

2005年度 卒業論文

合わせガラスの  
ひび割れシミュレーション

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 3DCG コンポーネントプロジェクト

学籍番号 M0102022

飯田 英輔

2005年度 卒業論文概要

論文題目

合わせガラスの  
ひび割れシミュレーション

メディア学部

学籍番号：M0102022

氏名

飯田 英輔

指導  
教員

渡辺 大地講師

キーワード

合わせガラス、ひび割れ、亀裂進展、破壊シミュレーション

近年のコンピュータ技術の発展にともない、コンピュータグラフィックスを用いて映像を表現することが増えてきた。破壊現象は映像作品の中でよく目にすることができるが、現実で行うには費用がかかり、時には危険を伴う場合もある。これらのリスクを回避するために破壊現象をコンピュータグラフィックスで表現するのは有効な手段の1つであり、研究も盛んに行われている。

映像作品の中で破壊の対象は色々あるが、本研究では建物や乗り物などで多く使用しているガラスに注目した。現在ガラスには様々な種類があるが、中でも安全性が高いために多様な箇所で利用されている合わせガラスに焦点を当てた。合わせガラスは2枚のガラスの間に特殊樹脂膜を挟んで接着しており、衝撃が加わっても特殊樹脂膜の作用により、ガラスの破片が飛散、脱落することが少ない。このとき合わせガラスのひび割れの形は蜘蛛の巣状になる。既存の研究では、高速にこのような亀裂を作成するものがない。

本論文では合わせガラスのひび割れの形状とひび割れ同士の重なりを表現するモデルを提案する。はじめに合わせガラスのひび割れの形の特徴、亀裂の進展法則を挙げる。それらを元にひび割れを作成した。次に合わせガラスに複数回衝撃が加わり、複数のひび割れが生成されたときにひび割れ同士の重なりを表現した。最後に検証を行い、問題点、今後の展望について言及する。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	論文構成	2
第2章	亀裂の特性	3
2.1	一般的なガラスと合わせガラスの違い	3
2.2	放射状の亀裂	5
2.3	衝突箇所を中心に交わらない亀裂	7
2.4	ひび割れの重なり	9
第3章	合わせガラスのひび割れのモデル化	10
3.1	亀裂の表現	10
3.2	重なりの表現	17
第4章	検証と考察	19
4.1	検証	19
4.2	考察	23
第5章	まとめ	25
	謝辞	26
	参考文献	27

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景と目的

ゲームや映画などの映像作品では、乗り物や建築物の破壊表現をよく見る。破壊表現は現実で行うには費用がかかり、場合により危険を伴う場合もある。これらのリスクを回避するためにコンピュータグラフィックスで破壊表現を行うのは有効な手段の 1 つである [1]。

本研究では破壊の対象として、乗り物や建築物に使う機会の多いガラスに注目した。ただ、現在は加工を施していないガラスを乗り物や建築物に使うことは少なくなってきており、合わせガラスを使うことが増えてきている。合わせガラスはガラスと特殊樹脂膜によって構成する複合材料であり [2]、この構成から衝撃が加わったときにひび割れの形が特徴的になる。合わせガラスは多くの場合、破損して破片が飛散することがなく、ひび割れが入るだけで済む。本研究では、合わせガラスのひび割れを高速に表現することを目的とする。また、合わせガラスに複数回衝撃が加わり、ひび割れが複数できた場合を表現することも目標とする。

現在破壊シミュレーションでは O'Brien ら [3][4] の研究が挙げられる。これらの研究は、有限要素法を用いて対象物を解析し計算することによって破壊の様子をコンピュータグラフィックスで表現している。即時に結果を表示できる計算量であり、細かいところまでリアルに破壊をシミュレーションできるが、複合材料を破壊の対象には考えていないので合わせガラス特有の亀裂を表現することができない。

Baeleら [5]の研究はひび割れの進展を簡単な計算式にして、破壊のシミュレーションを行っている。この研究はひび割れの進展の仕方に着目し、その法則にしたがって亀裂を作り、破壊を表現している。計算量が少なく即時に結果を表示できるが、単一材料を破壊の対象としているためこの研究も合わせガラス特有の亀裂を表現することができない。

複合材料の破壊シミュレーションは、構造解析や構造評価に利用するための研究 [6] は進んでいるが、解析結果に重点を置いているためゲームなどの即時性を求めるコンテンツで使うことができない。

本研究では亀裂の進展法則と合わせガラス特有に表れる亀裂のでき方の物理的特性に加え、ひび割れの形状の特徴を捉えることによって複雑な計算を行わずに高速に表示できる合わせガラスのひび割れを表現する手法を考えた。さらに窓やフロントガラスに使用している合わせガラスは、窓枠にはまったまま複数回衝撃が加わる可能性がある。それを表現するために単一のひび割れだけでなく複数回ひび割れができた場合のひび割れの重なりを亀裂と合わせガラスの物理的特性を利用した手法を考えた。

## 1.2 論文構成

本論文は全5章で構成する。第2章で亀裂の特性や合わせガラスの特徴について述べ、第3章では第2章の内容を踏まえて、ひび割れを表現する為の手法について述べる。第4章では本論文の手法を実装した結果の検証と考察を行い、第5章で研究のまとめを述べる。

## 第 2 章

# 亀裂の特性

### 2.1 一般的なガラスと合わせガラスの違い

一般的なガラスと合わせガラスのひび割れにはどのような違いがあるか、ここでは実際の写真を見比べて見た目の違いについて述べる。図 2.1 は合わせガラスではない一般的な実際のガラスの中央に衝撃を加えた結果であり、図 2.2 は実際の合わせガラスの中央に衝撃を加えたものである。

