

氷晶への入射光と出射光の強度比テーブルを用いたハロの高速レンダリング手法

古田寛[†] 孫郭鑫[†]
玉木徹^{††} 金田和文^{††}

本研究では氷晶の姿勢を考慮したハロの高速なレンダリング手法を提案する。本手法では前処理として入射光と出射光の強度比を算出し、テーブルに保存する。そして、本処理として氷晶の姿勢から出射光を算出し、テーブルを参照することでハロのレンダリングを行う。これにより、大気中の氷晶の姿勢を考慮したハロの高速なレンダリングが行える。提案手法の応用として気象分野などが考えられる。

A Fast Method for Rendering a Halo Using a intensity table calculated from the ratio of incident light and outgoing light in an ice crystal

Hiroshi Furuta[†] Guoxin Sun[†]
Toru Tamaki^{††} Kazufumi Kaneda^{††}

In this paper, we propose a method for quickly rendering a halo taking into account the distribution of ice crystals. The ratio of incident light and outgoing light in ice crystal is calculated in advance and is saved into an intensity table. In a rendering process, referring to the intensity table a halo is rendered taking into account the distribution of ice crystals in the atmosphere. The proposed method is useful for meteorology.

1. はじめに

コンピュータグラフィックスにおいて、大気光学現象は映画やゲームなどのエンターテインメントの分野で数多く利用されている。さらに、物理則に従って大気光学現象を表示することで現象の理解に繋がる。これにより、気象分野への応用が考えられる。

ハロ、虹、オーロラなどの大気光学現象は色彩や形状がとても魅力的である。これらの現象は大気中に存在する物質で光の屈折、反射、干渉などの光学現象が起こることによって発生する。すなわち、ハロは大気中の氷晶により、虹は大気中の水滴により、オーロラは荷電粒子と大気中の酸素や窒素原子との相互作用により起こる現象である。本研究はハロについて着目する。

従来のハロの表示法 [1][2][3][4]では氷晶の姿勢ごとに光線を追跡しレンダリングを行っている。このため、多くの本数の光線を追跡する必要があり、計算時間が多くなる。また、氷晶の分布が一様分布しか取り扱うことができず、氷晶の姿勢分布が変化した場合に発生するハロをレンダリングすることができなかった。

本研究では出射光強度比（入射光の角度の変化に対する出射光の角度の変化の割合）を用いてハロのレンダリングを行う。これにより、光線を追跡する本数が減少し、計算の高速化を計ることができる。また、前処理として出射光強度比をテーブルへ保存する。レンダリング時にはこのテーブルを用いて任意の氷晶の分布に対してレンダリングを行う。

2. ハロ

氷晶が原因となり引き起こされる大気光学現象には 22 度ハロ、46 度ハロ、幻日などがある（図 1 参照）。ハロは太陽を中心に光の輪として観測される。視半径が 22 度のものは 22 度ハロ、46 度ハロのものは 46 度ハロと呼ばれる。また、太陽の両側に 22 度かもう少し離れて太陽と同じ高度にある明るい領域を幻日と呼ぶ [5]。本研究では比較的良く観測される 22 度ハロ（以下ハロ）について着目する。

ハロは氷晶へ太陽光が入射し、氷晶により屈折した光が集光し、我々の目に届くことで見える光学現象である。この氷晶は六角柱の形状である（図 2 参照）。この氷晶は六角形の面（主面）と四角形の面（側面）の長さの違いから column 型と plate 型に分けられる（図 3 参照）。また、氷晶で屈折が起きる光線の経路として 5 つの経路がある（図 4 参照）。

氷晶の形状と光線の経路により異なる現象が発生する。例えば、氷晶が column 型

[†] 広島大学 大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, HIROSHIMA University

^{††} 広島大学 大学院工学研究院
Faculty of Engineering, HIROSHIMA University

で光線の経路が b の時に 22 度ハロ、氷晶が plate 型で光線の経路が e の時に 46 度ハロ、氷晶が plate 型で光線の経路が b の時に幻日が起こる。

