

吹雪時における運転者の視覚挙動について

SUBJECTIVE EVALUATION OF DRIVER'S EYE-MOVEMENT
DURING BLOWING SNOW

萩原 亨*、加来 照俊**

By Toru HAGIWARA and Terutoshi KAKU

This paper describes evaluation of driver's eye-movement in reduced visibility conditions due to blowing snow. Driver's eye-movement is evaluated by following methods.

(1) Fixation duration, angular velocity, three-dimensional coordinates and frequency distribution of fixation points in reduced visibility conditions are estimated from driver's fixed points.

(2) Driver's visual field under blowing snow condition can be defined by the concept of 'Fuzzy'. We try to estimate driver's eye-movement behavior by use of a 'Fuzzy Entropy', which is the expectation of an amount of information.

1. はじめに

本研究は、吹雪時における運転者の視覚挙動について多角的に検討した結果である。吹雪時における安全な走行を実現することは、冬期間の道路交通において大きな課題である。具体的に吹雪時における安全走行を確保するための対策を考える上で、運転者の視覚的な状況を把握することは重要であろう。

一方、吹雪時における運転者の視覚的な評価は、過去において静的な状況下で多くなされてきた。吹雪による視覚的な影響がどのような形で走行時に現れるかについては、興味ある問題ではあったが、測定手法が主な原因となり直接測定できなかった。このため、吹雪が激しくなった状態での運転者の視覚的な評価は、車両の挙動や運転者の報告等から間接

的に行う以外方法がなかったと言える。

そこで、著者らの研究室で開発した視点解析システムを応用し、吹雪時の測定を行い以下の手法により運転者の視覚挙動の評価を行った。

1) 注視時間、注視点の移動角速度、注視点の三次元位置による解析

2) 吹雪時の道路空間をファジイ事象として考え、運転者が得ている情報量（エントロピー）から運転者の視覚挙動を評価する解析

国道40号線で行った吹雪時における視点測定実験の解析結果について以下で述べる。

2. 運転者の視点測定方法について

運転者の視点の測定は、ビジョン・アナライザを用いた視点測定システムにより行った。運転者の視界、及び装着感を改良することにより、かなり危険と思える場面においても通常の運転に近い感覚で運転可能である。

* 正員 工修 北海道大学助手 工学部土木工学科

**正員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

また、測定した結果は、著者らの開発した視点と視野映像との関係を明確に分析するシステムにより三次元データに変換し解析を行った。データ処理の効率性・正確性等において従来の視点解析システムに比べて優れた点が多い。この解析手法については既に昨年発表¹⁾しているのでここでは簡単にその特徴について示す。

図-1に視点の測定から出力までのフローチャートを示す。運転者の三次元的な視点位置は、運転者の眼球運動と頭部運動を測定し、眼球運動測定装置から出力される視点の方向に頭部運動の方向を加えて拡大し、設定した道路空間(図-2)と交差する点から求めた。三次元的に求められた視点の軌跡及び道路空間は、ワイヤーフレーム・モデルにより二次元の映像に変換し計算機によりリアルタイム表示され、VTR映像と合成表示される。

これまで、視点の測定実験時にしか行えなかった視点と映像の合成が、種々の測定結果を計算機に入力することにより、測定実験後において視点と映像の合成が可能となった。この特徴により、従来困難であった視覚対象物と視点の関係が明確に定義できるようになり、種々の条件における運転者の視覚探索パタンの比較が飛躍的に容易になったと言える。

3. 吹雪時の運転者の視点測定実験について

吹雪時の運転者の視点測定を稚内管内サラキトマナイ地区の国道40号線において1988年12月20日から

一週間行った。図-3に実験区間を示す。被験者は三名である。様々な吹雪の程度における運転者の視点の測定を行った。実験に危険が伴うため、被験者は三名とも常時運転している人に依頼した。特に、被験者Bは吹雪時の走行に熟練した運転者である。測定実験には、ジープタイプの4WD車を用いた。設定した実験区間を視程距離の異なる種々の条件において、約50回実験を繰り返した。

