特 I 視覚援助施設としての航空灯火

豊福 芳典[○](運輸省交通安全公害研究所)

Lights of Visual Aids for Navigation

Yoshinori Toyofuku

Abstract

While look down on an airport in the sky at night, we see a number of lights glittering, as if jewels were scattered. The lights in an airport play indispensable role for navigation safety.

In this paper, an outline of lights of visual aids for air navigation (hereinafter referred to as AGL; Aeronautical Ground Lights) is introduced by the following composition. At first, many sorts of lights used as AGL and their classification are shown. Secondly, the significance of AGL, even in the condition of progress of the technology of electronic aids for air navigation, is explained. Thirdly, the property peculiar to AGL, which is different from that of lights for other transport facilities, and the required performance derived from that property are explained. Finally, the future state of AGL and some examples of studies in recent years related to visualization are introduced.

1. はじめに

着陸進入中の航空機から見る空港の灯火群の美しさに暫し見とれた人も少なくないであろう。しかし、この灯火は運航の安全に欠く事のできない役割を果たしている。

本稿では、次の構成により航空灯火の概要を紹介する。まず、多くの航空灯火の種類とその分類を示す。次に、電子航法援助技術が発達した中において、なお重要な役割を占める航空灯火の意義及び他の交通機関の場合とは

異なる航空灯火の有する特質とそのため要求される性能について解説する。最後に、航空灯火の将来像並びに可視化にも関連のある最近の研究事例について紹介する。

2. 航空灯火の分類と役割

2-1. 航空灯火の分類

主な航空灯火の分類を図1に示す。航空灯火は、大きく航空灯台、飛行場灯火及び航空障害灯に分類される。

Fig. 1 Classification of Aeronautical Ground Lights

航空灯台は、夜間又は計器気象状態下において飛行中の航空機に航空路や特定の地点、区域等を知らせるための灯火であり、飛行場灯火は航空機が離着陸するため及び飛行場内を地上走行するための視覚援助のための灯火である。航空障害灯は飛行中の航空機に対し航行の障害となる物件の存在を知らせるための灯火であり、障害物の高さ等の条件により設置の義務が定められている。

本稿では、このうち飛行場灯火について述べる。飛行場灯火は設置形態によって二つに分けられる。滑走路中心線灯、誘導路中心線灯はそれぞれの中心線に沿って一定間隔で設置される。このように、航空機が通過する部分に設置される灯器は、路面に埋め込まれ、光を放射するために光学レンズの必要最小限の部分だけが路面から突出する構造となっている。このような灯器を埋込型といい、灯器全体が地上に出ている灯器を地上型という。

また、これらの灯火の設置基準や性能要件は、国際民間航空機関（ICAO）で定められて国際的な統一が図られており、それにほぼ準拠して国内法に取り入れられている。

その設置基準等は、滑走路の種類に応じて異なっている。すなわち、電子航法援助施設の最も充実した精密進入用滑走路は、着陸可能な視程条件等によりカテゴリーⅠ、カテゴリーⅡ、カテゴリーⅢ（さらに、Ⅲa、Ⅲb、Ⅲcに細分される。）に分類される。カテゴリーⅠ（以下、「CATⅠ」と略記する。）からCATⅢcとカテゴリーが高くなるほど劣悪な視程条件でも着陸可能な滑走路を意味し、設置を要求される灯火や灯火数が増加する。現在日本では、新東京国際空港（成田）、釧路空港、熊本空港にCATⅢaが導入されており、これが国内で実用化されている最高カテゴリーである。

Fig.2 The Layout of Aerodrome Lights

2-2. 主な飛行場灯火の役割

主な飛行場灯火の標準的な配置を図2に示す。

1) 進入灯……進入区域に設置され、その灯火パターンにより着陸しようとする航空機に最終進入経路の情報を提供する。CATⅡ／Ⅲ用精密進入滑走路に設置される進入灯のパターンの一例を図3に示す。カテゴリーが低下するに従い、サイドバレットや150m位置のクロスバーなどが省略される。

