

ひび割れの行動モデルとそのCGへの応用

正員 千葉 則茂<sup>†</sup>      非会員 海野 啓明<sup>††</sup>

非会員 和田 誓一<sup>†</sup>      非会員 村岡 一信<sup>†††</sup>

A Behavioral Model of Cracks  
and Its Applications to CG

Norishige CHIBA<sup>†</sup>, Member, Keimei KAINO<sup>††</sup>, Seiichi WADA<sup>†</sup>  
and Kazunobu MURAOKA<sup>†††</sup>, Nonmembers

あらまし 泥のようなものを乾かしてできるひび割れは、粘着性の度合により乾いた地表面のひび割れからガラスのそれをも含むいろいろな形状を示す。もし、このようなひび割れ形状を生成できるような行動モデルが開発できれば理論的にもCGへの応用上も興味深い。本論文では、まずこれらの粘着性の違うひび割れ形状の特徴を解析し、ひび割れの行動モデルの構築のためのいくつかの仮定を示す。次に、これに基づいて粘着性の強さをパラメータとするひび割れの行動モデルを提案し、シミュレーション例によりその有効性を示す。更に、ひび割れの形状のコンピュータグラフィックスへの応用例、すなわちひび割れ形状による大理石模様や陶磁器のうわ葉のひび割れの表現例を示す。最後に、ひび割れの行動モデルを任意曲面上で動作できるように拡張するための今後の課題について言及する。

1. ま え が き

ひび割れは、壁、大理石模様、露出した岩盤、陶磁器の表面(図1)、樹皮やメロンの皮等に見られる。もし、このようなひび割れ形状を生成できるような行動モデルが開発できれば理論的にもCGへの応用上も興味深い。これまで、ひび割れについては、平田<sup>(4),(5)</sup>による研究がある。そこでは、粘着性の度合やさまざまな温度ひずみを与えたときの、ひび割れの性格がいくつか明らかにされている。しかしながらこれまで、生成されるひび割れ形状の類似性を重要視した形状シミュレーション法は提案されていないし、もちろんそのためのひび割れの行動モデルも提案されていない。

本論文では、まず平田の成果を踏まえ「泥状のものを乾かしてできるようなひび割れ」(以下、このよう

ひび割れを単に「ひび割れ」と言う)の形状の特徴を解析し、次にその結果に基づきひび割れの行動モデルを提案する。更に、CGにとって興味深い大理石模様や陶磁器のうわ葉のひび割れ模様の表現への応用例を示す。最後に、壺(つぼ)の表面のような任意形状の曲面上で動作するひび割れの行動モデルへの拡張に伴う今後の課題について言及する。

ひび割れは、力学的には破壊によって作られる。破壊は一般に潜在的なクラック等の欠陥における応力、ひずみ集中により発生すると考えられている<sup>(1)</sup>。ひび割れの数値シミュレーションとして、有限要素法と逐次破壊法を用いて圧縮応力下における1本の内在ひび割れからのひび割れの発生と進展をシミュレーションした結果が報告されている<sup>(2)</sup>。またひび割れのフラクタル性を明らかにするために、脆い棒が網上に結合した平板構造からなるモデルに適当な境界条件を与え、この系のひび割れの時間発展をシミュレーションした結果も報告されている<sup>(3)</sup>。しかしながら、これらのシミュレーション法に基づいた、鑑賞に耐え得る「ひび割れらしさ」をもったひび割れ形状の生成例は報告されていない。筆者らは破壊形状の特徴を事象に即して解析し、

<sup>†</sup> 岩手大学工学部情報工学科, 盛岡市

Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020 Japan

<sup>††</sup> 仙台電波工業高等専門学校電子制御工学科, 仙台市

Sendai National College of Technology, Sendai-shi, 989-31 Japan

<sup>†††</sup> 岩手県立盛岡短期大学, 盛岡市

Iwate Prefectural Morioka Junior College, Morioka-shi, 020 Japan



(a) Teacup

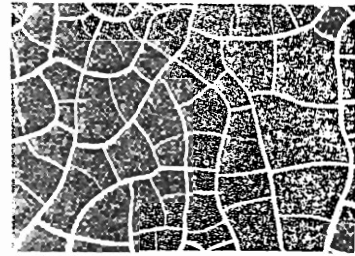


(b) Flower vase

図1 陶磁器  
Fig. 1 China and porcelain.



(a) Weakly sticky material



(b) Strongly sticky material

図2 泥のひび割れ<sup>(5)</sup>

Fig. 2 Cracks on mud-like materials<sup>(5)</sup>.

