

大気光学特性や視覚特性を考慮した模擬視界生成

青木 義郎* 豊福 芳典* 塚田 由紀*

Generation of Simulated visual image in consideration of the atmosphere optical characteristic and the visual characteristic.

by

Yoshiro Aoki* Yoshinori Toyofuku* Yuki Tsukada*

Abstract

The influence of the visual property or the atmosphere characteristic was analyzed by the numerical simulation. The visual image was computed on the basis of the analysis results. As a result, the following were clarified.

(1)When an atmosphere model is made into the spherical shell in consideration of multiple scattering, a numerical analysis result is well adjusted with the actual measurement at the time of clear sky. It becomes possible to ask for the daylight illuminance at the time of twilight with sufficient accuracy by the devised approximation formula of daylight.

(2)The contrast reduction by scattered light of a matrix sign changes with the luminescence patterns of a character. An actual visible threshold distance may be 3 times the distance calculated by the formula of Koschmieder, if there is no influence of daylight and the luminescence intensity of matrix sign is fully high.

(3)The eye illuminance of a signal light which begins to feel glare falls from 1/3 to 1/2 half with aging.

原稿受付：平成16年2月23日

*交通システム研究領域

1.はじめに

人間は視覚によって外界から多くの情報を受容しており、また高度情報化社会の発展に伴って各生活場面でのその情報量はますます増加する傾向にある。

外界からの視覚情報は大気光学特性によって変化し、交通事故、特に航空機事故の多くは霧などによる低視程時に発生している。このため、灯光や昼光が大気中でどの様に散乱し、そしてそれが見え方にどの様に影響するかを解析することは、霧発生時の適正な視覚情報伝達方法を知り交通環境の改善に役立つものと考えられる。しかしながら、これを実環境下で詳細にそして正確に解析を行うことは、極めて困難なものとなる。

また、視覚特性は加齢に伴って変化し、例えば視覚の空間分解能の低下、グレア感度の向上等が起こる。これらの視覚能力の低下は、高齢者の高い死亡率の一因となっており、これからの高齢社会にとって、あらゆる世代に対して情報を適切に提供できるような視環境作りが重要である。

筆者らは、以前にMie理論によって求められる散乱特性に基づき、散乱光の解析及びCG化を行う数値シミュレーションを開発した。

この論文では、大気特性や眼球光学特性が視覚情報に及ぼす影響を数値シミュレーションにより解析するとともに、視覚特性や大気特性を考慮した模擬視界生成方法の検討を行った。またそれにより交通環境や生活環境においてどのような影響をもたらすのか求めた。それらの結果について報告する。

2. 光散乱解析方法

大気中や眼球内での光散乱を解析並びに可視化する数値シミュレーション手法を以下に示す。

2.1. Mie 散乱方程式

Mie 理論によると、球粒子に平面波の光が入射する時の散乱強度分布 $I(\theta, \phi)$ 及び散乱効率 $K(\theta, \phi)$ (散乱断面積 / 幾何断面積) は、散乱角 θ (入射と散乱の相対角)、屈折率 m 、サイズパラメータ $x = 2\pi r / \lambda$ (r は粒径、 λ は光波長) の関数となる。

$$I(\theta, \phi) = \frac{1}{4} \{ |i_1|^2 + |i_2|^2 \} / 8 \quad (1)$$

$$K(\theta, \phi) = \frac{2}{x^2} \sum_{v=1}^{\infty} (2v+1) (|a_v|^2 + |b_v|^2) \quad (2)$$

2.2. 散乱光空間分布解析

Mie理論により求められる微粒子 1 個当りの散乱特性 (散乱効率や散乱強度角度分布) に基づき、モンテカルロ法により空間に微粒子が複数個存在するときの散乱光の空間分布特性を求めることができる。その基本フローチャート¹⁾を図1に示す。なお、最大散乱次数は 60 とする。

この解析手法により各発光体の個々の光散乱空間分布を求め、それを視界に存在する複数の光源について重ね合わせていくことにより、光散乱を考慮したCG画像 (図2) を作成することができる²⁾。今回はこれにより、水晶体内や大気中での光散乱を解析し、そのCG化を行っていくものとする。

