

卒業論文

レイトレーシング法による 太陽光シミュレーション

大阪工業大学 情報科学部

学籍番号 Q07-101

御庄 洋行

2011年2月17日

目次

1	序論	3
1.1	レイトレーシング法	3
1.2	本研究の目的	3
1.3	構成	4
2	レイトレーシング法	5
2.1	レイトレーシング (ray tracing) 法とは	5
2.2	レイトレーシング法による視点から見える物体の描画手順	6
2.3	視線と物体の交点位置の計算方法	6
2.4	輝度の計算	8
3	満ち欠けと明るさの月のシミュレーション	9
3.1	等級とは	9
3.2	プログラム上の明るさと等級との比較	10
3.3	視線ベクトルを考慮した明るさと等級との比較	15
3.4	まとめ	19
4	季節ごとの日照時間と日照量の変化	20
4.1	原理	21
4.2	夏至と冬至での一日あたりの照射時間の比較	25
4.3	夏至と冬至での南中高度の比較	26
4.4	夏至と冬至での一日あたりの照射量の比較	27
4.5	月毎での照射量と日照時間の移り変わり	29
4.6	まとめ	33
5	アプリケーションの操作法	34
5.1	月の満ち欠けと明るさ	35
5.2	夏至と冬至での日照量	36
5.3	夏至と冬至での日照時間	37
5.4	夏至での南中高度	38
5.5	月毎の日照量時間と日照量	39

1 序論

1.1 レイトレーシング法

レイトレーシングは 1979 年に 3 次元 CG 画像用レンダリング手法の 1 つとして考案され、ユーザーが 3 次元空間上で視点や対象物、光源を操作するだけでただちに更新された高精細な静止画を描画することができる手法である。

しかし開発当時は単純な形状の透明な物体や鏡面を再現するには効果的であったが、ざらついた質感を持つ物体の表面を表現したり複雑な形状を再現するには当時のコンピュータの処理能力の制約があって適していなかった。その後、表現力を広げるための新たな手法が考案されていき、広義でのレイトレーシング手法は、現在、間接光を再現する大域照明技術の代表的なものとなっている。

20 世紀末から 2000 年代始めまではコンピュータの処理能力が低く、1 フレームの静止画の生成だけで数分～数時間を要した。そのため自動車や家電などの意匠設計、建築などの意匠・照明設計、ハリウッド映画の VFX など比較的ニッチな用途にとどまっていた。しかし最近ではマルチコア型のマイクロプロセッサ、および 1TFLOPS 近い性能を持つ GPU などが登場してきたことで、それまでオフライン生成が主流だったレイトレーシング映像のリアルタイム生成が視野に入ってきている。今後は映画や工業デザイン分野で人手を介した作業がすべてを単純なレイトレーシング処理に集約したり、個人所有の PC 上で映画や工業デザイン分野でのリアルな映像を制作できると言われている。

1.2 本研究の目的

本研究では見かけの天体現象を「光線」を軸に表示するシミュレーションをレイトレーシング法を用いて行った。開発言語には C++ を利用した。例として地球から見える月の満ち欠けを視覚的に表現したり、地球にふりそそぐ太陽光の強弱を計算する。

以下二つの研究を行った。

1. 月の満ち欠けによる明るさの変化

月の満ち欠けは太陽光が月を照らし、地球がその面や向きを変えて観測する事で発生する。月の面を球体である事を仮定しても、太陽からの照射面との角度差から、表面上の各点での輝度が異なる筈である。また、地球から月を見込む各点の角度差も輝度に影響されるはずである。

本研究ではレイトレーシング法により、月の表面の各点に当たる太陽光とその反射を考えることにより満月、半月、三日月等のそれぞれの月の満ち欠けと明るさの関係を検証する。

2. 季節による太陽光の日照時間、日照量の変化

太陽光による日照量や日照時間は緯度毎に変化していく。地球の面を球体として、緯度ごとに太陽からの照射面との角度差を総計することで求めることができる筈である。

本研究ではレイトレーシング法により、地球の表面の各点に当たる太陽光と法線ベクトルを考えることにより、緯度ごとの日照時間、日照量の違い、またある緯度上での月々の日照時間、日照量の変化を検証していく。

1.3 構成

本研究は二章でレイトレーシングの基本原理や計算方法を述べていき、三章では月の満ち欠けを検証していく。四章では緯度毎に太陽光による日照量や日照時間の変動を検証していく。五章では作成したアプリケーションの操作法を解説する。

2 レイトレーシング法

2.1 レイトレーシング (ray tracing) 法とは

レイトレーシング法は三次元空間上の視点から視線方向にスクリーン（画面）を配置し、このスクリーン上の2次元での (x, y) の位置へ視点から光線を飛ばしていき、最終的に2次元スクリーンでの1ピクセル（画素）ごとの色計算を $x \cdot y$ 分繰り返す方法である。レイトレーシングは視点からスクリーン（画面）へ視線を発射する事によってスクリーン上のイメージ画像を計算するレンダリング手法である。2次元でのスクリーン上にある1ピクセル（画素） (x, y) の位置へ視点から視線を飛ばす。視線が物体に当たった場合、その表面に対する法線ベクトルと光源から飛んでくる光線から表面の色を計算する。これがスクリーンに写る色として、全てのピクセルで計算を行う事により、最終的に視点から見えるイメージ画像を収集するのがレイトレーシング法である。

図1では光線が視点（点 a ）からスクリーン上の画素を通して物体（点 b ）へ伸び、反射して光源（点 c ）へ向かっている。

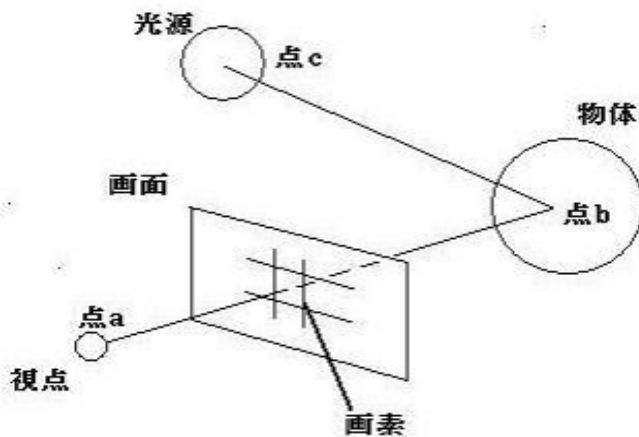


図1 光源から視点まで光線の軌跡

2.2 レイトレーシング法による視点から見える物体の描画手順

以下ではレイトレーシング法による物体の描画方法について説明する。
本研究では地球から見て太陽からの光が月にどのように反射して見えるかと緯度毎の日照時間や日照量がどのような変化があるかを検証する。そのためプログラム上では透過を使わず反射のみを使用する。よって透過についての説明は省くことにする。

2.3 視線と物体の交点位置の計算方法

図2は視点(点 a)から物体(点 b)を見ている様子を表したものである。なお本研究での物体は月の形状であるためここから物体の形状は球体とする。
視点から球体へ向うベクトルを視点ベクトル \vec{V} 、視点から球体の中心点(点 c)へ向かうベクトルを軸ベクトル \vec{F} とする。

