

複雑な道路・交通環境下における運転者の認知・  
判断及び行動制御モデルの構築

The modeling of a driver' cognition-decision process and driving  
behavior under the complex traffic environments

東京都市大学博士論文

平成27年6月

洪 一 基



## 目次

<b>第1章 はじめに</b> .....	<b>2</b>
1-1 研究背景と目的.....	2
1-2 本研究の特徴.....	4
1-3 論文の構成.....	7
<b>第2章 文献研究</b> .....	<b>9</b>
2-1 交通システムにおける人間要素.....	9
2-1-1 概要 .....	9
2-1-2 運転課題 (The driving Task) .....	9
2-1-3 運転者の認知反応 .....	11
2-1-4 運転パフォーマンス .....	13
2-2 交通流理論におけるドライバーモデル.....	21
2-2-1 概要 .....	21
2-2-2 追従走行モデル (Car Following Models) .....	21
2-2-3 安全距離・衝突回避モデル (Safe distance and Collision avoidance models) ....	27
2-2-4 車線変更モデル (Lane Changing Model) .....	28
2-2-5 ファジー推論モデル (Fuzzy inference models) .....	31
2-3 認知工学理論における運転者モデル.....	32
2-3-1 認知作用のメタファー .....	32
2-3-2 認知作用の手順プロトタイプモデル .....	34
2-3-3 状況決定制御モデル (Contextual Control Model ; COCOM) .....	35
<b>第3章 実験</b> .....	<b>39</b>
3-1 実験1 : 多変量分析法を用いた複雑な交通環境からの事故因子の定量評価法 <sup>51)</sup> ..	39
3-1-1 概要 .....	39
3-1-2 実験方法 .....	40
3-1-3 実験結果 .....	48

3-2 実験2：道路環境の変化が運転者の認知行動に及ぼす影響に関する研究.....	49
3-2-1 概要.....	49
3-2-2 実験方法.....	50
3-2-3 実験結果.....	53
3-3 実験3：信号交差点流入部の障害物に対する高齢運転者の認知、判断及び運転挙動.....	55
3-3-1 概要.....	55
3-3-2 加齢による運転者の認知・生理学的な変化.....	56
3-3-3 実験方法.....	59
3-3-4 実験結果.....	61
3-3-5 結論.....	65
<b>第4章 統合運転者行動制御モデル.....</b>	<b>68</b>
4-1 概要.....	68
4-2 運転者モデルに関する既存の研究.....	68
4-2-1 既存研究の流れ.....	68
4-2-2 認知工学理論.....	69
4-2-3 交通流理論.....	71
4-2-4 車両力学理論.....	72
4-3 統合運転車制御モデル.....	73
4-3-1 ブレーキ認知反応時間 (Brake perception reaction time).....	74
4-3-2 ステアリング認知反応時間 (Steering perception reaction time).....	75
4-3-3 注視運動の安定性 (Fixation eye movement stability).....	76
4-3-4 追従安定性 (Car following stability).....	78
4-3-5 操舵安定性 (Steering stability).....	78
4-3-6 利用可能な時間 (Available Time).....	79
4-3-7 運転者への安全運転支援水準 (Driver Support Level).....	80
4-4 ファジー推論機構 (FIS) による行動制御レベルの推定.....	81
4-5 事例：飲酒運転の危険性を体験するための教育用運転模擬装置の開発.....	82
4-5-1 概要.....	82

4-5-2 実験方法 .....	83
4-5-3 飲酒運転の危険性を体験する。 .....	88
3-3-6 教育効果の検証 .....	90
3-3-7 まとめと今後の課題 .....	91
<b>第5章 結論と今後の課題 .....</b>	<b>93</b>
5-1 結論.....	93
5-2 今後の課題.....	94
<b>参考文献.....</b>	<b>95</b>
<b>付録：学術誌掲載論文.....</b>	<b>100</b>
<b>謝 辞</b>	

## 目次

Figure 1-1	運転者モデルの概念図.....	3
Figure 1-2	Rasmussen の梯子モデル(1983) .....	5
Figure 1-3	Hollnagel の状況決定制御モデル (1991) .....	6
Figure 1-4	統合運転者モデルの構造.....	7
Figure 2-1	認知的な観点からみた運転者の運転課題.....	10
Figure 2-2	人間の情報処理モデル (Wickens, 1984).....	11
Figure 2-3	A Model of Traffic Control Device Information Processing.....	20
Figure 2-4	Model for cooperative and forced gap acceptance .....	30
Figure 2-5	ギャップの定義.....	30
Figure 2-6	人間行動の梯子モデル <sup>3)</sup> .....	35
Figure 2-7	状況決定制御モデルの内部構造 <sup>3)</sup> .....	37
Figure 3-1	瀬田交差点の道路形状.....	40
Figure 3-2	研究の流れ.....	41
Figure 3-3	運転挙動とヒューマンエラーの分類.....	43
Figure 3-4	交通環境からの事故因子 (追突事故) .....	46
Figure 3-5	交通環境からの事故因子 (出会い頭事故) .....	48
Figure 3-6	交通システムの循環モデル (概念図) <sup>5 3)</sup> .....	50
Figure 3-7	実験装置の構成.....	51
Figure 3-8	実験道路 (例) .....	51
Figure 3-9	道路環境による計測値の比較.....	54
Figure 3-10	ドライビングシミュレータの映像 (例) .....	60
Figure 3-11	The principle of operation of the EMR-8B eye mark recorder.....	61
Figure 3-12	Search RT as determined by the ATMT .....	62
Figure 3-13	Definition of a fixation-action time point by the parked vehicle (hazard) .....	62
Figure 3-14	Example of fixation eye movement for (a) an older driver's hazard avoidance behaviours and (b) a younger driver's hazard avoidance behaviours	66
Figure 4-1	既存研究における運転者モデル.....	68
Figure 4-2	Rasmussen の梯子モデル(1983) .....	70
Figure 4-3	状況決定制御モデルの内部構造.....	71
Figure 4-4	統合運転者モデルの構造.....	74
Figure 4-5	メンバシップ関数 (ブレーキ認知反応時間) .....	75
Figure 4-6	メンバシップ関数 (ステアリング認知反応時間) .....	76
Figure 4-7	メンバシップ関数 (注視運動の安定性) .....	77

Figure 4-8	メンバシップ関数（追従安定性）	78
Figure 4-9	メンバシップ関数（操舵安定性）	79
Figure 4-10	メンバシップ関数（利用可能な時間）	80
Figure 4-11	メンバシップ関数（安全運転支援水準）	81
Figure 4-12	ファジールールによる運転者の制御制御レベル推定	81
Figure 4-13	飲酒が人体に与える影響	84
Figure 4-14	ハードウェアの構成	85
Figure 4-15	道路の構成（例）	86
Figure 4-16	実験データの記録（例）	88
Figure 4-17	特殊視覚効果	90
Figure 4-18	DUI-DS の教育効果に関するアンケート調査結果	90
Figure 5-1	研究成果のイメージ	93

## 表目次

Table 2-1 認知反応時間の連鎖モデル <sup>11)</sup> .....	14
Table 2-2 ブレーキ反応時間 (対数分布) <sup>15)</sup> .....	15
Table 2-3 予期されていない状況における認知反応時間 <sup>16)</sup> .....	16
Table 2-4 パダルの間隔による移動時間の変化 <sup>20)</sup> .....	17
Table 2-5 ペダル移動時間の計測値 (Movement Time Estimates) .....	17
Table 2-6 ターゲットの提示方法による平均反応時間 <sup>22)</sup> .....	18
Table 2-7 予期されていない状況下における安定減速率の推定値 <sup>23)</sup> .....	19
Table 2-8 信号変化に対する認知反応時間.....	20
Table 2-9 第1追従モデルにおけるパラメータ.....	24
Table 2-10 GM 実験による第3モデルのパラメータ値.....	25
Table 2-11 GHR モデルパラメータ 1、m の推定値 <sup>45)</sup> .....	26
Table 2-12 認知工学における運転者モデル <sup>5)</sup> .....	33
Table 2-13 認知モデルの分類.....	36
Table 3-1 瀬田交差点の交通容量、信号パラメータ.....	42
Table 3-2 運転挙動とヒューマンエラーの分類.....	43
Table 3-3 追突事故における共通因子と寄与率.....	44
Table 3-4 出会い頭事故における共通因子と寄与率.....	44
Table 3-5 追突事故における評価項目と各因子の寄与率.....	45
Table 3-6 出会い頭事故における評価項目と各因子の寄与率.....	47
Table 3-7 実験環境と変数設定.....	52
Table 3-8 実験環境で設定された交通量.....	60
Table 3-9 Comparison of the search RT between the two driver groups .....	62
Table 3-10 Comparison of the eye movement characteristics between the two groups .....	63
Table 3-11 Comparison of the fixation-action point between the two driver groups	64
Table 4-1 認知・反応時間の連鎖モデル <sup>10)</sup> .....	75
Table 4-2 回避行動別の所要時間 <sup>21)</sup> .....	80
Table 4-3 Performance and behavior characteristics that have been associated with increasing BAC levels <sup>64)</sup> .....	83
Table 4-4 走行シナリオ.....	86
Table 4-5 血中アルコール濃度による反応時間と特殊視覚効果の決定値...	89

# 第1章 はじめに

## 第1章 はじめに

### 1-1 研究背景と目的

交通は、人とモノを目的地まで運ぶことを目的とした移動である。人は交通の利用者である一方で、車を運転するときには運転者（オペレータ）でもある。即ち、運転者（人）は「人間-道路-自動車系（以下、交通システム）」における相互作用の中心であるとともに、交通システムの信頼性にとって重要な要素でもある。近年、交通システム中に情報技術を取入れシステムの信頼性向上、効率化が進められている。例えば、カーナビ、ETC、VICS、DSSS、ASV等の車載情報機器は、目的地までの最短経路情報、渋滞情報、事故情報、安全運転支援等、利便性の向上だけでなく運転者の的確な意思決定や行動判断に必要な情報を様々な方向から提供することが出来る。一方、自動車保有台数の増加、道路ネットワークの大規模化及び車載情報機器の導入は運転者の精神的・肉体的な負荷を増加させる新たな課題を生み出した。運転は、時々刻々変化する道路・交通環境に対する認知-判断-操作の連続であり、その一連の流れに不均衡が生じるとヒューマンエラーが起りやすくなる。Treat(1977)は、交通事故の57%は運転者だけに原因があり、少なくとも90%以上がヒューマンエラーと関係があると言っている。その上で、運転者が道路・交通環境を間違えて理解していることを事前に警告できれば、交通事故の半数以上を防ぐことが出来るとも言っている<sup>1)</sup>。

ヒューマンエラーを減らすためには、事故が起りにくい交通環境情報を道路または車から提供するなどの予防安全技術(active safety technology)の開発が重要である。予防安全技術は、①危険を察知しやすく運転者が疲れにくい交通環境の構築、②車両運動の限界性能が高く、路面状態、横風等の外乱の影響を受けにくい車づくり、③各種センサーや交通管制システムが危険を探知し運転者に警告をする警告型運転者支援技術、④運転者が認知していない危険因子や危険行動に対して車側から事故回避行動を自動的に行う介入型運転者支援等に分類できる。①と②については、古くから人間工学と自動車工学分野で研究されシステムの評価手法まで定着している。一方、③と④の運転者支援技術については、運転支援システムによる警告と自動的な介入が事故防止にどれだけ効果があるかを、事前に評価することが要求されている。

理論上、人間行動の選択肢は無限であるが、実際に選択できる選択肢は限られている。運転者モデルは、運転者が選択できる選択肢が限られていることが多いことに着目し、利用可能な選択肢から確率的に最も選択されやすい又は望ましいとされる知覚-認知・判断-行動を、定量的な方法を用いて数式化又は定性的に概念化したものである。

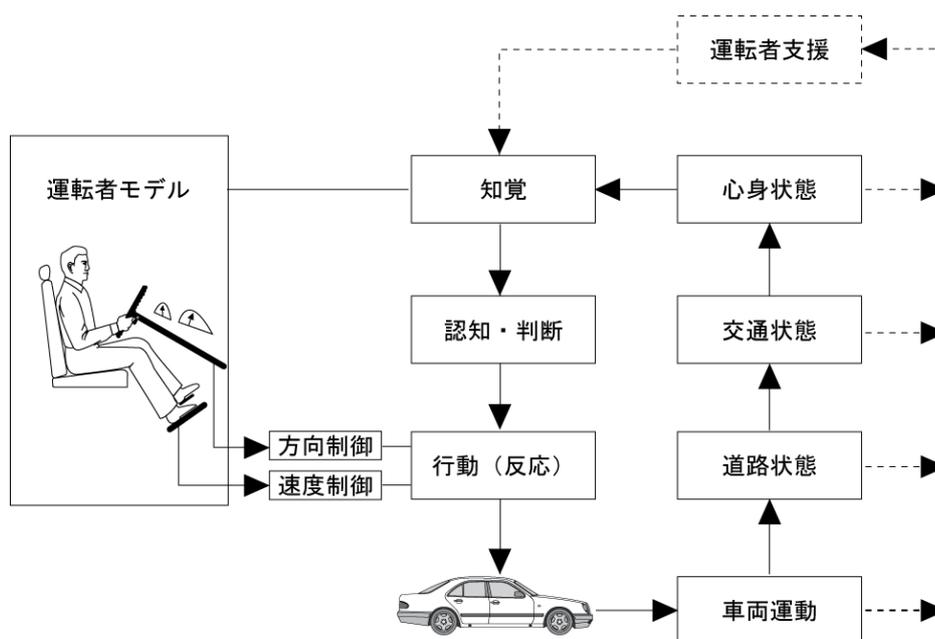


Figure 1-1 運転者モデルの概念図

運転者モデルは運転者-道路-自動車系の相互作用を理解し、相互作用による影響を評価するのに重要な役割を果たしていることから、古くから研究されてきた。これまでに提案されている運転者モデルは、その研究分野別の目的から交通流理論（交通工学）、認知行動理論（人間工学）及び車両制御理論（車両運動学）に分類することができる。交通流理論には交通流の円滑化、安全化の観点から車両間の相互関係をモデル化した追従走行モデル（Car following model）、安全距離・衝突回避モデル（Safety distance model or collision model）、車線変更モデル（Lane changing model）等の微視的交通流理論がある。認知行動理論では人間-道路又人間-自動車の相互作用における不整合から生じる作業負荷の評価、ヒューマンエラーの防止、運転パフォーマンス等々を評価することを主な目的とした情報処理モデルが提案されている。車両制御理論ではマン・マシンインタフェース（MMI）の最適化の観点から、変速機、ステアリング、ブレーキ、アクセル等の運転操作と車両の運動特性との関係を数式化した速度制御モデル、操舵モデル等が提案されている。

運転者は本質的に誤りやすい3つの機能（認知、注意、記憶）に頼りながら時々刻々変化する道路・交通環境を認知し、その時の状況(context)によって異なる行動判断をしなければならない。しかし、従来の運転者モデルに関してはそれぞれの分野別の目的に合わせ様々な運転行動の解析手法が研究されたものの、システム設計の全体にわたる道路・交通環境の認知・判断から行動制御までを含む広い意味での運転者行動モデルとしては、十分とは言えない。例えば、システムの巨大化、複雑化に伴う運転者の予想外の行動に対しては、蓄積されているデータも少ないし、そのような場合の運転者の行動制御特性を確率的に取扱うには、運転行動モデルは十分ではない。

本研究の目的は、このような問題に対して、従来の研究成果を踏まえて交通システムの安全性に関する共通パラメータを抽出し、運転者の認知・判断から行動制御にわたる統合的な運転者行動モデル (JDM: Joint Driver Model) を提案しようとするものである。特に、研究用ドライビングシミュレータを用いて様々な交通環境 (外乱) を運転者に与え運転支援システム (DSSS) の事前評価を行う際、システムに致命的な欠陥がないか、システムの装備によってどの程度の効果が得られるかを定量的に評価することへの応用を目指している。