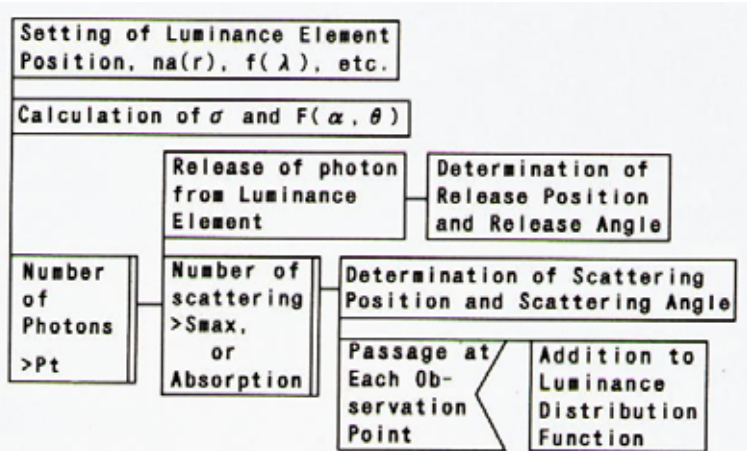


Fig.1 Basic flowchart for analysis of space distribution of scattered light.

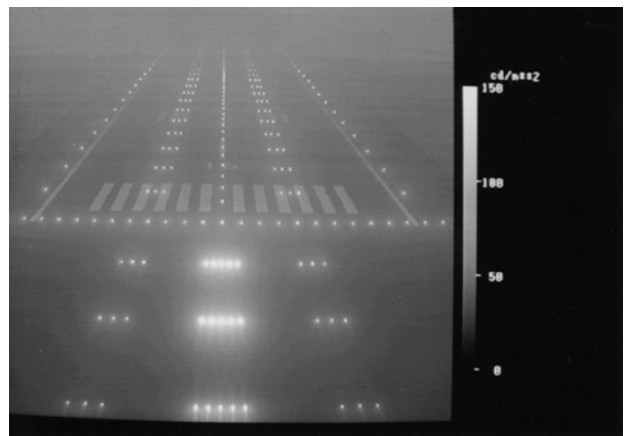


Fig.2 Computer graphics image taking account of scattered light.

3. 解析結果

3.1. 大気光学特性を考慮した模擬視界生成

図1の解析手法に基づき、昼光や灯火光の大気中での光散乱を解析し、CG化を行う。

3.1.1. 昼光散乱の解析

昼光照度が時間に伴ってどのように変化するかを解析することは、灯火システムの運用計画、そして環境への影響を考える上で重要である。また高精度な模擬視界を作成する上でも背景の変化すなわち昼光がどのように変化するか知ることは重要である。

昼光照度は、CIEの推奨式を代表として過去いくつかの算出式が提案³⁾されてきた。しかし、それらの計算式は、薄暮時、特に太陽が水平線よりも下になった時のことは考慮されていない。薄暮時の昼光を解析するためには、大気中の光の多重散乱を考慮する必要がある。また、数値計算を行う上で必要となる大気モデリングも平面大気ではなく球殻大気にする必要がある。

ここでは図3に示されるような球殻大気モデルを用い解析を行うものとした。なお、光の散乱に影響を及ぼす散乱粒子は、空気分子、エアロゾルの組み合わせとし快晴時の解析を行う。空気分子の高度分布はU.S.標準大気の大気密度に基づき算出した。その空気分子の大気層での光学的厚さは0.0885、透過率は0.92である。エアロゾルの高度分布は、地上0-30kmの区間について過去の測定結果と補間により求めたEltermanの分布⁴⁾と相対的に合うように設定を行う。これら空気分子及びエアロゾルの高度分布を図4に示す。

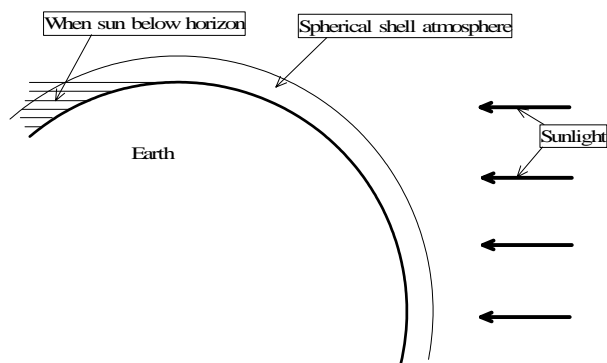


Fig.3 Model of spherical shell atmosphere.