視線と物体の交差位置を求めるには次のように考える。交差点の位置が視点ベクトル \vec{V} の単位ベクトル

$$\vec{B} = \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \quad (1)$$

の t 倍であるとすれば、視点から交点までの位置ベクトルは

$$\vec{V} = t\vec{B} \quad (2)$$

で表し、変数 t を求める事で視点ベクトルの大きさを求める。

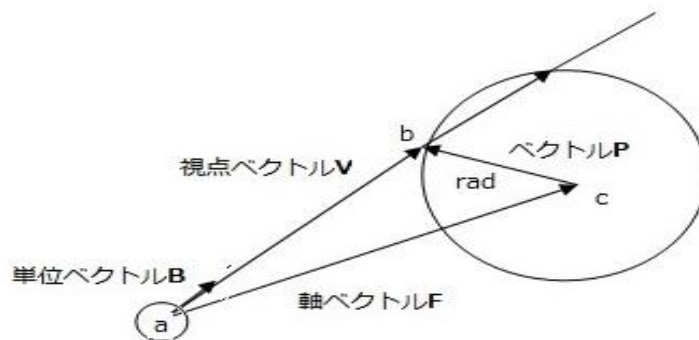


図2 交差点の計算

まず最初に球体の中心点から交差位置へ向かうベクトル \vec{P} を求める。このベクトルは
 図中の視点ベクトル \vec{V} と軸ベクトル \vec{F} から

$$\vec{P} = \vec{V} - \vec{F} \quad (3)$$

で求める事が出来る。このベクトル \vec{P} の内積は、この球体の半径 r の 2 乗に等しいの
 で、(3) 式から

$$\begin{aligned} r^2 &= (\vec{V} - \vec{F}, \vec{V} - \vec{F}) \\ &= (t\vec{B} - \vec{F}, t\vec{B} - \vec{F}) \end{aligned} \quad (4)$$

この式を展開して、

$$(\vec{B}, \vec{B})t^2 - 2t(\vec{B}, \vec{F}) + (\vec{F}, \vec{F}) - r^2 = 0 \quad (5)$$

単位ベクトル \vec{B} の大きさは 1 なので

$$(\vec{B}, \vec{B}) = |\vec{B}| \cdot |\vec{B}| = 1 \quad (6)$$

よって

$$t^2 - 2t(\vec{B}, \vec{F}) + (\vec{F}, \vec{F}) - r^2 = 0 \quad (7)$$

これを t についての 2 次方程式と見ると 2 次方程式の解の公式から

$$t = -(\vec{B}, \vec{F}) \pm \sqrt{(\vec{B}, \vec{F})^2 - (\vec{F}, \vec{F}) - r^2} \quad (8)$$

ここで t が実数解を持てば視線が球と交差するのでそのための条件は

$$D \geq 0 \quad (9)$$

である。実数解 t が二つある場合、球体のどこか 2 点で視線が交差する事を意味する。
 この時視点の前方にあってかつ小さい方が求める値となる。このようにして (2) により
 物体の交点までのベクトル \vec{V} が定まることになる。

2.4 輝度の計算

光が物体に照らされた時、物体の表面には明暗ができる。この明暗（物体の輝度）を求める方法はいくつかあるがその中で今回は比較的計算の簡単な Lambert の余弦則を使う。Lambert の余弦則とは光ベクトルが球体の一点に当たったとき、その光ベクトルと交点位置のポリゴンから垂直方向に出ている法線ベクトル視点からの光線が物体と交わると、その交点位置と単位法線ベクトル \vec{V} （交点位置のポリゴンから垂直に出ている単位ベクトル）が判明する。なす角を θ とすると、 \vec{V} と \vec{N} の内積から

$$(\vec{N}, \vec{V}) = |\vec{N}| |\vec{V}| \cos\theta = \cos\theta \quad (10)$$

となり、したがってこの内積の値は $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ で $0.0 \sim 1.0$ となる。照射面にとって、光ベクトルが垂直に当たる成分は $\vec{V} \cos\theta$ であるので、 $0 \leq \cos\theta \leq 1$ を用いて輝度が表現できることになる。本研究では明暗を強調して表すためプログラム上で RGB 値（765 階調）を掛けて明るさを求めた。最大輝度を 765 とすれば、例えば図 3 の右の図で $\cos\theta$ が 0.5 なら $\cos\theta \cdot 765 = 382$ となり最大輝度の半分ほどの明るさとなる。



図 3 球体にあたる光ベクトルと法線ベクトル

3 満ち欠けと明るさの月のシミュレーション

前章での視点、球体、光源をそれぞれ地球、月、太陽に置き換えて満月、半月、三日月等の月の満ち欠けと明るさをシミュレートする。明るさはスクリーン上の画素ごとに球体の明るさを求め、その合計値と定義する。明るさの比較は満月を基準として各月と比較し、どのくらい月の明るさに差が出るのかを検証する。また等級による各月の明るさと比較し、プログラム上の各月の明るさをどれくらい正確に表す事が出来ているかを検証する。

3.1 等級とは

星の等級とは、天体を地上で観測した時の見かけの明るさを表した単位である。その星自体の明るさを表す絶対等級と区別して、実視等級ともいう。等級は数値が1. 減るごとに約2.5倍明るくなる。つまり一等級と六等級では等級差は五等なので 2.5^5 倍(約100倍)の明るさの差がある。

表1には各月の実視等級が記載されている。その下にある数値は満月と他の形状の月の明るさの差を表している。

	満月			半月		三日月	
太陽と月との角距離	180°	150°	120°	90°	60°	37°	30°
実視等級	-12.7	-11.8	-11.0	-9.9	-8.7	-7.0	-6.8
満月との明るさの差(倍)	1	2.28	4.75	13.01	39.06	185.46	222.76

表1 月の形状による等級 [1]

3.2 プログラム上の明るさと等級との比較

シミュレートによる月の明るさと星の等級を比較し、明るさがどの程度正確に表すことができるのかを検証した。

本実験では満月、半月、三日月の明るさの比を計算し、実際の等級と同じ倍率の比になるかを検証する。

3.2.1 プログラムの概要

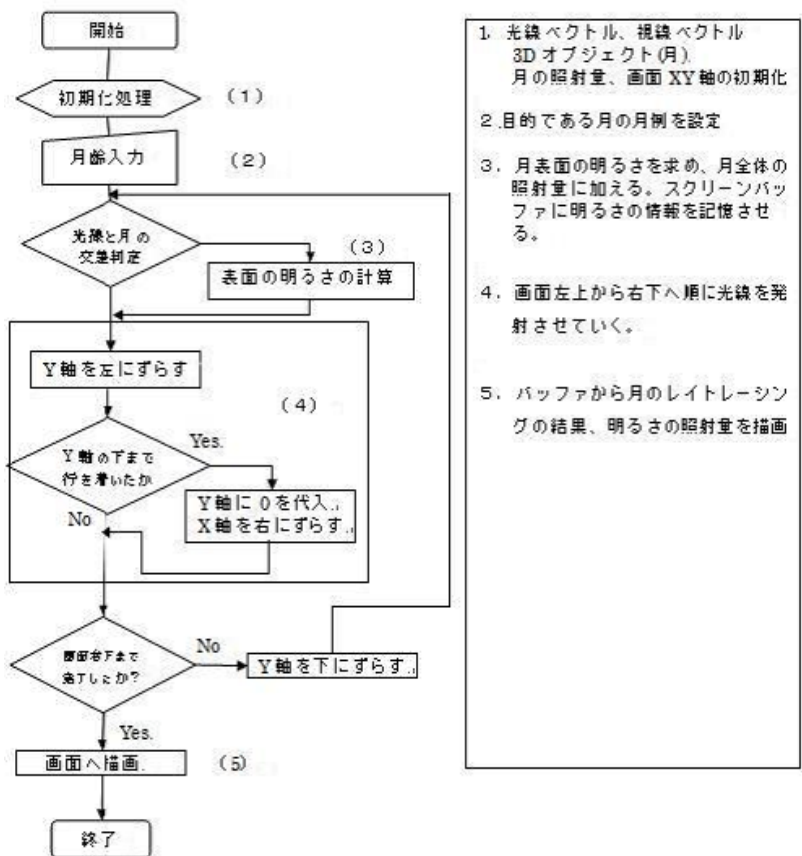
本研究では作成したプログラムは大きく分けて二つあり、一つ目が満ち欠けと明るさのシミュレーションでもうひとつは季節毎の日照時間の変化についてである。ここでは前者について説明を行い、後者は 4.1 章から説明を行う。

まず月モデルとして半径 100 の 3 D オブジェクトを使用する。レイトレーシングの画面サイズは縦横 200 ドットで合計 40000 の光線を画素毎に月モデルへ照射し、月表面の位置ごとの明るさを (10) 式で求める。画素数が縦横 200 なのはこれ以上数を増やしても精度自体は変わらないためである。満月や半月、三日月など各月の視点に届く照射量は全ての光線で求めた明るさの合計と仮定し、満月を照射量を 100 % として、各月の照射量の比較を行った。

