操船シミュレータ上の灯火の表現手法と関門航路への適用

宮崎 恵子*・沼野 正義*

田中 邦彦*・福住 克保**

Improved Representation of Light in Ship Handling Simulator and its Application to Kanmon Passage

Keiko MIYAZAKI, Masayoshi NUMANO,
Kunihiko TANAKA and Yoshiyasu FUKUSUMI

Abstract

We have aimed to improve safety of ship navigation at night and studied appropriate passage routes on ship handling simulator taking Kanmon Passage as an example.

As we enhance recognition of the passage route, we prepared several ways such as changing character of light buoys or corresponding/cascading buoys lighting. We have represented lights of aids to navigation such as buoys and lighthouses accurately in our ship handling simulator and executed simulator experiments to test those ways. To represent accurate representation of lights, we have made several CGI (Computer Graphics Imagery) objects based on their colors, their luminosity and luminance of CGI on screen. A buoy chooses appropriate object automatically from them according to its own luminosity and a distance between the buoy and a viewpoint. Besides we have added equations of atmospheric transmittance to our program and realized visibility of light on our simulator. We discuss those methods and results of the simulator experiments in this paper.

1. はじめに

船舶技術研究所では海上保安庁と共同研究を実施し、特に夜間における船舶の航行安全を向上させることを目的として、航路の航行環境について検討してきた。どのような航路標識をどのように配置するかについては、その地域の地理的条件や船舶航行の実態を考慮して決定されているが、日時の経過と共に変化する陸上の灯火や船舶の航行実態等、標識環境への対応が求められる一方、灯浮標の場合は電源に制約があるので、いたずらに光力を上げることはコスト面から無理がある。光の見え方の問題は、多分に心理的な要素を有しており、従って、見易いか否かの検討にあたっては、実際に視認し比較することが必要となり、まして机上計画では不可能である。そこで、特に夜間において、より効果的に航路航行環境について検討できるよう、技術の進歩の著しい操船シミュレータを航路の検討に利用することを図った。

本稿では、関門海峡の関門港関門航路（以下、関門航路という）を対象として、操船シミュレータ上で航路を検討する際に不可欠な、灯浮標や灯台などの灯火を、このような検討に用いることができるように CGI (Computer Graphics Imagery) で表現する手法について報告する。さらに、航路の視認性を高める方策についてシミュレータ実験で検討した結果について述べる。

* 正会員 船舶技術研究所（〒181 三鷹市新川6-38-1）

**非会員 海上保安庁（〒100 千代田区霞が関2-1-3）

2. 航路の視認性を向上させる方策

海上では、航路は灯浮標を的確に配置することによってわかるようになっている。図1は関門航路の一部であるが、航路の範囲と航路を示す灯浮標の位置が描かれている。灯浮標は、それぞれ、固有の灯質（固有の光色、点灯と消灯のリズム）と光度を持っていて、これにより、灯浮標同士は識別される。船上の操船者は、図のように配置されている灯浮標を鳥瞰図ではなく、ほぼ水平方向から見て、海図と灯浮標を対応させ、航路を認識する。特に夜間は海面が暗いため、航路を安全に航行するためには、昼間に比べてより灯浮標が欠かせないものとなる。

航路を示す灯浮標は、敷設される位置によって、灯質などが規則で一元的に決定されるものがある。しかし、そのように決定されるもの以外の灯浮標を配置するときに、環境に合わせて、航路の視認性を高めるよう、その灯質などの決定については自由度がある。

そこで、この自由度の残っている灯浮標についての検討を、シミュレータを通して効率的に行えるようにすることを目的として、本研究を行った。

ここで述べている視認性は、ただ単に目立つということだけではなく、識別性も含んでいる。すなわち、必要な航路が的確に認識できることが重要である。航路の視認性を向上させる方策においては、関門海峡全体を考えると、メインである関門航路だけでなく、いわゆる枝航路と呼ばれる小さな航路も交通網として重要であるので、関門航路はもちろん、枝航路も、きちんと識別できるということが目標である。そういった意味での、航路の視認性を高めることが目的であり、その効果的な検討ツールとして、操船シミュレータを使うため、シミュレータ上での灯火の表現手法を考案し、実現した。

航路の視認性を向上させる方策として次のものについて検証した。

- (1) 関門航路と枝航路を別系統の同期点滅にして、その交互点灯タイミングの時間差を最適なものにする。
- (2) 関門航路をカスケード（一定の間隔で次々と起こる）点灯方式にし、順次点灯していく時間差を最適なものにする。
- (3) 関門航路をカスケード点灯、枝航路を同期点滅にする。

