眼球運動解析によるヒューマンエラー防止のための危険予知

古莊 雅生* 平井 貴裕** 櫻井 美奈***

Foresight of Incidental and Dangerous Situation for Preventing Human Errors by Using Analysis of Eye Movement

Masao FURUSHO, Takahiro HIRAI and Mina SAKURAI

Abstract

It is very important to make foresight of the incidental and dangerous situation for preventing human errors. It is pointed out that almost causes of marine disasters are human errors. Authors propose the foresight training for preventing human errors by using the sample sheets including dangerous situations of vehicle transportation. In the industrial production field and the road traffic situation, excepting the marine traffic situation, the effect of the foresight training has been already confirmed. Especially in the marine traffic situation, the effectiveness of the foresight training is not confirmed yet.

This research by using eye-movement analyzer("Free-View") shows the characteristics of the foresight process relating to the human errors by using sample sheets including the incidental dangerous situations of the road traffic and the small boat.

Based on the experimental measurements, the results are as follows ;

- (1) There is a strong relationship between the characteristics of eye movement and the foresight ability of the incidental and dangerous situation, in case of judgement for the traffic situation.
- (2) The evaluation of foresight ability is strongly influenced by the static characteristics of eye movement of the average gazing position more than by the dynamic characteristics of the sight-line displacement.

1. はじめに

自動車交通や生産工場の作業場面では、災害や事故を防止するために危険予知という手法を取り入れ、その効果が報告されている⁽¹⁾。しかし、船舶交通や海上労働における危険予知活動の導入が呼びかけられているものの、それを評価した報告はなく、より有効な危険予知活動の手法を導入することが必要である。さらに、災害原因がヒューマンファクターによるものとの指摘も多く、災害防止の観点から効果的な手法を開発する必要がある。

そこで、既に従来から用いられている日本自動車

連盟（以下“JAF”）が発行している道路交通場面の危険予知シートと、神戸商船大学が作製したプレジャーボート版危険予知シートを提示しながら、非接触眼球運動測定装置（以下“Free-View”）を用いた実験を行い、危険予知シート（静止画）から得られる視覚情報を認識する際の一般的な視覚特性や、危険な状況を認識する際の眼球運動特性を通じて危険予知活動の手法と評価に関する知見を得たので報告する。

2. 危険予知

海上交通システムの構成要素は、その安全管理手

* 正 会 員 神戸商船大学（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1）

** 学生会員 神戸商船大学大学院（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1）

*** 学生会員 慶應義塾大学大学院（〒252-8520 藤沢市遠藤5322）

図1 危険予知訓練 (KYT) の位置づけ

法を検討するとき、1. Man(人間)、2. Machine(船舶)、3. Media (環境)、4. Management (管理) という 4M の要素に分けられる。危険予知は、これらの構成要素のうち、“Man” の要素（ヒューマンファクター）に焦点を向けたヒューマンエラー予防策の一つである。

筆者らが考案したこれらの構成要素と危険予知との関係モデルを図1に示す。そのモデルではシステム管理者としての人間は、航行環境にある様々な情報という刺激を受けながら、予測、判断、操作というフィードフォワードとフィードバックのループ的な繰り返しのプロセスを経て、人間行動の目的達成に向けた行動を実行すると捉えている。危険予知とは、このようなループのプロセスを含む人間行動の目的を達成するための行動改善手法であり、1. 危険な状況に対する感受性を高め、2. 危険な状況に適応する集中力を涵養し、3. 危険な状況を脱するための問題解決能力を高めるという意義を持つものと位置付けられる。

危険予知とは、ある状況の場面を見た時に、そこに潜んでいる危険を認識する感性、すなわち危険感受性を高めるために考案された手法である。その手法は文章やイラストを用いる方法、あるいはビデオ映像を用いる手法など様々な方法が考案されている。

危険予知の効果は、危険感受性テスト、小集団討議、カウンセリングを組み合わせた危険予測に関する

平均事故発生率
(件/年)

図2 事故発生率の変化 (深沢、1990)

る安全教育プログラムの実施を通じて、その訓練効果に関する調査研究として、1990年、深沢により報告されている⁽²⁾。その危険感受性テストは、深沢自身が独自に開発したイラスト方式によるもので、2枚の連続した運転場面のそれぞれに危険な状況を含んだイラストが提示されたものであった。図2は、この安全プログラムに参加したタクシードライバー群（実験群）と参加していないドライバー群（対照群）を比較し、プログラム実施前後1年間のそれぞれの平均事故発生率を検討したものである。実験群の事故発生率は対照群と比較すると大幅に減少し、危険予知の効果を示している。

