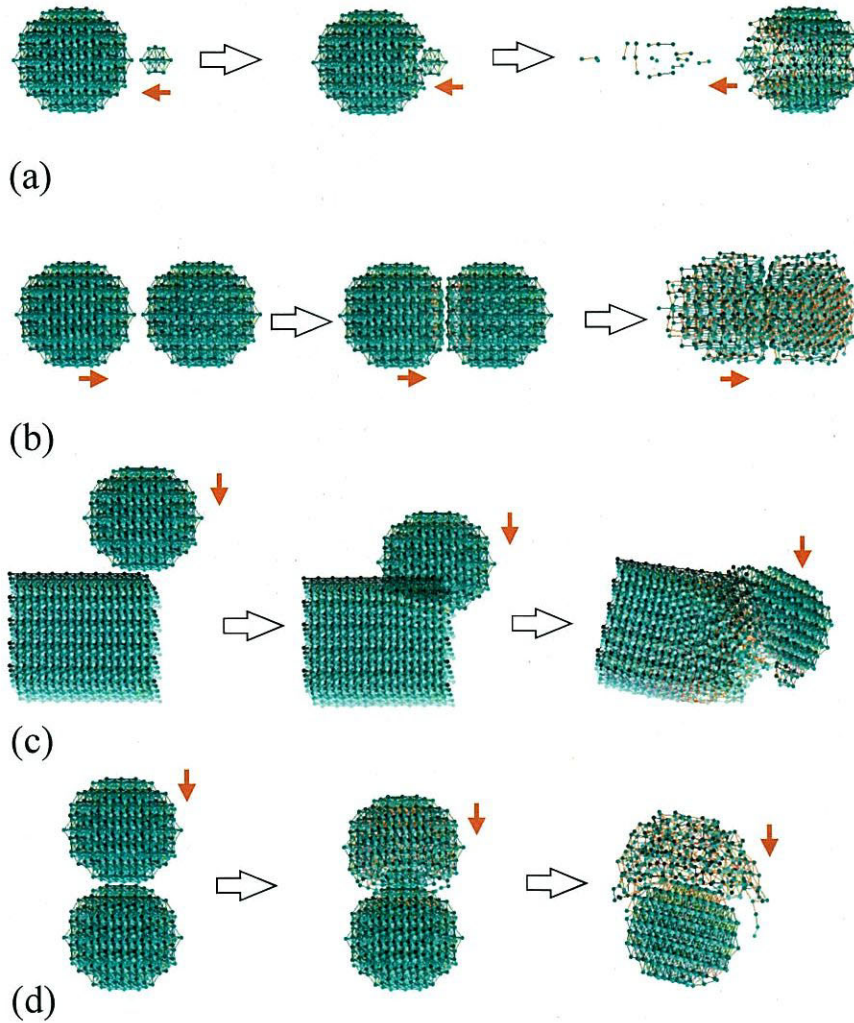


Fig. 7 Appearance of deformation by the interaction between two virtual objects

ので、バネが衝撃によって弾性限界を越えやすく、また伸展度が低くても切れやすいので、物体全体で粉々になりやすいからである。分裂は、物体内部の任意の場所に、方向性をもって破断が生じ、大きな破片といくつかの細片に分かれている。このとき、 y_p が粉碎と比較してやや大きく、かつ y_p と b_p の差が小さいので、衝撃が一定以上に大きい場合のみ弾性限界を越え、また適度にバネが切断して物体全体に衝撃が伝播する前に、いくつかの物体に分裂する。亀裂は球状物体の特定の部位で一部のバネに破断を生じ、その周辺のバネに弾性限界の逸脱を生じているが、全体の形状はほぼ保たれている。これは、 y_p が一定以上大きく、物体の形状により衝撃が伝わりやすい部位のみ弾性限界を越え、一部のバネが切れる程度の破損を生ずる場合である。崩潰は、おおむね全体のバネに弾性限界からの逸脱を生じているが、ほとんど破断を生じないので物体全体が柔らかくなり、物体の形状が崩れた状態が表現されている。 y_p が小さいが y_p と b_p の差は大きいので、モデルが衝撃によって弾性限界を越えて伸展しても切れにくく、物体全体として潰れた状態になりやすいからである。また、 y_p が大きいとバネが弾性限界を越えないので、徐荷されると元の形状に戻りやすい。このため、安定は床面上における衝突の勢いにより、やや変形しているが、弾性限界を逸脱したバネはなく、弾性力で容易に元の状態に復元する。