図1には、関門航路と枝航路を示す灯浮標のグループと、カスケード点灯の方向を示す。

シミュレータ実験では、関係者による主観的評価を実施し、(1)交互同期点滅と(2)カスケード点灯の最適な時間差の決定と、(1)～(3)の方策の中から、効率良く航路の視認性を高めるものの選定を行った。

3. 操船シミュレータ上の灯火の表現手法

まず、操船シミュレータが、航路等を示す灯台や灯浮標などの灯火を評価に用いることができるよう正確に表現できなくてはならない。その上で、前述の航路の視認性を向上させる方策について、シミュレーションを行いながら、リアルタイムで簡単に変化させ、比較検討できることが必要である。

CGIの方式によっては、点光源をポリゴンではなく、光専用の手法で高度に表現ができるものもあるが、著者らは、船舶航行の分野に限らず、一般的なCGIでも灯火を扱えるように、ポリゴン（色付きの多角形）で表現する手法について検討し、船舶技術研究所の操船シミュレータ上で実現した。

3.1 同期点滅・カスケード点灯等の簡便な設定

航路の視認性向上の方策検討には、操船シミュレータ上で、灯浮標のグループ化の設定、灯質の設定、

図1 関門航路の灯浮標配置とグループ化の例

グループごとの同期点滅の設定、グループ間の同期点滅の時間差の設定および時間差の変更、さらにカスケード点灯の時間差の設定と変更を容易に実現する必要がある。このために、表1に示した例のように、灯浮標のデータテーブルを用意し、灯質等のデータを簡単に設定できるようにした。横方向に一つの灯浮標のデータを入力する。灯質の点灯と消灯の時間については、milli-sec単位で設定する。同期点滅の場合、各灯浮標のデータ列の最後尾の数字がベースとなる灯浮標の通し番号であり、一つのグループを示し、同期点滅の開始時刻を合わせる。網掛け部がオフセットで、グループ間の点灯開始時間差を示している。カスケード点灯の場合、各灯浮標のデータ列の最後尾の数字で、マイナス符号がカスケード点灯であることを示し、その絶対値の順番で順次点灯が開始する。その後の灯質は各灯浮標ごとに設定した通りになる。最後尾から一つ前の数字はカスケード点灯のベースになる灯浮標の通し番号を示す。網掛け部がオフセットで、カスケードで順次点灯していく時間差となっている。

シミュレーション中にキー入力で時間差が変更できるようなシミュレーションプログラムを作成した。特定のキーを押すことによって、網掛けで示したオフセットを増減できる。これにより、シミュレーション中に、交互同期点滅では各グループの点灯開始時刻の時間差を、カスケード点灯では、カスケードの順次点灯していく時間差をその場で変化させることができる。

3.2 灯浮標・灯台等の灯火表現の改良

実際の世界では、光の光色および光度は、たいへん広く分布している。表2に関門航路の灯浮標の一部の諸元表を示す。この表が示すように、関門航路を示す灯浮標をとってみても、一番暗い灯浮標である関門第二号航路第二号灯浮標の光度27カンデラから、一番明るい灯浮標である関門航路第六号灯浮標の光度264カンデラまで広く分布している。さらに、灯台は、一桁大きい数値を持っている。

一方、CGIでは、狭い範囲しか輝度を表現できない。船舶技術研究所における操船シミュレータのCGIのRGBの値は、0～255までとれるが、例えば赤（灯浮標に使用される光色）のスクリーン上の輝度はR255で5.5カンデラ/m²であった。スクリーン上で、少なくとも2×2ピクセルを保持すること、視点近くで灯浮標として適切な大きさとなることを考慮し、視点から2,500mの位置を基準にして、灯浮標光源部の大きさを一辺が1.5mの立方体とした。このときの光度は、最高でも約20カンデラしか表現できない。CGIでは、実物の灯浮標と全く同じ光度を表示することは不可能である。そこで、CGIの各灯浮標間の光度の比が、実際の標識間の光度と同じ比で表現できるように、灯浮標の光源部分のオブジェクトをポリゴンで作成した。

しかし、この一辺1.5mの立方体のオブジェクトでは、本シミュレーション範囲の10,000m四方の場合、最遠以前に、スクリーン上で見ることが出来る最小単位1ピクセルよりも小さくなって、表示されない。これを防ぐために著者らはLevel-of-Detailの手法に改良を加え、各灯浮標光源部オブジェクト（以下、簡略して灯浮標オブジェクトという）のポリゴンサイズは、視点から離れた位置で表示されるLevel-of-Detailのオブジェクトほど大きく作成し、ポリゴンサイズが大きくなった分だけ輝度を下げることとした。図2の上部に示すように、視点位置から遠ざかるに連れて、灯浮標オブジェクトのポリゴン面積を、4倍ずつ大きくし、輝度を4分の1ずつ小さくすることにより、スクリーン上で、Level-of-Detailの変換点の前後における光度を一定に保つことを実現した⁽¹⁾。

