

3. 掘削機操作における眼球運動と有効視野*

中村隆宏**, 深谷 潔***, 呂 健****,
江川義之***, 興水ヒカル*****

3. Eye Movement and Useful Field of View in the Operation of Excavator*

by Takahiro NAKAMURA**, Kiyoshi FUKAYA***, Jian LU****,
Yoshiyuki EGAWA*** and Hikaru KOSHIMIZU*****

Abstract: What is the operator watching while he operates his machinery? Though this is a very simple question, it is very important in order to investigate the background factor for disasters caused by excavators. Because, the possibility to reduce the disaster depends how accurately the operators recognize and avoid nearby workers, dangerous events, and so on. However, researches, which answer such questions, have not been carried out so far.

Therefore, the first experiment, in which the eye movement of operators was measured, was carried out using the newly developed excavator simulator, and the fundamental factors for the acquisition behavior of visual information in operating an excavator were examined. As the result, it was found that the operators gazed on the important objects to carry out work correctly and carefully, especially on the bucket.

In addition, the second experiment, in which the target detection task was contained, was carried out. The factors that affect reaction time, miss rate and useful field of view of the operators were discussed. The effect of instruction was not significant, but the detection performance of the operators was influenced by the eccentricity of targets though the head- and body-movement were allowed to be free. The lever-pattern of operation had much influence on the performance. In case the lever-pattern is unfamiliar to the operator, it seems that the more experience the operator has, the greater the influence of that is. Such result means that the promotion of the standardization for lever-pattern must be dealt with cautiously and carefully.

Keywords; Eye movement, Useful field of view, Visual information, Attention

1. 緒言

ドラグ・ショベル等の掘削機による災害の中でも「挟まれ・巻き込まれ」「激突され」といった災害については、掘削機を操作するオペレータが周辺の作業環境に存在する危険対象を的確に認識し回避することで、災

害発生の可能性を大幅に低減することが可能である。しかし一方で、オペレータが作業中に周辺の作業環境からどのような情報を取り入れながら認識を成立させているか、といった点に関しては、これまで明らかにされていない。

通常、ヒトは視覚、聴覚、嗅覚、味覚、皮膚感覚とい

* 日本人間工学会第 41 回大会 (2000) 及び日本応用心理学会第 67 回大会 (2000) において一部発表

** 建設安全研究部, 境界領域研究グループ Construction Safety Research Division, Interdisciplinary Research Group

*** 機械システム安全研究部, 境界領域研究グループ Mechanical and System Safety Research Division, Interdisciplinary Research Group

**** 物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

***** 科学技術振興事業団 重点研究支援協力員 Supporting Staff for Priority Research, Japan Science and Technology Cooperation

う 5 つの感覚器官を複合的に働かせることによって周囲の環境から情報を取り入れ、外界の認識を成立させている。ある対象を目の前にした時、その対象を異なる角度から見る、その対象の周囲をまわる、その対象に触れる、その対象を持ち上げてみる、その対象を叩いてみる、といった行動は、ヒトが外界に存在する何らかの対象に対し働きかけを行い、そのフィードバックを情報として様々な感覚器官を複合的に働かせ、その対象に対する認識を成立させることを示す例である¹⁾。

一方で、5つの感覚器官の中でも、視覚はヒトにとって支配的な感覚器官である、といわれる。例えば自動車の運転場面においては、時間経過に伴う空間変化が交通行動の基本特性であり、この条件下でいかなる方位定位行動を行うにあたって急速に変化する空間的事象に関する情報が必要となるため、視覚情報領域に優位の重要性が与えられる²⁾。航空機の操縦に関しても五感の中でも最も利用され依存されるのは視覚であり、感覚レベルでの限界は極めて重要な問題である³⁾。視覚から取り入れられる情報の重要性は、単に光学的な性質にとどまらない。逆さめがねに代表される変換視研究においては、視覚は重力に関して最も間接的でありながら圧倒的入力情報の多さからヒトの生活基盤の最も重要な部分を占めており、視覚から受ける重力情報量は最大と言ってもよい、と指摘されている⁴⁾。

外界の様々な対象から視覚的に綿密な情報を取り入れるためには、受容器である眼を対象のある方向へ向け、最も視力が高い中心窩 (fovea) で捉える必要がある。周囲に広がる空間のどの部分へ視点を向けるべきか、といった選択は、無作為に行われるわけではない。比較的明確に対象を認知することが可能である有効視野 (useful field of view) やさらにその外側に広がる周辺視野 (peripheral visual field) で大まかに捉えた情報を、より精緻に捉えるために注視点を移動させることもあれば、聴覚的な刺激を取り入れた後で視覚的に情報を“取りに行く”といった感覚間の統合が行われる場合もある。

こうした注視点 (fixation point) の移動の背景にあると考えられるのが、対象に対する観察者の注意 (attention) である。眼球の飛越運動 (saccade) と注意の定位には構造的な関係が見られ、飛越に先立って注意はその対象に向けられる⁵⁾。さらに、注意の向けかたと注視点の移動は必ずしも一対一の対応を示すわけではないが、眼球運動は注意の向け方の一つの指標となり得る⁶⁾ (Fig. 1 参照)。

何をどのように見るか、あるいは何がどのように見えるか、といった問題は、労働災害の発生にも大きく

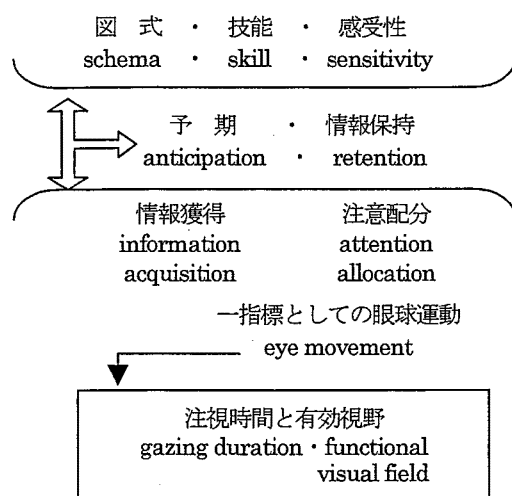


Fig. 1 Background of eye movement. 眼球運動の背景要因 (三浦, 1982 より抜粋)

関わっている。狩野⁷⁾は、労働の場面においては当然認知されるはずの外物が知覚されない、という現象をいくつかの災害事例に基いて説明し、perception のメカニズムを解明すること以上に、non-perception のメカニズムの解明が重要であることを示唆している。すなわち、掘削機による労働災害に限らず広く様々な労働現場において、見えているはずなのに見えていない、といった事態が災害発生の背景に存在することを示すものである。

掘削機オペレータが周囲の作業環境からどのような視覚情報を取り入れているか、さらにはどのような対象に対して注意を向けているか、といった問題は、これまでに明らかにされていない。これは、効果的な災害防止対策を講じるにあたり、基礎的なデータが不足している状況を示すものである。こうした状況を鑑み、本研究においては第一に、掘削機オペレータの視覚情報獲得行動を検討するための眼球運動測定実験 (実験 1) を行った。測定によって得られる注視対象や注視時間、飛越運動などに関するデータは、注意の向け方の一つの指標となり得るものである。さらに、有効視野に関しては、Miura⁸⁾、三浦⁹⁾、Crundall, D. et al.¹⁰⁾が行った実験を参考に、ターゲット検出課題 (実験 2) を通じて検討した。ターゲットの検出範囲は有効視野の推定を可能にし、反応時間 (reaction time) はその時々々の要件 (task demand) の大きさを反映すると考えられるためである。

本章においては、シミュレーション実験の課題を踏

まえ、これら実験の概要及び結果について、順次述べることとする。

2. シミュレーション実験の課題

2.1 シミュレーションの長所

眼球運動・有効視野の測定を行うにあたって最も理想的な方法は、現実場面における作業行動を対象とすることである。しかしながら、現実の作業環境は様々であり、同一の作業現場においても環境は時々刻々と変化し続ける。そのため、実験的な条件統制が極めて困難であり、被験者の行動に影響を及ぼす数多くの変数を体系的に考慮することは事実上不可能である。また、変数の統制が困難なフィールドの条件下では不測の事態が突発的に生じる可能性もあることから、安全性の確保が難しいという現実的かつ深刻な問題がある。

シミュレーションは、現実の作業環境において生起する行動を再現し観察することが可能でありながら、可能な限り実験的な条件を統制し安全性を確保する方法の一つである。本章で行った実験のパラダイムに当てはめた場合、シミュレーションの長所は以下のように整理される。

- 1) 実験条件の様々な変数の統制及び定量的把握が可能
- 2) 同一条件下での反復が可能
- 3) 目的に応じた条件設定が容易
- 4) 反応行動の記録が容易
- 5) 低コストでの実験が可能
- 6) 危険事象を擬似的に再現可能

実際の作業現場においては、気象・地形・土質等の自然環境条件によって作業環境は大きく変化し、これらの変数が観察対象となる行動に及ぼす影響を明確に捉えることは極めて難しい。実験室内に擬似的な作業環境を構築することによってこれらの自然環境条件を一定に保つことが可能であるとともに定量的な把握を行いやすい。

また、実際の作業現場では作業の進展に伴い状況は変化するため、全く同一の作業環境を再現することは不可能であるが、シミュレーションにおいては同一の条件を繰り返し設定することが容易である。

さらに、実験の目的に応じて、操作対象となる掘削機の大きさやデザイン、操作方式等の条件を任意に設定することが可能で、実際にフィールドでこれらの条件を設定する場合と比較して、極めて容易に、低コストで実現可能である。

加えて、有効視野を測定する目的で作業空間上の任

意の位置にランダムにターゲットを提示するような場合、現実の作業空間においてはターゲット提示装置を設置すること自体が困難である。仮にそうした提示装置を多数設置するのであれば、実際の作業空間とは全く異質の環境を作り出すことになりかねない。シミュレーションにおいては、作業環境中の対象物はコンピュータ・グラフィックスによって描画されるため、全てコンピュータ・プログラム上で操作可能であり、提示位置の座標・提示時間等の情報も容易に記録が可能である。観察される行動は、分析のために何らかの形で記録する必要があるが、実際の作業現場は精密な測定機器にとって極めて厳しい環境であることがほとんどであり、測定環境も多様性に富むため、利用可能な記録方法は限定されてしまう。実験室内においてはこれらの問題の大部分を解消することが出来る。

さらにシミュレーションの最大の長所は、擬似的にはあるが危険事象の再現が可能な点である。実験的な操作を行ったとしても、現実の作業環境の下で危険事象を再現する場合、相応のリスクを負うことになる。しかし、シミュレーションにおいては擬似的な環境下ですべての事象が生起するため、実際の危険性を排除したうえで災害発生のある状況を作り出し、オペレータの反応行動を観察することが可能である。

2.2 シミュレーション実験の問題点

実際の作業現場においてデータを収集する手法と比較して、様々な長所を有するシミュレーションではあるが、検討すべき問題点も含まれている。第一に、シミュレーションのリアリティである。複雑な環境条件をシミュレートする場合の物理的なリアリティは一定の限界を超えるとそれ以上の効果を期待できないのに対し、費用は飛躍的に増大する。近年のコンピュータ技術の進展に伴い高いリアリティを伴うシミュレーション化が可能な技術的範囲は増大し、以前と比較して費用も低減することが可能であるが、現時点では費用対効果の観点から依然として解決すべき課題は多い。

一方で、シミュレーションのリアリティはどの程度であれば十分といえるのか、といった疑問が生じる。例えば、シミュレータの中でも最も実用化が進んでいるといわれるフライトシミュレータにおいては、リアリティ(迫真性)が異なっても訓練成果に影響が見られない例があり、むしろ高度なリアリティ(迫真性)は反対の効果をもたらす、とする報告もある¹¹⁾。何らかのトラブルによる悪影響(与圧故障、客室火災など)をも忠実に模擬することは非生産的であり、巡航中の操作のような長時間じっとしている状況の模擬は何ら効果を期待できないからである。また、逆さめがね・左右逆