3.2 相互作用による物体の変形

つぎに、2.6.2項で示したシミュレーションパターン条件に従い、仮想物体同士が衝突したときの変形・破壊の一例を Fig. 7 に示す。基本的にすべての質点の質量 m 、バネの弾性定数 k_1 , k_2 , 粘性定数 γ は2.6.1項の条件と同一とし、バネの降伏距離比と破断距離比を表わす変数を y_p , b_p と物体を構成する質点の速度 v_0 を各物体を構成する全要素に共通として、それぞれのシミュレーションパターンごとに与える。

Fig. 7(a)~(d)はそれぞれ、左から右へ時間の進行に従って並べたものであり、一定速度で移動する物体の運動方向を図中に赤矢印で示している。

同図(a)は小型球状物体 A_1 と球状物体 A_2 を構成するバネの降伏距離比と破断距離比を表す変数を $y_p=1.12$, $b_p=1.17$ とし、 A_1 に A_2 方向への速度 $v=0.3$ [m/s] なる条件を与えたものである。 A_1 が A_2 に衝突後、 A_2 を貫通して出てきた場合のようすが示されている。このとき、 A_2 の内部の質点とバネが A_1 より先に、はじき出されているのがわかる。

同図(b)は球状物体 B_1 , B_2 を構成するバネの降伏距離比と破断距離比を表わす変数を $y_p=1.01$, $b_p=1.08$ とし、 B_2 に B_1 方向への速度 $v=1.0$ [m/s] なる条件を与えたものである。 B_2 が B_1 に衝突して自身も変形しながら B_1 を弾き飛ばしているようすが示されている。このとき、衝突の衝撃で、 B_1 , B_2 ともに内部のバネが弾性限界を逸脱し、連続的に破断してそれぞれが粉碎していくようすが示されている。

同図(c)は球状物体 C_1 と立方体 C_2 を構成するバネの降伏距離比と破断距離比を表わす変数を $y_p=1.06$, $b_p=1.15$ とし、 C_2 に C_1 方向への速度 $v=0.1$ [m/s] なる条件を与えたものである。 C_2 の角に C_1 が垂直方向に衝突しそのまま C_1 は C_2 と接触した部分が粉碎している。また C_2 は C_1 が衝突した部分から仮想床面までの間に破壊を生じており、また対角側が浮き上がって仮想床面から離れ、 C_2 自体が傾いているようすが示されている。

同図(d)は球状物体 D_1 , D_2 を構成するバネの降伏距離比と破断距離比を表わす変数を $y_p=1.02$, $b_p=1.05$ とし、 D_1 に D_2 方向への速度 $v=0.3$ [m/s] なる条件を与えたものである。さらに、 D_2 を構成するバネの弾性定数のみ、それぞれ $k_1=100$ [N/m], $k_2=1.0$ [N/m] なる条件を与え、 D_1 より硬い物体とした。衝突によって D_1 は粉碎しているが、 D_2 は D_1 と接触した周辺部と仮想床面と接触している付近に亀裂を生じ、衝突の衝撃によって回転しているが、ほぼ全体の形状は保たれているようすが示されている。

3.3 ループ時間に関する結果

本研究で行なうシミュレーションは主に以下の3つの処理で構成される。

- ①バネと質点で構成される物体の運動に関する演算。
- ②質点同士の接触判定に関する演算。
- ③演算結果に基づく描画。

①~③を1回処理するのに要する時間を本研究ではループ時間と定義する。また、①②を n 回繰り返した後③を1回処理するのに要した時間を n で除したものを平均ループ時間と定義する。サンプル間隔 τ がループ時間より小さい場合、実時間での表現が可能である。本研究では τ を暫定的に1[msec]としてシミュレーションを行ない、実測されるループ時間について検討する。

2.6.2項のパターン(a)および(d)についてシミュレーションを行なったときのループ時間と接触判定の回数について Figs. 8, 9 に示す。グラフ上段に実線で示したのは演算1