また、気象の分野では大気中の氷晶の大きさを測定する実験もされている [6]。これにより、ハロが観測される時にどのような大きさの氷晶が多いのか調査されている。



図 1 氷晶により起きる大気光学現象
(出典：文献 [7])

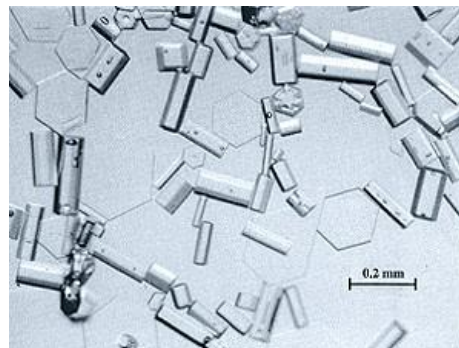


図 2 大気中の氷晶
(出典：文献 [7])

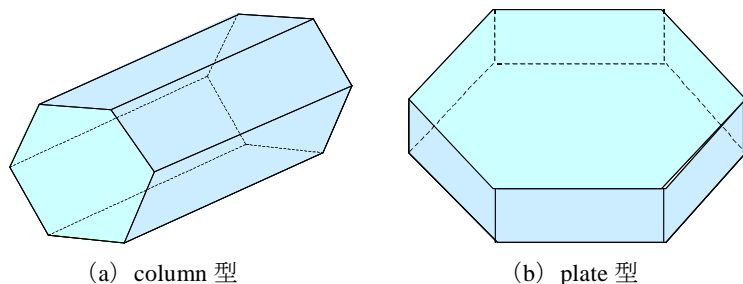


図 3 氷晶の形状

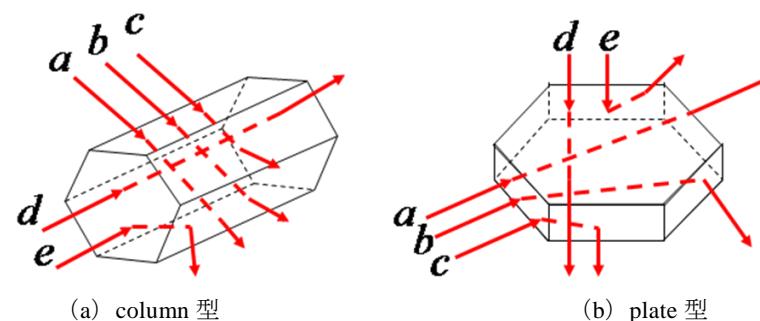


図 4 氷晶内の光の経路

a: 側面から入射し 2 つ離れた側面から出射, b: 側面から入射し 1 つ離れた側面から出射, c: 側面から入射し隣の側面から出射, d: 主面から入射し主面から出射, e: 主面から入射し側面から出射

3. 関連研究

ハロのレンダリングを行うために Greenler はある氷晶の姿勢について太陽からの光線を追跡し、この光が目が届く方向を求め、その光線をスクリーン上で加算する手法を開発した [1]。この処理を氷晶の姿勢を変化させて繰り返すことでハロのレンダリングを行っている。レンダリング画像の輝度分散を小さくするために非常に多くの光線を発生し、それを追跡しなければならないため多くの計算時間がかかる。また、氷晶の姿勢を変化させる時に姿勢をランダムに決定している。そのため、一様分布のものしか考えることができない。

Gonzato らは Greenler の手法で作成した結果画像に対してフィルターを掛けることで実写と合成をした時に不自然なざらつきが生じるのを防ぐ手法を開発した [2]。しかし、Gonzato の手法でもフィルターを掛ける前の画像を作成するために依然として多くの姿勢に対して光線の追跡を行う必要がある。また、Gonzato の手法も Greenler の手法と同様に氷晶の姿勢をランダムに決定しているため、一様分布のものしか考えることができない。

