霧の MTF 特性と標識

行田 尚義*

MTF properties of Fog and Signal Lighting

Naoyoshi Nameda

(Department of Information and Computer Science Faculty Engineering, Kagoshima University)

ABSTRACT

This paper reports the results of MTF (Modulation Transfer Function) measurement and simulation of patterns in fog. Fog was produced in a fog chamber. First, temporal density change of fog and particle size distribution of water in fog, were investigated. To evaluate optical properties, MTF properties using grating patterns, was measured. One grating pattern was displayed on a white diffuse flat panel illuminated by installed fluorescent lamps, and another was displayed on a panel illuminated by other lamps from outside. Estimating the MTF properties of assumed fogs from the MTF properties obtained, simulation of patterns passed through the fogs, were carried out by a computer graphic device, and those pattern perceptibility were compared. As a result, the detailed shape of the pattern should depend on imaging aspects of transmitting light with slightly scattering. Moreover, perceptibility of signal pattern under the fog density indicated by visibility distance: 1500 m, was discussed.

1. は し が き

霧中における標識の見え方は航空標識、鉄道標識や道路標識などに重要なことと考える。過去に、多くの研究がなされている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。しかし、その多くは点光源の光の見え方に関するものであった⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

本研究は高温高圧蒸気を吹き込んで霧を発生させる霧室を使用して、空間周波数を変えた縞パターンにより霧の濃度に対する MTF (Modulation Transfer Function) を測定したものである。測定した MTF をもとに画像処理装置を使って、標識や風景のぼけ像を造り霧中のパターンをシミュレートした。

2. 方 法

使用した霧室は幅 30 m 奥行き 25 m 高さ 35 m の空間に高温高圧蒸気を 1.2 t (水) / h の割合で吹込んで霧を作るものである。とくに霧の光学的特性を考慮されたものではないので、実験に先立って霧の濃度の時間的変化と霧の粒子の形とその直径の分布を測定した。

霧の濃度の測定では霧の厚みを 17 m とし、He-Ne レーザーを光源として P 1 型光電管照度計 (トプコン製) で受けて霧の無い時の照度を基準に霧の濃度を測定した。霧の粒子の形とその分布の測定方法は水の表面に張ったコロジオン膜 (コロジオン溶液: 酢酸セルローズの稀釈液から形成される膜) に霧の粒子を固定

し、それをプレバートで受けて電子顕微鏡で観察した。

霧の光学的特性としては点光源の光が霧によって拡張された点像分布を測定することによっても得られるが、対象とした霧の濃度程度では広がり角が小さくて測定が困難であった。広がり角が小さい像のフーリエ面における空間周波数に対する広がり角は逆に大きくなるので、測定が楽になることから、本研究では霧の MTF 特性を測定した。実験で使用した標識は図 1 a のように空間周波数を段階的に変化した縞パターンの内照型 (20 W 蛍光灯 4 本内蔵) と、図 1 b のようなパターンに外部から照明するパネル型の 2 種類であった。図 1 a の標識で黒筋の幅 80 mm (3.7 cpd (cycles/deg.)) 以下は縦の長さを半分の 90 mm にした。しかし 80 mm 幅の黒筋だけは 90 mm と 200 mm の 2 種類を用意した。正確な MTF 測定には 8 サイクル以上の波数が必要といわれているが⁸⁾、本測定では各 1 サイクルづつであった。しかし、室内の実験であっても絶えず霧の状態が変化しており測定誤差が大きい実験であることを考慮すると、この程度の標識でも充分と考えられる。測定は BM-8 型輝度計 (トプコン製) を使って視野 0.2 度で各空間周波数の縞の明と暗の輝度を測定してコントラストを求め、霧の無い時に測定したコントラストとの比を取った。すなわち、霧の無い場合の最大と最小の輝度を、それぞれ $I_{\max}$, $I_{\min}$ とし、霧のある場合の最大と最小の輝度をそれぞれ $I'_{\max}$, $I'_{\min}$ とし、MTF を M とすれば

$$M = \frac{(I'_{\max} - I'_{\min}) / (I'_{\max} + I'_{\min})}{(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})}$$