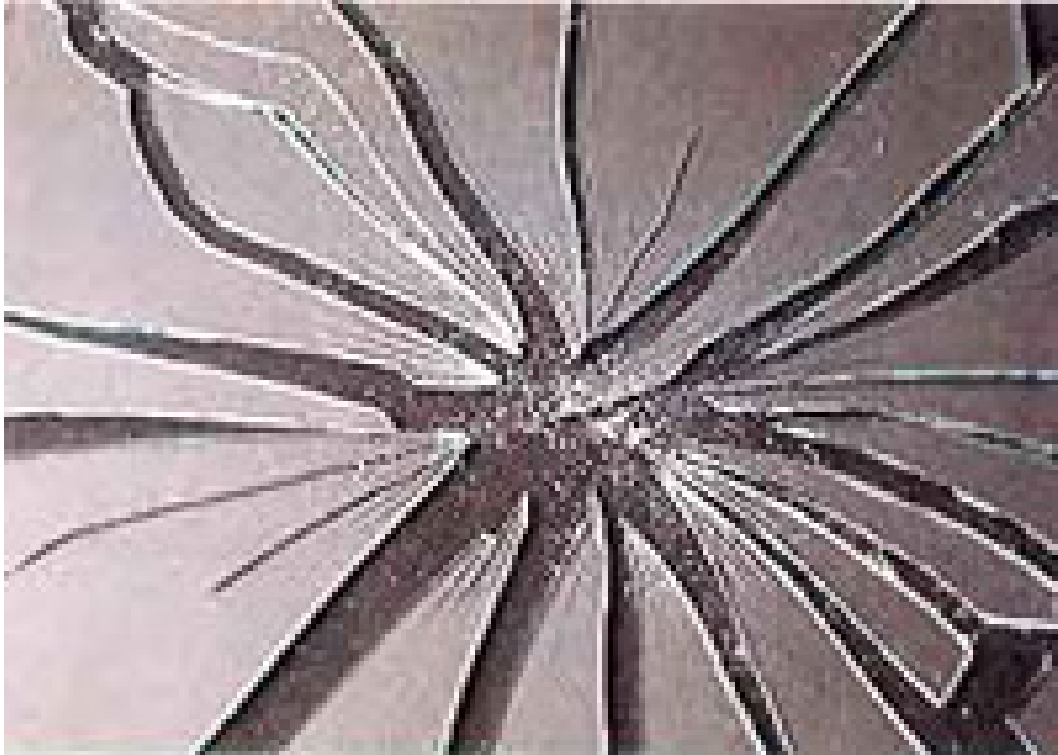


図 2.1: 実際のガラスのひび割れ (日本板硝子株式会社 [7])

一般的なガラスは衝突箇所より、ガラスの縁に向かって放射状に亀裂が進み、その結果亀裂に沿って割れてしまう。一方合わせガラスは一般的なガラスと同じように衝突箇所からガラスの縁に向かって放射状に亀裂が入るが、これとは別に一般的なガラスには表れなかった衝突箇所の中心に交わらない亀裂ができています。この亀裂は衝突物が接触した付近は多く、それより外側になるにつれて間隔が広がっていき、これらの亀裂はいったいどうやって出来上がるのか、次の節でその過程を述べ、それを参考にひび割れを表現する。



図 2.2: 実際の合わせガラスのひび割れ (日本総合研究所 エンジニアリング事業本部 [6])

## 2.2 放射状の亀裂

一般的なガラスと合わせガラス両方に共通して表れた、衝撃箇所より放射状の亀裂は次のようにできる。どのような物体の表面にも目に見えないほどの小さな傷が無数に存在していて、物体に衝撃が加わるとその小さな傷を出発点として亀裂が進展し始める [8][9]。この亀裂が進展する際には2つの法則がある。

1つ目は亀裂が引張応力に対して垂直な方向に進もうとすること [10][11] である。引張応力とは、ある物体に力が加わるとその力とつり合うために発生する抵抗力である。物体に力が加わったとき、一番大きい引張応力は物体の縁やすでに存在している亀裂に対して並行に働いている [10]。図 2.3 は引張応力の分布を矢印で示した概念図である。



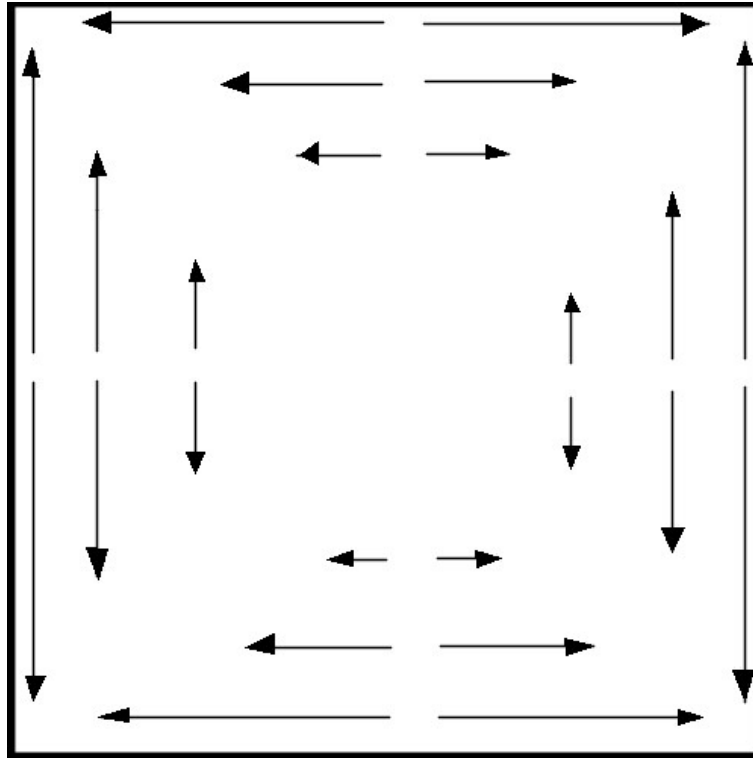


図 2.3: 引張応力の分布概念図

この引張応力の働きにより、亀裂は縁やすでに存在している亀裂に近づくにつれて垂直になろうと進展方向を変える。図 2.4 は進展する亀裂が縁に対して垂直になろうと進展方向を変えた様子を示したものである。

