

## シミュレータ実験によるドライバのエラー再現

大野宏司

本郷武朗

(株)豊田中央研究所

ドライバが起こすエラーを説明するために、認知的コスト最小化によると考えられるエラーをシミュレータ実験により再現し、そのエラーを解析した結果について報告する。近年の交通事故の増加から予防安全システムに対する期待が高まっている。予防安全システムの実現に向けてドライバが起こすエラーの原因を明らかにする必要がある。本報告では、シミュレータ実験により被験者に先行車追従タスクを課しエラーを誘発させ、帰納学習法であるID3によりエラー発生の原因を解析し、認知的コスト最小化の検証を行う。

## HUMAN ERRORS ON DRIVING SIMULATOR

Hiroshi OHNO

Takero HONGO

Toyota Central Research &amp; Development Labs., Inc

We discuss the human error caused by minimising cognitive cost on driving simulator in order to understand human error mechanisms of driver. In recent years traffic accidents have increased, so that there has been a growing expectation for automotive safety systems. It is necessary for the development of automotive safety systems to understand human error mechanisms of driver. The paper reveals that the human error on driving simulator, that is induced during a car following task, is based on minimising cognitive cost from the result of the analysis of subject's judgements by the ID3 algorithm.

## 1 はじめに

本報告ではドライバが起こすエラー [2] の発生原因の説明に向けて、自動車の運転を模擬するシミュレータ実験により、被験者に判断におけるエラー（ブレーキを踏む反応時間の増加）を誘発させ、そのエラー発生の認知的コスト最小化（後述）に基づいた説明を行う。

近年の交通事故の増加から、衝突警報装置などの予防安全システムに対する期待が高まっている。我々の最終的な目標は、ドライバの認知や判断の過程を解析することにより、予防安全システムのインターフェース評価手法を確立することである。

ドライバは日常の交通状況下で様々な知覚対象、例えば信号機、歩行者、先行車のブレーキランプ等の中から運転において適切な情報を検出し、安全に走行するための判断を行っている。交通状況下で得られる情報量は、運転において意味のないものも含めると無限の大きさを持つと考えられる。したがって、人間の情報処理能力を大幅に上回るようになってしまう<sup>1</sup>。そこで、ドライバは有限の情報処理能力を活用するために何らかの尺度で情報の選択を行っていると考えられる。本報告では、情報の選択において認知的コスト最小化が基本的原理として働いていると仮定した。すなわち、ドライバは様々な交通状況下で状況判断の経験を積むにつれて、より簡単で効率的な情報の選択を行うようになる。このような人間の性質をここでは、認知的コスト最小化と呼ぶことにする。また、交通事故が伴うような脇見、考えごと、ぼんやりなどのミスには、認知的コスト最小化の影響が働いている可能性があると考えている。

そこで、本報告では認知的コスト最小化という仮説の検証のために、自動車の運転を模擬するシミュレータ実験により被験者にエラーを誘発させる実験を行った結果および解析結果を示す。また、ドライバの判断過程の解析では判断の過程をわかり易く表現する必要がある。ここでは、解析のために判別木を使って判断過程を表現することを試みる。そのために、判別木を生成する簡易な帰納学習法である ID3[3] を適用する。

<sup>1</sup>フレーム問題として捉えることができる。そして、フレーム問題の解決に失敗した時にドライバは事故を起こす場合もあり得ると考えられる。

## 2 認知的コスト最小化によるエラー

認知的コストとは走行環境の中から車間距離、車速、ブレーキランプの点灯、歩行者の有無などを認識するために人間が感じる認識のしやすさを表す尺度である。そして、人間は経験により認識の対象を認知的コストが最小なものにしていく。そのため、ある場面では行動のために有効であった認識対象が、別の場面では無効になってしまう。すなわち、今まで有効であった認識対象により、エラーが誘発されてしまうことになる。以上のような考えに基づいて、認知的コスト最小化を検証するための実験のシナリオを作成する。