Glassner は Greenler の手法で氷晶の形状や太陽高度を変化させてシミュレーションを行っている [3][4]。さらに、氷晶の姿勢を決定する時に氷晶の姿勢に制限を加えることで一様分布でないハロのレンダリングも行っている。しかし、氷晶の姿勢を制限範囲内ではランダムに決定しているため、任意の分布のものは考えることができない。また、Glassner のシミュレーションも Greenler や Gonzato らと同様に画像を作成するために多くの氷晶の姿勢に対して光線を追跡する必要がある。

4. 提案手法

4.1 出射光強度比

出射光強度比とは入射方向の光線が変化する角度に対して、出射方向の光線が変化する角度の割合である。これは出射光が入射光に対してどれだけ集光しているのかを表している。つまり、従来の方法では光の強さを目に届いた光線の本数として計算していたが、提案手法では光の強さを光の集光度として計算することで計算時間を減らす。

ある入射光 ω に対して氷晶中での光線の経路を考えることで出射光 $L_{out}(\omega)$ が算出できる。また、入射光から $\Delta\omega$ 離れた光 $\omega + \Delta\omega$ に対しても同様に $L_{out}(\omega + \Delta\omega)$ を求めることができる。出射光強度比 $I(\omega)$ は入射光の角度変化に対する出射光の角度変化の割合の逆数を用いて次式で表される (図 5 参照)。

$$I(\omega) = \left(\frac{\Delta\omega}{|L_{out}(\omega + \Delta\omega) - L_{out}(\omega)|} \right)^{-1} \quad (1)$$

出射光強度比を前処理で計算し、テーブルに保存する。そして、本処理でテーブルを参照することで氷晶からの出射光強度を計算する。

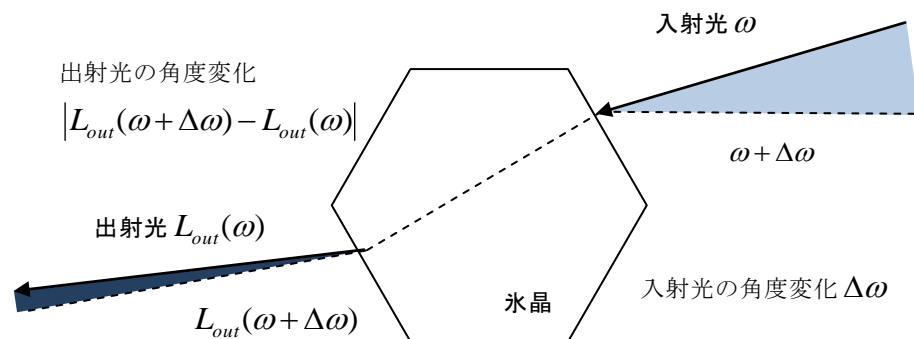


図 5 氷晶による光の集光

4.2 氷晶の姿勢と分布

図 6 のように氷晶の主面の中心に x 軸，側面の中心に z 軸をとる。さらに、 x 軸， y 軸， z 軸での回転角度をそれぞれ ξ_x ， ξ_y ， ξ_z とする。これによって、氷晶の姿勢を 3 軸の回転角度によって表現する。

22 度ハロを作る column 型の氷晶はその形状から大気中では側面が水平方向を向く状態が多いと考えられる。この状態を初期配置として氷晶の分布について 3 軸それぞれで考察する。 x 軸に関する氷晶の分布は風などの影響を受けにくく一様分布となる場合が多いと考えられる。 y 軸に関する氷晶の分布は風の影響により風向と主面が平行になる氷晶と垂直になる氷晶の割合が変化すると考えられる。 z 軸に関する分布は上昇気流や氷晶の落下の影響により側面が水平方向を向く氷晶が多く、側面が鉛直になる氷晶は少ないと考えられる。

