

## 稲妻のパターンに従った雷鳴の生成

阿部寿人 松山克胤 藤本忠博 千葉則茂

岩手大学

### アブストラクト

Sosorbaram 等は, DLA(Diffusion Limited Aggregation)モデルを拡張した電界を考慮した放電パターンの生成モデルを提案している. 本論文では, この放電パターンの生成モデルにより生成された稲妻のパターンに適合する雷鳴を自動的に生成する手法を提案する. 雷鳴は稲妻発生時の大気の急激な温度変化で起こる衝撃波である. 本手法では, この雷鳴を, 生成された稲妻パターンに沿って, それぞれの階段状先頭に, N 波を基本として構成したサウンドテクスチャを音源として配置し, 受聴点に到達する波形を合成することにより, 近似的に生成している.

## Synthesis of Thunder According to Lightning Pattern

Hisato Abe, Katsutsugu Matsuyama, Tadahiro Fujimoto, Norishige Chiba  
Iwate University

### Abstract

Sosorbaram et al. proposed the extended Diffusion-Limited Aggregation (DLA) model for creating lightning patterns according to the given electric field. In this paper, we present a sound synthesis method for automatically producing thunder appropriate to the lightning patterns generated by their model. Thunder is the sound of a shockwave created by lightning rapidly heating the surrounding air. In our method, we first assign the sound texture composed as a sound source on the basis of N-wave to each stepped leader included in the generated lightning pattern. We then render the approximated thunder by integrating the waveforms received at an observer position.

### 1. はじめに

天候景観の CG 映像生成技術の開発は, 映画などの映像コンテンツの制作や種々の景観シミュレーションに応用を持つ重要なテーマである. また, 映像コンテンツに対する効果音の果たす役割は大きく, 重要な表現メディアとして認知されている. しかしながら, 映像に適合する効果音の作成には専門的なサウンドデザイナーを必要とする場合も多い. 一方, バーチャルリアリティ (VR) やミックスドリアリティ (MR) などインタラクティブなコンテンツでは, キューとなる映像が動的に決定されるため, 効果音の自動生成は有用である.

本論文では, 稲妻パターンの生成アルゴリズムによって生成されたアニメーションに雷鳴を付加する方法を提案する. 雷鳴は稲妻発生時の大気の急激な温度変化で起こる衝撃波である. 本手法では, この雷鳴を, 生成された稲妻パターンに沿って, それぞれの階段状先頭に, N 波を基本として構成したサウンドテクスチャを音源として配置し, 受聴点に到達する波形を合成することにより, 近似的に生成して

いる.

本論文の構成は以下のものである. 2 章で本論文に関連するこれまでの研究例について, また 3 章で雷の原理, すなわち稲妻と雷鳴の発生メカニズムについてまとめ, 4 章で稲妻パターン生成アルゴリズムの概要を示し, それに基づく雷鳴生成アルゴリズムを提案する. さらに, 5 章で実行例を示し, 6 章でまとめと今後の課題をまとめる.

### 2. これまでの関連研究

これまで, 稲妻パターンを生成する研究としては主に雲底と地面の間に発生する稲妻のパターンに関するものであり, パターンの生成は確率的な方法や, 雷の写真などを計測した統計的なデータを基にしているものなどがある. これに対して, Sosorbaram 等は, DLA(Diffusion Limited Aggregation)モデルを拡張した電界を考慮した放電パターンの生成モデルを提案している [SOSORBARAM00, SOSORBARAM01]. 一方, 稲妻の効果的なレンダリング法を提案したものとしては, [Dobashi 01]等

のものがある。

CG の分野における効果音の自動生成に関する研究の先駆的な試みは古く [Takala92] , その後 10 年間ほど研究例はほとんどなく, ここ数年で特に活発になってきた新しい研究分野である [Funkhouser98 , Funkhouser99 , Doel01 , O ' Brien01 , Tsingos01 , Dubnov02, Tsingos02 , 土橋 03 , Dobashi03] .

