

注視行動の統計的性質

STATISTICAL ASPECT OF DRIVER'S EYE-MOVEMENT

村田 隆裕*
By Takahiro Murata

1. 序

この小論は、アイカメラによる自動車運転者の注視点の分析から得られた、注視時間の頻度分布に関する統計的性質についての報告である。行動に関する研究は、心理学や医学の分野で過去一世紀にわたって発展をみていくが、ここで扱う目の動きに関する基礎的、応用的研究も、今世紀初頭以来、個々の学問分野で体系が確立しつつある。しかし、その研究成果をそのまま土木技術に生かすことは困難である。なぜなら各分野にはそれぞれの学問体系があり、一つの行動についての研究も、研究者の分野によって体系内の位置づけが異なるためである。臨床医学における目の動きの研究は、主として目の病疾の追求を終局の目的としたものであり、生理学においては、目の動きの生理的メカニズムを探求することに目的を有し、心理学においては、目の動きを心理的現象としてとらえて心理の法則性の説明として研究される。しかし、土木工学の体系においては、行動とは技術的成果である土木構造物とそれを利用する人間の行動との関連性を追求するために研究されるべきものである。この関連性を明らかにすれば、人間行動に関するよりよい機能をもつ新たな構造物の設計に役立つようになることが期待される。

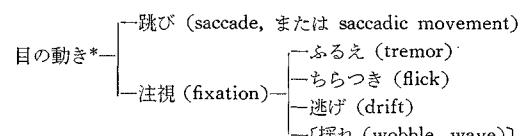
自動車運転者の注視行動の問題は、道路およびその付帯構造物、関連施設の計画や設計において考慮すべき事項や基準を得るためにとり上げたものである。注視行動とは、目の動き (eye movement) のうち、その動きによって、視覚情報を得るための動き、と定義したい。これを定義する理由は、目の動きのうちでも、たとえば迷路性眼振と呼ばれる現象などは、生理的な原因による目の不規則な動きであり、このときは目の動きは視覚的情報の受容とは無関係にとり扱われるためである。

以降、注視行動に関する従来の研究成果を概括し、注視時間の確率密度関数を導いて、母数に関する考察を行ない、アイカメラによる自動車運転者の注視対象に関する実験によって、注視時間の頻度分布を求めて、適合度検定による母数推定を行ない、運転中の注視対象と、それが行動に与える影響との関連性をさぐる。

2. 注視行動に関する従来の研究

(1) 目の動き

目の動きについての研究は、すでに 17 世紀前半ケプラーが手がけたといわれている。しかし、体系的な研究は今世紀初頭にいろいろな学問分野ではじめられ、以降約半世紀にわたって目の動きについての定説が固定した。現在、注視行動における目の動きは次のように分類されている。



この分類は定説となっているが、ほかの機能をもつ動きも見出されている。すなわち、追跡運動 (pursuit movement), 代償性運動 (compensatory movement), 輪輳 (convergence), 開散 (divergence), また眼振 (nystagmus) などである。追跡運動とは、ほぼ 30°/sec 以下の速さで動く対象をなめらかに追っていく目の動きのことを指す。目は静止している線状の対象に沿ってなめらかに動くことはできない。線状の対象をたどるときや、対象を次々に見るときには注視点は速い動き (跳び) と静止 (注視) を繰り返す。この性質は、目の動きの基本的性質であり、これについて 1903 年にすでに

* 注視以外の用語は筆者が仮に名付けたもの。またこの分類法は〔〕内のもの以外は参考文献 1) による。

Dodge が指摘していた²⁾。また、注視中にも完全に静止することができず、常に微小な動きが生じていることが知られた。このことについては 1948 年に Lord and Wright³⁾ と Hartridge and Thomson⁴⁾ の間に論争があり、Ratliff and Riggs がその論争に結着をつけ(1950)⁵⁾、Barlow(1952)⁶⁾、Ditchburn and Ginsborg(1953)⁷⁾ が追試を行なって定説化した。

跳びは、注視点の移動に伴う速い動きである。Robinson は、種々の大きさの跳びにおける目の動きの時間変化を計測した⁸⁾(図-1)。また、いろいろな研究者が跳びの定量的性質を求めているが、それらをまとめると表-2 のようになる。表-1 はその出典の一覧である。

ふるえは、目を動かす筋肉群のバランスにおける特徴であるといわれる¹⁴⁾。この動きの振動数と大きさは表-2 に示すとおりである。つまり大きさが 3°~2° の 30~150/sec で振動する不規則な小さな動きである。

逃げは注視の間に対象の網膜像が中心窓(ちゅうしん

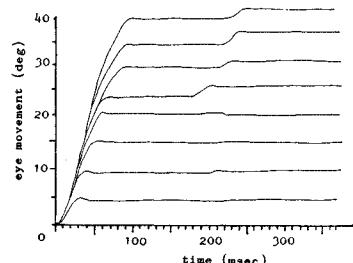


図-1 跳びの時間的特性 (Robinson¹⁰⁾)

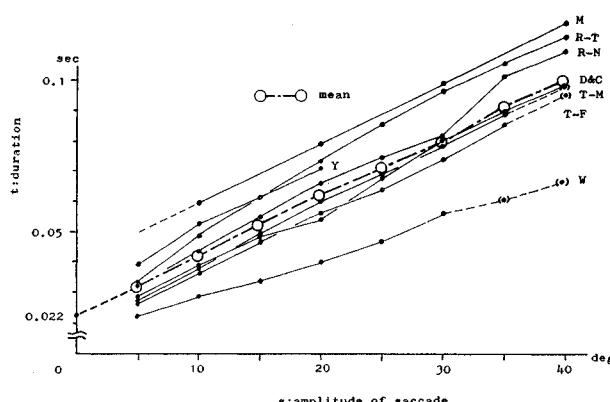


図-2 跳びの大きさと持続時間 (表-2 参照)