しかし、この手法では、オブジェクトの大きさの変化が著しく、また、灯浮標や灯台の光度ごとにオブジェクトを個別に作成する必要があった。これを解決するため、灯浮標や灯台の光色と光度とスクリーン上の輝度に基づいて作成した共通のオブジェクトから、各灯浮標固有の光度や距離に応じて適切なオブジ

表1 灯浮標データの設定用ファイルの例

通し番号	1	2	500	2500	0			
1	2	500	2500	0				
2	2	500	2500	0	1			グループA 同期点滅
3	4	500	500	500	4500	200		
4	2	500	2500	0	1			グループB 同期点滅
5	4	500	500	500	4500	200	3	
6	2	500	2500					
7	2	500	2500	100	6	-1		グループC カスケード点灯
8	2	500	2500	200	6	-2		
9	2	500	2500	300	6	-3		

表2 灯浮標および灯台の諸元表（一部）

標識名	光度(カンデラ)	灯質	光色
関門航路第五号灯浮標	173	FG3s	緑
関門航路第六号灯浮標	264	FI(2)RGs	赤
第二関門航路第二号灯浮標	27	FI(2)RGs	赤
下関港防波堤灯台	886	FF(2)CGs	緑

エクトとサイズを選択して表示するアルゴリズムを用いた。

まず、標準サイズの辺1.5mの立方体でオブジェクトを作成し、その輝度を、0.05カンデラ/m²（夜間のシミュレーションで識別できる最低の輝度）からそれぞれの色の最大輝度までを適当に分割して、各オブジェクトに割り当てる。今回は、全体のポリゴン数の検討から、各色20個のオブジェクトを作成した。

基準とする灯浮標を決め、それを基に、各灯浮標の実際の光度を標準化して、標準位置である視点から2,500m位置のスクリーン上の光度buoy.candelaを求める。さらに、各灯浮標のサイズも、基準とする灯浮標サイズとスクリーン上の光度から求める。灯台のように光度の大きいものはサイズを大きくして対応できる。ただし、視点から2,500m離れた位置で、2×2ピクセルを保つように、最低サイズを標準サイズである1.5mとし、それ未満の場合はサイズを1.5mとした。ここで求めたサイズが、2,500mより近いところで表示される灯浮標のサイズbuoy.sizeとなる。このサイズを基に、各距離で対応する光度を求める。

一方、2,500m地点を基準にしてそれ以遠では、距離が遠くなる分、表示させるオブジェクトを拡大することにより、見かけの大きさを保つ。2,500m以遠で表示させるオブジェクトは、標準サイズの1.5mを用い、視点と灯浮標との距離を d (m) として、次の式で求められるスケールbuoy.scaleの値で拡大する。2,500mより近くでは、 d を2,500とする。

$$\text{buoy.scale} = \frac{\text{buoy.size}}{1.5} \cdot \frac{d}{2500.0}$$

拡大した分の光度を一定にするため、各地点における灯浮標のスクリーン上の見かけの光度buoy.candela₁は、視点と灯浮標との距離を d (m) として、

$$\text{buoy.candela}_1 = \left(\frac{2500.0}{d} \right)^2 \cdot \text{buoy.candela}$$

となる。2,500mより近くでは、 d を2,500とする。

これにより、図2の下部「改良型灯火の表現手法」に示すように、各灯浮標が、固有の光度と、視点と灯浮標との距離に応じて、共通のオブジェクトの中から、光度がbuoy.candela₁のオブジェクトを選択し、そのオブジェクトのサイズをbuoy.scale倍することにより、非常にスムーズかつ正確な灯火が模擬できた。

3.3 大気透過率の反映⁽²⁾⁽³⁾

完全な平行光線以外の点光源から放射された光は発散し、その照度は距離の2乗に反比例する。灯浮標が、操船者に観測されるときは角膜照度がこれにあたる。

大気透過率を考慮し、世界気象機関により採択されている輝度対比の閾値を用いて、灯浮標からの光に対する観測者の角膜照度 E_d を求めると、

$$E_d = \frac{I_o \cdot \varepsilon \cdot \frac{d}{V}}{d^2} = \frac{I_o \cdot 0.05 \cdot \frac{d}{V}}{d^2}$$