となる⁹⁾。

ちなみに、図 1 に霧の無いときの輝度値を示しておく。標識に

* 鹿児島大学工学部情報工学科

輝度値

(b)

Unit : mm

(a)

a : 内部に蛍光ランプを組込んだ照明器具のパネル上のグレーティング。

上図は霧のない時のパネル上の輝度

下図はパターンの寸法

パターンの下図は0.46cpd, 上図右から左にそれぞれ0.9

2, 1.84, 3.68 cpdの空間周波数である。

b : 外部からの別のランプで照明するパネルの上に形成したグレーティング

上図は霧のない時のパネル上の輝度

下図はパターンの寸法

右から左にそれぞれ0.92, 1.84, 3.68 cpdの空間周波数である。

図1 グレーティングパターンとその輝度

使った縞の一番低い空間周波数は0.46 cpd (図1 a 下図の下段のグレーティング) であるが、図の中央の白い部分からさらに低い空間周波数0.23 cpd に対する MTF を求めた。この方法は中央部の高い輝度値から、 I_{max} が得られるから下段 (0.46 cpd) の黒筋部分の輝度値を I_{min} としてコントラストを計算した。しかし、正確な値より若干低くなることを考慮して解析する必要がある。また特に濃い霧の場合、時間的濃度変化が急激の場合や、パターンが測定視野よりも小さくなる3 cpd 以上では測定精度が低下しているので、目視による測定も参考にした。目視による測定の仕方を説明すると、まず霧で見えなくなる境目の縞 (空間周波数) を決定する。そして、予め測定しておいた視覚系の MTF 特性¹⁰⁾ から、境目の空間周波数のコントラストいき値を求めた。視覚系の MTF 特性は被験者間で異なるし、輝度によっても変化する。そこで使用する特性値は同一被験者について、同一輝度のグレーティングで測定されたものが望ましいが、本実験は別の被験者について測定した特性値を使った。しかし、網膜照度についてはほぼ同程度でたし、求められた空間周波数の領域が測定バラツキの小さいところにあったので、被験者と同年代のしかも視力も等しい別の被験者について過去に測定したデータ¹⁰⁾ を使って推定してもそれほど大きな間違いにはならないと判断した。

3. 測定結果

3.1 霧の発生の時間的変化

霧室に高圧蒸気を吹込んでしばらく充満するのを待って、蒸気を止めた時の霧の濃度の変化を測定した。

蒸気を吹込んでいる間は霧の濃度が濃すぎて照度が低すぎるので測定が出来なかった (アナログ出力による自動記録をしていたのでレンジ切替えが出来なかった)。この測定は室温の比較的高い6月に行われたために霧の時間的濃度変化の安定した所では、薄い霧になってしまった。そこで濃い霧の条件は時間的変化の急峻のところ求めざるを得なかった。

3.2 霧の粒子の測定

図2は蒸気を吹込み始めた直後と、蒸気を止めて霧のやや安定した時の霧の粒子の形状を示している。図3は直径の分布特性を示す。蒸気を吹き込み始めた直後は直径の小さい粒子が多いのに対し、蒸気を止めた後の霧は天然の霧¹¹⁾と比較して、径の大きい分布をしていることが分った。

3.3 濃度に対する霧の MTF 特性

図4は横軸に対数目盛りにとった空間周波数、縦軸に MTF を対数目盛りにとった図である。霧の発生は数回にわたって行ったが、各濃度については各1回の測定であり、内照型とパネル型の標識について差が認められなかったので、測定点を増やすために同一面上に全て一緒にプロットした。霧の透過率が 7×10^{-5} の場合は目視によって求めた空間周波数の値から上述の方法によって