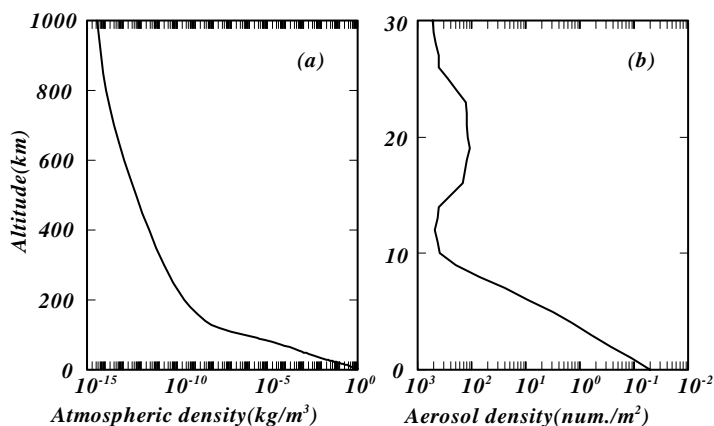


Fig.4 Number density of molecular and aerosol vs altitude.

各種条件下での昼光照度の測定を行い、数値解析の結果との比較を行う。その結果を図5に示す。

点で示される測定結果は空に分布する雲の状態により大きく変動している。これらの上部に集中しているのが主に太陽が雲に隠れない晴天時の結果であり、それに対して下の方でばらついているのが曇天時の結果である。今回の数値解析結果は上部の晴天時の実測値とよく一致しており、薄暮時においても正確に解析できていることが示されている。

図5の結果から快晴時の昼光照度近似式(3)を提案する。この式により薄暮時の昼光照度も精度よく求めることが可能となる。

$$E = 126,000 \times \sin((\theta + 9.0))^6 / (1 + 12.43 + 7.0 \exp(-(0.0546 \times (\theta + 13.0))^2))^{0.5})^5 \quad (3)$$

ただし、P：大気透過率

θ：太陽高度 (deg.)

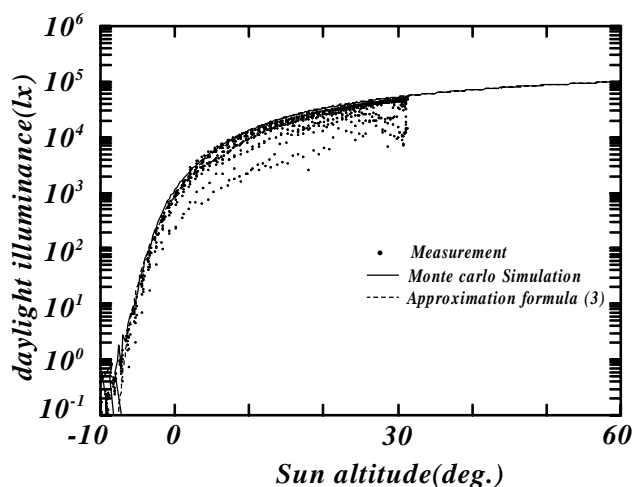


Fig.5 Daylight which changes with sun altitude.

3.1.2. 複合光源のCG解析

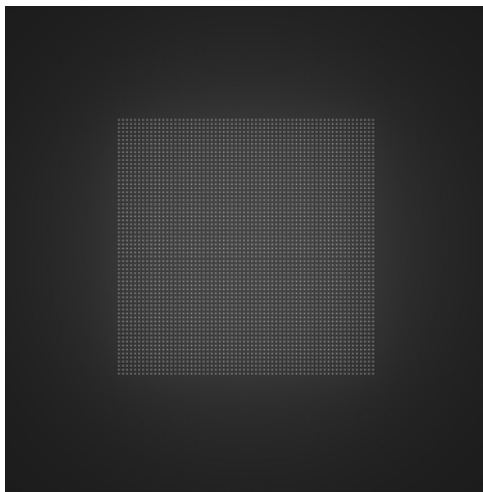
群灯火で形成される電光文字表示板は、霧などの低視程時により見え方が悪化するが、その視認性・可読性について十分な解析はなされていない。一般的には点光源の視認性の解析方法として光減衰の影響を考慮したallardの式が用いられ、反射型指標の視認性の解析方法としては光散乱を考慮したKoschmiederの式が良く用いられる。今回のような点光源と面光源の特徴を合わせもつ複合光源については光の散乱及び減衰の影響を考慮した解析が必要である。

ここでは数値解析により、散乱を考慮した電光文字の輝度分布が霧の濃度や文字パターンによりどのように変化するかを明らかにし、それにより視認性・可読性について評価を行う。

