鳴門海峡における橋梁灯の効果について

和気 博嗣*・原 潔*

On the Effects of Bridge Lights on the Bridge over Naruto Kaikyo on Ship's Track

Hirotsugu WAKE and Kiyoshi HARA

Abstract

The construction of several long bridges over the Seto Inland Sea are in progress. Bridge lights are very important for safety vessel traffic. In this paper we investigated the effects of these lights on the statistical characteristics of ship's track distributions. The ship's tracks were observed by radar on two different light-conditions at Naruto Kaikyo. One was there was only one temporary light on the center of bridge. The other was there were both a center light and side lights on the bridge. The result are summarized as follows:

- (1) The basic navigational rule of keeping to the right becomes more clear by fitting the side lights on the bridge.
- (2) The standard deviation of ship's track distributions increases approximately proportionally to the square of the distance from the bridge.

Although these results obtained for a bridge at the strait, it is conceivable that they are applicable to the same case of other bridges.

1. は じ め に

現在、瀬戸内海各地で大規模な架橋工事が相次ぎ、既に完成したものや、目下進行中のものもあるが、いずれもその対応を誤れば船舶の安全航行が阻害される場合も考えられる。そのため、航行援助の一つとして、橋梁灯が設置されているが、船舶の航行上に与える効果について、これまで定量的な評価があまりなされていない。

また、一般に沿岸航海中、船首目標を設定することは、保針や変針および船位の確認をする上で非常に重要である。特に潮流の強い狭い水道等では、操船上の確な判断を与える上で不可欠なものともいえるであろう。

鳴門海峡は従来より海上交通の難所として知られているが、これまで顕著な船首目標がなかった。そこに大鳴門橋が完成し、橋梁自体および橋梁灯の設置により、ここを通航する船舶に少なからず影響を与えているものと思われる。

今回は、大鳴門橋の建設中及び完成後の2度にわたる現地での交通調査に基づいて得られた航跡分布を比較することにより、橋梁灯の効果が船舶の航跡分布にどのように表われているのかを考察した。

2. 交通調査及びその解析

現地での交通調査は、大鳴門橋が建設中であった昭和59年11月28日と、同橋が完成・開通(昭和60年6月8日)後の同年7月10日に現地の3P工事事務所において、各24時間の目視観測及びレーダ観測を行った。図1に鳴門海峡付近の地理状況を示す。(＋印が観測地点)

* 正会員 神戸商船大学(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

第1回観測時には橋梁灯として、中心灯のみが仮設されていたのに対して、第2回目の観測時には図2に示すように、中心灯及び両側の側端灯などが完備されていた。ただし、第1回観測時の仮設中心灯の位置は、水平位置は図2に示す点で、垂直位置は橋のメインロープの位置に設けられていた。こうした状況の下での両観測を比較することにより、橋梁灯の効果を見出すことを試みた。

図1 鳴門海峡略図

図2 大鳴門橋灯火配置図

2.1 観測結果の概要

通航隻数等の観測は、3P工事事務所から鳴門側にある孫崎灯台を見通す線を通するものを観測した。第1回観測時は、通過隻数400隻（内漁船109隻）、第2回目は472隻（内漁船190隻）であった。各回の船型別、船種別の通航隻数を図3及び図4に示す。2回の観測を比較すると、第2回目観測時の漁船が1回目に比べて約2倍近くになっている。これ以外は、船型別には100～500トンクラスのもの及びその殆どが漁船である20トン未満のものが多いこと、船種別には、一般貨物船と漁船及び小型タンカーがその大部分を占めるという傾向には変わらない。当時の潮流については、両観測時とも小潮時に近く（第1回目の月齢は5.0、第2回目の月齢は22.0）、潮流の大きさには顕著な差はない。また、当時の気象状況として、第2回目観測時の夕方頃に南寄りの風が強かった程度で、天候、視程などに大きな相違はなかった。

なお、鳴門海峡には多くの漁船のほか、観潮船や架橋工事用の作業船など、特異な航行をする船舶があるが、以下の解析では、一般船舶の状態を把握するという観点から、これらの漁船、観潮船、作業船は除外した。従って解析の対象となった隻数は、第1回目が261隻、第2回目が246隻である。

2.2 航跡の分析

以上のような2回にわたる目視及びレーダ観測で得られたデータをもとに、まず、昼夜ならびに北航船、南航船別の航跡図

図3 船型別・船種別通航隻数
(第1回観測時) 図4 船型別・船種別通航隻数
(第2回観測時)