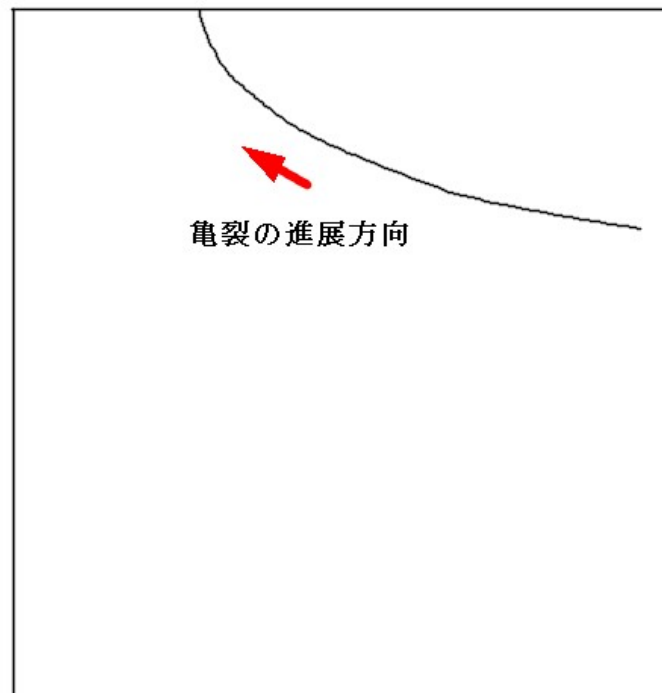


図 2.4: 亀裂の進展方向

2つ目の法則は亀裂同士が交差しないということである [10]。図 2.5 は亀裂が進展した先にすでに他の亀裂が存在していて、亀裂の進展がそこで止まり、亀裂と亀裂が交差することがないことを示したものである。

## 2.3 衝突箇所の中心に交わらない亀裂

この節では衝突箇所の中心に交わらない亀裂がどうやってできるか述べる。まず、合わせガラスはどのような構成でできているか説明する。合わせガラスは2枚の板ガラスの間に特殊樹脂膜を挟んで接着してある。特殊樹脂膜があることによって耐貫通性に優れており、ガラスの破片が飛散、脱落することが少ない。この特殊樹脂膜の作用で合わせガラスには放射状の亀裂と垂直に近い角度を成す亀裂が発生する。この亀裂は次のような過程によってできる。合わせガラスに衝突物がぶつかると脆い性質であるガラスは割れてしまうが、ガラスは特殊樹脂膜に接着

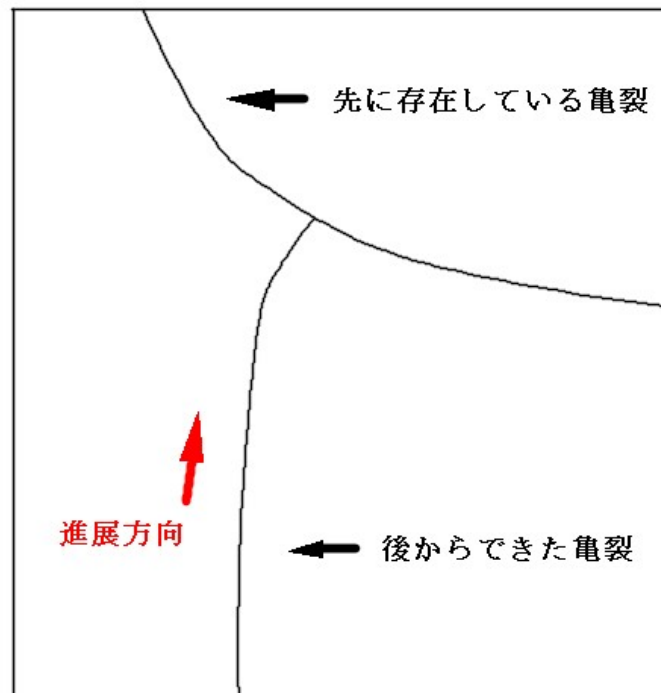


図 2.5: 亀裂の交差

したままである。特殊樹脂膜は柔軟なので力に対して変形する。ガラスも特殊樹脂膜に合わせて変形しようとするが、脆い性質なので割れてしまう。そのため合わせガラスの曲率が大きいところほどこの亀裂が発生する数が多くなる。この割れた部分が衝突箇所の中心に交わらない亀裂となる。この亀裂は衝突箇所を中心に囲むように表れることが多い。

図 2.6 は合わせガラスをハンマーで叩いた写真である。ハンマーが接触した箇所は変形が大きいので亀裂が多く密集しているのがわかる。



図 2.6: 亀裂の集中 (株式会社リプロス [12], 株式会社ガラスアシスト [13])

## 2.4 ひび割れの重なり

ここでは 1 枚の合わせガラスにひび割れが複数できたときどのようなようになるか述べる。放射状の亀裂は進展の法則によってできているので、亀裂が進んでいった先にすでに亀裂があった場合はその亀裂と交差したところで進展が止まってしまう。

衝撃箇所中心に交わらない亀裂は合わせガラスの変形具合によってできるのでこの亀裂は進展法則を適用せずに無条件で表れる。

## 第 3 章

# 合わせガラスのひび割れのモデル化

この章では最初に放射状の亀裂の作成方法について述べ、次に衝突箇所中心に交わらない亀裂の作成方法について述べた後、最後にひび割れ同士の重なった場合について述べる。

### 3.1 亀裂の表現

ここでは亀裂をどのように作成していくか述べる。本手法では合わせガラスのモデルの表面に点を配置していき、それらの点を直線でつなぐことによって亀裂を表現する。まず最初に衝突物がぶつかった点を決める。これを中心点  $P_0$  とする。中心点  $P_0$  より合わせガラスの縁に向かって亀裂は進展していく。2章で述べたように、亀裂はガラスの縁に対して垂直になろうと進展方向を変化する性質がある。この性質を表現するため、合わせガラスの四辺のどの辺に向かって進展方向を変化させるか決める。中心点と合わせガラスのなす四辺形の各頂点を線で結び4つの領域に分割する。進展する亀裂は、亀裂自身が存在する領域に含まれる縁に向かって垂直になろうと進展方向を変化させる。図 3.1 の黒い点は衝撃が加わった中心点  $P_0$ 、赤い線は合わせガラスを4つに分割する線である。