「それらしい」ひび割れ形状を生成する行動モデルを開発した。

## 2. ひび割れの特徴

ひび割れについては平田による研究があり、「割れ目について」という論文<sup>(5)</sup>の中でその一般的な性格が次のように述べられている。

- 性格1：ひび割れの発生条件は確率的な性格をもつ。
- 性格2：ひび割れの成長は、ある慣性をもったものが応力の場に打ち出されるのと同じである。
- 性格3：応力の場は、ひび割れの先端を張力に垂直な方向に曲げるように働く。

性格1は材質の組成にむらがあり、それがランダムに分布していることを示す。物に弾力的な力が働くとき、張力の方向は自由な縁ではそれに平行である。従って、ひび割れが自由な縁から発生する場合はそれから垂直に出る。また、ひび割れの先端が自由な縁にゆっ

くりと入るときもそれに垂直に入る。しかし、ひび割れの先端は材質中である速度をもつので、一般には自由な縁では垂直に入らない。性格2ではこのことを述べている。性格3では、張力に平行にひび割れを作ってもひずみを解消できないことを述べている。本章では、ひび割れの行動モデルを設定するために、特定のひび割れについて更にその特徴を具体的に解析する。

図2(a)と(b)はそれぞれ粘着性が弱い場合と強い場合の泥を乾燥させてできたひび割れの写真である<sup>(5)</sup>。これらのひび割れをここではそれぞれa型、b型と呼び、それらの形状の特徴を調べる。

### 2.1 a型のひび割れ

a型のひび割れ(図2(a))には、次の特徴が見られる。

- (1) ひび割れの交わるころの角度分布の極大は90°、120°、180°にある。
- (2) ひび割れはジグザグしている。
- (3) ひび割れの先端は生き残っているものが多い。
- (4) ひび割れの長さに特徴的なものがない。
- (5) ひび割れは一様に分布している。

(1)の角度分布の極大のうち90°、180°の極大はひび割れの性格3により、120°の極大はひび割れがひずみを効率よく解消するためにその先端が分岐したか、もしくはもともとひび割れの「芽」からその先端が3方向に延びたことにより生じたと考えられる。120°の極大は、b型のひび割れと比較するとわかるように、泥の

粘着性が小さいときに発生しやすい。

一般に、泥は乾燥するときに収縮するので、ひび割れはこのひずみを解消するために発生する。ひび割れの分岐は、1本のひび割れの成長だけではひずみが早く解消できないときに発生すると考えられるが、その条件を明確にすることは難しい。ここでは簡単のため、分岐は領域にひび割れの芽が現れるときにのみ生じ、ひび割れが成長するときは生じないと仮定することにする。以下では、このようなひび割れの芽を「初期ひび割れ」ということにする。図2から、初期ひび割れとしては、①領域の内部にできる3方向に伸びていくものと②領域の縁部にできる1方向に伸びるものの二つの型を考えれば十分であろう。一つは3本のひび割れが互いに120°をなすY字形であり、他は90°と180°をなすT字形である。

(3)と(4)はひび割れの成長と並行して新しい初期ひび割れが発生する、すなわち既存のひび割れでは解消できないひずみがひき続き発生していることを示している。このことから、ひび割れの発生は再帰的であると解釈できる。またこのとき、(3)は発生するひずみが局所的であることを示しており、(2)はそのためひび割れの成長速度が小さいことを示している。(5)は一樣なひずみの解消にはひび割れも一樣に分布した方が得策であることを示している。これらは、粘着性が弱いためひずみの発生に対して直ちにいたるところで小さなひび割れを発生させ、局所的にひずみを解消させていると言い換えられる。

初期ひび割れの発生確率と、発生したひび割れ先端の数と、そのうち他のひび割れに突入したひび割れ先端の数の比は以下のように決定される。交点と生き残っている先端の数をそれぞれ  $n_{int}$ ,  $n_{tip}$  とすると図2(a)から  $n_{int}=172$ ,  $n_{tip}=97$  となり、比は

$$n_{tip}/n_{int}=0.56 \quad (1)$$

となる。交点のうちYとT字形の数はそれぞれ61と111である。YとT字形の初期ひび割れがそれぞれ  $n_Y$ ,  $n_T$  個発生した後、 $p$  個の先端が他のひび割れまたは縁に垂直に入ったとすると次の等式が成り立つ。

$$n_Y=61 \quad (2)$$

$$n_T+p=111 \quad (3)$$

$$3n_Y+n_T-p=97 \quad (4)$$

これらの整数解は、

$$n_Y=61, n_T=13, p=98 \quad (5)$$

であり、 $n_T/n_Y=0.21$ ,  $p/(3n_Y+n_T)=0.5$  (6)