## 3 実験シナリオ

ワークステーション上のシミュレータにより運転操作を模擬する実験を行う。ここで、被験者はディスプレイ上から得られる情報だけにより判断を行い、運転操作するものとする。ただし、実際の運転状況では、視覚的な情報の他に体感や音などによる情報も重要な役割を判断において果たしていると考えられるがここでは考慮しない。

### 3.1 検証場面

ディスプレイ上に表示される先行車の挙動変化に対応する判断過程を被験者が獲得できる走行場面とする。

### 3.2 被験者の課題

実験では以下の二つの課題を行う。

1. ある走行状況（走行場面1）下で判断過程を被験者に獲得させる。
2. 1と異なる走行状況（走行場面2）下で、被験者の判断過程と操作を調べる。

走行場面1では被験者は、一車線道路で先行車に追従し、先行車の減速や停止に伴い追突しないようにシミュレータを操作する。すなわち、走行場面1では、被験者が先行車と追突せずに追従し減速、停止するための判断過程を獲得することを想定している。走行場面2では先行車が走行場面1と異なる挙動をするように設定し、どのような判断が行われるかを調べる。

### 3.3 検証手順

検証の手順を以下に示す。

1. 判断過程の獲得  
被験者に実験の課題1を繰り返し行う。
2. 判断過程の確認  
被験者に実験の課題2を行う。
3. 判断過程の推定  
実験の課題2をID3で推定した被験者の判断過程で被験者が実際行った判断過程を推定する。
4. 2と3から比較判定  
以下で述べる認知的コスト最小化の検証手続きにより行う。

判断過程の獲得で認知的コスト最小化が働いているとすると、実験の課題2で、先行車の挙動に関する属性が判断過程で無視(省略)されるため、被験者がブレーキを操作するタイミングが遅れると考えられる。すなわち、先行車の挙動変化(ブレーキランプの点灯)からブレーキ操作量出力(被験者がブレーキを踏む)までの時間(以後、ブレーキ遅れ時間と呼ぶ)が長くなることになる<sup>2</sup>。さらに、ブレーキ遅れ時間の間では、被験者が獲得したと思われる判断過程によって判断がなされていると考えられる。したがって、3の推定とブレーキ遅れ時間との判断結果とは一致すると考えられる。以上に基づく、検証の手続きを図1にまとめる。図中、正答率とは、走行場面1で被験者が獲得したと思われる判断過程により、ブレーキ遅れ時間間の判断を予想した時の正解の割合である。ここで、判断を予想するために、被験者の判断過程を推定する必要がある。そのため、被験者の判断過程を推定するために、ID3を用いて解析を行った。ただし、ID3では、認知的コストを相互情報量として定量化する。また、判断過程を判別木により表現する。したがって、図中の判断過程の間違いとは、解析により得られた判別木の間違いである。

## 4 方法

### 4.1 シミュレータ実験系

被験者はディスプレイ(19インチ)上に表示された先行車がディスプレイ上の平行線の内側(後

<sup>2</sup>ただし、ブレーキ遅れ時間にはアクセル、ブレーキを操作する操作時間が含まれている。現在のところ操作時間については課題中一定としている。

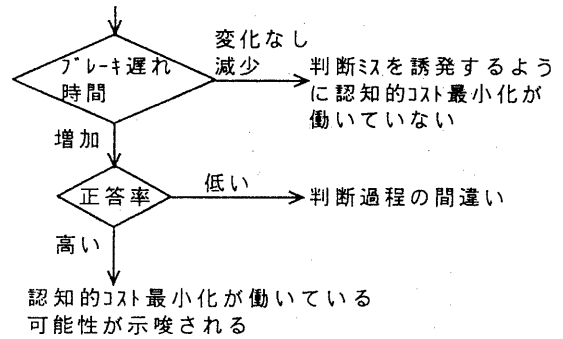


図1: 認知的コスト最小化の検証手続き

述)に入るように先行車との位置関係(車間距離に相当)を調整する課題を実行する。すなわち、一車線道路において追従走行を行うことを模擬する。先行車との位置関係の調整には、アクセルとブレーキとを模擬する操作板を足により操作する。以上の運転操作を模擬するシミュレータ実験系の構成を図2に示す。ワークステーション上のシミュレータにより、先行車の動きや道路の構造などの運転状況が模擬され、ディスプレイ上に表示される。