転めがねを用いた変換視研究においては、VR (Virtual Reality) における臨場感を物理的な意味で忠実に再現する必要がないことが示唆されている¹²⁾。これらの知見からは、シミュレーションのリアリティはさほど重要ではないと思われるが、現実場面における体験とシミュレーションにおける体験とのズレから生じる感覚の不一致 (sensory conflict) に対して、人間はどのように、どれ位の範囲で適応が可能であるか、あるいは適応しているか、といった点について現時点では明らかではない。

次に考慮すべき事項は、シミュレーションにおける動機的諸条件のシミュレートは不可能である、という点である。どれほど優れたシミュレーションであっても、被験者はシミュレーションであることを容易に理解する。そのため、観察対象となる行動に関連する安全態度や客観的危険体験などの動機づけが歪められ、シミュレーションにおいて観察される行動と現実場面において生じる行動が異なる可能性がある。これは、シミュレーションのリアリティや規模、あるいは費用等によって解決できる問題ではない。

これらシミュレーション実験の問題点に対して、早急に抜本的な対策を施すことは極めて困難である。そのため、これらの問題点をシミュレーションの特性の一つと捉え、実験結果の解釈において十分に考慮する必要がある。

2.3 眼球運動に関する実験データの扱い

眼球運動を測定する際に自由な頭部運動を被験者に許容することは、反射性成分である前庭動眼反射を混入させるため、純然な眼球運動だけのデータ解析には頭部の非動化が不可欠である¹³⁾。しかし本研究において対象となる作業は掘削作業であり、掘削機械の操作に伴って被験者の頭部運動が生じるのが通常である。頭部運動を何らかの形で制限した場合、被験者に対して極めて不自然な状態で通常と同じような操作・作業を求めることとなる。シミュレーションにおける作業環境は、詳細な描写映像・動揺装置による体感の再現・音声提示等を併用することによってリアリティを高めることが出来るよう配慮されている。従って、頭部運動を制限した不自然な状態で通常と同じような操作・作業を被験者に求めることは、シミュレーションのリアリティを著しく損なう、という本来の目的にそぐわない影響が生じる恐れがある。

北濱ら¹⁴⁾は、被験者に迷路探索課題を課し、その際の眼球運動、頭部運動、身体の移動軌跡を測定した。その結果、被験者間に差が見られるものの、雁行路通過時の視線、頭部、身体の動きは、探索方向を繰り返す

につれて次第に連続性をもち対応することを示している。こうした結果は、一連の人間の行動を捉えようとする場合においては、むしろ頭部運動の許容が妥当であることを示唆するものである。

こうした検討をもとに、実験では被験者に自由な頭部運動を許容した状態で測定を行った。測定される眼球運動はオペレータの行動を包括的に捉えた場合の「視覚情報獲得行動」という一側面を表わしており、被験者の自由な頭部運動と併せて「何を、どのように見ていたか」を測定した結果となる。これらは記述的な検討にとどまらざるを得ない部分もあるため、純粋に眼球の動きのみを捉えたデータと直接比較することは出来ないが、実際の掘削作業行動に対応した行動をシミュレーションにおいても観察出来る可能性があり、さらにシミュレーションにおける行動と実際の行動の比較・検討を行う上でも有用である。

3. シミュレーションによる眼球運動測定実験

3.1 目的

掘削作業中のオペレータの眼球運動測定を通じ、注視点の変位状況、飛越距離の変化等、視覚情報獲得行動を探るための基礎的なデータの収集ならびに検討を行う。

3.2 実験方法

(1) 被験者

実験に参加した被験者は合計9名 (A, B, C, D, E, F, 及び K, L, M) であった。全員が掘削機操作の資格を有し、日常的に掘削機を用いた作業に従事するオペレータであった (平均年齢: 40.2±9.3歳, 平均経験年数: 11.0±8.3年)。被験者Dは眼鏡を使用していたが、他の8名の裸眼視力は正常であった。6名 (A, B, C, D, E, F) の被験者は延べ2日間にかけて実験に参加した。残り3名 (K, L, M) はシミュレータ酔いの症状が深刻であったため、途中で実験を中止し、その後の実験への参加を取りやめた。1日目と2日目の実験内容は同じであった。1日につき、1~3名の被験者が実験に参加した。

(2) 実験に使用したシミュレータ

実験に使用したシミュレータは、労働省産業安全研究所 (東京都清瀬市) VR実験室に設置されたものである。(シミュレータ及びシミュレーション環境の詳細は第2章を参照のこと。)

(3) 実験データの記録

眼球運動の測定には、アイマークレコーダー (NAC, EMR-8) を使用した。視野レンズには水平画角62°のレ

ンズを使用し、両眼計測を行った。アイマークレコーダーでは、被験者のアイマーク座標データを30Hzでサンプリングした後、視野映像の中にコード化して挿入し、ビデオ信号として出力する。被験者の注視点をあらかずアイマーカーは視野映像の中にスーパーインポーズされ、ビデオテープレコーダー等での記録が可能である。被験者の視野映像及びアイマーク座標データは、デジタルビデオカセットレコーダー (SONY GV-D900) を用いてミニデジタルビデオテープに記録した。実験者はモニター (パナソニック TH-26V10) を用いてデータ記録状況を随時確認した。モニターは、アイマークレコーダーのキャリブレーションにも利用した。ビデオテープには視野映像及びアイマーク座標データとともに、エレクトリックコンデンサーマイクロホン (SONY ECM-T145) 及びマイクロホンミキサー (SONY MX-50) を用いて実験状況の音声を記録した。被験者のシミュレータ操作内容に関する情報は、シミュレーション制御コンピュータにLOGデータとして記録した。LOGデータは、操作レバーへの入力情報、シミュレーション環境における掘削機の位置情報及び作業装置の位置情報等を記録した。

(4) 実験手続

実験手続の主な流れを以下に示す。

- 実験に先立ち、使用するシミュレータについて被験者に対する説明を行った。
- 控え室で被験者に質問紙を配布し、氏名、年齢、オペレータ経験年数、習熟したレバー操作方式、有する資格、日頃の作業内容、日頃の作業で運転する掘削機の大きさ等に関して回答するよう求めた。
- 質問紙に回答した後、1人ずつ実験に参加させた。被験者がシミュレータ運転席に着座しシートベルトを着用した後、アイマークレコーダーのヘッドユニットを装着した。眼球像位置の調整を行った後、アイマークのキャリブレーションを行った。キャリブレーションは、実験者が正面スクリーンにレーザーポインターで9つの点を示し、被験者が示された点を注視することによって行う「FIX方式」を用いた。実験者が示すべき9つの点の位置は、モニター上にキャラクタとして示されるため、実験者はモニターでキャラクタの位置を確認し、キャラクタに対応するスクリーン上の位置をレーザーポインターで示した。被験者には、合図があったらレーザーポインターで示された点を注視したまま手元のキャリブレーションスイッチを押すこと、キャリブレーションの最中なるべく頭を動かさないこと、示された点を目の動きだけで追うこと、等を求めた。
- キャリブレーションが正常に行われたと判断した後、視野映像及びアイマーク座標データ、音声情報の記録を開始し、被験者には正面スクリーンにレーザーポインターで示される点を注視するように求めた。同時に実験者は、レーザーポインターで示される点を正面スクリーンの上下左右方向にゆっくりと動かし、被験者の注視点を表わすアイマーカーが示された点とどの程度一致しているかをモニターで確認することで、キャリブレーションの正確性を判断した。アイマーカーと注視点が正しく対応していないと判断された場合には、繰り返しキャリブレーションを行った。
- キャリブレーションの後、被験者に対し教示を行った。教示では、実験の目的は掘削作業中の眼球運動の測定であること、なるべく自然に、普段と同じように操作を行うこと、実験者の指示と合図に従って操作を行うこと、気分が悪くなったり何らかの不都合が生じた場合にはすぐに申し出ること等を伝えた。
- 教示の後、シミュレーション映像の提示を開始した。シミュレーション映像が提示される最中は、実験室内の照明をすべて消灯した。シミュレーション映像が提示されてから、再度、アイマーカーと注視点の対応を確認した。
- データの収集を目的とした本試行 (掘削作業シミュレーション) に先立ち、シミュレータの操作に慣れるための操作練習 (前後方向への走行、左右への旋回、作業装置の基本操作等) を行った。操作練習は実験者の指示に従って行われた。
- 操作練習の後、被験者に掘削作業を行うよう求めた。掘削作業では、掘削機正面の窪んだ部分をさらに深く、広く掘ること、バケットですくいとった土は左側に停車しているダンプトラックの荷台に積み込むこと、奥行き判断に気をつけること、掘削及び積み込みは連続して5回行うこと等を伝えた。実験者から被験者に対し指示を与え、本試行を開始した。
- 本試行終了後、実験者の合図でシミュレーション画面の映像提示を停止し、実験室内の照明を点灯した。本試行中に被験者の注視点を表わすアイマーカーのズレの有無、及びズレの程度を判断するため、被験者に正面スクリーンにレーザーポインターで示される点を目で追うように求めた。同時に実験者は、レーザーポインターで示される点を正面スクリーンの上下左右方向にゆっくりと動かし、被験者の注視点を表わすアイマーカーとポインターで示された点との一致の程度をモニターで確認することで、ズレの程度を判断した。この間も、ビデオレコーダーによるデータの記録は継続して行った。
- ズレが認められた場合、このズレの程度を分析の段

階で適切な注視点座標を判断する際の修正量の目安として利用した。引き続き有効なデータの収集を行うにはズレが大きすぎる、と判断された場合には、次の試行に備えて再びキャリブレーションを行った。

(5) 掘削機モデルの大きさ

実験は、初めに「中型掘削機モデル（機械総重量約12トン程度を想定）」を用いて行い、次いで「小型掘削機モデル（機械総重量約3トン程度を想定）」を用いて行った。いずれの場合にも、操作練習、本試行の内容は同一であった。

(6) 操作レバーと掘削機の動きの対応

レバーの操作方式は、それぞれの被験者が習熟しているものとした。

3.3 分析方法

(1) 分析用テープの作成

実験データのうち、視野映像、アイマーク座標データ、及び音声情報はデジタルビデオテープに記録した。分析の際には一時停止、コマ送り等の操作を頻繁に行うため、ビデオテープの摩耗や損傷の恐れがある。そのため、分析に不要な部分を除き、別なデジタルビデオテープに複製した。複製されたビデオテープは「分析用テープ」としてビデオによるデータ解析に使用した。

(2) 注視点座標の測定モニター

分析用テープを再生し、注視点座標の測定を行った。被験者の注視点をあらわすアイマークは視野映像の中にスーパーインポーズされるため、ビデオ画像に記録されたアイマークの動きをたどることによって注視点の変位を判断した。注視点の変位状況を数値的に捉えるため、分析用モニターの画面を等間隔に1972分割（水平方向に58分割、垂直方向に34分割）し、中心を原点として、視野画像中表示されるアイマークの位置を x 軸（水平方向； $-29 \sim +29$ n.d.）と y 軸（垂直方向； $-17 \sim +17$ n.d.）の座標軸で表現した。モニター画面の分割は、無色透明なクリアシートに縦横1 cm 毎に罫線を引き、分析モニターに粘着テープで固定することで行った。視野映像との関係から、座標値の絶対値「1」は視角にして約 1.13° であった。被験者は自由に頭部運動を行うため、視野映像中表示されるアイマーク（注視点）座標の絶対値は意味を持たないが、アイマークが視野映像の画角に入っている場合には、頭部運動量を除く相対的な眼球運動量を求めることが可能であった。

(3) アイマーク座標と注視点座標の対応

視野映像の中に示されるアイマークと実際の被験者の注視点は必ずしも一致しているわけではなく、多少なりともズレを含んでいることがほとんどである。測

定前に行われるキャリブレーションの段階で、こうしたズレは極力排除するようにし、場合によっては繰り返しキャリブレーションを行うことで測定可能な程度まで調整が試みられるが、被験者の疲労等を考慮すると長時間にわたるキャリブレーションには限界がある。