表-1 図-2 の出典の一覧

記号	研究者	備考	発表年	参考文献
D&C	Dodge and Cline		1901	9)
T-M	Tinker	7名の男性についての平均	1947	10)
T-F	Tinker	7名の女性についての平均	1947	10)
W	Westheimer		1954	11)
Y	Yarbus		1956	12)
M	Mackensen		1958	13)
R-T	Robinson	こめかみ側への動き	1964	8)
R-N	Robinson	鼻側への動き	1964	8)
平均	Yarbus	Yarbus のデータを除くデータについての平均		

表-2 ふるえの定量的性質

研究者	振動数 (c/s)	振幅	発表年	参考文献
Adler and Fliegelman	50~100	平均 1'	1934	15)
Ratliff and Riggs	30~70	0~2', 平均 17.7"	1950	5)
Higgins and Schultz	平均 50	平均 1.2'	1952	16)
Ditchburn and Ginsborg	30~80	10°~30°	1953	7)
Barlow	—	1' 以下	1952	6)
Riggs, Armington, and Ratliff	40~107, 平均 63	3°~18°	1954	17)
Pritchard	150	平均 9"	1961	18)

か：網膜内の最も視力の大きい点)から、ゆっくりとずれてゆく動きである。Barlow の測定では逃げの大きさは 6' を超えることがほとんどなく、速度はたかだか 20'/sec である⁶⁾。暗所では 5 sec の動きの間での逃げは 6' ~31' で、15' を超えたものが 8 例あり、平均 11' である。Ratliff and Riggs の報告では 5' 以上にならないと記されている⁵⁾。逃げを定量的に扱った研究は少ない

が、この逃げの裏の事象であるちらつきについては多くの研究がある。

ちらつきは逃げによって中心窓から離れた対象の網膜像を、中心窓に戻すための動きといわれる。その定量的性質をまとめると、表-3 のようになる。この表によると、大きさは 26' 程度までであり、生起時間は 0.02~0.03 sec できわめて短い。また生起間隔が不規則であることは重要な性質である。

揺れについては、Ratliff and Riggs⁵⁾、Lord and Wright³⁾ および Barlow⁶⁾ の報告等に見られる目の動きで、Barlow はこれについて「明らかに、小さな一点を注視するように要求された被

表-3 ちらつきの定量的性質

研究者	生起の間隔	頻度 (1/sec)	大きさ	持続時間(sec)	発表年	参考文献
Adler and Fliegelman	1 sec	1	8'		1934	15)
Lord and Wright	0.86~12 sec	0.08~1.2	2~25'	0.02~0.03	1948	3)
Ratliff and Riggs	0.2 sec 以下、3~4 sec の場合もあり、不規則	5 以上、0.3 前後の場合もある。	2.2'~25.8'、10'以上はまれ、平均 5.6'	0.02	1950	5)
Barlow	変化多し		変化多し		1952	6)
Ditchburn and Ginsborg	0.03~5.0 sec、平均 0.75 sec.、変化が著しい。	0.2~30、平均 1.33	5'~15'、平均 6'	(速度は 10°/sec)	1953	7)

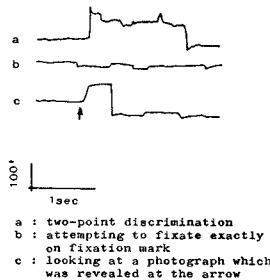


図-3 微小な目の動きの記録例 (Barlow⁶⁾)

被験者内でも、被験者間でも変化が大きい、と述べている。

以上の目の動きは Barlow の実験報告⁶⁾に典型的な形で示されている(図-3)。

(2) 注視対象に関連づけた研究

以上は注視行動としての目の動き自体の研究成果を概括したものであるが、さらに注視対象、すなわち環境要素と対応づけた研究についても若干の補足をしたい。この種の研究の初期のものとして、心理学における読み(reading)の際の目の動きに関する研究¹⁹⁾や、絵画に対する注視行動の研究²⁰⁾があった。また、対象に対する注意との関連でも研究がなされているといわれている¹⁾。最近になって、技術的要請またそれらに伴う測定装置の開発により、種々の実用的な研究が進められている。たとえば、レーダーの探索における目の動きの研究²¹⁾、飛行機の操縦における注視行動、テレビジョンに対する注視行動²²⁾、広告や建築の分野での応用、そしてこの論文の主題である自動車運転者の目の動き^{23)~27)}などである。これらの研究は、1960年前後から光学的測定装置が発達していることに伴って盛んになっている。

対象に関連づけた研究では主として注視対象が何であるか、またその注視時間の特性がどのようにになっているか、という点が主として研究されてきた。また注意の度合いと目の動きの関連についても、多くの研究者が追求してきた。読みにおける目の動きを研究した Tinker は、文章の難易が跳びの回数に影響する、と指摘した¹⁹⁾。また Lord and Wright や Ratliff and Riggs の微小な目の動きについての諸研究の中には、対象の形と目の動きとの対応について触れた部分があるが、いずれも対象の形と目の動きとの対応は見出せないと結論している^{3), 5)}。しかし、これらの実験では、注視対象は点と十字線のみであって、これらは被験者にとって同様の意味しかもたないと考えられ、したがってこの結論は一般的に正しいとはいえない。Barlow は注意の集中の度合いが跳び、あるいはちらつきに影響すると考え、対象の相違によって跳びの生起回数に変化が見られるかどうかを

