操船者の眼球運動特性と見張り

古荘 雅生* ・ 友永 正昭**
 福田 忠彦*** ・ 甲斐 繁利****

A Lookout of the Ship's Operator from the Standpoint of Sight-line Displacement

Masao FURUSHO, Masaaki TOMONAGA,
 Tadahiko FUKUDA and Shigetoshi KAI

Abstract

We have already reported on the characteristics of a lookout in the daytime and at night by using the eye-movement analyzer called "eye-pointer".

This time, we show the remarkable points added the other new data in the twilight with the measurement of the eye-movement by the same way.

The remarkable points of the characteristics of the eye-movement related a lookout of ship's operator are as follows ;

1. The extent of fixation point shown by the ellipse with the standard deviation of the fixation angle has a normal tendency being wide horizontally. But in case of the Jet-foil's navigator in the daytime and on the open sea, the extent of fixation point has a special tendency being wide vertically.
2. The average interval of fixation time at night and in the twilight is about 150msec. That in the daytime is about 60msec. On the other hand, by the average speed of sight-line displacement of the eye, the eye-movement of ship's operator is saccade movement in the daytime and in the twilight, and that is smooth pursuit movement at night. Ship's operators conduct the lookout affairs by looking and searching the obstructive targets at night and in the twilight, and by seeing them in the daytime, because of more or less of the visual informations from the ship's environment.
3. The relation every one unit observing duration (33msec) in the daytime between the average speed of sight-line displacement of the eye and the number of fixation point can be shown by the approximate formula ;

$Y = 1827 / X + 31.8$ (Y : the number of fixation point, X : the speed of sight-line displacement of the eye (average rate) (deg/sec), correlation coefficient : -0.82)

4. In the twilight, the average fixation time is more longer and the average speed of sight-line displacement of the eye is more faster, both than that in the daytime.

So it is very difficult to catch the visual informations of the targets at sea, in the twilight, ship's operators should have special cautions for preventing ship's collision.

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 正会員 東京医科大学霞ヶ浦病院 (〒300-03 茨城県稲敷郡阿見町中央3-20-1)

*** 非会員 慶應義塾大学 (〒252 神奈川県藤沢市遠藤5322)

**** 正会員 運輸省航海訓練所 (〒231 神奈川県横浜市中区北仲通5-57)

1. はじめに

船長や航海士等の操船者は、視覚・聴覚等のあらゆる感覚機能と双眼鏡・レーダー等の船舶搭載機器の機能を活用しながら、そのときの状況に適した方法と手段により見張りを行わなければならない。そして衝突・乗揚げ等の海難事故を防止することにより、人命と財貨の安全な輸送業務を遂行する責任がある。しかし、船舶の大小や航行海域の広狭を問わず海難事故が発生し、特に衝突事件の海難原因は、その50%以上が「見張り不十分」であると指摘されている⁽¹⁾。「見張り不十分」と指摘される原因について、さらに明らかにするため、操船者がどのような見張りを行っているかを把握する必要がある。

筆者らは操船者の眼球運動を測定し、主として視覚による見張り特性の研究を継続して行っている。そして、テクノスーパーライナーの研究開発に象徴されるような船舶の高速化時代を迎え、高速船（ジェットフォイル）操船者の見張り特性をはじめ、一般速力船操船者の見張り特性を明らかにしてきた⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

これらの実船実験と平成7年8月に実施した練習船北斗丸による実船実験に基づく眼球運動測定の結果をまとめ、操船者の眼球運動特性に基づく見張りの特性に関する知見が得られたので報告する。

2. 実験概要

実船実験の概要について、実験年月日、実験海域、航行海域区分、実験海域、使用船舶、被験者等を表1に示す。

実験海域を図1に示す。航行海域区分とは、船舶が航行する実験海域をその広狭により「港内」、「狭い水域」、「広い水域」という3区分としたものである。

使用船舶の主要目を表2に示す。航海速力の異なる船舶の操船者を対象とするため、高速船としてのジェットフォイル（“JET-8”及び“すいせい”）と一般速力船としての練習船（“大成丸”及び“北斗丸”）を使用した。