3次元仮想環境での音生成の技術は, サウンドレンダリングとサウンドモデリングとに大別できる [Takala92] . サウンドレンダリングは, 音の伝播シミュレーションを用いた聴覚化のことで, 仮想空間内の音源と受聴点との関係を計算するものである. サウンドレンダリングに関する研究は, 近年ビームトレーシング法を用いる手法が発表されており, ユーザがインタラクティブに移動できる音環境 [Funkhouser98] や, アバター間でのサウンドレンダリング法 [Funkhouser99] , さらに回折を考慮したものの [Tsingos01] が提案された. また, 実際の聴覚環境の部屋を用いて, 室内音響に関するキャリブレーションと一連のビームトレーシング法の有効性が示された [Tsingos02] .

サウンドモデリングは 物体の形状や特性を用い, その物体を音源とし, 生成される波形を計算するものである. サウンドモデリングに関する研究は, 物理法則に基づいた, 剛体の衝突, 摩擦, 回転に対して効果音を自動的に付加する手法 [Doel01] が提案されている. これはインタラクティブかつ自動的に効果音を付加できる. この研究に関連して, さらに, 現実の 3D オブジェクトの音を実測すること [Pai01] で, 自然な音を作成することも可能である. また, 非線形有限要素法 [O ' Brien99] を用いて, 短いタイムステップで幾何形状の微小変化を利用して音を作成する手法 [O ' Brien01] により, 効果音の自動生成を可能とした例もある. これは物理シミュレーションに基づくため計算コストが大きいという問題点を持つ. ウェーブレット解析を静的に行い, キャラクタやテクスチャに投影することで新しい音を再構築する手法 [Dubnov02] も提案されている. 風による樹木の揺らぎの効果音の自動生成 [松山 02 , 松山 03 , 松山 04] は, 枝と風で発生する音の自動生成 [松山 02] , 葉の衝突・摩擦による効果音の自動生成 [松山 03] , さらに, リアルタイムに動作する手法 [松山 04] が提案されている. また, 土橋等により, サウンドテクスチャを用いた風きり音のリアルタイムレンダリング法が提案されている [Dobashi03 , 土橋 03] . この手法では, 数値流体解析に Curle のモデルを適用することで, 様々な形状の風きり音が表現できる. また, 火炎の効果音を生成する方法も提

案している [Dobashi 04] .

雷鳴の生成に関する論文としては, 著者等が知る限りにおいて, [Glassner00] の手法があげられのみである. この手法では, 稲妻のストロークを 3-5m のセグメントとし, それぞれのセグメントから衝撃波 (N 波を基本として, 受聴点でのセグメントの仰角に応じて用意された波形) を発生させて, その形状に依存した雷鳴を生成している. しかしながら, この手法について 筆者らが追試を行った限りでは, 良好な結果が得られなかった. そのため, 本論文では [Glassner00] とは異なるアプローチを採用している.

### 3. 雷の原理

ここでは, 実際の稲妻の発生メカニズム, 落雷の放電過程, および, 雷鳴発生原理について, [北川 01] , [速水 96] よりまとめる.

#### 3.1 稲妻発生メカニズム

雷を起こす自然現象は雷雲である. 雷雲の電荷分離は大小の氷粒の衝突により行われる. 雷雲の発生要因は, 地表付近の気温が高く上層に冷気があると激しい上昇気流により発生する. この上昇気流により水蒸気が上昇し, やがて氷粒となる. 氷粒は上昇しながら次第に成長し, やがて自重で落下し始めると, 雷雲内では, 落下する大きな氷粒と上昇する小さな氷粒との衝突が頻繁に発生する. 気温 10 以下の低温の大気中では, 小さい氷粒は正, 大きい氷粒は負に帯電し, 小さい氷粒は上昇気流で吹上げられて雲の上部に正電荷が分布し, 大きい氷粒は重力で落下して, 雲の中部・下部に負電荷が分布する. この分離された正負電荷が, 空気の絶縁を破壊して起きるのが雲内放電である. また雲の中部・下部の負電荷が, 地表に正電荷を誘導し, この正負電荷が空気の絶縁を破壊して起きるのがいわゆる落雷である.