レイトレーシングの処理を高速化するため、描画情報を一度スクリーンバッファに記憶しておき、処理終了時にまとめて画面に反映させるようにした。これにより時間の掛かるスクリーン上の描画処理を一度にまとめることができ、また地球から見える所だけを描画することで結果処理時間を大幅に削減できた。具体的には高速化を行わない場合、レイトレーシング完了まで 9 分程かかるが、これを 5 秒までに抑えることができた。

以下に月照射量を測定するプログラムのフローチャートを記載する。

フローチャートでの光線と月との交差判定には (8) 式を使う。



1. 光線ベクトル、視線ベクトル 3D オブジェクト(月) 月の照射量、画面 XY 軸の初期化
2. 目的である月の月例を設定
3. 月表面の明るさを求め、月全体の照射量に加える。スクリーンバッファに明るさの情報を記憶させる。
4. 画面左上から右下へ順に光線を発射させていく。
5. バッファから月のレイトレーシングの結果、明るさの照射量を描画

図 4 月の満ち欠けと明るさを計測するフローチャート

3.2.2 満月モデルのシミュレート結果

図5は満月のシミュレート結果である。図の右側は惑星の配置図で太陽、地球、月の順番に一直線に並んでいる。太陽からの光は地球を通り越し月に反射して地球に帰ってくる。月に反射した光はほぼ全て地球に帰って来るので円状の綺麗な満月となる。

光線がある月の一点を照らす時の明るさ L の計算は光線が月表面に当たるときに(10)式を使う。それにプログラム上でのRGB値(765階調)を掛けて

$$L = (N, V) \cdot 765 \quad (11)$$

で求める。これを全ての画素で行い、その合計値を月全体の明るさと定義する。図の下にあるグラフは明るさの明暗を示したもので一点の明るさ L が最大値に近いほど明るさが大きく(最大100%)、低いほど暗くなっていく(0%)。このグラフから月全体での明暗の分布を視覚的に確認できる。

月の表面の明るさは光ベクトルが中心点に近づくほど明るくなる。この図では光ベクトルが真正面から当たるため円の中心が最も明るく、円の外側にいく程徐々に暗くなっている事が分かる。

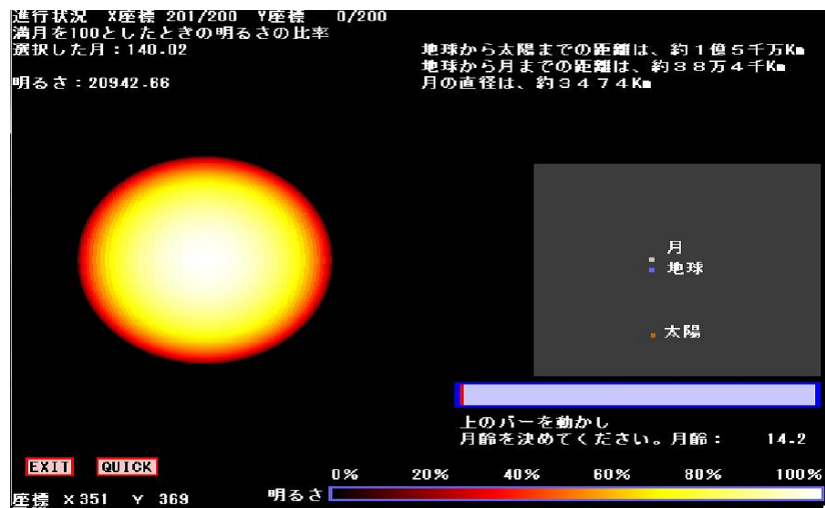


図5 満月のモデル

3.2.3 半月モデルのシミュレート結果

図6は半月のシミュレート結果である。惑星の配置図では月を中心に下に地球、左側に太陽が配置されている。太陽からの光は月に反射して地球に帰ってくるが月に反射した光の半分は地球から見えないので半円状の月となる。

月の表面の明るさは光ベクトルが月の中心かつ太陽に近い場所ほど明るくなる。この図では光ベクトルが真横から当たるため月の左端が最も明るく、円の右側にいく程徐々に暗くなっていき、半分を超えたところで明るさはほとんど見えない事が分かる。



図6 半月のモデル

3.2.4 三日月モデルのシミュレート結果

図7は三日月のシミュレート結果である。惑星の配置図では月を中心に下に地球があり、上の太陽は12時の方向から反時計回りに約37度移動して配置されている。これは月齢が約29.5日なので三日月の位置 $(360/29.5) \times 3 = 37$ となり37度とした。

太陽は月のほぼ後ろに位置しているため、反射して地球に帰ってくる光は少ない。そのため月の形状は半月よりも細く三日月の形になる。

三日月は満月と比べ全体的に暗く、月の右側かつ月のふちに沿って明るさが増している、そして月の中心に近づくにつれ徐々に暗くなっている事が分かる。



図7 三日月のモデル

3.3 視線ベクトルを考慮した明るさと等級との比較

ここでは先ほどのシミュレーションに視点ベクトルを加えて計算し、月の表面からの反射光を考えた場合、明るさがどのように変化するか、また等級での比と比較していく。これは地球から照らされた月を見込む角度を考慮して、地球に到達する月からの反射光を求めるためである。

計算方法は式(11)に視点ベクトル S と法線ベクトル V の内積の積を加えた

$$(N, V) \cdot (N, S) \quad (12)$$

によって求める。

プログラム上では前回と同様、RGB 値 (765 階調) を掛けて明るさを求める。

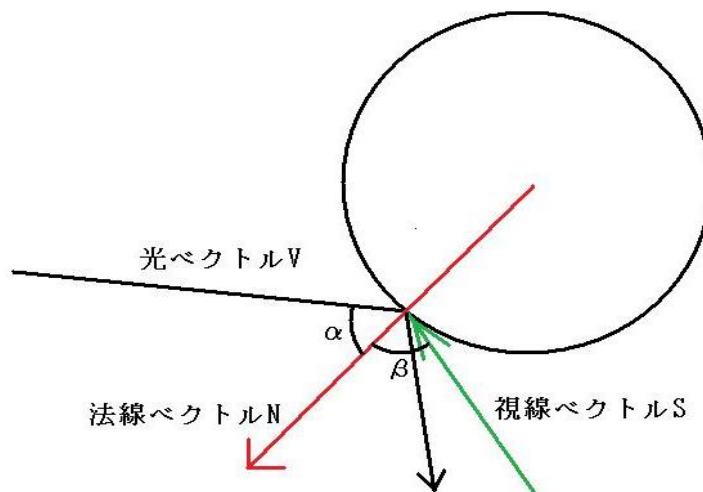


図8 視線ベクトルを考慮した場合の法線、視線ベクトルの関係

3.3.1 満月モデルのシミュレート結果

図9は図5に比べると月の輪郭の輝度が全体的に低くなっていることがわかる。また明るさも7割程まで下がっている。

中心部を見比べると明るさはほとんど変わらない。これは視線ベクトルと法線ベクトルがほぼ平行になっているためだと思われる。



図9 視線ベクトルを考慮した満月のモデル

3.3.2 半月モデルのシミュレート結果

図 6 は太陽に近い程、輝度が高くなっているが図 10 では月の中心からやや右側が一番輝度が高くなっている。

明るさも半分ほどになっている事がわかる。しかし等級と比較した場合、満月の明るさは半月の 11 倍に収まっていなければならないがこの明るさではせいぜい 4 倍程度になっている。