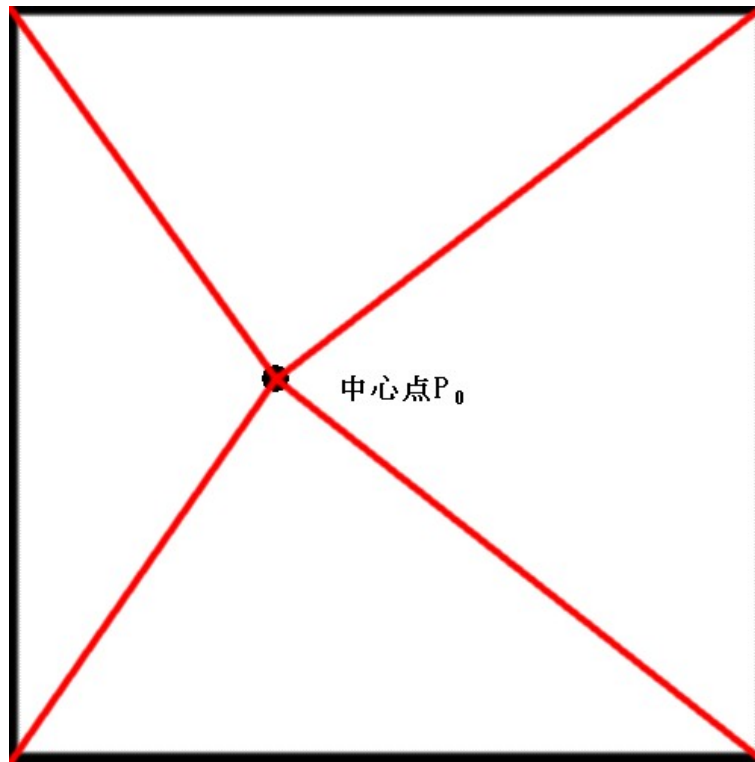


図 3.1: 分割した 4 つの領域

1本の亀裂は中心点  $P_0$  より複数の点を縁に向かって配置することによって出来る。1本目に作成した亀裂の1個目の点を  $P_{11}$ 、2個目の点を  $P_{12}$  と表記する。 $i$ 本目に作成した亀裂の  $j$ 個目の点であれば  $P_{ij}$  となる。ここでは仮に衝突箇所より真上の方向へ進展していく亀裂の作成方法について述べる。最初に決めた中心点  $P_0$  の真上の方向に点  $P_{11}$  を配置する。この中心点  $P_0$  と点  $P_{11}$  の位置によって亀裂の進展方向が決まる。点  $P_{12}$  は中心点  $P_0$  と点  $P_{11}$  がなす線の延長線上に配置する。このようにしてあらかじめ決めた数だけ点を配置する。

点と点の間隔は後ほど作成する衝突箇所中心に交わらない亀裂同士の間隔に影響する。そのため点と点は一定の間隔で配置するのではなく、衝突箇所中心に交わらない亀裂が密集する部分には点同士の間隔を狭くする。間隔を狭くする点  $P_{ij}$  と中心点  $P_0$  の距離は、式 3.1 で求める。 $k$  は作成する合わせガラスのひび割れに適した定数とする。

$$x = jk. \quad (3.1)$$

衝突箇所中心に交わらない亀裂は、衝突物が接触した部分に近いほど多くなる。この点と中心点  $P_0$  の距離  $x$  は、次の式 3.2 で求める。

$$x = j^2/50k. \quad (3.2)$$

そのため点を中心点から縁に向かうに連れて、点同士の間隔が広くなるように配置する。このとき中心点  $P_0$ 、点  $P_{11}$ 、点  $P_{12}$ 、 $\dots$ 、点  $P_{1n}$  を線で結ぶと一直線になるようにではなく、先ほど分割した領域に属する合わせガラスの縁に対して垂直に進展しようとするように点を配置していく。その配置の仕方は、点が属する領域の合わせガラスのそれぞれ縁に対して  $j^2/500k$  近づけることによって位置を修正して行く。このようにして中心点よりガラスの縁に向かって進展する 1 本の亀裂を作成する。図 3.2 の赤い点は点を配置していく様子 of 例である。

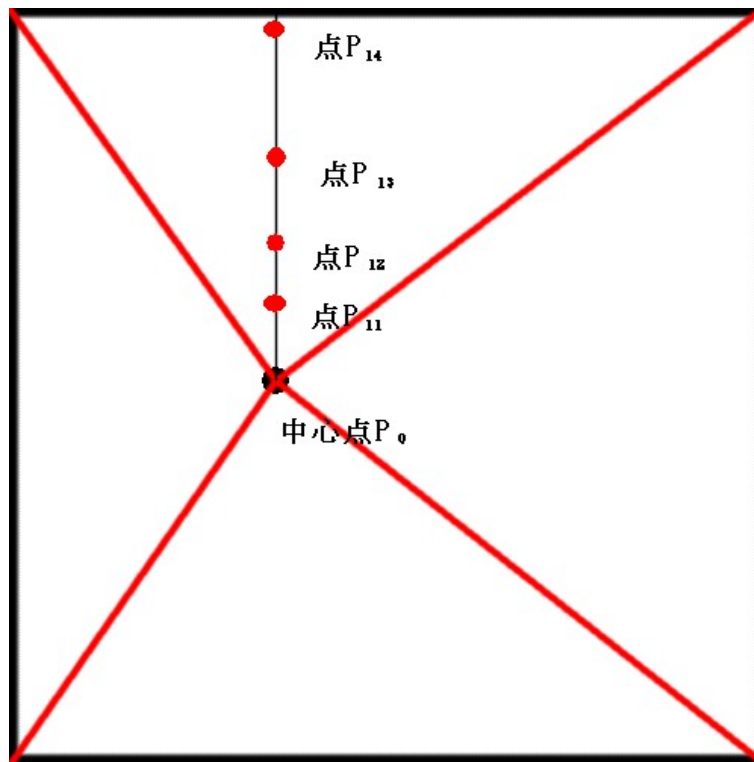


図 3.2: 点の配置

2本目の亀裂の1個目の点  $P_{21}$  は放射状の亀裂を何本作成するかによって位置が決まる。放射状の亀裂を  $l$  本作成する場合には  $\angle P_{11}P_0P_{21}$  が  $360/l + \alpha$  度になる。 $\alpha$  は0 から  $10/l$  の範囲で決めるランダムの数値である。図 3.3 の  $l$  は作成する放射状の亀裂の本数、 $\alpha$  はランダムの数値であり、 $\angle P_{11}P_0P_{21}$  を示したものである。