## 1-2 本研究の特徴

認知工学分野では、外部環境に対して視認性がよく危険を察知しやすい道路環境、運転が快適にできて疲れにくい車を目指し、マンマシーンインターペースの観点からの研究が行われてきた。例えば、運転者の脳波、眼球運動、心電図、筋電図、皮膚電位 (発汗) 等の物理実験法と NASA-TLX、SWAT のような心理実験法など様々なメンタルモデルが提案されている。認知モデルは、人間の認知行動に対するアプローチ方法から三つの仮説、①要素仮説 (Atomistic assumption)、②機構仮説 (Mechanistic assumption)、③認知仮説 (Cognition assumption) に分類できる。

要素仮説は、機械の機能は各々の要素を結合したもので、作業の分割との関係から Taylor の「科学的管理 (Scientific management)」にその起源がある。要素仮説は、人間に対する刺激-生体-反応 (Stimulus-Organism-Response; S-O-R)、FTA (故障の木解析; Fault Tree Analysis)、FEMA (故障モード影響解析; Failure Mode and Effect Analysis)、THERP (ヒューマンエラー率予測技法; Technique for Human Error Rate Prediction) 等であり、システム信頼性分析に大きな影響を与えた。しかし、要素仮説は、システム内の人間を決定論的な機械と見なしているため、機械と人間の相互作用が欠落している、という問題がある。

機構仮説は、人間の心を情報処理システム (IPS; Information Process System) としてみる観点から情報処理論にその起源がある。情報処理理論では、人間の行動をすべていくつかの要素ステップに分解し、システムの相互作用を非常に明確に表現する。しかし、システム内の人間の行為を決定論的に見る見方は、要素仮説と変わらない。機構仮説として広く知られている認知モデルは、Rasmussen によって提案された梯子モデル (Step ladder model) があげられる。梯子モデルは、複雑な人間の信頼性問題を次の3つの行動階層、①スキルベース行動 (Skill-based behavior)、②ルールベース行動 (Rule-based behavior)、③知識ベース行動 (Knowledge-based behavior) に分け扱うことを提案したものであり、S-R-K モデルとも呼ばれる (Figure 1-2)<sup>2)</sup>。国内では、1986年に小島が梯子モデルとファジー推論を融合し交差点右折時の運転者-車系の運転者モデルを提案した例がある<sup>3)</sup>。これは、機構仮説による決定論的なモデルの限界を乗り越えることを試みた研究例であるが、ITS のような大規模なシステムを評



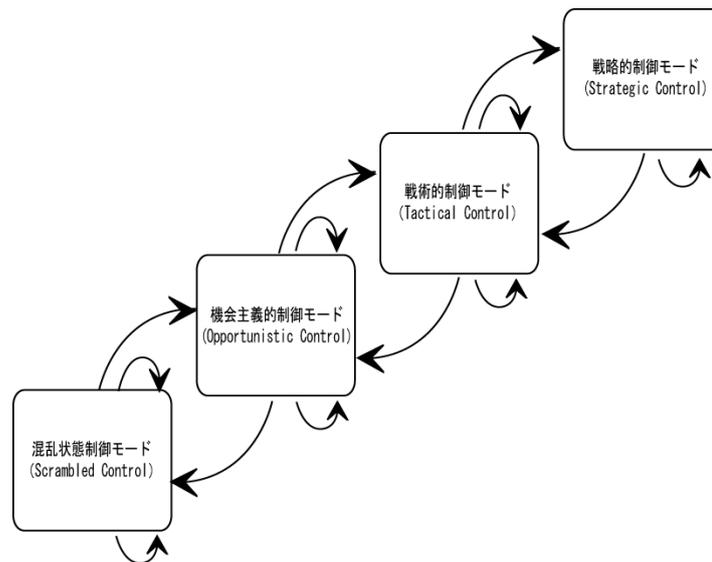


Figure 1-3 Hollnagel の状況決定制御モデル (1991)

本研究で提案する統合運転者モデルは、従来の研究から同定された7つのモデルパラメータ（入力）、入力パラメータ情報を基にファジー推論を行う推論機構（Fuzzy Inference System; FIS）、Hollnagel の状況決定制御モデルに基づいて運転者の行動制御レベルを推定する出力メンバシップ関数から構成される (Figure 1-4)。入力パラメータは、運転者の行動制御レベルを推定するための説明変数である。

統合運転者モデルには、既存の研究からその計測過程と結果から信頼性が高いと知られている結果をメンバシップ関数 (Membership Function) の中に組み込まれている。被験者から入力されたデータはメンバシップ関数に組み込まれた指標と比較されその結果を自然言語に表現され、If-then 形式の関数群であるファジー演算子 (Fuzzy operator) に入力される。ファジー演算子は、複数入力パラメータからファジールールに基づいて運転者の行動制御レベルを4つのモード、戦略的制御 (strategic control mode)、戦術的制御 (tactical control mode)、機会主義的制御 (opportunistic control mode)、混乱状態制御 (scrambled control mode) に推定する。例えば、ブレーキ認知反応時間を Slow、Normal、Fast という3種類の集合にわけられることを考えた場合、どのぐらいの速さを Fast とするか Slow とするかは明らかな定義がなく曖昧な側面がある。ファジー推論ではこのような曖昧な事象を定量化することで数学の集合論的な解釈を可能にする。

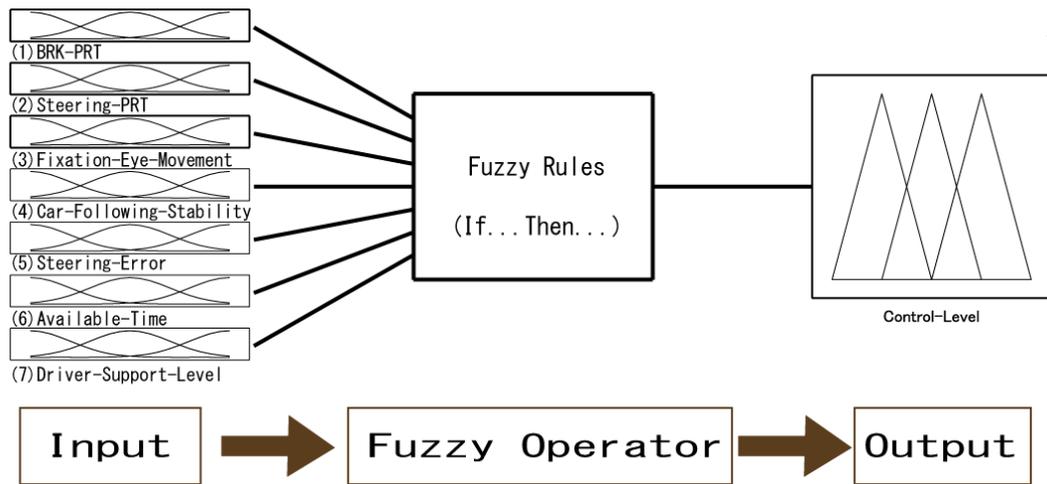


Figure 1-4 統合運転者モデルの構造

### 1-3 論文の構成

本研究は、以下のように構成されている。

ここまでの第1章は、研究目的と背景及び本研究の特徴について示した。

第2章では、主に人間工学、交通工学及び自動車力学で行われた運転者の認知、判断、行動に関する既存の研究成果を幅広く考察する。

第3章では、本研究で提案した統合運転者モデル(JDM)を開発するために行われた3つの実験を紹介する。

第4章では、本研究開発した統合運転者モデルの内容、そのモデルの実用化を想定して開発されたファジー推論機構、そのモデルを応用した事例について述べる。

第5章では、まとめとして本研究を通して得られた結論をまとめ今後の課題について議論する。

## 第2章 文献研究

本章は、道路設計 (Highway design)、道路運用 (Highway operation) 及び自動車の設計で幅広く応用されている人間-道路-自動車系における人間の認知、判断、行動特性を幅広く考察し、今後情報 (IT) 技術の導入によって予想される交通システムの高度情報化、統合化、複雑化による運転者の役割の変化、複雑な交通環境下における運転者の行動制御レベルの遷移のモデル化に関する新たな課題について議論する。

## 第2章 文献研究

### 2-1 交通システムにおける人間要素

#### 2-1-1 概要

本章の目的は、人間-道路-自動車系における人間の認知、判断、行動特性を人間工学的な観点から考察し、統合運転者行動評価モデル (Joint Driver Model; JDM) のパラメータを同定することにある。まず、本章では道路設計、道路運用、及び自動車の設計で幅広く応用されている従来の研究を考察し、次に ITS 技術の導入によって予想される交通システムの高度化、統合化、複雑化による運転者の役割の変化、それに伴い様々な分野 (物理心理学、交通心理学、認知工学、交通工学等) で議論されている運転行動の評価方法を考察する。

#### 2-1-2 運転課題 (The driving Task)

道路走行中における運転者の作業課題は、その目的から縦の課題 (Longitudinal Task) と横の課題 (Lateral Task) に分類できる。実際の運転においては道路幾何、交通流、交通制御等、交通環境に合わせ2つの課題が複雑な組合せで構成される独立して切り分けることは難しいが、本研究では人間信頼性評価の観点から人間に期待される適切な行為を系統的に記述し行為群がどのように関係つけられるか理解する有効な方法として用いる。

##### (ア) 縦の課題 (Longitudinal Task)

縦の課題は、交通流の中で前方車と後方車との間で安全に走行するために必要な車間距離の維持、速度制御 (加・減速) 等を行うための運転課題を指す。交通流理論の観点から縦の課題は追従理論 (Car following theory)、ショックウェーブ理論 (Shock wave theory) の基本であり追突事故、渋滞のメカニズムを解析するとき重要な行動要素である

##### (イ) 横の課題 (Lateral Task)

横の課題は、目的地までの経路選択、障害物の回避を行うためのステアリング操作、車線変更、合流、分流等を行うための運転課題を指す。交通流理論の観点から横の課題は車線変更理論 (Lane change theory)、ギャップ許容理論 (Gap acceptance theory) の基本であり車線変更、合流、分流及び追越し時の意思決定過程を理解するのに重要な行動要素である。

### (ウ) 認知的課題

情報処理の観点から運転課題は、視覚的課題と運転中の情報処理の90%以上を負う視覚的課題と聴覚的課題(Auditory task)、運動的課題(Kinetic task)、認知的課題(Cognitive task)等非視覚的課題に分けることができる。

上述した縦の課題を情報処理の観点からみると、運転者の目標、前方車両の挙動、道路を通じて提示される運動の流れ(flow of motion)、危険因子の位置、交通信号、車内情報機器など、一次的視覚注意令域(primary visual attention lobe; PVAL)から提供される入力情報に基づいて、先方車の動きを追跡しながら加速、減速、停止、左・右折、追越し、等を行う運転課題である。一方、横の課題は運転者の前方に提示されている道路正面と自車が走行する方向など、道路から提供される入力情報に基づいて、車線変更、左・右折、追越し・追抜き、等を行う運転課題である(Figure 2-1)。

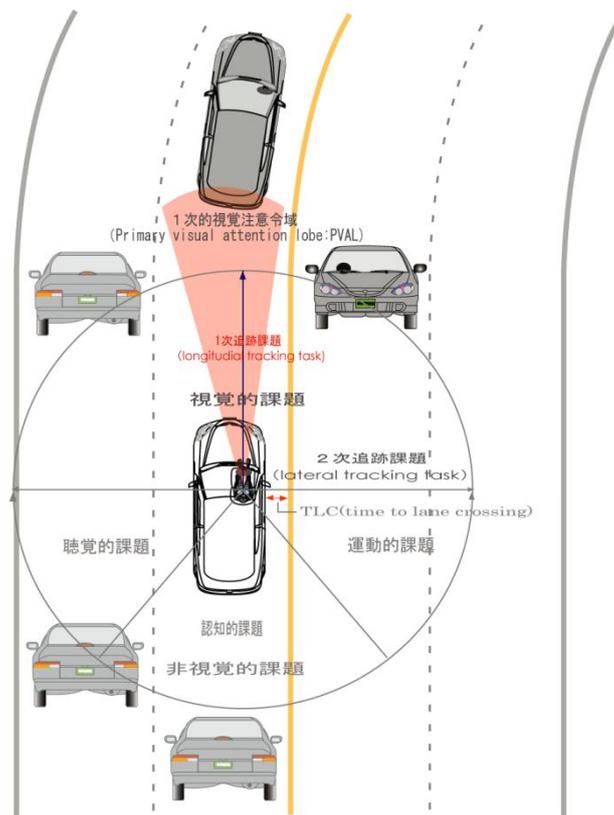


Figure 2-1 認知的な観点からみた運転者の運転課題

### 2-1-3 運転者の認知反応

人間がある刺激を知覚してこの情報が脳に伝えられ、手足の行動として反応するまでの時間を認知反応時間 (Perception Reaction Time) と呼ぶ。知覚は視覚、聴覚、触覚などによるが、運転作業の場合は90%以上を視覚情報に依存する。反応時間は刺激の種類、強度、反応動作の種類、年齢、注意の分散、疲労、緊張などの条件によって異なることが知られている。運転者の反応時間は、人間の情報処理過程を理解し情報処理のパフォーマンスを評価するのに重要な指標である (Figure 2-2)<sup>6)</sup>。

現在、道路構造令で示す2.5秒は道路の視認距離を確保することが目的であり、視界の中に今まで見えなかった障害物が突然現れる場合の反応時間は、ランプの点灯などの反応時間より長く取ると考えられたものである。

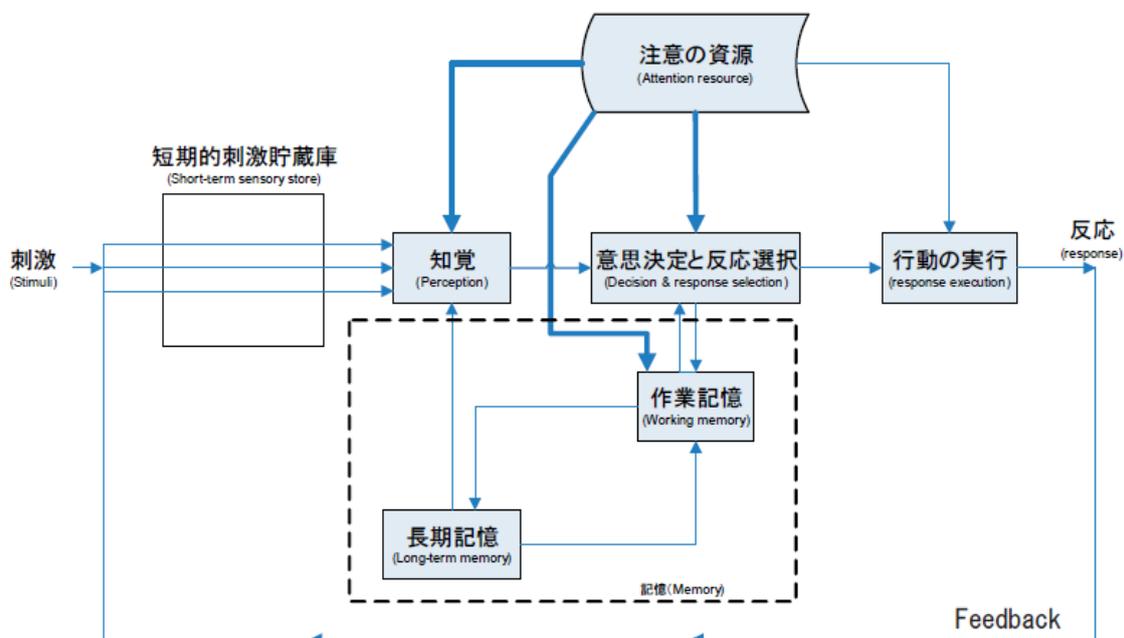


Figure 2-2 人間の情報処理モデル (Wickens, 1984)

次に示すヒックの法則<sup>7)</sup>とマジカルナンバー<sup>8)</sup>は、人間の認知反応時間に関する基礎的な研究として広く用いられる体系的な研究である。

#### (ア) ヒックの法則 (Hick's Law)

ヒックの法則は、英国の心理学者 W.E Hick(1952)によって行われた複数の選択肢に対する選択反応時間(Search Reaction Time; SRT)の計測実験から導かれた線形方程式 (Linear equation) である(式 2-1, 式 2-2)<sup>7)</sup>。