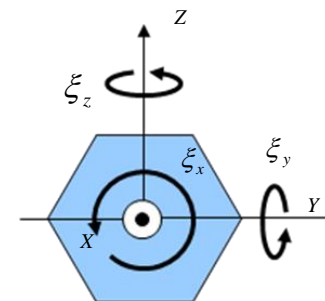


図 6 氷晶の姿勢

4.3 氷晶の分布を考慮したハロのレンダリング

提案手法では前処理として出射光強度比をテーブルに保存し、本処理としてテーブルを参照することで氷晶の分布を考慮したハロのレンダリングを行う。具体的な手順を以下に示す。

まず、前処理として出射光強度比を求め、テーブルに保存する。すなわち、入射光から氷晶中での光線の経路を考えることで出射光を算出し、入射光と出射光の角度変化から出射光強度比を算出する。そして、入射光から出射光強度比が参照できるテーブルを作成する (図 7 (a) 参照)。それと同時に入射光から入射光が参照できるテーブルを作成する (図 7 (b) 参照)。現段階では主面に平行な光線だけを想定したテーブルを作成している。

L_{in}	ω_1	ω_2	ω_3	...
I	$I(\omega_1)$	$I(\omega_2)$	$I(\omega_3)$...

L_{out}	ω'_1	ω'_2	ω'_3	...
L_{in}	ω_1	ω_2	ω_3	...

(a) 出射光強度比のテーブル (b) 出射光から入射光を参照するテーブル

図 7 前処理で作成するテーブル

次に、本処理としてレイトレーシング法によりレンダリングを行う。視点、注視点、スクリーンを指定し、各ピクセルへレイを発射する。このレイは氷晶から出射され目に届いた光と考えられることができ、氷晶からの出射光として取り扱う。図 7 (b) のテーブルを参照することで出射光から入射光を求める。ここで、入射光の角度は太陽方向と氷晶の姿勢との関係に対応しているため、氷晶の姿勢の考慮が行える。この入射光からテーブルを参照することで出射光強度比が求められる。ここで、氷晶の姿勢は氷晶と入射光を固定した状態で入射光を太陽方向に回転させることで求めることができる。この氷晶の姿勢が大気中に存在している確率（分布関数 $P(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$ ）を積算することで氷晶の分布の考慮を行う（図 8 参照）。

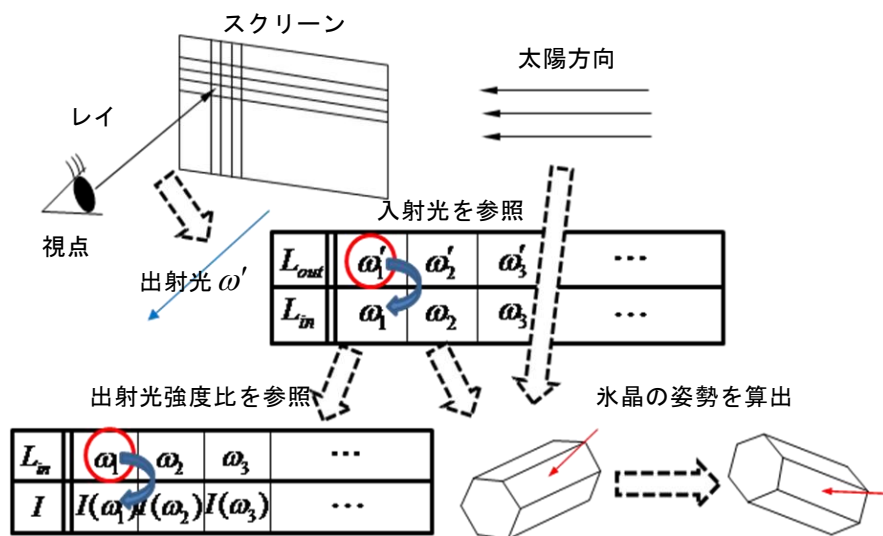


図 8 レンダリングの概念図

太陽光の強度 I_{sun} と氷晶からの入射角 θ （氷晶面の法線 n とすると $\theta = n \cdot \omega$ ）と出射光強度比 $I(\omega)$ と氷晶の姿勢の分布関数を掛け合わせることで氷晶からの出射光強度比を計算する。

$$I_{pixel} = I_{sun} \cdot \cos \theta \cdot I(\omega) \cdot P(\xi_x, \xi_y, \xi_z) \quad (2)$$