このように点を配置していった2本目、3本目と定めた数だけ反時計回りに放射状の亀裂を作成する。



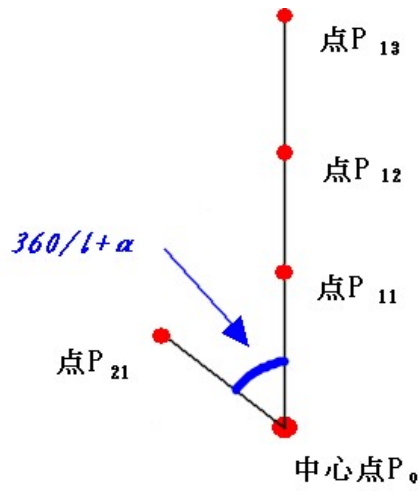


図 3.3: 点の配置

衝突箇所中心に交わらない亀裂は点  $P_{11}$  と点  $P_{21}$ 、点  $P_{21}$  と点  $P_{31}$  というふうに隣接する点  $P_{ij}$  の  $j$  が同じ番号の点同士を繋げることによって表現する。図 3.4 の青い線が衝突箇所中心に交わらない亀裂を作る様子である。

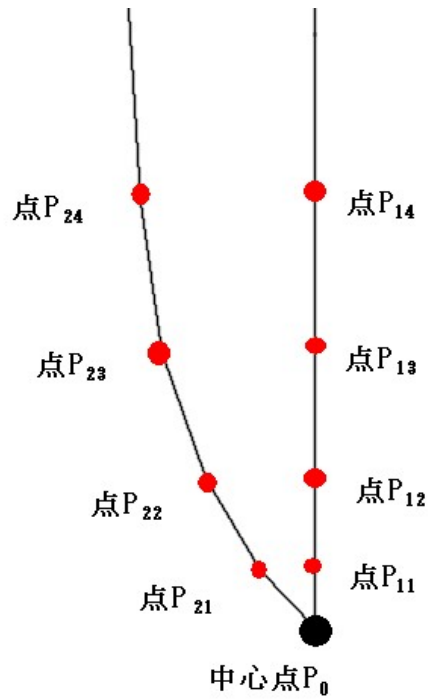


図 3.4: 衝突箇所中心に交わらない亀裂の作成

先に衝突物が接触した部分を表現するために点を配置してあるが、衝突物が接触したとする部分より外側では配置した点を1個置きに使用して衝突箇所を囲むようにできる亀裂を作成する。このときに使用しなかった点を1/2の確率で部分的に表れる衝突箇所中心に交わらない亀裂を作成するために使う。図 3.5 は衝突箇所中心に交わらない亀裂を示したものである。

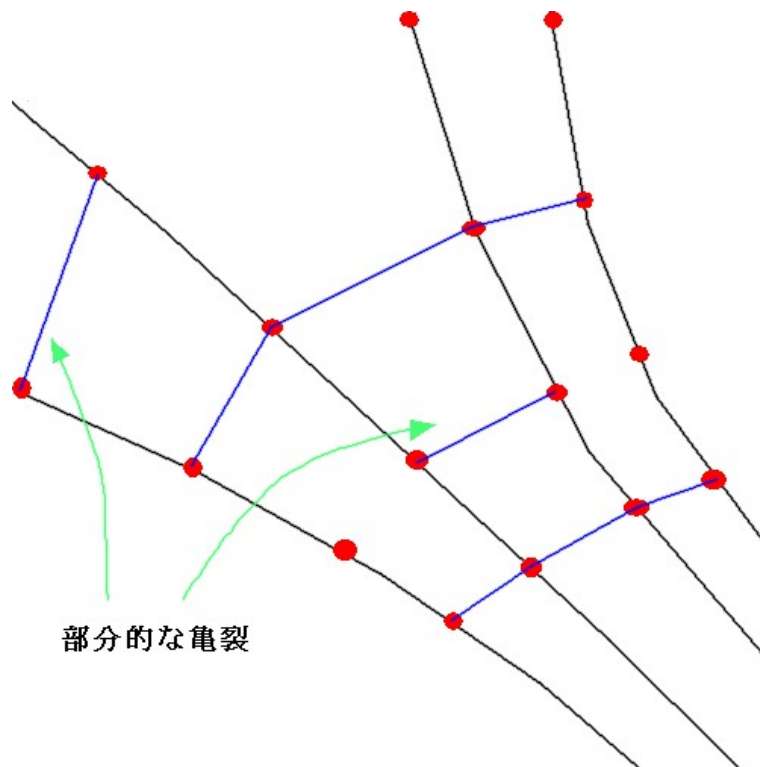


図 3.5: 部分的な亀裂

図 3.6 は赤い線を衝突物が接触してできた衝突箇所中心に交わらない亀裂として表し、青い線をそれより外側にできた衝突箇所中心に交わらない亀裂として表したものである。

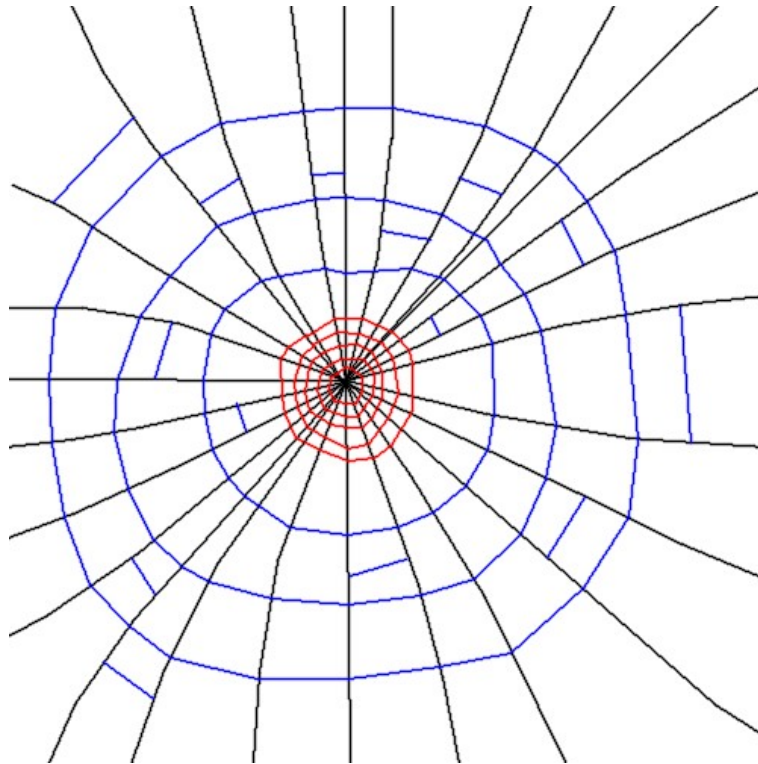


図 3.6: 亀裂の間隔

## 3.2 重なりの表現

合わせガラスに複数個のひび割れを作る場合、後からできるひび割れには制限を生じさせる。衝突箇所中心に交わらない亀裂は進展してできるのではないので、無条件に作成していくことにするが、衝突箇所中心より放射状にできる進展する亀裂は、進展した先に亀裂があるとそこで止める。この重なりの特徴を表現するには線分同士の交差判定を行い、点の配置箇所を修正する。