こうしたズレの原因の一つには、眼球と角膜反射光の光源及びセンサー（眼球像及び角膜反射光を捕捉する）の位置関係が挙げられる。通常はキャリブレーションの段階で調整が行われるが、眼球の変位が調整範囲を超えた場合にはアイマークと実際の注視点のズレがみられるようである。したがって、視野画像上でアイマークが画角の端に変位するほどズレが大きくなり、また、視野レンズの水平画角が大きいものほど視野画像上で顕著に現れる（EMR-8の仕様では、眼球運動の測定範囲は 40° 円とされており、推奨される視野レンズの水平画角は 44° である）。本研究においては、オペレータの掘削作業行動の全体を捉える目的から、可能な限り水平画角の広い視野レンズ（ 92° ）を採用することが望ましいが、こうした問題点を検討し、 62° レンズを使用することとした。その結果、視野映像から左右それぞれ 20° 以上外側に注視点の変位した場合、ズレが観察される場合が多かった。また、キャリブレーション時には第一眼位、第二眼位ともズレが観察されなかった場合であっても、第三眼位においてはズレが観察されることが多かった。

さらに、シミュレーション映像の提示の有無によって輻輳・開散運動（vergence eye movement）が観察されたことも、ズレの一因であった。これは、提示映像の切り替え後、数秒で生じた。シミュレーション映像提示前には一点に収斂していた左右のアイマークが、シミュレーション映像においてはおよそ $2^\circ \sim 5^\circ$ 程度（分析モニター画面上で確認）離れ、シミュレーション映像の提示終了後、再び一点に収斂する。この場合、シミュレーション映像を背景として左右アイマークと注視点のズレを確認すると、注視点は左右それぞれのアイマークのおよそ中間点に位置していた。提示されるシミュレーション映像はスクリーン上に2次元に投影されているが、被験者はこれらの映像を3次元的に認知していたと推測される。

こうした理由から、測定時のズレを完全に解消することは出来なかったが、「キャリブレーション後」「測定前」「測定後」のそれぞれでアイマークと注視点の一致の程度を判断した際の映像記録から、修正の必要性及び修正量を判断し、さらに、分析モニター上で測定されるアイマーク座標にこれらの修正を加えることで、注視点座標を求めた。こうした手続きは、ズレが比較的小さく、かつズレの程度や方向がほぼ一定である場

合にのみに適用し、有効データとした。

(4) 分析対象の選定

分析対象の選定にあたり、シミュレーションによる掘削作業の内容を検討した。実験は、1日目、2日目とも同じ内容で、それぞれ「中型掘削機モデル」と「小型掘削機モデル」を用いて行った。当初は、掘削機の大きさの違いに関する検討を行う計画であった。しかし、小型掘削機モデルの場合、初期設定位置のままでは掘削機の作業装置がダンプトラックの荷台に届かず、積込み作業を行うにあたってはクローラ（履帯）を操作して掘削機を移動する必要があるため、掘削機とダンプトラック・掘削地点の位置関係が被験者及び試行毎に異なる、という結果となった。三者の位置関係は、旋回角度や掘削・積込みを行う方向等に関して一連の作業内容に大きく影響し、直接比較を行うことが困難であると判断されたため、本研究においては分析対象から外すこととした。但し、分析対象となる試行以外に、小型掘削機モデルを用いたシミュレーションを行ったという意味において、被験者に練習試行としての効果を与えた可能性があることを考慮しなければならない。

実験に参加した被験者のうち測定が行われたのは、シミュレータ酔い等の症状が深刻であったため途中で実験を中止した3名(K, L, M)を除き、6名(A, B, C, D, E, F)であった。この6名は1日目、2日目とも実験に参加していた。これら6名の測定結果に関して「キャリブレーション後」「測定前」「測定後」のそれぞれでアイマーカーと注視点の対応の程度を評価し、ズレの程度が比較的小さく修正が可能なデータと、ズレが大きく十分に修正を行うことが困難なデータに二分し、分析対象データを選別した。

このようにして、中型掘削機モデルを使用した試行のうち分析対象データとして採用したものは、4名の被験者(A, B, E, F: 各被験者とも1試行分)のデータであった(平均年齢: 40 ± 12.1 歳, 平均経験年数: 7.8 ± 6.1 年)。いずれも眼鏡等は使用しておらず視力は正常であった。また、いずれも1日目の実験に参加した際のデータであった。

(5) データ分析

分析対象となったデータは、「分析用テープ」でアイマーカーと注視点の対応を確認し、修正が必要となる範囲と修正量を求めた。また、座標値を求めるための対象となる眼(右眼または左眼)を判断した。

分析の際に記録した内容は以下の通りである。

- ・ビデオフレーム番号(時分秒フィールド)
- ・対象となる眼に関する分析用モニター上のアイマーカー座標(x 軸, y 軸)

- ・操作内容(掘削, 左旋回, 積込み, 右旋回)
操作内容は以下の基準に従って4項目に分類した。
- ・掘削: 作業開始もしくは右旋回終了時から、掘削を行い左旋回を開始するまで
- ・左旋回: 掘削終了後左旋回を開始してから旋回を終えるまで
- ・積込み: 左旋回終了後、積込みを行い右旋回を開始するまで
- ・右旋回: 積込み終了後、次の掘削のために右旋回を開始してから旋回を終えるまで

分析用テープを1フレーム(1/30秒)ずつコマ送りし、フレーム毎に上記の項目について分類、記録を行った。記録したアイマーカーの座標値は、事前に判断したズレの範囲と程度に基づいて修正し、注視点座標を求めた。また、「瞬き」「視野映像画面角外への変位」等により注視点座標を求めることが出来ない場合には、直前の確認可能であった座標値と同一とみなした。

3.4 実験結果

(1) 注視点座標値の変化とフレーム毎の飛越距離

シミュレータを用いた眼球運動の測定においてまず注目したのは、「どの程度の眼球運動が行われているか」という点である。これは、注視点座標値の変化を時系列にしたがって示すことで表わされる。

以下に、被験者Bに関する眼球運動分析結果ならびに操作内容を示す。これは、連続して5回の作業を行った中の、1回目の作業に関する分析結果である。Fig. 2には、眼球運動の x 軸(水平方向)成分の変化を、Fig. 3には y 軸(垂直方向)成分の変化を、Fig. 4には飛越距離の変化を示す。なお、Fig. 2において、プラス側は被験者からみて正面より右方向、マイナス側は正面より左方向を示し、Fig. 3においてプラス側は被験者からみて正面より上方、マイナス側は下方を示している。Fig. 2の x 軸(水平方向)成分に関するグラフでは、左右への旋回操作直前から旋回操作中にかけて変化が激しく、他の操作時との違いが大きい。すなわち、旋回操作時には繰り返し左右へ視線を走らせていることを示すものである。これはFig. 4に示される飛越距離からも裏付けられる。左右への旋回操作時には繰り返し大きな飛越が観察されるが、それ以外の操作においては同様の飛越は見られない。旋回操作時とは対照的に、掘削及び積込みの操作においては x 軸(水平方向)成分、 y 軸(垂直方向)成分とも、細かな変化はあるものの概ね滑らかに推移しており、飛越距離に関してはほとんど変化が見られない。こうしたことから、旋回操作時においては左右へ視線を走らせることが頻繁に行われるものの、掘削及び積込みの作業

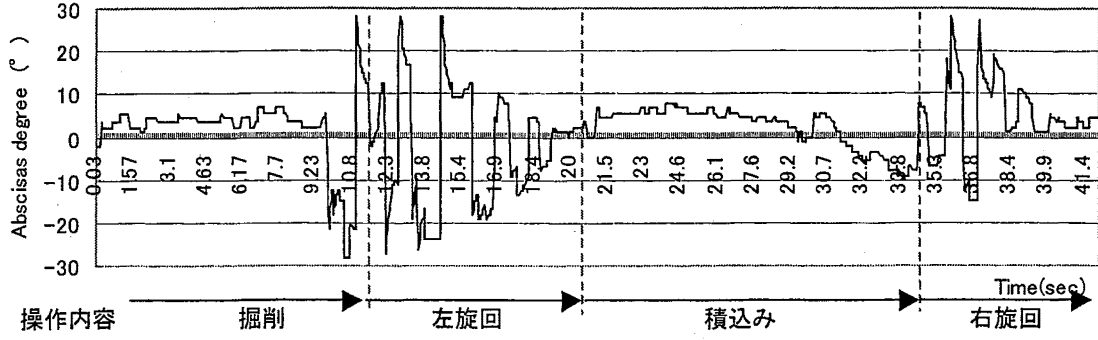


Fig. 2 Change of abscissas of eye-movement (Sub. B 1st).
 眼球運動の x 軸 (水平方向) 成分の変化 (被験者 B 1 回目)

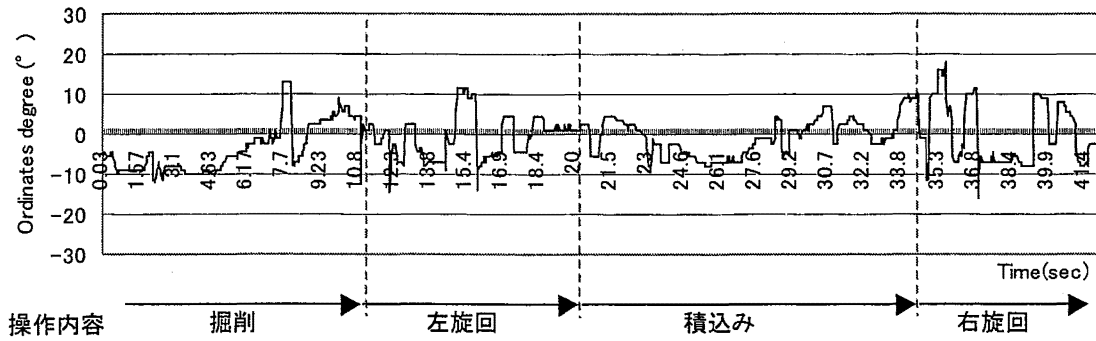


Fig. 3 Change of ordinates of eye-movement (Sub. B 1st).
 眼球運動の y 軸 (水平方向) 成分の変化 (被験者 B 1 回目)

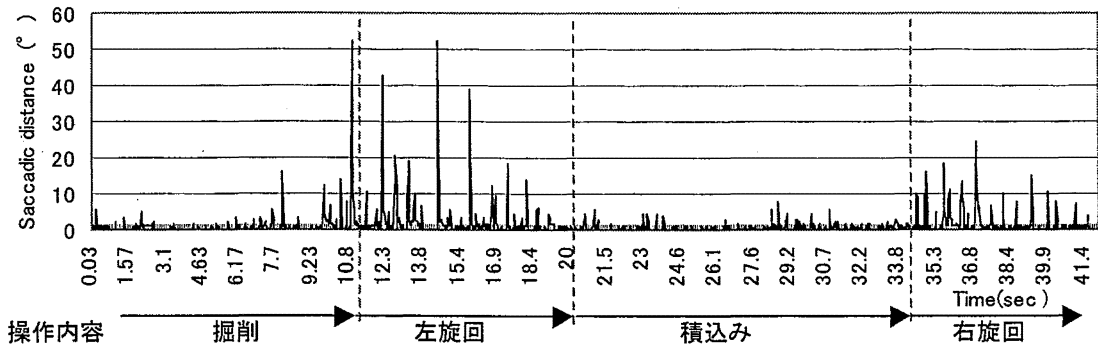


Fig. 4 Change of saccadic distance (Sub. B 1st).
 飛越距離の変化 (被験者 B 1 回目)

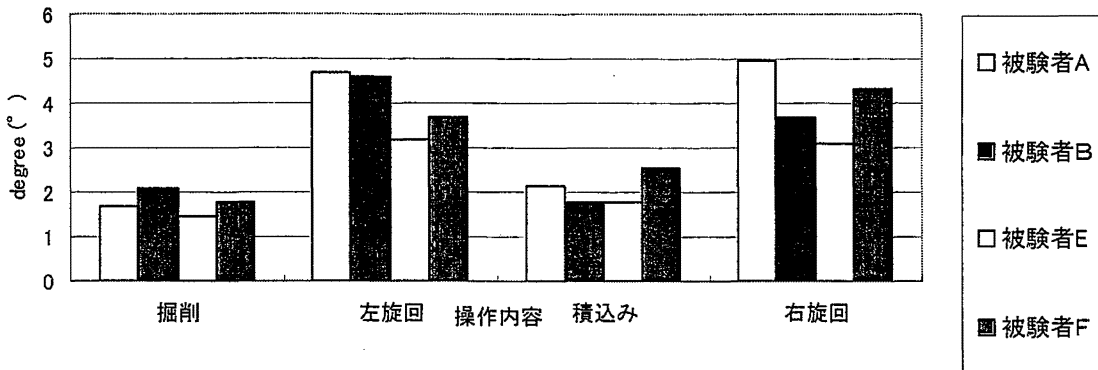


Fig. 5 Saccadic distance in every operation.
 操作内容別平均飛越距離

においては、何らかの対象を注視し続けることが多い、と考えられる。

同じ被験者 B によって引き続き行われた 2~5 回目の作業に関しても、さらに、分析対象となった他の被験者 (A, E, F) についても、ほぼ同様の傾向が認められた。