5. 結果

5.1 出射光強度比の考察

4.2 節で述べたように、氷晶の主面の中心に x 軸、側面の中心に z 軸をとる。この氷晶の姿勢から x 軸だけを回転させる。そして、主面と太陽方向が平行で x 軸中心に一樣な分布を考える。図 9 は出射角と出射光強度比の関係を表している。0 度から 22 度付近までの出射光強度比は 0 であり、22 度付近で最大値を示している。また、出射光強度比が最大値をとる角度より出射角が大きくなるにつれて出射光強度比が急激に減少していることが分かる。これは 22 度ハロの特徴である視半径が 22 付近で光が強く見えることを表している。

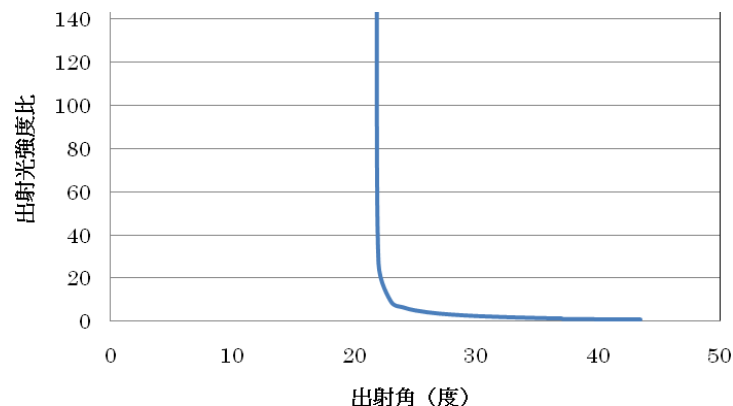


図 9 出射角と出射光強度比の関係

5.2 X 軸中心の氷晶の姿勢を変化させた場合の表示例

視点を (0, 0, 0), 注視点を (0, 1, 0) に置き, 太陽方向を (0, -1, 0), 視野角を 100 度, スクリーンの解像度を 200×200 ピクセルとし, 氷晶の屈折率を 1.31 とした. 氷晶の分布は Y 軸, Z 軸を初期配置 ($\xi_y = \xi_z = 0$) に固定した. X 軸中心の氷晶の姿勢の分布関数を一様分布と正規分布に変えた場合のレンダリングを行った.

図 10 は一様分布 (図 10 (a) 参照) のものである. 図 10 (b) はレンダリング画像である. 氷晶から出射された光をグレースケール画像として表しており, 画像の中心に太陽を置くように設定している. レンダリング画像では上下に光の筋が見られる. この詳細を見るためにレンダリング画像の上部の矢印の鉛直方向の明るさを拡大した (図 10 (c) 参照). 視半径に対する強度の関係は 22 度付近で大きな値となり 22 度ハロの特徴が見られる (図 10 (d) 参照). また, 図 11, 図 12 はそれぞれ氷晶の姿勢分布が $\mu=0, \sigma=1.0$ の正規分布と $\mu=0, \sigma=0.5$ の正規分布である. 図 11 (a), 図 12 (a) はそれぞれ分布関数を表している. 図 11 (b), 図 12 (b) は図 10 (c) と同様にレンダリング画像の明るさを拡大表示した画像である. また, 図 11 (c), 図 12 (c) は視半径と強度の関係を表している. これらも 22 度付近で最大値をとっている.