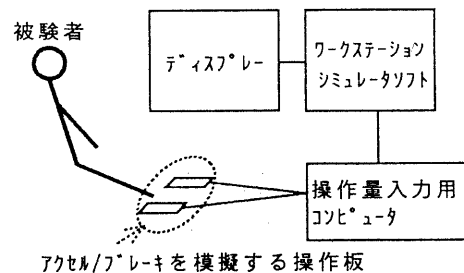


図2: シミュレータ実験系の構成

ディスプレイ上に表示される先行車にはブレーキランプが付けられている。ブレーキランプの点灯はディスプレイ上で白色から赤色に変化することにより行われる。ブレーキランプの点灯により、先行車が一定の減速を行うことが模擬されている。被験者はディスプレイ上に表示される画面を見て、先行車との位置関係を一定に保つようにアクセル、ブレーキを操作する。アクセルを踏み込んだ後離すことにより軽い減速が自車に働くようになっている(エンジンプレーキを模擬する)。また、ディスプレイ上には自車の車速が表示されている。

## 4.2 課題と実験のシナリオ

走行場面1, 2で被験者に与える課題は図3に示すように先行車との位置関係を一定に保つことである。先行車は一定の速度で走行し、ある時間後一定の減速度で停止する。ただし、先行車がブレーキを掛け停止する場合には先行車に追突しないように自車の速度を調整して停止しなければならない。この場合には課題は無視される。

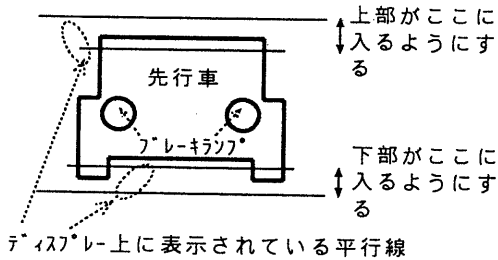


図3: 被験者の課題

また、実験は以下のようなシナリオで行う。

- 走行場面1. スタート後58秒後、先行車は減速し停止する(図4参照)
- 走行場面2. スタート後57秒後、先行車は減速しながら道路の脇に移動して停止する(図5参照)

停止した先行車の前方には数台の停止車両が存在している。被験者に対して走行場面1を5回、走行場面2を最後に1回行い、合計6回の課題を実施する。走行場面1の繰り返しの過程で、被験者が先行車に追突せずに減速、停止するための判断過程を獲得することを想定している。

ただし、被験者は過去に同種の実験を体験しており、運転に関する技能や課題については十分に熟知している。また、走行場面1, 2において、「走行場面が被験者に与える判断過程の獲得時のバイアスを減らす」という目的で、追従走行中に先行車がランダムに2度ブレーキランプを点灯させるようにした。このことは、先行車のブレーキランプが先行車が停止する時にのみ点灯するならば、ブレーキランプの点灯と停止時に強い相関が生じ、判断過程の獲得に悪影響を及ぼす可能性があると考えられるからである。

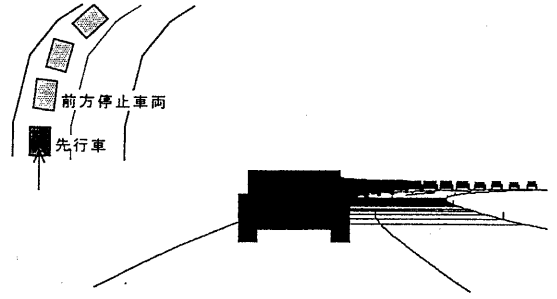


図4: 先行車が減速し停止する場面(走行場面1)