Fig.3 The Pattern of Approach Lighting System

2) 連鎖式閃光灯……進入灯システムの中心線灯の位置に併設されている白色の閃光灯で、誘目性に富んでいる。先端から滑走路方向に流れるように連続して閃光する。
3) 進入角指示灯（PAPI）……エイミングポイント近傍の滑走路左側に設置される。4個の灯火が一組として構成され、赤と白の色光の見え方で、着陸しようとする航空機にその機その時点での進入角情報を提供する。その様子を図4で説明する。
4) 滑走路灯……離陸又は着陸しようとする航空機に滑走

Fig.4 The Way of Looking at PAPI

路の輪郭を示す。灯光は白色であるが、滑走路終端（着陸しようとする航空機から見て先方にある滑走路末端をいう。以下同じ。）付近は黄色とする。

5)滑走路末端灯……離陸又は着陸しようとする航空機に滑走路の末端を示す。灯光は、滑走路進入端（着陸しようとする航空機から見て手前にある滑走路末端をいう。以下同じ。）を示すものは緑色、滑走路終端を示すものは赤色である。

6)滑走路中心線灯……離陸又は着陸しようとする航空機に滑走路の中心線を示す。灯光は白色であるが、滑走路終端から300mまでの範囲は赤色、300mを超え900mまでの範囲は赤色と白色の交互とする。

7)接地帯灯……着陸しようとする航空機に接地帯を示す白色灯火である。滑走路中心線に対称に3灯1組の横列灯火であり、滑走路末端から900mまでの区間に60m（又は30m）間隔で設置される。

8)誘導路灯……地上を走行する航空機に誘導路の両縁を示す青色灯火である。

9)誘導路中心線灯……地上を走行する航空機に誘導路の中心線を示す緑色灯火である。

10)停止線灯……地上を走行する航空機に、滑走路への進入の可否及び誘導路上での進行の可否を赤色点灯及び滅灯によって表示する。誘導路中心線に直交する直線上に約3m間隔で設置される横列灯火である。

3. 航空灯火の意義

航空輸送の安全運航は、万全の機体整備、パイロットの技能・資質の向上、航空保安施設の改良と保守、適切な航空交通管制などの、大規模で多面的な活動によって支えられている。航空灯火は航空保安施設の一つであり、離・着陸、空港面地上走行に必要なガイダンス情報を昼夜を問わず積極的に連続して提供している。

電子航法援助が利用できない場合には、もちろん航空灯火が離・着陸及び空港面地上走行の唯一の誘導情報であるが、精度の十分高い電子航法援助施設が完備している場合には、視覚援助は一見不要に思える。しかし、その場合にも、二重システムの意味で重要であるだけでなく、次のように視覚情報と電波情報は相互に補完し合っており、安全性をより高めている。

すなわち、電子航法援助はいわば物理的な量の情報であって、センサからの信号をコンピュータ処理して計器等に表示するもので、正確、緻密、コンパクトであるが、必ずしも人間の感覚に直接対応しない。これに対し、視覚援助は視覚という人間の感覚器で受け取る感覚的な量の情報で、直感的に理解することができる。飛行機をうまく飛ばすためには物理的な量の情報と人間の感覚的な量の情報の二つが必要であるといわれている¹⁾。たとえば、夜間悪天候の雲中を降下して、雲の下に出た時ぱっと眼前に進入灯が予測どおりに見えたときにはどんなパイロットでも「ほっと」とすると言われるように¹⁾、視覚

情報は物理情報に対する確信度と心理的余裕を与える重要な役割を果たしている。

また、電波誘導での進入であっても、偏位、高度、姿勢を修正する必要がある場合は、進入灯火や滑走路灯火の形作るパターンが不可欠の視覚情報となる。パイロットはこれらのパターンの見え方によって、自機の位置、高度、姿勢、運動の状況を直接的に知ることができ、修正操作をする際の非常により基準となっている。

また、接地直前の着陸操作においては、パイロットの緻密な高度感覚がスムーズな接地につながる。昼間は滑走路面を見て着陸操作が行われるが、夜間は路面が見えない。このとき基準になるのが、接地帯灯や滑走路中心線灯などの多くの埋込灯火である。

次に、滑走路走行中は速度が低下して空力的作用力が不足するから、自動操縦は原理的に使えない。手動での脚の操舵が必要となる。滑走路での、機体の軸線とエナジーを正しく滑走路中心線方向に向ける方向保持のための操縦操作において、滑走路中心線灯はパイロットに極めて重要な基準を与えている。殊に横風が強く、機首の向き等の機体姿勢や接地直前の飛行方向が不安定になり、その維持に高度な技術を要する場合は直更である。