なお、吹雪の程度を示す評価基準として、図-3に示す地点に設置されている反射式吹雪計による視程距離値を用いた。

4. 吹雪時における視覚挙動の解析結果について

(1) 測定データの分類について

測定データの条件を一定にするため、対向車及び先行車のない直線区間(300m, 図-3)の視点データを全測定結果から選択した。その結果、被験者AとCは10回、Bは7回の測定を解析の対象とした。

また、吹雪の程度を、視覚的に大きく三つのレベルに分類した。吹雪の程度を明確に捉えることは難しく、視覚的な状況から吹雪の程度を大きく分類し解析したほうがより適当であると考えた。

吹雪がほとんど発生していない状況、遠方の山が吹雪により見えなくなる状況、近くの道路とその周辺しか見えなくなる状況の三つに分けた。さらに直前すら見えない状況が考えられるが、実験が不可能であったためここでは考えない。各々の状況に相当

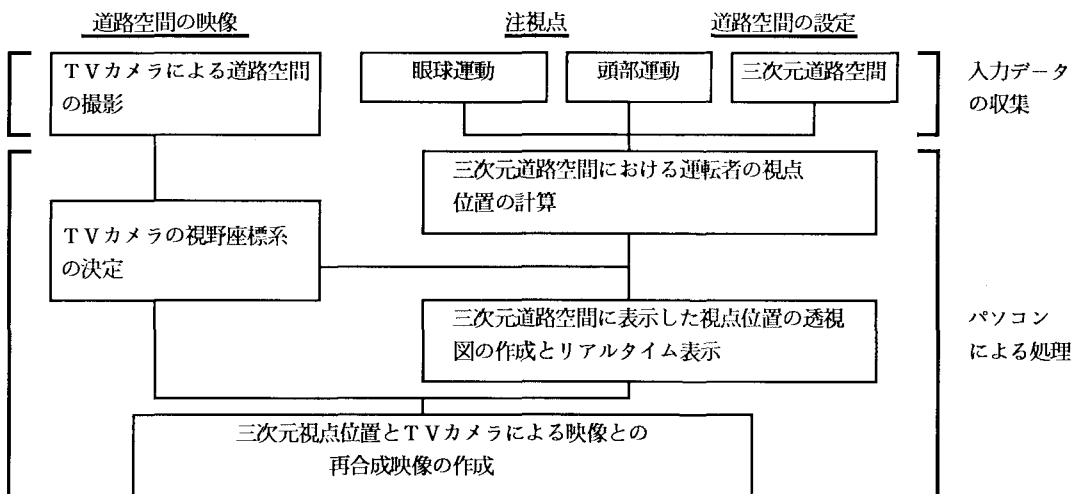


図-1 視点解析システムのフローチャート

する視程距離値の範囲を以下に示す。

視程レベル	内 容
A	吹雪が発生していない状態
B	$500\text{m} \leq \text{視程距離} < 1000\text{m}$
C	$200\text{m} \leq \text{視程距離} < 500\text{m}$

各被験者の視程距離値別の測定データをこれら三つの視程レベルに分類した。各被験者の視程レベルには、2回から4回の測定データが含まれている。

図-4に解析区間における平均走行速度を被験者別、視程レベル別に示す。三名の被験者ともほぼ速度は一定であった。吹雪がかなり激しくなっても、速度が低下しない現象は、過去の研究²⁾において示されている。

(2) 注視点の定義

実験により得られた視点は、眼球運動を0.1sec毎にサンプリングした点である。運転者の視覚的な挙動を定量的に評価するために、運動指標の情報を良くとらえるための眼球運動を考え、注視点を定義する必要がある。

眼球運動は運動の大きさにより大まかに固視微動・随従運動・跳躍運動の三つに大別される。一点を凝視しているときに、激しく細かく動く運動が固視微動である。固視微動は外界から情報を入手するための大切な動きである。図-5に示すように、振り子のような正弦波状に速度の変わる指標を追ったときの視線の動きによく現れるのが随従運動である。自動車の運転時のように動く視対象を見るときに多く生じる目の動きである。静止画を見たときに注目している視対象を移動する際に生じるような眼球運動が、跳躍運動である。

注視の定義の中に固視微動の速度成分を含めるのは当然のことであるが、ここではある範囲内の随従運動成分も含めることとした。これは、随従運動が運動中に視覚特性の低下する跳躍運動と異なり、運動指標の情報をよくとらえるための眼球運動と考えられるからである。

