

## 原著論文

### 追従眼球運動時のメンタルワークロードと有効視野の関係

## 和文抄録

本研究では自動車運転中の視野狭窄現象のメカニズムを解明することを目指し、有効視野とメンタルワークロードの関係を実験により検討した。実験では、自動車運転時の映像を背景とし追従眼球運動時の有効視野を計測するための視覚刺激への反応課題を実施した。また、メンタルワークロードとして、被験者に数的課題（読み上げ，加算）を副次課題として与える実験を実施した。結果として、メンタルワークロードの増加に伴い有効視野が顕著に狭窄することを示した。この結果は、従来から提唱されている情報処理資源と視野の広さと深さに関する視野狭窄メカニズムを裏付けるものであった。また、メンタルワークロードの増加に伴う有効視野の狭窄は眼球停留時のみならず追従眼球運動時でも同様に、水平方向に先行して垂直方向から生じる事を明らかにした。

（キーワード：メンタルワークロード，有効視野，情報処理資源）

## abstract

Experiments on useful field of view (UFOV) and mental workload were conducted with the aim of elucidating the mechanisms of field of view narrowing while driving. The experiments involved a visual stimulus response task against a background image of driving scene in order to measure UFOV during pursuit eye movement, and an experiment to study mental workload by giving subjects a numerical task (recitation, addition) as secondary task. It was found that UFOV narrows markedly as mental workload increases. These results support existing theories that propose a mechanism for narrowing of UFOV associated with information processing resource and field of view width and depth. Also, Along with increase of mental workload, the UFOV narrowing during pursuit eye movement occurs at vertical in advance of horizontal direction.

## 1. 結 言

近年、自動車や作業現場での事故等の原因は、人間により引き起こされるヒューマンエラーに起因している場合が多いことが報告されている<sup>1,2)</sup>。マン・マシンシステムの信頼性・安全性確保には、システム内に介在する人間の状況把握が必要である<sup>3)</sup>。

人間は外界からの情報の約 90% を視覚によって取得している<sup>4)</sup>。視認行動での情報の取り込みは中心視のみならず、中心視周辺の有効視野でも行われる<sup>5)</sup>。例えば自動車運転時を想定すると、ドライバーは注視点を次々に動かしながら運転環境の情報を取得する必要がある、注視点を移すべき対象の決定に大きく寄与していると考えられるのが中心視周辺の領域に広がる有効視野である。ドライバーは、有効視野内から得られる情報を手掛かりに次に注視すべき対象を検出し、注視点の移動を行っている<sup>6)</sup>。また、有効視野の大きさは常に一定ではなく、ドライバーの情報処理資源に大きく影響されるといわれており、定性的ではあるが両者の関係を示したモデルも考案されている<sup>7)</sup>。このモデルは、ドライバーの情報処理資源の一定則と処理の深さと広さの関係から説明されている。運転作業中の各注視点における課題要件が大きい状況下では、情報を処理するための注意の量が増大し、情報処理資源を多く必要とすることで深い処理となるのに対し、注視点における課題要件が小さい状況下では僅かな注意の量、すなわち少ない情報処理資源による浅い処理となる。また、情報処理資源の量が一定であるとする、深い処理が必要となる状況下においては、周辺に対して配分できる注意の量が低減し、注視点周辺での情報を処理できる範囲が小さくなる。一方、浅い処理で対応できる状況下では、周辺に対して配分できる注意の量が増え、情報を処理できる範囲が大きくなり、これが処理の広さに相当する。このように、処理の広さが有効視野であるとする、視覚的注意に関与する有効視野形成機構は情報処理資源の一定則と処理の深さと広さの関係から視野狭窄現象を説明することができる。さらに、視覚的注意だけでなく運転作業では他の感覚からの情報処理も並列に行う必要があることから、ドライバーは注意の処理資源モデルに基づいて運転行動を行っているとい仮説を立てることができる。注意の処理資源モデルでは、覚醒水準等によって規定される情報処理資源を視覚、聴覚、触覚など各モダリティにおける情報処理や運動制御に分配し、各々に分配された処理資源の量に従って処理精度が決定されることを仮定している<sup>8)</sup>。

上記仮説が正しいとするならば、運転行動に必要なでない車載機器の操作や同乗者との会話といったモダリティによらない情報処理は主作業に対する負担、すなわちメンタルワークロード (MWL) と考えることができ、MWL が増加すると視覚的注意に配分できる処理資源量が低減することで処理の広さに相当する有効視野が狭窄するものと考えられる。また、仮説を裏付けるように、先行研究では、視線の移動を伴わない携帯電話での会話や考え事も運転への集中を阻害することで漫然運転の原因になり<sup>9,10)</sup>、ドライビングパフォーマンスの低下、MWL の増加、注意力低下などを促すとも報告されている<sup>11)~15)</sup>。さらに、MWL の有効視野への影響を調査した研究も存在し、MWL により有効視野が狭窄することも示されている<sup>7,22,23)</sup>。しかしながら、それらの研究の多くにおいて視野測定法は注視点の周辺に提示した視標に対する被験者の主観的な判断により「みえる」、「みえない」の境界を求めるものがほとんどである。この場合、視野の境界は注視点からの距離といった物理量で評価できるものの、その値の判定方法が被験者の判断によるものであり明確な境界の基準が設定されていないといえる。さらに、前述した先行研究<sup>7,22,23)</sup>では、主に視線を一定時間、一定位置に保持する固視による条件で有効視野計測を行っているが、視対象の認識は固視だけでなく追従眼球運動によっても行われる。追従眼球運動は滑動性眼球運動とも呼ばれ、低速( $2\sim 40^{\circ}/s$ )の視覚運動刺激に対して滑らかに刺激を追視するために生じる眼球運動である<sup>19)</sup>。自動車運転時を想定すると、視対象そのものが運動していない状態においても、自車両が走行している場合にはドライバーの視野内において視対象が相対的に運動し、ドライバーはこの視対象を網膜の中心窩で捉えるため追従眼球運動を行う。走行時においては視対象が自車両と同方向に同じ速度で移動している場合を除いて、視対象はドライバーの視野内において相対的に運動していると考えられることから、走行中には追従眼球運動が頻繁に生ずると考えられる。そのた