さらに、滑走路・エプロン間の地上走行においては電波誘導は利用できない。たとえば、霧等で非常に視程が悪いときに、高度な電波誘導で着陸はできたとしても、航空灯火等の視覚援助施設が不備であれば、空港内での現在位置や進むべき正しい誘導路の形状がわからず、身動きがとれないことになる。滑走路や誘導路に立ち往生機があったのでは、その空港はそれ以上着陸機等を受け入れることができない。つまり、航空運航は単に離・着陸ができればよいというものではなく、出発地の駐機場から到着地の駐機場までの全ルートが安全に確保されなければ円滑な運航ができない。したがって、灯火情報は、特に夜間や低視程時に誘導路の経路情報や管制情報の表示機能として、必要不可欠のものとなっている。

このように、視覚援助システムと電子航法援助システムは運航の各段階によってそれぞれの重要度が異なるものの、性格の異なった二つの情報をパイロットがうまく連続させることによって、お互いに情報の冗長性が確保でき、それぞれの機能の相乗効果と相互補完によって運航の安全性の確保が図られている。特に、最近の電子航法援助技術の発達、発着の最低気象条件を下げて定時性の確保と効率の向上に寄与するが、これも視覚援助システムの充実が伴って初めて最大の効果が発揮される。

4. 航空灯火の特質と要求される性能

(1) 灯火パターン

陸上交通の信号灯火は、灯火単独で意味を持っている場合が多い。これに対し、航空灯火の特徴は、着陸進入や着陸操作のための視覚情報を提供するために、多数の灯火群で適切な形状を形成してその全体パターンを一つ

の情報として呈示することである。パイロットはこのパターンの見え方と動き方によって、飛行場及び滑走路の識別並びに自機の位置（偏位や滑走路までの距離）、進行方向、対地速度、高度、降下率及び姿勢に関する情報を得ることができる。

修正操舵のためには、灯火パターンは滑走路中心線に対して左右対称で、縦列灯火が連続していることが重要である。

(2) 灯火光度の均一性

このような特質から、パターンを構成する各灯火の明るさのバラツキを極力抑える必要がある。このためその灯火群は定電流直列回路で構成され、光度を均一に保持している。通常の電気回路は定電圧並列回路が多く、他にあまり例のない航空灯火の特徴である。

(3) 信頼性

また、灯火パターンの迅速な認識に支障をきたさないよう、断芯等による不点灯を少なくすることが重要である。さらに、視程が低いときは視認できる灯火数が限られるため、地上走行中に走行経路の線形情報を与える縦列灯火に不点灯が生じると、有効な方向性のガイダンスが得られなくなる。したがって、航空灯火システムには高い信頼性が要求される。

このため、予防保全の思想による灯器メンテナンス、二次電源の設置、常用電源がダウンしたときの一定時間内での自動的な二次電源への切り替え、千鳥配線による回路構成などの様々な配慮がなされている。

(4) 光度制御等

航空灯火は、太陽光の強い昼間から夜間まで、また、クリアな視程条件から霧、雪等で視程の極めて悪い条件に至るまで、非常に広範囲の背景輝度条件と大気条件下で使用される。これらの条件によって、灯火の見え方は全く異なってくる。あらゆる条件下で、要求される角度範囲内では常に適当な明るさに見え、かつ、接近してもグレアを与えることのないように、灯火の種類毎に、背景輝度や大気条件に応じて最適な光度に制御できることが必要である。同時に、灯火の用途に応じた詳細な配光特性も規定されている。

(5) 構造・形状等

埋込型灯器を航空機の手輪が乗り越えたときは、当然航空機に振動を生じるから、路面からの突出高さの抑制と光学特性の確保の両立する灯器設計が必要である。また、灯器が航空機から受ける衝撃に十分耐える強度が要求される。

地上型灯器については、ジェットブラストに耐える強度が必要であると同時に、航空機が衝突した場合に航空機に重大な被害が発生しないように、灯器や灯器支持部に脆弱性を持たせている。

5. 航空灯火に関わる最近の動き

5-1. 飛行場灯火の将来像

我が国の中核的空港においては、航空輸送量の増加に伴い、その運航密度も限界となりつつある。また、輸送容量及び運航の定期性、定時性の確保のために、霧等による低視程時でも安全な運航が可能な空港が望まれている。このような課題を解決するために、地上走行誘導管制（SMGC；Surface Movement Guidance and Control）システムの導入が計画されている。

