

## 積雲中での光の多重散乱過程の可視化



海洋研究開発機構地球シミュレータセンター  
 荒木 文明、川原 慎太郎、大野 暢亮、  
 島 伸一郎、草野 完也、陰山 聡

## お品書き

- 超水滴法を用いた、連結階層型  
雲形成シミュレーションとその可視化手法
- 超水滴データに基づく大気放射計算  
(フォントレーシング)による写実的可視化
- CAVEシステムを用いた  
雲中での光の多重散乱の3次元的な解析手法  
～VFIVEリアルタイムフォントレーシング～

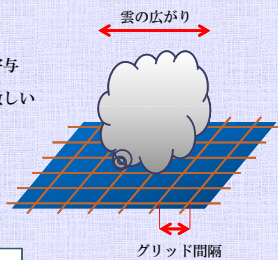
## 従来の大気(流体)シミュレーション

### 雲

- 水循環、熱・放射収支に重要な寄与
- 気候変動に比べ時空間的変動が激しい
  - 微物理の過程に強く依存
  - 不確実性が極めて大きい



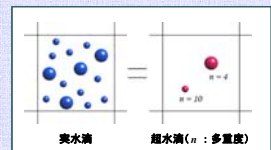
雲微物理を第1原理から解けるとよい



## 超水滴法 (S. Shima et al., arXiv:physics/0701103 (2007))

### 超水滴

- 同一の属性(粒径、凝結核の質量、温度など)を持つ複数個の水滴を粗視化して1つの計算粒子と見なす計算概念

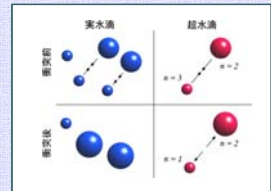


- 衝突併合過程

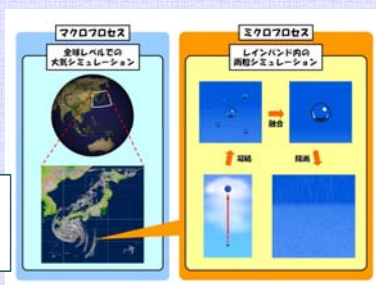
- いつでも同程度の  
サンプリング数を確保

- Monte Carlo法

- 他、運動、凝結成長、蒸発など
- 実水滴と同様に定義



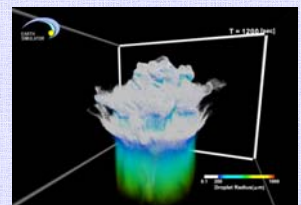
## 連結階層雲形成シミュレーション



各超水滴と近傍格子点の間で情報交換

## 可視化の方法論

- 雲力学過程
  - 場の可視化手法
  - 膨大なボリュームデータ  
→ 並列可視化ソフトウェア (MovieMaker) など
- 雲微物理過程
  - 粒子の可視化手法
  - 膨大な数の粒子を描ききる  
→ Point Sprite (右図) など
- 雲力学過程+雲微物理過程
  - 階層連結問題における可視化の方法論 → ?  
(Multi-Layer, Multi-Scale, Multi-Physics)



(川原 慎太郎 et al., 計算工学講演会論文集 Vol.13 (2008))

## 今後期待されること


- ➔ 複数種類のエアロゾルを取り込む
  - ➔ エアロゾル間接効果：雲の寿命、降水量に影響
  - ➔ 太陽放射の放射伝達過程を通じて気候変動に影響
- ➔ 大気放射過程
  - ➔ 関与媒質（大気や雲など）の光学的性質に基づき、太陽放射の放射伝達を計算
  - ➔ **超水滴を用いれば、光と粒子の直接的な相互作用として放射伝達を記述できる（かもしれない）**

7

## 写実的な雲の可視化

CGにおける写実的描画手法

- ➔ 本質的には大気放射計算と同じ手法に基づく
  - ➔ ボリュームレンダリング方程式を離散化した再帰的数値積分法
  - ➔ フォントレーシング法による確率的な解法、など