従って、随従運動を含む眼球運動速度を基準に考え、その所定の速度より遅いものの中から注視成分と想定されるものを求め注視点を定義することにした。その所定の眼球運動のしきい値としては、ビジョン・アナライザを用いた眼球運動の研究³⁾から示

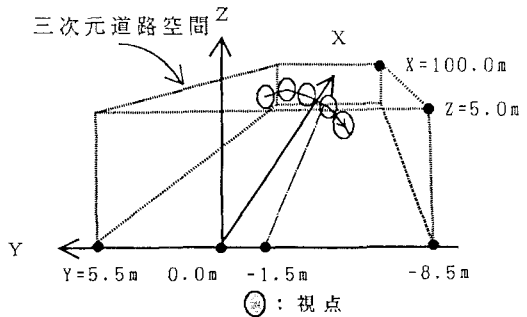


図-2 視点と道路空間の三次元表示

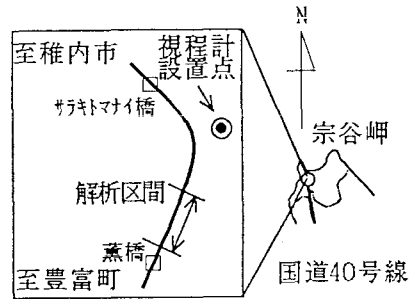


図-3 視点の測定路線

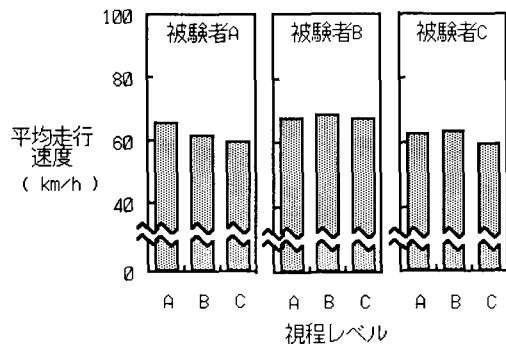


図-4 視程レベルと走行速度

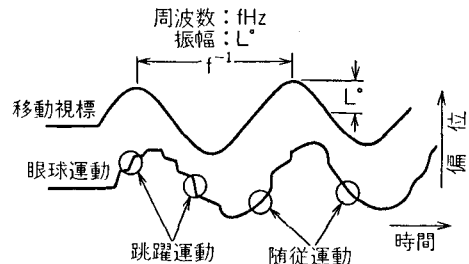


図-5 運動指標に対する眼球運動
参照：視線情報を用いた画像の客観分析³⁾

された値であるところの、5deg/secを用いた。

この定義により測定した視点データを解析し、注視点求めた。以下に示す解析はすべて注視点を対象として行った。

(3) 吹雪時の注視挙動による評価

a) 平均注視時間について

各被験者の平均注視時間を視程レベル別に図-6に示す。また、解析区間における注視点の個数について視程レベル別に図-7に示す。被験者A,Bの場合、平均注視時間は視程距離が短くなってもほぼ一定であるが、注視点の個数が増加した。被験者Cの場合、視程距離が短くなると注視時間は長くなるが、注視点の個数はほぼ一定であった。よって、視程距離が短くなった場合、何れの被験者も注視成分の全体に占める時間的な割合が増えたと言える。

視程距離が短い場合、一度の注視では視覚対象物を認識できないため、1)同じ視覚対象物を短い時間内で繰り返し注視する、2)一回に注視する時間を延ばして視覚対象物を確実に認識する、の二種類の注視パターンが示されたと言える。

b) 注視点の移動角速度について

注視点間の移動角速度を、視程レベル別に求めた。図-8に、注視点間の移動角度を、図-9に移動角速度を示す。視程距離によりほとんどの場合移動角度、移動角速度とも小さくなっていることが分かる。三名の被験者とも、吹雪が多少でも発生すると急激に注視点の移動角速度と移動角度を小さくした。