SMGCシステムは、低視程を含むあらゆる視程条件下で、飛行場内の航空機及び車両の安全で迅速な移動を支援する高度に自動化された空港の地上交通の管理システムである。すなわち、その最終的な概念は、空港内の全ての航空機及び車両の位置、移動速度等を各種センサーで検知し、発着のスケジュールデータベース等に基づき駐機スポット・滑走路間の最適な走行経路と誘導計画を設定し、無線交信と航空灯火によってその経路を誘導する。これらの機能がコンピュータの支援を得て、有機的、自動的に実現される。これにより、航空機等の衝突回避、低視程時における地上走行経路の確保、管制官とパイロットのワークロードの軽減、ヒューマンエラーの防止、効率的な地上走行を目指す。

航空灯火はこのSMGCシステムの中のサブシステムとして、決められた走行経路を視覚情報によって誘導する視覚誘導システムを構成することになる。たとえば、図5に示すように、誘導路中心線灯と停止線灯を組み合わせ、ある航空機の進行を禁止する場合はその機の前方の停止線灯を点灯し、誘導路中心線灯は消灯する、逆に進行を許可する場合は停止線灯を消灯して進行方向のいくつかの誘導路中心線灯を点灯する。それぞれの航空機の進行に合わせてこれを繰り返すことにより、曖昧さのない、連続的な誘導・管制情報を視覚的に与えること

Fig.5 The Concept of the Visual Guidance System

ができる。

このように、航空灯火は将来的には単に誘導路等の位置や線形を示すだけでなく、他の灯火や地上交通管理システムの他の機能と連携し、状況の変化に応じて点灯状態が制御されるなどのシステム化が進むものと思われる。

5-2. 低視程時の灯火の見え方のCG画像化

光源から放射された光は、大気中に浮遊する微粒子によって散乱され、このため霧などの中で視対象が見えにくくなったり、ハローが生じたりする。光が霧等でどのように散乱するかについて、実際の霧中での実験によって、種々の条件の組合わせて正確、詳細に解析することは極めて困難である。天然の霧は、その発生や粒径分布等の条件を自由にコントロールできないこと、霧が発生していてもその状態が安定的に持続しないことなどが主な理由である。人工的な霧室の使用も、小規模のモデル実験用ならば比較的容易だが、実際の航空灯火の見え方実験のためには極めて大規模の霧室が必要となり、ほとんど不可能である。そこで、散乱光が灯火の見え方にどのように影響するか、光源の条件や霧の条件によって灯火はどのように見えるかを容易に精度よく調べる手段とすることを目的として、青木^{2), 3)}らはMie理論によって求められる散乱特性に基づき、モンテカルロ法を用いて散乱光の空間分布を数値シミュレーションし、さらに、CG画像化するシステムを開発している。

Mie理論によると、球状粒子に光が入射したときの散乱強度と散乱効率（散乱断面積／粒子の幾何学断面積）が散乱角、粒子屈折率、粒径と波長の比で決まる。これに、粒子濃度、粒径分布、光の波長確率密度等を設定し、一個の光子が光源を放射されてからの挙動を確率的に記述する。さらに、複数個の光子の挙動を重ね合わせ、統計分布を求めることにより、散乱光空間分布を求める。また、光源と観測点との位置関係を特定して、観測点で見える散乱光空間分布をCGにより画像化する。

霧室における光源ハロー測定実験での実測値とこの数値シミュレーションによる計算結果を比較検討することにより、数値シミュレーションにより散乱光が精度よく模擬できることを確認している。

なお、このシステムの適用限界を超える場合の一つとして、灯火の配光が軸対称でない場合や灯火光の強い反射や吸収を考慮する必要がある場合を挙げている。この場合は、十分な精度を確保するためには計算量が膨大となっており、使用コンピュータの計算処理能力を超える。今一つは、重力によってその形状が球にならない大きな雨滴の場合のように、Mie理論がそのまま適用できない場合である。