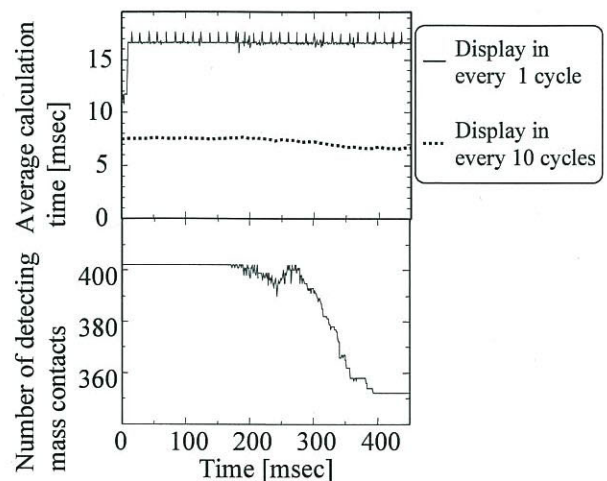


Fig. 8 Average calculation-time and number of detecting mass contacts in the case of pattern (a)

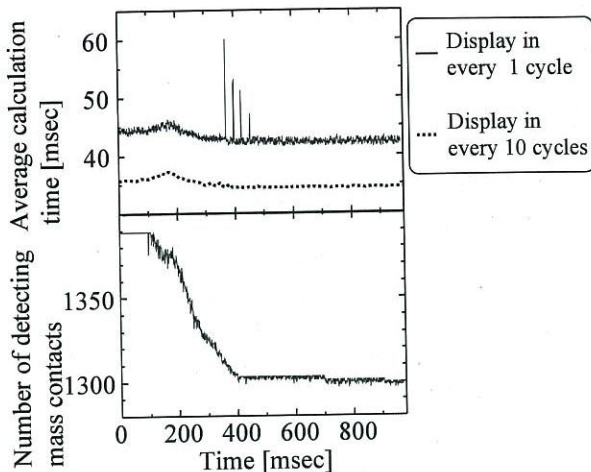


Fig. 9 Average calculation-time and number of detecting mass contacts in the case of pattern (d)

回につき描画を1回行なった場合のループ時間であり、点線で示したのは演算10回につき描画を1回行なった場合の平均ループ時間である。またグラフ下段は物体を構成する各質点同士の接触判定を行なった回数である。物体間の距離が近づいて、質点間に接触を生じた場合、その時刻においては他の質点との接触判定を行なわないので、判定回数は減少する。また物体同士の衝突によって、破壊を生じた場合、他の質点と接触可能な質点数が増減するので、これに伴って判定回数も増減する。

Fig. 8はパターン(a)において、小型球状物体 A_1 が球状物体 A_2 に衝突後、判定回数が減少している。このとき、小型球状物体 A_1 の表面に存在する質点の数が少ないので、判定回数の減少の割合が少なく、ループ時間にほとんど変化が見られない。

一方、Fig. 9はパターン(d)において、球状物体 D_1 が仮想床面上に置かれた球状物体 D_2 に衝突する場合である。小型球状物体 A_1 と比較して物体の表面に存在する質点が多いので、衝突判定回数自体が多くなり、平均ループ時間も大きくなっている。また、衝突直後には衝突判定回数が減少しているにもかかわらず、平均ループ時間が一時増加していることが示されている。

4. 考 察

4.1 破壊の表現について

本研究では塑性を単純な線形モデルで表わし、粘弾性固体を表現する Kelvin-Voigt モデルと組み合わせて、粘弾塑性体モデルを構築した。このモデルを用いてまず仮想球状物体を構成し、仮想空間内における落下衝撃のシミュレーションを行なった。塑性を決定するパラメータである降伏距離比 y_p と破断距離比 b_p を設定し、これらの2変数の適切な設定によって、物体の内部状態変化に基づく4種類の破壊と、破壊されない安定な状態の合計5種類に分類される任意の状態を実時間で表現できることを確認した。粉碎、崩潰などの状