となる。ここで、 I_o は光源の光度（カンデラ）、 ε は輝度対比の閾値、 d は視点と光源間の距離（m）、 V は

図2 灯浮標等灯火オブジェクトの表現手法

気象学的視程 (m) を表す。

一方、国際航路標識協会では、標準的な視程として10海里 (1海里は1,852m) を用いて航路標識灯火の光学的距離を取り扱うように勧告している。この勧告に沿った大気透過率を考慮すると、表2の関門航路第六号灯浮標の実海域での操船者への角膜照度は、2,500mの位置で、 2.819×10^{-5} ルクスとなる。大気透過率を考慮しないと、 4.224×10^{-5} ルクスである。図3に示すように、操船シミュレータでは、操船者は、スクリーン上に表示されるCGIのオブジェクトを、操船シミュレータのブリッジ内の決まった位置から観測する。スクリーンとブリッジ間の距離は、シミュレーション範囲に比べて非常に短いので無視することができる。すな

わち、スクリーン上に表示されるオブジェクトの光度を求めるときに、大気透過率を直接反映することにし、大気による減衰後の光度を用いることにした。よって、前節の各地点における灯浮標のスクリーン上の見かけの光度buoy.candela_1は、

$$\text{buoy.candela}_1 = \left(\frac{2500.0}{d} \right)^2 \cdot \text{buoy.candela} \cdot (0.05)^{\frac{d}{v}}$$

となる。これを用いることにより、視程によって灯火の光度が変化するという自然現象を模擬できた。

3.4 背景光の表現の改良

これまでは、現場を再現した形で背景光が灯浮標や灯台の視認を妨げるように、操船シミュレータ上で背景光を作成し用いていたので、背景光の光度は一貫して正確とはなっていなかった。しかし、背景光を、灯浮標等に対して相対的に正確な光度で表現することは、操船シミュレータ上の灯火の表現と評価において重要なことである。

背景光は、灯浮標等と違い、景観画像上に広く大きく存在するものである。そこで、灯浮標等の灯火と光度を比較するときには、対する背景光の範囲を決めておく必要がある。著者らは、この範囲 (景観画像上で、窓もしくは枠として想定することになるが) を、高精度な情報受容が可能な範囲である弁別視野の視角縦横2度の範囲⁽⁴⁾⁽⁵⁾とした。その範囲内に点在している光点の光度の総和を、その背景光の光度とする。さらに、背景光のテクスチャには、これまでも用いて一定の効果を上げていたバックグラウンドが透明なテクスチャを用いることにした。背景光のテクスチャの例を図4に示す。左側が基となる背景光テクスチャで、白い部分が光点、黒い部分がバックグラウンドで透明になっている。このテクスチャは、重ね合わせることで、図4の右側のように密度を増すことができる。一般的なグラフィックスコンピュータではテクスチャメモリに制限があり、多くの種類の背景光を個々に用いることには限界があるが、このようなバックグラウンドが透明な背景光を使うことにより、効率的に使用できる。

背景光のテクスチャの作成は、次のようになる。まず、スクリーン上の視角縦横2度の範囲を求める (船舶技術研究所の操船シミュレータのスクリーンでは、約18cm×18cm)。その面積を基準にして、背景光テクスチャを作成する。背景光は、白が基本となるが、船舶技術研究所の操船シミュレータでは、白の最大輝度が32カンデラ/m²まで表現でき

図3 シミュレータと実海域における操船者の視点と灯浮標の位置

図4 背景光テクスチャの例

図5 背景光テクスチャの最小単位

る。灯浮標等の灯火のところで述べたように、見えなくなることを防ぐため、スクリーン上では、背景光テクスチャの光点の一つ一つも、必ず 2×2 ピクセルを保持する必要がある。これが、背景光テクスチャの光点の最小単位であり、図5のようになる。この図5に示した最小単位の光点の背景光テクスチャで、 4×10^{-3} カンデラ(白の最大輝度32カンデラ/ m^2 の場合)から 6×10^{-6} カンデラ(前述の夜間のシミュレーションで識別できる最低の輝度0.05カンデラ/ m^2 を用いた場合)まで表現できる。図4のような背景光テクスチャの光度は、点在する全光点の光度の総和になる(ただし、テクスチャの大きさが視角縦横2度で、個々の光点が 2×2 ピクセル以上)。

一方、灯浮標等の表現と同様に、背景光が視点位置から遠ざかるにつれて、図6に示すように背景光も背景光オブジェクト(背景光テクスチャ付きのポリゴン)も変換していく。このとき、背景光の光点一つの光度を x カンデラ、光点の個数を m 個とすると、ある背景光は、 $x \cdot m$ カンデラを一定に保つことにより、光度を保持する。一般的には、光点の輝度は変化させず(最大輝度を用いる)、視点位置から遠ざかるにつれて、個々の光点は大きく(x を大きく)、光点の個数を少なく(m を小さく)することにより、スクリーン上で背景光の光点が見えなくなることを防ぎつつ、光度を保つようにする。しかし、光点の大きさには限度があるため、限界にきたところからは、光点の輝度を小さく、暗くして、 $x \cdot m$ カンデラを一定に保つことも必要になる。観測者の視点位置からは、灯浮標と同様、距離に応じて光度の変化が観測できる。