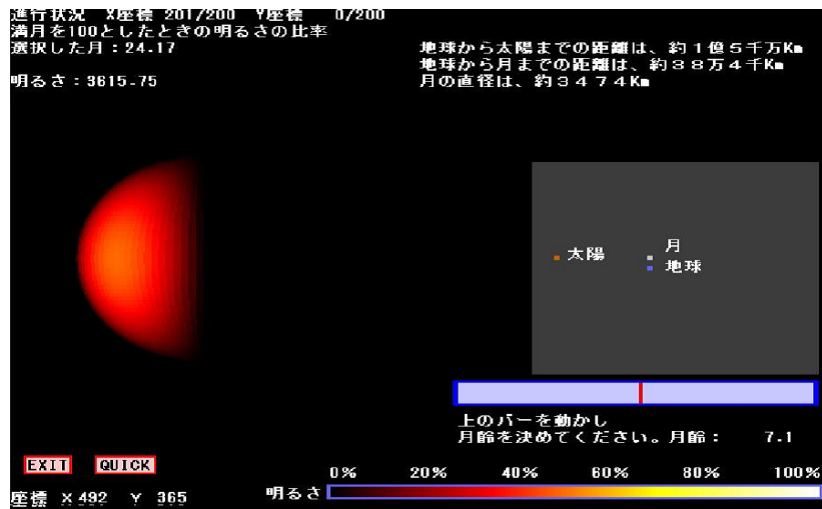


図 10 視線ベクトルを考慮した半月のモデル

3.3.3 三日月モデルのシミュレート結果

図 11 はと図 7 はを見比べると視線ベクトル加えたことにより明るさは四分の一程になった。三日月の明るさは視点から見てほとんど輪郭部の明るさのため、全体的に暗くなっていることが分かる。三つの月の明るさの中では一番変化が大きい結果となった。

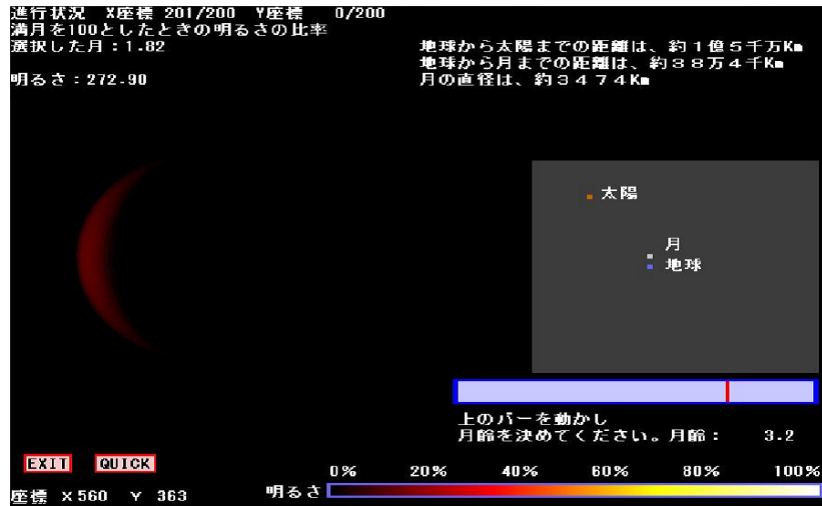


図 11 視線ベクトルを考慮した三日月のモデル

3.4 まとめ

今回の検証では月の明るさは等級に比べて半月、三日月とも実視等級よりもかなり明るい結果となった。

図 12 は視点ベクトルを加えレイトレーシングを行った月の明るさのグラフと実視等級での明るさを表したグラフである。下の線が実視等級だが満月から半月への明るさの変動があまり一致していないことがわかる。今回のレイトレーシングでは太陽光自身は減衰しないものとしている。そのため見かけの明るさよりも明るくなったのではないかと考えた。天体の見かけの明るさは途中にある星間物質による光の吸収などの影響も受けている。このことからレイトレーシングでの月の明るさと実視等級では差が開いてしまったのではないかと考えた。

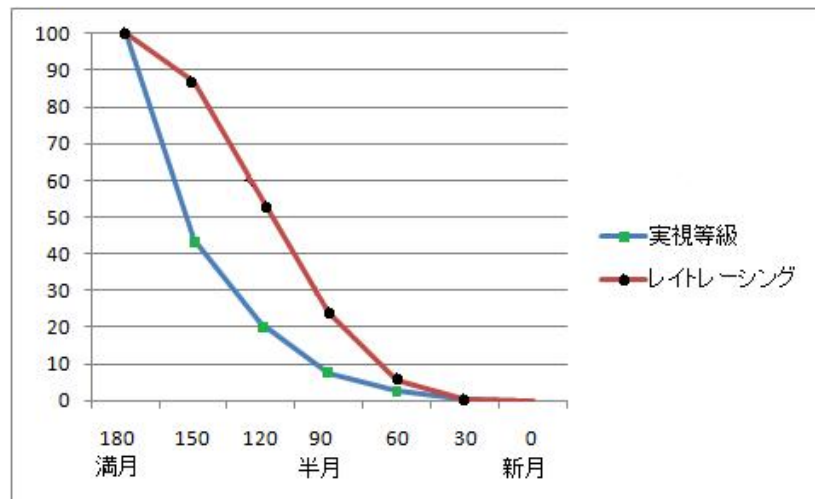


図 12 レイトレーシングによる月の明るさと実視等級

4 季節ごとの日照時間と日照量の変化

本章では、月の満ち欠けに用いたプログラムを太陽・地球に適用し、太陽光の照射量と照射時間を季節ごとに計算した結果を述べる。

特に冬至と夏至での南中高度、日照量、日照時間を緯度毎にレイトレーシングを用いて求める。また冬至と夏至の他に月毎の変化も比較していく。

冬至とは、定気法で太陽黄経が 270 度のときで 12 月 22 日ごろを指し、夏至は、定気法で太陽黄経が 90 度のときで 6 月 21 日ごろを指す。恒気法では冬至から 1/2 年（約 182.62 日）後で 6 月 22 日ごろとされている。

定気法とは地球が太陽の周囲を回る時の 360 度の角度を 24 等分して二十四節気の日時を求める方法である。恒気法では 1 年の時間を 24 等分して二十四節気の日時を求める。二十四節気とは太陰太陽暦で月の満ち欠けより一ヶ月を決めているが季節の変化を表す事ができないため、月の満ち欠けとは別に、季節を表す指標として用いられたものである。

4.1 原理

図 13 は、夏至と冬至でそれぞれ太陽光を地球へ照射している。夏至の場合太陽光を図右から地球を照らし、冬至の場合左から照らしていると仮定し、二つの照射量、照射時間、南中高度を計測し比較した。

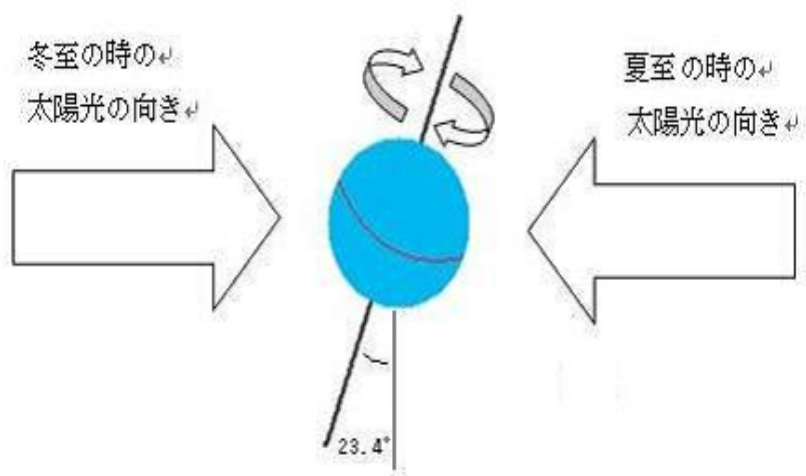


図 13 夏至と冬至での太陽光の当たる方向

4.1.1 計測方法

本研究では照射量、照射時間、南中高度の三つの計測を緯度毎に南緯 90 度から北緯 90 度まで 5 度ずつ計測していくことにした。例えば緯度 0 度の照射量を測定する場合、その緯度上で経度を 5 度ずつ 360 度回転させその合計値を緯度 0 度での一日の照射量として仮定する。これを夏至と冬至それぞれで計測し、同じ緯度でどのような違いがあるかを検証した。