め、運転作業時のヒューマンエラー防止の観点から、追従眼球運動時の有効視野特性について検討する必要があると考える。

これらのことより、本研究では、追従眼球運動時における有効視野の狭窄に着目し MWL と有効視野との関係を明らかにすることを目的とする。また、本研究では注視点と視標の距離を刺激の強度ととらえ距離と判断（検出）確率の関係を表す心理測定曲線から求められる主観的等価値（判断確率 50% 点）により視野の境界を求め、判断確率基準での視野計測を行うことで、MWL と有効視野の関係を定量的に評価することを目指す。

## 2. 有効視野計測・評価法

### 2-1 心理測定曲線に基づく有効視野計測法.

心理測定曲線で評価される刺激閾値を結んで形成される包絡線内の領域を有効視野と定義する。いま、図 1 に示すように、注視点  $S_1$  から認知対象物  $S_2$  への距離を  $x$  とする<sup>16)</sup>。 $x$  は刺激強度を表す心理物理量であり<sup>17)</sup>、 $x$  が小さいほど刺激は強く、 $x$  が大きいほど弱い。このため、 $x$  を小さい値から大きくするとき認知できなくなる値が存在する。この認知できなくなる  $x$  の値は、刺激閾値 (stimulus threshold) であり、それを有効視野の縁と考える。この刺激閾値と検出確率の間には関数関係が成立し、その関数を表す曲線は心理測定曲線と呼ばれ、図 2 に表すような曲線になる<sup>18)</sup>。ただし、本研究では刺激強度を注視点  $S_1$  から認知対象物  $S_2$  までの距離と定義するため、値が大きくなるにつれて刺激が弱まることに注意する必要がある。したがって、図 2 に表す縦軸は非検出確率を表す。

図 1,2 の挿入

いま、図 3 に示すように固視点  $S_1$  から各方位における心理測定曲線が得られるとき、それぞれの方位における刺激閾値を結んだ包絡線によって得られる領域を本研究では有効視野 (UFOV) と定義している。ここでの刺激閾値は、心理測定曲線が刺激強度（ここでは注視点からの距離）を引数とする非検出確率の累積分布関数であることより、非検出確率を指定したときの累積分布関数の逆関数で得られるパーセント点に相当している。非検出確率が 50% の場合の刺激閾値は主観的等価値 (PSE) に相当し<sup>19)</sup>、特に断らない限り本研究の有効視野は各方位での PSE からの包絡線によって形成される。

図 3 の挿入

ところで、心理測定曲線は刺激強度（あるいは知覚閾値） $x$  の関数として次式で表すことができる。

$$P = f(x) \quad (1)$$

式(1)の左辺は確率であり、一般に次式のような正規分布の累積分布関数による確率で与えられている<sup>18)</sup>。

$$P = \Phi(y) = \int_{-\infty}^y \phi(y) dy, \quad y = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x}, \quad \phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (2)$$

ここに、 $\mu_x$ 、 $\sigma_x$  は  $x$  の平均と標準偏差を表し、 $\phi(\cdot)$ 、 $\Phi(\cdot)$  は正規分布の確率密度関数と累積分布関数である。本研究では、実験において一組の変化刺激( $x_1$ ,  $x_2$ , ...)を用意しておき確率的に一つずつ提示する恒常刺激法<sup>(18)</sup>を用いる。このため、注視点  $S_1$  から認知対象物  $S_2$  までの距離  $x$  を変化させて 2 件法<sup>(18)</sup>による“検知できる”もしくは“検知できない”反応を被験者の持つ押しボタン情報として記録する。なお、本研究では視対象を検出できる範囲を有効視野と定義している。この記録から図 2 のように心理測定曲線を描くことは、実際には式(2)の確率分布のパラメータを推定することである。本研究では、次節に示すステアケース法<sup>20,21)</sup>によりパラメータを推定した。

### 2-2 ステアケース法によるパラメータ推定.

ステアケース法では刺激強度  $x$  を被験者の下した判断によって次の実験における刺激強度を  $x_{+1}$  もしくは  $x_{-1}$  と変化させる。この方法では、刺激強度の変化量をあらかじめ  $d$  として定め、被験者が“検知できた”と反応した場合には刺激強度を  $x_{+1} = x + d$  と増加してつぎの実験を行い、“検知できなかった”場合には  $x_{-1} = x - d$  として刺激を段階的に減少して定められた条件が満足されるまで実験が行われる。変化量の  $d$  の値としては、心理測定曲線を表す正規分布の標準偏差に近い値を用いることが推奨されている<sup>20)</sup>。