以上のような手法を用いて、背景光を表現する。実世界の背景光の光度は、現場で測定機器を用いて、視角縦横2度の範囲の光度を求め、この数値を基に、灯浮標等の光度に対して相対的に正確な背景光を表現できる。

4. シミュレータ実験

4.1 本手法の評価シミュレータ実験

航路視認性向上方策のシミュレータ実験に先立ち、本稿で提案した手法を参考文献1の論文で提案した前手法と比較し、その改良の効果について、シミュレータ実験と評価をおこなった。

4.1.1 灯浮標・灯台等の灯火表現の改良(改良型灯火の表現手法)

関門航路の中から、代表的な灯質を持つ5つの灯浮標と灯台を選択して、操船シミュレータ上に、参考文献1の論文の前手法「改良型Level-of-Detail手法」と、本稿の「改良型灯火の表現手法」でそれぞれ表現して、5つの灯火を250m間隔で一列に表示した。視点位置を0mから10,000mまで変化させて、両手法による表現を比較し、改良効果について主観的評価を聴取した。評価者は、2人で、いずれも関門航路航行を経験しており、1人は船長経験者、1人は航路標識担当者である。

評価結果をまとめると次のようになる。前手法「改良型Level-of-Detail手法」では、Level-of-Detailの変換点で、光度は一定に保たれても、面積の変化が著しく、灯浮標の灯質によっては、変換点が意識されてしまうことがあった。本稿の「改良型灯火の表現手法」では、変換点で光度を保つだけでなく、長距離にわたり面積の変化もギャップがなくなめらかで、灯浮標・灯台光源部の灯火表現がスムーズにおこなえている。

4.1.2 大気透過率の反映

図6 背景光オブジェクトの表現手法

同じく、関門航路の中から、5つの灯浮標と灯台を選択して、操船シミュレータ上に、本稿の「改良型灯火の表現手法」で表現し、5つの灯火を250m間隔で一列に表示する。それらの灯火の上空50mと100mに、同じ灯火にさらに「大気透過率を反映」させたものを同時に表示した。視程は、国際航路標識協会の標準視程10海里、半分の5海里でおこなった。視点位置を0mから10,000mまで変化させて、大気透過率を反映させた灯火とさせない灯火を比較し、主観的評価を聴取した。評価者は、同上である。

結果としては、大気透過率を反映させた灯火は、視程が悪い場合ほど、距離が遠ざかるにつれて、急激に表示されるオブジェクトの光度が小さくなり、視程が悪くなると、視認できる限度の距離が短くなるという自然現象が模擬できているという評価であった。

さらに、このシミュレータ実験中、画像と同時に、別のCRTに、画像表示されているオブジェクトの光度を表示して確認をおこなった。例えば、表2の関門航路第六号灯浮標は、距離2,500mで、大気透過率を考慮しないと、12.4カンデラ、標準視程10海里で8.3カンデラ、5海里では5.5カンデラのオブジェクトが表示されていることが確認でき、大気透過率の反映が意図した通りにおこなっていた。

実際のところ、光は、波長によって同じ視程でも大気透過率が違う。今回は、国際航路標識協会および世界気象機関による一般的な値を用いたが、今後は、このような点も検討して、より正確に大気透過率を反映した灯火のシミュレーションを行いたいと考えている。また、本稿では、光度の大きいところで人間が感じる光度間の差と、光度の小さいところで感じる差が同じであるとして、灯火の表現手法を求めている。これについても、今後改良の余地があると考えている。

4.1.3 背景光の表現の改良

この手法の有効性検証の第一段階として、基本モデルによる実験を実施した。

実験は、図6に示した概要を、そのまま操船シミュレータ上に再現した。背景光のテクスチャ付きのオブジェクトと比較のため表示した灯浮標オブジェクトを、それぞれ1つずつ500mの間隔で並べて表示した。これらに対して、視点位置を0mから10,000mまで変化させ、灯浮標および背景光が、その距離に応じて、適応するオブジェクトに変換されることを確認できた。

今後は、背景光についても、オブジェクトの共通化を図り、実海域の背景光の分布と光度に応じて、事前に簡便に背景光オブジェクトを生成することと、シミュレーション中でのスムーズな変換を行えるように、この手法の発展を目指したい。

4.2 航路視認性向上方策のシミュレータ実験

本稿で報告してきた手法のうち、3.1～3を、関門航路を対象として、船舶技術研究所の操船シミュレータ上で実現した。そして、航路の視認性を向上させる方策を検討する操船シミュレータ実験を行った。