3. 実 験

3.1 実験概要

実験は、屋外昼光の影響を防ぎ測定環境を一定に保つため、暗幕をかけて天井灯を点灯させた実験室で行った。被験者は、ディスプレイから970mm離れた位置にある顎台に頭部を乗せ、顔面の位置が動かない姿勢で座り、ディスプレイに提示された危険予知シートを1枚ずつ観察し、そのシート上部に記載されている設問内容に口頭で回答した。危険予知シートの一例を図3、図4に示す。実験者は、その回答を記録しながら合計15枚の危険予知シートをディスプレイに提示した。

実験は一人ずつ行い、ディスプレイに危険予知シートが提示された時点を計測開始時とし、被験者の回答終了後に実験者が「他にもありますか」と尋ね、被験者が「ありません」と回答した時点を計測終了時とした。実験開始からそれぞれの提示シートに要する較正や、15枚のシートに回答する時間を含めた実験終了までの所要時間は約30分であった。

較正は、5点較正法を用いて測定前に行った。さらに、それぞれの危険予知シート間に挿入した微調整用画面を用いて視線と視対象にずれがないことを

- あなたは約束の時間に遅れていたためイライラしながら信号が変わるのを待っていました。写真はちょうど信号が青に変わったところです。右には直進しようとしているワンボックス車があり、歩道には女性二人が立ち話をしています。急いで左折しようと思いますが、この時あなたは何に注意して運転しますか？

図3 危険予知シート シートNo.1

- プレジャーボートのフライングデッキ(操船デッキ)で操船して航行中、前方の船舶に接近しています。この時、あなたは何に注意しますか。

図4 危険予知シート シートNo.10

表1 危険予知ポイント

得点	回 答
5点	最も重要な危険箇所を認識し、それ以外の危険箇所も認識
4点	最も重要な危険箇所は認識しているが、それ以外の危険箇所が不十分
3点	最も重要な危険箇所は認識していないが、それ以外の危険箇所を認識
2点	最も重要な危険箇所を認識せず、それ以外の危険箇所も不十分または漠然としている
1点	単語のみ等の要領を得ない回答
0点	未回答、分からない等

確認した。

被験者の眼球運動特性は、Free-Viewにより①X・Y方向注視角度(deg)、②眼球運動速度(deg/sec)、③注視時間(msec)、④瞬目(まばたき)時間(msec)・回数、⑤瞳孔径X、Y(dot)等の項目について自動的に記録される。

提示した15枚の危険予知シートは、自動車を運転している場面でJAFが作製したものが5枚、神戸商船大学が作製したプレジャーボート版が10枚である。

各設問に対する被験者の回答は、実験者があらかじめ設定した危険個所に基づいて表1に示す5段階の危険予知ポイントとして評価した。

被験者は、神戸商船大学の1年生26名(男性21名、女性5名)、2年生5名(すべて男性)の計31名で、いずれの被験者も色覚異常等の眼科的疾患はない。

3.2 実験装置

実験に使用した眼球運動測定装置は、(株)竹井機器工業製のFree-View/Ver.6.0/T.K.K.2920である。この装置の規格を表2に、また刺激提示部、処理部、眼球検出部で構成される装置の概要を図5に示す。

Free-Viewは、人間の眼球運動をより簡便に、そして被験者を拘束することなく測定することを目的として開発された非接触型の眼球運動測定装置である。そして、視対象をディスプレイに限定した装置

表2 Free-View規格

眼球検出部	
検出方法	眼球映像 画像処理方式
LED発光ピーク波長	850[nm](近赤外)
眼球撮影カメラ	白黒CCDカメラ
検出眼	片眼
検出距離範囲	0.5~1.5[m] (眼球の反射率の違いなどにより制限を生じる場合あり)
トラッキング速度	10[度/秒]以上
トラッキング範囲	左右各18[度]、上 25[度]、下 5[度]
寸法	約400(W)×305(D)×175(H)[mm]
重量	約 7.2[kg]
電源	AC100[V] ±10 [%]、50/60[Hz]
消費電力	約 50[w]

処理部	
検出角度範囲	水平垂直とも±20[度](セッティング条件により制限あり)
最大検出分解能	0.2[度]以上
検出精度	0.5[度]以上
サンプリング時間	30[Hz]
測定遅延時間	2[フレーム]以内
データメモリ数	100000[個]
データ保存形式	テキスト形式
対応OS	Windows95/98
刺激映像入力	NTSC(コンポジット、S)
刺激映像出力	NTSC(コンポジット、S)
画像記録出力	アナログRGB
電源	AC 100[V]10±[%]、50/60[Hz]
消費電力(トータル)	約 250[W]