を作成した。第1回観測時における昼間の北航船の例を図5に示す。

次にこれら航跡図の全体的な分布を眺め、大筋の流れにほぼ直交するように適当な間隔でゲートライン(G1～G6)を設定した(図5)。このように、ゲートラインを比較的狭い範囲に多く設けたのは、最狭部に進入する船舶の動向をより詳細に把握しようとする為である。こうして設定した各ゲートライン上で、距離別通過隻数のヒストグラムを描き、それらの平均値及び標準偏差を求め、第1回及び第2回の昼夜別、南北航別等の比較をすることにより、各航行状態の特性を分析した。

なお、各ゲートライン上における航跡分布は、すべてほぼ左右対象の釣鐘型であり、航跡分布の累積相対頻度を求めて正規確率紙による正規性のチェックをした結果、極めてよく正規直線と一致し、これらの航跡分布が正規分布で近似できることを確認した。

各ゲートライン上で得られた航跡分布の平均値及び標準偏差を、海峡全般にわたって比較できるように、図6～図9を作成した。これらの図は、仮設の中心灯のみで側端灯なし(第1回観測時)の昼間(図6)及び夜間(図7)、側端灯及び中心灯が

図5 北航船の航跡図(中心灯のみ：昼間)

図6 中心灯のみ(昼間)

図7 中心灯のみ(夜間)

図8 中心灯及び側端灯のある場合(昼間)

図9 中心灯及び側端灯のある場合(夜間)

ある(第2回観測時)場合の昼間(図8), 夜間(図9)の様子をそれぞれ示したものである。

これら4つの図で, 三角形の底辺の広がり(標準偏差 $\pm 1\sigma$)の大きさを示し, 三角形の高さが通航隻数を表わしている。また, 三角形の底辺の中点を連ねた線が, 分布の平均的な動向を表わしている。

それぞれの図を比較して, その特徴を挙げると,

- (1) 全体的にみて, 平均的には右側通航の傾向がみられる。
- (2) 側端灯のない場合の昼間及び夜間, ならびに側端灯があっても昼間の場合には, 平均的には橋の中央付近に集中する傾向が大であるのに対して, 側端灯及び中心灯が完成した第2回観測時の夜間の場合には, はっきりと右側通航をしている。
- (3) 分布のばらつき(標準偏差)については, 橋下(G3)付近に近づくにつれて, ばらつきは小さくなっている。

このように, 中心灯及び側端灯が設置された場合は, 中心灯のみであった場合に比し, 南・北航行の平均的な隔たりがかなりはっきりと表われている。この点から, 橋梁灯の灯火の効果を, 以下においてさらに詳細に考察を加えた。

3. 分析結果の考察

前図において海峡全体にわたっての分布状態をみてわかるように, 特に第1回観測時(側端灯なし)の夜間の状況と, 中心灯及び側端灯ができた第2回観測時の夜間の様子を比較すると, 両者の間に明らかな差がみられる。このような差をより定量的にとらえる為に, (1)各ゲートライン上での南・北航行の平均値の差をとり, 側端灯なしの場合と側端灯ありの場合の昼間及び夜間におけるこれらの値の比を考える。(2)船舶の航跡分布のばらつきについては, 各ゲートライン上での標準偏差そのものを吟味すると同時に, 南・北航行別に昼間, 夜間における側端灯のない場合と, ある場合の標準偏差の比をもって考察した。

3.1 航跡分布の平均値の差

まず, 観測毎の南北航行の平均値の差を各ゲートライン上で取り出し, 昼間及び夜間におけるこれらの値の比を考える。この比が橋からの距離に対してどのように変化するかを示したものが図10である。

図10の中で一点鎖線で示したものが, 側端灯のない場合のものであり, 橋からの隔たりの大きいG1やG5, G6のところでは, 昼間に比しやや夜間の方が平均値の差が小さい傾向があり, 橋桁に近づくに従って夜間対昼間の平均値差の比が1に近づくなどかな変化を示しているものの, 全般的にみれば, 昼夜の平均値の差はほぼ同程度(比が1)であるとみなしてよい。

一方, 中心灯及び側端灯のある場合には, 図10の実線で示したように, 非常に極端な変化を示し, G1及びG6からの双方とも, 橋に向かっての平均値差の比は指数関数的に増加しており, 全体的に昼間に比し夜間の平均値差が断然大きいことを示している。この曲線は, 夜間対昼間の比を示したものであるが, このことは, 側端灯が設置されても昼間においては, 夜間に中心灯のみがある場合とほぼ同様に, 橋の中心付近に向かって集中して行く傾向が強く, この事実は前掲の図8をみてもわかる。これに比べて, 側端灯が設けられた夜間の動向は, 南・北航行の平均ラインがはっきりと離れる為に出てくる結果である。

G1及びG6から橋に向かう場合の平均値差の比の増加傾向は, 指数関数として回帰することができる。その結果, 両者はほぼ同様の曲線であることがわかった。このように側端灯がある場合とない場合の昼・夜の比を比較することにより, 側端灯の効果が明らかに表われていることがわかったが, 灯火による効果は夜間において顕著であるから, 1回目と2回目観測時の夜間における比をとることによって, その効果を検討した。