#### 3.2 落雷の放電過程

落雷の放電過程で, 最初に空気の絶縁を破壊して進展する放電をリーダと呼び, リーダについて同じ放電路を反対方向に進展する放電をリターンストロークと呼ぶ.

落雷はリーダが雲から地表に向かって「下降」するか, 地表から雲に向かって「上昇」するかによって 2 つに分けられる. さらに, このリーダが「負に帯電」しているか, 「正に帯電」しているかによって, 落雷は 4 つのタイプに分けられる. 本研究では最も一般的な負帯電リーダ下降型の落雷について検討する.

図 1 にみるように負帯電リーダ下降型の落雷は,

リーダは雷雲の負電荷領域から出発し、地表に向かって進む。リーダの進展に伴って、雲の負電荷がリーダ上に移動し、リーダが切り開いた放電路に沿って分布する。リーダが地表に達するとリターンストロークがおきて、リーダに分布した負電荷が地表の正電荷で中和される。この過程は1～数回繰り返され、雷雲の全電荷が地表に誘導された正電荷によって中和されると、1つの落雷は終わる。

### 3.3 雷鳴発生メカニズム

雷鳴は放電により発生する。雷の電気は約1億ボルトといわれており、大量の電気がわずかに瞬時に空气中を流れる。そのために、放電路(雷が流れる部分)の空気が急激に熱せられ、爆発的に膨張し衝撃波を発生させる。この爆発により生じた衝撃波こそが雷鳴の原因である。そのため、雷鳴は近距離では爆発音と同じ響きをもつが、遠方では衝撃波が空气中を伝わる際に、地面等への反射を繰り返しゴロゴロと聞こえる。

衝撃波とは、一般に空気のような圧縮性流体の中で、音速を超える速さで伝わる圧力波のことを示す。衝撃波は自然界では、超新星の爆発、太陽風の地球磁場との干渉、火山の噴火、雷や隕石の大気圏再突入などで様々の規模で現れる。衝撃波波形はN型の波形になっていることからN波と呼ばれる。N波を図2に示す。

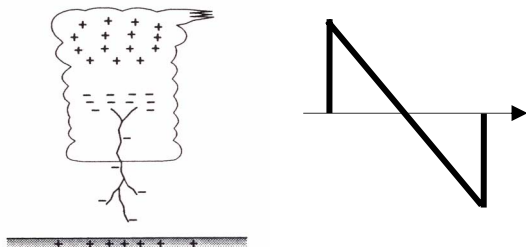


図1. 負帯電リーダ下降型 図2. 理想N波

## 4. 稲妻パターンと雷鳴の生成アルゴリズム

稲妻パターン生成 [SOSORBARAM00, SOSORBARAM01] と雷鳴生成のアルゴリズムを以下に述べる。稲妻は実際の落雷が起こる電荷分布を3次元空間上で再現し、それに基づいた稲妻パターンを生成する。雷鳴は、生成された稲妻パターンに沿って音源を配置し、稲妻パターン生成時に発生した衝撃波の振舞いを計算する。そして、観測点に到達する波形を合成して雷鳴の生成を行う。

### 4.1 稲妻パターン生成アルゴリズム

STEP1: 電位空間の設定

稲妻パターンを生成するための空間を設定し、その空間を格子に分割する。そして、雲内電荷、地上電荷を設定し、各格子点の電位を式(1)より求め電位空間を定義する。

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{r_i} \dots (1)$$

ここで、 $r_i$ は格子点から $q_i$ 電荷までの距離を示す。  
STEP2: 先駆点の配置

負に帯電している領域から任意に開始点を設定し、先駆点(先駆放電の先端の点)とする。

STEP3: 候補点の配置

先駆点の周りに候補点(次の先駆点の候補となる点)をM個配置する。

STEP4: 進展確率の付加

M個の候補点に進展確率を与える。先駆点*i*に対して、候補点*k*の進展確率は式(2)で与えられる。

$$P(E_k) = \frac{E_k}{\sum E_j} \dots (2) \quad E_k = \frac{|\Phi_k - \Phi_i|}{d_{ik}}$$