また、被験者の詳細を表3に示す。年齢による影響を考慮し、実験当時の年齢は37～43歳である。いずれの被験者も色覚は正常で、眼科的疾患はない。

実験には強膜反射方式の眼球運動測定装置〈アイポインター：竹井機器株式会社製〉を使用した⁽²⁾⁽³⁾。

表1 実験概要

番号 No.	実験年月 西暦年／月	実験海域	航行海域区分	使用船舶	速力 ノット	被験者	昼夜別
1	90/07	大阪港内	港内	J E T - 8	12	H	昼間
2	"	小豆島地蔵埼沖	広い水域	"	43.5	"	"
3	"	明石海峡	狭い水域	"	43.5	H	"
4	"	大阪港内	港内	"	12	M	"
5	"	播磨灘・明石通狭後	広い水域	"	43.5	"	"
6	90/07	明石海峡	狭い水域	J E T - 8	43.5	M	昼間
7	91/01	播磨灘	広い水域	大成丸	15	O	昼間
8	91/01	明石海峡	狭い水域	大成丸	15	O	昼間
9	92/11	佐渡・両津港	港内	すいせい	10	Y	昼間
10	"	佐渡・両津港	港内	"	10	"	夜間
11	"	佐渡海峡中央部	広い水域	"	45	"	昼間
12	"	佐渡海峡中央部	広い水域	"	"	"	夜間
13	"	姫埼西方・両津港出港後	狭い水域	"	"	"	昼間
14	92/11	港口1海里・新潟入港前	狭い水域	すいせい	45	Y	夜間
15	95/08	釧路港出港	港内	北斗丸	7	I	昼間
16	"	北海道南東岸	広い水域	"	15	"	夜間
17	"	北海道南東岸	"	"	"	"	昼間
18	95/08	三陸沖	広い水域	北斗丸	15	I	薄明

表2 使用船舶主要目

	旅客船／ジェットfoil		練習船	
船名	JET-8	すいせい	大成丸	北斗丸
区分	高速船	同左	一般速力船	同左
全長(m)	30.4 (水中翼を上げた状態) 27.4 (水中翼を下げた状態)	同左 同左	120.84	120.80
垂線間長(m)	24.0	同左	115.00	同左
型幅(m)	8.5 (最大9.1)	同左	17.00	同左
型深さ(m)	2.6 (base line～main deck)	同左	10.50	同左
喫水(m)	約 1.5 (満載型喫水) 約 2.2 (水中翼を上げた状態) 約 5.4 (水中翼を下げた状態)	同左 同左 同左	5.80	同左
総トン数(トン)	約 170	同左	5886.22	5877.19
実験時 <港内>	約 12	約 10	—	約 7
航海速力 <狭い水域>	約 45	同左	約 15	約 15
(ノット) <狭い水域>	約 45	同左	約 12	—
主機	ガスタービン (water jet pump 2060rpm)	同左	蒸気タービン	同左
連続最大出力(PS)	3800×2	同左	7000	同左
搭載人員(名)	約 300	約 280	214	244
眼高(m)	約 7.5 (翼走時)	同左	約 14	同左
停止距離(m)	約 90	同左	約 900	同左

表3 被験者

船名	被験者	年齢	視力		色覚	眼疾患	備考
			裸眼	矯正			
JET-8	H 船長	43	R 0.9 L 0.5	R 1.2 L 1.0	正常	なし	船長歴 2年1か月
JET-8	M 船長	39	R 0.8 L 1.2	R 1.5 L 1.2	正常	なし	船長歴 1年8か月
すいせい	Y 船長	43	R 1.5 L 1.0	— —	正常	なし	船長歴 1年5か月
大成丸	O 一等 航海士	43	R 1.5 L 1.2	— —	正常	なし	航海士歴 約20年
北斗丸	I 次席一 等航海士	37	R 0.5 L 0.7	— —	正常	なし	航海士歴 約14年