態を表現可能であるので、切離の瞬間にざらざらと崩れ落ちる砂状の物体や、切れにくい粘着質の物体などを表現できる可能性が示された。 y_p はモデルの弾性限界を示しており、ここまで伸展しても弾性により元の状態に復元できることを示している。弾性定数 k_1 の大きさも考慮して硬さを表わす指標の1つである。 b_p はモデルの靱性を表現しており、この値が大きいほど靱性も大きくなる。なお、 y_p と b_p の差は延性を示しており、この値が大きいほど延性が高くなる。 y_p と b_p がともに小さいと、もろく壊れやすい性質を示すが、脆性は物体に生じた傷などに応力が集中して弾性限界以下で破断を生じる性質を意味するので、 $y_p=b_p$ のときのみ脆性を表現する。仮想物体を構築したとき、一部の構成要素が、その周囲のモデルと比較して y_p が小さく、かつ y_p と b_p の差が0に近いとき、仮想物体の該当する部分については脆性を表現すると考えられる。なお、本研究では重力加速度を考慮せず、上述の2変数のみを変更してFig. 6を得たが、質量、重力加速度、落下の初速度、弾性定数 k_1 、 k_2 、粘性定数などの値が変化すれば、異なる結果を得る。ところで、このシミュレーションでは、塑性を表現するための2つのパラメータ y_p 、 b_p のみに議論を限定するために、各バネと質点に与える物性定数をすべて共通とした。また弾性限界を逸脱したバネの弾性定数 k_2 は k_1 と比較して一様に小さくなるとしたが、現実の物質の場合、特性の違いにより大きくなる場合もある。また、粘性定数にも変化を生じると考えられるが、本研究では考慮していない。なお、仮想物体を構成するバネおよび質点ごとにパラメータを設定すれば、現実の物体と対応すると考えられる。このために、実測値に基づいてパラメータを同定する手法の開発が必要であり、今後の検討課題である。

また、モデルで構築した物体のマクロな特性について検討するために、シミュレーションによって、棒状の仮想物体の引張り試験や、ユーイングやサールの装置を想定したヤング率の測定などを行なうことも考えられ、今後の検討課題である。

ところで、本研究では弾性限界からの逸脱を物体の伸展についてのみ考慮している。仮想物体は数式によって記述されるので、計算上の体積が0となる場合が考えられるが、現実の物体では外力を受けて圧縮しても体積が0にならず、破断を生じる場合がある。この破断が外力と異なる方向に伸展して生じるとして本法では考えたが、圧縮による弾性限界からの逸脱の可能性についても物理学的見地から考慮する必要がある。

4.2 仮想物体の相互作用について

仮想物体同士の衝突による相互作用について表現するために、それらを構成する質点同士の接触条件について定義した。正四面体構造の連続配置によって仮想物体を構築するので、1以上12未満のバネと接続しており、かつ互いにバネで接続していない質点同士が、接触による相互作用を及ぼしうる。この条件を満たす質点2つを1組とするすべての組み

合わせを考え、接触距離以下で最も距離が小さい組み合わせの質点間で接触を生じ、接触した質点間では完全弾性衝突が生じるとした。この条件でシミュレーションを行なったところ、Fig. 7に示すように自然な接触が表現できた。

ところで接触距離が小さいほど、物体同士の距離が小さくなるので、接触しているようすが自然に見える。しかしながら一定以上に小さいと、モデルで構築した仮想物体同士の場合、すり抜けを生じる。正四面体の1面の重心と頂点の間の距離から、このときの接触距離を $\sqrt{3}L/3$ としたが、接触によって物体が変形し質点間の間隔が広がった場合、1~2個程度の質点がすり抜け、ごくわずかに物体内部に入り込む場合もあった。しかしながら、物体同士が離れる際に、該当する質点を接続するバネが切断されて、物体同士の動態としては、ほぼ問題なく表現できることを確認した。

なお、質点間の距離が接触距離より小さい場合、完全弾性衝突により質点の速度ベクトルが変化しても、つぎのサンプル間隔内で接触距離より離れずに、再度接触したと判定して無限に衝突を繰り返す場合がある。これを避けるために、質点間の距離が接触距離より小さい場合でも接触距離で接触したとする補正処理を行なった。これによって、質点同士が繰り返し衝突することなく、接触後の物体の動態を自然に表現可能とした。これらの結果から、本モデルは破壊を伴う力覚提示システムなどで、デバイスおよび操作対象物を構築するのに有効であると考えられる。

4.3 演算時間について

差分方程式で質点の速度および位置座標を算出する場合、 τ が小さいほど誤差の少ない正確な動態表現が可能である¹⁶⁾。したがって実時間で描画を行なうためには、本研究で定義した平均ループ時間とサンプル間隔 τ を一致するのが望ましい。

Fig. 8の場合ではループ10回につき描画を1回行なう場合の平均ループ時間は約7 [msec]であることから、力覚表示システム^{16),17)}で実時間の描画が可能である。したがって、操作デバイスと仮想物体を本モデルにより構築することが有効であることが示唆された。