ここで、 $E_k$ は候補点*k*における電界強度、また、 $E_j$ は各候補点*j*における電界強度であり、M個の全候補点についての和を取る。 $\Phi_k$ と $\Phi_i$ は候補点*k*と先駆点*i*の電位、 $d_{ki}$ は先駆点*i*から候補点*k*までの距離を示す。M個の候補点の中から進展確率の大きな順にN個を選び、新たな先駆点とする( $N < M$ )。ただし、新たな先駆点として選ばれた点の近傍、すなわち、その点を中心とした半径Rの球体の内部にまだ選ばれていない候補点が属していれば、それらの候補点は選ばないこととする。

STEP5: 終了条件

先駆点が地上に達していなければ、STEP3に戻る。逆に、先駆点が地上に達した場合、放電が起きたと判断し処理を終了する。

### 4.2 雷鳴生成アルゴリズム

STEP1: N波作成

雷鳴生成、つまり衝撃波の振舞いを計算するために基本となるN波を作成する。N波は基本周波数の倍音で作られていることから、N波は式(3)より求めることができる。

$$Nwave = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(nx) \dots (3)$$

本研究では、一般的なN波を用いるのではなく、時間経過と共に、振幅だけでなく周波数も下がるようなN波を作成して用いた。これは、経験上、同じ周波数のN波が周期的であると自然な雷鳴が生成されず、実際に解析した結果、周波数が低くなる傾向

が見られたためである。周波数の下がり具合は試行錯誤により求めた。

STEP2：観測点・音源の設置

まず稲妻パターンを生成するための観測点を空間上に設定する。そして、4.1の方法で生成した稲妻形状に沿って音源を配置する。音源の座標は稲妻形状を生成するときを得られた先駆点の座標をそのまま用いる。つまり、先駆点を設定すると同時に音源の座標も決定される。

STEP3：周波数の設定

観測点と各音源の座標から、観測点～音源間の高さを求める。そして求めた高さから周波数を決定する。この際、高位置にある音源の周波数は低めに、低位置にある周波数は高めに設定する。

ここで、周波数を決定する際に音速による周波数分布について考慮する。実際の落雷が起こる時の大気の状態は、地上に近いほど気温は高く、上空にあるほど気温は低い。ここで、気温による音速の変化を式(4)に示す。

$$V = 331.5 + 0.6t \quad \dots(4)$$

式中のVは音速、tは気温を表す。式(4)より上空にある音源の音速は遅く、地上にある音源の音速は早いことがわかる。つまり、上空から地上のほうに伝わる波形は時間方向に伸びて観測される。本研究では、稲妻の伝播に合わせて音速や周波数の変化を計算して波形を求めるのではなく、観測点と雷の位置関係から、観測点で聞こえるであろう周波数を持つ波形を直接的に作成し、それをサウンドテクスチャとして稲妻パターンに貼り付けるアプローチをとる。

STEP4：減衰係数の設定

N波の減衰係数を決定する。波形は周波数の2乗に比例して減衰するという性質があるので、その性質に基づき設定する。

STEP5：音源の大きさの設定

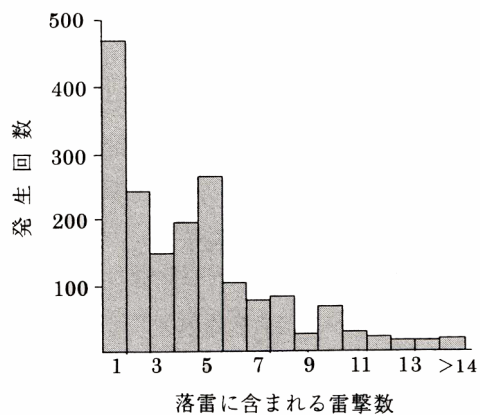
観測点と各音源の座標から、観測点～音源間の直線距離を求め、その距離から個々の音源の音の大きさを設定する。音の大きさは距離の2乗に反比例するという性質から、基準となる距離と音源の大きさを予め設定しておき、基準の距離と個々の音源の距離を比較して音源の音の大きさを設定する。