注視時間の結果と同様に、視程距離が短い場合、あいまいな映像から情報を得るために繰り返し前回の注視点と近い地点を注視する必要があるためであろう。角速度の速い跳躍運動や随従運動時の認識レベルが視界がよい場合に比べて極端に低下するために、角運動の小さい注視パターンになると推測される。

c) 道路空間における注視位置について

図-10に極端に視程距離の異なる場合の注視点の分布を被験者別に示す。図-10の上段は吹雪が発生していない場合の結果である。被験者は前方に広がる道路空間全体を一樣にながめるような視覚的挙動を示し、注視点は道路空間全体に分散した。

一方、図-10の下段に視程距離の短い場合を示す。特定の視覚対象物に注視点が集中し、注視点の

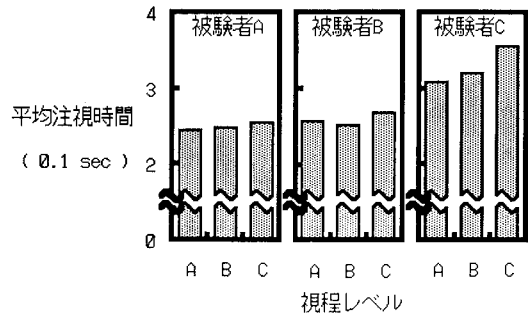


図-6 視程レベルと注視時間

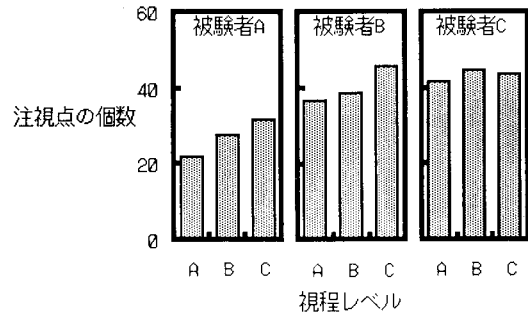


図-7 視程レベルと注視点の個数

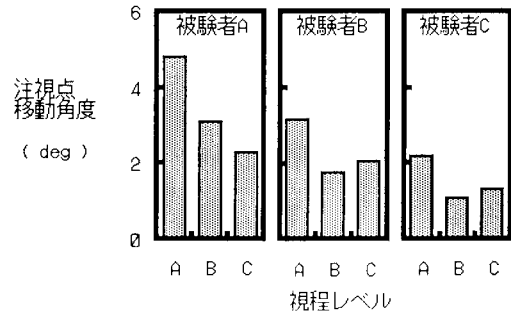


図-8 視程レベルと注視点間の角度

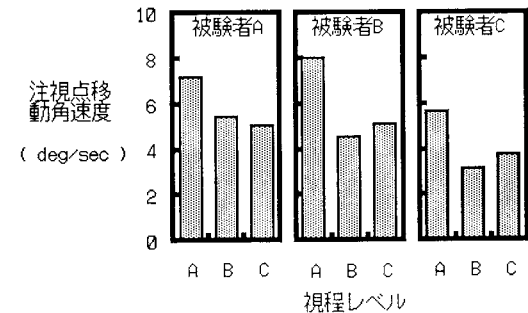


図-9 視程レベルと注視点間の角速度

分散が少なくなる傾向を示した。

さらに、図-11に被験者別の注視点位置の平均値を前後方向、左右方向、上下方向に分けて求めた結果を示す。吹雪が発生していない場合（視程レベルA）は、比較的三名とも似通った地点を見ていた。しかし、視程距離が短くなるにつれて各々全く異なる注視点の位置となった。被験者による注視点の位置の違いを以下にまとめる。

被験者Aは、視程レベルCになった場合、注視点位置を左上方向に集中した。ちなみに、左上方向には、電柱・除雪用ボール等がある。被験者Bは、視程距離が短くなるにつれて注視点を前方の正面に集中する傾向を示した。被験者Cは、視程距離が短くなるにつれて注視点を車両の右側、対向車線側の路面に集中させる傾向を示した。

d) 注視点による解析結果

注視時間、注視点移動角速度と注視点位置の解析により運転者の視覚に及ぼす視程距離の影響を定量的にまとめた。これらの解析は、被験者の注視点の動きそのものからの評価である。

1) 視程距離が短くなる場合、三名の被験者ともその注視パターンとして、注視時間の総和を長くした。注視点の数を多くする被験者と注視時間自体の長さを長くする被験者に分かれた。このとき注視点の移動角度は小さくなり、移動角速度も短くなった。