ところで1回のループ時間は仮想物体を構築する質点の力学計算に要する時間、衝突判定のための逐次探索の時間、描画時間の総和である。Figs. 8, 9において描画以外の演算回数などについては全く同一としたので、ループ時間と平均ループ時間の差は描画9回にかかる時間を10回に平均した時間に相当する。この時間はすなわち描画時間にほぼ相当するが、Fig. 8においても、Fig. 9においても10 [msec]程度で、差がほとんど認められない。Fig. 8とFig. 9ではループ1回につき1回の表示を行なった場合の全ループ時間がそれぞれ、16 [msec]程度と42 [msec]程度で約2.6倍になっていることを考慮して、描画時間は物体を構成する要素の数および衝突判定回数にほとんど影響を及ぼされず、おおむね一定と考えることができる。一方、衝突判定回数はFig. 9の場合、Fig. 8の約3.5倍であるのに対して、ループ時間は上

述のように約2.6倍になっていることから、力学計算に要する時間のほうが衝突判定に必要な計算の時間より、全ループ時間に及ぼす影響が大きいと考えられる。正四面体の連続で仮想物体を構築するので、質点の数が多いほどより細かな形状を表現しうるが、同時に演算量も増加する。さらにこれに伴って、相互作用に関与する質点の数が増加するほど、全体の平均ループ時間は増加する。したがって、実時間での処理を前提とした場合、仮想物体の大きさ、形状はコンピュータの演算能力に依存すると考えられる。一方、物理モデルを用いた仮想物体の研究において、演算量を削減する手法¹⁸⁾などが提案されているが、本研究のような塑性を取り入れて破壊を表現する物理モデルにおいても有効と考えられ、今後の検討課題である。

4.4 仮想物体の表現について

本研究では質点を表わす円とバネを表わす線を組み合わせたワイヤーフレームモデルで表わしている。このため、構造のすき間から裏側に存在する物体も透けて描画されるので、Fig. 7(c)のように遠近感を正確に表現するのが難しい場合がある。これを補う手法として、たとえば、物体の質感を表現するための別画像を用意し、形状に合わせて表面に貼り付けるテクスチャマッピングを用いれば、物体の破壊を生じない場合には、有効であると考えられる。しかしこの技法は、物体が砕け散った場合や表面に亀裂を生じた場合などにも、テクスチャを貼り付ける領域が広がるだけであり、亀裂や粉砕のような破壊を表現することは困難である。このため本研究では仮想物体をワイヤーフレームモデルで表現した。しかしながら、質点およびバネをすべて表示すると、DirectXを利用した描画処理の場合でも τ を小さくするのが困難である。破壊されて分割した仮想物体の個々についても質感を表現するために、新たな表現技法が必要であり、今後の検討課題である。

相互作用に関与しない質点およびこれに連結するバネを表示しないなどの処理により描画時間を短縮すると同時に、光源との位置関係などを考慮した隠面処理による質感の表現などが必要であると考えられ、今後の検討課題である。

5. おわりに

本研究は、現実の事象を反映した人工現実感の世界を構築し、非線形の破壊を含めた物体の変形現象を扱うものであった。そのために、塑性を単純な線形モデルで表わし、粘弾性固体を表現するKelvin-Voigtモデルと組み合わせて、粘弾塑性体モデルを構築した。さらに、仮想空間内の物体の相互作用を実現するために、構成する質点同士の接触条件について定義した。このモデルを用いてさまざまな種類の仮想球状物体を構成し、仮想空間内における落下と物体同士の衝突のシミュレーションを行なった。任意のパラメータを与えることにより4種類の破壊と非破壊の合計5種類を表現できることを確認した。さらに演算描画に要する時間を測定し、小さな物体同士の相互作用における実時間での表現を実現した。

これにより、実時間で物体を加工操作する力覚表示システムへの応用が可能であることが示唆された。同時に、加工される物体のみならず、加工時に受ける反力により生じる器具の劣化なども再現し得る可能性も示された。なお、本研究では、上記の手法の確立に重点をおいたため、モデルに与えたパラメータは必ずしも現実の物体の物性値を反映していない。しかしながら、物体から実測したパラメータを本モデルに与えれば、現実の物体と同様の動態を得られると考えられるので、実現が困難な条件下で、破壊を生じうる現象の予測実験などにも応用が期待される。したがって今後は、現実の物体について同様の実験を行なった場合と比較し、これを表現するための物性値パラメータの決定法とその有効性について検討する予定である。