ヒックの法則によると、人間の選択反応時間は刺激情報のエントロピー (H) に比例し、刺激情報のエントロピー (H) は選択可能な事象の数の対数である。即ち、n 個の事象から事象 1 を決めるまで必要とされる時間(sec)は以下のような関係式から推定される。

$$H = \log_2(n + 1) = \sum p_i \log_2 \left( \frac{1}{p_i} + 1 \right) \quad (\text{式 2-1})$$

$$T = a + bH = b \log_2(n + 1) = a + b \sum P_i \log_2 \left( \frac{1}{P_i} + 1 \right) \quad (\text{式 2-2})$$

ここで、

T = N 個の事象から事象 i を決めるまでに必要とされる所要時間(秒)

a = 反応時間の最小値(意思決定を除く所要時間)

b = 定数 (実験から得られた平均意思決定時間  $\approx 150$  ミリ秒)

H = 転送された情報のエントロピー量

n = 等しく選択される可能性がある選択肢の数 (選択可能な事象の数)

$P_i$  = n 個の事象から、i が選択される確率

例えば、ある信号の色を見て対応するボタンを押すという場合、信号の色を認知してから対応するボタンを押すまでかかる一定時間を 200 ミリ秒 とするなら、信号の提示からボタン押下までの時間は次のようになる。

- ボタンの数が 1 つの場合 :  $T = 200 + 150 \log_2(1+1) \approx 350$  ミリ秒
- ボタンの数が 2 つの場合 :  $T = 200 + 150 \log_2(2+1) \approx 438$  ミリ秒
- ボタンの数が 3 つの場合 :  $T = 200 + 150 \log_2(3+1) \approx 500$  ミリ秒
- ボタンの数が 4 つの場合 :  $T = 200 + 150 \log_2(4+1) \approx 548$  ミリ秒
- ボタンの数が 5 つの場合 :  $T = 200 + 150 \log_2(5+1) \approx 588$  ミリ秒

### (イ) マジカルナンバー (Magical Number)

人間が脳の中に一時的に蓄積できる情報量には限界があり、それを短期記憶 (Short Term Memory: STM) といい。人間の情報処理は短期記憶と深い関係があり選択反応時間に影響を及ぼす。例えば、運転者は走行中に周辺車両、道路形状、信号器、各種メータ類等から入力された情報に基づき次の行動を決める。Miller G. A. (1956) は、一度聞いただけで直後に再生するような場合、脳の中に保持できる記憶容量は 7 個前後になるということを示した。この 7 個というのは、情報量ではなく意味を持った「情報のかたまり (Chunk)」の数のことで、数字のような情報量が小さなものも、人の名

前のように情報量が大きな物も  $7 \pm 2$  個程度 ( $\pm 2$ : 個人差) しか覚えられないということを発表した。それをマジカルナンバー ( $7 \pm 2$ ) という<sup>8)</sup>。

#### 2-1-4 運転パフォーマンス

ドライバーは、運転中に道路形状、道路標示、周辺車両の動き、信号制御、車載器等からの運転情報を得ている。自動車の操作系に対する作業パフォーマンスは、刺激の種類 (聴覚、視覚、触覚等)、刺激の数 (選択肢)、刺激の予測可能性等によって変化する。本章では、運転者の情報処理の 90% 以上が視覚情報処理に依存していることから<sup>9), 10)</sup>、主に視覚情報処理による認知反応特性、作業パフォーマンスを扱うこととする。

##### (ア) ブレーキ操作における認知反応時間 (Perception response time for braking)

自動車の操作系においてブレーキ操作は、車両を停止させるだけでなく速度の制御、危険回避などを行うために欠かせないものであり、アクセル操作と切替えられる場合が多い。ブレーキ反応時間は、ブレーキの操作が求められる外部刺激を感知してから認知・判断までの時間 (CDT)、行動判断の結果を筋肉に伝え足をブレーキまで移動して適切な量を操作するまでの時間 (CMT) に構成され、2つの要素を合わせブレーキ反応時間といい (式 2-3)。

$$\text{PRT} = \text{CDT} + \text{CMT} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (\text{式 2-3})$$

ここで、

PRT: Perception response time

CDT: Cognition and Decision Time

CMT: Control Movement Time

$\varepsilon_1$ : Signal transmitting and transferring delay

$\varepsilon_2$ : Mechanical delay

一般的に人間の認知・反応過程は、「探知 (Detection)-識別 (Identification)-判断 (Decision)-反応 (Response)」4段階に分けることができる。

- [探知]は視野に異変 (障害物、前方車両の速度変化、急な割込み等) が現れた場合、それを発見することをいう。主に、探知跳躍性眼球運動 (Saccadic eye movement) により検出される。
- [識別]は注視運動 (Fixation eye movement) により対象物の移動方向、速度、色などの特徴が見分けられ大脳に入力される。
- [判断]は大脳に入力された情報に対してどのように対応するかを決めること

をいう。

- [反応]は脳で決められた判断結果が筋肉に伝えられ運動系が動くことをいう。

McGee らは、感覚器による刺激の受容から運動系による出力までの一連の過程を分解し連鎖モデル(Chaining model of PRT)を提案した(Table 2-1)<sup>10)</sup>。

Table 2-1 認知反応時間の連鎖モデル<sup>11)</sup>

区分	50%	70%	80%	90%	95%	99%
1. 認知						
a. 情報伝達(Latency)	0.24	0.27	0.31	0.33	0.35	0.45
b. 視線移動(Eye Movement)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
c. 注視(Fixation)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
d. 認識(Recognition)	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
2. 判断(Decision)	0.50	0.75	0.85	0.90	0.95	1.00
3. ブレーキ反応	0.85	1.11	1.24	1.42	1.63	2.16
計A (1a-d+2+3)	2.28	2.87	3.19	3.49	3.82	4.55
計B (1c-d+2+3)	1.95	2.51	2.79	3.07	3.38	4.01
計C (1a-d+3)	1.78	2.12	2.34	2.59	2.87	3.55

運転者の認知反応時間に関する研究には、制限された条件で計測されたため刺激に対する判断時間を殆ど考慮していない場合が多い。即ち。被験者が出現された対象物について事前に予期している状況か視野内に1つしかない対象物に対する単純反応時間である。しかし、実際の運転では周辺車両があり、予期されない場所やタイミングで急減速する場合が多い。Neuman(1989)の実験結果によると、運転者の認知反応時間は道路状況によって、1.5秒(交通量の少ない道路)から3秒(都市部の高速道路)まで分布している<sup>12)</sup>。

認知反応時間に関する計測結果と分布を見ると、対称性のある正規分布ではなく正の歪み(歪度:+)のある非対称分布が多い。Taoka(1989)は、AngとTang(1975)が提案した対数確率密度関数(式2-4)を用いて、サンプル数50以上での認知反応時間の非対称を修正する方法を提案した<sup>13)、14)</sup>。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi t} \exp \left[ -\left( \frac{\ln(t) - \lambda}{\xi} \right)^2 \right] \quad (\text{式 2-4})$$

ここで、 $\lambda$ と $\xi$ は分布の形状を定義するパラメータで認知反応時間の平均値と標準偏

差で表わす (式 2-5, 式 2-6, 式 2-7)。

$$\xi^2 = \text{LN}\left(1 + \frac{\delta^2}{\mu^2}\right) \quad (\text{式 2-5})$$

$\lambda$  は、以下のように中央値の自然対数関係で表わす。

$$\lambda = \text{LN}\left(\frac{\mu}{\sqrt{1+\delta^2/\mu^2}}\right) \quad (\text{式 2-6})$$

$$\Phi\left(\frac{\text{LN}(t)-\lambda}{\xi}\right) = 0.5, 0.85, \text{etc} \quad (\text{式 2-7})$$

式 2-4 を正規化すると、

$$Z = \frac{\text{LN}(t)-\lambda}{\xi} \quad (\text{式 2-8})$$

ここで、[Z=0.00、50‰ Z=1.04、85‰ Z=1.65、95‰ Z=2.33、99‰]

Lerner(1995)らは、16件の実験の結果に対数確率密度関数(式 2-4)を適用して Table 2-2 のような結果を提示した<sup>15)</sup>。予期されていない状況における 95‰値 (2.45 秒) は停止視離を求めるとき用いられる AASHTO のガイドライン値 (2.5 秒) とほぼ同じ結果である<sup>15)</sup>。

Table 2-2 ブレーキ反応時間 (対数分布)<sup>15)</sup>

計測値	予期されていない状況	予期された状況
平均	1.31sec	0.54sec
標準偏差 ( $\sigma$ )	0.61sec	0.1sec
パラメータ $\lambda$	0.17	-0.63
パラメータ $\xi$	0.44	0.18
50 th percentile (‰)	1.18sec	0.53
85 th percentile (‰)	1.87sec	0.64
95 th percentile (‰)	2.45sec	0.72
99 th percentile (‰)	3.31sec	0.82

Fambro(1994)らが行った実験結果によると、予期されていない同一場面においても条件によって異なる結果を示している。Table 2-3 は Fambro による実験結果で、条件 3 は 90 km で走行中に路側から急に現れた歩行者と直面した時の結果で、予期されていない認知反応時間として広く用いられる<sup>16)</sup>。

制御移動時間（CMT）においては、次に示すピットの法則が広く応用され、ペダル間の垂直距離と移動時間との関係、移動時間と認知反応時間との関係について実験結果が報告されている。

Table 2-3 予期されていない状況における認知反応時間<sup>16)</sup>

実験条件	条件1	条件2	条件3
	閉鎖されたコースでの実験車両	閉鎖されたコースでの被験者所有車両	一般公道での被験者所有車両
50th percentile (‰)	0.82sec	1.09sec	1.11sec
75th percentile (‰)	1.02sec	1.54sec	1.40sec
90th percentile (‰)	1.15sec	1.81sec	1.57sec
95th percentile (‰)	1.23sec	1.98sec	1.68sec
99th percentile (‰)	1.39sec	2.31sec	1.90sec

### (イ) ブレーキ操作における制御移動時間（Control Movement Time）

画面上のある位置にターゲットが現れてから指先やマウスのカーソルを動かしてターゲットまで到達する時間（RT）は作業の難易度に比例する。作業の難易度はターゲットまでの距離と大きさの関係で表わすことが出来る。それを次のような線形方程式（式2-9）で表わしたものをピットの法則（Fitts' Law）という<sup>17)</sup>。

$$RT = a + bID = a + b \log_2\left(\frac{2A}{W}\right) \quad (\text{式 2-9})$$

ここで、

ID: 作業難易度の指標 (Index of Difficulty) 「 $ID = \log_2\left(\frac{2A}{W}\right)$ 」

a: 定数（機械的遅延又運動指令が筋肉まで伝わるまでの遅延：最小反応時間）

b: 定数（年齢、周辺環境、心理的な余裕等によって変動）

A: 操作系（運動系）の起点からターゲットの中心までの距離

W: ターゲットの幅（大きさ）

運転中、危険を認知した場合にアクセルペダルからブレーキペダルまで右足を移動する。Brackett and Koppa (1988) は、ブレーキペダルとアクセルペダルの距離が10～15 cmの範囲で右足の移動時間を計測した結果0.15～0.17秒であり移動距離による有意差は見られないが、ブレーキペダルがアクセルペダルより5 cm以上高くなると、右足の移動時間に有意差（平均=0.22秒、標準偏差=0.2秒）があることを確認した<sup>18)</sup>。

Hoffman (1991) によると、制御移動時間は視覚的補正が必要されない難易度 (Index of Difficulty) において制御移動時間 (CMT) は、ペダル間の垂直距離に大きな影響を受

ける<sup>19)</sup>。Berman(1994)は、ペダル間隔を16.5cmから24.0cmまで広げた場合(7.5cm)の移動時間が以下のようになった(Table 2-4, Table 2-5)<sup>20)</sup>。

更に、制御移動時間(MT)とブレーキ反応時間(BRT)との関係については、ピアソン相関係数(r)が0.17であった。即ち、ブレーキ反応時間は、運動系の反応速度より認知判断過程に大きな影響を受ける。移動時間に関する既存の研究をまとめたものである。

**Table 2-4** ペダルの間隔による移動時間の変化<sup>20)</sup>

計測値	変更前 (16.5cm)	変更後 (24.0cm)
平均	0.20sec	0.29sec
標準偏差	0.05sec	0.07sec
95th percentile (%)	0.32sec	0.45sec
99th percentile (%)	0.32sec	0.51sec

※ ペダル間隔:アクセルパダからブレーキペダルまでの移動距離

**Table 2-5** ペダル移動時間の計測値 (Movement Time Estimates)

出典	N	平均(標準偏差)	75%	90%	95%	99%
Brackett & Koppa (1988)	24	0.22 (0.20)	0.44	0.59	0.68	0.86
Hoffman (1991)	18	0.26 (0.20)	0.50	0.66	0.84	1.06
Berman (1994)	24	0.20 (0.05)	0.26	0.29	0.32	0.36

米国全州道路交通運輸行政官協会(以下、AASHTO; American Association of State Highway and Transportation Officials)では、停止視距を求める際のブレーキ反応時間として「2.5秒」を採用しており、日本道路構造令も同じ「2.5秒」を採用している<sup>21)</sup>。

I.Hong と M.Iwasaki(2008)が行った若年者と高齢者の探索反応時間実験(ATMT)で、17インチの液晶タッチパネルに出現する1から15までの数字ボタンに対して、15個のターゲットを固定した場合(デフォルト)とランダムに変えて場合に有意差が見られた(Table 2-6)<sup>22)</sup>。即ち、中心から同じ距離に出現するターゲットに対して移動速度は殆ど変わらず、ターゲットがランダムに出現したことにより認知・判断時間が長くなった。

Table 2-6 ターゲットの提示方法による平均反応時間<sup>22)</sup>

被験者グループ	固定	ランダム
若年者 (N=30)	0.98sec	1.67sec
高齢者 (N=32)	1.86sec	2.88sec

## (ウ) 制動パフォーマンス (Braking Performance)

車両運動学では、自動車のブレーキング・パフォーマンスの指標として停止距離が用いられる。停止距離は空走距離と制動距離により構成され、前者は運転者が危険を認知してからブレーキを踏むまでの間（認知反応時間）に走行した距離を、後者はブレーキが効いてから完全停止するまでの距離をいう。

$$d = \frac{v}{3.6}t + \frac{v^2}{(3.6)^2 2fg} = 0.28Vt + \frac{v^2}{254f} = 0.28Vt + 0.039 \frac{v^2}{a} \quad (\text{式 2-10})$$

縦断勾配がある道路においては、

$$d = 0.28Vt + 0.039 \frac{v^2}{\left\{ \left( \frac{a}{9.81} \right) \pm G \right\}} \quad (\text{式 2-11})$$

ここで、

d = 制動距離 (m)

V = 速度 (km/h)

t = 危険を認知してからブレーキ操作を開始するまでの認知反応時間 (秒)

f = タイヤと路面との摩擦係数 (Coefficient of friction: COF)

g = 重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>)

a = 減速率 (m/s<sup>2</sup>)

G = 縦断勾配% (0~100%)

Fambro (1997) らの実験によると、予期されていない状況下で減速場面に直面した時の被験者の 90%が減速率3.4 m/s<sup>2</sup>を越えていて、湿潤路面上でもステアリング制御が出来る範囲内だったという<sup>23)</sup>。

Table 2-7 予期されていない状況下における安定減速率の推定値<sup>23)</sup>

区分	減速率 (g)
平均	-0.55
標準偏差	0.07
75th percentile (%)	-0.43
90th percentile (%)	-0.37
95th percentile (%)	-0.32
99th percentile (%)	-0.24

米交通工学会 (ITE) では「 $-3 \text{ m/s}^2$  ( $\cong -0.3\text{g}$ )」周辺を不快感のない減速率の閾値として採用している [ITE]。更に、AASHTO の設計基準では停止距離を求める際の基準値として「 $-3.4 \text{ m/s}^2$  ( $\cong -0.35\text{g}$ )」が使われている<sup>21)</sup>。

### (エ) ステアリング反応時間 (Steering Response Times)

ステアリングの操作は単に方向の変更だけではなく、車線変更、合流、分流、進路上の障害物に対する回避等、運転行動における横の課題 (Lateral driving task) を遂行するために欠かせない操作である。一般的に、運転中のステアリング操作はブレーキ操作又アクセル操作が同時に行われる場合が多いため運転者の作業負担が高いと言える。