STEP6：単一落雷と多重落雷

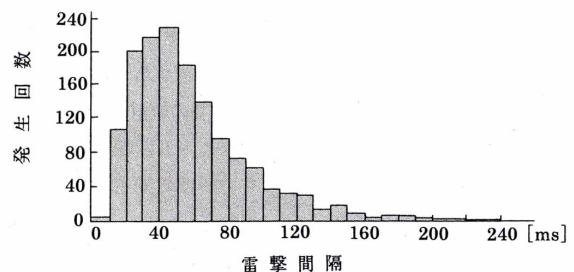
落雷は雷撃と呼ばれる放電の単位からなっている。1つの雷撃で終わる落雷は「単一落雷」、複数の雷撃を繰り返す落雷は多重落雷と呼ばれる。雷撃数とそれに伴う雷撃間隔の統計を図3(北川 01))に示す。この統計によると単一落雷が高い頻度で発生するが、

雷撃を4～6回繰り返す落雷の発生率が比較的高く、数十回繰り返す落雷もかなりの頻度で発生する。また雷撃間隔は、代表値40msをはさんで、10ms～240msという広い範囲に分布している。本研究ではこの統計を基にして、1撃の落雷に含まれる雷撃数と雷撃間隔を設定する。雷撃数の設定には図3(a)を近似した指数分布を、同様に、雷撃間隔の設定には図3(b)を近似したポアソン分布関数を適用した。

STEP7：N波の蓄積(雷鳴の生成)  
観測点～音源間の直線距離や落雷のタイミングから、波形の到達時間を設定し、到達時間が経過した音源から設定したN波を集める。そして全音源からの波形を観測点で合成して雷鳴を生成する。



(a)雷撃数



(b)雷撃間隔

図3．落雷の雷撃数と雷撃間隔

5．結果

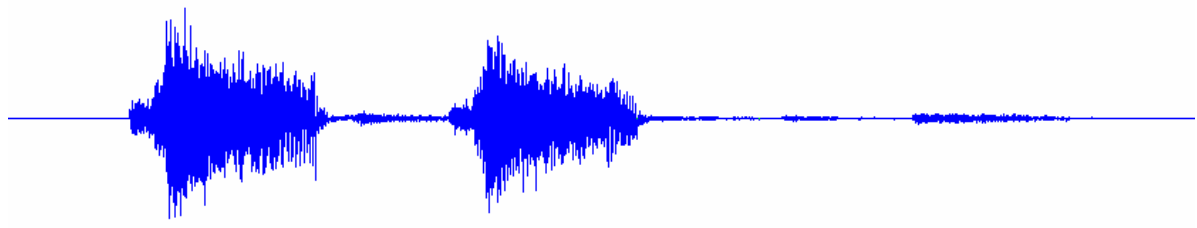
図4は本提案手法によりN波を合成して生成した雷鳴の波形・スペクトルの例を示す。この例では、

- ・ 設定した落雷の本数...8本
- ・ 総音源数 ...1256個

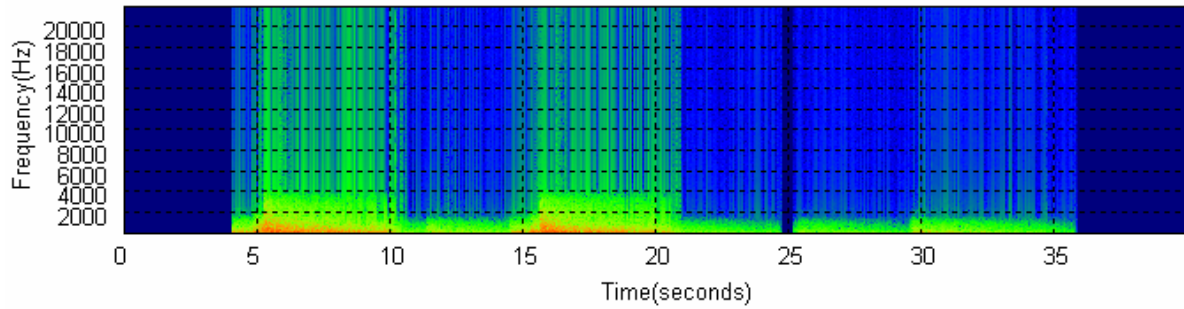
を用いた。また、遠雷を表現するために、観測点～音源間の距離が遠いものはフィルタを適用した。適用したフィルタは以下の通りである。