が得られる。すなわち、初期ひび割れの大半はY字形

であり、ひび割れの先端の半分は他のひび割れまたは縁に到達して消滅することがわかる。

## 2.2 b型のひび割れ

この型のひび割れは、泥の粘着性が比較的強い場合のものである。図2(b)から次の特徴が挙げられる。

(1) ひび割れが交わる場所の角度分布の極大は90°, 180°にある。

(2) ひび割れの先端は生き残っていない。

(3) ひび割れは滑らかである。

(4) ひび割れは互いに反発し合う。

(5) ひび割れは一樣に分布している。

(1)はひび割れの性格3の直交性によるものと考えられる。(2)は、新しく発生したひび割れの先端は消滅するまで成長するためである。すなわち、ひずみは大域的であり引き続きひずみの発生を待たずにひび割れが走り終わってしまう、すなわちひび割れの成長速度が大きいと考えられる。これは(3)の特徴としても現れている。この型のひび割れは、既にあるひび割れから垂直に出るのでT字形の初期ひび割れとみなすことができる。また、(4)は、図2(b)の中央で上下に走る3本のひび割れが互いに反発しながら成長していることからの特徴であるが、ひずみの解消というひび割れの目的からすれば、合流するよりは互いに別々の方向に走り去る方が得策であるということの意味しているともみさせる。(5)はa型と同様の理由による。

## 3. ひび割れの行動モデル

本章では、まず前章の解析で得られたひび割れ形状の特徴に基づき、粘着性のパラメータ  $\eta$  ( $0 \leq \eta \leq 1$ ) を用いて、ひび割れの行動モデルのための仮定をまとめる。次に、これらの仮定に基づきひび割れの行動モデルを設定する。

[仮定1] 初期ひび割れは、互いにある程度の距離  $d$  以上離れた場所から一樣に発生する。このとき、

$\eta \sim 0$  のときはY字形の初期ひび割れ、

$\eta \sim 1$  のときは「境界」から垂直に出るT字形の初期ひび割れ

が多く発生する。ここで、「境界」は縁とひび割れの両方を意味する。

[仮定2] 簡単のため、ひび割れの先端は分岐せず、成長速度は変化しないとする。但し、ひび割れの長さ(成長長さとも言うことにする)  $l$  は

$\eta \sim 0$  のときは短く、

$\eta \sim 1$  のときは長い

とする。

[仮定3] ひび割れの先端の成長には3種類の力, すなわちランダムな力  $F_r$ , 反発力  $F_c$  および「境界」に垂直に入るように働く力  $F_{\perp}$  を受ける。特に,

$$\eta \sim 0 \text{ のときはランダムな } F_r,$$

$$\eta \sim 1 \text{ のときはクーロン反発力 } F_c$$

が大きく働く。

[仮定4] ひび割れの生き残っている先端の数  $n_{tip}$  と交点の数  $n_{int}$  の比  $n_{tip}/n_{int}$  は  $\eta$  の増加と共に減少する。すなわち,

$$\eta \sim 0 \text{ のとき } n_{tip}/n_{int} \sim 1,$$

$$\eta \sim 1 \text{ のとき } n_{tip}/n_{int} \sim 0$$

である。

[仮定5] ひび割れの成長は再帰的である。

仮定1に従い, YとT字形の初期ひび割れの発生比率を  $\eta$  により与える。初期ひび割れの形は, 領域内にランダムにとったひび割れの「芽」の候補点の位置により決定する。すなわち, 候補点が境界の近くなるとT字形の, そうでなければY字形のひび割れの「芽」とする。仮定1の「ある程度の距離  $d$ 」は, 初期領域が1辺  $r_0$  の正方領域で, 初期ひび割れの発生数を  $n (= n_Y + n_T)$  とすると,

$$d \sim r_0 / \sqrt{n} \quad (7)$$

とおける。

仮定4における比  $n_{tip}/n_{int}$  は, 粘着性のパラメータ  $\eta$  に対して自動的に定まると都合がよい。この比  $n_{tip}/n_{int}$  は, ひび割れの先端の生き残る程度を表すものなので,  $\eta$  によりそれぞれの再帰段階でのひび割れ先端の成長長さ  $l$  を制御すれば間接的に実現されることになる。ここでは,