探ろうとしたが果たせなかつたと報告している⁶⁾。これらの基礎的な諸事実をふまえて、筆者は目の動きの現象によって注意の集中の度合いが説明しうると考え、一つの対象に対する注視時間分布のパラメーターによってそれを定量的に表現することを試みる。

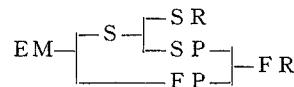
それについて述べる前に、目の動きの測定方法について触れておく必要がある。測定方法として初期には目の動きを直接にとり出す機械的方法もあったが、最近では主として光学的方法、および EOG 法という電気的方法が用いられている。これらのうち、注視対象と関連づけた研究には光学的方法の一つである角膜反射法による装置が主として用いられ、この研究でもアイカメラと呼ばれる装置を使用した。アイカメラによれば、視野の画像の中に注視点が光点として重複して写し込まれ、それを映画のフィルムやビデオコーダーに記録できるので分析が容易である。

3. 注視時間の確率密度関数

一つの対象に対する注視時間は、二つの相続して起こる跳びの間の間隔時間と考えることができる。このことに基づいて、注視時間の確率密度関数を理論的に導き、さらにこれまでの実験によって知られている注視時間の頻度分布をこの分布にあてはめ、適合性検定と母数の値の推定を行なって母数の意味について考察する。

(1) 注視時間の確率密度関数

目の動きの現象の統計的性質から、一つの対象に対する注視時間の確率密度関数を導く。目の動きの形態は、一般には前述のように分類されるが、これを確率事象として扱うために次のような事象からなりたつとする。



EM(目の動き)は、S および FP よりなる。S は跳び(SR)と、潜在的または仮想的な跳び(SP)とからなる事象で、FP は S の余事象である。FR は SR の余事象で、注視に相当する。事象 SP はここでちらつきであるという仮定をおく。しかし、この仮定がなりたたなくとも、SP が次の二つの条件を満たす仮想の事象であるとすれば、以後の論述にとって障害とはならない。

① 生起確率が小さい。

② ある時間内の生起回数の分布は二項分布である。

従来の研究によって、SR(跳び)の生起確率も、SP(ちらつき)の生起確率もともに 0.1 以下であることが知られているので、①の条件は満たされている。また②は、EM が S とその余事象とからなりたつことと同義

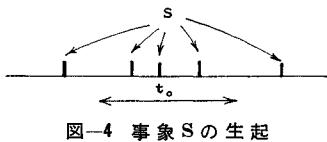


図-4 事象 S の生起

である。この条件のもとで、注視時間、すなわち SR の生起間隔時間の確率密度関数を導く。

まず S の生起回数の分布がポアソン分布にしたがうことを示す。S の生起は、時間軸上で図-4 のようになっているので時間 t_0 内に S が j 回生起する確率は二項分布

$$B(j/N, p) = \frac{N!}{j!(N-j)!} p^j (1-p)^{N-j}$$

にしたがう。 N は時間 t_0 がすべて S によって満たされたと仮定するときの S の回数であり、 p は S の生起確率である。ここで p は小さい ($p < 0.1$) ので、 $N_p = \lambda'(j$ の期待値) が一定ならば、 N は大きい。この条件のもとに、二項分布は次のように変形される。

$$\begin{aligned} & \frac{N!}{j!(N-j)!} p^j (1-p)^{N-j} \\ & \xrightarrow[N \rightarrow \infty]{N_p = \lambda'} \frac{\lambda'^j}{j!} \left(1 - \frac{N_p}{N}\right)^N \\ & \xrightarrow[N \rightarrow \infty]{} \frac{\lambda'^j}{j!} e^{-\lambda'} \end{aligned}$$

この式はポアソン分布である。

S の生起間隔時間 t' の分布は、一定時間内の S の生起回数の分布がポアソン分布であることから、指数分布、すなわち

$$f_1(t') = \lambda e^{-\lambda t'} \quad \text{ただし } \lambda = \lambda'/t_0$$

となる。

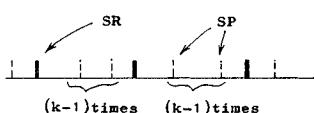


図-5 事象 SR, SP の生起

SR の生起間隔時間の確率密度関数は、アーラン分布となる。すなわち、SR と SP の時間軸上の配列が図-5 のように、SR が生起した後、SP が $(k-1)$ 回つづけて生起し、再び SR が起きる、という状況にあるとすると、SR の生起間隔時間の分布の確率密度関数 $f(t)$ は S のそれのたたみ込みによって求められ、それが指数分布であることから

$$f(t) = \frac{\lambda^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda t}$$

となる。

(2) 適合性検定と母数推定

目の動きについてのいろいろな分野での研究で、注視

表-4 検定に用いるデータの一覧

番号	注視行動、注視対象	研究者	発表年	参考文献
1	絵 画	Buswell	1935	20)
2	自由探索	Ford, White and Lichtenstein	1959	30)
3	レービー探索	White and Ford	1960	21)
4	テレビジョン、ドラマ	渡部ほか	1965	22)
5	同上 (被験者異なる)	同 上	同上	同上
6	テレビジョン、自然風景	同 上	同上	同上
7	高速道路の静止写真	小笠原	1966	31)
8	都市内高速道路走行中	同 上	同上	同上
9	同 上	同 上	同上	同上
10	信号灯	大藏	1969	27)
11	都市景観の静止写真	福島	1969	31)
12	幾何模様	同 上	同上	同上

時間の頻度分布が求められることが多い。しかしそれは、ヒストグラムの形で得られているだけで、その分布からは平均値、最頻値などの統計量が算出される以外には、ヒストグラムの形状については定性的に言及されているにすぎなかった。