- ・ FIRフィルタ(ローパスフィルタ)
- ・ 遮断周波数200Hz
- ・ 次数51

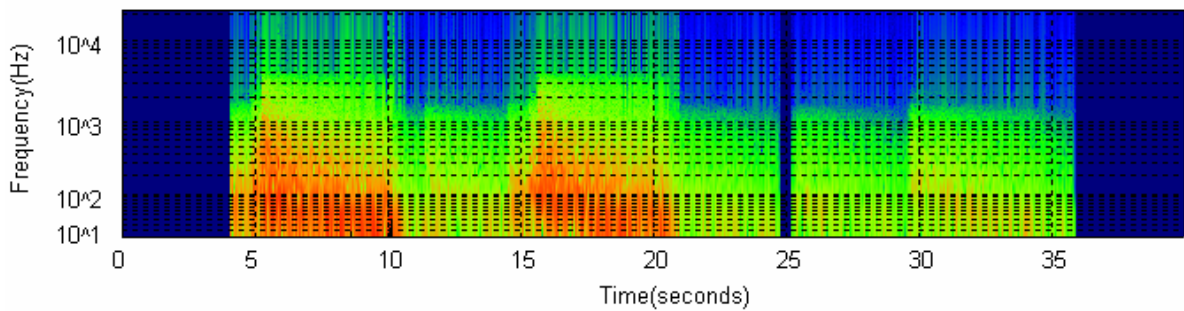
図5には稲妻パターンを生成した画像を示す。



(a)生成した雷鳴の波形



(b)生成した雷鳴のスペクトル



(c)生成した雷鳴のスペクトル(対数軸)

図4．生成した雷鳴

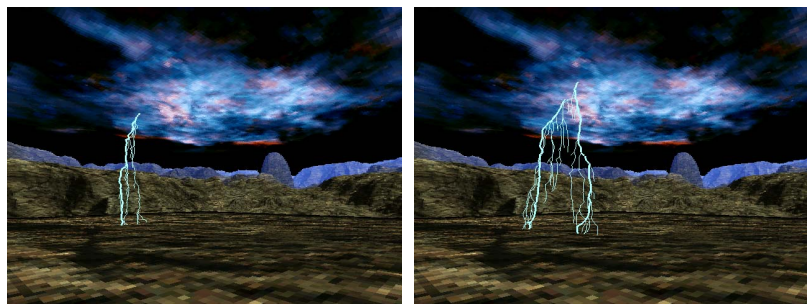


図5．生成した稲妻パターン

## 6．おわりに

本研究では、CGにより生成された稲妻パターンに対して、それに同期した雷鳴を自動的に生成する手法を提案した。生成した雷鳴はまだ不十分な点が多いが、ある程度、実際の雷鳴に近い音が表現できたと言える。

今後の課題としては、雲やビルによる音の反射、音の屈折による不規則な波形の考慮、また、雲-地上間の放電だけでなく、雲内放電の影響を考慮した雷鳴の生成などにより、実際の雷鳴により近い音を生成することを考えている。また、時間効率を重視した生成法の開発なども検討している。

謝辞

本研究の一部は、夢景士いわて戦略的研究推進事業に係わる研究開発課題による。

参考文献

[Glassner00]Glassner, Andrew S : "The Digital Ceraunoscope: Synthetic Lightning and Thunder, Part 2", IEEE Computer Graphics & Applications, Volume 20, Number 3, pp. 99-109, May 2000

[北川 01]北川信一郎: 雷と雷雲の科学-雷から身を守るには-, 森北出版株式会社(2001)

[速水 96]速水敏幸 : 謎だらけ・雷の科学, 講談社 (1996)

[SOSORBARAM00]Batjargal

SOSORBARAM:“雲を考慮した稲妻のビジュアルシミュレーション” 第 16 NICOGRAPH/MULTIMEDIA 論文コンテスト論文集, pp.21-28, 2000, 11.23,24

[SOSORBARAM01]

Batjargal

SOSORBARAM "Visual Simulation of the Lightning Taking into Account Cloud Growth" Proceedings of Computer Graphics International 2001,Hong Kong,pp.89-95

[Doel01] Doel, K., Kry, P. and Pai, D. Foley automatic: Physically-based sound effects for interactive simulation and animation, In Proceedings of ACM SIGGRAPH, ACM, 2001; 537-544.