図 14 は三つの計測でのフローチャートである。以下に三つの計算方法を述べる

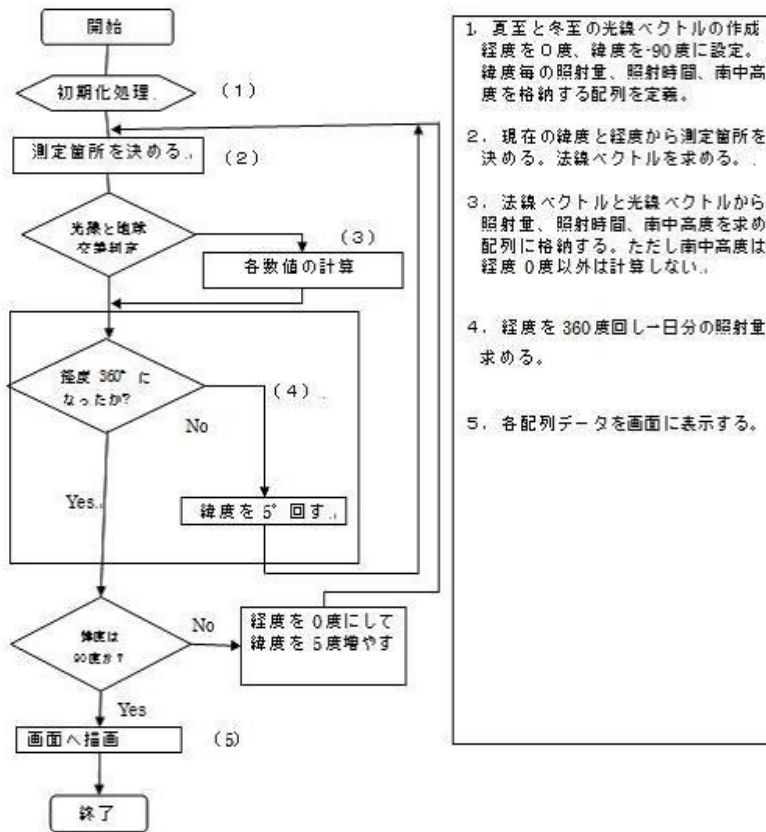


図 14 照射量、照射時間、南中高度のフローチャート

4.1.2 照射時間の計算

1日の照射時間は次のように計算した。一方向から太陽光と測定する緯度を決め、経度を360度回転する間に緯度と経度の交差点へ72本の光を地球に当てる。そのうちの真っ直ぐに地表に当たる光の本数を計測すれば良い。本研究では経度を5度ずつ測定するので一日あたり72本の光線を発射して地球に当たる光の本数を計測した。一日の照射時間 T の算出法は光線が当たった回数 H として、経度を360度回転したとき

$$T = H/72 \cdot 24 \quad (13)$$

によって算出する。

4.1.3 南中高度の計算

夏至での南中高度は経度0度での法線ベクトル \vec{N} と光線ベクトル \vec{V} から

$$\theta = \arccos \frac{(\vec{N}, \vec{V})}{\|\vec{N}\| \|\vec{V}\|} \quad (14)$$

$$\theta' = 180/\pi \cdot \theta \quad (15)$$

によって角度 θ' を算出した。

4.1.4 照射量の計算

太陽光が一点を照らす照射量は照射面積によって算出する。照射面積は測定箇所の法線と太陽光とのなす角の大きさに異なる。例として図 15 では平面に対し違う角度で光を当てている。左のように法線に対し平行に光を当てた場合の照射面積を 1 とすると左のように 45 度の角度から当てた場合 $(1 + X)$ となり照射面が大きくなる。つまり同じ明るさの太陽光を照射した場合、太陽光と法線のなす角が大きいくほど照射面積が大きくなり結果照射量が減少する。

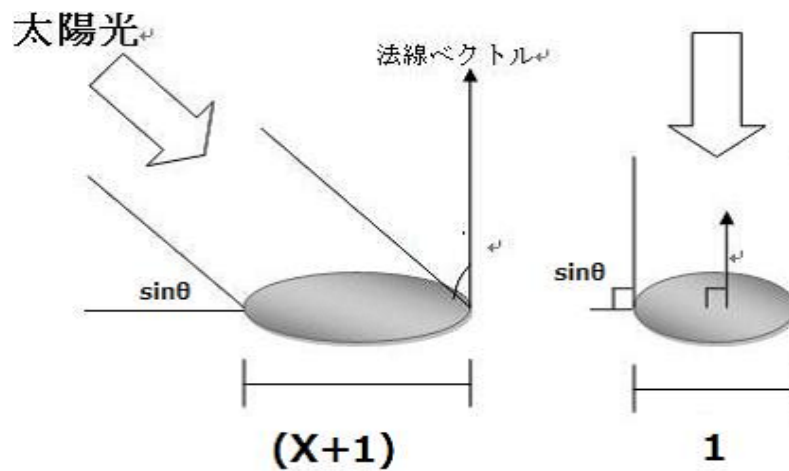


図 15 太陽光の角度による照射面の違い

これを踏まえて計算するために次の式

$$x = \frac{1}{\sin\theta} \quad (16)$$

によって x の値を導き、照射面積として x^2 に反比例するとして

$$L\sin^2\theta = \frac{L}{\left(\frac{1}{\sin\theta}\right)^2} \quad (17)$$

により照射量を求めた。

4.2 夏至と冬至での一日あたりの照射時間の比較

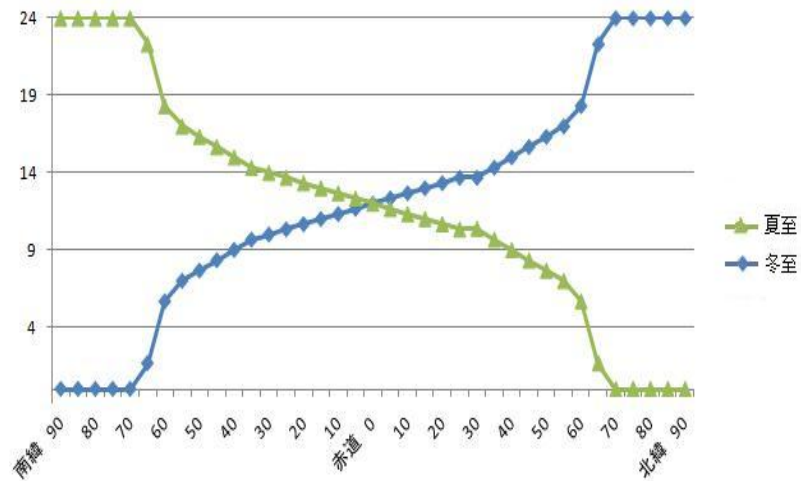


図 16 照射時間

図 16 は緯度 0° から北極へ向かって日照時間の違いを表したグラフである。緯度は高くなるにつれ昼と夜の時間の差が大きくなっていくことがわかる。

特に 60° から 70° では時間変化が大きくなっている。白夜が見られる緯度 66.6° 以上では夏至での日照時間が一日中続いていることもわかる。

4.3 夏至と冬至での南中高度の比較

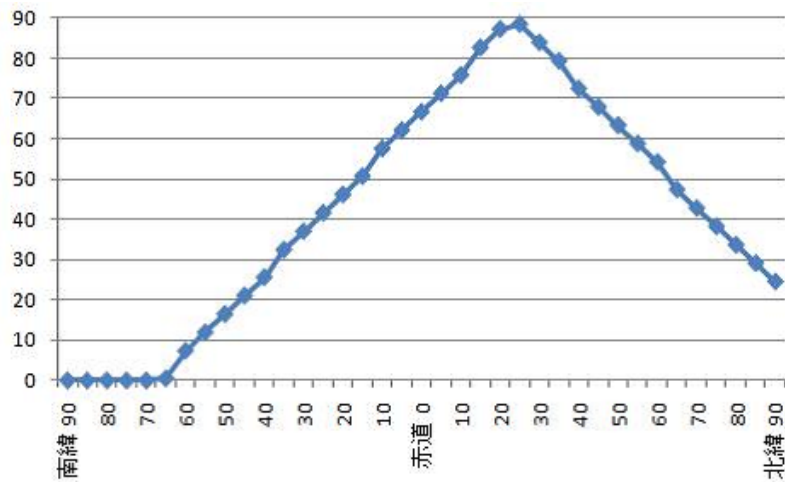


図 17 南中高度

図 17 は各緯度毎の南中高度を表している。

図では 23~24 度の辺りが最も高い位置に日が昇っていることがわかる。これは地球の地軸は、公転面の法線に対して 23.4 度傾いているので地上から太陽を見るを真上に見えるためである。