図10中に示した点線は, 夜間における側端灯ありの場合と, 側端灯なしの場合の平均値の差の比を示したもの

図10 橋からの距離による平均値差の比の変化

であり、G 1からG 4までは、側端灯のある場合の平均値差が側端灯のない場合に比べて約 1.5 倍ある。これは中心灯のみであった場合に比べて、側端灯が増設された場合には、南北航行の平均的な隔たりが約 5 割増しになることを意味している。ただし、この傾向は、橋からの距離が離れてしまうと効果が現われず、G 6 付近では全くその効果がみられない。以上のように、夜間における側端灯の有無についての比較においても、南・北航行の平均的な距離の大小に影響が出ることが判明した。

3.2 航跡分布の標準偏差

次に航跡分布のばらつき（標準偏差）についてその特性を検討した。

側端灯のない場合と側端灯のある場合について北航船及び南航船に分けて、各ゲートライン上で得られた分布の標準偏差を縦軸にとり、平均値の差の場合と同様に、橋からの距離を両横軸にとって距離によるばらつきの変化をみると、図11から図14に示すとおりである。これらの図から全体的な特性をまとめてみると、次の傾向がみられる。

図11 距離によるばらつきの変化
(中心灯のみ：北航船)

図12 距離によるばらつきの変化
(中心灯のみ：南航船)

図13 距離によるばらつきの変化
(側端灯あり：北航船)

図14 距離によるばらつきの変化
(側端灯あり：南航船)

- (1) 標準偏差は橋からの距離のほぼ 2 乗に比例して増大している。
- (2) 中心灯のみの場合には、南北航行ともに橋の真下 (G 3) 付近でばらつきが最小になる傾向がみられるが、側端灯のある場合には、やや G 4 側に最小点がずれる傾向がみられる。
- (3) 中心灯のみの場合には、距離によるばらつきの増加が大きいのに比し、側端灯のある場合にはその増加傾向がゆるやかになり、図13、図14に示すように鍋底型のカーブとなる。

このように、全体的には類似した 2 次曲線としてとらえることができるが、今一例として側端灯のない場合の、北航昼間の曲線 (図11の実線) について回帰式を求めてみると、次のようになる。

$$\sigma = 50.8 + 13.4d + 163.6d^2 \text{ (m)}$$

$$\text{標準誤差 } E = 14.2 \text{ (m)}$$

.....(1)

但し、 σ ：標準偏差(m)

d ：橋からの距離(km)

である。

また、標準偏差は、井上の分析⁽⁴⁾のように、可航幅と交通量で決まるが、今回のように橋軸線上で可航幅が急激に狭くなるような海域では、その最狭部からの距離の2乗で標準偏差が大きくなる。この傾向をより詳細に説明するには、操船シミュレータ等を用いた人間—航行環境系の分析をなお進める必要がある。

次に北航船、南航船別に、平均値の差で行ったのと同様の手法を用いて、昼間、夜間それぞれにおいて側端灯がある場合とない場合の標準偏差の比が、橋からの距離によってどのように変化するかを調べた。北航船の場合を図15に、南航船の場合を図16に示す。

まず北航船の場合（図15）をみると、昼間においては、G 6、G 5付近で側端灯がある場合の方がばらつきは小さいのであるが、G 4付近から逆転して側端灯のある場合の方がない場合よりもばらつきが大きくなっている。

一方、夜間においては、一貫して側端灯がある場合の方が、ばらつきは小さい。これは側端灯及び中心灯の両方が設けられている効果であると考えられる。また、図にみられるように、G 6からG 3に至る距離における標準偏差の比の変化は、昼間、夜間ともよく似ており、これらもまた、2次曲線に近似できる。しかも、両者はいずれもG 5付近で極小点がある。即ち、最狭部通過のために、約800m程手前で側端灯つまり可航幅を意識し始める点と考えられる。この海峡を通過する船舶は上述したように100~500GTが大部分なので、その平均船長を35mとすると、この距離は約23Lとなる。

橋桁下を通過後は、それまでの急激な変化とは一変して、どちらも直線的な、なだらかな変化となり、目標物を通過した時の状態をしばらくの間維持する傾向がみられる。

次に南航船の場合（図16）についてみると、北航船の場合に比べてかなり様子が異なる。即ち、矢印の方向にG 3に向かって接近する場合、昼間においては側端灯の効果は殆ど現われておらず、側端灯のない場合との比はほぼ1である。一方、夜間においても、G 1付近で側端灯のある場合の方がややばらつきが小さいものの、橋への接近と共にほぼ直線的に、側端灯のある場合の方がばらつきは大きくなる。