4.2.1 実験の目的

拡幅、直線化がなされ、1996年1月6日これを表示するため、多くの灯浮標の再配置が完了した関門航路は、以前の航路に比べて、操船者の評判が良いようである。しかし、特に枝航路が短くなったことなどもあり、関門航路および枝航路の視認性にはさらに改良の余地がある。また、改良案そのものが優れていても、現在の機器設計生産技術では実現できないものやコストパフォーマンスが悪いシステムでは改良案として成り立たない。

本実験では、大幅な機器の仕様変更および利用者への告知に関しても実現可能と考え策定した方策（2章で示した方策）の基礎的な評価を行うものである。

4.2.2 実験条件

- (1) 海域：六連島南端付近から巖流島灯台西付近までの間で、西行と東行の両方について航行する。
- (2) 時間帯：夜間
- (3) 自船：眼高12m、総トン数3,000トン、船速12ノット
- (4) 他船：なし
- (5) 気象海象：晴天、無風、視程10海里
- (6) 背景光：参考文献1の論文と全く同じ背景光オブジェクトを使用。よって、灯浮標等と相対的光度は一致しない。
- (7) 評価者：海上保安庁灯台部および試験研究センターの航路標識担当者、計10人。
- (8) 対象標識：図1に示す対象海域内の全標識。

4.2.3 実験内容

(0) 実験0

比較のため、現行関門航路の航行。

(1) 実験1

関門航路と枝航路（安瀬、若松、戸畑、境川、砂津）を別系統の同期点滅にする（枝航路同士は同じ系統の同期点滅）。その交互点灯タイミングの時間差を、0.1～0.5秒の0.1秒刻みで5種類変化させる。

(2a) 実験2-a

関門航路の直線部（図1の斜線部のみ）をカスケード点灯方式（図1に方向明示）にし、その順次点灯の時間差を0.1～0.5秒の0.1秒刻みで5種類変化させる。関門航路の曲線部と枝航路については現行通り。

(2b) 実験2-b

関門航路全体（図1の太線全範囲）をカスケード点灯方式にし、その順次点灯の時間差を0.1～0.5秒の0.1秒刻みで5種類変化させる。枝航路については現行通り。

(3) 実験3

関門航路全体をカスケード点灯、枝航路を同期点滅にする。

4.2.4 実験手順

実験0～3の順番で実験を行う。前述した実験条件に従い、いずれも、東行、西行の順で航行する。航行中に、自由に船速を増減、停止できる。それぞれの実験の時間差は、最初0.1秒から始めるが、評価者の要求に応じて、ランダムに繰り返すことができる。実験中は、評価者同士で意見交換はせず、独自の評価をする。実験0では、次に述べるように自由討論による評価をおこなう。実験1～3では、評価者の独自の主観的評価を、各自アンケート用紙に記入する。全実験終了後、アンケート結果について討論をおこなう。

(0) 実験0

このシナリオに限り、実験中の評価者の意見交換を認め、現行の航路の認識をする。現行関門航路の航行環境を有しているかの評価もおこなう。灯火の表現手法の改良における効果については、4.1でおこなっているため、ここでは、参考文献1の論文と同様の評価のポイントについて、口頭で説明し、実験後に自由に意見（主観的評価）を述べあう。

関門航路の灯浮標・灯台・導灯を評価するうえでのポイントは次の通りである。

- シミュレーション中、一つの灯浮標・灯台が、同一のものであることを違和感なく判定できること。
- 灯浮標・灯台の灯質と光度により、何号ブイであるかが認識できること。
- 背景光によって灯浮標の見え方が妨げられること。
- 各導灯の側度感が、航行するうえで十分であること。

(1) 実験1

関門航路と枝航路の交互点灯タイミングの時間差5種類について、同順位なしで1位～5位のランク付けをアンケート調査票に記入する。

(2) 実験2-aおよび2-b

東行航行時に、赤色灯浮標側の時間差5種類について、西行航行時に、緑色灯浮標側の時間差5種類について、同順位なしで1位～5位のランク付けをアンケート調査票に記入する。

(3) 実験3

航路の視認性を向上させる方策として、いずれが優れているかを評価するため、実験3を実験0～実験2までの4つの実験と一対一比較して、同程度、実験3が優位、実験3が劣位かをアンケート調査票に回答する。

4.2.5 実験結果および考察

(0) 実験0

現行関門航路の航行環境を有しているかどうかの評価の結果は、10人とも、評価ポイントa、b、dを満足し、関門航路の航行環境として、十分に実現できているという評価であった。cについては、背景光が参考文献1の論文と全く同じものであるため、同じ問題点が残し、視点位置から遠いところでは背景光が灯浮標の光度より相対的に暗く、近いところでは反対に明るいという意見が出された。しかし、目的は