$$l = l(r, \eta) = r / (2 - \eta) \quad (8)$$

としている。ここで,  $r$  はひび割れによって分割される領域の特徴的な長さであるが, 実際に求めることは計算時間の点から困難であるので, ここでは領域数  $s$  に対し

$$r \sim r_0 / \sqrt{s} \quad (9)$$

と近似的に定めている。これは, ひずみの解消というひび割れの目的から, 分割されてできる領域はほぼ同じ面積をもつと仮定し, 更に簡単のためすべての領域を正方形領域からなると仮定した場合の1辺の長さを意味する。これより,  $\eta = 1$  で  $l = r$  となりほとんどのひび割れが他のひび割れに突入することが期待できる。また, 領域数  $s$  は, 初期値を

$$s = 1 \quad (10)$$

とし, YとT字形の初期ひび割れがそれぞれが  $n_Y$  と  $n_T$  発生するごとに,

$$s = s + (1.5n_Y + n_T) \quad (11)$$

と更新することにする。この式は, 一つのT字形のひび割れは領域の数を1だけ増やすことに, また一つのY字形ひび割れは, 平均的にその先端の半数が他のひび割れに突入することに寄与することから定められている。

先端が成長するとき受ける力は, 仮定3によりランダムな力  $F_r$ , 反発力  $F_c$  および境界からの力  $F_{\perp}$  である。 $F_r$  は, 先端の方向を変え,  $\eta = 0$  で振れ角が  $60^\circ$  以下で,  $\eta$  が増加して1になると振れ角も減少して0になるようにする。 $F_c$  は,  $\eta^2 r_0 / \sqrt{s}$  程度の距離までしか作用しないクーロン型反発力とする。但し, この反発力は距離に反比例するとしている。これは, 反発力が距離の2乗に反比例するとしてシミュレーションすると反発が強くなりすぎるという経験からである。ここに,  $\eta^2$  は  $\eta = 0$  に近づくにつれて早く力が働かないようにする因子である。また,  $F_{\perp}$  は境界からある一定の距離に近づいたとき働くようにする。

以上の仮定から次のような行動モデルが設定できる。

A0: (初期設定)

まず,

粘着性のパラメータ  $\eta$  ( $0 < \eta < 1$ ),

正方領域の1辺の長さ  $r_0$ ,

再帰の最大段数  $i_{max}$ ,

一つの領域で発生する初期ひび割れの平均的発生数  $n_0$ ,

単位成長長さ (速度)  $v$

を定め, 更に

領域数  $s$  を1

とおく。

A1: (ひび割れの生成)

以下のステップ(1)~(3)を  $i = 1, 2, \dots, i_{max}$  について繰り返す。

(1) (初期設定)

$n \leftarrow n_0 \cdot s$  (初期ひび割れの総数)

$r \leftarrow r_0 / \sqrt{s}$  (分割領域の1辺の長さ)

$l \leftarrow r / (2 - \eta)$  (ひび割れ先端の成長長さ)

$j_{max} \leftarrow l / v$  (ひび割れの成長ステップ数)

$\Delta t \leftarrow 1 / j_{max}$

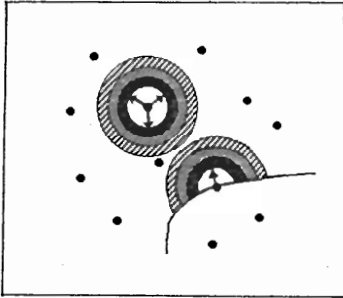
(2) (初期ひび割れの発生)

Y字形とT字形のひび割れの芽をランダムにそれぞれ  $n_Y = (1 - \eta)n$ ,  $n_T = \eta n$  個選び, これらを初期ひび割

れとする。これらは互いに  $d$  程度以上離れているとする。これらのひび割れの成長により生成されるであろう領域数  $s$  を

$$s \leftarrow s + (1.5n_r + n_r)$$

とおく。それぞれのひび割れ先端は位置ベクトルと速度ベクトルをもつ。



Imperfection points, and two kinds of initial cracks.

図3 初期割れ目の禁止領域

Fig. 3 Restricted areas for initial cracks.

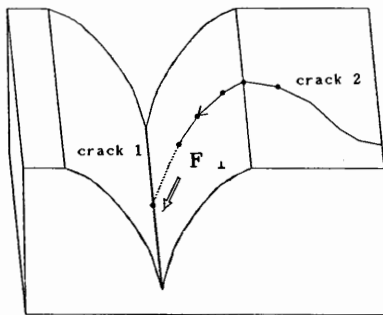


図4 ひび割れ1の近くにおけるひび割れ2の行動

Fig. 4 Behavior of crack 2 under the force  $F_{\perp}$  due to crack 1.