とは、その眼球運動速度が30deg/sec以上で、視線が指標の速度に追従できず飛ぶように速く移動し、視線が跳躍中には指標を認識できないような状態と定義する。

4. 実験結果

解析方法に示す解析項目を含み、表1に示す実験概要の番号(表中の左側)に対応する実験結果を表4に示す。注視点の広がり、X軸、Y軸に対応するそれぞれの注視角度(degree単位)の標準偏差で示される。また、扁平率は、扁平率 = {(長径軸注視角度の標準偏差 - 短径軸注視角度の標準偏差) / 長径軸注視角度の標準偏差} により計算したもので、その値が0に近いほど円形に近い。

定性的要素①「注視点の広がり」について、船舶の違いによる結果を図2に示す。

注視点の広がり、船舶の違いにかかわらず、水平線下方のそれと平行な水平方向に注視点が分布するという一般的傾向が見られる。特徴的な傾向は、ジェットfoilが、昼間、広い水域を翼走状態で高速

表 4 実験結果

番号 No.	注視点の広が 長径軸 X軸 or Y軸	注視点の広がり 長径軸 標準偏差 (deg)	注視点の広がり 短径軸 標準偏差 (deg)	注視点の広がり 扁平率	平均注視時間 (m sec)	注視点数 1000分の 換算値	眼球運動速度 平均値 deg/sec)	眼球運動	サンプリング データ数
1	X軸	8.65	4.07	0.53	42	72	33.7	跳躍	1000
2	Y軸	5.48	4.77	0.13	39	70	40.3	跳躍	1000
3	X軸	5.69	3.00	0.47	45	128	25.6	随従	1000
4	X軸	9.08	5.27	0.42	46	54	50.3	跳躍	1000
5	Y軸	4.86	3.91	0.20	55	75	30.7	跳躍	1000
6	X軸	6.99	5.72	0.18	44	84	41.4	跳躍	1000
7	X軸	5.68	1.26	0.78	47	169	15.4	随従	700
8	X軸	5.10	1.39	0.73	41	139	22.5	随従	440
9	X軸	4.64	1.39	0.70	43	108	17.8	随従	600
10	X軸	7.81	1.86	0.76	193	98	19.7	随従	1000
11	Y軸	2.89	2.76	0.05	69	79	49.7	跳躍	1000
12	X軸	4.15	2.36	0.43	114	126	15.0	随従	1000
13	X軸	6.83	1.71	0.75	66	115	26.3	随従	1000
14	X軸	2.56	1.41	0.45	167	83	14.7	随従	800
15	X軸	5.97	4.81	0.19	76	95	26.9	随従	1000
16	X軸	10.94	4.95	0.55	99	67	37.1	跳躍	1000
17	X軸	7.78	2.27	0.71	97	130	15.7	随従	1000
18	X軸	11.37	4.56	0.60	148	52	48.1	跳躍	1000

航行中、Y軸を長径軸とする扁平率0.20以下で、上下方向に注視点の広がり示すことである。

平均注視時間は、航行海域、速力、船舶という要素の違いには関係がない。しかし、昼夜という明暗の違いには有意な差(有意水準5%のt検定)が認められる。その結果、平均注視時間は、昼間55msec、薄明148msec、夜間143msecとなり、昼間は短く、薄明と夜間は昼間と比べて長い。昼夜別の平均注視時間と眼球運動速度との関係を図3に示す。

注視点数は注視時間と同様に操船者が注視する状態を示し、眼球運動速度は、視線が移動する様子から操船者の眼球運動特性を推察することができる。昼間の眼球運動速度に対する注視点数の変化を図4に示す。この注視点数と眼球運動速度について、特に昼間の結果には、高い負の相関(相関係数: -0.82)が見られる。