実験結果は、図4のような階段グラフにまとめられる。図中「○」は“検知できた”反応の場合を、「×」は“検知できなかった”反応の場合を表している。 $x^{(j)}$  ( $j = 1, 2, \dots, j$ )は、刺激の呈示順序を表している。実験に用いた刺激強度の大きい順に並べかえたものを  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ )として、表1に示すような各  $x_i$  値での度数分布表を作成するとき、求める知覚閾値の平均  $\bar{x}$  と標準偏差  $s_x$  は次式で推定される<sup>20)</sup>。

$$\bar{x} = x_0 + d \left( \frac{A}{C} - \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

$$s_x = 1.62d \left( \frac{CB - A^2}{C^2} + 0.029 \right) \quad (4)$$

ここに、 $x_0$  は実験の最初に用いる刺激強度の初期値であり、 $A, B, C$  は

$$A = \sum_{i=1}^k i f_i, \quad B = \sum_{i=1}^k i^2 f_i, \quad C = \sum_{i=1}^k f_i \quad (5)$$

で与えられる。このときの  $f_i$  の値は、表1に示す度数分布表で“検知できた”反応と“検知できなかった”反応のそれぞれの総数が小さい方の反応を用いる<sup>20)</sup>。

図4,表1の挿入

### 2-3 有効視野の楕円関数による評価.

図3のように、注視点  $S_1$  を表す原点  $O$  からの角度  $\theta$  を時計の3時方向を  $\theta = 0^\circ$  として反時計回りに  $\theta = 360^\circ$  まで定義する。有効視野に関する阿山ら<sup>22)</sup>や Ikeda ら<sup>23)</sup>をはじめとする多くの先行研究<sup>24)~26)</sup>では固視状態で固視点周辺にランダムに提示された認知対象物を検知できるか否かの実験を実施し有効視野を評価した結果、有効視野の形状は楕円の形状をしており、垂直方向より水平方向で広くなり、水平方向、垂直方向で有効視野は対称であることを示している。さらに、この結果を受けて山中ら<sup>27)</sup>は注視点からの任意の方向における視野の縁を観測点とし、あてはめられた楕円関数と等価となる円の直径を視野のサイズとする定量的な視野領域の評価法を考案している。また、この評価法では3方向の観測点からでも精度よく視野領域を推定できることが示されており非常に効率のよい評価方法であるといえる。これより本研究では、楕円関数を用いた視野評価法を採用した。

## 3. 実験方法

### 3-1 被験者.

被験者は、21~23歳(平均21.8歳、標準偏差0.75歳)の運転免許証を所有している健康な男子学生21名とした。なお、倫理的配慮として被験者には実験内容、目的、意義、参加は任意であること、予測されるリスク、実験に関する問い合わせ先等について十分な説明をし、インフォームドコンセントを得ている。

### 3-2 実験デザインおよび手順.

図5に実験概要図と実験風景をそれぞれ示す。被験者は70インチのディスプレイ（Victor, HD-Z70RX5）表示面の60cm前方に頭部非固定の状態で着座し、2つの課題を同時に遂行した。主課題はディスプレイに提示された視標の検出課題である。被験者は画面に提示された運転映像上をランダムに $10^{\circ}/s$ の速さで移動する大きさ直径 $1^{\circ}$ の白色円形の追視視標に視覚的注意を集中させ、眼球、頭部運動により追従作業を行った。被験者が追視視標に視覚的注意を向けていることを確認するため、眼球運動測定装置（SR research, EYE-LINK II）により眼球の回転角速度を計測した。なお、眼球運動の測定は両眼測定とし、サンプリング周波数250Hzとした。被験者は、白色円系視標の周辺に出現する標的視標を検出し、手元のスイッチの押下により反応した。この視標検出課題には、ランドルト環の周辺に赤色の領域を設けた標的視標を用いた。標的視標の提示位置はステアケース法に従って被験者の反応により決定され、各方向における視野計測（1実験）につき30試行繰り返されて出現するように構成した表示プログラムにより提示した。実験における標的視標の提示初期値は、事前の練習課題の結果から被験者毎に設定した。被験者の標的指標に対するスイッチ押下反応は表示プログラムに送られ、注視点に対して任意の方向における有効視野を計測することができる。実験では水平、垂直、斜め（注視点から時計の3時方向を $\theta=0^{\circ}$ として反時計回りに $\theta=45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ）の3方向の視野計測を行った。この課題により、標的検出への反応時間と3方向の有効視野の計測データが得られる。視標検出課題では、標的課題の提示時間は1.0s、表示間隔は $3.0s \pm 50\%$ であり、1実験は約2分から3分程度である。