全体的に見ると最も高い位置ある 23.4 度から緯度が離れる程に太陽の高さも下がってきている。北緯 90 度では 23.4 度となった。また赤道での南中高度は 66.6 度という結果になった。

4.4 夏至と冬至での一日あたりの照射量の比較

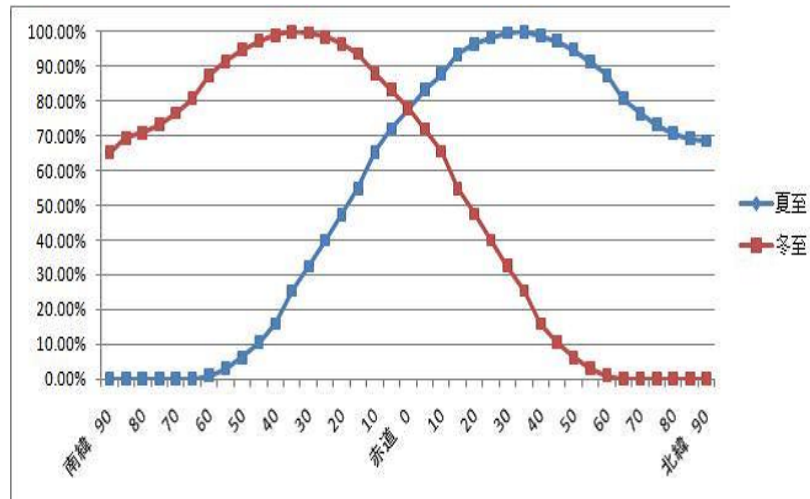


図 18 冬至と夏至での照射量の比較

図 18 は冬至と夏至での照射量の違いを緯度毎に表したグラフである。グラフの中心を緯度 0° の赤道として、左端は南緯 90° 右端は北緯 90° となっている。このグラフでは照射量が最も多い南緯 30° と北緯 30° を 100 % として、各緯度の照射量を比較している。

全体的に照射量は緩やかに増減しており、夏至では北緯 30 度から 35 度が最も照射量が多い。本来緯度が 23.4 度の時、南中高度が 90 度になるため、最も照射量が多くなると思われたが、一日辺りの総量から見ると北緯 23.4 度付近より若干ずれた緯度ほうが多い結果となった。

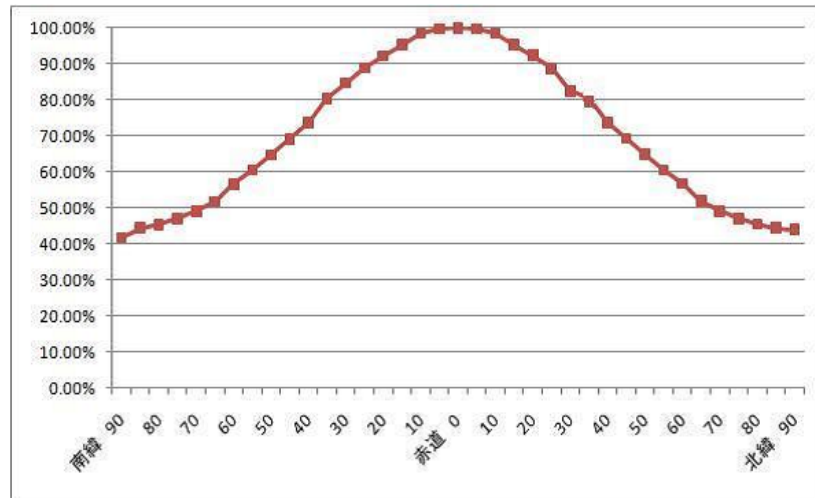


図 19 夏至と冬至の平均照射量の比較

図 19 は夏至と冬至の平均照射量の総量の違いを緯度毎に表したグラフである。ここでは最も多い緯度 0°での総量を 100 %として各緯度と比較していく。グラフでは赤道が最も照射量が多いことがわかる。一般的に地軸が 23.4°傾いているのでその近辺が最も照射量が多くなると思われた。しかし総量的には年間での総量が平均的に最も高い赤道が多くなる結果となった。

4.5 月毎での照射量と日照時間の移り変わり

本研究では夏至を6月、冬至を12月として、東京（緯度 35° ）、ロシア（緯度 67° ）のそれぞれで照射量と日照時間の移り変わりを月毎にグラフに表す。

4.5.1 東京での照射時間と日照量の移り変わり

図 20 は、毎月の東京での日照時間のグラフである。

グラフから最も日照時間が長くなる夏至では14時間となり、逆に最も短くなる冬至では9時間半程になっている。

夏至と冬至では4時間半の差が出ており、季節とともに緩やかに時間が変化している。

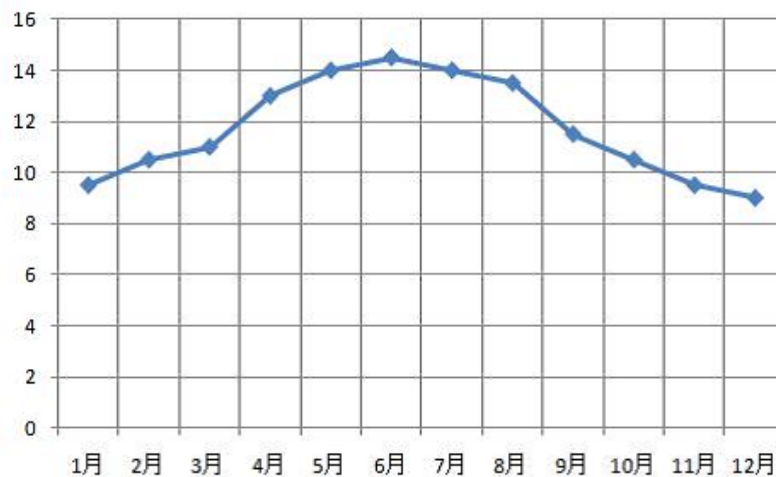


図 20 日本での年間での照射時間

図 21 は、毎月の東京での日照時間のグラフである。このグラフでは夏至の最も高い照射量を 100 %としている。

冬至と夏至では照射量に約 2 倍の差があることがわかる。6 月は夏至のため照射量が最も多いがこの時期は梅雨などの気象により太陽が雲に隠れている事が多い。そのため 6 月より 7 月 8 月の方が日差しが強く感じると考えられる。

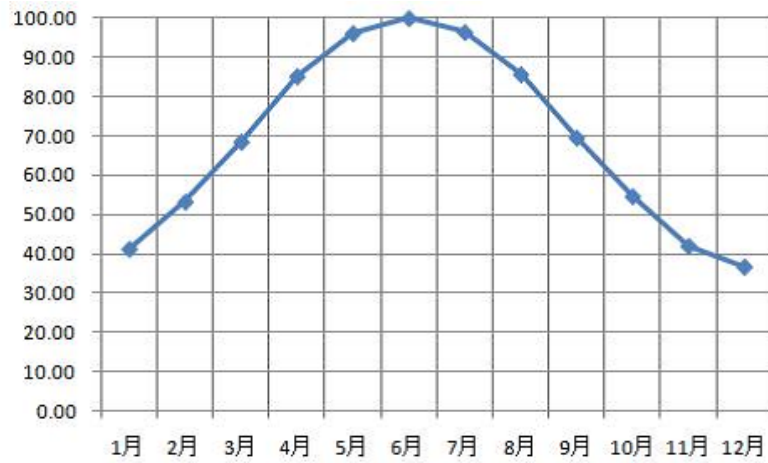


図 21 東京での年間での日照量

4.5.2 ロシアでの照射量と日照時間の移り変わり

図 22 は、白夜を観測できるロシア、ベルホヤンスク（北緯 67.3 度）での毎月の日照時間のグラフである。

白夜は緯度 66.7 度前後とされており、グラフを見たとおりの夏至である 6 月では一日中、太陽が出ている。逆に 12 月では 1 日中、太陽が出ていないことがわかる。また東京と比べて、一年間での日照時間の変動がとても激しいことが見て取れる。