図2 注視点の広がり

5. 考 察

5.1 注視点の広がりによる眼球運動特性

操船者が視野内のどのような範囲で注視しているかを考察する。

操船者は、船舶航行の危険要因に対してできる限り早い時機に回避することができるように、常時適切な見張りを心がけている。

図2に示すように、注視点の広がり
は距離判断の目安となる水平線付近を
中心に、X軸を長径軸とするような水平
方向に広がるという一般的傾向がある。
しかし、ジェットフォイルが昼間、広
い水域でしかも翼走中、約45ノット(時
速約83km/h)の高速航行中には、Y軸
を長径軸とする上下方向に楕円近似で
表されるような注視点の広がりを示す。
さらに、眼球は跳躍運動の傾向があり、
視線の動きが素速い状況であることが
判る。進行方向の航行障害物を特に注
意しているというジェットフォイル船
長の話を裏付ける結果である。

ジェットフォイルの場合について、
昼間と夜間を比較する。

広い水域では、注視点の広がりが上
下方向に最も大きく広がっている点は共通している。この点は、高速船操船者が昼夜を問わず進行方向の
航行障害物を特に注意していることを示している。

次に港内と狭い水域を比較すると、昼間と夜間ではそれぞれ逆の傾向を示している。

昼間の視覚による見張りについて、操船者は航行海域の広狭を認識し、さらに海面との相対速度から航
海速力の大小を把握することは容易である。ジェットフォイル特有の操縦性能を考慮しながら、航行障害
物の認識と避航領域を確保するために、操船者の注視点の広がりは左右方向に大きくなる傾向を持つもの
と予想される。一方、艇走中の港内では、その航海速力が翼走中に比べて小さく、変針による避航よりも
減速あるいは停止による避航動作を取ることが予想されるため、左右方向の注視点の広がりは狭くなるも
のと推察する。

夜間の視覚による見張りは、距離判断の目安となる水平線を視認できず、さらに水域の広狭を認識する
ことができない。そのため狭い水域を翼走する場合には、上下方向、左右方向ともに広い水域に比べてジ
ェットフォイルの進行方向に沿って注視点が集中する傾向が大きい。一方、港内を艇走する場合、操船者
は航行海域を制約する岸壁・防波堤などの港湾構造物や他船という航行に支障となる物標を探索し、いち
早く視認しながら避航措置を判断する必要がある、昼間と比べてその視覚情報量は少ない。そして、夜間

図3 平均注視時間と眼球運動速度との関係(昼夜別)

図4 眼球運動速度に対する注視点数の変化(昼間)

は主として視細胞の桿体が機能し、同心円構造の網膜上に桿体が多く分布する周辺視を通じて明暗の感覚に関する視覚情報を得ている。また、両眼は視野の広さが左右方向それぞれ約 100° に及び、多くの情報を受容している⁽⁷⁾。そのため、一般的な注視点分布の傾向を重畳し、左右方向に注視点が広がるものとする。

一般速力船としての大成丸、北斗丸の場合を検討する。

夜間・薄明の場合と昼間の場合を比較すると、前者の場合、注視点の広がりや左右方向に広い。これは、主として視細胞の桿体が機能し、受容野が小さく、夜間・薄明のため視覚情報量が少ないにもかかわらず、ターゲットとなる物標の探索が、左右方向に幅広く行われていることを示している。後者の場合について、港内と広い水域を比較する。港内の場合、広い水域の場合より上下方向の広がりが大きい。これは、港内では航行海域の制約があり変針による避航が難しいため、できる限り早く航行障害物を認識し、早めの避航措置をとらなければならないからであろう。

5.2 昼夜（明暗）の違いによる眼球運動特性

明順応と暗順応、輝度差弁別閾、暗闇における視力の低下などに見られるように、人間の視覚系は明暗によって非常に異なる視覚特性を示す。昼間という明るい視環境に加えて、航行船舶の動静、航路障害物の有無、海面状況などという視覚情報量の多さが注視時間の長短に影響を及ぼすものと考えられる。一方、視線の動きを表す眼球運動速度は、昼間 32deg/sec 、薄明 48deg/sec 、夜間 22deg/sec となり、平均運動速度の違いが認められる。すなわち、昼間と薄明は跳躍運動が占める割合が大きく、夜間ではその割合が小さくなって随従運動を主体とした眼球運動になる傾向を読み取ることができる。昼間は、知覚される対象物の空間的な位置情報を把握するため、そして夜間は、航行の支障となる対象物の相対的な動きの情報を把握するためにそのような特性を示すものとする。薄明時は、視細胞の錐体と桿体の機能が入れ替わる時機であり、見張り上の要注意時間帯である。そのため、注視時間が長く眼球運動速度の最も大きな跳躍運動になるのではないかと推察する。