Summala(1981)らは、被験者に事前に告知されていない状況で前方の駐車車両のドアが急に開く場面を演出し、ステアリングの変異を3段階 (最小、中央、最大) に分けて時間間隔を計測した。計測結果によると、ドアが開いてからステアリングの初期変異 (最小) が発生するまで平均 1.5 秒、中央まで約 2.5 秒、3-4 秒に最大になった。Simmala はその結果を基に道路環境の急な変化に対しステアリングによる回避行動に必要な最小時間として「3秒」を提案した<sup>24)</sup>。

### (オ) 交通制御器具に対する反応距離と反応時間

車窓を通して入る外部情報を処理する過程であり、交通制御器具 (Traffic Control Devices; TCD) に対する視覚情報処理は運転パフォーマンスを決定する重要な要素である。交通制御器具 (以下、TCD) における人間工学的な問題は、「視界内で知覚できる距離、それが交通信号か道路標示又は路面標識か、それらが含んでいる意味をどれほどの確に伝えられるか」である。Figure 2-3 は TCD における情報処理モデルである。

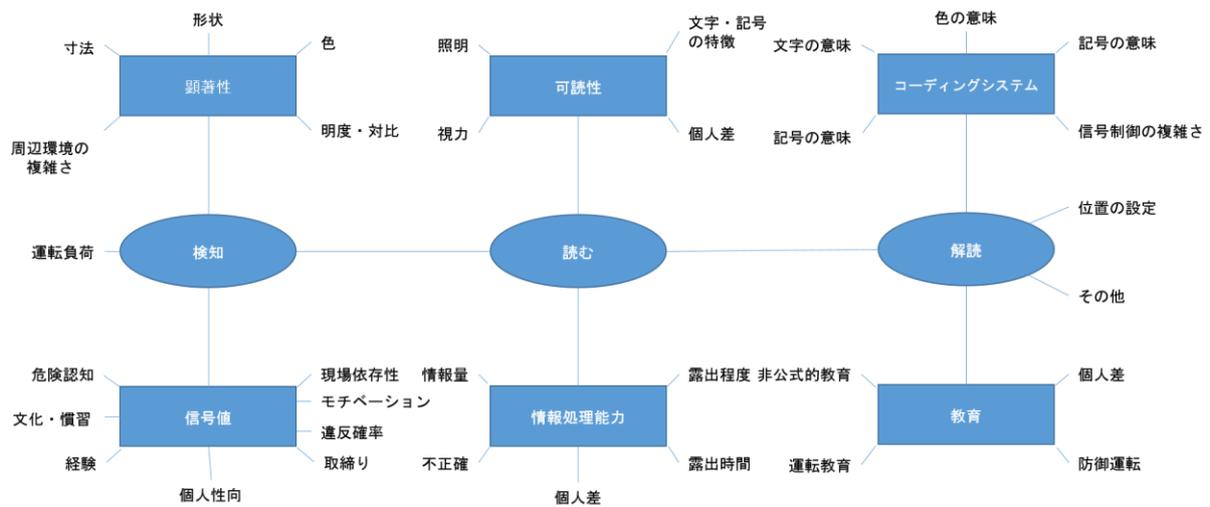


Figure 2-3 A Model of Traffic Control Device Information Processing

Chang (1985) らは、交通信号の変化に対するブレーキランプの反応から運転者の反応時間を計測した。その結果は Wortman (1983) らが行った実験とほぼ同じ結果る。Table 2-8 は 2 つ実験結果をまとめたものである<sup>25), 26)</sup>。

Table 2-8 信号変化に対する認知反応時間

区分	Wortman(1983) <sup>25)</sup>	Chang(1985) <sup>26)</sup>
Mean PRT to signal change	1.30 秒	1.30 秒
85th percentile PRT	1.50 秒	1.90 秒
95th percentile PRT	2.50 秒	2.50 秒
99th percentile PRT	2.80 秒	-

## 2-2 交通流理論におけるドライバーモデル

### 2-2-1 概要

交通流は車両と車両の相互作用によって生成される現象であり、ドライバーモデルはその相互作用の特徴を数式化又は概念化したものである。交通流理論は、交通流を微視的にとらえた車両運動学的なものと交通流を巨視的にとらえた体力学的なものに分類される。即ち、各々の車両を移動体としての粒子と観ることで運転者の属性や車両の運動特性による相互作用を再現したものが「車両運動力学モデル」であり、車両の動きを流体の流れとして観るものが「流体力学モデル」である。前者と後者の大きな違いは、前者が人間の反応遅れ( $\Delta t$ )を考慮することに対して後者は考慮しない点である(岩崎正人、東京大学博士論文集)。運動力学モデルは、狭い範囲での各々の車両の挙動を微視的に観ていることから微視的交通流理論(Microscopic traffic theory)、流体力学モデルは広範囲での車両の流れを巨視的に観ていることから巨視的交通流理論(Macroscopic traffic theory)とも呼ばれる。

交通流理論からドライバーモデルだけを切り離すことは難しいが、本研究では第4章に提案する「統合型運転行動評価モデル(JDM: Joint Driver Model)」の理論的な基礎となる微視的交通流モデル(Microscopic traffic model)を中心に考察することにする。

### 2-2-2 追従走行モデル (Car Following Models)

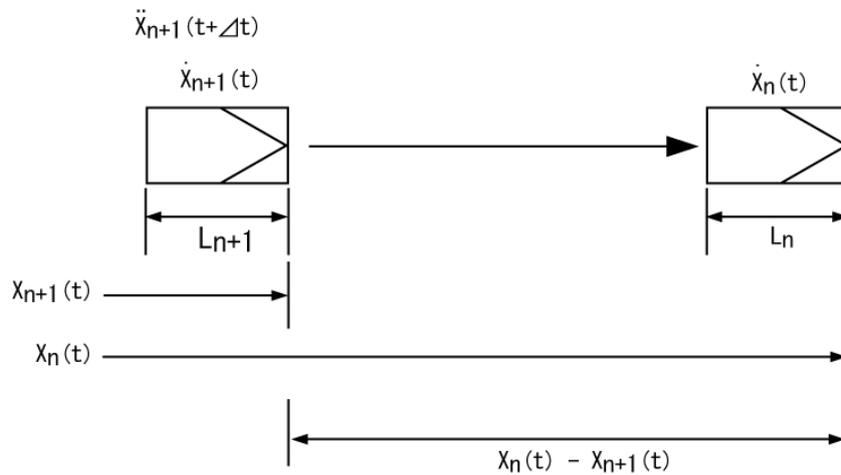
#### (ア) 追従モデルの原理

追従走行モデルは、一連の交通流の流れにおいて縦方向の相互作用を表したもので、もっとも古くから研究されてきた代表的な交通流理論である。追従走行とは、前方車の影響を受けて、追従車両が前方車両との距離や速度差などを調整しながら、前方車を追いかけてながら走行する状態をいう。追従走行に関する交通流理論は次の3つの側面がある<sup>27)</sup>。

- ① 追従走行と単独走行の切替り・境界に関するもの
- ② 運転者が目標とする適切な車間距離に関するもの
- ③ 前方車の速度変動への対応時の動的な挙動に関するもの

一般的に使われている追従走行モデル(Car following models)は、③の動的な挙動に関するものを記述したモデルであり、追従車両の速度を前方車両の速度変化(Stimulus)に対する反応(Response)で表わしている。その中で、現在の追従走行理

論にもっとも大きな影響を与えた研究は、L. A. Pipes による交通運動理論 (Traffic dynamics theory)、Gazis, D. C.、R. Herman、R. W. Rothery による追従モデル (G-H-R model ; GM models) 、Forbes に追従モデル等があげられる<sup>28),29)</sup>。



ここで、

$n$  = 前方車両 (leading vehicle)

$n + 1$  = 追従車両 (following vehicle)

$L_n$  = 前方車両の長さ (length of lead vehicle)

$L_{n+1}$  = 追従車両の長さ (length of following vehicle)

$X_n$  = 前方車両の位置 (position of lead vehicle)

$X_{n+1}$  = 追従車両の位置 (position of following vehicle)

$\dot{X}_n$  = 前方車両の速度 (speed of lead vehicle)

$\dot{X}_{n+1}$  = 追従車両の速度 (speed of following vehicle)

$\ddot{X}_n$  = 前方車両の加速度 (acceleration rate of lead vehicle)

$\ddot{X}_{n+1}$  = 追従車両の加速度 (acceleration rate of following vehicle)

$t$  = 時間 (at time)

$t + \Delta t$  = 時間  $t$  から  $\Delta t$  後の時間 ( $\Delta t$  time after time)

追従モデルは、基本的に次のようなフィードバック制御モデルにより記述される (式 2 - 12)。

$$\text{Response} = \text{func}(\text{sensitivity}, \text{stimulus}) \quad (\text{式 } 2-12)$$

ここで、

Response: 反応 (出力)

Sensitivity: 反応強度 (感度)

Stimulus: 刺激 (入力)

### (イ) Pipes の交通運動理論

Pipes ら(1951)は、米カリフォルニア州の道路交通法(California Motor Vehicle Code)で提案された追従走行ルール「追従走行時の最低安全距離は時速 10 マイル毎に車両 1 台の長さ増加する。」を用いて交通流における車両の運動理論を提唱した。即ち、刺激として相対速度、反応として自車の加速度を取り上げ、以下の関係式を導いた<sup>30)</sup>。

$$d_{Min} = [\chi_n(t) - \chi_{n+1}(t)]_{Min} = L_n \left[ \frac{\dot{\chi}_{n+1}(t)}{(1.47)(10)} \right] + L_n \quad (\text{式 2-13})$$

車両長を 20 フィート(6m)と仮定した場合、

$$d_{Min} = 1.36[\dot{\chi}_{n+1}(t)] + 20 \quad (\text{式 2-14})$$

ここで、

$d_{Min}$  = the minimum headway distance

式 2 - 14 の両辺を  $\dot{\chi}_{n+1}(t)$  で割ると、

$$\frac{d_{Min}}{\dot{\chi}_{n+1}} = h_{Min} = 1.36 + \frac{20}{\dot{\chi}_{n+1}} \quad (\text{式 2-15})$$

ここで、

$h_{Min}$  = the minimum safe time headway

Pipes の理論によれば、最小安全車頭距離 ( $d_{Min}$ ) は速度の増加とともに増加する。逆に、最小安全車頭時間 ( $h_{Min}$ ) は速度の増加とともに減少し、 $\dot{\chi}_{n+1} = \infty$  の時、 $h_{Min}$  は 1.36 秒になり、理論上の臨界値になる。

### (ウ) Forbes の理論 (Forbes' Theory)

Fobes (1959, 1963, 1968) らは前方車両の速度変化に対して、追従車両が加減速に必要な反応時間を考慮した<sup>31), 32), 33)</sup>。即ち、前方車両の尾部から追従車両の頭部までの最小車頭時間 ( $h_{Min}$ ) は反応時間より同一又大きくなる (式 2 - 16)。

$$h_{Min} = \Delta t + \frac{L_n}{\dot{\chi}_n(t)} \quad (\text{式 2-16})$$

Forbes は、実観測から反応時間は 1 ~ 3 秒間に分布することを発見した。ここで、反応時間を 1.5 秒 ( $\Delta t$ )、車両長 ( $L_n$ ) を 20 フィート (6m) とした場合、以下の式になる (式 2 - 17、式 2 - 18)。

$$h_{Min} = 1.5 + \frac{20}{\dot{X}_n(t)} \quad (\text{式 2-17})$$

$$d_{Min} = 1.5[\dot{X}_n(t)] + 20 \quad (\text{式 2-18})$$

### (エ) GMモデル (General Motor' Theory)

General Motors の理論 (以下、GM モデル) は、包括的走行実験と巨視的交通理論と微視的交通流理論との数学的架橋の役割を果たしている。多くの文献で追従モデルの基本式としてあげられることが多い。追従車両の反応 (Response) を前方車両の速度変化による前方車両と追従車両の相対速度 (Stimuli) の関数で表わす。

#### ① 第1モデル (The first model)

第1追従モデルは、感度 (sensitivity)  $\alpha$  を定数と仮定したモデルであり、以下のよう表す。

$$\ddot{X}_{n+1}(t + \Delta t) = \alpha[\dot{X}_n(t) - \dot{X}_{n+1}(t)] \quad (\text{式 2-19})$$

ここで、 $\dot{X}_n(t) > \dot{X}_{n+1}(t)$  なら  $\ddot{X}_{n+1}(t+\Delta t)$  は (+) : 加速  
 $\dot{X}_n(t) < \dot{X}_{n+1}(t)$  なら  $\ddot{X}_{n+1}(t+\Delta t)$  は (-) : 減速  
 $\dot{X}_n(t) = \dot{X}_{n+1}(t)$  なら  $\ddot{X}_{n+1}(t+\Delta t)$  は (0) : 定速

感度  $\alpha$  は、両車両 (前方車両と追従車両) の時間距離 (time space; sec) から求められ、実験から感度値の有意範囲は  $0.17\text{sec}^{-1} \sim 0.74\text{sec}^{-1}$  である (Table 2-9)。

Table 2-9 第1追従モデルにおけるパラメータ

観測値	反応時間 ( $\Delta t$ , sec)	感度 ( $\alpha$ , $\text{sec}^{-1}$ )
最小値	1.00	0.17
平均	1.55	0.37
最大値	2.20	0.74

#### ② 第2モデル (The second model)

第2追従モデルは、先方車と追従車両の距離が (Space) が短くなる時は  $\alpha_1$ 、遠くなる時は  $\alpha_2$  を使用して表したものである。

$$\ddot{X}_{n+1}(t + \Delta t) = or_{\alpha_2}^{\alpha_1}[\dot{X}_n(t) - \dot{X}_{n+1}(t)] \quad (\text{式 2-20})$$

ここで、

$\alpha_1$ : 両車両の間隔が近くなる時。(感度が高くなる。)

$\alpha_2$ : 両車両の間隔が長くなる時。(感度が低くなる。)

### ③ 第3モデル (The third model)

第2モデルは、非連続的に変化する車頭間隔 (distance headway) において $\alpha_1$ と $\alpha_2$ の判別することが難しい問題がある。その問題を解決するために感度 $\alpha$ の値を車頭距離の逆関数 ( $1/d$ ) で求め、「 $\alpha$ 」と「 $1/d$ 」との傾き $\alpha_0$ を用いて表したものが以下の第3モデルである。

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} \quad (\text{式 2-21})$$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{1/d} = \alpha d \quad (\text{式 2-22})$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{d} = \frac{\alpha_0}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} \quad (\text{式 2-23 式})$$

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha_0}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (\text{式 2-24})$$

即ち、両車両の車頭距離が短くなると、感度 $\alpha$ は大きくなる。GMの走行実験による「式 2-24」パラメータ値を Table 2-10 に表す。

Table 2-10 GM 実験による第3モデルのパラメータ値

実験場所	反応時間、 $\Delta t$ (sec)	感度、 $\alpha_0$ (m/sec)
GM テストコース	1.5	12.3 (40.3fps)
Holland トンネル	1.4	8.2 (26.8fps)
Lincoln トンネル	1.2	9.1 (29.8fps)

※1fps = 0.3048m/sec (fps: feet per second, 1feet = 0.3048m)

### ④ 第4モデル (The fourth model)

交通の流れが速くなると、追従車両の運転者は前方車両と自車との相対速度に敏感になる。第4モデルは、「式 2-25」に感度 $\alpha_0$ に追従車両の速度を導入したものである。

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha' [\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (\text{式 2-25})$$

即ち、「式 2-19」における感度 $\alpha$ を「定数 $\alpha'$ 、追従車両の速度、車頭距離」で表したものである。

### ⑤ 第5モデル (The fifth model)

第5モデルは、継続的に行われた走行実験の結果を基に、感度パラメータを改良した最終モデルである。モデルパラメータとして $l, m$ が導入され、提唱した3名 (Gazis、Herman、Rothery) の頭文字を取って G-H-R モデルとして世界的にもっとも知られ、一般追従モデル (General car following model) と呼ばれる。

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha_{l,m} [\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (\text{式 2-26})$$

モデルパラメータ  $l, m$  については、世界中の研究者により様々な環境で研究され、安全性の評価、交通シミュレーション等に応用されている。Table 2-11 は、第5モデルが提唱されてから現在に至るまで報告されているモデルパラメータ  $l, m$  についてまとめたものである。