したがって、これら 4 名分の分析結果に共通する点は以下の通りである。

- ・ x 軸 (水平方向) 成分に関しては巡回操作時に大きく変化し、他の操作時においては滑らかな推移を示す。
- ・ y 軸 (垂直方向) 成分に関しては、操作内容による違いは僅かであり x 軸 (水平方向) 成分ほど変化が大きくない。
- ・ 左右への巡回操作時には繰り返し大きな飛越運動が観察されるが、それ以外の操作においてはほとんど変化が見られない。

(2) 操作内容毎の平均飛越距離

飛越距離の変化に関しては、操作内容によって傾向が異なることが示されたが、ここでは注視点の分布範囲の広さを直接示しているわけではないことを考慮しなければならない。飛越距離の変化に関する値はビデオ映像の 1 フレーム (1/30 秒) 毎の注視点座標変化を基に算出されているため、眼球運動があまり活発に行われることがなくとも、一度の眼球運動で注視点が大きく変位した場合には算出される値も大きくなり、グラフ上に極端な変化として表われる。それに対し、より頻繁に眼球運動が行われながらも注視点の変位毎の飛越距離がさほど大きくなければ、時系列に沿って飛越距離を示すグラフ上には反映されない。こうした点を考慮し、飛越運動が行われず停留であると判断されたデータを除き、飛越運動が観察された場合に限りその平均値を求め「平均飛越距離」とした。「停留」は、分析モニター上で読み取られた座標値 (1 目盛りはおよそ 1.13°) が 2 フレーム (2/30 秒) 以上変化しない、という基準を満たすものに限る、2 フレーム未満の場合には「飛越運動」と見なした。Fig. 5 に、各被験者の操作内容別平均飛越距離を示す。

いずれの被験者に関しても、掘削・積込みにおいて飛越距離は短く、 2° 前後のほぼ同じ値を示している。左右への巡回においてもほぼ同じ値を示しているが、幾分ばらつきが大きく、 $3\sim 5^\circ$ 程度の値を示している。掘削・積込み時と左右への巡回時に大きな違いが見られる点は、これまでの注視点座標値の変化量に関する結果に一致するものであり、停留を差し引いても、同様の傾向が確認された。分散分析 (二元配置、繰り返しなし) の結果、被験者間に差は見られなかったが ($F(3,9) = 3.09, n.s.$)、操作内容に関しては有意な差が認められ

た ($F(3,9) = 25.64, p < .05$)。こうしたことから、巡回操作時にはより広い範囲にわたる走査が行われていることが伺える。

(3) 注視点の分布状況

これまでの結果から、操作内容毎にみた時間的な推移に伴う眼球運動の変化、及び注視対象については確認することが可能であるが、その変化がどの程度の範囲に及んでいるかに関しては明らかではない。すなわち、注視点が斜め方向に変位した場合には、 x 軸 (水平方向) 成分、 y 軸 (垂直方向) 成分ならびに飛越距離にその変化が現れるものの、三者の対応関係を直感的に理解することは困難である。そのため、操作内容毎に注視点の座標値をプロットした分布図を基に、眼球運動の空間的な変化に着目した。分布図の原点 (0, 0) はアイマークカメラの視野映像中心を表わし、被験者毎に若干異なっているもの、およそ被験者から見た前方視野中心に対応する。Fig. 6~9 に、被験者 E の操作内容毎の注視点分布状況を示す。操作内容毎の分布範囲を比較した場合、掘削時と積込み時の分布状況は類似しており、注視点がほぼまとまっている。それに対し、左右への巡回時における分布状況は明らかに異なる傾向を示しており、注視点は主に横方向に広く分布する。また、左右の巡回時を比較した場合でも、左巡回時には分布が横方向に広がるのに対し、右巡回時には横方向に広がりつつも縦方向への広がりもみられている。こうした傾向はいずれの被験者のデータにも共通しており、作業回数毎に比較した場合でも大きな違いは認められなかった。

(4) 注視対象に対する注視回数の割合

「どの程度の眼球運動が行われているか」について確認された次の段階として、「掘削作業中にオペレータはどのような対象を見ているのか」といった点に注目した。注視対象は「その他」を含め以下の 9 項目に分類した。

- ・ バケット
- ・ アーム
- ・ 掘削地点
- ・ 荷台 (ダンプトラックの荷台)
- ・ 積載土 (前の作業時に荷台に積み込まれた土砂)
- ・ 送電線
- ・ フェンス
- ・ 地面 (掘削地点以外)
- ・ その他 (ピラー、ブーム、道路、巡回方向の先読み、等々)

上記の他に、注視対象が確認できない以下の 3 項目については、それぞれの内容に応じて分類を行った。

- ・ 瞬き

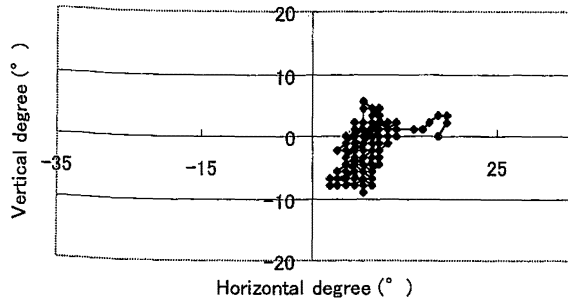


Fig. 6 Range of fixation points in excavating (Sub. E 1st.).
掘削時の注視点分布状況 被験者 E 作業 1 回目

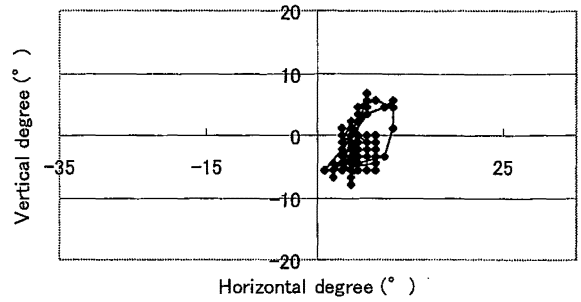


Fig. 8 Range of fixation points in loading (Sub. E 1st.).
積み込み時の注視点分布状況 被験者 E 作業 1 回目

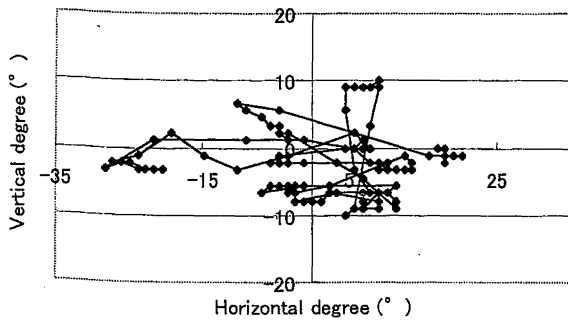


Fig. 7 Range of fixation points in left-turn (Sub. E 1st.).
左旋回時の注視点分布状況 被験者 E 作業 1 回目

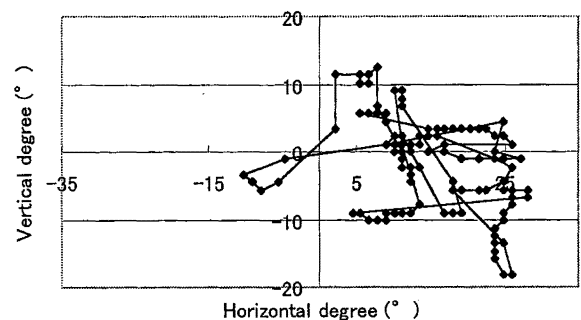


Fig. 9 Range of fixation points in right-turn (Sub. E 1st.).
右旋回時の注視点分布状況 被験者 E 作業 1 回目

- ・ 飛越運動 (ある対象への注視点停留が 2 フレーム = 2/30 秒未満)
- ・ 視野映像画角外への変位

これらの分類に基づき、1 フレーム (1/30 秒) ずつ分析用テープをコマ送りし、修正された注視点の位置から注視対象を判断した。

これらの手続きを踏まえ、1 作業あたりにある対象を何回注視したか、という「注視対象別注視回数の割合」を求めた。割合として算出した理由は、単に「注視回数」のみを求めた場合、その値は作業時間に依存する可能性があるためである。そのため、1 作業あたりの注視回数の合計を「1」とし、それぞれの注視対象毎にその割合を求めることとした。但し、それぞれの注視対象が持つ意味性を重視し、「ある対象から別な対象に注視点が移動した」と判断された場合にのみ注視回数は「1 回」とカウントされ、注視点の移動が認められた場合であっても同一の注視対象内であれば、連続して注視しているものと判断した。

分析対象となった 4 名の被験者の 1 回目、3 回目、5 回目の作業を対象とした。Fig. 10 に、注視対象別注視回数の割合を示す。

最も注視される回数が多いのはバケットであり (44.4%)、掘削地点 (17.2%)、荷台 (8.0%)、積載土 (7.4%)

が続く。他の対象に対してはいずれも割合は僅かであり、5%にも満たなかった。すなわち、注視行動のほとんどはバケットをはじめとする特定の対象に対して行われており、他の対象に対する注視が行われることが少ないことを示している。

(5) 注視対象に対する注視時間の割合

次に、ある対象に対する注視がどの程度の時間に行われていたかを検討するために、「注視対象別注視時間の割合」を求めた。注視回数が少ない場合であっても長時間にわたり注視が行われていれば、その対象から得られている情報量は多いと考えられるからである。注視対象別注視時間の割合は、注視点の停留が確認されたフレーム数の合計と注視対象毎に分類されたフレーム数の合計との関係から算出した (1 フレーム = 1/30 秒)。

「注視回数の割合」と同様、各被験者の 1 回目、3 回目、5 回目の作業を対象とした各被験者の注視時間 (フレーム数) から、対象毎の注視時間の割合を求めた。Fig. 11 に、「注視対象別注視時間の割合」を示す。注目すべきは、注視時間の 63.3% がバケットに対して費やされている点である。掘削地点に関しては 9.8%、荷台 7.0%、積載土 6.4% であったが、これら以外の対象に対する注視時間はいずれも 5% にも満たなかった。

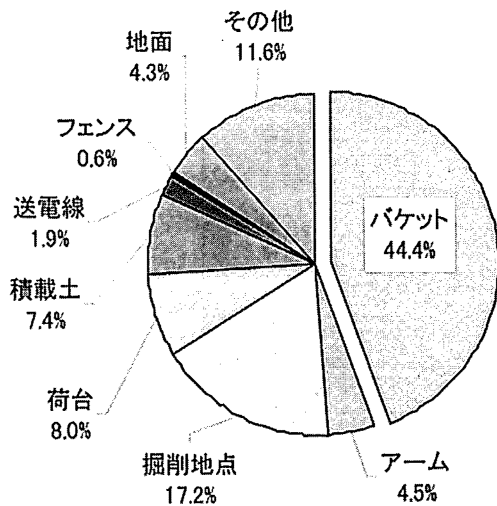


Fig. 10 Percentage of fixation times for each object.
注視対象別注視回数の割合

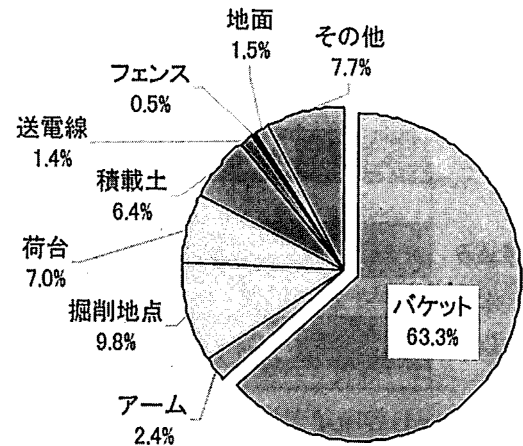


Fig. 11 Percentage of fixation duration for each object.
注視対象別注視時間の割合

(6) 操作内容別・注視対象別注視回数の割合

これまでの分析から、注視点座標の変位に関して操作内容毎に異なる傾向が認められた。操作内容毎の注視対象に関しても同様の違いがあると考えられることから、操作内容別・注視対象別の注視回数の割合を求めた (Fig. 12)。これまでの分析と同様、各被験者の1回目、3回目、5回目の作業を対象とした。