ここでは、従来得られている注視時間の頻度分布をアーラン分布にあてはめ、 χ^2 検定による適合性の検定を行なう。検定に用いるデータは表-4 に示す。これらの頻度分布がアーラン分布にあてはめられるものとして、アーラン分布の二つの母数 m と k を次のようにして求めた。まず注視時間の平均値を m の仮の値とし、 k を 1, 2, ..., 12 まで変化させて各 k の値を母数とす

表-5 適合度検定の結果

番号	注視行動、注視対象	N	m (sec)	k	λ (/sec)	$P\chi^2$
1	絵 画	44	0.29	8	27.9	0.60
2	自由探索	1204	0.28	6	21.2	0.07
3	レーダー探索	607	0.36	8	22.2	0.76
4	テレビジョン、ドラマ	312	0.49	2	4.1	0.53
5	同上 (被験者異なる)	267	0.42	2	4.4	0.21
6	テレビジョン、自然風景	372	0.33	3	9.2	0.75
7	高速道路の静止写真	381	0.26	2	7.8	0.70
8	都市内高速道路走行中	121	0.23	2	8.9	0.51
9	同 上	612	0.21	2	9.6	0.04
10	信号灯	147	0.19	2	10.4	0.51
11	都市景観の静止写真	367	0.33	3	9.2	0.90
12	幾何模様	625	0.29	2	7.0	0.48

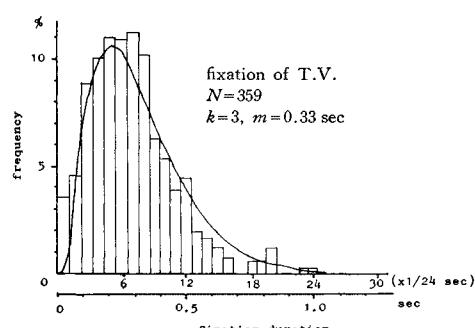


図-6 注視時間分布の一例 (表-5 の 5)

るアーラン分布を理論分布とし、それぞれについて χ^2 値、自由度、 χ^2 確率を算出して、 χ^2 確率を最大にする k の値を k の推定値とする。ついで m の値を微小量ずつ変化させて、同じく χ^2 確率を最大にする m の値を m の推定値とする。その結果を表-5に示す。図-6は適合度の高いデータとその理論分布である。ここで χ^2 確率とは、得られた χ^2 値を χ_0^2 とすると $P(\chi^2 \geq \chi_0^2)$ のことを指す。この値は、観測値と理論値がすべて一致しているとき（すなわち $\chi_0^2=0$ ）に 100% となって最大の適合度となるが、 χ^2 確率による適合度の値はどれほどどの値まで許されるかについて、若干考察したい。 $P(\chi^2 \geq \chi_0^2)$ は 0.05, 0.01 などの値がとられることがあるが、これらは仮説 $\chi^2=0$ の検定における有意水準、すなわち $\chi_0^2=0$ の仮説を棄却したときに、その仮説が真である確率（第一種の誤りの確率）である。この有意水準で仮説が棄却し得た場合に、「適合しない」と結論することは妥当であっても、棄却し得ないときにただちに仮説を採択する（「適合する」）と結論を下すことは危険であろう。0.05, 0.01 などの値は、仮説の否定（「適合しない」）の結論に意味のあるフィッシャーの有意性検定に用いられる値であって、仮説の肯定（「適合する」）を調べる場合には、適当な値ではないといえる。ここでは、有意性検定とは異なる考え方で適合度の基準を定める。

χ^2 分布から χ^2 値の最もとりやすい値、すなわち χ^2 分布の最大値を与える χ^2 値を χ_m^2 とすると、 $P_m=P(\chi^2 \geq \chi_m^2)$ が適合度として一つの基準値と考えられるであろう。 χ^2 分布の微分によってこの χ_m^2 は自由度 ϕ が $\phi \geq 3$ のとき $\chi_m^2=\phi-2$ となり、 ϕ が 1 および 2 のとき $\chi_m^2=0$ となる。 P_m の値は計算によって図-7に示すように求められた。

P_m の値は通常 0.5~0.7 といわれているが、ここでの考え方によれば 0.59~0.80 となる。もっとも χ^2 値の最もとりやすい値における χ^2 確率としての P_m 自体を適合と不適合の境界とすることはいささか厳しすぎると

もいえる。

これらの値からどの程度のへだたりならば適合していると結論されるかについては、今後の研究に委ねなければならない。表-5 の χ^2 確率は、常識的な値である 0.5 以上を採用した。注視時間の頻度分布はアーラン分布にあてはめ得る場合が多いことが知られた。各注視行動におけるアーラン分布の母数について考察する。

(3) 平均注視時間 m

従来、注視時間に関してはその平均値のみが論じられていた。たとえば Tinker は文字の読みにおける目の動きの研究の結論として「読む対象が難解で複雑になるほど停留の頻度も停留時間もともに増加する」と述べている¹⁹⁾。自由探索およびレーダー探索について研究した White and Ford は「注視時間、注視回数もともに目の動きを束縛する度合いの関数であって、その束縛は視覚的作業によって課せられるものであろう」と考えている²¹⁾。テレビジョンの画面を見る目の動きを研究した渡辺らは、注視時間の分布から注視点停留時間の平均値を求め、「画面を見る場合、眼球は 1/5~1/2 秒ごとに動くことが生理的に無理のない状態であると同時に、画面上の 1 点から必要な情報を得るのにはこの程度の時間を必要とすると推定してよいであろう」と述べている²²⁾。このほかにも注視行動を扱った研究では、ほとんどが平均注視時間について考察をしている。