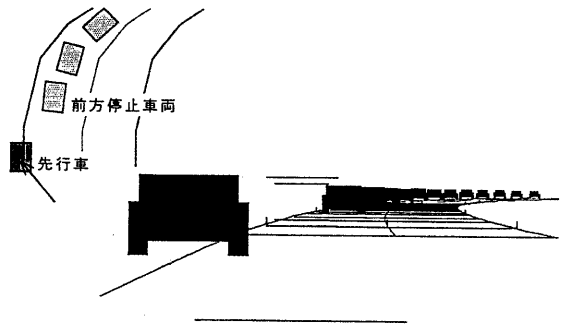


図5: 先行車が減速しながら道路の脇に停止する場面(走行場面2)

## 4.3 実験条件

実験系で使われるシミュレータのパラメータを表1に示す。時間単位はシミュレータ内で模擬されている時間を示す。以後、明示的に断わりがなければシミュレータ内の時間とする。次に、測定するデータの属性を表2に示す。ここで、前方停止車両との距離とは、自車と先行車が停止する時に前方に停止している車両の最後尾の車両との距離である。表に示すデータが10[msec]毎にサンプリングされる。データの単位はシミュレータが模擬しているデータの単位とした。

## 4.4 被験者

被験者として、日常運転を行う20, 30歳代の男性4名(A, B, C, D)と女性4名(E, F, G, H)の計

8名とした。

## 5 結果

### 5.1 測定データ

図6に被験者Eの走行場面1の課題(5回行った内の5回目)で測定した時系列データの一部を示す。

時間[秒]	自車車速[m/s]	自車加速度[m/s <sup>2</sup> ]	前方停止車両との距離[m]	ブレーキ操作量	ブレーキ操作のON/OFF
56.900	15.659	0.148	-0.347	12.175	0.000
57.000	15.668	0.144	-0.332	12.100	0.000
57.100	15.684	0.156	-0.316	12.325	0.000
57.200	15.726	0.424	-0.274	17.000	0.000
57.300	15.769	0.425	-0.231	17.051	0.000
57.400	15.811	0.421	-0.189	17.000	0.000
57.500	15.853	0.424	-0.147	17.051	0.000
57.600	15.895	0.421	-0.105	17.030	0.000
57.700	15.935	0.395	-0.065	16.606	0.000
57.800	15.974	0.394	-0.026	16.606	0.000
57.900	16.014	0.393	0.014	16.606	0.000
58.000	16.053	0.391	0.053	16.606	0.000
58.100	16.085	0.322	0.085	15.424	0.000
58.200	16.029	-0.564	0.029	0.000	0.000
58.300	15.972	-0.562	-0.028	0.000	0.000
58.400	15.916	-0.561	0.136	0.000	0.000
58.500	15.860	-0.559	0.354	0.000	0.000
58.600	15.804	-0.557	0.573	0.000	0.000
58.700	15.749	-0.556	0.791	0.000	0.000
58.800	15.693	-0.554	1.010	0.000	0.000
58.900	15.638	-0.552	1.230	0.000	0.000
59.000	15.583	-0.550	1.449	0.000	0.000
59.100	15.528	-0.549	1.668	0.000	0.000
59.200	15.473	-0.547	1.888	0.000	0.000
59.300	15.419	-0.545	2.108	0.000	0.000
59.400	15.364	-0.544	2.328	0.000	0.000
59.500	15.314	-1.902	2.412	0.000	1.435
59.600	14.912	-2.610	2.425	0.000	2.188

図6: 測定データの一部(被験者E)

### 5.2 技能の習熟度

図7, 8, 9, 10に技能の習熟度を示す車間距離の平均と分散の値をそれぞれ示す。各図の横軸は走行場面1の課題を行った回数を示す。

表1: 実験系のシミュレータのパラメータの値

パラメータ名	値
ディスプレイの表示間隔	100[msec]
各種のデータのサンプリング間隔	10[msec]
先行車の減速度	0.28G
先行車の車速	57[km/h]

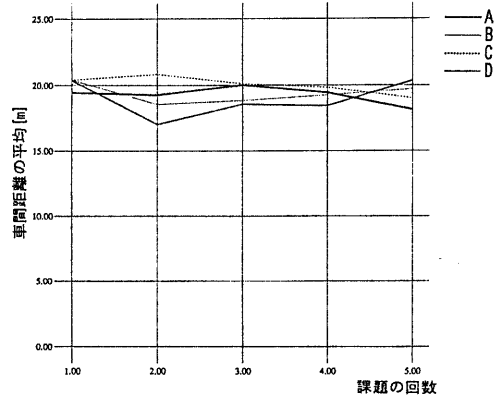


図7: 習熟度曲線 - 車間距離の平均 -(男性)