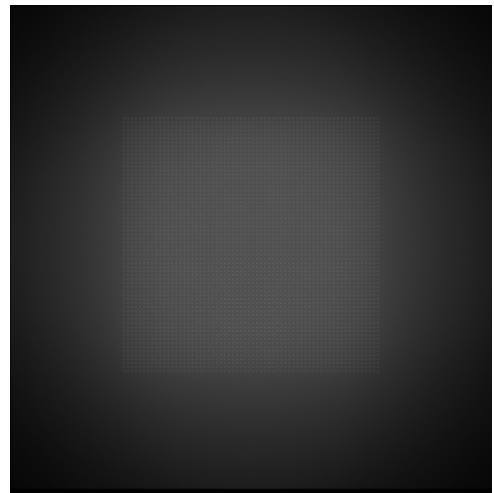
(1) マトリクス電光表示板

低視程時におけるマトリクス電光表示板の見かけ上の輝度分布を図1の手法に基づき解析を行った。そのCG画像を図6に示す。なお解析は、64×64の電光ランプ全点灯の条件で行っている。外光の影響は無いものとした。

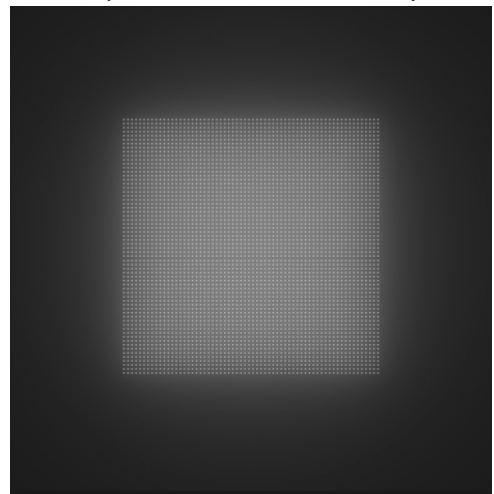
マトリクス電光表示板の見え方には、視標と観測位置との間の光学深さ(減衰定数×観測距離。大気混濁度を示す数値であり、この値が2.996の時、対象物の視認限界値として視距離が求められる。)だけでなく粒径分布も影響を及ぼす。これは図7に示されるように粒径により前方散乱光成分が変化するため、粒径が大きくなるほどその散乱成分は増え、前方からの視認性にも影響もする。



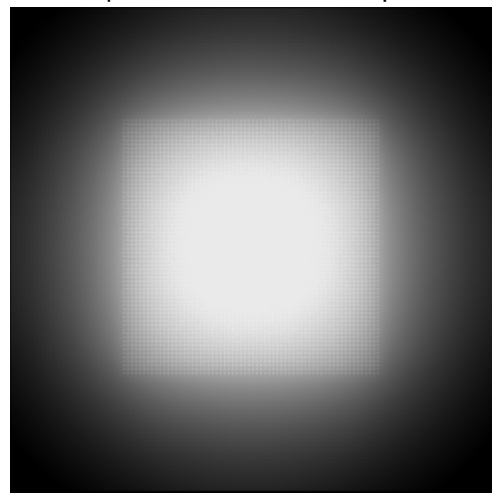
(a) Optical depth : 3,
Mean particle radius : 0.3 μm



(b) Optical depth : 8,
Mean particle radius : 0.3 μm.



(c) Optical depth : 3,
Mean particle radius : 3 μm.



(d) Optical depth : 8,
Mean particle radius : 3 μm.

Fig.6 Computer graphics image of matrix signal lights taking account of scattered light.