(3) (ひび割れの先端の成長の消滅)

以下のことを  $j_{max}$  回繰り返す。

同時刻  $t$  で、生き残っているすべてのひび割れの先端に対して以下の処理を行う。

一つの先端を選び、この位置ベクトルを  $x_0$ 、速度ベクトルを  $v_0$  とする ( $v_0$  の大きさは  $l(r, \eta)$ )。このとき、

$$x_0' = x_0 + v_0 \Delta t.$$

とおき、 $\Delta t$  後の位置ベクトル  $x_1$  と速度ベクトル  $v_1$  は以下のように決定する。

$$v_1 = k_2 \{ v_0 + (F_c + F_{\perp} + F_r) \Delta t \}$$

$$x_1 = x_0 + v_1 \Delta t$$

ここに、 $k_2$  は  $|v_1| = l(r, \eta)$  となるように定める。先端が  $x_0$  から  $x_1$  に成長するとき、もし境界と交わるならば、この先端は消滅する。

$$x_0 \leftarrow x_1, v_0 \leftarrow v_1 \text{ とする.}$$

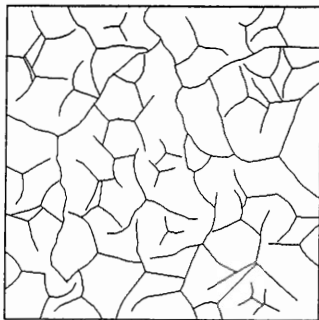
A2 : (終了)

最後に紙面の都合上詳しく述べることはできないが、インプリメント上の工夫点や注意点を述べておく。

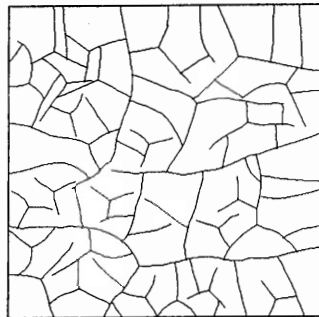
(1) 初期ひび割れを均等に分布させ、かつその分布の間隔を再帰段階に応じて変えなければならない。そのためには、例えば図3に示すように、再帰段階に応じた「活性禁止領域」を表す層状の禁止領域を初期ひび割れの点やひび割れ先端の他のひび割れの突入点の周りに設けるとよい。

(2) 力  $F_{\perp}$  を実現するためには、例えば図4のように、ポテンシャルを表す2次元配列を用いて、ひび割れの成長と共に、それに沿ったV字谷を掘っておくことにする。これより、力  $F_{\perp}$  は谷のこう配より決定することができる。

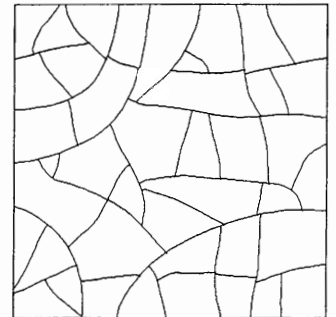
(3) 反発力  $F_c$  は、ひび割れ先端の進行方向に対するある一定角度の「視角内の扇状領域」を走っている



(a)  $\eta = 0.2$



(b)  $\eta = 0.6$



(c)  $\eta = 1$

図5 ひび割れ形状のシミュレーション例

Fig. 5 Simulation of cracks.

ものみから受けるようにするとよい。これは、ひずみの解消というひび割れの目的から理解される仮定である。

#### 4. シミュレーション例

3. で設定した行動モデルの仮定と生成されるひび割れ形状との関係をシミュレーションにより調べ、その仮定をおくことの有効性を確認する。まず、構成した行動モデルで  $\eta$  を 0.2, 0.6, 1 としたときのひび割れのシミュレーション例を図5に示す。再帰段階は4である。 $\eta=0.2$ のときは図2(a)に、 $\eta=1$ のときは図2(b)によく似たひび割れ形状が生成されていると言えよう。すなわち、2. で述べた図2(a)と(b)のひび割れの特徴、つまりひび割れの交差角度、ひび割れの勢い、ひび割れの局所性・大域性の違いがうまく再現されていると言えよう。 $\eta=0.6$ のときは0.2と1の場合の中間的印象をもっているとも言えよう。これらの印象の違いは6. のCGへの応用で更に確認される。