4. 結 果

危険予知ポイントの高い被験者は、その低い被験者と比べ、平均注視位置と危険予知シートが期待する危険個所との距離が小さく、危険個所に対して適切に視線が移動している状況がわかる。

-

図 6-2 平均注視位置
—危険予知ポイント：低—

注視点は、静止画において一般的に用いられている眼球運動速度が 5 deg/sec 以下の速度成分（注視成分）を持ち、さらに人間が情報を取り入れる時間（停留時間：一般的に $150 \sim 200 \text{ msec}$ ）も考慮して、眼球運動速度が 5 deg/sec 以下の状態が 150 msec 以上継続した場合と定義されている。ただし、本論での注視点は、Free-Viewのサンプリング周期が 33.3 msec であるため、注視時間が 150 msec 以上の最小値（ $167.5 \text{ msec} = 33.3 \times 5$ ）とする。

この定義に基づく注視点の数（以下“注視点数”）について、視線が文字部分（設問部分）にあるときと画像部分にあるときに分けて危険予知ポイントの高い方から低い方へ並べたものを図7に示す。

注視点数は個人差が大きく、各設問ごとの比較においても特徴的な傾向は見られなかった。さらに、注視時間についての最大値、あるいは平均値も個人差が大きく、特徴的な傾向は見られなかった。

4.4 眼球運動速度

図8は、ある被験者が危険予知シート（No.3）を観察中の眼球運動速度分布である。危険予知シート中の画像部分と文字部分について、横軸に示す眼球運動速度の区分ごとにそれぞれのデータ数に対する生起率（%）を縦軸に示す。

図8 眼球運動速度の分布

危険予知シート中の文字を読む場合と画像を見る場合を比較すると、眼球運動速度が5～15deg/sec以下の生起率は、画像を見る場合に大きく、15～45deg/sec以下では文字を読む場合に大きく、その生起率が逆転していた。この結果は全ての被験者について確認され、眼球運動速度の分布の特徴的な相違であるといえる。これは文字情報を認識する場合と画像情報を認識する場合のそれぞれの特徴である。

JAF版の危険予知シート（シートNo.1～5）について、瞬目を除く解析可能なデータ数が1000データ

図9 眼球運動速度の平均値

以上得られた被験者（No.1 & No.2 : 19名、No.3 : 17名、No.4 : 8名、No.5 : 13名）に関する眼球運動速度（平均）の平均値を図9に示す。

眼球運動速度の平均値は、シートの相違による差は少なく20～25deg/secであった。

5. 考 察

(1) 平均注視位置⁽⁶⁾

平均注視位置は、危険予知シートの“何を”、あるいは“どこ”を見ているかというまさしく観点の問題、すなわち“目の付けどころ”の問題である。平均注視位置は、眼球運動の定性的な特性を示す指標である。

危険予知シートには、危険な状況が数点含まれているのが一般的である。その中から、最も危険なポイントを視覚情報として探り出すために、眼球運動による視線移動は休みなく継続されている。

図10は、シートNo.1・No.3・No.4の3枚について、危険予知ポイントの高い被験者と低い被験者それぞれ3名ずつの平均注視位置を比較したものである。原点は最も重要な危険箇所を表す。

図10 平均注視位置の相違
－危険予知ポイントの高低比較－

平均注視位置の違いは、危険予知ポイントの高い被験者と低い被験者を比較すると、前者の平均注視位置は最も重要な危険箇所に近いことがわかる。

この傾向はシートNo.2及びNo.5では見られない。それは、シートNo.2の画像中心付近に危険箇所があり、また、シートNo.5では左右に分かれて危険箇所があるためであろうと推察できる。

この結果は、危険予知シートに示された危険箇所の明示性に関連し、危険予知シートの完成度に左右される傾向があると推察する。

(2) 注視点

注視点は、危険予知シートに示された上述の平均注視位置を“どのように”、あるいは“どれくらい”見ているかという注視状況の問題、すなわち“目の

付け方”の問題である。

注視点数及び注視時間については個人差が大きく、各シートごとの比較、最大値、あるいは平均値には特徴的な傾向は得られなかった。このことは、静止画に示された危険箇所に対する“目の付け方”は個人差が大きく、注視点数及び注視時間と危険予知ポイントとの関係は小さいといえる。

(3) 眼球運動速度

眼球運動速度は、危険予知シートを“どのように”見ているかという視線の動き方に関する観察状況の問題、すなわち“目の動き”の問題である。眼球運動速度は、眼球運動の定量的な特性を示す指標である。