表-5 によると、平均注視時間 m は 0.19~0.49 sec であり、渡辺らの記述と一致する。しかし、 m の意味については、諸研究における考察を総合しても、明確な概念を抽象することは困難である。 m の意味としては、むしろ各注視行動の特性としての値、すなわち対象によって規定される数値であるという説明が妥当な記述であろう。たとえば、レーダーのような対象を見る場合には、 m は 0.28~0.36 sec、テレビを見る場合は 0.42~0.49 sec、静止した二次元的な対象（写真、絵画など）を見るときには 0.26~0.33 sec、自動車運転の場合には 0.18~

0.23 sec などである。それぞれの注視行動において、 m はある標準の値を持ち、測定された値として考へることができる。今後の研究においても平均注視時間を算出し、その成果の積み重ねによって標準的な m の値と、ばらつきの度合いとが明らかになるであろう。現在までのところでは、前述の諸値を基準として考へるものとする。

(4) 凝視度 k

平均注視時間の意味が統計論的にしか記述し得ない一方、アーラン分布のいま一つの母数 k は、注視における注意の集中の度合い（凝視度）を示

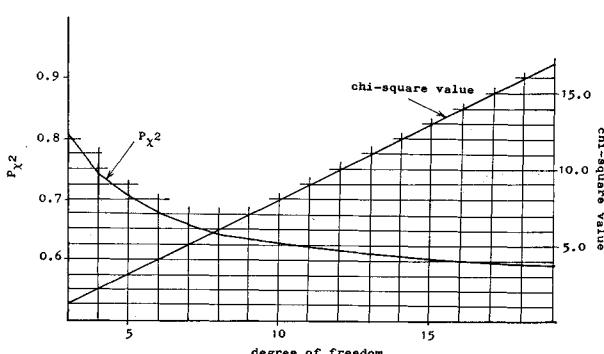


図-7 最も起こりやすい χ^2 値と χ^2 確率

す指標となり得ると考えられる。この仮説が立てられる理由を次に述べる。

アーラン分布の母数としての k は、目の動きの現象においては二つの相次いで生起する飛びの中間の仮想的な飛び（これがちらつきにあたるならば潜在的な飛び、といえる）の回数に 1 を加えた値となっていることは前述のとおりである。

飛びの機能については Barlow は「被験者の行なわなければならぬ（視覚的な）仕事に対して、被験者が関心があるかどうかということが（目の）動き（すなわち飛び）の頻度を決める主要な要因であり得る。（飛びの）頻度が高くなるのは被験者に課せられる視覚的な作業に変化が起こるときである」と述べている⁶⁾。Thomas もまた「被験者が見る対象に興味をもつと、目の動きが頻繁になる」と述べている²⁵⁾。

一方、ちらつきは、目の動きの性質としては飛びと同質のものである。麦島は、飛びとちらつきとは本質的に一つの現象であると述べている¹⁾。Tinker も「飛びの特性はそれが読みにおける注視時の動きと、本質的には同じである」と結論し、いずれも飛びとちらつきを同一の現象であることを記している¹⁹⁾。Barlow は、大きさが 2° 近くの動きも $10'$ 程度の動きもすべて、飛び (saccadic movement) と呼んでいる⁶⁾。Cornsweet は $5'$ 程度の速い動きを指して「ちらつき、あるいは飛び」(flicks or saccades) と呼んでいる²⁸⁾。

図-2 はまた、おのずからこれらのことと裏付けている。これは、飛びの大きさ (s) と飛びの生起している時間 (t) との関係であり、これらの間に、線形の関係のあることが示されている。この関係が s が 5° 以下の場合も保たれるとすると $s=0$ のとき $t=0.022$ となる。このことは、ちらつきを微小な飛びと考えるときにちらつきの生起時間が 0.022 sec であることを示している。そして一方、ちらつきの現象自身についての二つの実験結果は、ちらつきの生起時間を $0.02 \sim 0.03 \text{ sec}$ (Lord and Wright), 0.02 sec (Ratliff and Riggs) であることを示しているのである（表-3）。ちらつきが微小な飛びであるとすると、ちらつきの機能は前に述べた飛びの機能と同じであるとすることはできよう。すなわち、関心をもって注視するときに S の生起の頻度が高くなるという仮説を立て得るのである。一つの対象を注視する間の S は、ちらつきである。一つの対象を注視するときの関心の度合いはその対象に至る飛びとその対象から離れる飛びの間に生起するちらつきの回数に 1 を加えた値 (k) によって表わすこととし、この指標を凝視度と名付けることとする。前に述べた従来の研究の注視時間に関する考察においても、この凝視度の考え方を導入することによりより明確な記述をすることができると思われる。

表-5 の k の値については次のことがいえる。 k の値の大部分は $2 \sim 3$ である。この程度の値が通常の注視行動—テレビを見る、写真や絵画を見る、自動車運転をするなど—における凝視度と考えることができる。しかし、自由探索、レーダー探索のように特別な注意をもって対象（レーダーのスクリーン）を注視するときには $k = 6, k=8$ となる。

ちらつきの生起間隔は、きわめて不規則であることは表-2 に示されているが、このことも SP（仮想的、あるいは潜在的 S）がちらつきに相当するならば容易に説明される。なぜなら S の生起間隔の分布が指數分布であることは、すなわち、S の生起の不規則性を示すからである。

4. 自動車運転者の注視行動

(1) 一般的対象に対する注視

これまで述べてきた仮説に基づき、高速道路における自動車運転者の注視行動の特性を調べる。解析には、アイカメラ（商品名ナックアイマークレコーダ）による運転者の注視点調査の結果を用いる。