次に、いくつかの仮定を除外して得られるひび割れ形状のシミュレーション例を図6～8に示す。仮定4

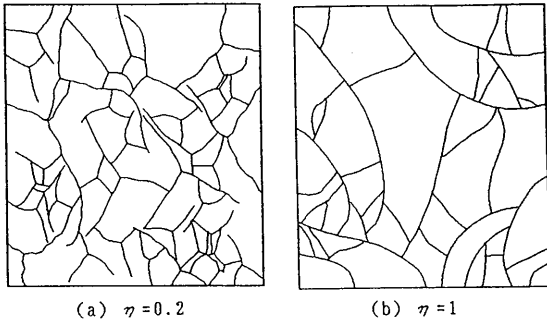


図6 禁止領域がない場合のひび割れ形状  
Fig. 6 Cracks simulated employing no restricted area.

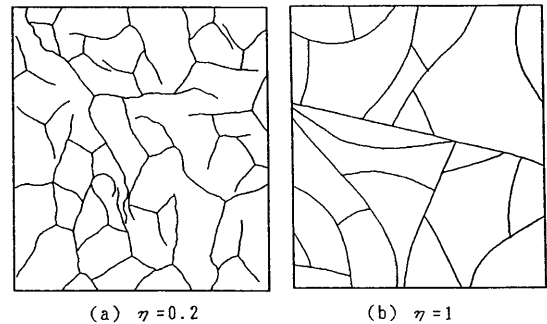


図7 境界への垂直な力  $F_{\perp}$  がない場合のひび割れ形状  
Fig. 7 Cracks simulated by removing the force  $F_{\perp}$ .

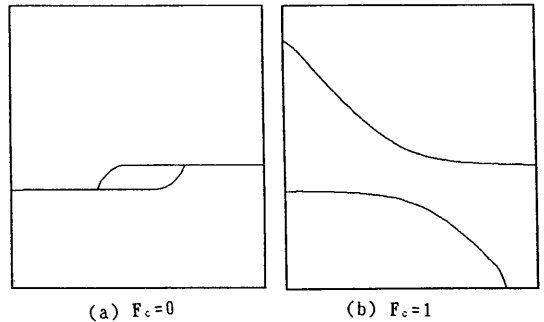
がひび割れの印象にとって重要なことは図2より明らかなので、ここでは他の仮定を除いた場合について議論する。

3. で設定した行動モデルでは、発生する初期ひび割れは互いに  $d$  以上離れていると仮定している。これは、ひび割れの発生確率を領域内に一様に分布させるための条件である。この条件を除いて、すなわち  $d=0$  としてシミュレーションした結果を図6に示す。図6(a)は  $\eta=0.2$  の場合、(b)は  $\eta=1$  の場合で再帰段階はどちらも3である。やはり、ひび割れによる領域の分割、若しくはひび割れの分布が不均等になってしまい、図2のものとは異なった印象を与えることがわかった。

行動モデルでは、ひび割れの先端が成長するとき3種類の力が働くとして設定した。図7は、境界に対して垂直方向に働く力を除いて、すなわち  $F_{\perp}=0$  としてシミュレーションした結果である。図7(a)は  $\eta=0.2$  の場合、(b)は  $\eta=1$  の場合で再帰段階はどちらも3である。この場合、既に存在する他のひび割れに斜めに飛び込むひび割れが多く見られ、特に図7(b)ではひび割れの「勢い」が強すぎて、境界形状を無視して走っており、図2(b)のものとは異なった特徴が現れている。

他のひび割れの先端との反発力を除いた場合、すなわち  $F_c=0$  とした場合の向かい合って進む二つのひび割れのシミュレーション結果を図8(a)に示す。図8(b)は、 $F_c=1$  とした場合である。 $F_c=0$  とすると図8(a)のように、図2(b)や図5(c)には見られない明らかに無駄な(ひずみの解消という観点からは得策でない)ひび割れの行動が生じ、小さな断片ができてしまっている。

以上の結果から、3. で設定した行動モデルの仮定は、2. で述べた特徴をもつひび割れ形状の生成に重要であ



(a) on the condition of  $F_c=0$   
(b) on the condition of  $F_c=1$

図8 反発力  $F_c$  によるひび割れ形状  
Fig. 8 Simulation of cracks.