達していて、関門航路の背景光としての航行環境を有しているという評価が全員から得られた。

よって、本論文で提案している灯火の表現手法により、航行環境として十分なものが提供できていると考える。

(1) 実験 1

アンケート調査票を集計し、評価者のつけた順位の逆数をポイントとして、時間差ごとに合計をとったものを図 7 に示す。0.2秒が僅差で最適という結果になった。0.1秒と0.4秒については、一位とした評価者はなく、0.2秒 4 人、0.3秒 3 人、0.5秒 3 人が一位と評価した。

(2a) 実験2-a

実験 1 と同様に順位の逆数をポイントとして集計した。図 8 および図 9 が示すように、赤色と緑色とも0.3秒が最適、次いで僅差で0.2秒という評価であった。

(2b) 実験2-b

図10および図11に同様に集計した結果を示す。赤色では0.2秒が最適、次いで0.3秒、緑色では0.2秒と0.3秒が同ポイントであった。

実験2-aと2-bから、カスケード点灯は、0.2と0.3秒の時間差が適切といえる。

実験2-aと2-bで、0.2秒と0.3秒で逆転が見られることについて考察する。実験2-bでは、実験2-aよりも、遠い距離までカスケード点灯を順次目で追っていくことになる。カスケード点灯が最後までいったところを一区切りとして捉えと、赤色の場合は、見えている範囲でのカスケード点灯の一区切りが、実験2-aと2-bとでほぼ同じとなり、カスケード点灯一区切りごとのリズムが、評価者にとって好ましいものであったことが要因ではないかと考える。一方、緑色の場合は、実験2-aと2-bとで見えている範囲の灯浮標の数が1つ程度しか変わらないことと、緑色が赤色よりも見えにくいことから遠くまで視線をのぼして見るという点において、時間差があり、ゆっくり目で追っていける0.3秒の方が有利であることが、実験2-aと2-bでの赤色と緑色との結果の差になったと思われる。

(3) 実験 3

実験 3 をその他の実験と一対一比較して、航路の視認性を向上させる方策（同期点滅のみ、カスケード点灯のみ、カスケード点灯と同期点滅。それぞれ実験 1、2、3）の有効性について、同程度、優位／劣位をアンケート調査票に記号で記入した。同程度の場合はそれぞれ 0 ポイント、どちらかが優位の場合は、優位とした方を 1 ポイント、他方を 0 ポイントとして、アンケート調査票を集計し、最大値を 1 に標準化したものを図12に示す。この結果、実験 2 の関門航路のカスケード点灯のみを行う方策の評価が高いことが明らかである。

4.2.6 実験のまとめ

アンケート調査票の集計結果と討論から、航路視認性向上方策のシミュレータ実験は次のようにまとめられる。

実験 3 の結果からは、実験 1 よりも実験 3、実験 3 よりも実験 2 の方が有効であるとの結果になった。これは、実験で航行した航路が関門航路だけであり、関門航路の視認性を高めるという点においては、関

図 7 実験 1 の結果 交互同期点滅の最適時間差

図 8 実験2-a の結果 赤色灯浮標カスケード点灯(直線部)の最適時間差

図 9 実験2-a の結果 緑色灯浮標カスケード点灯(直線部)の最適時間差

門航路のカスケード点灯だけで効率よく行えるということを示している。実験後の討論においても、同じ意見が出て、そのことが裏付けられている。同期点滅よりもカスケード点灯の方が、有効であることの理由として、カスケード点灯方式は、一齐点灯である同期点滅方式とは違い、灯火と灯火が接近または重なる場合においても視認でき、航路形態の把握に優れているからという意見が得られた。カスケード点灯の時間差は0.2と0.3秒の評価が高かったが、この間に最適値が存在するかどうかについては、本実験だけでは結論が得られなかった。今後も検討を続けたい。

海域全体の航路の視認性を高めるという意味では、枝航路の視認性を高めることも目的の一つであったが、その点については明確に求めることができなかった。今後は、枝航路に重点をおいて実験を行いたい。ただし、実験3と実験2との差が小さいこと、現行の実験0よりも実験1が優れていることから、枝航路の同期点滅も有効と考えられる。これについては、実験後の討論でも、枝航路は現行では視認性が低く、同期点滅などの方策は必要であるとの意見が得られた。

操船シミュレータを用いて、航路の視認性を高めるための方策の検討を行った。本稿で提案した灯火の表現手法は、本実験において有効に働き、このような検討を行うのに十分な実験環境を提供できるものであった。