Table 2-11 GHR モデルパラメータ  $l, m$  の推定値 <sup>45)</sup>

出典	$l$	$m$
Chandler et al. (1958) <sup>34)</sup>	0	0
Gazis, Herman and Potts (1959) <sup>29)</sup>	0	1
Herman and Potts (1959) <sup>35)</sup>	0	1
Helly (1959) <sup>36)</sup>	1	1
Gazis et al. <sup>29)</sup> <sup>38)</sup>	0-2	1-2
May and Keller (1967) <sup>38)</sup>	0.8	2.8
Heyes and Ashworth(1972) <sup>39)</sup>	-0.8	1.2
Hoefs (1972) (dcn no brk/dcn brk/can) <sup>40)</sup>	1.5/0.2/0.6	0.9/0.9/3.2
Treiterer and Myers(1974) (dcn/acn) <sup>41)</sup>	0.7/0.2	2.5/1.6
Coder and May (1976) (Single regime) <sup>42)</sup>	0.6	2.4
Coder and May (1976) (uncgd/cgd) <sup>42)</sup>	0/0	3/0-1
Aron (1988) (dcn/ss/acn) <sup>43)</sup>	2.5/2.7/2.5	0.7/0.3/0.1
Ozaki(1993)(dcn/acn) <sup>44)</sup>	0.9/-0.2	1/0.2

注) dcn:ブレーキ使用減速、no\_bk\_dcn:ブレーキ未使用減速、acn:加速、un\_cgd:非渋滞、cgd:渋滞、ss:安定状態

### 2-2-3 安全距離・衝突回避モデル (Safe distance and Collision avoidance models)

1959年米谷と佐々木によって初めに提案されたもので、GHRモデルにおける刺激-反応の関数の代わりに運転者が前方車の予期されていない行動に対して衝突回避ができる安全な追従距離を関数で表したものである<sup>46),47)</sup>。

追突事故の観点から、定常状態における安全な最小車間距離  $d_m$  と速度  $v$  には、一般的に次式が用いられる。

$$d_m = vT + \frac{v^2}{2D_f} - \frac{v^2}{2D_l} + L + x_0 \quad (\text{式 2-27})$$

ここに、

$v$ : 各車両の速度[m/s]

$L$ : 各車両の長さ[m]

$d$ : 各車両間の車頭距離間隔[m]

$D_l$ : 前方車の減速度[m/s<sup>2</sup>]

$x_l$ : 前方車の停止距離[m](=  $v^2/2D_l$ )

$D_f$ : 追従車の減速度[m/s<sup>2</sup>]

$T$ : 追従車の反応の遅れ[s]

$x_0$ : 停止時の安全余裕距離[m]

$x_f$ : 追従車両の停止距離[m](=  $vT + v^2/2D_f$ )

式 2-27 において、前方車が瞬間に停止しても追従車が最大減速度  $D_e$  [m/s<sup>2</sup>] で安全に停止できるためには次のようになる。

$$d_m = vT + \frac{v^2}{2D_e} + L + x_0 \quad (\text{式 2-28})$$

ここに、

$D_e = fg$

$g$ : 重力加速度[9.8 m/s<sup>2</sup>]

$f$ : 各路面とタイヤの最大摩擦係数

衝突回避モデルは前方車のブレーキングに対して追従車両が衝突しないための条件を数式にしたもので、何秒で衝突するかを次式に示すように前方車と追従車との車間距離及び相対速度から求められる TTC (Time to Collision) がある閾値より大きいと衝突を回避できる。

$$\text{TTC [sec]} = \frac{d}{|v_1 - v_f|} \quad (\text{式 2-29})$$

ここに、

d: 各車両間の車頭距離間隔[m]

$v_1$ : 前方車の速度[m/s]

$v_f$ : 追従車の速度[m/s]

#### 2-2-4 車線変更モデル (Lane Changing Model)

交通流における運転者の車線変更行動は、左右前後の車両の動き（主に、相対速度、車間距離）から車線変更の可否を決定するため、高いレベルの車両相互作用と短い時間（5～10秒）内での意思決定が必要とされるため極めて重要な意味を持つ。車線変更モデルは自車の前後車両と目的車線の前後車両のギャップと相対速度がモデルパラメータとして含まれるため、「追従モデル」、「合流モデル」及び「ギャップ許容モデル」が融合された形になる。特に、運転者が車線変更の可否を決定するモデルとしてゲーム理論が導入された研究例もある<sup>48)</sup>。

一般的に車線変更は3段階：「車線変更に対する意思決定、目標車線の選択、車線変更を行うための許容ギャップ」で行われる。

車線変更モデルは、運転者が現在の車線から別の車線へ移動する際に行われる「認知-判断-行動」の過程を関数で表したものである。運転者の車線変更には、運転者が現在の車線での混雑を避けるために自発的に行う場合と現在の走行車線から危険を回避するために不本意に行われる場合がある。式 2-30 は、先方車と追従車両との速度差による心理的な圧迫 (Pressure) を数式化したモデルで、現在の走行車両で感じる心理的な圧迫感 ( $P_1$ ) が目的車線 (車線変更後の車線) の潜在的先方車との速度差による心理的な圧迫感 ( $P_2$ ) より大きい場合車線変更を決断する。

$$P = \frac{(V_{des} - V_{obs})}{2 \cdot S} \quad (\text{式 2-30})$$

ここに、

$P$  = 圧迫感 (Pressure)  $V_{des}$  = 先方車の希望速度  $V_{obs}$  = 先方車の観測速度  $S$  = 相対距離

さらに、車線変更には目的車線の潜在的先方車と後続車 (車線変更後の前後車) との許容ギャップが最小安全距離とのより長いかが車線変更を実行する決め手となる。

[用語の定義]

対象車線 (Subject Lane) : 車線変更の対象車両 (自車) が現在走行している車線

目的車線 (Target Lane) : 自車が車線変更を狙っている車線又は

$V_s$  : 車線変更の対象車 (自車)

$V_L$  : 対象車両が車線変更をした後の潜在的な前方車

$V_F$  : 対象車両が車線変更をした後の潜在的な追従車

## (ア) 車線変更の分類

### ① 車線変更の実行に基づいた分類

- 必須車線変更 (Mandatory Lane Change ; MLC) : 交差点で直進、右折、左折するなど目的地まで行くために必ず指定された車路への変更が必要な場合
- 裁量車線変更 (Discretionary Lane Change ; DLC) : 追い越し、前方の障害物を回避するなど 車線変更が必要だと判断した場合。

### ② ギャップに基づいた分類

- ギャップ車線変更 (Gap lane change) : 先方車と後続車の両方が自車の運転に影響を与える。
- 遅車線変更 (Retarded lane change) : 自車の車線変更は先方車の影響を受ける。
- 競合車線変更 (Conflict lane change) : 自車の車線変更は後続車に影響される。
- 自由な車線変更 (Free lane change) : 自車の車線変更は先方車 および後続車に影響されない。

## (イ) Hidas の車線変更モデル

Hidas は、車線変更行動を運転者の心理的な要素と交通状況によって次の3種類のモデルを提案した<sup>48)</sup>。

- **自由な車線変更 (Free lane change)** : 対象車線、目標車線とも自由流で走行可能な状況を指す。その状態では他車両との干渉を受けずに車線変更の可否を迷わず判断できる。
- **無理な車線変更 (Forced lane change)** : 車線変更開始直前まで、目的車線の潜在的な前方車両と追従車両との間にギャップの変化が殆どない状態で強制的に車線変更を行う状況を指す。その状態では、対象車両の車線変更開始により目的車線の潜在的な追従車両が強制的に減速されることによりショックウェーブ (Shock wave) が発生する恐れがある。
- **協調的な車線変更 (Cooperative lane change)** : 目的車線の潜在的な追従車両が対象車両の車線変更を事前に探知し自ら減速を行う状態を指す。その状態では、対象車両が進出可能な許容ギャップを車線変更開始前に与えられるため急減速によるショックウェーブは発生しにくい。

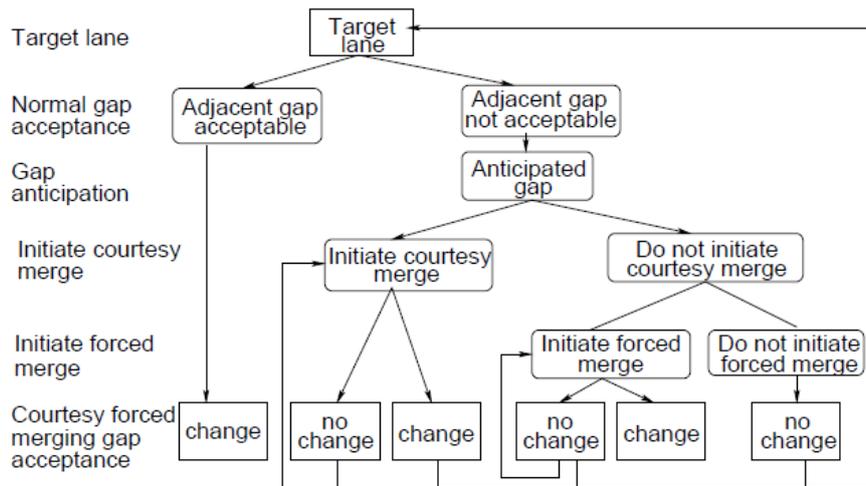


Figure 2-4 Model for cooperative and forced gap acceptance

車線変更モデルにおけるギャップとは目標車線にある前方車と後続車との距離を意味する。目標車線への車線変更をするためには自車が入り込むための十分な空間が必要であり、自車と前方車と速度差、自車と後続車の速度差に車線変更の可否が決められる<sup>49)</sup>。

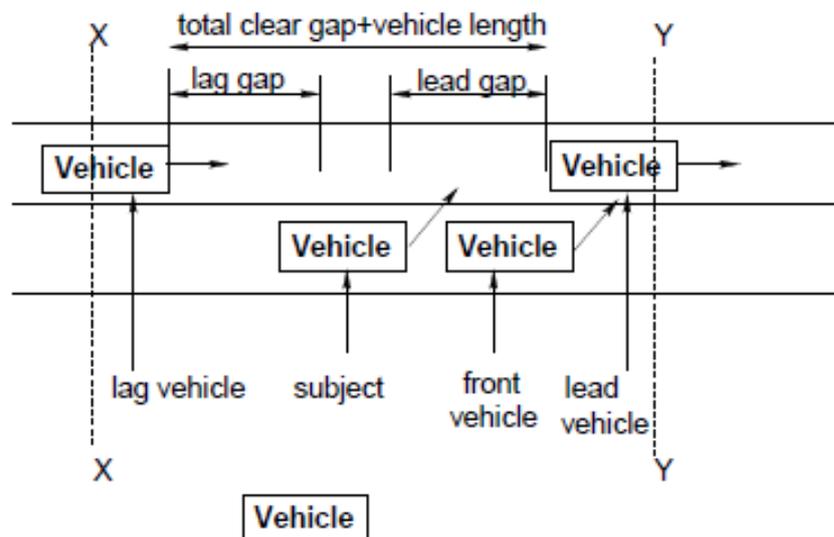


Figure 2-5 ギャップの定義

車線変更モデルの主な役割は、目標車線 (Target Lane) に車線変更をするために必要とされる潜在的な前方車両と追従車両の速度とギャップ アクセプタンスを決めることである。車線変更モデルの考え方は、道路設計においてランプから本線へ合流する際に必要な加速車線長の決定、本線の上流部からランプまでに必要とされる視距等の決定にも用いられたため、追従モデルと並んでマイクロ交通シミュレーション・ツール

の中核モデルとして扱われている。しかし、追従モデルが前方車両の速度変化(刺激)に対する反応として比較的定量的にモデル化できるのに対して、車線変更モデルは運転者の心理的な要素が含まれるためモデル化が相対的に難しい。

$$G_n^{g,cr}(t) = \exp[X_n^g(t)\beta^g + \alpha^g v_n + \sum_n^g(t)] \quad (\text{式 2-31})$$

$$G_n^{g,cr}(t)$$

= critical gap measure for gap G perceived by driver n at time step t

$X_n^g(t)$  = explanatory variable used to characterize mean  $G_{ng, cr}(t)$

$\sum_n^g$  = random term follows log normal distribution  $\alpha^g$  = parameter of driver specific random term  $v_n$  Assuming  $\sum_n^g(t) \approx N(0, \alpha_z^2)$  i.e., the critical gap lengths are log normally distributed, the conditional probability of acceptance of a gap is given by:

Prob(A gap is accepted)

= Prob(lead and lag gaps are accepted)

= P(lead gap acceptable)\*P(lag gap acceptable)

=  $P(G_{tn}^{lead} > G_{cr,tn}^{lead} \text{ and } G_{tn}^{lag} > G_{cr,tn}^{lag})$

$$= \Phi\left(\frac{G_{tn}^{lead} - \beta^{lead} X_{tn}^{lead} - \alpha^{lead} v_n}{\sigma_{s,laed}}\right) * \Phi\left(\frac{G_{tn}^{lag} - \beta^{lag} X_{tn}^{lag} - \alpha^{lag} v_n}{\sigma_{s,laed}}\right)$$

### 2-2-5 ファジー推論モデル (Fuzzy inference models)

ファジー理論は、ファジー集合と呼ばれる事象の集合とそのメンバーで構成され、複雑なシステムを「曖昧」に捉えることで古典的な一階述語論理の厳密な推論の限界を克服するための論理体系を指す。

交通システムは IT 技術により高度化 (ITS)、既存の社会インフラと統合化され、交通現象が他車両との相互関係だけで説明することがますます難しくなっている。ファジー推論モデルは、複雑な交通現象を「曖昧」なファジー集合と捉え時々刻々変化する交通環境に柔軟に対応しようとしたアプローチである。

## 2-3 認知工学理論における運転者モデル

### 2-3-1 認知作用のメタファー

認知工学における認知作用のメタファーモデルは「Table 2-12」にまとめた3種類に分類できる。

- S-O-R (Stimulus-Organism-Response) : 刺激－生態－反応
- IPS (Information Process System) : 情報処理機構
- Cognition Viewpoint : 認知的な観点

#### (ア) 刺激－生態－反応 (S-O-R)

反応は刺激と生態の関数、 $R = f(S, O)$  とみなされる。S-O-Rモデルは「式2-12」の追従モデルにおけるフィードバック制御モデルの理論的な背景になる基礎的な認知理論である。

#### (イ) 情報処理機構 (IPS)

心理過程は厳密に規定可能な手順とみなされ、心理状態は、感覚入力、運動及び他の心理状態との因果関係として定義されるものとみなされる。即ち、人間は情報処理システムあるいは物理的な信号システムであるという観点である。IPSモデルは我々が使っているパソコン、カーナビのような情報処理機器の設計に大きな影響を与えている典型的な認知理論である。

#### (ウ) 認知的な観点 (The Cognitive Viewpoint)

認知作用が能動的なものであって反応的なものではないとする見方。即ち、認知作用は同時に起こる自律的なプロセスないしは機能の集合とされる。

これまで (SOR/IPS) のように行動の機構ではなく、行動全体に焦点をあてる。

#### ※ 認知的観点と S-O-R モデルとの違い

- 認知作用の機能、ひいては人間行動は系列的ではなく、循環的である。即ち、行為は人間の認知作用の持つ固有の性質と機構ではなく、状況（タスクと状況）によって決定される。
- 認知作用は、外部事象や刺激に始まり、行為あるいは反応で終わるものではない。即ち、人間は事象に対して受動的に反応するのではなく、能動的に情報を探し、外界の物事の進展と自らの意図に基づいて行動する。