1つ目のひび割れと2つ目のひび割れの距離が離れている場合は、図 3.7 の赤線で示した、1つ目のひび割れの一番外側の中心を囲むようにできている亀裂と、その亀裂より外側に存在する放射状の亀裂を交差判定に使用する。

一番外側の亀裂しか判定に用いないのは、ひび割れ同士の距離があった場合、外側の亀裂で進展が停止してしまうので内側の亀裂まで交差判定を行うと無駄な処理になるからである。交差すると判定された場合は、進展する亀裂の一番外側の

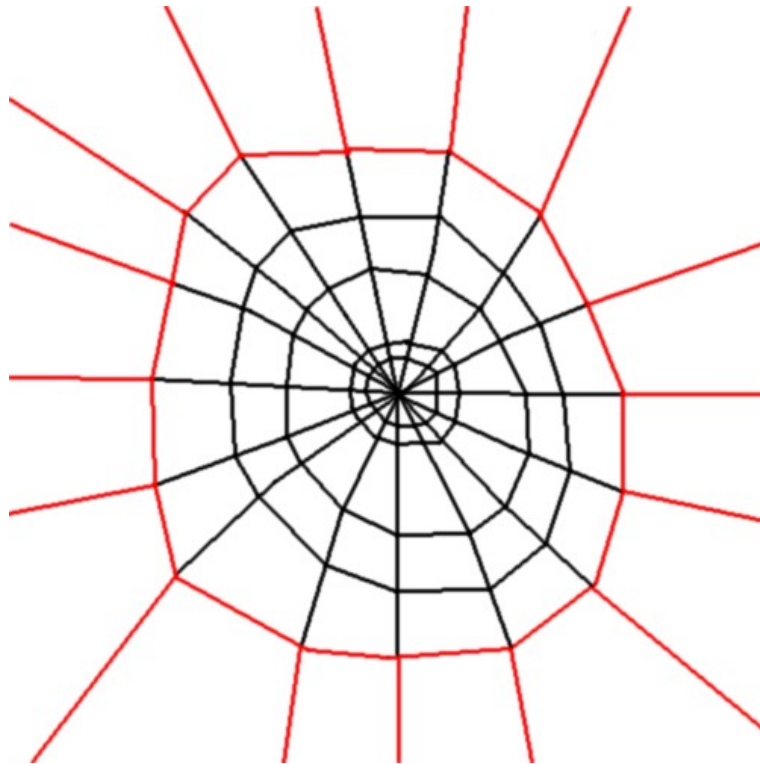


図 3.7: 交差判定に用いる亀裂

点を交差する箇所に移し修正する。

# 第 4 章

## 検証と考察

本章では本研究の手法を用いて合わせガラスのひび割れを表現した結果の検証と考察を行う。

### 4.1 検証

本研究では 3D グラフィックツールキットである FK System[14] を用いて実装を行った。ここで作成したひび割れは 1 本の放射状の亀裂を 30 個の点で表し、その亀裂を 20 本用意したものである。図 4.1 は実際の合わせガラスのひび割れの様子であり、図 4.2 は 3 章で述べた手法を用いて単一の合わせガラスのひび割れを表現したものである。



図 4.1: 実際の合わせガラスのひび割れ (日本総合研究所 エンジニアリング事業本部 [6])

実際の合わせガラスと実装した結果を比較すると放射状の亀裂と衝突箇所中心に交わらない亀裂が現れ、全体的なひび割れの形は表現することができた。合わせガラスのひび割れの特徴である、衝突箇所中心に交わらない亀裂も環状になるものと部分的に表れるものに分けて表現できている。また、衝突箇所中心に交わらない亀裂が発生する間隔に違いを出すことによって、衝突物の接触した部分とそれより外側の部分を表現することができた。

両者の違う点を挙げると、実際の亀裂は曲線的なものが表れている。衝突箇所中心に交わらない亀裂は、実際の方がより不規則な形、間隔になっている。進展する亀裂が合わせガラスの縁に近づくにつれて、縁に対して垂直になろうとする特徴がはっきりと表現することができた。