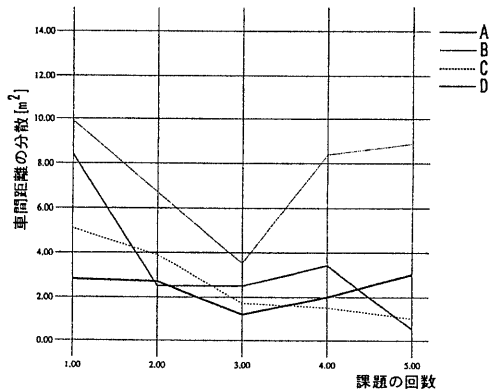


図8: 習熟度曲線 - 車間距離の分散 -(男性)

回数を重ねるにつれて、各被験者とも平均で約20[m]、分散で10[m<sup>2</sup>]以内に収まっていることがわかる。したがって、どの被験者もほぼ同じ程度の運転操作の技能を身に付けていることがわかる。

## 6 認知的コスト最小化の検証

ここでは、図1に示した手続きの流れにしたがって認知的コスト最小化の検証を行う。

### 6.1 ブレーキ遅れ時間

図11, 12にはブレーキ遅れ時間を示す(データは100[msec]毎にサンプリングされた)。縦軸がブレーキ遅れ時間、単位は秒である。横軸は課題の回数である。1回から5回目までは走行場面1、6回目が走行場面2である。図中三角のマークは先行

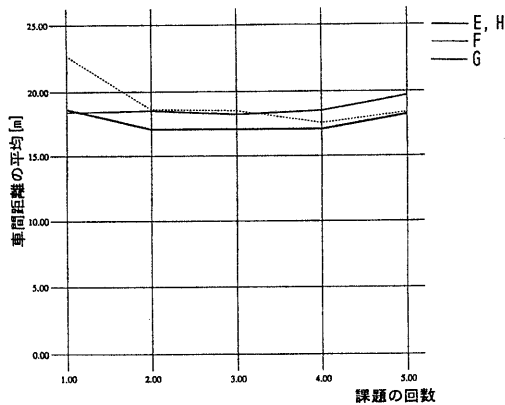


図 9: 習熟度曲線 - 車間距離の平均 -(女性)

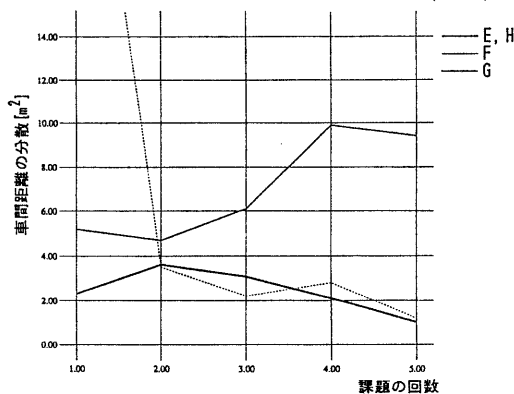


図 10: 習熟度曲線 - 車間距離の分散 -(女性)

車と追突したことを示す。被験者 G, D の二名が走行場面 2 において先行車と追突した。また、その他の被験者の走行場面 1 における追突の原因は、ブレーキの効き具合に不慣れなために生じたものである<sup>3</sup>。被験者 G を除く他の被験者のブレーキ遅れ時間は、ほぼ 0.8 秒前後にであることがわかる。すなわち、ブレーキランプ点灯後、判断し操作するまで約 0.8 秒の時間が必要であった。

<sup>3</sup>被験者からヒアリングを行った。

表 2: 測定するデータの属性

属性名	単位
自転車車速	[m/s]
自転車加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
相対車速	[m/s]
アクセル操作量	なし
ブレーキ操作量	なし
車間距離	[m]
前方停止車両との距離	[m]
ブレーキランプの ON/OFF	なし