このシステムにより得られたCG画像の例を図6に示す。着陸進入中に滑走路末端から200mの位置からみた滑走路のCG画像で、視程400mの場合である。

Fig.6 A Computer Image of Runway at Low Visibility

5-3. 滑走路中心線可視化システム

滑走路中心線灯は、滑走路に埋設される灯火で、航空機の手輪はその上を乗り越えて走行することになる。灯器の滑走路面からの突出高は15mm程度で、乗り越し時のコクピット等に生じる振動は大型機にとっては軽微である。しかし、小型機の離着陸の多い空港などでは、その衝撃に対する懸念などから滑走路中心線灯が設置されていない場合も多い。

しかし、滑走路中心線灯は、パイロットが着陸時において自機の位置、姿勢、速度等を知る最も有効な手がかりの一つ^{4), 5)}で、特に夜間、横風が強い時、視程が低い時などは、それが未設置であると着陸に何らかの困難を感じるパイロットが多いといわれている⁶⁾。

そこで、滑走路中心線灯の未設置空港において、滑走路中心線灯と同等の機能を有する視覚援助システムとして、レーザービームを応用する方法が検討されている。これは、大気中の微粒子での光散乱により可視化されたレーザービームを中心線位置情報として提供しようとするものである。（図7）

青木ら⁷⁾は、基本的に前節で述べたシミュレーション手法を用いて、大気混濁度や粒径分布とレーザービーム

Fig.7 The Visual System of a Runway Centerline by Use of a Laser Beam

の散乱強度の関係、必要なレーザー出力等についての解析及びそのCG画像化を行っている。

まず、霧室でのレーザー散乱光輝度測定実験結果とそれをシミュレーションした結果との比較で、散乱次数を十分高くとれば両者はよく一致することを示している。

次にシミュレーションによって、滑走路進入端から手前水平距離200mのグライドパス上から滑走路を見た時のレーザービームの光束1lm当たりの輝度と視程との関係を計算した。平均粒子半径 $3\mu\text{m}$ 、レーザー発振器を滑走路終端側に設置して滑走路進入端側へ向かって放射した場合の例を図8に示す。滑走路進入端が相対的に見えづらく、また、輝度が最大となる視程があることが示されている。

レーザー発振器を滑走路終端と滑走路進入端の両側に設置する場合について、それぞれの必要なレーザー出力を、視覚的空間的寄せ集め効果⁸⁾を考慮し、レーザービームを点光源の集まりとみなして、閾値角膜照度から推定した結果が図9である。ここで、レーザー光量を50

Fig.8 Scattering Luminance of a Laser Beam

Fig.9 The Required Power of Each Laser
(Laser Position: Both of Runway Thresholds)

Fig.10 A Computer Image of a Visualized Runway Centerline by a Laser Beam

0lm/Wと仮定している。

さらに、レーザー光の散乱の解析結果に昼光及び他の灯光による光散乱、直達光等の結果を重ね合わせるにより、着陸進入中の航空機から見た滑走路のCG化を行っている。視程800m、レーザー出力200W、レーザー発振器位置は滑走路終端と進入端の両側の場合のCG画像例を図10に示す。

なお、可視領域で100W以上の高出力のレーザーは見当たらないし、安全上の問題も大きいので、直ちにそのままの形で実用化は困難と思われるが、光の散乱を利用した可視化解析の例として紹介した。

【参考文献】

- 1) 野間聖明; "航空灯火と航空機の運航", 照学誌, Vol.73 No.3, pp121-125(1989)
- 2) 青木, 谷口, 入倉; "大気中の微粒子による散乱光を考慮した灯火システムのコンピュータグラフィックス (その1)", 照学誌, Vol.80 No.2(1996)
- 3) 青木, 谷口, 入倉; "大気中の微粒子による散乱光を考慮した灯火システムのコンピュータグラフィックス (その2)", 照学誌, Vol.80 No.2(1996)
- 4) 航空振興財団; "航空照明", 1986, pp.136-141
- 5) 航空灯火のパターン評価調査研究委員会; "航空灯火のパターン評価に関する調査報告書", 照明学会(1993)
- 6) 日本エアシステム冬期空港分科会資料(1993)
- 7) 青木 他; "大気中でのレーザービームの可視化", 光学, Vol.26 No.11(1997)
- 8) 入倉隆 他; "いき上レベルにおける視覚的空間的寄せ集め特性が灯火の明るさ知覚に及ぼす影響", 照学誌, Vol.77 No.2, pp36-40