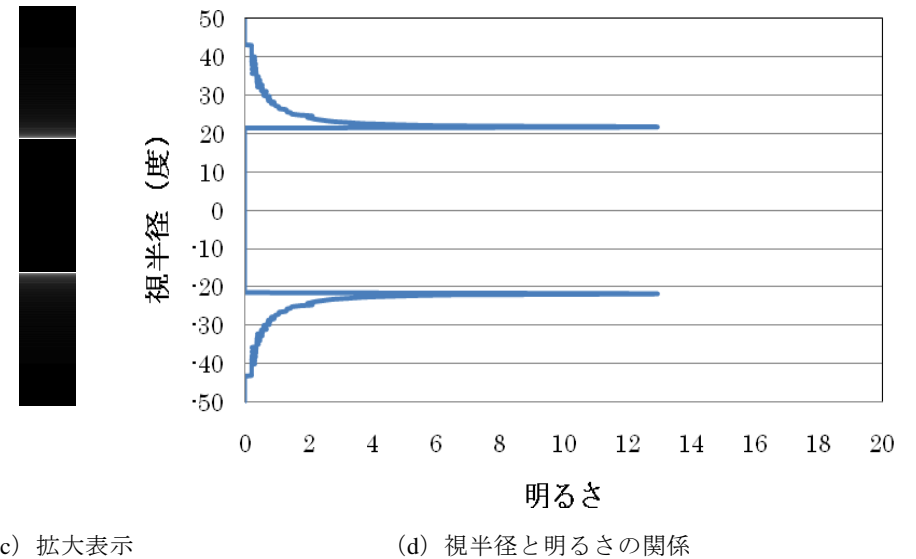
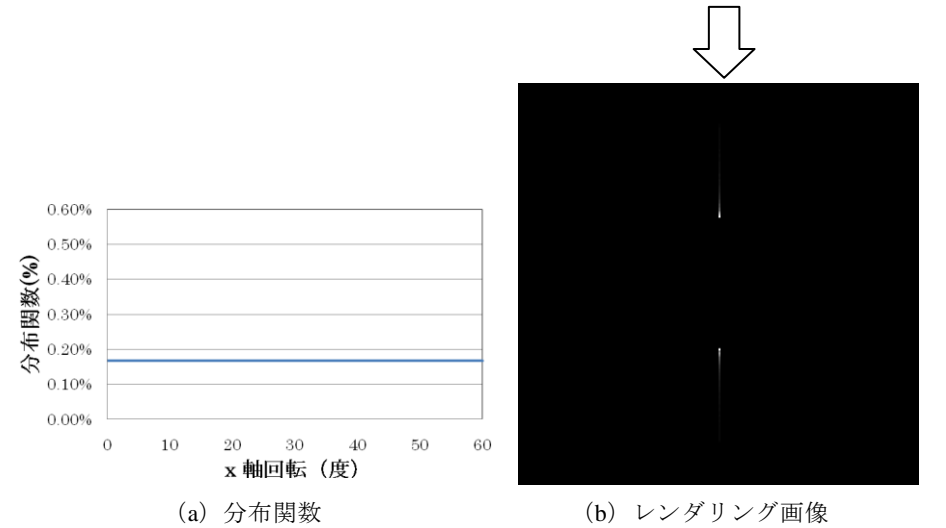