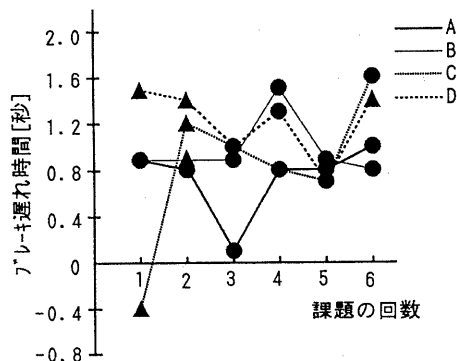


図 11: ブレーキ遅れ時間 (男性)

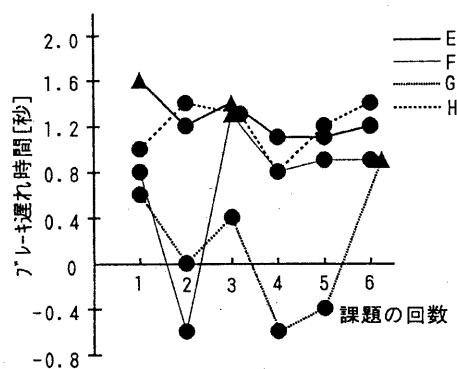


図 12: ブレーキ遅れ時間 (女性)

## 6.2 判別木の導出

図1の手続きにしたがい、走行場面2でブレーキ遅れ時間が走行場面1に比べ長くなっている被験者について、走行場面1の課題で獲得されると予想される判断過程をID3を適用し判別木を導出する。

図11, 12から、追突を起こした以後のデータについて(2, 3回以降)、各被験者の走行場面1のブレーキ遅れ時間の平均値および走行場面2のブレーキ遅れ時間(図11, 12における6回目)をそれぞれ表3に示す。表から、解析の対象となる被験者

表3: ブレーキ遅れ時間(単位[秒])

被験者	走行場面1の平均値	走行場面2
A	0.7	1.0
B	1.1	0.8
C	0.8	1.6
D	1.0	1.4
E	1.1	1.2
F	0.9	0.9
G	0.0	0.9
H	1.1	1.4

は、A, C, D, E, G, Hの6名であった。

次に判別木を導出するためにデータに対してクラスを付ける。クラス付けでは、ブレーキ操作量が出力されている時に *stop*(停止)、その他の場合を *follow*(追従)とクラス名を付けた。この理由は、ブレーキ操作量が出力されている時には、選択された時間領域で被験者の意思が確かに *stop* のクラスにあると考えられるからである。

また、被験者の時系列データの中から、解析の対象としたのは先行車の停止時のブレーキランプ点灯の前後、すなわち走行時間で56.5から60秒までの3.5秒間および、追従走行中、先行車のブレーキランプ点灯の前後4秒間<sup>4</sup>の計7.5秒間のデータとした。追従走行中のデータを含め解析の対象としたのは、被験者の判断過程の獲得が先行車の停止時のみで行われているわけではないからである(獲得時のバイアスを減らす)。ここで、ID3で用い