2) 吹雪が発生していない場合、三名の被験者は路面全体を一樣にながめる注視挙動を示した。また、三名の被験者とも、その注視点の平均値としては比較的類似した地点を見ていた。一方、視程距離が短くな

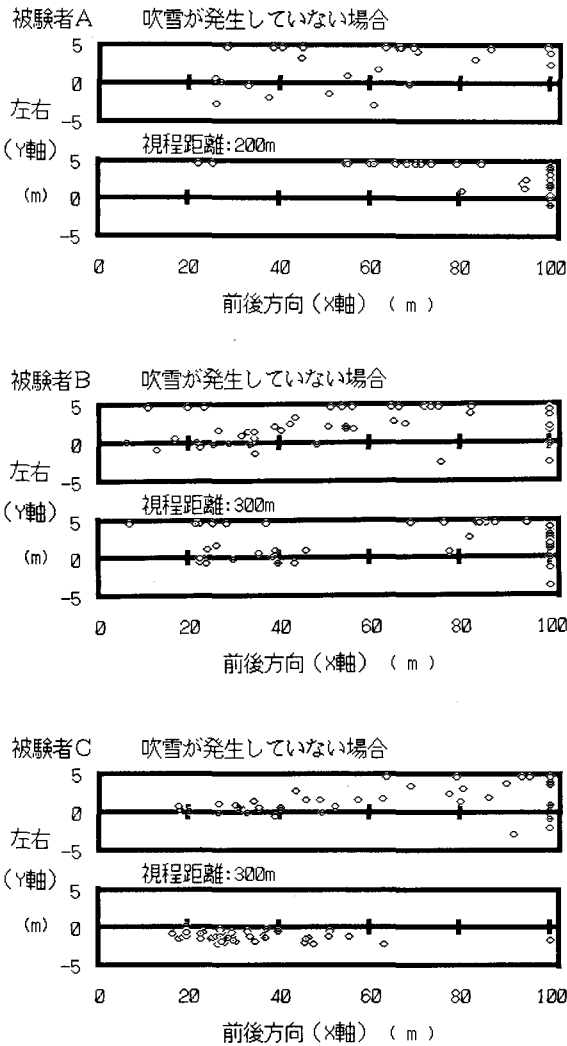


図-10 被験者別の注視点分布

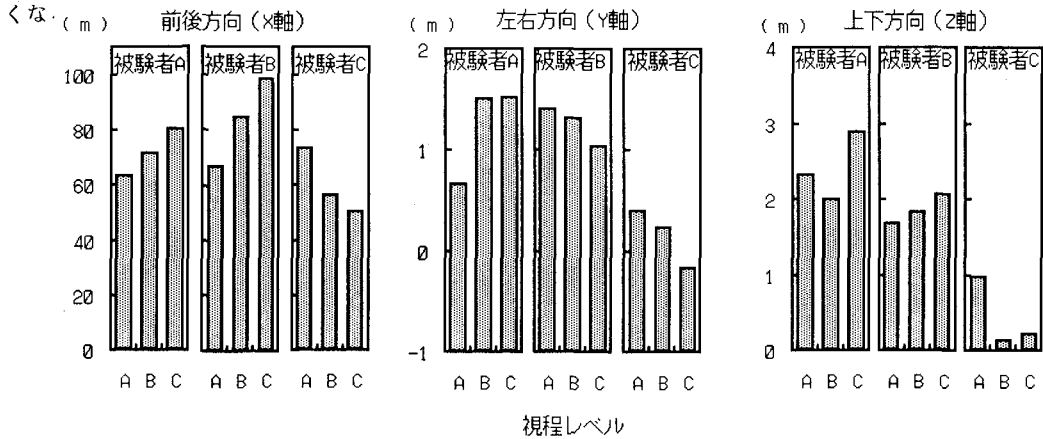


図11 注視点位置の平均値

になっていった。しかし、最も熟練した被験者Bは他の2名に比べて安定した注視点の動きを示した。

(4) 吹雪時における注視パタンのファジィ・エントロピーによる評価

前節において注視点の動きそのものから吹雪時の視覚探索パターンを評価した。運転者は視程距離が短くなると、注視に必要な時間を長くし、視認するポイントを少なくする結果を得た。しかし、これらの解析では運転者が道路から情報を得ている状況を総合的に評価することはできない。