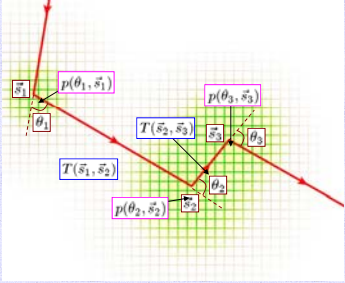
（これは写真です。提供：青柳 淳氏 (@安曇野)）

➔ 超水滴データの写実的な可視化を試みる

8

## フォントレーシング

- ➔ 光の散乱および透過 → 確率的
- ➔ Monte Carlo法
  - ➔ 散乱角
  - ➔ 次に散乱する位置を決定する。



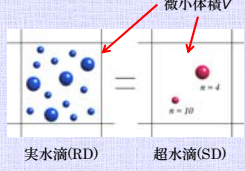
9

## 超水滴の光学特性の定義

散乱断面積  $\sigma^{SD}(\rho) := n\sigma^{RD}(\rho) = n\pi r^2 Q^{RD}(\rho)$

位相関数  $P^{SD}(\rho, \theta) := \frac{P^{RD}(\rho, \theta)}{\beta(\rho)}$

サイズパラメータ  $\rho := \frac{2\pi r}{\lambda}$  (Mie理論から解析的に導出)



微小領域Vの散乱係数 (=散乱の割合)  $\beta(\rho) := \sum_m \beta_m^{SD}(\rho) = \frac{1}{V} \sum_m \sigma_m^{SD}(\rho)$

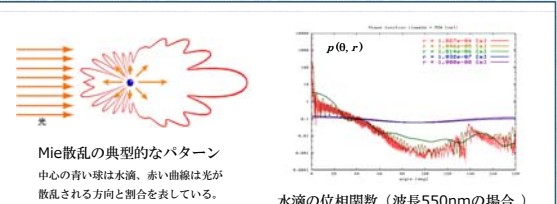
微小領域Vの位相関数 (=散乱角の確率密度関数)  $P(\rho, \theta) := \frac{1}{\beta(\rho)} \sum_m \beta_m^{SD}(\rho) P_m^{SD}(\rho, \theta)$

(光の吸収は起こらないと過程 → 散乱断面積 = 消散断面積)

10

## Mie散乱

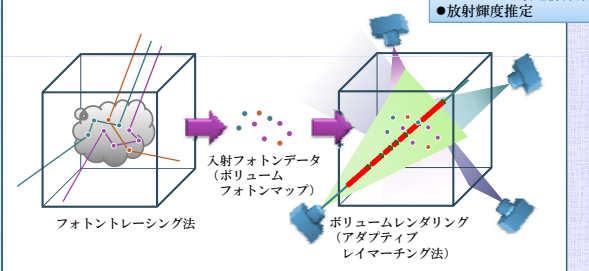
- ➔ 水滴による光の散乱は、水滴の粒径と光の波長によって極めて複雑に変化する
- ➔ Mie理論で光学特性を解析的に導出（計算負荷→大）