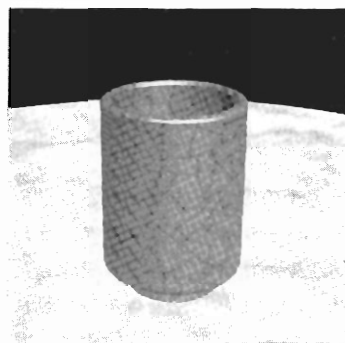
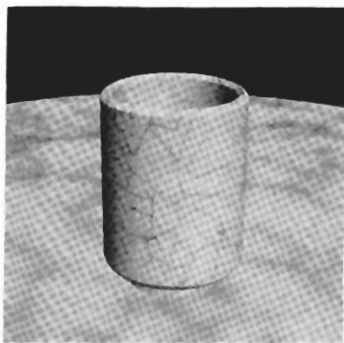


図9 湯呑茶碗  
Fig. 9 Teacups.



図10 花瓶  
Fig. 10 A vase.

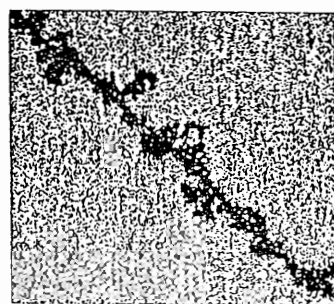


図11 線にランダムな太さを与えた例  
Fig. 11 A randomly blurred line.

ることが確認できたと言えよう。

## 5. CG への応用

図9と図10に陶磁器のうわ葉のひび割れの表現に用いた例を示す。これはひび割れの線画像を陶磁器表面にテクスチャマッピングしたものである。 $\eta=1$ の場合の図9(b)や図10では陶磁器らしさが表現されているのに対して、 $\eta=0.2$ の場合の図9(a)は、土器のような印象を受ける。これは、ひび割れの形状が材質の印象に重要であることを示していると言えよう。これはまた、ひび割れの行動モデルが特徴をうまく出せていることを示しているとも言えよう。

また、これらの陶磁器の台の「大理石模様」は $\eta=0.2$ のひび割れの線画より生成したものである。大理石模様の生成については Turbulent Flow の手法<sup>(6),(7)</sup>が提案されている。これらの手法はしま状模様の生成に有効である。また大理石の模様のなかには、ひび割れの間に不純物が浸透してきたものがある<sup>(10)</sup>。これを作成

するには、まずひび割れに太さと色のグラデーションをつけるとよい。ここでは、以下のようなパーコレーション<sup>(8)</sup>を応用して2次元配列に定義した線画にランダムな太さを与える方法を用いた。

(1) まず2次元配列領域上に  $N$  個のランダムな点を決めて色  $C_1$  を与える。そのほかの全領域には色  $C_0$  を与える。

(2) 次に、線画を構成するすべての点について以下の(i)~(ii)の処理を行う。

(i) 点の色が  $C_0$  ならば、これを  $C_2$  にする。

(ii) 点の色が  $C_1$  ならば、この点とこの点に隣接するすべての  $C_1$  の点を  $C_2$  で塗る(図11)。

(3) 最後に、領域にある色  $C_1$  のすべての点を色  $C_0$  とする。

以上の方法により太さを与えられた画像は色  $C_0$  と  $C_2$  の2値画像である。更に、色のグラデーションをつけるために低域フィルタを用いて平滑化をする。つまり、2値画像である2次元配列において、 $C_0$  の点ならば0、 $C_2$  の点ならば1として、これにFFTなどにより低域フィルタをかけて配列の各点に0から1程度の連続的

な値を与える。この値の大小に従って色のグラデーションを決めればよい。

## 6. むすび

本論文ではまず、泥のようなものを乾燥させてできるひび割れの特徴を解析し、ひび割れの行動モデルのためのいくつかの仮定を示した。次に、この仮定に基づき粘着性をパラメータとしたひび割れの行動モデルを提案した。また、いくつかのシミュレーション例により行動モデルが基づいている仮定の有効性と、本モデルにより実際のひび割れ形状と同様な印象を与えるひび割れ形状が生成可能であることを確認した。更に、コンピュータグラフィックスへの応用例として大理石模様や陶磁器のうわ葉のひび割れの表現例を示した。この中で、ひび割れ形状の違いによって土器や陶磁器の印象を受けることを示し、形状シミュレーションの大切さも示した。