一方、視標検出課題と同時に遂行する副次課題として、数的課題（一桁の数字の読み上げ、加算作業）を課す。この数的課題は先行研究<sup>28)</sup>において、誘発電位との同時計測によりMWLの定量化が既に行われており、負荷の低いものから、「課題なし」、「読み上げ」、「加算」である。数的課題は、一桁の数値が音声により3.0s間隔で被験者に伝えられ、被験者がその数値を復唱する課題を「読み上げ」、連続する2つの数値を加算し答えの一桁目のみを回答する課題を「加算」とし、各課題の正答率を評価指標とする。数的課題の提示は、ディスプレイ上に設置したスピーカー（Elegant2.1, ハーマンインターナショナル）により行い音量は70db（乗用車内における通常会話に相当）程度とした。

以上、本実験は視標検出課題が3方向（水平、垂直、斜め）、数的課題が3条件（なし、読み上げ、加算）の2因子3水準の実験であり、実験順序はランダムとした。

図5の挿入

#### 4. 実験結果

図6に数的課題の正答率を示す。図より、「読み上げ」より「加算」で正答率が顕著に低下しており（ $p<0.01$ , t検定）, 「読み上げ」ではほぼ100%, 「加算」では約85%であった。この結果より, 「なし」と「読み上げ」のMWLの差は小さく, 「加算」になるとMWLが顕著に増加していることがわかる。このことは, 本研究で用いたMWL課題条件は段階的にMWLが増加していることを示しており, 研究目的を達成するために適切な課題設定であったといえる。

次に, 各数的課題条件における標的視標への反応時間, 3方向の視野計測結果を用いて楕円近似で推定した有効視野領域を特性値とした二元配置分散分析を行った。その結果, 表2, 3の分散分析表に示す通り, 数的課題が反応時間( $p<0.01$ ), 有効視野( $p<0.05$ )の影響因子であることが統計的に示された。数的課題条件と反応時間, 有効視野の関係を図7, 8にそれぞれ示す。また, 図中のデータを用いた多重比較検定（Holm法）の結果も併記する。図7より, MWL負荷が大きくなるほど反応時間が延長していることがわかる。特に, MWL負荷が最も大きい「加算」において反応時間が最大値を示しており, 多重比較検定の結果, 「なし」と「加算」( $p<0.05$ ), 「読み上げ」と「加算」( $p<0.05$ )間に有意な差がみられた。この結果は, 先行研究<sup>28)</sup>で同じ数的課題を用いた場合において「加算」が最も大きな負荷となる結果と一致している。



同様に、図 8 より MWL 負荷が大きくなるほど有効視野が狭窄していることがわかる。特に、最も MWL 負荷の大きい「加算」において有効視野が最も小さくなり、多重比較検定の結果、「なし」と「加算」( $p<0.05$ )、「読み上げ」と「加算」( $p<0.05$ )間に有意な差がみられた。これらの結果は、実験で用いた MWL が増加すると反応時間が延長すること、追従眼球運動時においても視野が狭窄することをそれぞれ示している。

また、表 3 より視標の出現方向も有効視野の影響因子であることがわかった( $p<0.01$ )。多重比較検定 (Holm 法) の結果、「水平」と「垂直」( $p<0.05$ )、「斜め」と「垂直」( $p<0.05$ )の間に有意な差がみられ、垂直方向で視野が最も小さい結果となった。この結果は、先行研究<sup>22)~26)</sup>において報告されている垂直方向で狭く、水平方向で広いといった視野形状と一致しており、本研究における有効視野計測が精度よく行われていることも確認できた。

図 6,表 2,3,図 7,8,の順に挿入

## 5. 考 察

前章での結果より、本研究で用いた視野計測法ならびに MWL 負荷によって視野の狭窄を実験的に確認することができたが、MWL 負荷として用いた数値課題の「なし」と「読み上げ」の間には、反応時間、有効視野ともに統計的な差は確認できなかった。しかしながら、先行研究<sup>28)</sup>により、前述の両条件間の MWL 負荷量は異なり、「読み上げ」で「なし」に比べて負荷量が大きいたことが示されていることから、有効視野の大きさにも何らかの違いがあると考えられる。そこで、さらに詳細に検討するため有効視野の注視点からの方向間における範囲間の比率を算出し考察する。算出した比率は有効視野の長軸短軸比率であり、垂直方向を水平方向の有効視野で除した値とした。この値を用いて数値課題条件における長軸短軸の比率を特性値とした分散分析を行った結果、表 4 に結果を示すとおり数値課題要因( $p<0.05$ )が長軸短軸の比率の影響因子であることが統計的に示された。また、図 9 より、MWL 負荷が大きくなると長軸短軸の比率が小さくなっていることがわかる。この結果が水平方向と垂直方向のどちらの有効視野の大きさに起因するものかを検討するため、各視標の出現方向における有効視野を数値課題条件毎に算出した。表 5 に各条件における全ての被験者の有効視野の平均値と各視標の出現方向での「なし」条件に対する比率(括弧内)を示す。表より、MWL 負荷のある条件において垂直方向では水平方向と比べ「なし」条件に対する比率が小さく、垂直方向で視野狭窄が顕著に表れていることがわかる。図 9 の結果を合わせて考えると、この結果は、MWL 負荷による視野狭窄は水平方向に比べて垂直方向で顕著に現れることを示している。これは固視での有効視野を計測した先行研究における実験結果<sup>29)</sup>とも一致しており、眼球停留時のみならず追従眼球運動時でも同様であることが分かった。さらに、図 9 のデータを用いた多重比較検定 (Holm 法) の結果、3 方向から楕円近似で推定した有効視野では差が認められなかった「なし」と「読み上げ」条件間に有意な差が認められ、「なし」と「加算」条件間にも有意な差が認められた( $p<0.05$ )。「読み上げ」と「加算」条件間には有意な差が認められなかった。また、表 5 より、水平方向、斜め方向については、図 8 で示した楕円近似で得られた有効視野の狭窄と同様に「読み上げ」と「加算」の間で顕著に狭窄しているのに対して、垂直方向では、「なし」と「読み上げ」の間でも顕著な視野狭窄が起こっていることがわかる。MWL 負荷を段階的にコントロール(「なし」、「読み上げ」、「加算」)した実験により得られたこれらの結果は、視野の狭窄は MWL 負荷の強度が強くなるに従い、まず垂直方向から先行して生じ、その後水平・垂直ともほぼ同等の割合で狭窄が進行することを示しており、MWL 負荷と視野狭窄の関係が明らかとなった。