バケットに対する注視回数は作業内容毎に多少のばらつきがみられる。掘削時には50.1%、積込み時には46.2%であるのに対し、左右への旋回時にはいずれも35%程度である。また、他の注視対象に関しても操作内容毎に違いが認められる。掘削地点に関しては掘削時に35.1%、右旋回時に15.6%であるのに対し、左旋回及び積込みの際にはいずれも0%である。荷台に関しては左旋回時に21.1%、積込み時に13.7%であるのに対し、掘削時は0%、右旋回時でもわずか4.4%程度にすぎない。同様に、積載土に関しては積込み時に22.0%、左旋回時に7.5%、右旋回時に3.0%であるものの、掘削時においては0%である。

こうしたことから、いずれの操作においてもバケットに対する注視回数が最も多いものの、注視対象に対する注視回数は操作内容毎にそれぞれ異なっていることが示されている。

(7) 操作内容別・注視対象別注視時間の割合

さらに、操作内容毎に「注視対象別注視時間の割合」を求めた (Fig. 13)。前述のとおり、注視回数が少ない場合であっても長時間にわたり注視が行われていれば、その対象から得られている情報量は多いと考えられるからである。これまでの分析と同様、各被験者の1回目、3回目、5回目の作業を対象とした。操作内

容毎にみたそれぞれの注視対象に対する注視時間の割合は、注視回数の場合とほぼ同じ傾向を示した。すなわち、いずれの操作においてもバケットに対する注視時間が最も長く、他の対象に関してはバケットの半分にも満たない。しかし、バケットに対する注視時間も掘削時 (76.3%) 及び積込み時 (64.5%) に比べ旋回時 (左: 46.3%, 右: 39.5%) には短かった。また、他の注視対象に関しても、操作内容毎に違いが認められており、掘削地点に関しては掘削時に19.4%、右旋回時に19.2%であるのに対し、左旋回及び積込みの際にはいずれも0%である。荷台に関しては左旋回時に18.7%、積込み時に10.4%であるのに対し、掘削時は0%、右旋回時でもわずか5.0%程度にすぎない。同様に、積載土に関しては積込み時に15.3%、左旋回時に6.5%、右旋回時に2.2%であるものの、掘削時においては0%である。

こうしたことから、いずれの操作においてもバケットに対する注視時間が最も長いものの、注視対象に対する注視時間は操作内容毎にそれぞれ異なっていることが示されている。

3.5 考察

眼球運動成分の変化、飛越距離、注視点分布状況のいずれにも共通して、掘削・積込み操作の場合には変化が少なく、旋回操作の場合には大きな変化を示していることが確認された。また、注視対象に関する分析からは、バケットに対する注視行動が、回数・時間のいずれにおいて最もその割合が高く、中心視による視覚的情報の獲得はおよそ限られた対象から行われていることが示された。

操作内容によって違いがみられる点は、一連の作業

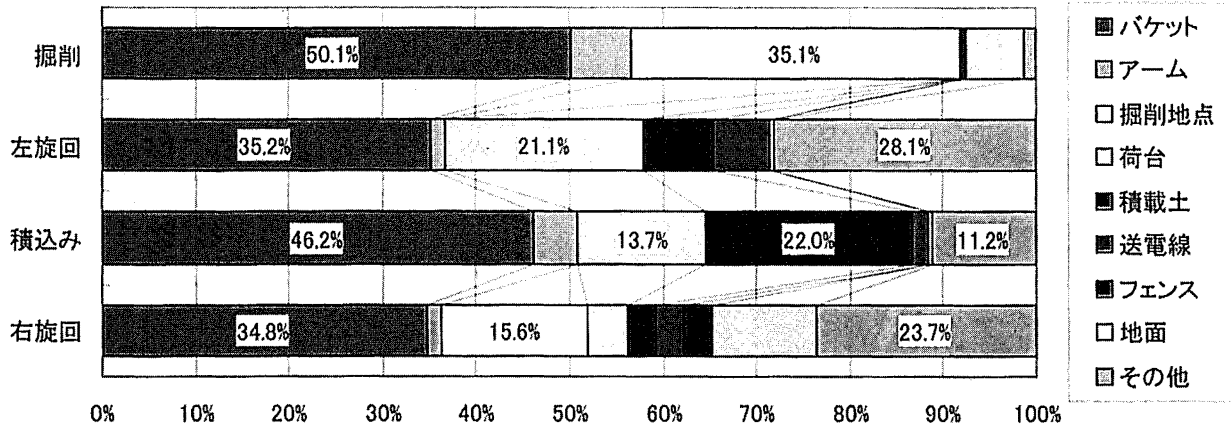


Fig. 12 Percentage of fixation times for each operation and object.
操作内容別・注視対象別注視回数の割合

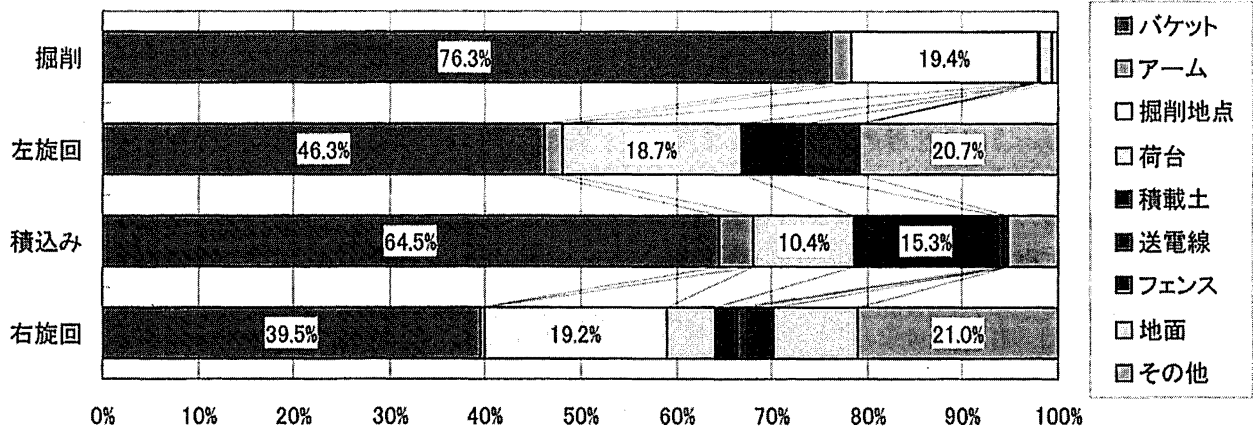


Fig. 13 Percentage of fixation duration for each operation and object.
操作内容別・注視対象別注視回数の割合

の中での「視覚的重要情報」に対応したものと考えることが出来る。すなわち、オペレータにとって第一に重要なのは、自らの操作内容をモニタリングするための「作業装置」の位置情報である。作業装置の中でも特に「バケット」は操作する掘削機の先端部であり、最も動きが激しく、作業精度に直接関わる部分である。さらに、どのような操作を行っても、その操作内容は必ずバケットの動きとして反映される。したがって、作業全体を通じて「バケット」への注視が増える結果となると考えられる。

バケット以外の重要な情報は、掘削操作においては掘削すべき「掘削地点」であり、積込み操作においては正確な放荷を行うための「荷台」、及び放荷地点の目標となる「積載土」であるため、注視回数、注視時間とも増加する。これらの作業においては、重要な情報となる対象物と「バケット」が近接しているため、これらの注視対象間を注視点が行き来しても、注視点

の分布範囲が広がることはなく、大きな飛越運動も生じ難い。

積込みを行うための左旋回時には、オペレータにとってはダンプトラックの「荷台」の位置情報が重要であり、旋回しながら度々その位置を確認することとなる。二回目以降の積込みにおいては、「積載土」が次の積込みの目標地点として利用される。「荷台」も「積載土」も被験者の視点から水平方向でやや下に位置する程度なので、「バケット」と「荷台」または「積載土」を交互に注視する結果、注視点の分布状況は横方向に広がることとなる。また、これらの注視対象間の空間的距離が離れていることから、一度に行われる飛越運動も大きくなる。

それに対し右旋回の際には、次の掘削に備え掘削すべき「掘削地点」の位置が重要な情報となる。「掘削地点」は地面と同じ高さであり、被験者の目線より下に位置する。「放荷」を終えたバケットの位置は荷台よ

り高い位置にあり、被験者の目線からやや上に位置する。操作内容をモニタリングするために「バケット」を注視しつつ、回転しながら度々「掘削地点」の位置を確認することになるため、視野の左上から右下にかけて注視点の分布状況は広がることとなる。

このようにして行われる視覚的な情報獲得行動が反映され、これまで検討されてきた飛越運動、注視点分布状況、注視回数、注視時間といった分析結果につながったものと考えられる。

市川、梅村¹⁵⁾は、滑空機操縦の際の眼球運動を測定している。飛行経験が3時間程度の被験者Aは、計器への注視割合が52.9%であったのに対し、飛行経験105時間の被験者Eは15.0%であった。飛行経験が多い被験者は、計器（速度計）を注視することが少なく、むしろ機首部分を注視することが多いことを報告している。その理由は、滑空機は機首の上げ下げによる速度制御が重要であり、習熟者は機首と地平線の関係から機体姿勢をチェックし速度を制御するのに対し、未熟練者は計器に頼るためである、という。これは、観察者にとって重要な情報が積極的に獲得されている例であると考えられる。また、どのような情報を重要であると評価するか、という選択に、経験的な要因が絡んでいることを示すものである。さらに、自動車の運転場面等を対象としたこれまでの研究からは、利用可能な情報を獲得できる有効視野の広さが、経験によって異なることが示されている。

本研究において対象とする掘削機の操作の場合にも、周囲の視対象に対する重要性の評価が経験によって異なり、行動に反映される可能性は高い。さらに、掘削作業において安全に関わる重要な要素は単に眼球運動にとどまるものではなく、むしろ周囲の危険対象を察知する有効視野の広がりや問題である。すなわち、掘削機の操作においてはどの程度の範囲から視覚的情報を取り入れることが出来るのか、言い換えれば、どの程度の範囲を越えると必要な情報を十分に取り入れることが出来ないのか、また、どのような要因が有効視野の変化に影響を及ぼすのか、といった点について検討する必要がある。こうしたことから、実験2においてはターゲット検出課題を取り入れ、掘削機操作の際の有効視野を測定した。

4. シミュレーションによる有効視野測定実験

4.1 目的

掘削機の操作を行う被験者に対しターゲット検出課題を課し、その検出範囲に基いて有効視野の測定を行うとともに、ターゲットの見逃し率・検出時の反応時

間・眼球運動から、掘削機の操作内容と空間的注意配分の関係について検討する。加えて、作業時の認知的負荷が見逃し率や反応時間にどのような影響を及ぼすかについて検討する。

4.2 実験方法

(1) 概要

被験者、実験に使用したシミュレータ、実験データの記録、実験手続、掘削機モデルの大きさについては、実験1と同じである。被験者は2日間にわたって実験に参加した。1日目と2日目の実験内容は同じであった。

(2) 条件

実験条件は以下の通りである。

- ・ 習熟した操作方式×未習熟な操作方式
- ・ 作業に関する指示：3通り

(ゆっくりで良いので出来るだけ正確に)

(大雑把で良いので出来るだけ早く)

(出来るだけ早く、出来るだけ正確に)