5.3 船種の違いによる眼球運動特性

昼間の結果をさらに船種毎に検討し、単位時間あたりの眼球運動速度に対する注視点数の変化を図4を示している。

5,000トンクラスの大成丸・北斗丸では、眼球運動速度の平均値から見ると、定義による分類では跳躍運動に該当する運動は認められない。しかし、ジェットフォイルでは航行海域の違いや速力の違いに関係なく眼球の跳躍運動が見られる。

図中の分数近似曲線 $\{Y = a/X + b$ 、係数 $a : 1827$ 、定数項 $b : 31.8$ [Y : 注視点数、 X : 眼球運動速度 (deg/sec)、相関係数: -0.82]} が示すように、眼球運動速度の増加に伴い、注視点数は減少する傾向がある。大成丸・北斗丸では注視点数は多く、眼球は随従運動の範囲で眼球運動速度は遅い。ジェットフォイルでは、注視点数は少なく眼球は跳躍運動の範囲で眼球運動速度のばらつきが大きい。この傾向は、昼間、船舶航行中の操船者が視覚情報を収集するときの眼球運動特性を示すものである。

6. まとめ

操船者の眼球運動特性と見張りについて、高速船（ジェットフォイル）と一般速力船（大成丸・北斗丸）それぞれの操船者を被験者とする実船実験の結果を次のようにまとめる。

6.1 注視点の広がりや見張り

(1) 操船者の注視点の広がりに関する一般的傾向について、注視点の広がりや水平線と平行な水平方向であり、操船者は進行方向の海面を左右（ X 軸）方向に注視しながら見張りを行う。

(2) 高速船操船者の注視点の広がりや、昼間、広い水域では進行方向の海面付近を中心とする上下（ Y 軸）方向であり、高速船操船者は進行方向を主体に見張りを行う。

(3) 港内と狭い水域における高速船操船者の注視点の広がりや、昼間と夜間ではそれぞれ異なった傾向を示す。その傾向の違いは、航海視環境の明暗の違いが航行海域の広狭と航海速力の大小を操船者に認識させ、それぞれの航行海域における避航要領の違いと、視細胞（錐体・桿体）の機能や視野という視覚情報処理過程の違いという生理的・心理的要素が原因である。

6.2 平均注視時間と見張り

昼間、薄明、夜間それぞれの平均注視時間は、昼間55msec、薄明148msec、夜間143msecとなり、昼間は短く、夜間・薄明には長い。昼間は知覚される対象物の状況を把握するという「見える」状態の見張りを行い、夜間には視覚情報量が少ないため、航行に障害のある物標を探索するという「見る」状態の見張りを行う。

6.3 眼球運動速度と見張り

操船者の眼球運動速度は、その平均値が昼間32deg/sec、薄明48deg/sec、夜間22deg/secとなり、操船者の眼球運動は平均運動速度の違いが認められる。すなわち、昼間と薄明は跳躍運動が占める割合が大きく、夜間ではその割合が小さくなって随従運動を主体とした眼球運動になる傾向を読み取ることができる。

6.4 昼間、単位時間（33sec）当たりの眼球運動速度に対する注視点数の変化と見張り

眼球運動速度の増加に伴う操船者の注視点数は、次式に示すような減少傾向があり、昼間、船舶航行中の操船者が視覚情報を収集するときの眼球運動特性を示すものである。

$$Y = a/X + b \quad \text{係数 } a : 1827 \quad \text{定数項 } b : 31.8$$

[Y: 注視点数 X: 眼球運動速度 (deg/sec) 相関係数: -0.82]