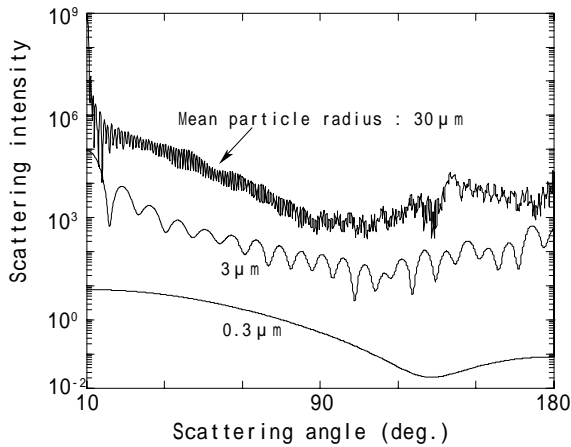
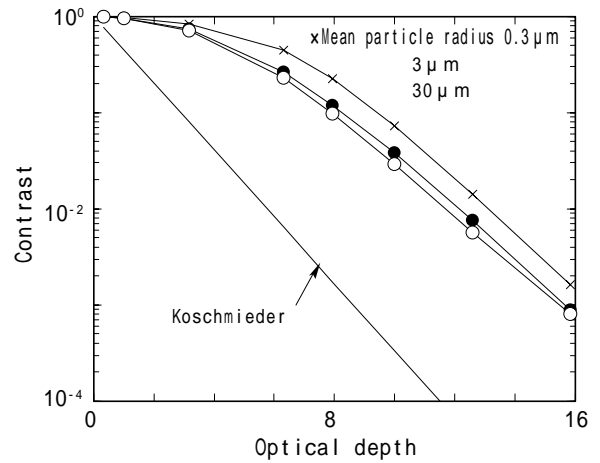


Fig.7 Scattering intensity.



(a) Visual angle of matrix lights:2.5deg.

(2) マトリクス電光表示板の視認性

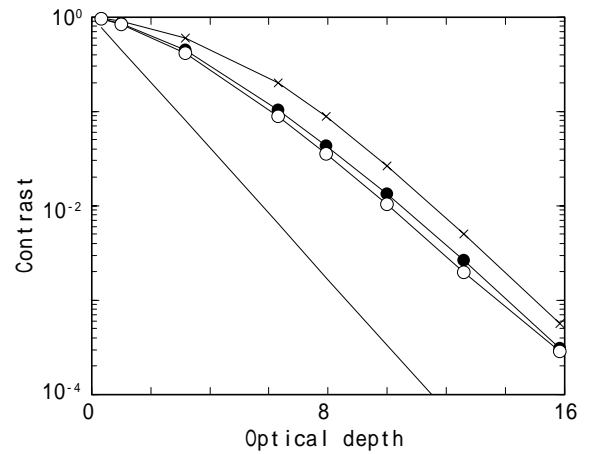
マトリクス電光表示板の視認性を評価するため、電光表示板の点灯部分における平均輝度とその背景部分における平均輝度のコントラスト比の算出を行った。その結果を図8に示す。なお、背景部分における平均輝度は散乱光による付加輝度であり、その範囲は指標中心から左右上下10度の範囲とした。

図に示されるように、大気混濁による視標とその背景とのコントラスト比の低下は Koschmieder 式、

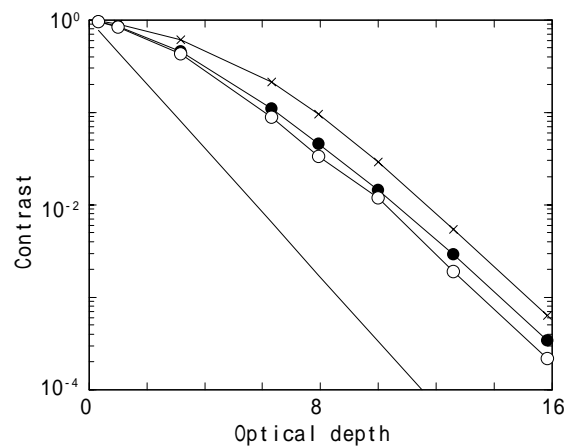
$$C_t = e^{-b \times t} \quad (4)$$

C_t : 混濁大気でのコントラスト t : 光学深さ

による結果よりもその割合は小さく、発光強度が十分に高く外光の影響がない条件では Koschmieder 式により求められる視認限界よりも3倍程度の視距離が得られる可能性がある。また粒径が大きくなるほど散乱光の影響が大きく、コントラスト低下の割合も大きくなる。視標サイズについては発光ランプ密度の向上もあり、小さい方が相対的に散乱光の影響が少なくなることが示されている。



(b) Visual angle of matrix lights:5deg.



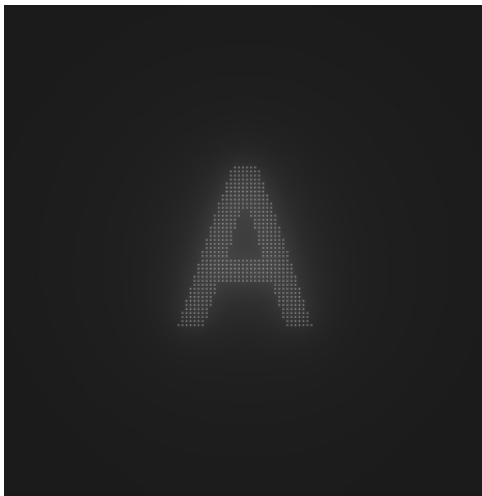
(c) Visual angle of matrix lights:10deg.