最後に、今後の課題について述べておく。CGへの応用で現れた問題点としてテクスチャマッピング手法の適用が挙げられる。湯のみ茶わんはマッピングに適した円筒形状であり、また花瓶は細い円筒と球からなる比較的簡単な形状をもつので、マッピングでもうまく表現されている。しかし、図1の花瓶では、ひび割れは花瓶の形状に依存して発生しているように見受けられる。原因は、物体の表面の形状がひび割れの発生、成長に影響をもつことにある。従って、任意の曲面上で動作し、その形状に依存したひび割れ形状が生成できるような行動モデルへの拡張が期待される。そのためには、まず曲面上のひび割れの特徴を明らかにする必要がある。更に禁止領域やポテンシャルが設定しやすく曲面上の任意の2点間の距離が計算しやすいようなデータ構造を選ぶ必要がある。また、強制的な外力を加えられたときにできるようなひび割れに対しても行動モデルの適用範囲を拡大させることも残されている。更に、表面を走るようなひび割れではなく、すなわち岩盤中を走るような3次元のひび割れ(面)の行動モデルの開発も岩石形状の自動生成などにおいて興味深い。また、3次元ひび割れの一つである節理形状の生成法の開発も、CGによる海岸の岩場や山岳河川の景観表現の点において興味深い。

**謝辞** 本研究に関して、終始熱心な討論を頂いた(株)環境設計研究室の遠藤真哉氏に感謝します。またプログラム開発を手伝って頂いた岩手大学卒業生山田和夫氏(現在(株)大日本印刷)に感謝します。なお、本研究

の一部は文部省科研費(一般研究(C)63550266)の補助による。

## 文 献

- (1) A. A. Griffith: "The phenomena of rapture and flow in solid", Phil. Trans. Roy. Soc. London, **221-A**, 587, pp. 163-198 (Oct. 1920).
  - (2) 山下 秀, 天野勲三, 大塚一雄, 中川浩一: "圧縮応力下における破壊亀裂の発生", 進展に関するシミュレーション—岩石の圧縮破壊機構に関する研究(第2報)", 日本鉱業会誌, **101**, 1150, pp. 503-509 (昭60).
  - (3) H. Takayasu: "A deterministic model of fracture", Prog. Theor. Phys., **74**, 6, pp. 1343-1345 (Dec. 1985).
  - (4) M. Hirata: "Experimental studies on form and growth of cracks in glass plate", Sc. Pap. I. P. C. R., **16**, 322, pp. 172-195 (1931).
  - (5) 平田森三: "キリンのまだら", pp. 19-53, 中央公論社(昭50).
  - (6) K. Perlin: "A image synthesizer", Proc. SIGGRAPH '85, **19**, 3, pp. 287-296 (July 1985).
  - (7) 岡田 稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 堀 健二: "3次元ランダムフラクタルを利用した不均質材質のテクスチャ表現", 情報学論, **28**, 11, pp. 1146-1153 (昭62-11).
  - (8) D. スタウファー, 小田垣孝訳: "浸透理論の基礎", pp. 1-20, 吉岡書店(昭63).
  - (9) 画像処理ハンドブック編集委員会編: "画像処理ハンドブック", 昭晃堂(昭62).
  - (10) 地団研地学事典編集委員会編: "地学事典", pp. 645, 平凡社(昭46).
- (平成2年2月5日受付, 5月14日再受付)

### 千葉 則茂



昭50岩手大・工・電気卒。同年より昭53まで(株)日本ビジネスコンサルタントに勤務。昭59東北大学院博士後期課程了。工博。同年同大・工・助手。昭61仙台電波高専・助教。昭62岩手大・工・助教授。アルゴリズム、コンピュータグラフィックス、形の科学に興味をもつ。情報処理学会、形の科学会、ACM各会員。著書「Planar Graphs: Theory and Algorithms」(共著, North-Holland, 1988), 「離散数学」(共著, 朝倉書店, 1989), 「レイトレーシングCG入門」(共著, サイエンス社, 1990)。

### 海野 啓明



昭48東北大・工・金属卒。昭54同大学院理学研究科博士課程了。理博。昭56仙台電波高専助手を経て、昭63助教授。磁性理論、コンピュータグラフィックス、数値解析に興味をもつ。物理学会、情報処理学会、APS各会員。





**和田 誓一**

昭 63 岩手大・工・情報卒。平 2 同大大学院  
修士課程了。同年沖電気工業(株)入社。在学  
中、コンピュータグラフィックスの研究に従  
事。



**村岡 一信**

昭 51 東北工大・電子卒。同年同大大学研究  
生。昭 52 仙台電子専門学校教員。平 1 盛岡  
短期大学講師。コンピュータグラフィックス、  
CAI に興味をもつ。情報処理学会会員。著書  
「レイトレーシングCG 入門」(共著、サイエン  
ス社、1990)。