11

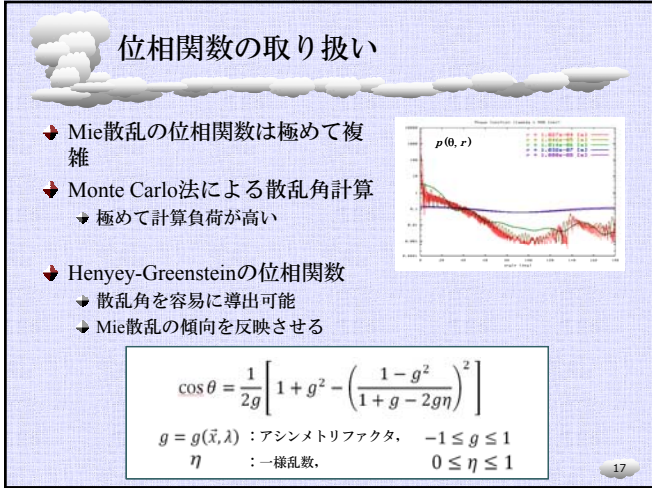
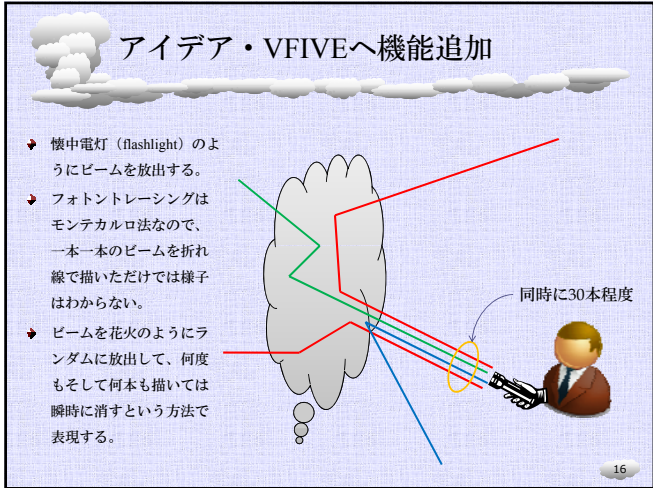
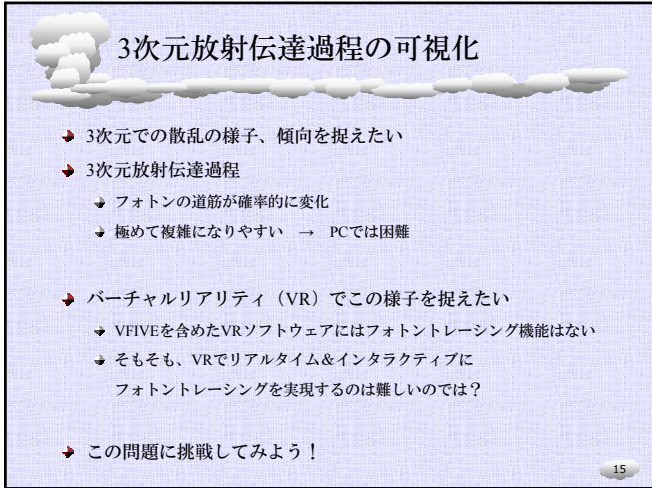
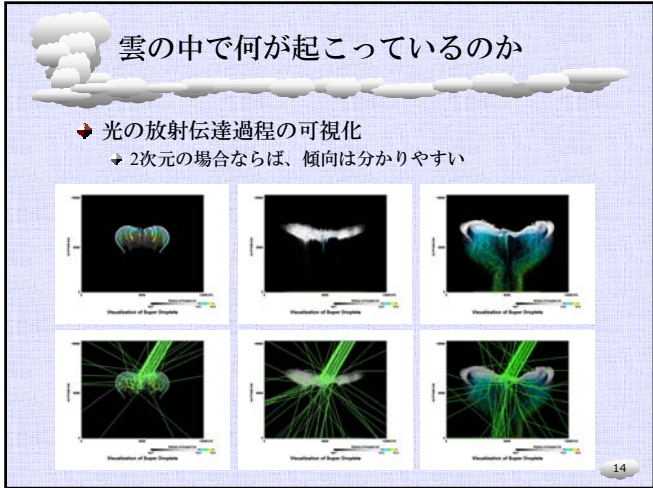
## 描画手法

ボリュームフォトンマッピング法を介して、カメラ方向への散乱光の放射輝度を計算・画像化

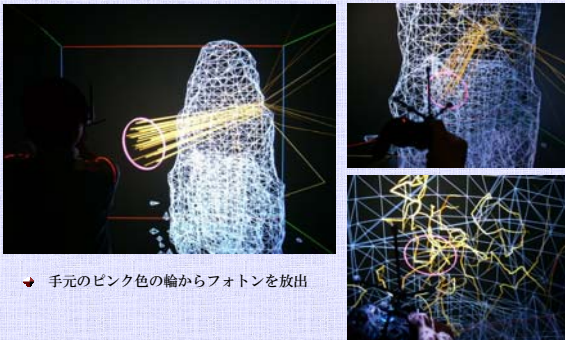


- フォトンの最近傍探索
- 放射輝度推定

12



## 結果（VFIVEへ新機能の実装）



- ➡ 手元のピンク色の輪から光子を放出

19

## まとめと展望

- ➡ 光の放射伝達に基づいて、超水滴データの写実的な可視化を行った。
- ➡ 雲の内部での光の散乱の様子を把握するために、リアルタイムかつインタラクティブなフォントレーシング機能を開発し、VFIVEに実装して実験した。
- ➡ 3次元空間での放射伝達過程を詳細に把握することができれば、さらに効率の良い放射伝達過程の計算方法を開発することができるかも知れない。

20