1ZC-02

スペクトル吸収特性を考慮した氷のレンダリング

井上　智皓†　　戀津　魁‡　　柿本　正憲‡

東京工科大学大学院†　　東京工科大学‡

1. はじめに

自然現象のシミュレーションはコンピュータグラフィックスにおける重要な分野である．本研究ではスペクトル吸収特性を考慮した関与媒質のレンダリングを目指す．関与媒質とは，内部で光の吸収や散乱といった現象が生じる媒質のことである．これには煙や炎，蝋燭，ジュースなど様々なものが含まれるが，本稿では氷に着目する．これまで水の色に着目した研究は多くされているが，氷の色に着目した研究は少ない．様々な氷の性質を踏まえることで，フォトリアルな氷のレンダリングを目指す．

2. 関連研究

大域照明計算はKajiyaによってレンダリング方程式[1]として定式化された．また，Pauly らはこれを関与媒質に対して拡張した[2]．こちらで用いられた形式はボリュームレンダリング方程式と呼ばれる．Frisvadらは，Lorenz-Mie理論を一般化し，様々な物質の粒子を扱えるようにすることで，詳細なパラメータによる関与媒質のレンダリングを可能とした[3]．

3. 氷の光学的性質

水や氷は透明な物質だが，ある程度の厚みを持つと青みがかった色がついて見える．図1は極地の氷山であり，水色の見た目をしていることが確認できる．これは水分子が可視光のうち波長が長い光（赤い光）を吸収しやすいためである．表1は純氷における波長ごとの透過率を示したものである[4]．氷の厚さが 30m を超えると赤の波長の光は残らない．青よりも紫の波長の方が多く透過することも確認できるが，実際に氷が紫の色味を持って見えることは少ない．これは，光源である太陽光のスペクトル分布が青にピークを持つためである．

図1　青く見える氷（実写）
(https://www.youtube.com/watch?v=f7hbWvHKns0)

表1 純氷における波長ごとの光の透過率
（[4]より一部抜粋）

氷の厚さ	波長			
	0.40μm（紫）	0.47μm（青）	0.51μm（緑）	0.71μm（赤）
0.01m	0.999	0.999	0.999	0.994
0.1m	0.999	0.999	0.998	0.941
1m	0.999	0.995	0.980	0.544
10m	0.993	0.949	0.820	0.002
100m	0.928	0.593	0.138	0.000

媒質中を光が進むとき，以下の Beer-Lambert の法則が成り立つ．

$$I = I_0 \exp(-k_e x) \tag{1}$$

Iは媒質表面からの距離xでの光の強度であり，I_0は入射光の強度である．k_eは消散係数であり，媒質における光の散乱と吸収の強さを表す．消散係数は散乱係数k_sと吸収係数k_aの和である．

Rendering of Ice Taking into Account Spectral Absorption Characteristics
†Tomoaki Inoue, ‡Kai Lenz, ‡Masanori Kakimoto
†Tokyo University of Technology Graduate School
‡Tokyo University of Technology

Copyright ©2020 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

表1の結果から，氷の場合は，青や紫に比べて赤の消散係数が大きいということになる．

氷山と異なり，積雪は白く見える．その理由は内部に空気を多く含んでおり，透過率が極めて低く，すべての波長の光を同等に散乱させるミー散乱が発生するためである．

4. 吸収特性を考慮したレンダリング

提案手法は，氷内部では式(1)が成り立つものとし，実測値として表1の詳細版[4]を使用してレンダリングを行う．また，図1のような青い氷山の各種実写映像の観察より，以下の点を前提条件と考える．

- 氷表面は完全拡散面と仮定する
- 氷内部では散乱は起こらないと仮定する
- 氷の透過率低下は吸収によるものとする

このように仮定すると，光線が氷に入射する際には拡散反射のほか，内向きのあらゆる方向に「拡散屈折」し，氷内部では反対側の内面に当たるまで光線は直進する．そして外部に出射する際に再び光線は拡散屈折を行う（図2）．

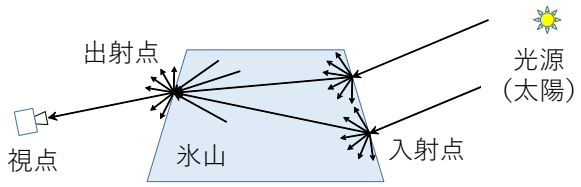

図2　氷のレンダリングにおける光線と拡散屈折

5. レンダリングの実装と結果

図2において視点から逆に光線をたどる経路追跡法を用いて提案手法を実装した．一次光線は波長をランダムに設定し，拡散屈折点では確率的に二次光線の向きを決定するモンテカルロ法を用いる．氷内部を直進し対面に当たった光線は，その長さと波長に応じた透過率の実測値に従って生き残るものとした．

図3はサイズの異なる相似形の氷をレンダリングした結果を示す．カメラからの距離も含めて全体のスケールを変えているため，(a)(b)ともに氷の形状の見かけは同じとなる．立方体の氷の一辺が(a)の 0.1m の場合はすべての色の光が同じくらい透過するため、白い氷になる．一方で，一辺が(b)の 50.0m の氷の場合，赤い光の透過率が小さくなるため，青みがかった結果となる．

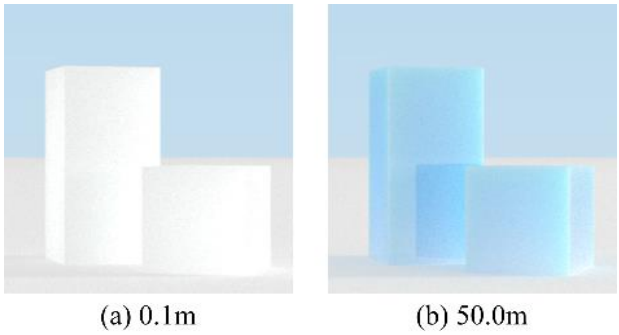

図3　サイズの異なる氷のレンダリング結果．数字は手前の氷の高さを示す．

6. おわりに

本稿では関与媒質としての氷をレンダリングするための手法を提案した．氷分子の性質から媒質内での散乱を無視して吸収の実測値に着目し，スペクトラルレンダリングと拡散屈折によるモデル化を行った．その結果，巨大な氷が青く見える現象を再現した．

今後の課題として，天空光と太陽光のより厳密な特性を考慮するほか，氷山のリアルな形状を導入することが挙げられる．

参考文献

[1] Kajiya, J. T., “The Rendering Equation,” ACM SIGGRAPH, pp.143-150, 1986.

[2] Pauly, M., Kollig, T. and Keller, A., “Metropolis Light Transport for Participating Media,” Proc. of Eurographics Workshop of Rendering Techniques, pp.11-22, 2000.

[3] Frisvad, J. R., Christensen, N. J. and Jensen, H. W., “Computing the Scattering Properties of Participating Media Using Lorenz-Mie Theory,” ACM Trans. on Graphics, Vol.23, No.3(60), 2007.

[4] 亀田貴雄(著), 高橋修平(著),「雪氷学」古今書院, 2017.

Copyright ©2020 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.