<sup>4</sup>追従走行中に2回点灯する。

たデータの属性は、自転車と先行車との関係を表すものとした(表4参照)。

表4: 解析に用いたデータの属性

属性名	単位
相対車速	[m/s]
車間距離	[m]
前方停止車両との距離	[m]
ブレーキランプのON/OFF	なし

以上から、被験者の判断過程を推定する判別木をID3により導出する。結果を図13に示す。ID3

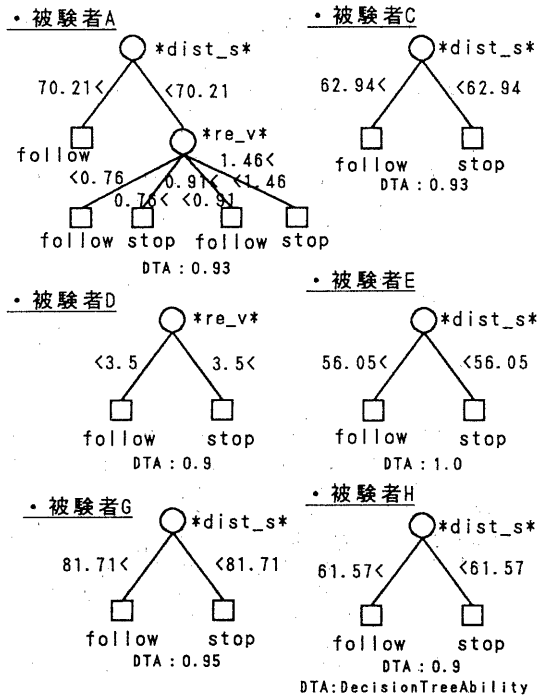


図13: 被験者の判断過程を推定した判別木

を適用する上で用いる各パラメータ [1] の設定で

は、判別木の形状がなるべく簡単になるようにした。図中、\*dist\_s\*は前方停止車両との距離、\*rev\*は相対車速を示す属性名である。また、DecisionTreeAbilityは導出した判別木によってデータ(判別木導出に使ったデータ)がどの程度正しく分類されているかを示す信頼性の指標である。図より、被験者Dを除く被験者の判別木では、前方停止車両との距離が、判断を行う際にもっとも重要な属性になっていることがわかる。

次に、判別木を使い正答率を求める。正答率は、導出された判別木により、走行場面2の課題のブレーキ遅れ時間から走行場面1の課題の平均遅れ時間を引いた時間領域のデータについて<sup>5</sup>クラス付けを行い、クラスが正しく付けられたかどうか調べることにより求められる。ただし、走行場面2のデータには走行場面1の場合と同様な仕方でクラスが付けられている。後者のクラス付けを正解とみなして、判別木によるクラス付けの正答率<sup>6</sup>を調べる。正答率の結果を表5に示す。また、DecisionTreeAbilityも合わせて示した。表

表 5: ブレーキ遅れ時間における判別木の正答率

被験者	正答率	DecisionTreeAbility
A	0.67	0.93
C	0.88	0.93
D	0.25	0.90
E	0.0	1.00
G	1.0	0.95
H	0.67	0.90

より、被験者C, Gの正答率がかなり高いことがわかる。したがって、検証手続き(図1)から、認知的コスト最小化が働いている可能性があることを示唆する結果になった。すなわち、走行場面2の課題でブレーキ遅れ時間が有意に増加しているのは、認知的コスト最小化が働いた結果、先行車の減速に関する注意水準が落ちているためと推定される。また、そのため被験者Gでは先行車に追突し

<sup>5</sup>走行場面2のブレーキ遅れ時間は走行場面1の平均遅れ時間より長くなっている。

<sup>6</sup>正答率が1の場合すべてのクラスが一致していることを示す。

た。その他の被験者については正答率が低く、認知的コスト最小化が働いているかどうか判定ができなかった。

実験から得られた結果を解釈すると次のようになる。シミュレータにおいて、先行車に追従する課題、ただし先行車は前方に停止した車両があるとその後ろに停止する、を繰り返して被験者に行わせると、本来先行車の挙動の変化に注意して判断するよりは、前方に停止した車両に注意する方が楽に対処できることを学習し、先行車への注意が働かなくなり(認知的コスト最小化が働く)、経験したことのない場面(走行場面2)で判断ミス(いわゆる、ほんやり)を引き起こすことになる(ブレーキ遅れ時間が増加する)。場合によっては判断ミスが先行車との追突を引き起こすことがある。

## 7 議論

今回の実験では被験者8名のうち2名について(25%)、認知的コスト最小化が働いている可能性があった。また、そのうち1名が判断ミスにより先行車に追突した。残りの6名については今回の実験では認知的コスト最小化が働いているかどうかわからなかった(図14参照)。原因としては、

1. 認知的コスト最小化が働いたが、被験者の(安全?)意識の差により先行車のブレーキランプに着目した判断過程を獲得したため、
2. 判断過程の推定が間違っていたため、
3. 走行場面が単純であったため、十分に認知的コスト最小化が働かなかったため、