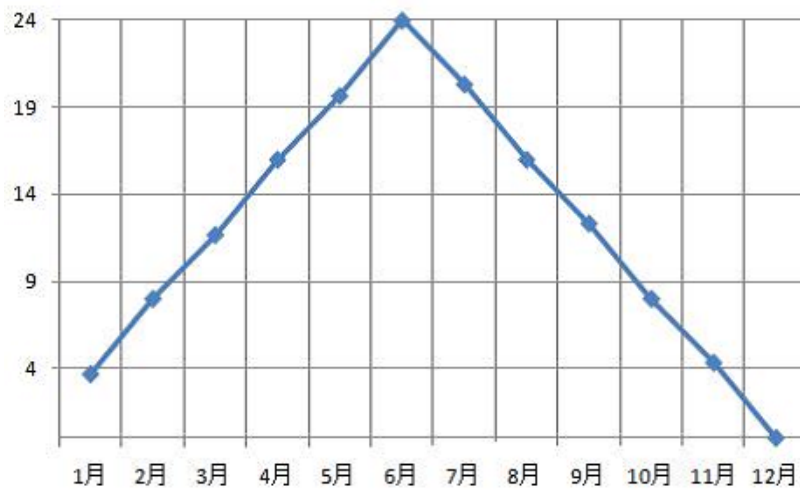


図 22 ロシアでの年間での日照時間

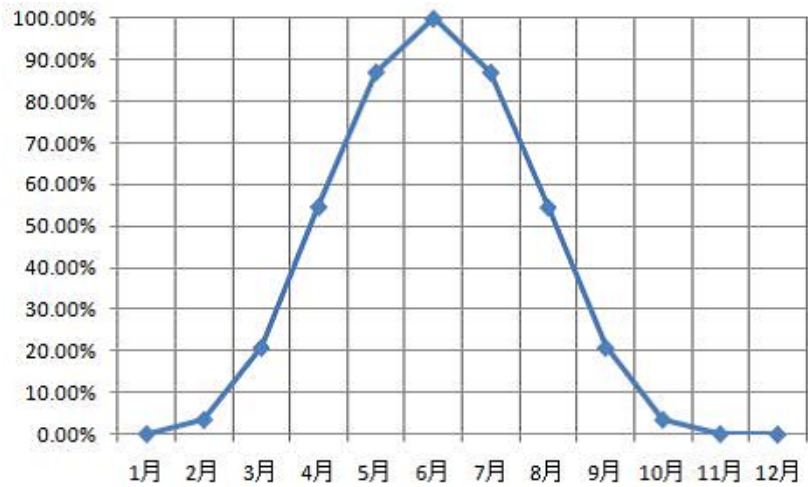


図 23 ロシアでの年間での日照量

図 23 は、ロシアのベルホヤンスクでの毎月の日照時間のグラフである。日照量も同じく年間での変動率が激しい。夏至である 6 月が最も高い値となっていて、11 月から 2 までは 6 月と比べて 10 % 程の日照量しかない。このグラフから分かるように夏至を中心に日照量が多くなる期間は短く、冬至付近のようにほぼ日照量がない期間が長いのがわかる

4.6 まとめ

日照量や日照時間は緯度によって大きく変動している。特に白夜が観測できる緯度 66.6° 付近からの日照時間の変動が大きい。また日照量では地軸である 23.4 度付近が最も多くなると思われたが、一日辺りの日射量では緯度 30 度から 35 度までが最も多く、年間での平均（夏至と冬至の平均値）では赤道付近が最も大きい割合という結果になった。

5 アプリケーションの操作法

ここから本研究で作成したアプリの操作法を解説する。

図 24 はアプリを起動したときの画面であり、操作自体はすべてマウスで行う。画面の使いたい項目にカーソルをあわせ、クリックすることでそれぞれの画面へ移行する。このアプリには大きく 5 つのモードがあり順に説明していく

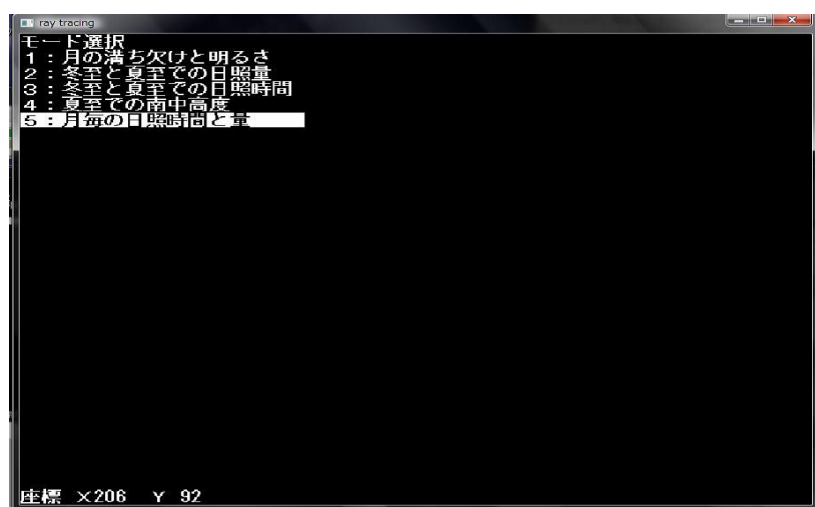


図 24 モード画面

5.1 月の満ち欠けと明るさ

図 25 はモード「1 . 月の満ち欠けと明るさ」を選んだ時の画面である。これはレイトレーシングによる月の満ち欠けを描画し視覚的に月全体の明るさを観察することができる。まず画面の右下に青枠の白いバーをマウスで操作し、月齢を設定する。この時、図右の太陽、地球、月の分布図が月齢に連動して配置が自動的に変わるので、ある月齢がどのような配置になるのかを簡単に確認できる。月を決めると画面左に月齢に合わせた月の描画を行う。レイトレーシングの描画デモは時間がかかるため画面左下に【QUICK】ボタンを配置した。このボタンをクリックすると高速描画を行い5秒ほどでレイトレーシング完了することができる。

モード画面に戻るには【EXIT】をクリックする。



図 25 月の満ち欠けと明るさでの画面

5.2 夏至と冬至での日照量

図 26 はモード「2. 夏至と冬至での日照量」を選んだ時の画面である。これは緯度毎に一日の日照量をグラフ化、数値として表にしたものである。画面上は南緯 90 度から北緯 90 度までの照射量の割合である。それぞれ夏至、冬至、平均と書いてあるが冬至と夏至はそれぞれの緯度毎の日照量を求め、そのなかで最も多い数値を 100 %として他の緯度での日照量と比較している。平均は夏至と冬至の日照量の平均を表している。

画面上は夏至と冬至時のグラフを表している。画面上では緯度 10 度ずつ表示しているが【SIMPLE】ボタンをクリックするごとに 5 度ずつ表示や平均の表示に切り替えることができる。