ここで、視野狭窄が水平方向に先行して垂直方向で起こる原因を考察する。水平、垂直方向における有効視野境界付近における視対象の検出について考えてみる。水平方向の有効視野を計測する際、本研究では被験者の右手方向に視対象となる視標を提示した。そのため、視対象の検出に主に寄与するのは視標までの視角的距離に近い右眼である。これに対して、垂直方向では被験者の両眼



から等しい距離に視対象となる視標を提示しており、視対象の検出に対する寄与は両眼で同等であると考えられる。そのため、垂直方向の視対象の検出では両眼加重効果が大きくなると考えられる。両眼加重効果とは単眼よりも両眼での機能が高くなること<sup>31)</sup>であり、両眼の網膜対応点に同等な刺激を与えた時に両眼の働きが高く、刺激された鼻側網膜と耳側網膜の感度の不均等が大きくなるほど両眼の働きが低くなると報告されている<sup>32,33)</sup>。また、両眼加重効果は確率加重効果とも呼ばれ、例えば「みえる」、「みえない」の2者選択の課題では単眼視下での「みえる」、「みえない」の確率は0.5であるのに対して、両眼視下では右眼、または左眼のどちらか単眼で検知できた場合でも「みえる」と判断するため確率は0.75となり両眼視では単眼視よりも視対象の検出確率は高くなるといわれている<sup>34)</sup>。このことから、視野範囲においては視標検出に対する両眼の寄与が等しい垂直方向で水平方向よりも両眼加重効果による視野範囲の拡大効果が大きくなると考えられる。また、単眼視での視野が小さくなる、つまり視野の狭窄量が大きくなると、両眼加重効果の表れる範囲(視角的距離)も小さくなるため、単眼視による視野が小さくなると両眼加重効果による両眼視の拡大効果も小さくなると考えられる。換言すると、単眼視での視野が方向に関わらず同じだけ狭窄した場合、両眼加重効果により視野の拡大効果が大きい垂直方向での両眼視による視野狭窄は単眼視でのそれより大きくなると考えられる。このため、両眼視による視野狭窄が水平方向に比べて垂直方向で顕著に現れたと考えることができる。また、本研究では「読み上げ」と「加算」条件で両眼視野の長短軸比率がほぼ同様であったが、これは両条件で「なし」条件と比べて垂直方向の有効視野が狭窄した結果、垂直方向の両眼加重効果が小さくなったため、「読み上げ」から「加算」条件にMWL負荷が増加した際、両眼加重効果の小さい水平方向と同等の割合で垂直方向の有効視野が狭窄したと考えることができる。このように、両眼加重効果による影響を考えると、視野狭窄が水平方向に先行して垂直方向で起こる原因を説明できる。しかしながら、これらの考察は一仮説であり、これを裏付ける検証については今後の課題である。

表4,図9,表5  
の順に挿入

## 6. 結 言

本研究では、追従眼球運動時におけるメンタルワークロードと有効視野の関係について検討することを目的とし、メンタルワークロード負荷量の異なる条件において有効視野を計測する実験を実施した。得られた結果を要約し、次の3項目を本研究の結論とする。

- 1) メンタルワークロードの増加により追従眼球運動時においても有効視野が狭窄することを定量的に示した。
- 2) メンタルワークロードの増加による有効視野の狭窄が水平方向に比べて垂直方向で顕著にみられる現象は、眼球停留時のみならず追従眼球運動時でも同様であることを明らかにした。
- 3) メンタルワークロードの増加に伴う有効視野の狭窄は、水平方向に先行して垂直方向から生じる事を明らかにした。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、首都大学東京大学院システムデザイン研究科(当時)の阿部光一郎君、林田吉正君、高嶺恭平君、古木翔君の助力を受けた。ここに記し、謝意を表する。

## 文 献

- 1) Reason, J.: *Human Error*, 53, Cambridge University Press., England (1990).
- 2) Card, S. K. Moran, T. P. and Newell, A.: *The Psychology of Human-Computer Interaction*, 23, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, United States (1983).