行なわれた調査の概要は次のとおりである。

調査道路：東名高速道路静岡一富士間

期間：1968年10月17日～19日および11月27

日

被験者：18才～27才男性5名

調査は、アイカメラを装着した運転者が高速道路を走行し、その間の目の動きを 24コマ/sec の 16mm 撮影機で撮影する方法による。写真-1 はアイカメラを頭部に取り付けた運転者と、 16mm 撮影機を操作する調査担当者を示す。アイカメラによって得られるフィルムは写真-2 に示すようなもので、V点が注視する対象に一致している。撮影機の制約から、時間は 160 sec (100 ft のフィルム) である。調査区間は静岡インターチェンジ後の直線部 (161.0～158.0 K.P.)、清水インターチェンジ



写真-1 アイカメラによる注視点調査

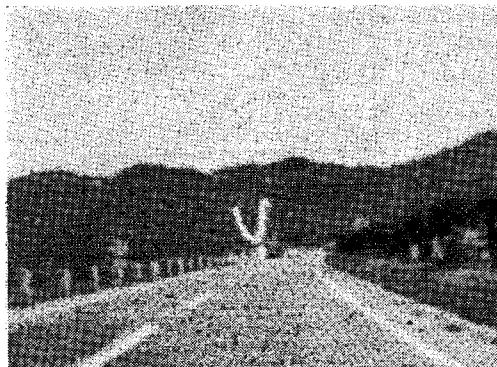


写真-2 注視点記録フィルムの例

手前の新幹線との交差部付近 (151.0~148.5 K.P.), 薩埵トンネル入口 (141.3~140.8 K.P.) および同トンネル出口 (140.5~138.0 K.P.) である。被験者は 5 名であったが装置の不安定性によるデータの不良により、用いることのできるデータはのべ 13 人・区間分 (表-6) である。

この 13 のデータに、ほかの実験*の 14 のデータを加え、計 27 人・区間のデータを解析する。各フィルムの解析のブロックダイヤグラムは 図-8 に示すとおりである。

適合度検定により、対象別の注視時間頻度分布の各パラメーターは表-7 のように得られた。図-9 には、母数 m , k の頻度分布の一例を示す。表-7 に示される各母数の期待値に最も近い母数をもつ分布を選び出し、その理論分布を描くと 図-10 のようになる。この図のおおのの分布が各対象に対する注視時間分布の代表的形態と考えられる。

この図から路面、レーンマーク、ガードレール遠方線形など運転中における視線誘導を行なう対象（これらを

表-6 実験により得られたデータ

誤差の度合い*	フィルム番号	被験者番号	区間	速度 (km/h)	キロポスト
○	1	1	2	90	141.3~140.8
			3	90	140.3~137.4
×	2	1	2	70	141.4~140.9
			3	70	140.4~138.1
○	3	1	1	90	161.0~157.6
◎	4	1	1	70	161.0~158.3
○	5	2	2	90	141.5~141.0
			3	90	140.5~137.5
×	6	2	2	70	161.0~158.3
×	7	2	1	90	160.8~158.7
◎	8	3	2	75	141.5~141.0
○	9	3	1	90	140.5~138.5
○	10	3	1	70	161.0~157.3
◎	11	4	4	90	161.0~158.2
○	12	4	4	70	151.0~148.5
○	13	5	4	70	151.0~148.5

* ○ 誤差なし ○ 誤差少ない × 誤差多い

* 大蔵泉（東京大学生産技術研究所第5部大学院）による。

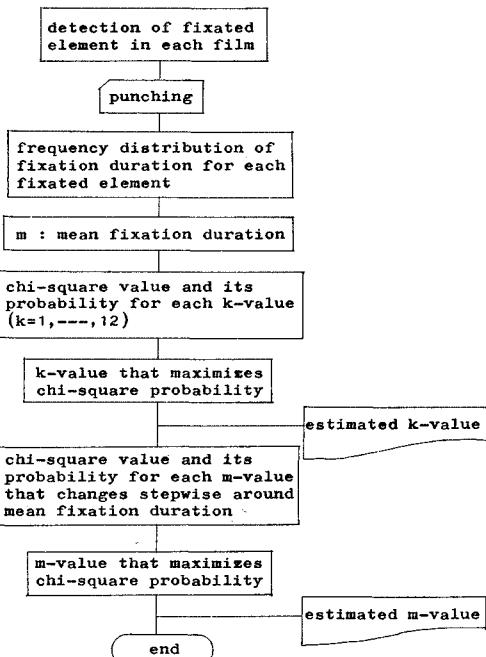


図-8 解析のプロックダイヤグラム

表-7 対象別各パラメーターの期待値

対象	平均注視時間		凝視度の期待値
	期待値	標準偏差	
路面	0.22 sec	0.093 sec	1.4
ガードレール	0.24	0.077	1.2
遠方線形	0.28	0.098	1.0
レーンマーク	0.17	0.053	1.1
跨道橋など	0.34	0.126	1.2
山腹、建物	0.22	0.106	1.5
標識	0.37	0.087	2.6
ほかの車両	0.41	0.141	1.4
海、スカイライン	0.26	0.086	1.2

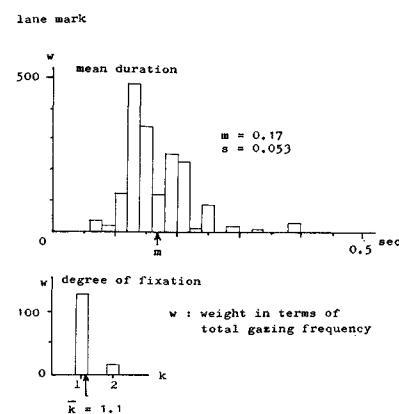


図-9 パラメーターの頻度分布 (レーンマーク)