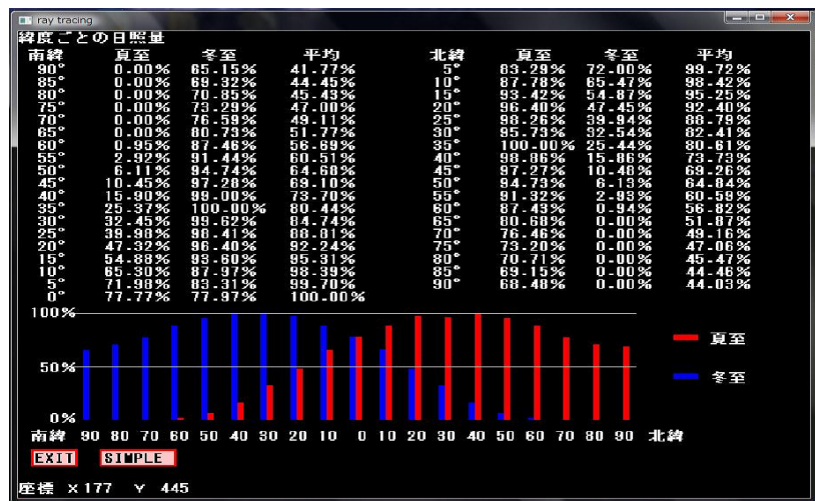


図 26 夏至と冬至での日照量での画面

5.3 夏至と冬至での日照時間

図 27 はモード「3. 夏至と冬至での日照時間」を選んだ時の画面である。これは緯度毎に一日の日照時間をグラフ化、数値として表にしたものである。日照量モードと同じく画面上は南緯 90 度から北緯 90 度までの日照時間を表示しており、緯度毎での日照時間を比較できる。

画面下は夏至と冬至時のグラフを表している。画面下では緯度 10 度ずつ表示しているが【SIMPLE】ボタンをクリックすることにより 5 度ずつ表示に切り替えることができる。

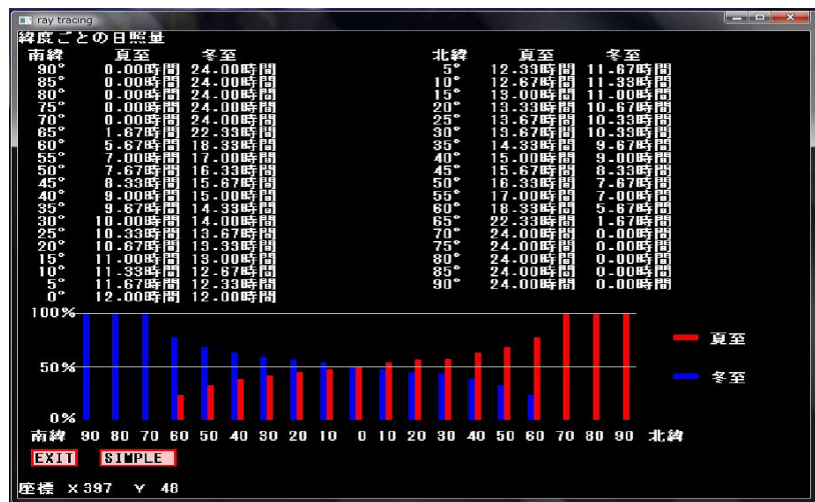


図 27 夏至と冬至での日照時間の画面

5.4 夏至での南中高度

図 28 はモード「4 . 夏至での南中高度」を選んだ時の画面である。これは緯度毎に日照量モードと同じく画面上は南緯 90 度から北緯 90 度までの日照時間を表示しており、緯度毎での日照時間を比較できる。

画面下は夏至時のグラフを表している。

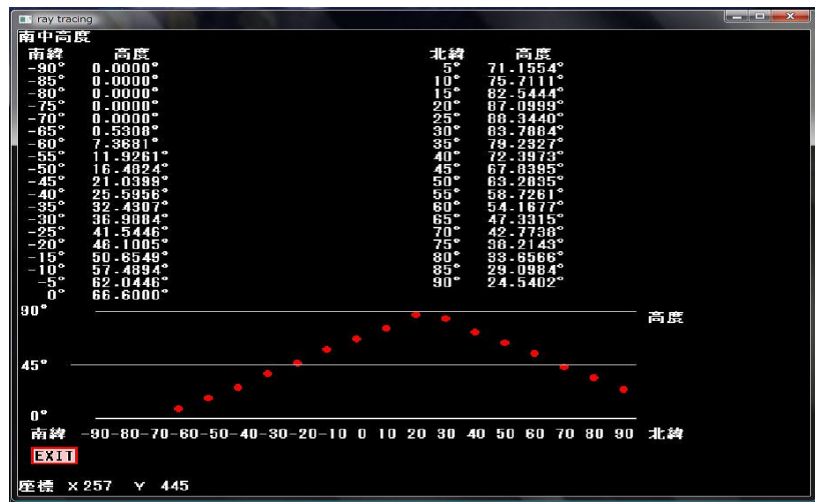


図 28 夏至での南中高度での画面

5.5 月毎の日照量時間と日照量

図 29 はモード「5. 月毎の日照量時間と日照量」を選んだ時の画面である。これは緯度毎に年間での照射量の変化を確認することができる機能である。画面上にある地球の下に数字で書かれたボタンがあり、これを押すことで自分の知りたい緯度での年間照射量と照射時間を知ることができる。地球に掛かっている黄色い線は現在選択している緯度上の経度である。画面左下のグラフは赤のグラフが年間で最も高い照射量を 100 %としたときのグラフで、青は赤道上での月毎の照射量を 100 %として比較を行なっている。例えば図 29 の 6 月での照射量を見ると赤道より 23.59 %高い数値になっている。

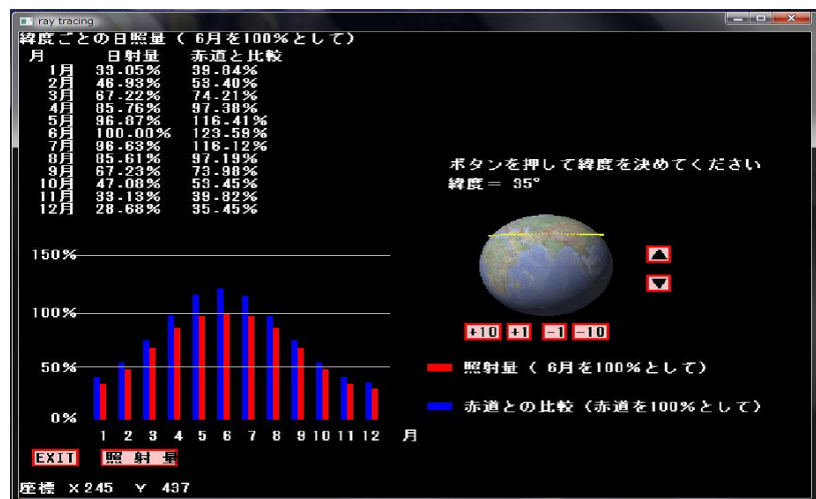


図 29 月毎の日照量時間と日照量での画面 1

画面上の【照射量】ボタンをクリックすると図 30 のように照射時間のグラフと表に切り替えることができる。

画面上にある地球の右にあるボタンは地球を上下に回転させることができ、選択した緯度上での経度全体を見ることができる

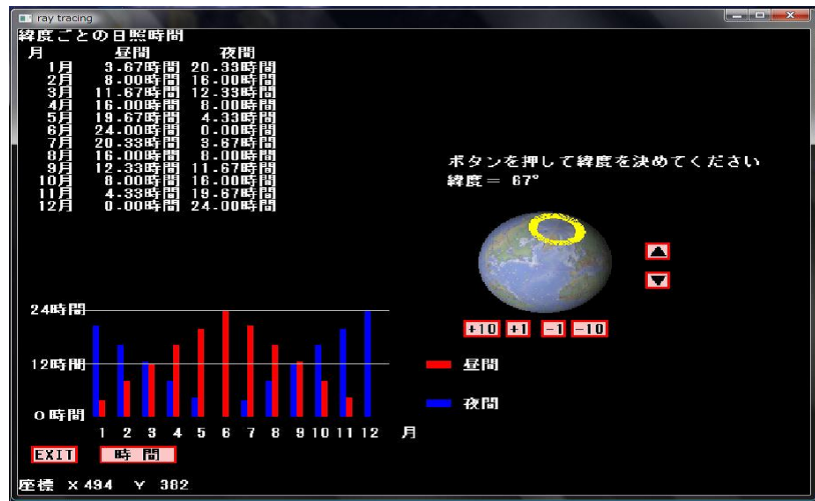


図 30 月毎の日照量時間と日照量での画面 2

参考文献

- [1] 『平成 22 度 理科年表』, 丸善株式会社 pp.82,(2009)