- 3) Hollnagel, E.: *Human Reliability Analysis Context and Control*, 145, Academic Press, United States (1993).
- 4) 藤森充, 上迫宏計, 川村幹也: 高速道路における頭部運動を考慮した運転者の視線計測, 計測自動制御学会論文集 3(4), 473-479 (1999).
- 5) Hill F. S., Walker S. and Gao F.: Interactive image query system using progressive transmission, *Computer Graphics*, 17(3), 323-330 (1983).
- 6) 三浦利章: 視覚的行動・注視時間と有効視野を中心として, 大阪大学大学院人間科学研究科紀要, 8, 171-206 (1982).
- 7) 三浦利章: 行動と視覚的注意, 36-52, 風間書房, 東京 (1996).
- 8) Kahneman, D.: *Attention and effort*, 7-11, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, United States (1973).
- 9) 篠原一光, 三浦利章: 情報機器利用による自動車運転者の注意への肯定的影響と否定的影響, 大阪大学大学院人間科学研究科紀要, 30, 15-34 (2004).
- 10) 牧下寛: 安全運転の科学, 16-46, 九州大学出版会, 福岡 (2006).
- 11) 川喜田英士, 阿部喜, 宮武秀樹, 小栗宏次: ドライビングシミュレータを用いた追従走行時における暗算タスクがドライバの生体信号及びペダル操作に及ぼす影響評価, 電子情報通信学会技術研究報告, 107(556), 53-58 (2008).
- 12) 萩原亨, 徳永ロベルト, メンタルワークロード評価法に基づく運転中の携帯電話利用の影響に関する研究, 国際交通安全学会誌, 30(3) 342-349 (2005).
- 13) Beede, K. E. and Kass, S. J.: Engrossed in conversation: The impact of cell phones on simulated driving performance, *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 415-421 (2006).
- 14) Horberry, T., Anderson, J., Regan, M. A., Triggs, T. J., and Brown, J.: Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle task, road environment complexity and age on driving performance, *Accident Analysis and Prevention*, 38(1), 185-191 (2006).
- 15) 東義隆, 川野常夫, 浜田隆史, 岩木直, 北川貴博, 森脇俊道: 携帯電話による会話と自動車運転の同時処理における意味的および空間的情報の干渉, 日本機械学会論文集 C 編, 70(693), 117-123 (2004).
- 16) 芋阪良二, 現代基礎心理学 3 知覚 II, 183-231, 東京大学出版会, 東京 (1982).
- 17) 大山正, 今井省五, 和気典二: 新編感覚・知覚ハンドブック, 185-193, 誠心書房, 東京 (1994).
- 18) 日科技連官能検査委員会: 新版・官能検査ハンドブック, 395-443, 日科技連出版社, 東京 (1999).
- 19) 日本視覚学会: 視覚情報処理ハンドブック, 390-397, 563-571, 朝倉書店, 東京 (2004).
- 20) 日本機械学会基準: 統計的疲労試験方法, 27-37, JSME S 00-2, 東京 (1994).
- 21) Dixon, W. J., Mood, A. M., and Ameri, J.: A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data, *Journal of American Statistical Association*, 43, 109-126 (1948).
- 22) 阿山みよし, 松澤麻記, 目加田慶人, 春日春男: 動的背景上の有効視野 に対する音声情報の影響, 照明学会誌, 85(2), 105-112 (2001).
- 23) Ikeda M., and Takeuchi T.: Influence of foveal load on the functional visual field, *Perception & Psychophysics*, 18(4), 255-260 (1975).
- 24) Ball K. and Owsley C.: The useful field of view test: a new technique for evaluating age-related declines in visual function, *Journal of the Optical Society of America*, 64(1), 71-79 (1993).
- 25) Owsley C., Ball K. and Keeton D. M.: Relationship Between Visual Sensitivity and Target Localization in Older Adults, *Vision Res.*, 35(4), 579-587 (1995).
- 26) 三好哲也, 中易秀敏, 鈴木大介: 運転時の周辺視野画像の眼球運動への影響, 人間工学, 43(2), 97-100 (2006).

- 27) 山中仁寛, 中易秀敏, 三好哲也, 前田多章: 視覚認知作業時の有効視野評価法に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 72(719), 244-252 (2006).
- 28) 大本浩司, 高橋励他: 事象関連電位によるメンタルワークロードの評価, 人間中心設計, 5(1), 29-37 (2009).
- 29) 和田隆広, 伊佐治和美, 津留直彦, 金子宏: 運転時における視覚機能としての動体視野の提案, 自動車技術会学術講演会前刷集, 84(4), 17-20(2004).
- 30) Mourant, R. R., and Rockwell, T. H.: Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human Factors*, 14(4), 325-335 (1972).
- 31) Pirenne MH: Binocular and Uniocular Threshold of Vision, *Nature*, 152, 698-699 (1943).
- 32) Hater MR, Seiple WH, and Salmon LE: Binocular summation of visually evoked responses to pattern stimuli in humans, *Vision Res.*, 13(8), 1433-1446 (1973).
- 33) Wood JM, Collins MJ and Carkeet A: Regional variation in binocular summation across the visual field, *Ophthalmic & Physiological Optics*, 12(1), 46-51 (1992).
- 34) 若山 暁美, 松本 長太, 大牟禮 和代, 松本 富美子, 阿部 考助, 田中 寛子, 大鳥 利文, 下村 嘉一: 両眼加重の働きと影響因子, なぜヒトは 2 つの眼があるのか, 日本視能訓練士協会誌, 40, 7-18 (2011).