作業を「正確に」行うよう指示する場合には、Fig. 14に示すイラストを被験者に提示し、ダンプカーの荷台に土砂を均一に、順序よく載せるよう求めた。

また、上記実験条件のほかに、掘削機の操作を一切行わずターゲットの検出課題のみを行う統制条件を設けた。

(3) 検出ターゲット及び反応方法

実験2において検出対象となったターゲットは、作業環境を構築するコンピュータ・グラフィックスと同様の方法で生成し、プロジェクターによってスクリーンに投影した。

ターゲットの大きさ及び形状は、正面スクリーンの中央（標準的な被験者の着座位置で垂直・水平方向とも視角0°に相当）投影時で直径約75mmの円形、標準的な被験者の頭部位置を基準として視角約1.64°であった。赤色と黄色の2種類があり、ターゲットが正面スクリーン中央に提示された場合、赤色ターゲットの輝度

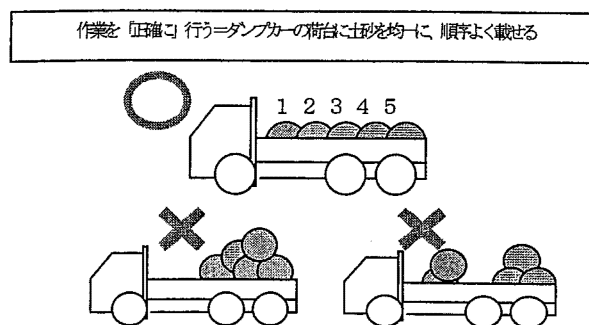


Fig. 14 The picture to explain how to load.
作業方法の説明図

は 1.91cd/m^2 、黄色ターゲットの輝度は 6.96cd/m^2 であった。ターゲット輝度の測定には、色彩色差計（ミノルタ株式会社製 CS-100）を使用した。

被験者に対して、ターゲットが赤色であった場合には右手操作レバーの上部に位置する反応ボタンで、黄色であった場合には左手の操作レバー上部に位置する反応ボタンで、出来るだけ早く反応するよう求めた。

こうしたターゲットの提示方法及び反応方法を採用した理由は、ターゲットの存在を周辺視のみで検出した反応ではなく、より深い認知的処理を行った上での反応を測定するためであった。実際の掘削作業現場においては周辺に存在する対象は様々であり、視覚的に必要とされる情報はより複雑であることがほとんどである。掘削機による災害の中でも「挟まれ・巻き込まれ」「激突され」等の種類の災害が多いことを鑑みれば、“何かがある”といった程度の認知ではなく、その対象に関するより多くの情報を取り入れた上での反応を測定する必要がある。

ターゲットの提示範囲は予備実験の結果に基づいて決定した。予備実験の結果、被験者正面を中心として $-180^\circ \sim -90^\circ$ 、及び $90^\circ \sim 180^\circ$ の範囲に提示されたターゲットに対する見逃し率が極めて高く、有効なデータを得ることは不可能であると判断した。また、ターゲットがスクリーンの上・下端に不完全な形で提示された場合は完全な形で提示された場合と比べて刺激量が著しく異なるため、提示されるターゲットがスクリーンの上・下端にかからない範囲を測定した。その結果、ターゲットの提示範囲は、被験者正面を中心として水平方向に左（-側） $90^\circ \sim$ 右（+側） 90° 、垂直方向に下（-側） $18^\circ \sim$ 上（+側） 13° に設定された。この提示範囲は被験者の位置を中心としているため掘削機の旋回操作を行う前後でも変化はなく、旋回中も被験者からみて一定の位置にターゲットを提示した。

また、シミュレーション環境を構築するコンピュータ・グラフィックスは二次元的にスクリーンに投影されるものの、対象物の位置関係等は三次元作業環境モデルに基いている。この三次元作業環境モデル内の位置関係によっては、ターゲットが他の対象物の陰に入ってしまう不完全な形での提示となることから、三次元作業環境モデル内で完全な形でのターゲットが提示される奥行き距離を事前に把握し、実験中は一定とした。

ターゲットは5分間で50刺激（平均6秒あたり1刺激）となるようランダムに提示され、赤色ターゲットと黄色ターゲットの出現確率は各々50%であった（赤色25刺激、黄色25刺激）。但し、ターゲット1刺激の最大提示時間は3秒とされ、3秒以内に被験者の反応が行われた場合、ターゲットはその時点で消失した。最

大提示時間以内に反応が行われなかった場合（見落とし反応）、ターゲットは自動的に消失した。

4.3 分析方法

分析用テープの作成、注視点座標の測定モニター、アイマーカー座標と注視点座標の対応は、実験1に同じである。

(1) 分析対象の選定

分析対象の選定にあたり、小型掘削機モデルを使用した試行に関しては、実験1と同様の理由から本研究の分析対象から外すこととした。但し、被験者に練習試行としての効果を与えた可能性があることを考慮しなければならない。

次に、ターゲットに対する見逃し率、反応時間の分析対象を選定し、6名（A, B, C, D, E, F）のデータが有効であると判断した。但し、被験者Bの統制条件（掘削作業なし）1回目、及び被験者Cの8回目の試行（中型掘削機モデル・未習熟操作・大雑把で良いので出来るだけ早く・1日目）については、コンピュータの不調によりデータが消失してしまったため、欠損値データとして扱った。

また、眼球運動測定データに関しては、実験1の場合と同様に測定されたデータを対象にアイマーカーと注視点の対応の程度を評価し、4名の被験者（A, B, E, F）について測定した結果を有効データとした。中型掘削機モデルを使用し、作業指示は“ゆっくりで良いので出来るだけ正確に”作業を行うよう求める内容に統一した結果、1回目の試行（習熟した操作方式の1日目）、7回目の試行（未習熟な操作方式の1日目）、10回目の試行（習熟した操作方式2日目）の3条件を分析対象として選定した。被験者はいずれも眼鏡等は使用しておらず、視力は正常であった。

(2) データ分析

検出対象となるターゲットに関する情報（提示位置座標、色、提示開始時点、提示終了時点）、及びターゲットに対する被験者の反応（反応スイッチ、反応開始時点、反応終了時点）については、操作内容の記録と同様の方法で、シミュレーション制御コンピュータに記録した。この記録データを基に、それぞれのターゲットに対する反応内容（正反応、誤反応、見逃し）の分類、及び反応時間の算出を行った。ターゲットの提示時間は最大でも3000msであるが、4000msまでの反応を分析対象とした。また、反応時間が4000ms以上の場合を見逃し反応とした。

一方、ターゲットの提示が行われていないにも関わらず反応ボタンが押されていた場合、こうした反応はすべて偽警報（false alarm）とし、分析対象から除外

した。また、赤色のターゲット提示に対し、黄色ターゲットの反応（またはその逆）を行った場合には誤反応として分類したが、反応全体の中でも極めて数が少なかったため、分析及び考察の対象には含まなかった（見逃し率の算出には含まれる）。

また、眼球運動に関するデータは、実験1と同じ方法を用いて注視対象等を判断した。

4.4 実験結果

(1) 実験条件と統制条件

初めに、掘削作業の最中にターゲットの検出課題を行った「実験条件」全体と、掘削作業を行わずにターゲット検出課題のみを行った「統制条件」での結果の違いに注目する。Fig. 15 に実験条件と統制条件に関する正反応の平均反応時間を、Fig. 16 に実験条件と統制条件の平均見逃し率を示す。平均反応時間については有意な差が認められた ($t(2697)=1.16, p < .001$)。平均見逃し率についても同様に有意な差が認められた ($\chi^2(1)=55.276, p < .001$)。

(2) ターゲットの提示範囲別反応時間と見逃し率

Fig. 17 に、ターゲットの提示位置を水平方向に 30° ずつ分類し、それぞれの範囲における正反応の平均反応時間を示す。被験者の正面位置を 0° とした場合、概

ね中心から遠ざかるに連れて反応時間が長くなっている。分散分析（2元配置）の結果、角度別 ($F(5,2687)=29.82, p < .001$) に有意な差がみられたほか、条件別 ($F(1,2687)=44.83, p < .001$) に有意な差がみられたが、交互作用はみられなかった ($F(5,2687)=1.80, n.s$)。

同様に、Fig. 18 に、ターゲットの提示位置を水平方向に 30° ずつ分類した場合の平均見逃し率を示す。反応時間の場合と同様に、中心から遠ざかるにつれて見逃し率が高くなっており、その傾向は実験条件においてより顕著である。 χ^2 検定の結果、いずれの条件においても提示範囲の間に有意な差がみられた（実験条件： $\chi^2(5)=61.156, p < .001$ ，統制条件： $\chi^2(5)=602.874, p < .001$ ）。

測定は自由な頭部運動を被験者に許容する形で行われたが、いずれの条件においても正面から周辺部へ向かうほど反応時間は長くなっており、見逃し率も増加する結果となった。

(3) ターゲットの色別反応時間と見逃し率

Fig. 19 にターゲットの色別平均反応時間を示す。赤色ターゲットと黄色ターゲットのいずれにおいても、実験条件と統制条件の間に差が認められた（黄色； $t(1382)=1.02, p < .001$ ，赤色； $t(1313)=1.28, p < .01$ ）。また、