蒸気を吹き出した直後

蒸気を止めた後

図2 霧の粒子の形状

その時の MTF を 0.02 と推定した。測定値から求めた透過率 1.6×10^{-2} の場合のいき値の点(⊗印)もほぼ同じ値を示しているの
で、この推定値はそれほど大きな間違いではないと思われる。

4. 考 察

4.1 霧粒子の分布と光学的特性

水蒸気は冷却して来ると核になる物を中心にして水滴を形成するが¹²⁾、核になる物がないと過飽和の状態にとどまっていると考えられる。本実験ではとくに核になるものが無かったので、かなり過飽和の状態にあったと考えられる。

写真を拡大するとコロジオン膜の繊維が核になって水滴が形成されたとみられる部分が観察された(図2 矢印参照)。そのよう

に考えると 1μ 以下の小さい霧の存在は実際にはもっと少なかったのではないかと想像される。蒸気を止めた後の霧の場合に、 1μ 以下で繊維上にあると思われる小さい粒子を取除いた場合を点線で示す(図3 下)。粒子による光の散乱では光の波長に比べて小さい粒子の場合はレーリー散乱の理論が適用される。それ以上数 μ まではミー散乱に従う。天然の霧の粒子では一部ミー散乱、大部分は光学的な屈折と反射特性に従っている領域にあったと考えられる¹³⁾。本実験でもその光学的特性はほぼ同じ条件と考えられるので、本霧室実験から天然の霧の場合を推定しても問題ないと考えられる。

透明な水の球体に平行な光が当たった場合粒子を通過する透過光を検討したところ、入射角が 60° を越えると反射成分が大きく

図3 霧の粒子径の分布

なり透過率が急速に減少する。すなわち霧の粒子の中央部を透過する光はあまり広がらない光となっている。何回も透過や反射を経た光は拡散角の大きい光となっていると考える。その結果、被験者の眼には拡散角の大きさの異なる2種類の光束が到達すると考えられる。この事は図4でMTF特性の中央部に凹みがある2つの曲線から成立していると見られることから推察される。

4.2 MTF特性と標識

航空や鉄道では霧の濃さを表わすのに視程何mという表現がとられる。航空照明⁴⁾では視角 $0.5^\circ \sim 5^\circ$ の標識が見える距離と定義され、その時の霧の透過率がほぼ5%になるとされている。推定した特性は霧中の光の拡散特性から2つの異なる拡散角のグループから成り立つと考えて2つの誤差関数で近似した(図4に示す式)。この近似式は低い空間周波数領域で実測値よりやや高め

図4 霧のMTF特性

図中の“M”は推定した視程1500mの場合の霧のMTF特性

値を示すが、実測値のMTFの算出がやや低めであったことを考慮するとこの式の方が実際の場合に合致していると考えられる。このMTF特性からフーリエ面における空間フィルターを作り縞の標識と建物の風景のフーリエ変換像にフィルターを掛けて、フーリエ逆変換を施してぼけ像を作製した。この風景は画面全面で霧の透過率がほぼ同じと考えて処理している。この変換は画像処理装置TOSPIX-2を使いCRT画面上(縦横512ドット、濃度256段階)に表示した(図5)。その結果、縞が見えなくなる空間周波数はおおよそ2cpdになっていることが分った。航空照明の定義にある標識の大きさから視角の最小値 0.5° をあえて空間周波数に換算すると2cpdになるので、本シミュレーションの結果とよく合っていることが分る。航空機の場合、比較的低空を飛行する低速機(260 km/s)でも標識を見付けて回避行動に移るまでに1400 m滑空すると言われている¹⁴⁾ので、余裕をとれば1500 mから標識が見える必要があることになる。パターン標識として認識するには複数の周波数成分が必要になるので、仮に1cpdの成分まで必要とすれば、1500 mでは26 mの大きさの明暗変化の標識が必要になる。今まで航空標識や鉄道標識では指向性の強い照明