表 1 ステアケース法での度数分布表  
 Tab. 1 Table of staircase method

| $i$   | $x_i$ | $\bigcirc$ | $\times (f_i)$     |
|-------|-------|------------|--------------------|
| 3     | $x_3$ | 0          | 2                  |
| 2     | $x_2$ | 2          | $3 \dots x_{\max}$ |
| 1     | $x_1$ | 3          | 0                  |
| 0     | $x_0$ | 1          | $0 \dots x_{\min}$ |
| total |       | 6          | 5                  |

$i$  : Rank of strength of stimuli

表 2 応答時間における分散分析表  
Tab. 2 ANOVA table for response time

| Factors | Frequency | Unbiased<br>variance | Variance ratio |
|---------|-----------|----------------------|----------------|
| S       | 20        | 41948.22             |                |
| A       | 2         | 562421.17            | 42.60 **       |
| S × A   | 40        | 13200.84             |                |
| B       | 2         | 5942.43              | 1.05           |
| S × B   | 40        | 55669.62             |                |

\*\* : P<0.01

S:Individual variation

A:Mental workload

B:Angles of recognition index

S × A:Nonsystematic error with S to A

S × B:Nonsystematic error with S to B

表 3 有効視野における分散分析表  
Tab. 3 ANOVA table for useful field of view

| Factors | Frequency | Unbiased<br>variance | Variance ratio |
|---------|-----------|----------------------|----------------|
| S       | 20        | 268.76               |                |
| A       | 2         | 969.37               | 9.93 **        |
| S × A   | 40        | 97.64                |                |
| B       | 2         | 1164.19              | 20.03 **       |
| S × B   | 40        | 53.84                |                |

\*\* : P<0.01

S:Individual variation

A:Mental workload

B:Angles of recognition index

S × A:Nonsystematic error with S to A

S × B:Nonsystematic error with S to B

表 4 長軸・短軸比率における分散分析表

Tab. 4 ANOVA table for ratio of horizontal and vertical

| Factors | Frequency | Unbiased<br>variance | Variance ratio |
|---------|-----------|----------------------|----------------|
| S       | 17        | 0.039                |                |
| A       | 2         | 0.101                | 3.59 *         |
| S × A   | 34        | 0.03                 |                |

\*, P<0.05

S:Individual variation

A:Mental workload

S × A:Nonsystematic error with S to A



表 5 各方向における有効視野 (deg.)

Tab. 5 Difference among useful field of views for kinds of angles (deg.)

| Angles     | Numerical Task |             |             |
|------------|----------------|-------------|-------------|
|            | None           | Recitation  | Addition    |
| Horizontal | 50.1           | 48.2 (0.96) | 45.2 (0.90) |
| Orthogonal | 53.7           | 52.5 (0.98) | 44.5 (0.83) |
| Vertical   | 45.5           | 41.6 (0.91) | 36.7 (0.81) |

(ratio: None)