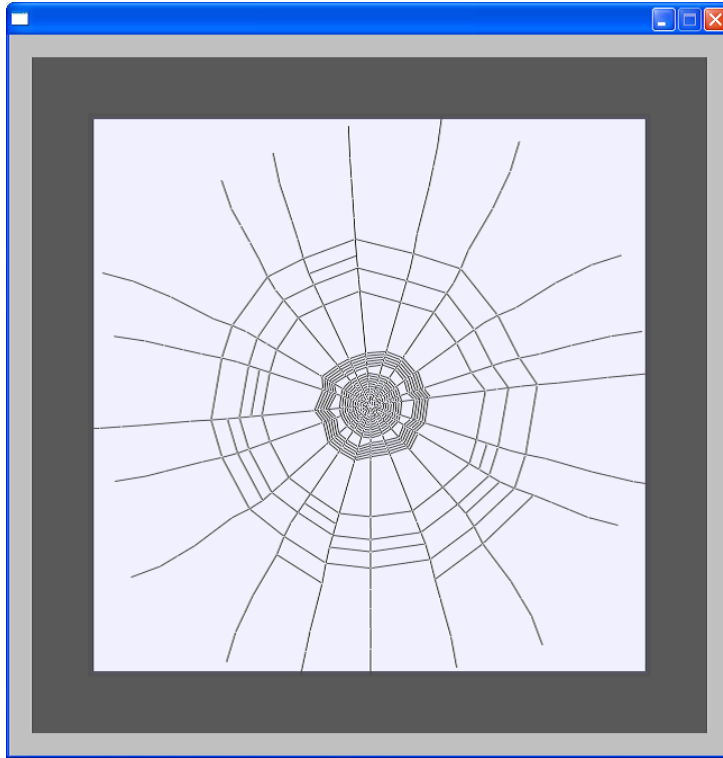


図 4.2: プログラムの実行結果 その1

図 4.3 は実際の合わせガラスに 2 回の衝撃が加わり、ひび割れが 2 つできて重なりあった部分の拡大である。右にあるひび割れが先にでき、左にあるひび割れが後からできたものである。赤い円で囲った部分は放射状の亀裂の進展が停止している。青い円で囲った部分はすでに亀裂が存在しているにもかかわらず衝突箇所中心に交わらない亀裂が後からできている。図 4.4 はプログラムの実行結果でひび割れを 2 つ作ったものである。図 4.5 は図 4.4 の赤枠で囲った部分を拡大した部分である。右上のひび割れが先に作られたものであり、左下のひび割れが後から作られたものである。赤い円で囲ったところは、後からできた放射状の亀裂が先にできていた亀裂にぶつかり進展が停止した部分である。青い円で囲ったところは、衝突箇所中心に交わらない亀裂が後からできても作成された部分である。



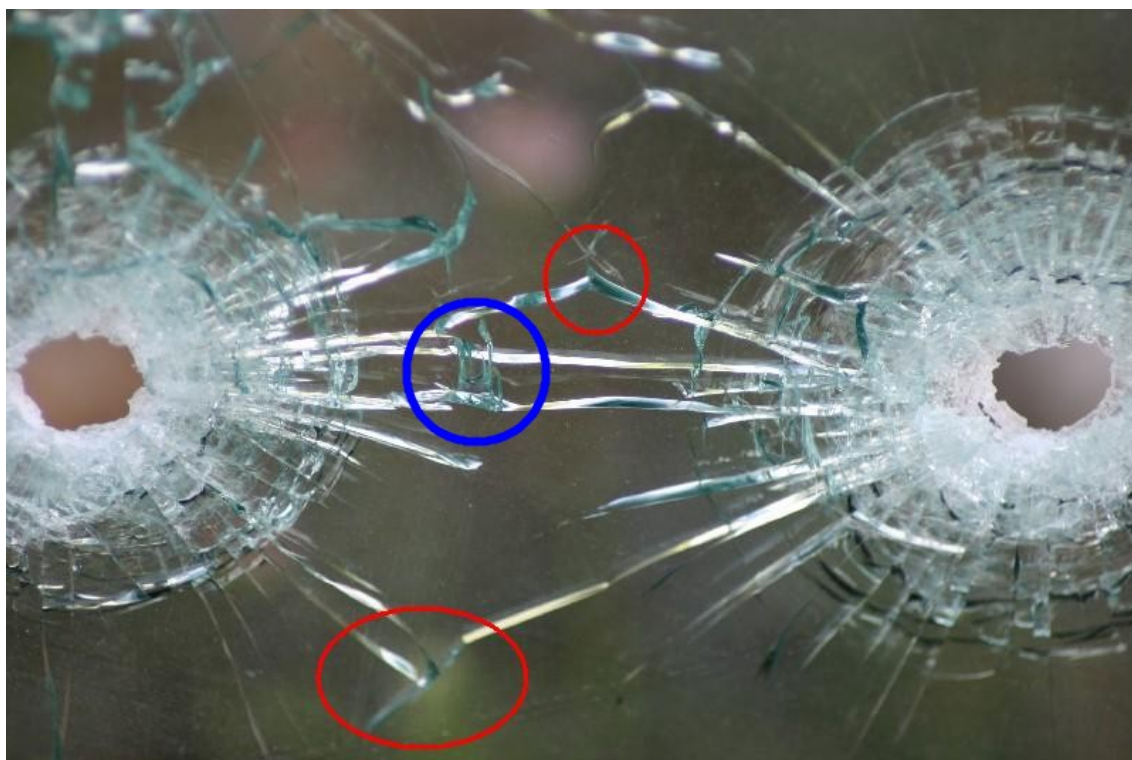


図 4.3: 実際のひび割れの重なり

放射状の亀裂の進展が停止する様子を表現できた。また、衝突箇所中心に交わらない亀裂ができる部分にすでに亀裂が存在していても作成できるようにできた。

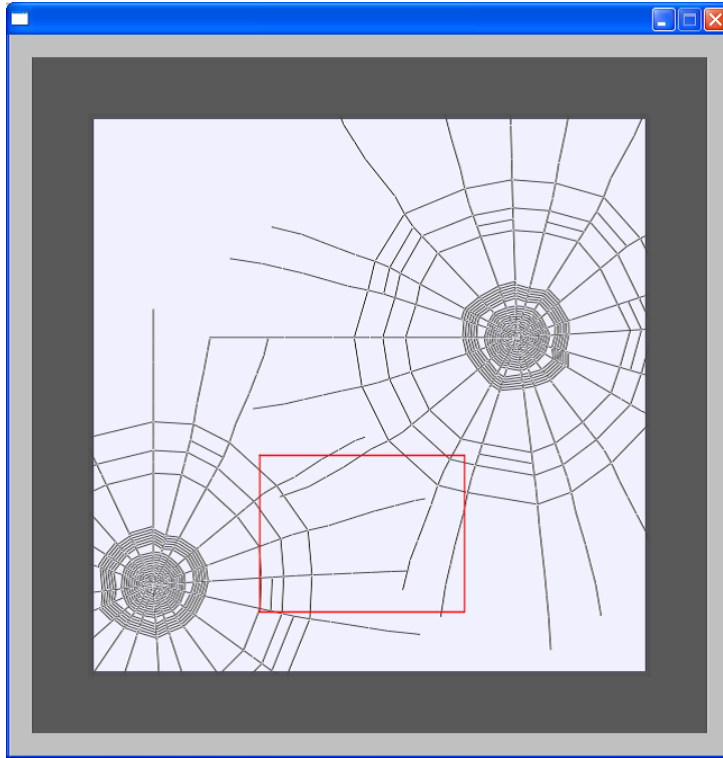


図 4.4: プログラムの実行結果 その2

## 4.2 考察

本研究では合わせガラスに焦点を当て、ひび割れのシミュレーションを行った。その結果、簡単なアルゴリズムで合わせガラスのひび割れを複数表現できるようになった。しかし、次のような本手法の問題点が挙げられる。