図5 視程1500mの場合に霧を通して見たパネル型標識と建物の風景

光を使って点光源として見える条件で使用して来た。暗夜にやっ
と見える角膜照度を $2 \times 10^{-6} \text{ lx}$ と仮定して [7] 霧の透過率が 5 %
のとき、1500 m の距離では 225 cd の点光源があればよいこと
になる。これは照明光源としては容易に達成出来る条件である。例
えば 60 W の反射形電球で中心光度が 300 cd である¹⁵⁾。一方広
がりのあるパターンの標識を使うことを考えると、面積が大きくな
るので同じに見える角膜照度は 1/10 程度⁷⁾ に少なくすむ
が、それを考慮しても点光源に比べてエネルギーは格段に大きくな
る。1 辺の長さが 26 m の正方形のパネル形の標識を使い外部
から照明すると仮定して、白熱電球より数倍効率の高い光源を使
っても少なくとも 100 倍のエネルギーが必要になる。そこでエネ
ルギー効率の点から考えると点光源の方が格段に有利になる。し
かし、パイロット経験者によると真暗の中の点光源は近寄って確
認したくなる誘惑にかられることがあり、逆に危険の場合がある
という。そこで今後の問題としてはエネルギーの見地の他に、人
間の心理や視覚特性を含めた標識の見え方の総合的な研究が必要
になるであろう。

5. 結 論

霧室による人工霧の MTF 特性を測定し、それからコンピュー
タ画像処理装置を使ってシミュレーションした結果、次のことが
分った。

(1) パターンの形成上、霧の粒子の中央部を透過して来る拡散角
の比較的小さい光束が重要ではないかと考える。

(2) エネルギー効率の点から考えると、標識としてパターンを表
示するより点光源の方が格段に有利である。

(3) 視程 1500 m でパターン標識を施すには最低でも 26 m の大
きさの明暗変化を必要とする。

なお、考察ではパイロットの経験のある(財)航空科学振興財団専
門委員、野間聖明氏の話を参考にさせて頂いたことを付記する。
また本研究のチャンスを与えて頂いた東京理科大 小原清成教
授、中京大 河合悟教授に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 正木、田中：大気中における光の減衰係数の算出、照学
誌、47, 6, (1963), 234-239
- (2) 藤井、高橋、吉田：人工霧に対する色光の透過性、照学
誌、49, 6, (1965), 299-304
- (3) 海老原、益子、松本、米山、岡田、坂本：後部灯火の視認性
について(第3報)：霧中(昼)について行う。交通安全公
害研究発表会、運輸省交通安全公害研究所、(1973), 30-36
- (4) 運輸省航空局監修：航空照明、(財)航空振興財団(1986)
- (5) 照明学会研究委員会：滑走路中心線灯に関する調査研究報
告書、(財)航空振興財団、(1969)
- (6) 照明学会研究委員会：誘導路中心線灯に関する調査研究報
告書、(財)航空振興財団、(1970)
- (7) 藤井克人：空港の地上誘導照明システムに関する基礎研
究、京都大学博士論文、(1971)
- (8) R. L. Savoy and J. McCann : Visibility of Low-spatial-
frequency Sine-wave targets : Dependence on Number of
Cycles, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 65, No. 3 (1975), 343-350
- (9) 田幸、辻内、南：光学的測定ハンドブック、朝倉書店、
(1981), 450-451
- (10) 行田、大頭：視覚神経系と視覚特性の年齢による変化、照
学誌、72, 10, (1988), 608-612
- (11) 電気学会研究委員会：碍子の霧中汚損試験法の検討、電気
学会技術報告(II)、第146号、電気学会(1983), 9-25
- (12) R. R. Rogers : A Short Course in Cloud Physics, Pergamon
Press, (1975), 54-86
- (13) 正木他：宇宙光学、光学ハンドブック、朝倉書店、(1976),
1109-1123
- (14) 照明学会研究委員会：閃光式航空障害灯調査報告書(本州
四国連絡橋公団委託)、照明学会、(1977), 45-47
- (15) ランプ総合カタログ、'89, 9, 東芝ライテック(株)、17

(受付 1990 年 4 月 9 日)