本研究の要旨は電子情報通信学会 2006 年総合大会²³⁾ および 2007 年日本バーチャルリアリティ学会²⁴⁾ で発表した。

参考文献

- 1) 宮崎, 安田, 横井, 鳥脇: 仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現, 電子情報通信学会論文誌, **179-A-11**, 1919/1926 (1996)
- 2) 広田, 金子: 仮想物体の弾性モデルに関する検討, 計測自動制御学会論文集, **34-3**, 232/238 (1998)
- 3) 友國, 平井: FPGA による仮想レオロジー物体のリアルタイム変形シミュレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **10-3**, 443/452 (2005)
- 4) N. Alan, T. Greg, B. Bob and S. Paula: Animation of fracture by physical modeling, *Visual. Comput.*, **7**, 210/219 (1991)
- 5) O. James and H. Jessica: Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture, SIGGRAPH'99, 137/146 (1999)
- 6) 青木, ゴ, 金子: 物理的モデルによる 3 次元物体の乾燥によるひび割れ表現法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J 86-D-II-12**, 1756/1764 (2003)
- 7) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション—拡張個別要素法で破壊を追う—, 森北出版 (1997)
- 8) 若松, 今井: 抵抗感を伴う立体視画像切断システムの開発, 電気学会論文誌 C, **113-C-8**, 627/634 (1993)
- 9) H. Wakamatsu, T. Imai and K. Okada: Artificial realization of reactive force feeling on stereoscopic cutting of image of multi-layer sphere, 2nd Int. Conf. Image Process., 552/556 (1992)
- 10) H. Wakamatsu: Operational systems of stereoscopic cutting 3D virtual objects with reactive feeling, Proc. IFAC 13th World Congr., Biomed. Control, 409/414 (1996)
- 11) 本間, 若松, 張: 粘弾性体モデルで表現した仮想物体の構築と加工, 電気学会論文誌 C, **119-C-12**, 1437/1443 (1999)
- 12) 中尾, 黒田, 小山, 小森, 松田, 坂口, 米田: 組織切開・開創シミュレーションによる手術計画支援, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **8-2**, 163/170 (2003)
- 13) 竹内, 胡摩, 佐野, 藤本: インタラクティブな手術シミュレーションのための柔軟物操作モデリング, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **8-2**, 137/144 (2003)
- 14) 本間, 若松: 力覚表示システム構築を前提とした粘弾性体のナイフによる切離モーメントの表現, 計測自動制御学会論文集, **40-4**, 458/465 (2004)
- 15) 本間, 若松: 力覚表示システムに应用可能なノコギリの切離モーメントの算出, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **9-3**, 319/326 (2004)
- 16) C. Bruyns, S. Senger, A. Menon, K. Montgomery, S. S. Wildermuch and R. Boyle: A survey of interactive mesh-cutting techniques and a new method for implementing generalized interactive mesh cutting using virtual tools, *J. Visual. Comput. Animat.*, **13**, 21/42 (2002)
- 17) 宮崎, 遠藤, 山田, 長谷川, 安田, 横井: 弾性要素数削減モデルにおける切断操作に応じた要素配置の動的再構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **8-3**, 255/262 (2003)
- 18) 本間, 若松: リアルタイムで切離可能な仮想粘弾性物体の構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **6-2**, 137/143 (2001)
- 19) 宮本, 菊池: 材料力学, 裳華房 (1996)
- 20) 佐野 理: 連続体の力学, 裳華房 (2000)
- 21) 棚橋隆彦: 連続体の力学(3)—物質の構成方程式—, 理工図書 (1986)
- 22) 萩原, 鈴木: よくわかる破壊力学, オーム社 (2000)
- 23) 本間, 若松: 粘弾塑性体モデルによる仮想物体の構築, 2006 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, **D-12-127**, 259 (2006)
- 24) 本間, 若松: 仮想物体間の相互作用による破壊の実時間表現, 第 12 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, **3C2-2**, 98 (2007)

[著者紹介]

本間 達 (正会員)



平成 5 年日本大学理工学部卒業, 9 年東京医科歯科大医学部卒業, 14 年同大学院保健衛生学研究科博士後期課程修了。15 年東京医科歯科大学大学院保健衛生学研究科助手。19 年同大学大学院同研究科助教, 現在に至る。博士(保健学)。

若松 秀俊 (正会員)



昭和 47 年横浜国大修士課程修了。同年東京医科歯科大学助手。足利工業大学助教授, 福井大学工学部教授を経て, 現在東京医科歯科大学大学院保健衛生学研究科教授。昭和 48~50 年ドイツ連邦共和国学術交流会(DAAD)給費により留学。Erlangen-Nürnberg 大学医学部客員研究員。オレゴン州立大学, 南京航空航天大学など客員教授。工学博士。