眼球運動速度の分布は、危険予知シート中の文字を読む場合と画像を見る場合を比較すると、眼球運動速度の区分に対して生起率が逆転するという特徴的な相違が見られた。これは文字情報の認識を通じて、その文字情報から得られた文脈に対する理解を経る過程と画像情報の認識を通じて、その画像情報から得られる状況に対する過程に違いのある、いわゆる情報源の性質が異なる場合の特徴であるといえる。このことは、静止している視覚対象から限られた情報を得ようとするときの眼球運動特性を示しているものと推察できる。この点について、画像情報と文字情報を同時に対比した研究事例はなかったが、福田らの研究により音符と文字という情報源の違いによる情報処理量の相違について、眼球運動を解析した事例がある⁽⁴⁾。

眼球運動速度の平均値が、シートの相違による差は少なく20～25deg/secであるという結果は、日本人が書籍から日本語を読む場合の眼球運動速度と類似し⁽⁴⁾、静止画から視覚情報を獲得するときの眼球運動特性を示している。

(4) 危険予知ポイントと眼球運動特性

平均注視位置に着目し、危険箇所と平均注視位置との距離について各シート毎の危険箇所に対する距離等を検討し、危険予知を評価できる可能性を示すことができた。しかし、平均注視位置に関する特徴がすべての危険予知シートに当てはまる訳ではない。それは危険箇所の多少や軽重、危険箇所の大小、シートが示す状況の複雑さ等の危険予知シートに含まれる情報の量や質というシート完成度によるものであろう。

危険予知ポイントを眼球運動特性から検討する場合、眼球運動速度や注視点数、注視時間という定量的な特性から危険予知ポイントと眼球運動特性との関係は少なかった。従って、情報を認識する段階で

は危険予知ポイントに大きな差があるとは言えない。

危険予知ポイントの差に表れる情報認識の差は、危険予知の位置づけから考察すると、被験者自身の予測や判断の過程に大きく影響された結果であろうと推察する。

危険予知ポイントの高い被験者と低い被験者を比較すると、眼球運動の動的な特性に差はなく、平均注視位置にその相違が見られることから、両者の相違は危険箇所がわからないという目の付け所の違いといえる。

そこで、危険予知ポイントの低い被験者には、危険箇所を具体的に指摘することが危険予知ポイントを高め、ヒューマンエラーの防止につながるものと期待できる。

(5) 危険予知シートの改善

Free-Viewを利用した被験者の危険予知に対する検討に加え、JAF版危険予知シートを用いて得られた眼球運動特性からプレジャーボート版危険予知シートを検討し、その改善点を探る。

“目の付けどころ”の問題である平均注視位置の比較から検討すると、危険予知ポイントが高い被験者の平均注視位置は危険箇所の近くにあるという傾向を示したプレジャーボート版危険予知シートは1枚(No.10)だけであった。それ以外のシート(9枚)では、危険箇所の特定に必要な知識、経験が不足しているために危険箇所を認識することができなかった場合、あるいは提示された危険箇所が小さいために特定できなかった場合があった。

このように、危険予知ポイントの違いにより平均中止位置と危険箇所との距離差が大きかったシートと小さかったシートの比較や、実験終了後に得られた被験者の感想等から考察した危険予知シートの完成度を高めるための改善点は、次の4点である。

1) 危険予知シートから得られる情報量を多くし、船種、航行環境(港湾構造物、水深等)等の要素を取り入れること。

2) 最も重要な危険箇所が明らかにわかるように、危険箇所を提示する大きさやその提示位置を工夫すること。

3) 被験者(画像における観察位置)自身の状況が把握できるように、視点の位置や自船の進行方向がわかる要素を含めること。

4) 被験者(画像における観察位置)周囲の状況が把握できるように、自船の大小や船舶の輻輳度がわかる要素を含めること。

6. まとめ

船舶交通や海上労働における災害を防止するための危険予知を導入し、その効果的な手法を提言するために、危険予知シート（静止画）から得られる視覚情報を認識する際の一般的な視覚特性や危険な状況を認識する際の眼球運動特性を実験調査し、危険予知の手法と評価に関して次のようにまとめる。

(1) 平均注視位置

○危険予知ポイントの高い被験者の平均注視位置は、危険予知シートに示された最も重要な危険個所に近い傾向がある。この傾向は、最も重要な危険個所が危険予知シートにどの程度明らかに示されているかという危険予知シートの完成度に左右される傾向がある。