- 観測可能な行為は観測可能な事象を必ずしも原因にもつ必要はない。逆に、観測可能な事象が必ずしも結果として観測可能な行動を招くとは限らない。

Table 2-12 認知工学における運転者モデル<sup>5)</sup>

Metaphor	Contents	Comment
刺激-生態-反応 (S-O-R)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Black-box approach</li> <li>• Finite state automaton, Arbib, 1964</li> <li>• Supervisory control theory)</li> <li>• Optimal control theory, Johanssen, 1990)</li> <li>• Observer/Controller/Decision model, Stassen, 1986 (観測機・制御器・意思決定モデル)</li> </ul>	Observer/controller /decision model
情報処理機構 (IPS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cognition and reality, Neisser, 1976</li> <li>• Step Ladder Model(SLM), Rasmussen, 1986</li> <li>• Artificial Intelligence, Haugeland, 1985</li> <li>• Human problem solving, Newell &amp; Simon, 1976</li> <li>• Computer power and human reason, Weizenbaum, 1976</li> <li>• Mind, Brains, and programs, Searle, 1980</li> <li>• Human error, Reason, 1990</li> </ul>	Prototypical information processing model, SLM
認知的観点 (Cognition Viewpoint)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perception cycle, Neisser, 1976)</li> <li>• A Very Simple Model of Cognition (VSMoC), Hollnagel &amp; Cacciabue, 1991(超単純認知モデル)</li> <li>• Cognitive processing model, Bainbridge, 1991 (認知プロセス・モデル)</li> <li>• COCOM, Hollnagel, 1992(状況決定制御モデル)</li> </ul>	Perception Cycle, VSMoC

## 2-3-2 認知作用の手順プロトタイプモデル

### (ア) 梯子モデル (Step Ladder Model, SLM)

Rasmussen (1986) が提案した IPS モデルの代表的なモデルである。「行為は環境状態を変化させ、意思決定は梯子の次を辿りながらこれを監視する」<sup>2)</sup>。

環境の変化は意思決定のための入力における変化であり、ステップ点順の変化には直接的影響を与えない。

#### ① 梯子モデルにおける人間行動の分類

- スキルベース行動 (Skill based Behavior) : 特定の感覚入力に対して、自動化された滑らかな行動パターンが意識的な制御を伴わずに実行される行動

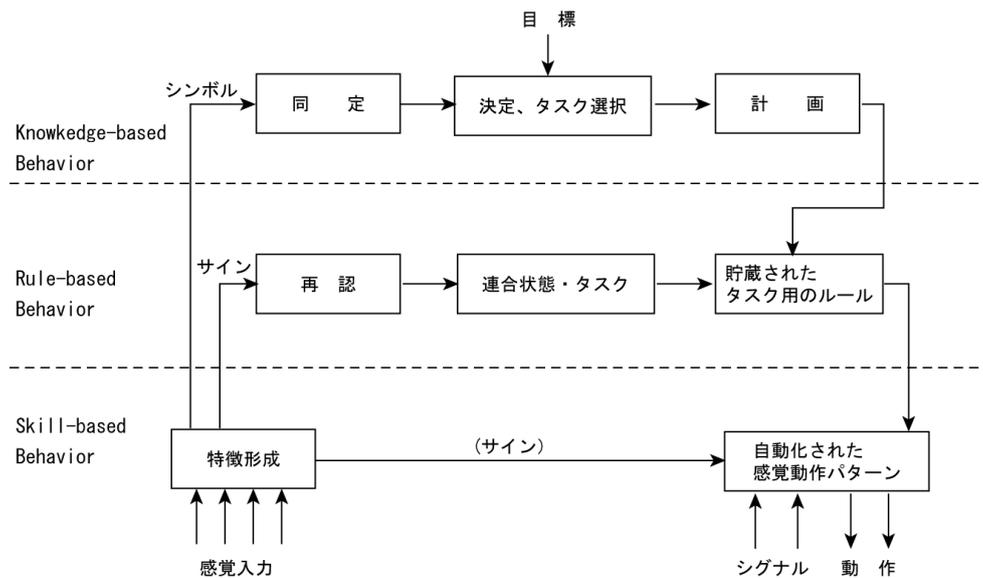
例、熟練したドライバーによるマニュアルトランスミッション車のシフトチェンジ操作の場面で、触覚から得られるシフトレバーの現在位置がシグナルとなり自動的にゲートからゲートへのシフトレバーを操作する状況

- ルールベース行動 (Rule Based Behavior) : 特定の目的を意識して過去に習得されている手順を用いて行動を行う状況

例、パワーウインドの開閉操作で、ドアの近くにあるスイッチ群の中のどれかを押下しようと手探り動作を行う場合

- 知識ベース行動 (Knowledge Based Behavior) : 過去の経験からの Know-How や規則が存在しない場合、現状の事態を解釈し積極的に立てて変わっていく状況

例、初めて乗ったレンタカーでエアコンの操作が分からずに自分なりのモデルを想定して試行錯誤しながら操作している状況

Figure 2-6 人間行動の梯子モデル<sup>3)</sup>

### 2-3-3 状況決定制御モデル (Contextual Control Model ; COCOM)

#### (ア) 概要

##### ① 状況決定制御モデルとは？

Hollnagel (1991) によって提案された認知モデルである。人間行為は行為間の固有な関係により決定されるのではなく、状況により決定されるという認知モデルの一種である<sup>5)</sup>。

##### ② 状況決定制御の見方

次に行われる行為が常に現在の状況（状況の手がかり）によって決定されると仮定している。

##### ③ 従来モデル（手順プロットタイプモデル）との違い

従来モデルとの見方の違いは、対象とする現象が違うのではなく、現象への対応の方法、つまり記述や説明に用いられる概念やそれからの関係が異なる。

状況決定制御モデルは、再発的なパターン生成の要因に注意を払っている。その結果、考察の対象は別の方向、即ち人間が現在の状況に対する中で、行為がどのように能動的に選択されるかに向けられている。

Table 2-13 認知モデルの分類

区分	詳細
A procedure prototype model (手順プロトタイプモデル)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 定義された行為系列が存在するという考え方を暗黙に表現しているモデルである</li> <li>・ 行為の系列は、あることを行うためのより自然な方法であり、またある系列ないし順序が選好されることを表現している。</li> <li>・ 次の行為が何かは、いかなる時点においてもプロットタイプが表す行為順序を参照することにより明らかにできる。</li> </ul>
A contextual control model (状況決定制御モデル)	行為は行為間の固有な関係により決定されるのではなく、系列

### (イ) 状況決定制御モデルの構造

認知作用の状況決定制御モデルは反応能モデルと制御モデルから構成される。

#### ① 反応能モデル

人間には意思決定、行動決定などの基本的認知機能に対応したある種の能力が備わっている。それが現状の必要性や要求に応じて適切な行動をする。

#### ② 制御モード

制御モードによる人間の制御特徴は、以下のようなモードにより表される。

- [混乱状態制御モード (Scrambled Control)] : パニックに陥っている状態、現在の状況に対する次の行為は無作為に選択される。
- [機会主義的制御モード (Opportunistic Control)] : 次の行為が現在の状況のみに基づいて選択される。
- [戦術的制御モード (Tactical Control)] : 状況に対する定期説な行為のテンプレートである計画や手順、規定などを見つけ、それにしたがって行動している状態
- [戦略的制御モード (Strategic Control)] : 合理的な目標を予め立案し、その目標を達成するための戦略を決定している状態

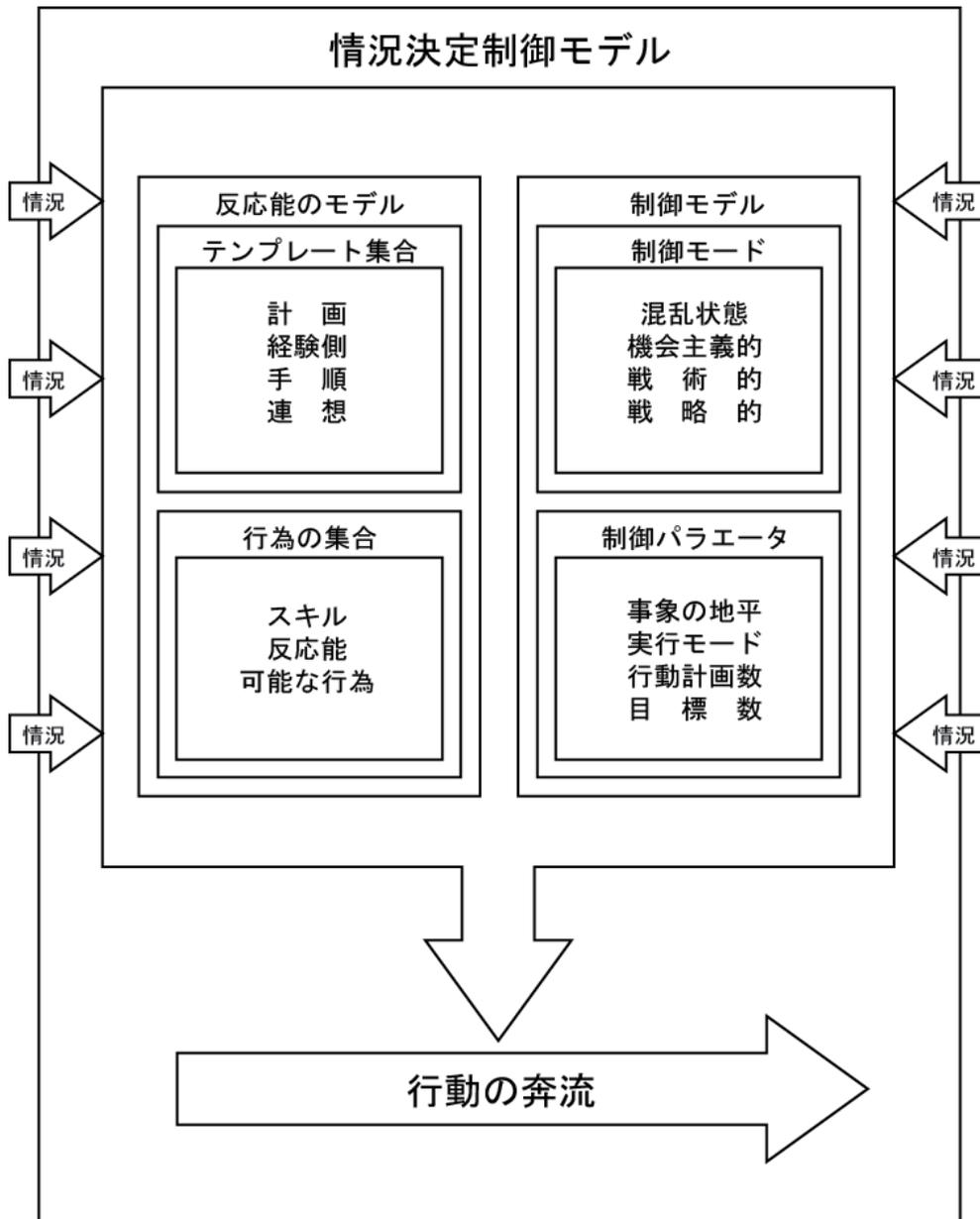


Figure 2-7 状況決定制御モデルの内部構造<sup>3)</sup>

## 第3章 実験

本章では、事故が多発している交差点で発生した事故データ分析、都市部高速道路の線形の厳しいSカーブで行った走行実験における運転者の注視挙動、信号交差点の流入部に設定された障害物（駐車車両）を回避する際の運転挙動を紹介する。なお、本章で紹介された3つの研究は、次章で提案する「状況決定制御モデルを用いた運転者の行動制御モデル」の基本となっている。

## 第3章 実験

### 3-1 実験1:多変量分析法を用いた複雑な交通環境からの事故因子の定量評価法<sup>51)</sup>

本実験は東京都内で一番交通量の多い瀬田交差点（東京都世田谷区）で発生した92件（死亡事故を除く）の交通事故データを基に交通量調査、事故現場分析及び3次元VRシミュレーション分析を行い複雑な交通環境が運転者のヒューマンエラーにどのような影響を与えるかを評価したものである。本実験を遂行するあたり、東京都玉川警察庁交通課から交通事故分析管理システム(KOA/TBS)の情報と事故分析に関する助言、国土交通省から瀬田交差点の道路図面など多くの協力を受けた。

なお、本実験の結果は平成19年土木計画会秋大会で最初発表され、後続研究が平成22年に国際ジャーナルITS大会の論文集に掲載された<sup>51)</sup>。

#### 3-1-1 概要

交通システムの安全性は人間（運転者）、車、道路環境における相互作用で決定される。運転者は交通システム中における中心的な存在であり、システムの信頼性に最も大きな影響を与える要素である。交通システムの相互作用における運転者の能力には限界があり、誤りやすい3つの機能（認知、注意、記憶）に頼らざるをえない。しかし、運転者の情報処理過程を直接観測することは不可能であるため、運転中に道路状況をどのように認知し、どのような判断をするかを定量的に評価（推測）することは非常に難しい。一般的に、交通システム状況が人間の能力を超えると事故が発生する。そのような状況を「ヒューマンエラー」という。Treat（1997）は交通事故の57%は運転者だけに原因があり、90%以上がヒューマンエラーと関係があると報告した<sup>1)</sup>。

平成16年、東京都内で発生した86,118件の65%（55,911件）が交差点及び交差点付近で発生した。そして、死傷者98,262人の中で死者の73%（232人）、重傷者の82%（1,118人）が交差点と関連している。また、死者の50%が横断歩道を横断していた歩行者又は自転車である<sup>50)</sup>。そのため東京都では、死傷事故率が高く、死傷事故が発生している交差点や単路137箇所を事故危険箇所として指定し、死傷事故を約3割抑止することを目指して、警視庁と連携して集中的な対策を講じている。

本実験の目的な、危険箇所として指定された交差点の中で交通量が多く事故が多発している交差点を選定し、事故現場の交通環境及び道路環境を調査分析することによってヒューマンエラーと関係がある因子を抽出し定量的に評価することである。

### 3-1-2 実験方法

#### (ア) 対象交差点の選定

本研究は危険箇所として指定されている交差点の中で、極端な道路環境からの影響を出来るだけ排除し一般的な道路環境での事故サンプルを収集するために駅周辺、商店街、観光地など道路環境が比較的に厳しい場所を避けて、次のような基準で対象交差点を決めた。

- 幹線道路が交差する交差点
- 道路形状が複雑で、交差交通容量が多く、交通渋滞が多発する交差点
- 道路の幾何構造や施設が良好な交差点
- 年間30件以上の交通事故が発生している交差点
- 死亡事故は少なく、車両間の接触事故が多発している交差点
- 現地調査時の安全性と容易性

上述した選定基準に基づいて交通統計分析と現地調査を行い、東京都世田谷区玉川台1丁目に位置する「瀬田交差点」を対象交差点に選定した。

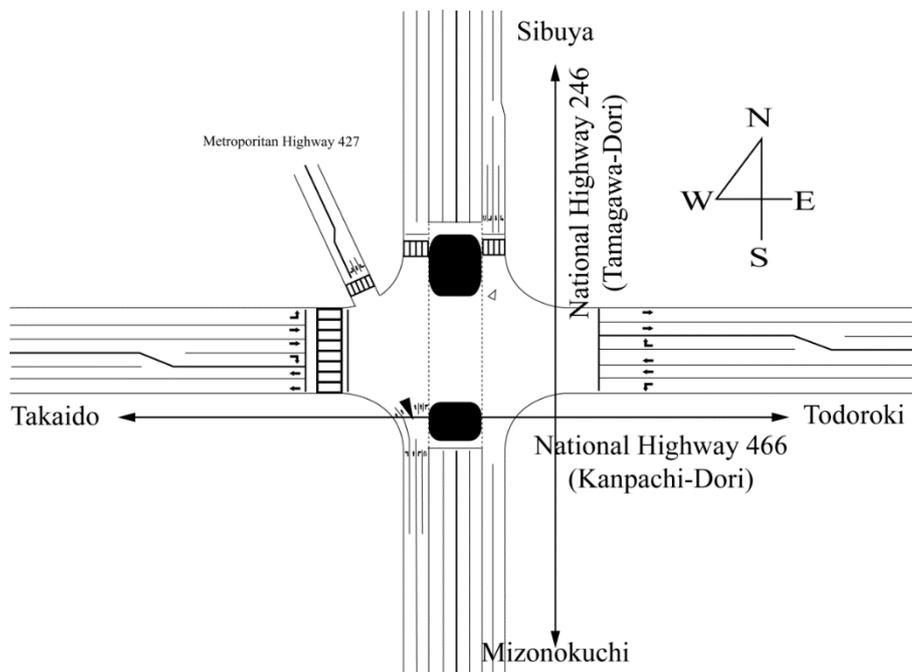


Figure 3-1 瀬田交差点の道路形状

事故現場における道路環境調査は瀬田交差点の中心から半径 50m以内で 2 年間（平成 15, 16 年）発生した事故の中で死亡事故と資料不十分の事故を除いた 91 件の事故を対象に行った。事故現場分析は玉川警察署の協力を得て交通事故分析管理システム（KOA/TBS）の情報を取得し、事故類型別に事故現場分析表を作成した。事故現場分析表は、道路環境の評価項目を道路の幾何構造、障害物・横断施設、交通規制・制御、交通流などに分類し、事故との関連性を定量化するために関連性が非常に低い場合 1 点、関連性がややある場合 3 点、関連性が高い場合 5 点の評価値を与えた。調査員には事前に評価に必要な専門知識を習得させた。安全の問題で十分な評価ができない場合は瀬田交差点を 3 次元映像に再現した VR モデルを用いて評価の信頼度を高めた。