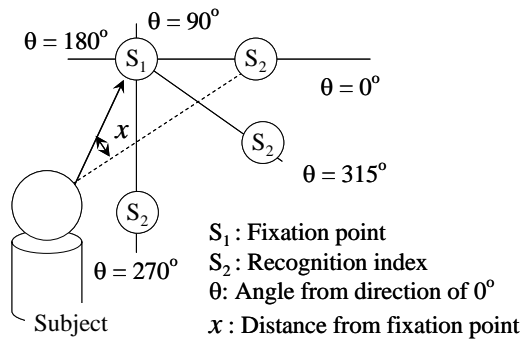


図1 注視点と視覚刺激の距離ならびに方向  
 Fig.1 Distance and angles of recognition index

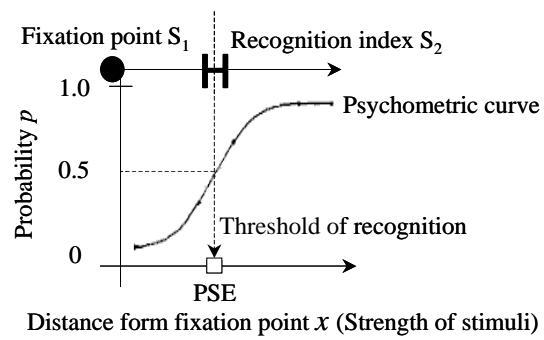


図 2 刺激の強度と心理測定曲線  
Fig.2 Psychometric curve

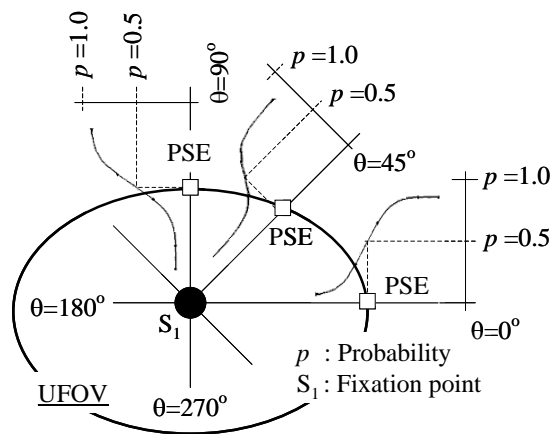


Fig.3 Definition of UFOV

図3 有効視野の定義

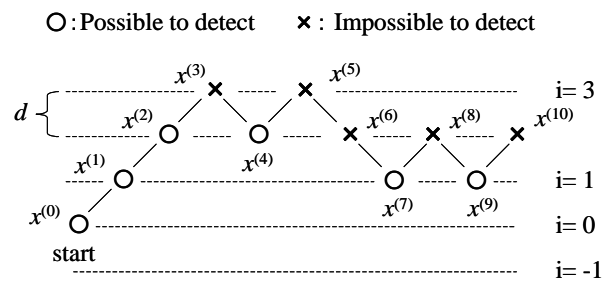


Fig.4 Example of result by staircase method

図 4 ステアケース法における結果の一例

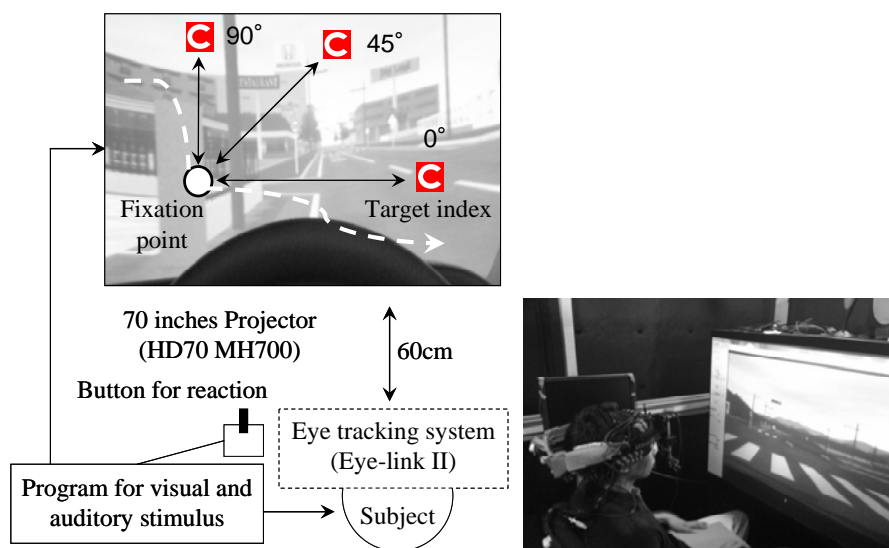


Fig.5 Experimental layout

図 5 実験概要図

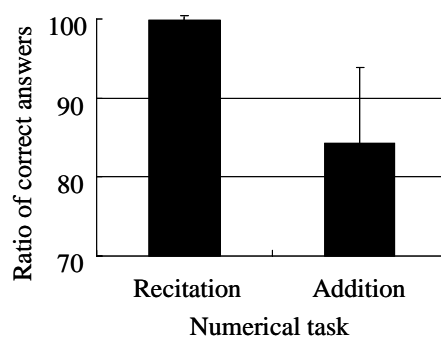


Fig.6 Mental workload and ratio of correct answers

図 6 メンタルワークロードと数的課題正答率



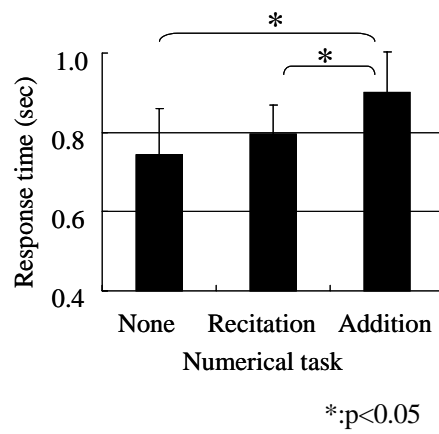


Fig.7 Mental workload and response time

図7 メンタルワークロードと視覚刺激への応答時間

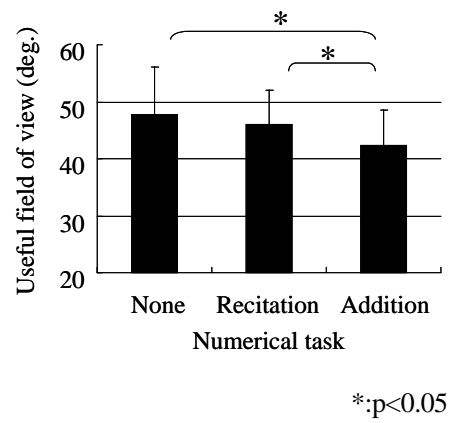


Fig.8 Mental workload and useful field of view

図8 メンタルワークロードと有効視野

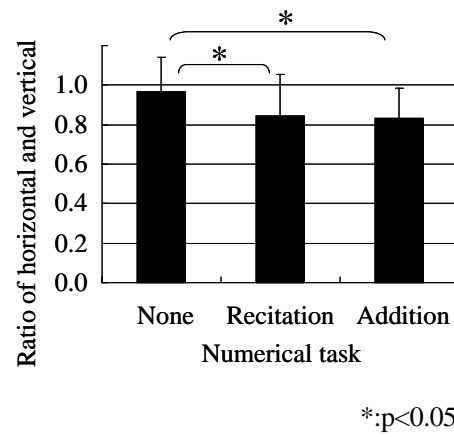


Fig.9 Mental workload and ratio of horizontal and vertical

図9 メンタルワークロードと長軸・短軸比率