視線誘導要素と名付ける)を注視する場合の注視時間分布は指数分布、すなわち凝視度 (k) は 1 となっている

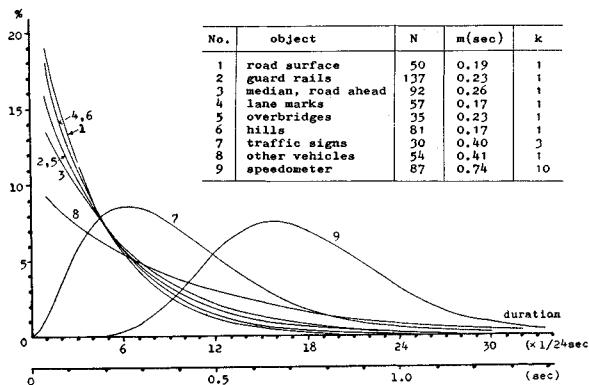
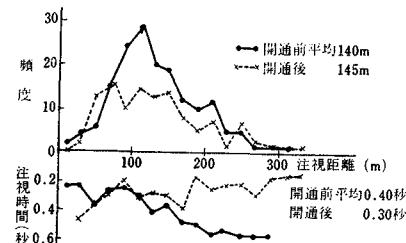


図-10 注視対象別注視時間頻度分布

ことが知られる。また、この要素への平均注視時間も約0.2 secで短い。このことは、従来までの注視行動の調査、実験では見られなかったことである。すなわち、これまでに知られていた凝視度の値はすべて2以上であって、これが1となることは、平均注視時間の短いことと合わせて自動車運転における一つの特徴と考えられる。このことを、さきに述べた目の動きの特性の仮説との関連で述べるならば、視線誘導における目の動きは、一つの対象を注視する間にちらつきを生じることなく、短時間注視した後、ただちに次の対象へ注視点が飛び移るという動きである、という仮説を立て得る。

図-10において標識（案内標識）に対する注視時間の凝視度は3であり、平均注視時間は0.41 secで、ほかの対象に比べて長い。しかし、これらの母数の値は、テレビや静止写真を見る場合の値と同程度の値である。自動車運転中には標識の注視において、いわば「日常の」注視行動が現われるのである。また、速度計を注視する場合の平均注視時間は0.7 secにも及んでいる。この注視時間のうちには、輻輳（ふくそう=遠くの対象から近くの対象へ両眼の注視点を移すこと）の時間も含まれているので、正味の注視時間は、より短時間であろう。しかし、ほかの研究には、計器の注視時間は平均0.6~0.9 secであるとの報告もあり²⁹⁾0.7 sec自体、決して長すぎるとはいえない。また、この凝視度が10と算出されたことも、數値を読みとるという速度計の注視の特性からすると、十分に説明のつくところである。

追越してゆく車両に対する平均注視時間は0.40 secで、視線誘導要素に対するそれに比べてほぼ倍になっている。しかし、凝視度は1で視線誘導要素の凝視度と同じ値である。このことは、平均注

図-11 案内標識の注視距離分布²⁷⁾

視時間が標識の注視の場合に等しくても、追越し車両に対する注視行動は視線誘導要素の注視におけると同じ特性、すなわち注視中に飛びが生じないという特性をもち、標識に対する特性($k=3$)と異なることを示している。

(2) 今後の応用

アイカメラは、道路における視覚に関連した施設の評価にとって、今後とも有効な利用が十分期待できる。この論文の主題である仮説—注視中のちらつきの回数と注意の集中の度合いとの間に関連がある—が微小な目の動きについてその観点から実験を行なって裏付けられれば、運転中の微小な目の動きを調べることにより、各対象に対する注意の集中の度合いを連続的に測ることが可能であろう。

また、より実用的なアイカメラの利用方法としては標識、信号灯などの注視距離の頻度分布から、それらの視認性を測定し、さらにほかの視認性の研究とあわせて合理的な交通安全施設設置基準を得ることができる。図-12は高速道路の案内標識の注視距離分布²⁷⁾で平均140 m、最大320 mとなっている。図-12のAは高速道路の規則、警戒標識の注視距離分布²⁶⁾で、案内標識におけるほど明確な分布型ではないがほぼ類似の型と考えられる

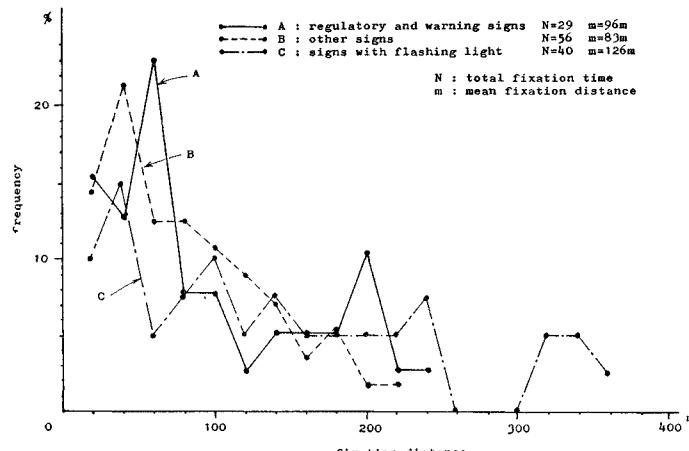


図-12 各種標識の注視距離分布

(平均 96 m)。B は工事区間における各種標識(案内、警戒規制標識を除く)の注視距離分布で、近いほど頻度の高い指数型の分布となっている(平均 83 m、最大 220 m)。C は黄色点滅灯を併置した標識の注視距離分布で 10~240 m のあらゆる距離で注視されている。これは同じく単調減少型の分布であるが、その減少の度合いは少ない。平均値は 126 m、最大は 360 m にも及んでいる。これらのことから、点滅灯の効果が裏付けられた。