### （イ） 分析方法<sup>3), 8)</sup>

収集されたデータにおいては事故の原因になった共通因子（Common Factor）を抽出するために統計分析ツールとして幅広く使われている SPSS を用いて因子分析（Factor Analysis）を行った。因子分析の方法は共通因子を抽出方法として主因子分析（PRIN）、各因子と評価項目との支配関係を調べるためにバリマクス回転（Varimax Rotation）を行った。

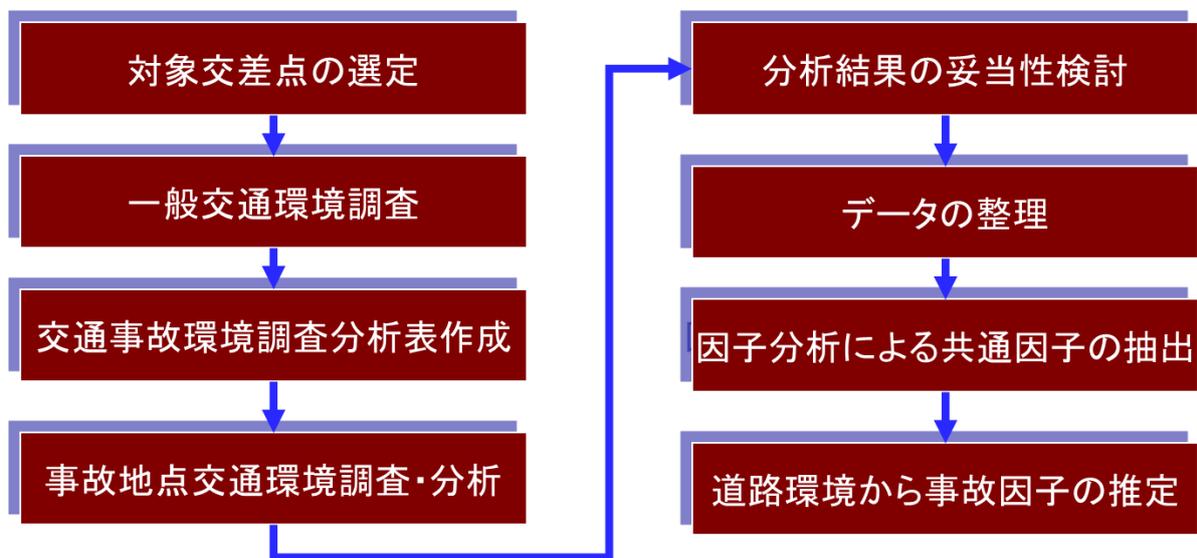


Figure 3-2 研究の流れ

(ウ) 実験結果

① 瀬田対象交差点の予備調査結果

瀬田交差点では国道 466（環八通り）の下に国道 246（玉川通り）の中央部 4 車線が立体交差し、都道 427 と国道 246 の外側 2 車線が国道 466 と平面交差する。交通統計によると都内で一番交通量が多く、渋滞が激しい道路区間で、年平均 60 件以上の交通事故が発生している。車線は片側 3 車線（幅：3.5m/lane）で中央分離帯が設置されている。交差部は直進 2 車線、右左折専用車線を持つ 4 車線（幅：3.3m/lane）に変更される。交差点の内部は車線のずれと複雑な車両挙動、信号制御、路面表示、道路標示などによる錯綜が起こりやすい。東名高速道路と首都高速道路の入口につながるため大型トラックの通行が目立つ。国 466 の西側を除いて歩道橋が設置されているが、歩道橋が設置されていない横断歩道へ自転車が集中するため、対車両事故が頻発している。都道 427 号から国道 466 へ進入する際、見通しが悪く道路標示や信号が複雑で判断ミスによる出会い頭事故が起こりやすい。平成 16 年 8 月に行われた交通流観測の結果、時間交通量は約 1,800 台、信号周期は 160 秒であった（Table 3-1）。

Table 3-1 瀬田交差点の交通容量、信号パラメータ

[平成16年8月]

道路名	国道466 (環八)								国道246(玉川)						都道427			
	西方向(高井戸)				東方向(等々力)				北方向(渋谷)			南方向(溝口)			北西方向			
	左折	直進	直進	右折	左折	直進	直進	右折	左折	直進	右折	左折	直進	右折	左折	直進	右折	
交通量	346	878	713	439	358	634	611	199	436	48	312	250	50	339	64	78	38	
大型車交通量	32	119	189	143	52	96	167	23	126	3	35	7	6	55	0	10	6	
大型車混入率(%)	9%	14%	27%	33%	15%	15%	27%	12%	29%	6%	11%	3%	12%	16%	0%	13%	16%	
歩行者・自転車	*				121/251				*			*			*			
信号パターン	φ1		φ2		φ1		φ2		φ5		φ4		φ5		φ4		φ3	
青信号(s)	65		15		78		22		13		12		13		12		15	
黄色信号(s)	4		4		4		4		4		4		4		4		4	
備考	横断歩道				19sec (φ3)				歩道橋			歩道橋			歩道橋			

\*交通量:台/時間

② 交通事故分析

事故当時に運転者が意図した行為とヒューマンエラーの特徴を調べるために、運転挙動を信号待ちのための減速停止、左折、右折、追従走行、車線変更追い越しなどに分類した。そして、各々の事故の原因と考えられるヒューマンエラーを次のように分類した<sup>7)</sup>。

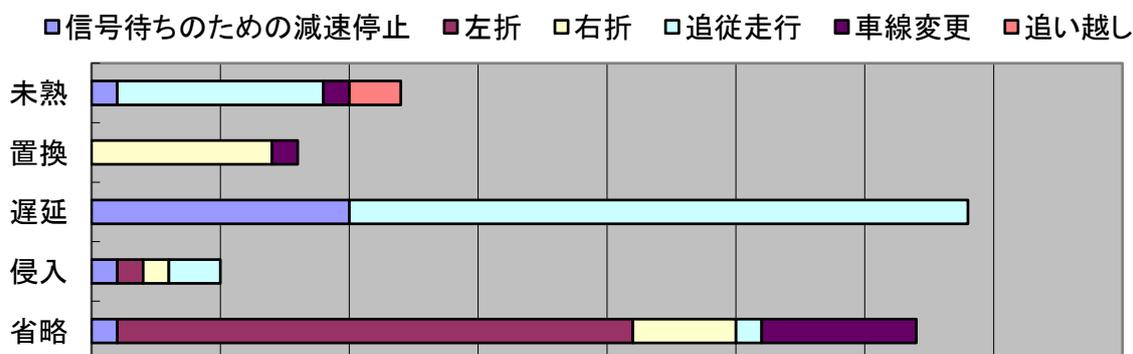
- 省略(Omission) : やるべき行為が行われなかった。
- 侵入(Intrusion) : 行為系列の中に全く関係のない行為が入り込まれた。
- 置換(Replacement) : 行為系列の中のある行為が別の行為に入れ替えられた。

- 遅延(Delay) : 行為が必要とされる時行われなかった。
- 未熟(Premature action) : 必要とされた時、行為が行われなかった。

Table 3-2 は瀬田交差点で発生した91件に対する事故当時の運転挙動とヒューマンエラーを表している。特に、瀬田交差点のように交通流が多い信号交差点は追従走行中に信号停止する先方車の動きに対する遅れと左折時に後ろから来る二輪車又は横断歩道の安全確認をしないための事故が多い。

**Table 3-2 運転挙動とヒューマンエラーの分類**

運転挙動	件数	認知課程		判断課程		操作課程	
		省略	侵入	置換	遅延	未熟	
減速停止	13	1	1	0	10	1	
左折	21	20	1	0	0	0	
右折	12	4	1	7	0	0	
追従走行	35	1	2	0	24	8	
車線変更	8	6	0	1	0	1	
追い越し	2	0	0	0	0	2	
小計		32	5	8	34	12	
合計	91	32	13		46		



**Figure 3-3 運転挙動とヒューマンエラーの分類**

(エ) 事故因子の抽出と定量的な評価)

① 主因子分析 (Principal Factor Analysis; PRIN)

事故類型別に作成された事故現場分析表を用いて3段階に定量化されたデータにおいて、各々の評価項目を変数として主因子分析を行った結果、追突事故(42件)と

出会い頭事故（9件）から5つの共通因子が抽出することができた。他の事故類型はサンプルが少ないため有意な結果が得られなかった。Table 3-3 は追突事故現場分析表の評価項目から抽出された5つの共通因子が追突事故の約80%（累積率）を支配していることを意味する。Table 3-4 は出会い頭事故現場分析表の評価項目から抽出された5つの共通因子が追突事故の約95%（累積率）を支配していることを意味する。しかし、主因子分析では各因子と各々の評価項目との関係が分からないため因子回転を行い各因子と評価項目との支配関係をしらべる必要がある。

**Table 3-3 追突事故における共通因子と寄与率**

成分	初期の固有値			抽出後の負荷量平方和		
	合計	分散の%	累積%	合計	分散の%	累積率
1	4.27	28.48	28.48	4.27	28.48	28.48
2	2.79	18.58	47.06	2.79	18.58	47.06
3	2.01	13.43	60.49	2.01	13.43	60.49
4	1.66	11.05	71.54	1.66	11.05	71.54
5	1.21	8.05	79.60	1.21	8.05	79.60*

**Table 3-4 出会い頭事故における共通因子と寄与率**

成分	初期の固有値			抽出後の負荷量平方和		
	合計	分散の%	累積%	合計	分散の%	累積率
1	6.947	34.735	34.735	6.947	34.735	34.735
2	4.463	22.315	57.050	4.463	22.315	57.050
3	3.342	16.711	73.761	3.342	16.711	73.761
4	2.311	11.553	85.315	2.311	11.553	85.315
5	1.676	8.379	93.694	1.676	8.379	93.694

## ② バリマクス回転 (Varimax Rotation)

バリマクス回転は各因子と評価項目との支配関係を分析するために一般的に用いられる因子軸の直交回転法の一つである。即ち、因子軸の回転によって因子の内容をわかりやすく説明できる。

Table 3-5 は追突事故に対するバリマクス回転によって得られた各因子と評価項目との支配関係を表す。説明分散は各評価項目の因子負荷量を二乗した値の合計で、因子の支配力を表す。例えば、因子1の説明分散  $3.52 (|-0.06|^2 + |0.71|^2 + \dots + |0.000|^2 = 3.52)$  は約4個分の評価項目を支配できる強さを表す。寄与率は全体のデータ変動（評価項目）に対する各因子の説明分散の割合 ( $3.53/15=0.23$ ; 23%) である。例えば、因子1の寄与率は、道路環境評価から抽出された追突事故の23.9%を支配していることを表す。

### ③ 因子の解釈と命名

主因子分析とバリマクス回転によって追突事故と出会い頭事故に対する道路環境からの因子を抽出し、環境評価項目との支配関係を調べた。最終段階では、各因子と強い支配関係を持つ道路環境の評価項目を用いて各因子の特性を表す名前をする必要がある。因子の命名は各因子に対する因子負荷量を見て決める。できるだけ大きな値に決めるのが望ましいが、普通標本抽出誤差や測定誤差を補償するために $|0.4|$ 以上を基準とする。本研究では、追突事故に対して $|0.5|$ 、出会い頭事故に対して $|0.6|$ を基準にした。Table 3-5、Table 3-6の中で基準値を超える因子負荷量に下線をマーキングされている。

Table 3-5 追突事故における評価項目と各因子の寄与率

回転後の成分行列(a)						
評価項目	成分					累積率
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	
X4	-0.06	-0.28	0.07	0.82	-0.04	0.76
X5	0.71	-0.43	0.14	-0.39	-0.09	0.87
X6	-0.18	-0.07	0.05	0.86	-0.08	0.78
X7	-0.47	-0.28	0.34	-0.13	0.59	0.78
X8	0.33	0.75	-0.08	0.09	0.05	0.70
X9	-0.18	0.81	-0.17	-0.25	-0.13	0.80
X10	0.08	0.18	-0.26	0.04	0.85	0.83
X11	0.28	0.88	-0.08	-0.09	0.01	0.86
X12	0.93	0.05	0.12	-0.04	0.05	0.89
X13	-0.22	-0.23	0.35	-0.19	0.62	0.65
X14	0.94	0.11	-0.09	-0.05	-0.05	0.91
X15	0.85	0.12	-0.25	-0.12	-0.21	0.85
X16	-0.17	0.66	0.13	-0.22	-0.04	0.53
X18	-0.06	-0.04	0.91	-0.02	0.06	0.83
X19	0.00	-0.04	0.94	0.15	-0.04	0.91
説明分散	3.52	2.90	2.18	1.78	1.55	11.94
寄与率	23.49	19.35	14.55	11.88	10.34	79.60

例えば、Table 3-5の因子1でマーキングされた評価項目はX5、X12、X14、X15ある。統計処理のために変数名を付けたが事故現場分析表の評価項目に戻すと次のようになる。

- X1：景色、看板、歩行者、周辺漏光などが視覚ノイズとなり、前方不注意

- X12：交差点通過の焦りに起因する後方車の無理な交差点進入
- X14：渋滞先詰まりによる後方車の無理な交差点進入
- X15：横断歩行者需要とその車両との錯綜に起因する、後方車の無理な交差点進入

最後に、事故現場における道路環境の評価項目 X1、X12、X14、X15 の特徴を表す因子名を「無理な交差点進入による前方不注意」と命名した。そして、追突事故における因子 1 の支配度は約 24%と推定できる。同様の方法で、抽出された全ての因子に対する命名を行った結果をまとめると次のようになる。

#### [追突事故における因子の命名]

- 因子 1：「無理な交差点進入による前方不注意」、24%
- 因子 2：「道路表示不十分及び速度判断の誤り」、20%
- 因子 3：「後続車の速度が高い場面での前方者の急停止、急な割り込み」、15%
- 因子 4：「沿線構造物による前方車及び信号の視認性妨害」、12%
- 因子 5：「沿線からの出入り、駐車車両による急停止」、10%

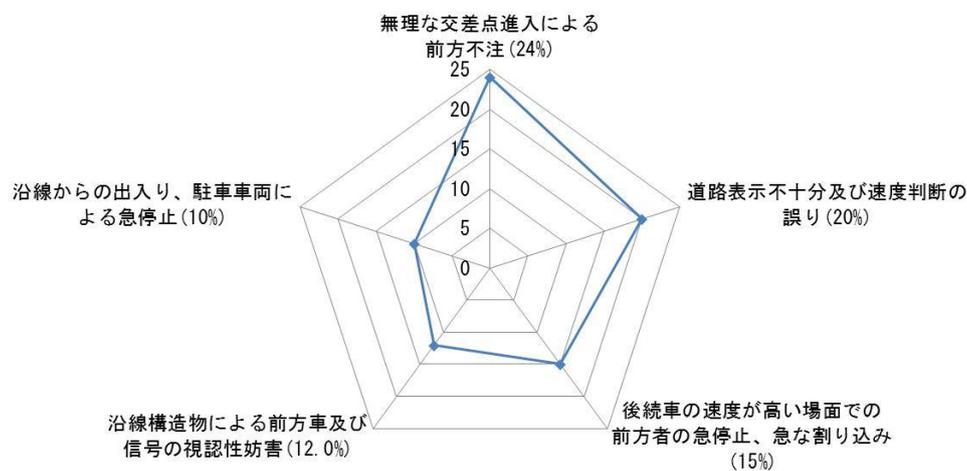


Figure 3-4 交通環境からの事故因子（追突事故）

[出会い頭事故における因子の命名と寄与率]