Fig.8 Contrast between luminescence part and background

(3) 電光文字のCG解析と可読性

数値解析により求められた電光文字のCG画像を図9に示す。なお文字パターンはアルファベットAで、文字部分を点灯させるケースとその背景部分を点灯させるケースの2種類について解析を行った。

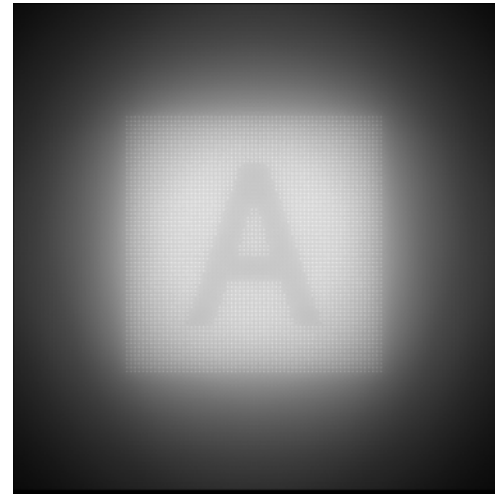
図に示されるように大気混濁度だけでなく点灯パターンによっても、散乱光が見え方に及ぼす影響は変化する。点灯部分の面積の大きい背景点灯のケースの方が同じ大気混濁度（光学深さ）であっても散乱光の影響は強く、文字と背景とのコントラストに影響する割合が大きい。



(a) Optical depth : 3,
Mean particle radius : 3 μm
Lighting of character portion



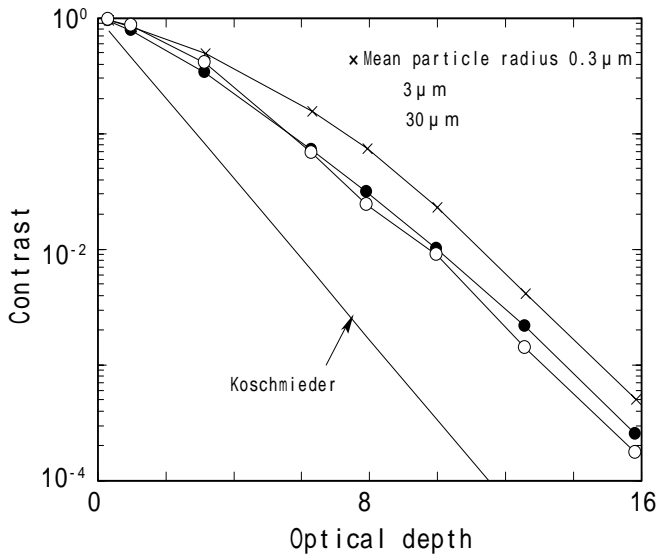
(b) Optical depth : 8 ,
Mean particle radius : 3 μm
Lighting of character portion



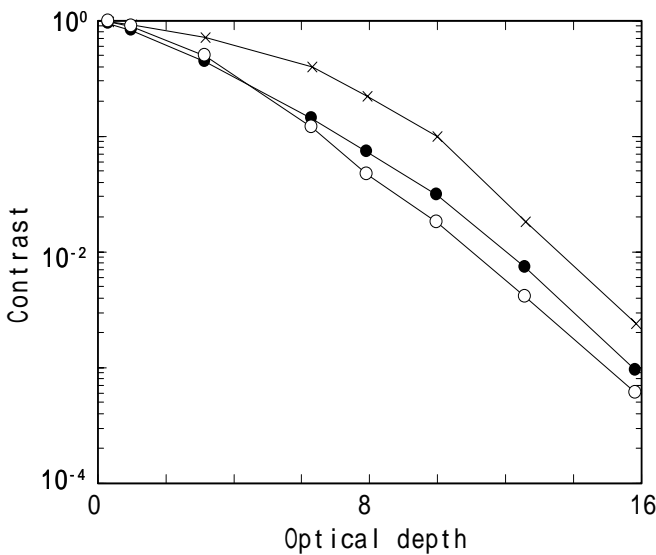
(c) Optical depth : 8
Mean particle radius : 3 μm
Putting out lights of character portion
Fig.9 Computer graphics image of matrix sign
taking account of scattered light.