- 衝突物接触部分の表現

現実の衝突物が接触した部分のひび割れは亀裂が密集し、ガラスが粉々になっている。今回の手法ではその亀裂が密集した様子を表現しきれなかった。

- 亀裂の進展方法

本手法ではガラスの縁に対して垂直になろうと進展しているが、その性質はすでに存在している亀裂に対しても生じる。2つ目以降のひび割れを生成したときに1つ目のひび割れの亀裂に対してもその性質が生じるように亀裂

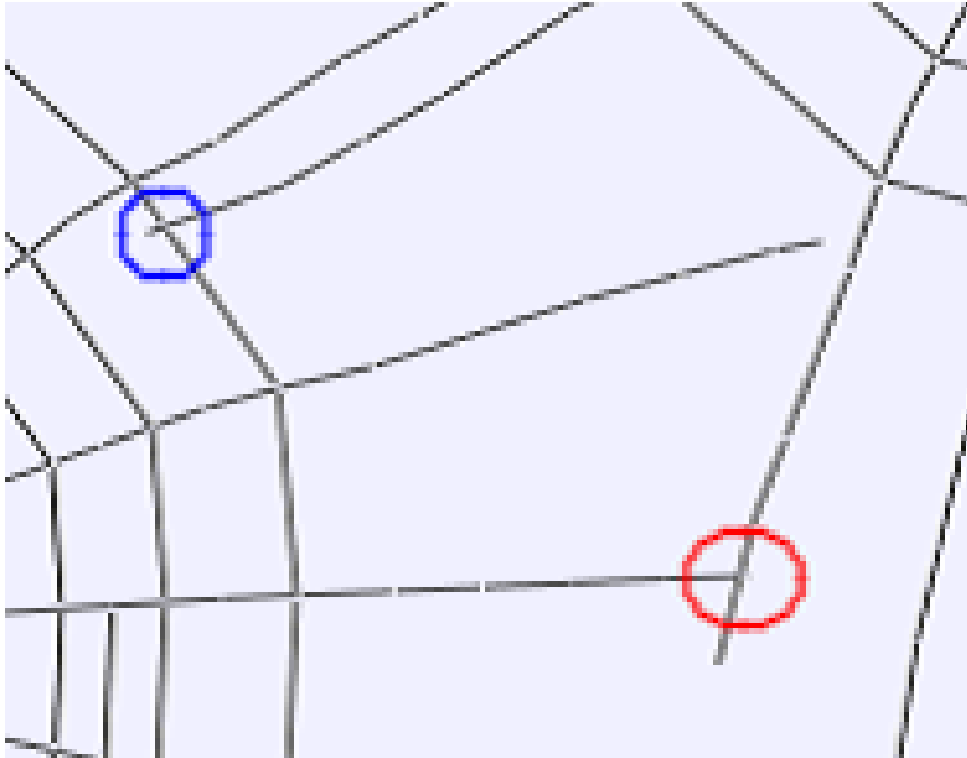


図 4.5: プログラムの実行結果 その2の拡大

の進展方法を改善する必要がある。

- 亀裂の形状

実際の亀裂は今回の手法で作成した亀裂よりも曲線的である。亀裂を曲線的に表現する必要がある。

## 第 5 章

### まとめ

本研究では合わせガラスに焦点を当て、亀裂の進展法則と合わせガラスの物理的特性に加えてひび割れの形状の特徴を捉えることにより、合わせガラスのひび割れを表現する手法を提案した。毎回変化があるひび割れを表現し、ひび割れの重なりを表現することにより複数回衝撃が加わった場合の合わせガラスを表現することができた。

今後の課題として、亀裂が密集した部分やガラスの厚みを考慮した表現することによって、よりリアリスティックなひび割れが表現できるようになるだろう。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、温かいご支援、ご指導いただきました東京工科大学メディア学部の渡辺大地講師、和田篤氏に心より感謝いたします。

日ごろから本研究のサポートをしていただいた、研究室のメンバーに厚く御礼申し上げます。

また、画像の転載を快く許可していただいた日本板硝子株式会社様、株式会社リプロス様、株式会社グラスアシスト様、株式会社日本総合研究所エンジニアリング事業本部様に心より感謝を申し上げます。

本研究にご協力していただいたすべての皆様に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] 白山晋, 「CGにおける物理シミュレーション」, 計算工学講演会論文集 Vol.5 pp.43-46,2000.
- [2] 作花済夫, 「トコトンやさしい ガラスの本」, 日刊工業新聞社,2004.
- [3] James F. O'Brien, Jessica K. Hodgins, "Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture", SIGGRAPH,1999.
- [4] James F. O'Brien, Adam W. Bargteil, Jessica K. Hodgins, "Graphical Modeling and Animation of Ductile Fracture", SIGGRAPH,2002.
- [5] Xavier Baele and Nadine Warzee, "Real time simulation of virtual objects impact with shattering", University of Brussels,2001.
- [6] 日本総合研究所 エンジニアリング事業本部,LS-DYNA,  
<http://www.jri.co.jp/pro-eng/struct/ls-dyna/index.html>.
- [7] 日本板硝子株式会社,Glass Business,  
<http://glass-business.jp/function/kyoka.html>.
- [8] 早川美徳, 「衝撃破壊の統計則 (WEB版)」,  
<http://poco.phys.tohoku.ac.jp/fragment/index.html>
- [9] D.G.Holloway, 「ガラスの物理」, 共立出版株式会社,1977.

- [10] 平田森三,「キリンのまだら」,ハヤカワ文庫,2003.
- [11] 佐藤建吉,「ものの破壊」,千葉大学工学部.
- [12] 株式会社リプロス,REPROS 特別記事 No.6,  
[http://www.repros.jp/f\\_articles/040622.html](http://www.repros.jp/f_articles/040622.html).
- [13] 株式会社グラスアシスト,  
<http://www.glass-assist.com/>.
- [14] FK Toolkit System,  
<http://www.teu.ac.jp/media/earth/FK/>.