過去の研究において、運転者の視覚による情報摂取過程を、道路空間を情報源とする運転者への通信と考え、道路環境から得る情報量の期待値であるエントロピーから視覚的な挙動を評価^{4)・5)}する手法が用いられてきた。シャノンの情報理論においてエントロピーは、対象とする系(道路空間)で事象(注視点分布)が生起することによって生じる情報量の期待値に相当し、エントロピーが大きいとは、事象(注視点分布)の生起によって発生する平均情報量が大きいことを意味している。

しかし、吹雪時においては道路空間(情報源)が視程距離により変化しており、道路空間(情報源)の見えない程度をなんらかの形でエントロピーの概念に導入する必要がある。

そこで、本研究では吹雪により道路空間に発生する「あいまいさ」の有効なモデリング手法としてファジィ概念を導入した。対象とする系(道路空間)をファジィ集合で表したときに拡張定義されるファジィ事象によるエントロピー^{6)・7)・8)}により、運転者の注視挙動を検討した。また、ファジィ集合そのものの「あいまいさ」の度合いを測る尺度として定義されるファジィ・エントロピー^{7)・8)}により、運転者の評価による道路空間の「あいまいさ」及び道路空間そのものの「あいまいさ」についても検討した。

a) ファジィ・エントロピーの定義とその適用について

道路空間には、 m 個の表示情報が出力されるものとする。そこで、運転者が認知する表示情報を m 次元表示情報ベクトル

$$Y=Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m \quad (1)$$

として表現する。すなわち、このベクトルの各成分 $Y_i (i=1, 2, \dots, m)$ は、道路空間にある情報を表わしている。

道路空間の情報の評価 $W_i (i=1, 2, \dots, m)$ には、吹雪(視程距離)に伴う「あいまいさ」が影響する。そこで、ファジィ集合で表した道路空間の情報の評価に吹雪に伴う「あいまいさ」を定量的に取り込む。

道路空間の情報の評価 $W_i (i=1, 2, \dots, m)$ に対しファジィ集合 X のメンバーシップ関数

$$X(W)=X(W_1), X(W_2), X(W_3), \dots, X(W_m) \quad (2)$$

が定義できるものとする。 $X(W_i)$ が0のときは道路空間が全く見えない状況、 $X(W_i)$ が1のときはくっきり見える状況、 $X(W_i)$ が0.5のときが見えるか見えないか半々の最もあいまいな状況を意味する。

次に、運転者は道路空間の情報ベクトル $Y*W$ に対し、運転者が処理する情報の受容した状態を、

$$A \begin{cases} Y_1(W_1), Y_2(W_2), Y_3(W_3), \dots, Y_m(W_m) \\ P_1, P_2, P_3, \dots, P_m \end{cases} \quad (3)$$

と表す。道路空間 Y_i (入力)の情報は、 P_i という確率で運転者に受け取られる。このとき、 Y_i は W_i の関数として定義されている。確率 P_i は生体制御パラメータ空間上で定義できるものであり、ここでは運転者の注視点分布を適用した。以上のような考えにより、ファジィ事象としての道路空間と運転者の注視点の関係を定義した。

そこで、ファジィ集合を、通常の集合の特性関数をメンバーシップ関数にまで拡張したものであると考えるとき、エントロピー関数で使われる特性関数をメンバーシップ関数で置換することができる。ファジィ事象から得ているエントロピー $H(A)$ は、以下の式で定義される。

$$H(A) = -\sum X(W_i) * P_i * \log(P_i) \quad (4) \\ (i=1, 2, \dots, m)$$

明かに、 $X(W_i)$ が1のときは、生起確率 P_i のエントロピーの式に還元される。(4)式の結果は、視程距離の変動を含む状況で運転者が得ている情報量(エントロピー)であると考えられる。

次に道路空間のファジィ集合そのもののあいまい

さは、ファジィ・エントロピーの定義から

$$D(A) = 1/m \sum [-X(W_i) \log(X(W_i)) - (1-X(W_i)) \log(1-X(W_i))] \quad (5)$$

(i=1, 2, ..., m)