が考えられる。

1については、追従走行中の先行車のブレーキランプ点灯に反応してブレーキを操作することから被験者B, Fの結果が該当する。今回シミュレータで実現したような単純な走行場面では被験者の獲得する判断過程をどれも同一のものにさせることは困難なことであるのかもしれない。

2については、ブレーキ遅れ時間が長くなっていることから被験者A, D, E, Hの結果が該当する。今回適用したID3では判別木により判断過程が表現される。そのため被験者の判断過程の構造が判別木のような構造になっている保証はない。判断や操作に伴う遅れ時間はどの被験者も0.8秒程度有している。このような遅れ時間を含むデータからは現在の学習アルゴリズムでは遅れ時間を考慮して判別木を導出することができない(時系列データに適用ができない)。また、時系列データに



基づく判断では瞬時瞬時のデータを基に判断が獲得されるのではなく、判断の結果を評価して、その評価結果により判断過程が獲得されると考えられる。そのため、瞬時瞬時の認知的コスト最小化に基づく学習ではなく全体の判断結果を考慮した認知的コスト最小化に基づく学習が必要であると考えられる。

3については、ディスプレイから得られる情報では被験者において各属性間で認知的コストを最小にするほどの違いがなく判断過程を形成することができた可能性がある。各属性間で認知的コストの違いを顕著にするためには走行場面や課題を見直す必要があると考えられる。

以上を問題点としてまとめると、

- 認知的コスト最小化の働きが不十分である、
- 時系列データとして捉えた認知的コスト最小化を考慮する必要がある、

となる。

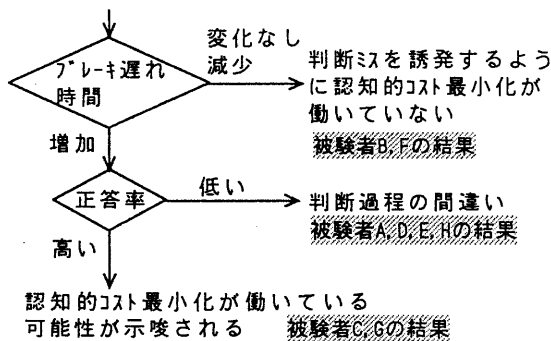


図 14: 認知的コスト最小化の検証手続きによる検証結果

## 8 まとめ

本報告では、運転を模擬するシミュレータ実験により、認知的コスト最小化の検証実験を行い、被験者8名のうち2名において、

- 被験者が経験したことの無い走行場面におけるブレーキ遅れ時間の増加、

- 被験者が経験したことの無い走行場面における被験者の判断の推定を、判断過程を推定した判別木により行ったところ高い正答率が得られた、

ことから認知的コスト最小化が働き、脇見やぼんやりなどのミスが生じる可能性を見出した。被験者のうち1名がこのようなミスにより先行車に追突した。今回の結果から現実の交通状況下でドライバが起こすエラーの中には、エラー発生の原因が認知的コスト最小化に基づくものとして説明できるのではないかと考えられる。また、今回の検討から以下の問題点が明らかになった。

- 走行場面が道路と車の関係が単純なものであるため十分に認知的コスト最小化が被験者の判断過程の獲得において働かない可能性がある。
- ID3の適用の仕方、サンプリングされた各時刻毎に相互情報量を最大化、では、時系列データに対しては判断過程を表現することが困難である。

今後は以上の問題点の解決に向けた検討および被験者の判断 - 操作過程の認知的コスト最小化を考慮したモデル化を検討して行きたい。

## 参考文献

- [1] 荒木他：決定木学習における数値データの区間分割，第5回人工知能学会全国大会予稿集，pp.157-160，1991.
- [2] Klebelsberg, D. 蓮花一己 訳，長山泰久監訳，交通心理学，企業開発センター交通問題研究室，1990.
- [3] Quinlan, J.R. : Induction of Decision Trees, *Machine Learning*, Vol.1, pp.71-99, 1985.