図 10 X 軸の氷晶の姿勢が一様分布

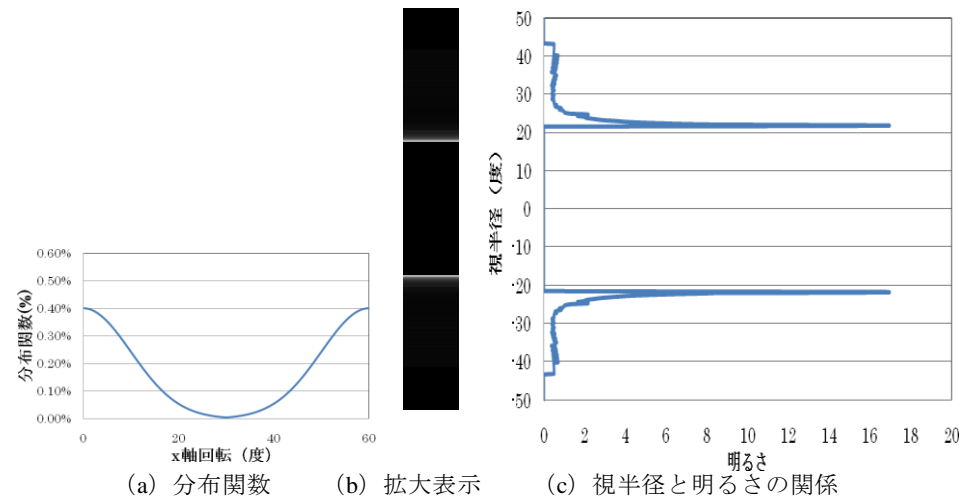


図 11 x 軸の氷晶の姿勢が正規分布 ($\mu=0, \sigma=1.0$)

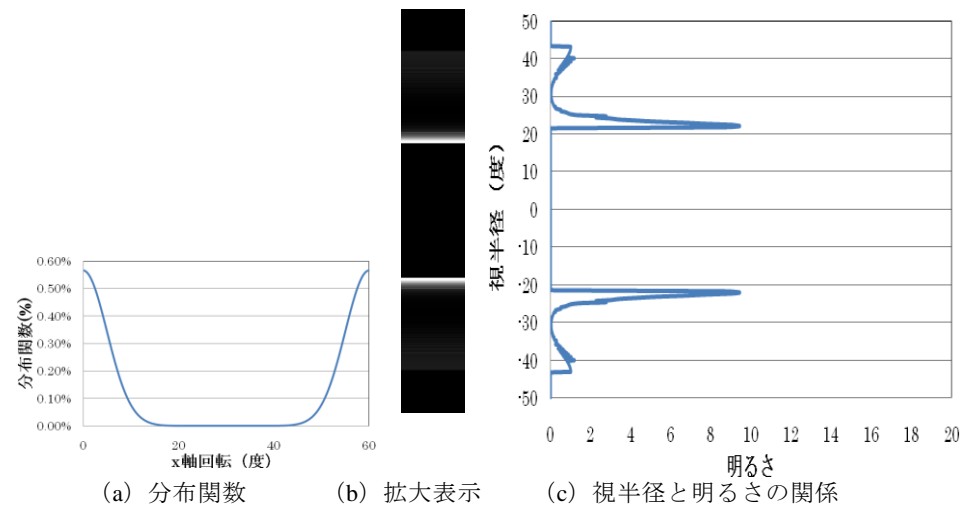


図 12 x 軸の氷晶の姿勢が正規分布 ($\mu=0, \sigma=0.5$)

6. おわり

出射光強度比テーブルを用いて氷晶の分布を考慮したハロの高速なレンダリング手法を提案した。そして、 x 軸に関する氷晶の姿勢の分布関数を一様分布と正規分布に変えてレンダリングを行った。

現段階では主に平行な光線だけを想定したテーブルを作成している。今後の課題として、任意の氷晶の分布を考慮するためにテーブルの拡張が挙げられる。

参考文献

- 1) R.Greenler: Rainbows, Halos, and Glories, Cambridge University Press, Portchester, New York (1980)
- 2) Gonzato J. C., Marchand S.: Photo-Realistic Simulation and Rendering of Halos, WSCG'01 (2001)
- 3) Glassner, A.: Computer-generated solar halos and sun dogs. IEEE Computer Graphics and Applications, pp.77-81 (1996)
- 4) Glassner, A.: Solar halos and sun dogs. IEEE Computer Graphics and Applications, pp.83-87 (1996)
- 5) 柴田清孝: 光の気象学, 朝倉書店 (1999)
- 6) Kimball, M. B. and T. J. Garrett: Constraining cirrus ice crystal size through observation of halos, 12th Conference on Cloud Physics and Radiation, Madison, Wisconsin (2006)
- 7) Atmospheric Optics, <http://www.atoptics.co.uk/>