により求められる。これにより、吹雪により変動する道路空間の「あいまいさ」が数量的に求められる。

最後に、運転者は道路空間の情報ベクトル $Y \cdot W$ に対し、運転者が処理する情報の受容した状態のあいまいさを求める式として、ファジィ・エントロピーの定義を適用する。運転者が受け取った情報そのもののあいまいさも以下の式によりファジィ・エントロピーとして求める。

$$S(A) = 1/m \sum [-P_i X(W_i) \log(P_i X(W_i)) - P_i (1-X(W_i)) \log(P_i (1-X(W_i)))] \quad (6)$$

(i=1, 2, ..., m)

$S(A)$ は、どの表示情報 Y_i もそれが重要であるか否か不明なとき大きな値となると考えられ、 $S(A)$ が大きいことはすべての Y_i に注意力が行き渡っていて、情報を得ようとする要求が高いことを表している。あるいは、非常に道路空間があいまいであると運転者が評価していると受け取れる。

b) ファジィ・エントロピーによる吹雪時の注視挙動の解析について

これらの定義された式を用いて、吹雪時の注視挙動の解析に応用した。(2)式のメンバーシップ関数は、視程距離値と注視点の位置から定義した。すなわち、被験者の位置(距離0m)での値を1、視程距離計で示された被験者からの距離の地点を0とした。また、その間の地点の関数値は、被験者からの距離により比例配分した値とした。例えば、視程距離値が500mの場合、運転者から100m地点でのメンバーシップ関数の値は0.8、300m地点では0.4となる。

次に、注視点の確率分布 P_i は、図-2に示す道路空間上における注視点の時間的な確率分布とした。図-2の道路空間を32区画に分け、各々の区画に分布する注視点の時間的総和を測定区間(300m)の総注視時間で除した。

被験者が道路空間から得たエントロピー値を、(4)式から求めた。道路空間全体が鮮明なら通常のエントロピー値に還元される。図-12に、その結果を

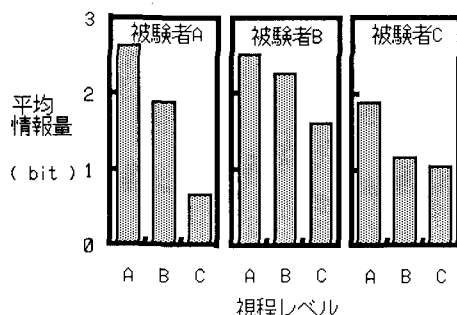


図-12 視程レベルとエントロピー (bit)

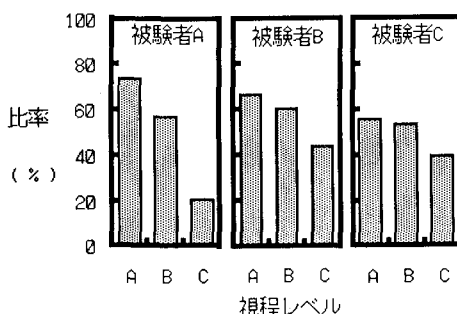


図-13 最大エントロピー値に占める割合

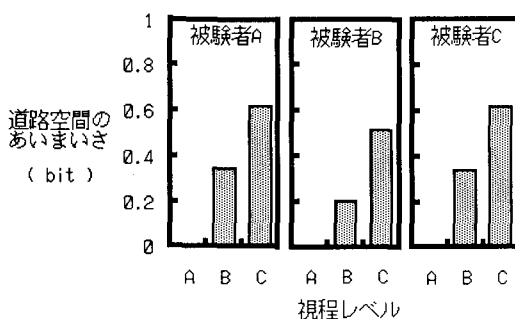


図-14 道路空間の視程距離を原因とするあいまいさの程度

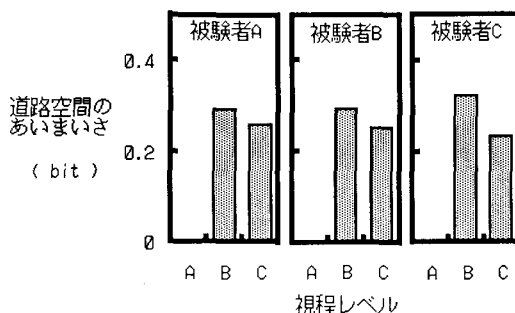


図-15 被験者による道路空間のあいまいさの程度

示す。視程距離の減少、すなわち「あいまいさ」の増加に伴い、各被験者ともエントロピー値が減少している結果が示された。

また、(4)式から最大エントロピー値を求め、図-12のエントロピー値を割った値を比率(%)として図-13に示す。この結果は、視程距離が短くなった場合における被験者別の情報収集能力を示している。