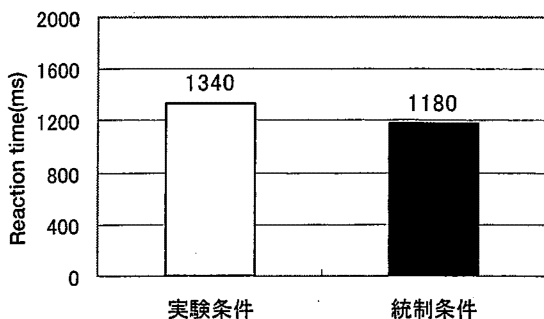


Fig. 15 Reaction time for experimental- and control condition.
条件別平均反応時間

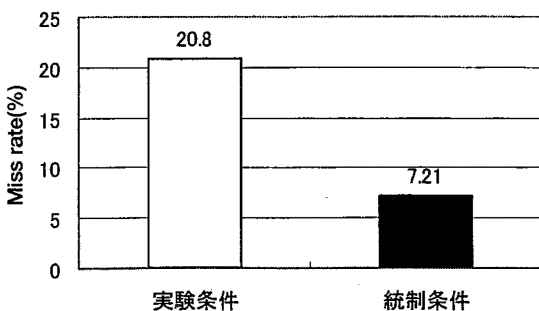


Fig. 16 Miss rate for experimental- and control condition.
条件別平均見逃し率

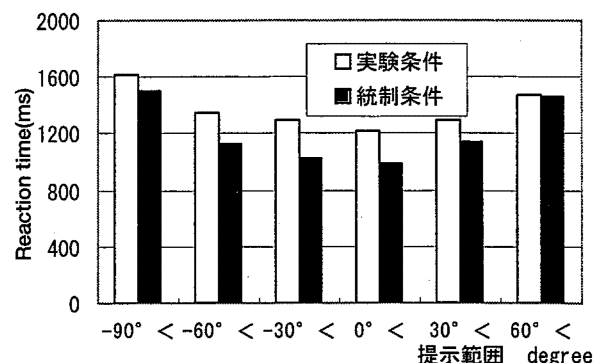


Fig. 17 Reaction time for each area.
指示範囲別平均反応時間

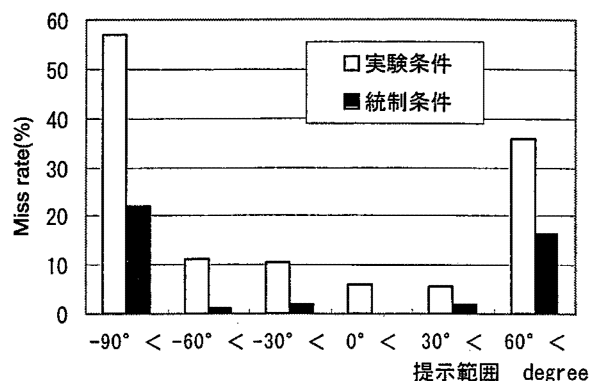


Fig. 18 Miss rate for each area.
指示範囲別平均見逃し率

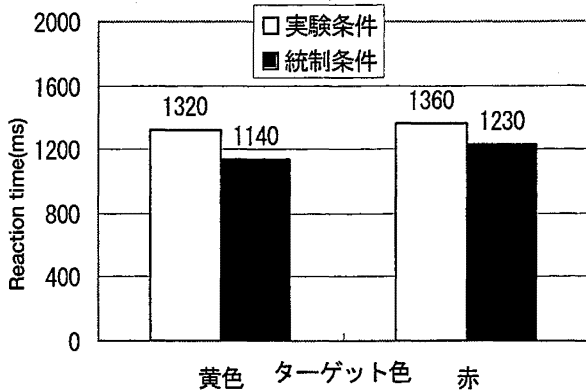


Fig. 19 Reaction time for each target. ターゲットの色別平均反応時間

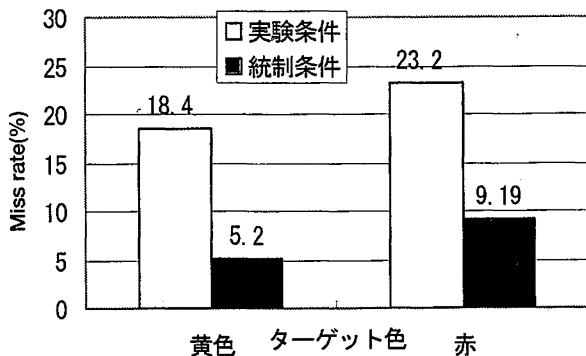


Fig. 20 Miss rate for each target. ターゲットの色別平均見逃し率

分散分析 (2元配置) の結果, 条件間に有意な差が認められた ($F(1,2695)=32.63, p < .001$). 黄色と赤色の間には差はみられなかった ($F(1,2695)=3.71, n.s.$). また, 交互作用はみられなかった ($F(1,2695) = 0.95, n.s.$).

同様に, ターゲットの色別平均見逃し率を Fig. 20 に示す. 赤色ターゲットと黄色ターゲットのいずれにおいても, 見逃し率については両条件の間に有意な差が認められた (黄色; $\chi^2(1)=28.891, p < .001$, 赤色; $\chi^2(1)=26.892, p < .001$). また, 黄色ターゲットと赤色ターゲットとの間には, いずれの条件においても有意な差が認められた (実験条件; $\chi^2(1)=9.461, p < .01$, 統制条件; $\chi^2(1)=3.214, p < .01$).

(4) 作業に関する指示の違いの影響

作業に関する指示の違いによる平均反応時間は以下の通りであった。

- ・ ゆっくりで良いので出来るだけ正確に : 1370 ms
- ・ 大雑把で良いので出来るだけ早く : 1300 ms
- ・ 出来るだけ早く出来るだけ正確に : 1350 ms

分散分析 (一元配置) の結果, 反応時間に関して有意な差はみられなかった ($F(2,2194)=2.41, n.s.$).

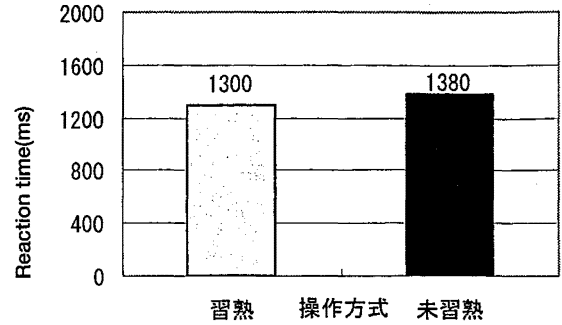


Fig. 21 Reaction time for each way of operation. 操作方式の違いによる反応時間

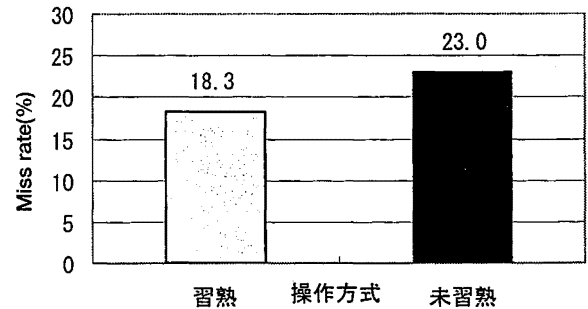


Fig. 22 Miss rate for each way of operation. 操作方式の違いによる見逃し率

同じく, 作業に関する指示の違いによる平均見逃し率は以下の通りであった。

- ・ ゆっくりで良いので出来るだけ正確に : 25.3%
- ・ 大雑把で良いので出来るだけ早く : 18.1%
- ・ 出来るだけ早く出来るだけ正確に : 17.6%

見逃し率に関しては, 作業に関する指示の違いによって有意な差がみられる結果となった ($\chi^2(2)=22.268, p < .001$).

(5) 操作方式の違いによる反応時間と見逃し率

Fig. 21 に, 実験条件における操作方式の違い (習熟した操作方式, 未習熟の操作方式) による平均反応時間を示す. 習熟した操作方式に比べ, 未習熟の操作方式では反応時間は幾分長くなっている. 分析の結果, 習熟した操作方式と未習熟な操作方式の間に有意な差がみられた ($t(2195)=1.00, p < .001$).

Fig. 22 に, 操作方式の違いによる平均見逃し率を示す. 習熟した操作方式と比べ, 未習熟の操作方式では見逃し率が高く, 有意な差がみられた ($\chi^2(1)=9.427, p < .01$).

(6) 経験年数と反応時間・見逃し率の関係

次に, オペレータの経験年数と反応時間・見逃し率の關係に注目した. 分析対象となった6名の被験者を経験年数によって5年以下と10年以上に二分し, そ

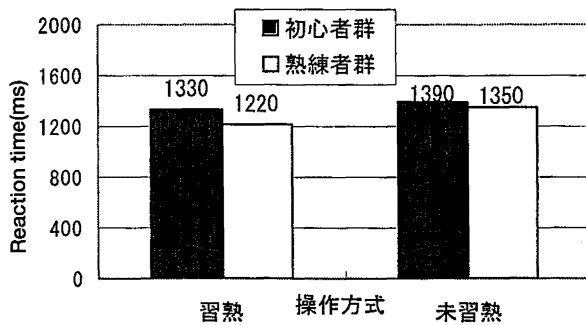


Fig. 23 Reaction time for each way of operation and experience.
操作方式の違いによる経験別平均反応時間

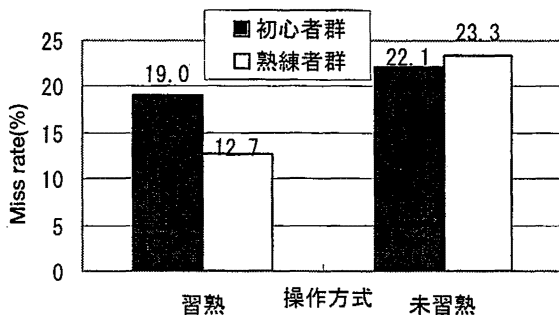


Fig. 24 Miss rate for each way of operation and experience.
操作方式の違いによる経験別平均見逃し率

それぞれを「初心者群」「熟練者群」とした。初心者群は A, B, C, D の 4 名 (平均年齢 31.5±6.8 歳, 経験年数 3±1.8 年) の被験者で構成され, 熟練者群は E, F の 2 名 (平均年齢 43.0±19.8 歳, 経験年数 12.5±3.5 年) で構成された。反応時間に関しては, 試行毎の反応数のばらつきによる影響を少なくするため, 各被験者毎の平均値より群の平均値を求め, その値に基づいて両群の比較が行われた。見逃し率に関しては, 統計的な手続きを考慮し, 各被験者の反応数から算出した。図示は省略するが, 実験結果は以下の通りであった。

実験条件における経験別平均反応時間は, 初心者群 1360 ms, 熟練者群 1280 ms であり, 有意な差はみられなかった ($t(69)=2.83$, n.s.)。同じく実験条件における経験別平均見逃し率は, 初心者群 20.5%, 熟練者群 18.0% であり, 有意な差はみられなかった ($\chi^2(1)=1.036$, n.s.)。

統制条件における経験別平均反応時間については, 初心者群においては 1280 ms, 熟練者群においては 1020 ms であり, 有意な差がみられた ($t(9)=1.11$, $p < .01$)。同じく統制条件における経験別平均見逃し率については, 初心者群においては 7.0%, 熟練者群においては 8.0% であり, 有意な差はみられなかった ($\chi^2(1)=0.325$, n.s.)。

以上のように, 実験条件と統制条件のそれぞれにつ

いて反応時間及び見逃し率を比較したが, 経験年数による違いは統制条件における反応時間においてみられるのみであった。

(7) 操作方式の違いと経験年数の関係

Fig. 23 に, 実験条件における経験別にみた操作方式の違い (習熟した操作方式, 未習熟の操作方式) による平均反応時間を示す。いずれの群においても, 未習熟の操作方式の場合は反応時間が長くなっているが, 熟練者群においてその傾向はより顕著である。分散分析 (二元配置) の結果, 操作方式に関して ($F(1,67)=5.37$, $p < .05$), 及び経験群に関して ($F(1,67)=4.25$, $p < .05$) 有意な差がみられたが, 交互作用は見られなかった ($F(1,67)=1.09$, n.s.)。

Fig. 24 に, 経験別にみた操作方式の違いによる平均見逃し率を示す。習熟した操作方式の場合, 初心者群と熟練者群の間に有意な差がみられた ($\chi^2(1)=5.618$, $p < .05$)。未習熟の操作方式の場合, 両群の間に有意な差はみられなかった ($\chi^2(1)=0.287$, n.s.)。

いずれの群においても, 未習熟の操作方式の場合には見逃し率が高くなっているが, 熟練者群においてその傾向はより顕著であり, 反応時間に関する結果に一致するものであった。

(8) ターゲット検出課題と眼球運動

ターゲット検出課題に関して次に注目すべきは, 反応の遅れやターゲットの見逃しは, 何をみている時に, 何をみている時に多いのか, という点である。

実験 1 からは, 眼球運動や注視対象は操作内容によって変化することが把握されており, また, これまでの実験 2 に関する分析から, 操作方式の違いが経験年数に及ぼす影響について更に検討を行う必要があるため, これらの観点から反応時間及び見逃し率と注視対象及び操作内容との関係について検討した。以下に主な結果を示す。

◆注視対象別反応時間

- バケットを注視していた場合 :
 - 初心者群 1315 ms, 熟練者群 1223 ms
 - $t(10)=0.24$, n.s.
- バケット以外の対象を注視していた場合 :
 - 初心者群 1336 ms, 熟練者群 1309 ms
 - $t(53)=0.75$, n.s.
- 注視対象が不明であった場合 :
 - 初心者群 1419 ms, 熟練者群 817 ms
 - $t(17)=0.01$, n.s.

◆注視対象別見逃し率

- バケットを注視していた場合 :
 - 初心者群 23.5%, 熟練者群 25.9%
 - $\chi^2(1)=0.648$, n.s.