これらのCG画像（図9）などに基づき、文字情報の可読性を評価するため、文字の明暗部分の平均輝度をCG画像により算出し、そのコントラスト比を求めるものとした。その結果を図10に示す。なお、視標の大きさは10度として文字の明部部分の輝度比を計算したものである。

背景点灯のケースの方が大気混濁によるコントラストの低下の割合が大きくなることが示されている。また、明暗部分のコントラストが視認限界値0.05に達する光学深さはKoschmieder式により求められるものよりも3倍程度となり、十分な輝度と外光の影響がなければ視程の3倍程度の視距離が得られる可能性がある。



(a) Putting out lights of character portion



(b) Lighting of character portion

Fig.10 Contrast between luminescence part and background

3.2. 視覚特性を考慮した模擬視界の生成

3.2.1. 水晶体光散乱によるグレア光幕

水晶体光透過率は年齢の上昇に伴って低下し、20才で約0.85、65才で0.67となる。この結果を用いて、水晶体の混濁による光幕輝度が年齢によりどの様に変化するのかを数値解析により求めた。その結果を図11に示す。加齢によりグレア光幕輝度は上昇し、20才から60才では2倍ちかく上昇し、光源を見た時にまぶしさを感じやすくなる。これは水晶体透過率の低下に加え、加齢による水晶体混濁粒子の粒径が拡大⁵⁾することも原因である。

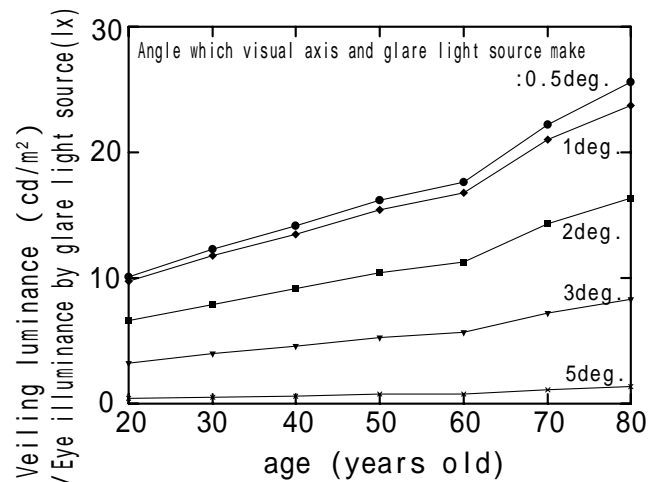


Fig.11 Glare veiling luminance which changes with aging.

眼球内光散乱によって発生する光幕は、各種社会環境において不快グレアや減能グレア発生させる大きな要因になると考えられる。van Bommelらの方法⁶⁾によると光源の輝度による不快グレアの程度の主観評価値GFと照明機器による等価光幕輝度 L_{eq} およびその照明機器を除いた視野の輝度による等価光幕輝度 L_{eqs} との関係が

$$GF = 7.3 - 2.4 \log (L_{eq} / L_{eqs}^{0.9}) \quad 5 \quad (5)$$

となるように灯光器の設置を推奨している。GF = 5となる投光器の角膜照度を図12に示す。図に示されるとおり不快グレアを感じ始める投光器の角膜照度(光度/観測距離)は加齢により1/2から1/3程度に低下しており、青年健常者のみを対象にするより高齢者との共生を想定するならば投光器のグレア限界光度は半分程度引き下げて光軸や配光を検討する必要がある。

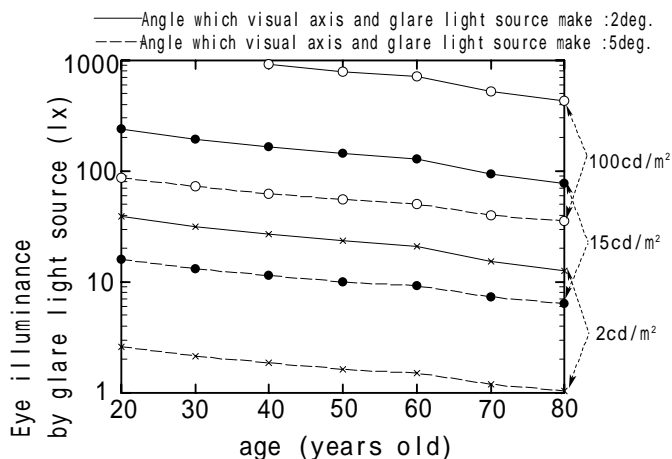


Fig.12 Eye illuminance which begins to feel glare.