(2) 注視点

○危険予知シートに示された危険個所に対する“目の付け方”には大きな個人差があり、注視点数及び注視時間と危険予知ポイントとの関係は小さい。

(3) 眼球運動速度

○危険予知シート中の文字を読む場合と画像を見る場合を比較した場合、その眼球運動速度の分布は、文字と画像という情報源の違いにより異なる。

○眼球運動速度の平均値は、危険予知シートの相違による差は少なく20~25deg/secである。

(4) 危険予知ポイントと眼球運動特性

○危険予知ポイントの低い被験者に対して危険個所を具体的に指摘することは、危険予知ポイントを高め、ヒューマンエラーの防止につながる可能性が大きい。

7. おわりに

ヒューマンエラーを防止するために、本論で紹介したようなシートを用いた危険予知という手法がある。危険予知シートを提示しながら眼球運動を解析し、効果的な危険予知を行うための手法を検討した。今回の実験は、危険予知シートの視覚情報から危険個所を抽出する一般的な眼球運動特性を調べるために、知識・経験の少ない学生が被験者であった。

今後は、Free-Viewによる眼球運動特性の解析を進めながら、経験・知識の多少が危険予知に及ぼす影響や、音声情報を含めた情報提示方法の違いによる比較・検討を通じて、危険予知シートの改善とヒューマンエラー防止のための提言に取り組むたい。

参考文献

- (1) 長町三生：安全管理の人間工学，海文堂，p. 8～10，1995.
- (2) 企業開発センター交通問題研究室，交通安全学，大阪交通科学研究会，pp.242～254，2000.
- (3) 福田忠彦・渡辺利夫：ヒューマンエスケープ-視覚の世界を探る-，日科技連，p.102・p.144・p.126～137，1996.
- (4) 福田忠彦：生体情報システム論，産業図書，pp.34，1995.
- (5) 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.
- (6) 古荘雅生・甲斐繁利・橋本 進：視線の動きから見た高速船（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第85号，pp.51～62，1991.

質疑応答

嶋田博行（神戸商船大学）：

- (1) 危険予知シートは海上版と陸上版を混せて提示なさったのでしょうか。
- (2) まとめで得られた「眼球運動速度における文字と画像との情報源の違い」に関するデータは、海上版と陸上版の両方を含んだデータでしょうか。
- (3) 危険予知シートの改善は、どのデータに基づいて、どのように改善すべきと考えられたのでしょうか。改善の根拠となるデータはどれなのでしょうか。

平井貴裕：

- (1) 心理学的な実験では、実験手順やシート（刺激）の提示方法の違いが実験結果に大きく影響することは周知の事実であります。陸上版(JAF版)危険予知シートは、数多くの陸上交通場面から収集されたシートであり、危険予知を行うための適切なシート情報が含まれています。一方、海上版シートは、カーフェリーでの作業場面を含めても、その撮影枚数が約1,000枚程度と少なく、今回使用した危険予知シートは、その中から適切なシート情報が比較的多く含まれているものを使用しました。そこで、陸上版シートと海上版シートは、シートの完成度が異なるために、まず陸上版シートをシート番号順に提示し、その後海上版シートをシート番号順に提示しました。交互作用(Interaction)の影響をできる限り小さくするために、各シートの提示順序はランダムとすべきでしたが、

この実験では、陸上版、海上版それぞれのシート番号順に被験者に提示しました。

(2) 海上版危険予知シートの回答では、被験者間の回答に大きな違いが見られず、また解析に必要なデータ数(1000個)に満たない場合が多かったため、陸上版危険予知シートのデータを使用しました。それは、被験者の海上経験について、1年生は神戸商船大学練習船、2年生は神戸商船大学練習船と航海訓練所練習船による乗船実習のみであったこと、そして、シートに含まれる危険予知のための情報量が少なく、しかも危険個所が分散していたこと等によりシートの完成度が低いと判断したためです。

(3) シートの改善点は、危険個所と解析結果から得られた平均注視位置との関係、及び被験者に対する実験終了後に行った被験者に対するヒアリング調査、さらに学部生時代の特別研究で行った

シート作成のための写真撮影作業から得られた反省事項に基づき総合的に考察したものです。

山田孝三郎(日立造船)：海上における危険の状況は船の種類、水路、海象など多種多様な要素が複合していると考えますが、海上版危険予知シート10枚を代表的に選択する時の考え方をご教示下さい。

平井貴裕：今回の海上版危険予知シートは、実際のプレジャーボートの運航中に遭遇する様々な海上場面を約1000枚撮影したものです。その中から危険と思われる要素が比較的多く含まれている写真をピックアップしました。今回の解析に使用した危険予知シート(海上版)は意図的にどのような場面を撮影しようとしたものではないため、危険予知シートの改善点を提案しました。シートの改善点を考慮した危険予知シートの撰択が必要です。