- ・ バケット以外の対象を注視していた場合：
 初心者群 29.7%， 熟練者群 22.9%
 $\chi^2(1)=0.264, n.s.$
- ・ 注視対象が不明であった場合：
 初心者群 25.0%， 熟練者群で 16.7%
 $\chi^2(1)=0.825, n.s.$

いずれも統計的有意差はみられなかった。また、操作内容別、及び操作方式別に分析を行ったが、いずれも経験年数との関連を見出す結果を得ることは出来なかった。

4.5 考察

ターゲット検出のみを行う統制条件と比べ、掘削機の操作を伴う実験条件において反応時間、見逃し率とも有意にパフォーマンスが低い結果となったことは、掘削機の操作そのものがオペレータに対して負荷を与えていることを示している。今回の実験において作業を行った環境は決して複雑なものではなかったが、現実の作業環境は様々な障害物や危険対象が多く、作業中の負荷はより大きいものと考えられる。

また、ターゲットの提示範囲別に比較した結果、概ね周辺部に向かうに連れて次第にパフォーマンスが低下していることが確認された。従来の頭部運動を制限した研究では、離心率の増大に伴うパフォーマンスの低下

(網膜感度に依存する)が確認されている。しかし、被験者に自由な頭部運動を許容した状態で行われた今回の実験においても同様の結果が得られたことから、検出パフォーマンスが網膜感度に依存するとともに、オペレータの空間的注意が身体の正面を中心として分布している可能性が示唆される。

ターゲットの色に関しては、見逃し率について差が見られた。一般的に黄・青と比べ、赤と緑の色覚限界は狭く、黄色と比べ赤色の方が周辺視で感受しにくいことから、検出率に差が現れたと考えられる。一方で、ターゲットの輝度の影響も否定できないため、今後の検討を要する。

作業に関する指示の違いは、「作業の早さ」と「正確さ」に関連するものであったが、見逃し率に関して低い値を示している指示の内容はいずれも作業の早さを求めるものであった。作業の早さを求められたために見逃しが減った、という解釈が妥当であるが、一方で「早さ」と「正確さ」は trade-off の関係にあることが一般的であり、矛盾が生じる結果といえる。見逃し率に関して低い値を示している 2 種類の指示の内容が、一方は「大雑把でよいので」であり、他方が「正確に」としているにも関わらず、両者の間には大きな違いは見られていないことから、作業に関する指示の影響以上に、例えばターゲット検出課題に対する習熟といった

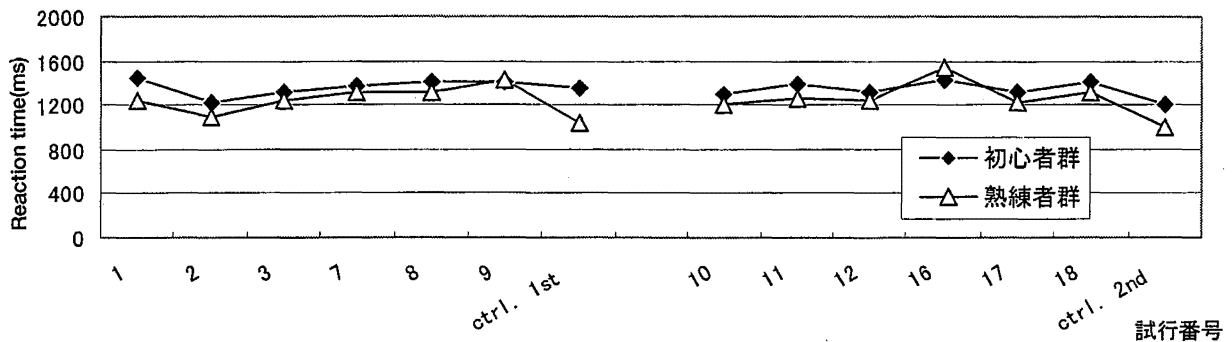


Fig. 25 Change of reaction time as the trial proceeding.
 経験別にみた試行順平均反応時間の変化

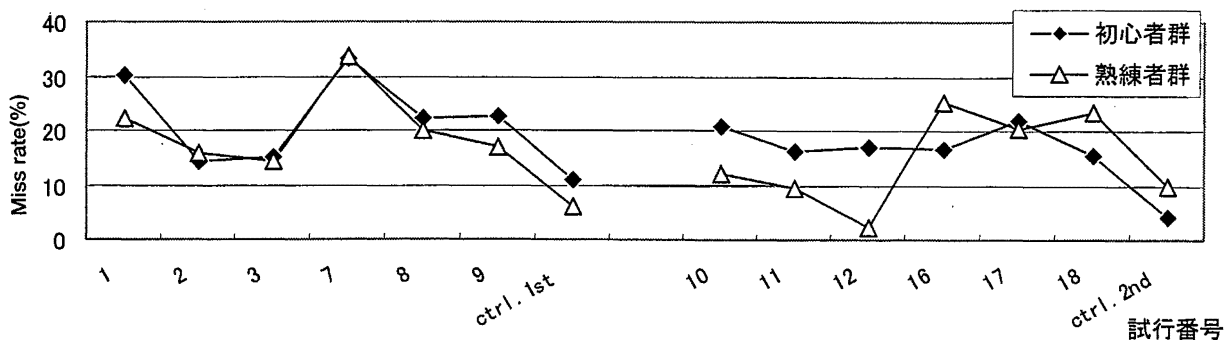


Fig. 26 Change of miss rate as the trial proceeding.
 経験別にみた試行順平均見逃し率の変化

要因が絡んでいる可能性があるだろう。この点に関しては、連続する試行における見逃し率の変化等について、さらに検討する必要がある。

操作方式の違いに関しては、反応時間と見逃し率のいずれにも差が認められており、未習熟の操作方法によってオペレータに与えられる負荷の高さを示すものである。単純に経験年数に着目した分析においては初心者群と熟練群の間に際立った違いが認められなかったにも関わらず、経験年数と操作方式の両者に着目した分析においては、未習熟な操作方式の場合、特に熟練者のパフォーマンスが大きく低下していた。これは、経験年数が長く、固有の操作方式に習熟したオペレータほど、未習熟な操作方式に対応が困難であることを示すものである。

操作方式による影響は、試行順序に従った反応時間及び見逃し率の変化に表れている。Fig. 25 には経験別にみた試行順平均反応時間を、Fig. 26 には経験別にみた試行順平均見逃し率を示す（試行番号 4~6, 13~15 については、小型掘削機モデルによる試行であるため省略）。

他の試行と比べ試行番号 1 において、反応時間、見逃し率とも幾分高い値を示すのは、いずれの被験者にとっても初めてのターゲット検出課題であり、初めての掘削作業シミュレーションであった影響が大きいと考えられる。

試行番号 9 及び 16 においては初心者群に比べ熟練者群の反応時間が長かった点に注目したい。初心者群に関しては試行毎の違いがそれほど大きくないのに対し、熟練者群に関しては試行番号 9 及び 16 において、変化が大きい。試行番号 9 及び 16 は、いずれも未習熟な操作方法によって行われた試行であり、経験年数によって操作方法の違いによる影響が異なることを示すものである。

経験別にみた試行順見逃し率の変化に関して試行毎の変化に注目すると、未習熟の操作方式（試行番号 7~9, 及び 16~18）において変化が著しい。しかも未習熟の操作に変更された直後である試行（試行番号 7 及び 16）において、値が急激に上昇している。初心者群の 2 日目に関してはその変化が大きくはないものの、全体を通じて共通した傾向にあると言える。また、1 日目の試行（試行番号 1, 2, 3, 7, 8, 9 及び掘削を行わない統制条件 1 回目）については初心者群と熟練者群とではほぼ同じ値で推移しているのに対し、2 日目の試行では幾分異なる傾向がみられる。試行番号 10~12 にかけては初心者群に比べ熟練者群が低い値を示しているのに対し、未熟練の操作方式の場合には初心者群と熟練者群の値が逆転するようになる。

こうした結果から、1 日目の試行においては馴染みのないターゲット検出課題やシミュレーションに対し、熟練者群は本来の技能を発揮することが出来ずにいたため初心者群との違いが明確に現れなかったが、課題やシミュレーションに慣れてきた 2 日目の試行では習熟した操作方式に関して初心者群との差が明確に現れた反面、経験年数が長いが故に未習熟の操作方式に対する抵抗が大きくパフォーマンスが著しく低下した、と考えられる。

一方、ターゲット検出課題と眼球運動との関係に関しては、明確な結論を得るには至らなかった。分析対象となった被験者がわずか 4 名であり、データ数が十分ではなかったことが一因である。眼球運動に関する分析は、アイマークのズレと膨大なデータの解析が効率化を阻む最大の要因であり、より多くのデータに基づく検討を行うため、測定方法・解析方法の改善が今後の検討課題である。

5. おわりに

眼球運動の測定を行った実験 1 の結果から、掘削機オペレータの視覚情報の獲得に関する基礎的なデータを得ることが出来た。また、ターゲット検出課題を課した実験 2 の結果から、掘削機操作時の有効視野に影響を及ぼす要因について検討を行った。これらを通じ、従来は明らかにされていなかった掘削機オペレータの視覚的情報処理過程について、多くの示唆を得ることが出来た。

一方、これらはすべて、シミュレーション実験を通じて得られた結果である。シミュレーション実験の結果が、実際場面 (real situation) における行動とどの程度一致しているか、といった「シミュレーションの妥当性」については未だ明らかにされてはいないため、今後の最重要課題として検討を要する。

今回の実験を通じて得られた結果の中で最も注目すべきは、未習熟な操作方式が経験豊富なオペレータに及ぼす影響である。複数の操作方式が混在する状況においては操作ミスによる災害の発生可能性が高いことから、現在は操作方式の統一化が図られている¹⁶⁾。しかし一方で、多くの作業現場においては「馴染みのある扱いやすい操作方式」が定着しており、豊富な経験を有するオペレータほど、身に染みついた操作方式から新しい操作方式への転移が困難である。そのため、統一操作に慣れるために少なからず練習を行いながらも、以前の操作方式に戻ってしまうオペレータも多い。

操作方式の統一化は、操作ミスによる災害の防止に極めて有効な手段である。しかし、これら統一操作方式が隔々にまで完全に定着するにはかなりの時間を要

するであろう。そのため、統一化が達成されるまでの移行期間においては、未習熟な操作方式がオペレータに与える影響、すなわち、有効視野の狭窄による検出率の低下、反応時間の増大といった現象に考慮し、慎重な対応が必要である。

参考文献

- 1) K. Pahlavan, Designing an Anthropomorphic Head-Eye System, W.H. Zangenmeister, H.S. Stiehl, & C. Freksa (Eds.), Visual Attention and Cognition, pp. 269-292, Elsevier Science Publishers (1996).
- 2) D. Klebelsberg, 交通心理学, 蓮花一己訳, 長山泰久監訳, 企業開発センター交通問題研究室 (1990).
- 3) R.D. Campbell and M. Bagshaw, Human Performance and Limitations in Aviation, Blackwell Science (1991).
- 4) 古賀一男, 重力基準の問題, 牧野達郎編, 知覚の可塑性と行動適応, プレーン出版, pp. 75-87 (1998).
- 5) J.M. Henderson, Visual Attention and Saccadic Eye Movements, G. d'Ydewalle and J. van Rensbergen (Eds.), Perception and Cognition: Advances in Eye Movement Research, pp. 38-50, Elsevier Science Publishers (1993).
- 6) 三浦利章, 視覚的行動・研究ノート — 注視時間と有効視野を中心として —, 大阪大学人間科学部紀要, 第8巻, pp. 173-206 (1982).
- 7) 狩野広之, 行動と環境, そして事象 (I) 対象の認知, 労働科学 Vol. 53, No. 1 (1977).
- 8) T. Miura, Active Function of Eye Movement and Useful Field of View in a Realistic Setting, R.G. Groner, G. d'Ydewalle and R. Parham (Eds.), From Eye to Mind: Information Acquisition in Perception, Search and Reading, Elsevier Science Publishers, pp. 119-127 (1990).
- 9) 三浦利章, 行動と視覚的注意, 風間書房 (1996).
- 10) D. Crundall, G. Underwood and P. Chapman, Driving experience and the functional field of view, Perception, vol. 28, pp. 1075-1087 (1999).
- 11) F・H・ホーキンス, ヒューマンファクター — 航空の分野を中心として —, 黒田勲監修, 石川好美監訳, 成山堂 (1992).
- 12) 下條信輔, 逆さめがねからバーチャルリアリティへ, 牧野達郎編, 知覚の可塑性と行動適応, プレーン出版, pp. 3-16 (1998).
- 13) 古賀一男, 眼球運動実験ハンドブック, 労働科学研究所出版部 (1998).
- 14) 北濱亨, 三浦利章, 岡崎甚幸, 篠原一光, 田村仁志, 松井裕子, 迷路探索歩行時の注視と歩行に関する研究, 人間工学, Vol. 35, No. 3 (1999).
- 15) 市川博, 梅村守, 滑空機操縦者の視線移動に関する実験的検討, 人間工学, Vol. 33, No. 4 (1997).
- 16) 金原正起, 油圧ショベルのヒューマンエラー防止対策, 建設機械, 日本工業出版, pp. 14-18 (2000).

(平成 13 年 2 月 14 日受理)