[Dubnov02] Dubnov, S., Joseph, Z., Yaniv, R., Lischinski, D. and Werman, M. "Synthesizing sound textures through wavelet tree learning", IEEE Computer Graphics and Applications 22, 4, 2002; 38-48.

[Funkhouser98] Funkhouser, T., Carlbom, I., Elko, G., Pingali, G., Sondhi, M. and West, J. "A beam tracing approach to acoustic modeling for interactive virtual environment", In Proceedings of ACM SIGGRAPH98, ACM, 1998; 21-32.

[Funkhouser99] Funkhouser, T., Min, P. and Carlbom, I. "Real-time acoustic modeling for distributed virtual environments", In Proceedings of ACM SIGGRAPH99, ACM, 1999; 365-374.

[O'Brien99] O'Brien, J. and Hodgins, J. "Graphical modeling and animation of brittle fracture", In Proceedings of ACM SIGGRAPH99, ACM, 1999; 137-146.

[O'Brien01] O'Brien, J. Cook, P. and Essl, G. "Synthesizing sounds from physically based motion", In Proceedings of ACM SIGGRAPH2001,

ACM, 2001; 529-536.

[Pai01] Pai, D., Doel, K., James, D., Lang, J., Lloyd, J., Richmond, J. and Yau, S. "Scanning physical interaction behavior of 3D objects", In Proceedings of ACM SIGGRAPH2001, ACM, 2001; 87-96.

[Takala92] Takala, T. and Hahn, J. "Sound Rendering", In Proceedings of ACM SIGGRAPH92, ACM, 1992; 26: 2: 211-220.

[Tsingos01] Tsingos, N., Funkhouser, T., Ngan, A. and Carlbom, I. "Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction", In Proceedings of ACM SIGGRAPH2001, ACM, 2001; 545-552.

[Tsingos02] Tsingos, N., Carlbom, I., Elko, G., Kubli, R. and Funkhouser, T. "Validating acoustical simulations in the bell labs box", IEEE Computer Graphics and Applications, 22, 4, 2002; 28-37.

[Dobashi 04] Dobashi, Y., Yamamoto, T., Nishita, T, "Synthesizing Sound from Turbulent Field using Sound Textures for Interactive Fluid Simulation" EUROGRAPHICS 2004, pp538-545

[Dobashi03] Dobashi, Y., Yamamoto, T., Nishita, T., "Real-Time rendering of aerodynamic sound using sound textures based on computational fluid dynamics", SIGGRAPH2003, ACM, 2003

[Dobashi 01] Dobashi, Y., Yamamoto, T., Nishita, T, "Efficient Rendering of Lightning Taking into Account Scattering Effects due to Clouds and Atmospheric Particles" Pacific Graphics '01, pp390-399

[土橋 03]土橋, 山本, 西田, "流体力学に基づくサウンドテクスチャを用いた風きり音のリアルタイムレンダリング", Visual Computing/ グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2003

[松山 02] 松山, 藤本, 村岡, 千葉, "風による樹木の揺らぎの効果音の生成法", 第 18 回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 芸術科学会, pp. 41-46, 2002 .

[松山 03] 松山, 藤本, 村岡, 千葉, "風による樹木の揺らぎの効果音の生成 - 葉の揺らぎの効果音 - ", 2003 年 NICOGRAPH 春季大会, 芸術科学会, pp. 67-68, 2003 .

[松山 04] 松山, 藤本, 村岡, 千葉, "風による樹木の揺らぎの効果音の効率的な生成法", 芸術科学会論文誌, Vol. 3, No. 1, pp.76-85, 2004