また、ほかの交通安全施設に対する注視特性について、現在研究が進められ、特に注視時間と注視距離の調査についてはシステム化が完成した。注視点のほかの統計的性質—注視点の視野内の分布、跳びの大きさの分布など—についても研究をすすめている。これらは今後の交通工学、景観工学の基礎的資料となり得るであろう。

しかし、アイカメラの精度上の問題点は少なからずあり、また、注視点調査のみが視覚的問題をすべて解決するのではなく、周辺視の問題にも多くの解決すべき点が残されている。

この論文は、昭和 44 年 12 月、東京大学土木工学科に提出した学位論文の一部に、以後の研究成果を加えたものである。研究に対してご指導をいただいた東京大学の八十島教授、東京工業大学の鈴木忠義教授ならびに研究データを提供していただいた東京大学大学院の大蔵泉氏にこの誌上を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 麦島文夫：眼球運動、感覚知覚心理学ハンドブック、5 章 25, pp. 670-680, 1969
- 2) Dodge, R. : Five types of eye movements in the horizontal meridian plane of field of regard, Amer. J. Physiol., Vol. 8, pp. 307-329, 1903.
- 3) Lord, M.P. and W.D. Wright : Eye movement during monocular fixation, Nature, Lond., Vol. 162, pp. 25-26, 1948.
- 4) Hartridge, H. and L.C. Thomson : Method of investigating eye movements, Brit. J. Ophthalm., Vol. 32, pp. 581-591, 1948.
- 5) Ratliff, F. and L.A. Riggs : Involuntary motions of the eye during monocular fixation, J. Exptl. Psychol., Vol. 40, pp. 687-701, 1950
- 6) Barlow, H.B. : Eye movements during fixation, J. Physiol., Vol. 116, pp. 290-306, 1952.
- 7) Ditchburn, P.W. and B.L. Ginsborg : Involuntary eye movements during fixation, J. Physiol., Vol. 119, pp. 1-17, 1953
- 8) Robinson, D.A. : The mechanics of human saccadic eye movements, J. Physiol., Vol. 174, pp. 245-264, 1964
- 9) Dodge, R. and T.S. Cline : The angle velocity of eye movements, Psychol. Rev., Vol. 8, pp. 145-157, 1901
- 10) Tinker, M.A. : Time relations for eye-movement me-
- asuring in reading, J. Ed. Psychol., Vol. 38, pp. 1-10, 1947.
- 11) Westheimer, G. : Mechanism of saccadic eye movements, Arch. Ophthalm., Vol. 52, pp. 710-720, 1954.
- 12) Yarbus, A.L. : The motion of the eye in the process of changing points of fixation, Biofizika, Vol. 1, pp. 76-78, 1956.
- 13) Mackensen, G. : Die Geschwindigkeit horizontaler Blickbewegungen, Gräfe's Arch. für Ophthalm., Vol. 60, pp. 47-64, 1958.
- 14) Riggs, L.A. et.al. : The disappearance of steadily fixated visual test objects, J.O.S.A. (Journal of Optical Society America), Vol. 43, pp. 495-501, 1953.
- 15) Adler, F.H. and F. Fliegelman : Influence on fixation on the visual acuity, Arch. Ophthalm., Vol. 12, pp. 475-483, 1934.
- 16) Higgins, G.C. and K.F. Schultz : The frequency and amplitude of ocular tremor, J.O.S.A., Vol. 42, p. 872, 1952.
- 17) Riggs, L.A., J.C. Armington and F. Ratliff : Motions of the retinal image during fixation, J.O.S.A., Vol. 44, pp. 315-321, 1954.
- 18) Pritchard, R.M. : Stabilized images on the retina, Scientific American, Vol. 204, No. 6, pp. 72-78, 1961.
- 19) Tinker, M.A. : Eye movement duration pause duration and reading time, Psychol. Rev., Vol. 35, pp. 385-397, 1928.
- 20) Buswell, G.T. : How people look at picture, Univ. of Chicago Press, 1935.
- 21) White, C.T. and A. Ford : Eye movement during simulated radar search, J.O.S.A., Vol. 50, pp. 909-913, 1960.
- 22) 渡辺謙ほか：画像と注視点の分布、NHK 技術研究, Vol. 17, No. 1, pp. 5-19, 1965.
- 23) Waldram, J.M. : Vision and eye movements of motor drivers, the New Scientist, Vol. 8, No. 208, pp. 1264-1267, 1960.
- 24) 鈴木忠義・中村良夫・村田隆裕・小笠原常資：運転者注視点の性質、高速道路と自動車、Vol. IX, No. 7, pp. 24-29, 1966.
- 25) Thomas, E.L. : Movements of the eye, Scientific American, Aug. 1968, pp. 88-95, 1968
- 26) 小林 実・村田隆裕：高速道路工事区間での注視点調査、交通工学, Vol. 7, 増刊号, pp. 17-26, 1972
- 27) 大蔵 泉：アイマーケローダの応用による交通工学に関する基礎的研究、東京大学土木工学科修士論文, 1969.
- 28) Cornsweet, T.N. : Determination of the stimuli for involuntary drifts and saccadic eye movements, J.O.S.A., Vol. 48, pp. 808-811, 1958.
- 29) 後藤昇弘：多変数制御系における人間のサンプリング特性、人間工学, Vol. 7, pp. 201-214, 1970.
- 30) Ford, A., C.T. White and M. Lichtenstein : Analysis of eye movements during free search, J.O.S.A., Vol. 49, pp. 287-292, 1959.
- 31) 小笠原常資：運転者の注視点とその交通工学的応用、東京大学土木工学科卒業論文, 1966
- 32) 福島駿介：視覚環境に関する研究、東京工業大学建築学科修士論文, 1969

(1972.9.28・受付)