被験者Bは、他の二名の被験者に比較して視程距離が短くなった場合(視程レベルC)でもエントロピー値がかなり高い値を示した。また、最大エントロピー値による比率も、視程距離の悪い条件(視程レベルC)において三人の被験者の中で最も大きかった。

(5)式を用いて図-14に、道路空間のあいまいさを計算した結果を示す。視程距離の低下によりあいまいさが増加した。

図-15に、被験者による映像のあいまいさの評価を(6)式により計算した結果を示す。吹雪が多少起きている状態(視程レベルB)で、「あいまいさ」が最も大きくなった。視程距離が短くなってしまうと、被験者は確かに見えないので、逆にあいまいさが減少していると推測される。

c) ファジイ・エントロピーによる注視挙動の解析結果

これらの結果から、道路空間をファジイ事象とすることで、吹雪時における運転者の注視パターンを比較的合理的に示せたと言える。

被験者は、三名とも視程距離の悪化すなわち道路空間があいまいさを増すにつれて得る情報量(エントロピー)は減少した。しかし、他の二名に比較して熟練している被験者Bは、エントロピー値の減少が小さかった。また、道路空間のあいまいさの評価は、視程距離が500mから1000mの視程レベルBのときに三名とも最大になった。

5. まとめ

以上の注視点による二種類の解析結果から、吹雪時の三名の被験者に示された視覚的な挙動を以下にまとめる。

- 1) 視程距離が短くなると、注視時間の総和が長くなった。同様に、注視点の移動角度は小さくなり、移動角速度も短くなった。
- 2) 吹雪が発生していない場合、被験者は路面全体を

一様にながめる視覚的な挙動を示した。また、三名の被験者とも、比較的類似した地点を見ていた。しかし、視程距離が短くなるにつれて、被験者による注視点の位置は別々になっていった。そのなかでも、熟練した被験者は安定した注視点の動きを示した。

- 3) 道路空間をファジイ事象と考え、被験者の情報摂取過程を解析することにより合理的な解が得られた。
- 4) ファジイ・エントロピーによる解析結果から、吹雪時の運転に熟練した被験者は、視程距離が短い状況においても多くの情報を得る視覚探索パターンを行っていた。

ただし、これらの結果は三名の被験者による結果である。より多くの被験者による実験を行うことが必要であろうが、このような危険な状況において実験を繰り返すことは事実上困難である。今後は、運転シミュレータ施設の利用を考えて行きたい。

また、本研究の解析結果から得られた吹雪時における運転者の視覚的な挙動を基礎に、吹雪時において安全により寄与する具体的な道路環境の改善策に結び付けていきたい。

本報告の実施並びにデータの収集において多大な御協力を頂いた北海道開発局開発土木研究所及び北海道開発局稚内建設部の関係各位に対して謝意を表します。また、本研究は佐川交通社会財団の援助によるものであることを記し、同財団に改めて感謝の意を表します。

[参考文献]

- (1) 萩原、加来：ビジョアル・シミュレーションによる運転者の視線解析手法について、土木計画学論文集、Vol. 7, 1989
- (2) 竹内ら：吹雪観測と交通管理への利用、北海道開発研究所報告、1986
- (3) 山田、福田：視線情報を用いた画像の客観分析、NHK技研R&D、No. 2, 1988
- (4) Shinar, D., Eye Movements in Curve Negotiations, Human Factors, Vol. 19, 1977
- (5) 萩原、加来：運転者の注視点とその評価に関する研究、土木計画学研究論文集、Vol. 6, 1988
- (6) 水元：ファジイ理論とその応用、サイエンス社、1988
- (7) 松井、馬場：ファジイエントロピーに基づく注意力の考察、計測制御学会論文集、Vol. 22, No. 6, 1986
- (8) 本田：ファジイ・エントロピーとはなにか、数理科学、No. 294, 1987