船種別では次のような特徴がある。

- ①一般速力船操船者の眼球運動は、随従運動の傾向があり、高速船操船者と比べて注視点数は多い。
- ②高速船操船者の眼球運動は、眼球運動速度と注視点数のばらつきが一般速力船操船者に比べて大きい。

6.5 薄明時の見張り

操船者の薄明時の見張りは、視細胞の錐体と桿体の機能が入れ替わる時機にあたり、注視時間が長く、眼球運動速度の最も大きい跳躍運動の傾向があり、物標の視認が極めて困難な状況である。見張り上の要注意時間帯である。

7. 謝 辞

船舶の安全運航にとって最も基本的かつ重要な「見張り」をテーマとした本研究は、橋本進氏（元東京商船大学教授）により始められたものである。研究当初から種々のアドバイスをいただきながら数多くのご教示を賜り、あらためて謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 海難審判庁：『海難審判の現況－平成8年版』，pp.49-50，1996.9月。
- (2) 古荘雅生・甲斐繁利・橋本 進：『視線の動きからみた高速船（ジェットフォイル）操縦者の見張りについて』，日本航海学会論文集，85号，pp.51-62，1991年9月。
- (3) 甲斐繁利・橋本 進・古荘雅生：『超高速船（ジェットフォイル）操縦者の見張りについて』，日本航海学会論文集，86号，pp.11-17，1992年3月。
- (4) 古荘雅生・甲斐繁利・友永正昭・岡辺光邦・橋本 進：『眼球運動からみた一般速力船操縦者の見張りについて』，日本航海学会論文集，87号，pp.59-66，1992年3月。
- (5) 古荘雅生・甲斐繁利・友永正昭：『夜間における高速船操縦者の見張りについて』，日本航海学会論文集，90号，pp.339-350，1994年3月。
- (6) 山田光穂・福田忠彦：『画像における注視点の定義と画像分析への応用』，電子情報通信学会論文誌，J69-D，pp.1335-1342，1986年。
- (7) 福田忠彦：『生体情報システム論』，産業図書，pp.30-34，1995年10月。
- (8) 福田忠彦・渡辺利夫著：『ヒューマンスケーパー視覚の世界を探る』，日科技連，pp.189-192，1996年6月。
- (9) 福田忠彦：『生体情報システム論』，産業図書，pp.30-34，1995年10月。

質 疑 応 答

鶴田三郎（東京商船大学）：「注視点の広がり」について、広がり大きさ・形状に関する一般的傾向をお

教えてください。

古莊雅生（神戸商船大学）：ご討論いただきありがとうございます。

陸上の四輪自動車と二輪オートバイそれぞれの運転者について本研究と同様に眼球運動を測定した結果が報告されています⁽⁸⁾。

二輪オートバイ運転者の眼球運動特性について、注視点の広がりには左右方向に狭く視野が狭くなり、また注視回数と注視時間を解析した結果は、注視回数は少なく注視時間は長いという結果から、四輪に比べ外界から受容できる視覚情報処理量は制限されると結論づけています。この結果は、本研究のジェットfoil操船者の昼間、広い水域における結果と同様な傾向を示しています。

眼球を運動させて視線が向けられる視野の範囲は、左右方向に約 $\pm 60^\circ$ 、上方約 40° 、下方約 60° とされています⁽⁹⁾。このような視野の範囲から見ると、注視点の広がりに関する一般的傾向は、左右方向であり、特殊なケースとして上記のような場合を例示できると思います。

佐藤尚登（海技大学校）：図1注視点の広がりについて、ジェットfoilの場合、昼夜間の狭い水域での注視点の広がりには顕著な差異が見られます。測定結果に加えてその差異についての考察をお願い致します。

古莊雅生（神戸商船大学）：ご指摘をいただきありがとうございます。

原著の5.1注視点の広がりの違いによる眼球運動特性にて考察します。昼夜という明暗が航行海域の広狭と航海速力の大小という操船者の認識に及ぼす相違と航行海域に応じた避航要領の相違による環境的要素の差異、そして視細胞（錐体・桿体）の機能や視野という視覚情報処理過程の相違により生理的・心理的要素の差異を原因として考察しました。