図15 標準偏差の比の変化（北航船）

図16 標準偏差の比の変化（南航船）

このように南航船の分布のばらつきについては、橋梁灯の効果が現われていないように見えるが、これは南航船にとって、特にG 1における分布の特異性によるものと考えられる。即ち、G 1に進入してくる船舶は、(1)すぐ西側の亀浦港から出てくるもの、(2)備讃から四国沿岸に沿って入ってくるもの及び(3)播磨灘から進入するものの大体3方向が考えられ、かなりの拡がりを持った形で進入して、極く近距離の間に橋下を通過することになる。こうした状況の下では、北航船のように比較的遠い所から、ほぼ定まった方向からの分布形態をもって航行してくる場合と違って、端的な橋梁灯の効果が抽出できないものと推定される。

4. 結 論

今回鳴門海峡における2度の交通調査に基づいて得られた結果より、橋梁灯の効果に着目して、仮設の中心灯のみであった第1回観測時と、中心灯及び側端灯が完備した後に行った第2回観測の船舶の航行分布状況を統計的に比較することによって、定量的な特性を導き出すことを試みた。その方法として、分布の平均値の差及び標準偏差を用いて検討して来たが、今回得られた結論をまとめると次のようになる。

鳴門海峡においては

- (1) 全体として、平均的には右側通航が行われている。
- (2) 側端灯の設置によって、より一層右側通航の傾向がはっきりしてくる。
- (3) 側端灯の有無による南北航行船の通過位置の平均値の差は、側端灯がある場合にはそれがない場合の約5割程平均距離が増加する。
- (4) 中心灯のみで側端灯のない場合や、側端灯があっても昼間の航行においては、南北航行船ともに、橋の中央付近を目標に集中する傾向がみられる。
- (5) 分布のばらつき（標準偏差）は、橋からの距離の2乗に比例して大きくなる。
- (6) 北航船に関しては、特に夜間における側端灯の効果が認められ、また橋の手前約800m付近で極小点が現われることから、側端灯のある場合に可航幅を意識し始める点がこの付近にあるものと推察される。ただし、南航船に関しては、航跡分布の特異性の為か橋梁灯の効果が明らかには現われていない。
- (7) 中心灯及び側端灯の効果は、以上のように平均値の差及び標準偏差の両面から検出できた。

以上の結果は、鳴門海峡における調査に基づくものであるが、順次完成する各橋梁においても、船舶がより安全に正確な運航を実施する為には、適切な橋梁灯あるいはそれを含めた航行援助施設が不可欠のものとなるであろう。大鳴門橋に関していえば、架橋による海上交通の容易さの点では総じて肯定的であり、また、航路中央を示す灯火及び航路幅を示す灯火に要望が多かった⁽²⁾のも、本研究の結果をうらづけるところである。

今回得られた結果は、今後完成する同種の形態の架橋においてもあてはめ得ると推察される。

本研究は、神戸海難防止研究会の、鳴門海峡航法調査委員会における研究の一部として実施したものである。

最後に、2度にわたる鳴門海峡での調査並びに結果の検討について有益な討論をして戴いた同委員会の樽美委員長を始め各委員の方々に感謝の意を表する次第である。また多大なデータの整理にご協力いただいた本学卒研究生の小川達夫君、金広茂章君及び滝沢秀浩君に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 井上欣三：直線航路における航跡分布のモデル化と航路分離に関する一考察，日本航海学会論文集，第56号，P103～115，昭和52年12月
- (2) 本四公団第1建設局・海技大学校電波計器教室：狭水道におけるレーダ使用状況に関するアンケート調査，昭和59年2月

質 疑 応 答

山村三朗（神戸商船大学）：自船周辺の他船の状態、特に反航船の存在が大きな影響を持つのではないかと思います，この点いかがお考えでしょうか。

和気博嗣：お説の通り他船の航行状態が大きな影響を持つと思われます。従って鳴門海峡においては漁船の状況や反航船の存在及び潮流の影響も考慮して検討しなくてはならないと思われます。一つの方法として、各船の状況を一船毎に解析してその上で判定することも考えられますが、今回は2度にわたる観測結果を統計的な手法で処理する方法を用いました。なお、両観測における通航隻数がほぼ同じであったこと、及び潮流や気象条件にも顕著な差がなかったことから、平均的には反航船の遭遇もほぼ同程度と考えられ、両観測を比較するとこれらの要素は相殺され、目的とする灯火の効果が残ってくるものと考えています。

辻 啓介（大島商船高専）：最後に示された図（本文図15）は北航船舶のものであったと思いますが、南航船の傾向は同じなのでしょうか。

和気博嗣：講演会場には南航船の図を用意しておらず、十分な説明ができませんでしたが、南航船の傾向は北航船のそれとかなり相違します。本文に図16を使って説明した通りです。