3.2.2. 水晶体光散乱が視覚の空間周波数特性に及ぼす影響

水晶体の光混濁によるコントラスト低下が年齢によりどの様に変化するのかを求めた。その結果を図13に示す。なお結果は指標（コントラスト1の空間周波数1-10cpdの明暗パターン。視角5度）を見たときのものである。水晶体混濁によるコントラスト低下は、年齢によりほとんど変化せず、20才から65才の年齢上昇に伴うコントラスト低下は、10%程度しか低下の割合が拡大しない。また、空間周波数が低くても高くても同じような傾向が示されている。一方、実際の明暗パターンを見た時のコントラスト感度低下は年齢により大きく変化し特にそれは高周波領域において顕著であるといわれている。これは水晶体混濁以外の要因（収差、回折、視神経系での刺激伝播）の影響が大きいものと考えられる。

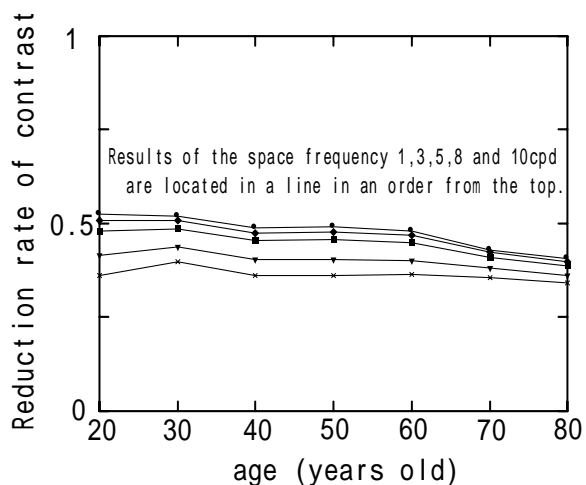


Fig.13 Contrast reduction by aging.

3.2.3. 加齢による視覚特性の低下を考慮した模擬視界生成

加齢変化に基づき視界がどの様に変化するのかを予測したCG画像を図14に示す。なおこのCG画像は、コントラスト感度低下や色覚特性の影響を考慮して、画像再生したものである。



Fig.14 Computer graphics image taking account of visual information which decreases by aging.

4. まとめ

この論文では、大気特性や眼球光学特性が視覚情報に及ぼす影響を数値シミュレーションにより解析するとともに、視覚特性や大気特性を考慮した模擬視界生成方法の検討を行った。またそれにより交通環境や生活環境における視覚情報劣化の影響について解析を行った。その結果を以下に示す。

- (1) CG画像の高精度化のため昼光の数値シミュレーション解析を行った。多重散乱を考慮し大気モデルを球殻大気とした場合、晴天時の実測値と良く整合することが確認された。また、考案した昼光の近似式により薄暮時の昼光照度も精度よく求めることが可能となった。
- (2) マトリクス電光表示板の視認性やその電光文字の可読性には大気の混濁度だけでなく粒径分布が影響し、粒径が大きくなるほど視認距離を低下させる要因になりやすい。文字の発光パターンにより散乱光による明暗コントラストも変化し、発光部分の面積が大きいほど可読性を低下させる要因になりうる。発光強度が十分に高く外光の影響がない条件では、Koschmieder式により求められる視認限界よりも3倍程度の視距離が得られる可能性がある。

- (3) 加齢（20～80歳）に伴い不快グレアを感じ始める投光器や信号灯の角膜照度は1/2から1/3程度低下する。
今後も光散乱による悪視界の解析並びにCG画像等により各種視環境の評価を行っていく。

<参考文献>

- (1)青木他：大気中の微粒子を考慮したモンテカルロ法による散乱光の空間分布解析、照明学会誌77-2（1993）pp.28-35
(2)青木義郎ほか：大気中の微粒子による散乱光を考慮したコンピュータグラフィックス（その1）、照明学会誌79-2（1996）pp.28-35
(3)ライティングハンドブック、照明学会、pp206-208
(4) Louis Elterman, Applied Optics 3,745-750（1964）
(5) 草田ほか：あたらしい眼科 2-5（1985）pp.725-728
(6) 田辺：スポーツ投光照明施設のグレア制限、照学誌、69、9（1976）514