5. 前手法の問題点⁽¹⁾の改善

参考文献1の論文において、著者らは、操船シミュレータ上の灯火の表現手法について報告した。その際、次の2点が検討課題として残った。

- ①灯浮標等における灯火の灯質の切れがよすぎる
- ②背景光が、灯浮標等の灯火との光度比の模擬を実現できていない

本稿では、この課題に限らず、特に夜間における航路航行の安全性を高めるための検討を行うツールとして、操船シミュレータが必要とする、もしくは効果的に使用できる手法について報告している。4.1本手法の評価シミュレータ実験で、本手法の改良効果について述べたが、本章では、さらに、前手法の問題点の改善についてまとめておきたい。

①灯質の切れがよすぎる

本稿のシミュレータ実験時には、実行しなかったが、3.1同期点滅・カスケード点灯等の簡便な設定の手法を用いれば次のように実現できる。例えば、3秒1閃の灯質を表現するのに、現状である表1では、1行目のように、500milli-sec点灯2500milli-sec消灯としている。これを、100milli-sec、300milli-sec、100milli-sec、2500milli-secと設定し、アルゴリズムも、現在のオン/オフから、ハーフ/オン/ハーフ/オフというものにする。ハーフでは、オンで表示されるオブジェクトの光度の半分の値を持つオブジェクトを表示する。これにより、灯質の立ち上がり等の切れがよすぎることを改善できる。また、このハーフに表示するオブジェクトは、前手法では、それぞれの灯浮標ごとに固有のオブジェクトを作成しなくてはならないが、本手法では、オブジェクトの共通化をしてあるので、その中から選択するだけでよい。

②背景光との光度比の模擬がおこなえていない

図10 実験2-bの結果 赤色灯浮標カスケード点灯(全体)の最適時間差

図11 実験2-bの結果 緑色灯浮標カスケード点灯(全体)の最適時間差

図12 実験3の結果 方策の一対一比較

本稿の、3.4背景光の表現の改良で示した手法は、この問題点の解決を目的としたものである。方法については同項の通りである。その検証については、4.1本手法の評価シミュレータ実験に示したように、簡単なモデルのシミュレータ実験しかおこなっていないが、さらに効果については今後のシミュレータ実験で確認したいと考えている。

6. おわりに

夜間においても、航路を安全に航行する使命を負っている操船者の立場に立ち、他船や陸上の灯火に惑わされることなく、航路の識別性を含む視認性を高めることのできる航路航行環境について検討すべきときがきている。そのために、操船シミュレータを用いることとし、航路を示す灯浮標を効果的に検討するために、一般的なCGIのポリゴンを用いたシミュレータ上での灯火の表現手法を考案し、船舶技術研究所の操船シミュレータ上で実現した。本稿では、これらの手法についてと、同手法を用いて、関門航路の視認性を高めるための方策を検討するシミュレータ実験について報告した。本稿で提案した灯火の表現手法は、このような検討を行うのに十分な実験環境を提供できるものであった。今後も検討を深め、より効果的に、特に夜間における航路航行の安全性を高めるための検討を行うツールとして、操船シミュレータの完成を目指したい。

参 考 文 献

- (1) 田中他：操船シミュレータ上の灯火の表現手法とその評価，日本航海学会論文集第95号，平成8年9月。
- (2) 海上保安庁編：航路標識基礎理論光学編。
- (3) 照明学会編：ライティングハンドブック，オーム社。
- (4) 福田忠彦：生体情報システム論，産業図書出版，平成7年10月31日。
- (5) 橋本 進：視覚情報とヒューマンエラー，海文堂，平成8年11月10日。

質 疑 応 答

古莊雅生(神戸商船大学)：視覚特性と大気透過率という環境特性を考慮しながら新しいシミュレータ手法により航路環境の改善対策のひとつとして開発された点を高く評価します。“buoy.candela”という用語について耳慣れない用語ですので詳しくご教示ください。

宮崎恵子：本文でも述べましたように、実際の世界では、光の光色および光度は、たいへん広く分布していますが、CGIでは、狭い範囲しか輝度を表現できません。シミュレータ上では、実物の灯浮標と全く同じ光度を表示することは不可能ですので、CGIの各灯浮標間の光度の比が、実際の標識間の光度と同じ比で表現できるように、灯浮標の光源部分のオブジェクトをポリゴンで作成しました。そのとき、基準とする灯浮標を決め、それを基に、各灯浮標の実際の光度を標準化して、標準位置である視点から2,500m位置のスクリーン上の光度buoy.candelaを求めます。この名称は、著者らがこのシミュレーションで用いるためにつけたもので、シミュレーションの中での各灯浮標の光度です。このbuoy.candelaを基に、各位置における当該灯浮標の見かけの光度を計算し、それに対応するオブジェクトを共通オブジェクトから選択し、表示します。