- 因子1 : 「車両の陰、道路障害物、幾何後続による対向車の視認性低下」、31%
- 因子2 : 「信号待ちや渋滞による焦りで無理な横断」、20%
- 因子3 : 「複雑な道路表示や路面標示による状況判断の遅れ」、17%
- 因子4 : 「交差量の増加による対向車の速度判断ミス」、14%
- 因子5 : 「道路幾何構造による対向車の進行方向や車両間隔の判断ミス」、13%

Table 3-6 出会い頭事故における評価項目と各因子の寄与率

回転後の成分行列(a)						
評価項目	成分					累積率
	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	
X1	0.86	0.18	-0.17	0.03	0.44	0.99
X4	-0.13	0.25	0.56	0.05	0.76	0.97
X5	-0.23	0.09	-0.22	0.20	0.92	1.00
X7	0.36	0.07	0.84	0.28	0.23	0.98
X8	0.15	-0.18	-0.73	0.00	0.03	0.60
X9	-0.41	0.14	-0.05	-0.64	-0.53	0.89
X11	0.94	-0.33	-0.03	0.08	-0.08	1.00
X12	0.94	-0.33	-0.03	0.08	-0.08	1.00
X14	-0.10	-0.19	-0.92	0.16	0.14	0.94
X15	-0.75	0.38	0.38	-0.30	-0.06	0.95
X16	-0.33	0.92	0.12	-0.11	-0.12	0.99
X17	-0.14	0.90	0.15	0.21	0.14	0.92
X18	0.87	-0.18	0.33	-0.16	-0.19	0.97
X21	0.87	-0.18	0.33	-0.16	-0.19	0.97
X22	0.56	0.00	0.11	-0.59	0.56	0.99
X23	-0.16	0.33	0.11	0.91	0.15	0.99
X24	-0.14	0.65	0.23	0.52	0.25	0.82
X25	-0.58	-0.47	0.48	-0.01	0.30	0.87
X26	-0.14	0.90	0.15	0.21	0.14	0.92
X27	0.53	0.24	-0.36	0.72	-0.04	1.00
説明分散	6.10	3.91	3.34	2.78	2.61	18.74
寄与率	30.50	19.53	16.72	13.92	13.03	93.69

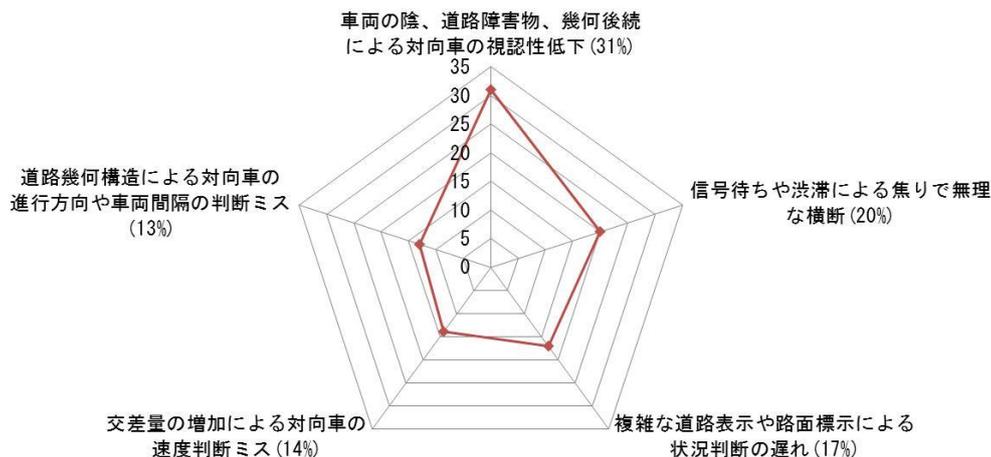


Figure 3-5 交通環境からの事故因子 (出会い頭事故)

### 3-1-3 実験結果

本実験は、全ての信号交差点を対象にした結果ではないが道路状況によるヒューマンエラーの可能性を定量的に推定することによって、道路何構造、道路障害物、交通制御、交通流が運転者のヒューマンエラーにどのような影響を与えるかを理解することが出来た。

特に、道路状況は互いに結びつけられ新しい状況を生み出すことが分かった。交通環境から交通事故の原因を定量化する手法は、米国運輸省 (NHTSA) が開発した IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model) に含まれている事故予測モデル (Crash Prediction Module: CPM) がある<sup>52)</sup>。しかし、殆どの事故予測モデルは多変量解析手法を基に開発されている。多変量分析手法は母集団の事象 (交通事故) が正規分布に従うという前提で行われる解析手法であるが、実際に交通事故の発生率 (事故件数/100万 Km・台) は数すくない事象であるため多くの研究者らから議論になっている。本実験で用いられた因子分析も多変量分析法の一種であることから本研究の限界であり今後の課題と言える。

## 3-2 実験2：道路環境の変化が運転者の認知行動に及ぼす影響に関する研究

本実験は実験1で調査した瀬田交差点の道路環境をドライビングシミュレータに再現し、運転者の行動が沿道環境、明暗、交通量等の交通環境によってどのような変化を見せるのかを調べるために行われた。本実験は‘交通システムの循環モデル’という運転者モデルの概念が提案されており「統合運転者制御モデル」を構築することにあたって基礎的な研究になっている。本実験は平成18年土木学会全国大会(秋大会)で発表賞(広井章人)を授与された<sup>53),54)</sup>。

### 3-2-1 概要

2004年、東京都内では、交通事故の65%が交差点及び交差点付近で発生した。その中で死者の73%、重傷者の82%が交差点と関連している。また、横断歩道を横断していた歩行者又は自転車が死者の50%を占めている。そのため東京都には、死傷事故率が高く、死傷事故が発生している交差点や単路137箇所を事故危険箇所として指定し、死傷事故を約3割抑止することを目指して、警視庁と連携して集中的な対策を講じている<sup>50)</sup>。

交差点は交差、分流、合流、右左折など、複雑な運転行動が行われるため、車両相互間の錯綜が起りやすい道路区間である。従って、交差点での交通事故を防ぐためには、運転者に過度な注意力と判断力を要求しない道路環境が望まれる。そのためには、道路環境に対する人間の認知・行動特性を理解し、どのような道路環境で事故が起りやすいかを評価する必要がある。

本実験では、道路の沿道環境、明暗、交通量の違いが運転者の認知挙動にどのような影響を及ぼすかを理解するために、道路環境による運転挙動の違いを評価した。

道路・人間・車システム(以下、交通システム)において、道路環境は運転挙動を変化させシステム全体を動かすきっかけになる。即ち道路環境は、事故原因の90%以上と知られているヒューマンエラーを防ぐための核心的な要素である<sup>1)</sup>。Figure 3-6は本実験の結果から提案された交通システムの循環モデルの概念図である<sup>53)</sup>。

人間に優しい道路環境をつくるためには、事故につながるヒューマンエラーが起りやすい環境を探ることである。本研究では、その手法として道路環境パラメータに対する自由度が高いドライビングシミュレーター(以下、DS)を考案し、環境の変化による運転挙動の違いを調べることにした。

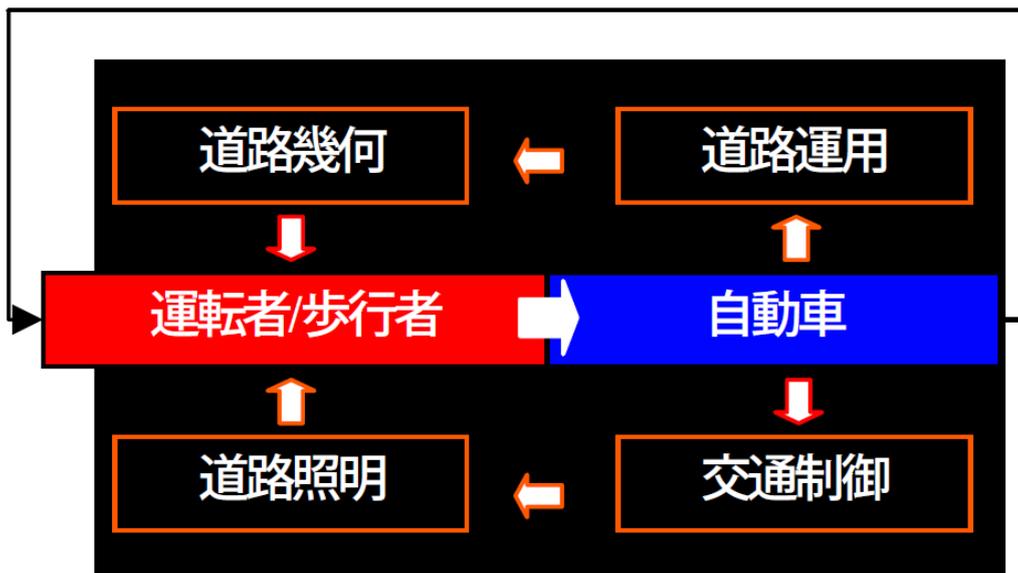


Figure 3-6 交通システムの循環モデル (概念図) <sup>53)</sup>

### 3-2-2 実験方法

#### (ア) 被験者

被験者は普通自動車免許保有の 20 代男性 29 人で、まず被験者には ATMT (Advanced Trail Making Test) のみを 3 回行うよう指示した。これは ATMT に慣れるとともに走行実験の直前における脳のストレス度を評価するためである。次に、被験者に DS に慣れてもらうために、1 回テスト走行をするよう指示した。

その後、ATMT と走行課題を同時に行う走行 (以下基本走行) から、環境要因を変化させながら実験を行った。実験では、走行課題終了と共に ATMT も終了とした。すべての条件の走行が終了した時点で、実験を終了した。

#### (イ) 実験装置

本実験のために考案された DS は、道路景観シミュレーションソフトである UC/Win Road (FORUM8 社製) を走行実験ができるようにカスタマイズしたものであり、300 インチスクリーンを用いた固定式である。また、道路環境の変化による運転者の認知的な負担を調べるために、脳のストレス度を計測するために開発された、総合医科学研究所作成の ATMT 装置を、運転中の副次課題として与えた。即ち、道路環境による認知的な負担が多くなるほど副課題のパフォーマンスが落ちることを仮説として設定したものである (Figure 3-7)。

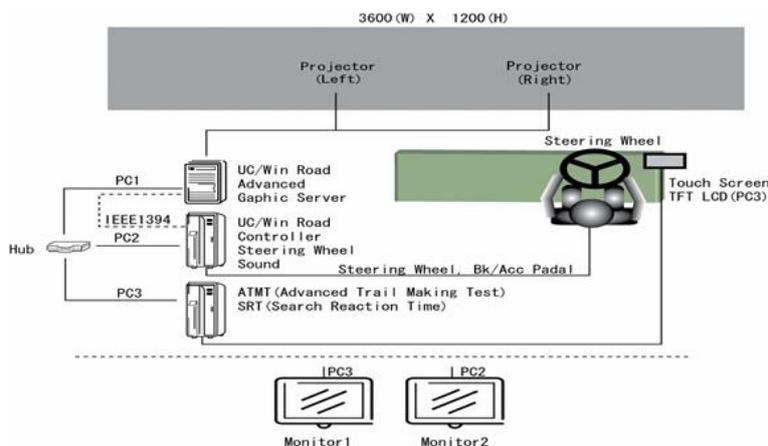


Figure 3-7 実験装置の構成

(ウ) DSの走行道路（実験路線）

DS実験で再現された瀬田交差点は東京都内で一番交通量が多く、渋滞が激しい道路区間である。年平均60件以上の交通事故が発生しているため、事故多発交差点として管理されている。車線は片側3車線(幅:3.5m/lane)で中央分離帯が設置されている。交差部は直進2車線、右左折専用車線を持つ4車線(幅:3.3m/lane)に変更される。交差点の内部は車線のずれと複雑な車両挙動、信号制御、路面表示、道路標示などによる錯綜が起こりやすい。時間交通容量は約1,800台、信号周期は160秒で、1カ所を除いて歩道橋が設置されている。東名高速道路と首都高速道路の入口につながるため大型トラックの通行が目立つ。自転車は歩道橋が設置されていない横断歩道へ集中し、対車両事故が頻発している。都道427号から環状8号線へ進入する際、見通しが悪く道路標示や信号が複雑で判断ミスによる出会い頭事故が起こりやすい (Figure 3-8)。



Figure 3-8 実験道路 (例)

## (エ) 実験手順

被験者は普通自動車免許保有の20代男性29人を対象に行った。まず被験者にはATMTのみを3回行うよう指示した。これはATMTに慣れるとともに走行実験の直前における脳のストレス度を評価するためである。次に、被験者にDSに慣れてもらうために、1回テスト走行をするよう指示した。

その後、ATMTと走行課題を同時に行う走行（以下基本走行）から、環境要因を変化させながら実験を行った（Table 3-7）。実験では、走行課題終了と共にATMTも終了とした。すべての条件の走行が終了した時点で、実験を終了した。

Table 3-7 実験環境と変数設定

区分	実験環境と変数設定		
基本走行	交通量：0、速度制限：40 km/h、副課題：ATMTのみ行う		
沿道環境	樹木削除	ビル削除	樹木・ビル削除
明暗	夕方	夜	早朝
交通量	500 台/時間	1000 台/時間	1500 台/時間
障害物	工事現場（1車線）⇒駐車車両（1車線）⇒追突事故現場（2車線）		

## (オ) 解析方法

ATMTは画面にランダムに提示される1から25までの数字の中でターゲットを探し、指でタッチすることによって、各ターゲットの探索に要した時間（以下探索反応時間）と、主課題による認知的な負担による2種類のエラーの頻度を計測した。第1のエラーは主課題による認知資源の余裕が少ないため、次のターゲットが何かを忘れる場合での喪失エラー、第2のエラーは、次のターゲットが何をしているかに関わらず、主課題に認知資源を奪われターゲットの的確なタッチができなかった場合でのスリップエラーある。

探索反応時間は、走行中における認知資源の変化を表す。即ち、認知資源に余裕が多いほど探索反応時間が早くなり副次課題のパフォーマンスが高くなる。

喪失エラーは、直面した課題に認知資源のほとんどが使われているため、別の課題を処理する余裕がないことを表す。それは、前方車や信号機などに注意を払っているため、歩行者や後続車の急な割り込みに対応できない状態に当たる。

スリップエラーは直面した課題に対する行動計画が既に立てられているにも関わらず、焦りなどによって的確な行動を行われない状態である。すなわち前方車の急停止などを予測していたにも関わらず別の行動が行われたため、ブレーキを踏むタイミングが遅くなる場面に当たる。

### 3-2-3 実験結果

Figure 3-9 は、道路環境の変化による計測結果をまとめたものである。

#### (ア) 沿道環境

ビル削除と全部（樹木・ビル）削除の場合は、探索反応時間と喪失エラー率が小さくなった。また、樹木削除の場合、探索反応時間とスリップエラー率が大きくなった。

一定間隔で植えられている樹木は周辺車両との相対距離の認知、相対速度の速度認知、車線維持等、認知的な面から運転負荷を減らす役割をしていると考えられる。

即ち、運転者にとって沿道環境は主に周辺視から認知される視覚情報であり、沿道環境を設計するとき施設の数よりも形状、彩色、寸法、配置間隔等を標準化することで運転負荷を減らすことが可能であることを示唆する。

#### (イ) 明暗

夜の場合、昼より探索反応時間が大きくなった。また、喪失エラー率とスリップエラー率は共に低くなった。即ち、昼より夜の方が事故率の高い原因は、昼に比べて夜の方が認知的な負担が大きくなることではなく、運転に必要な情報を見逃してしまい油断したり、無理な行動をしたりする可能性が高くなると考えられる。

#### (ウ) 道路障害物

道路障害物(工事現場、駐車車両)は、エラー率と探索反応時間を大きくした。すなわち、運転者にとって道路障害物は非常に負担をかけ、事故を起こりやすくする原因と考えられる。

#### (エ) 交通量

交通量が多くなればなるほど、探索反応時間と二つのエラー率が高くなった。すなわち、交通量の増加は、運転者にとって非常に大きな負担をかけることが考えられる。

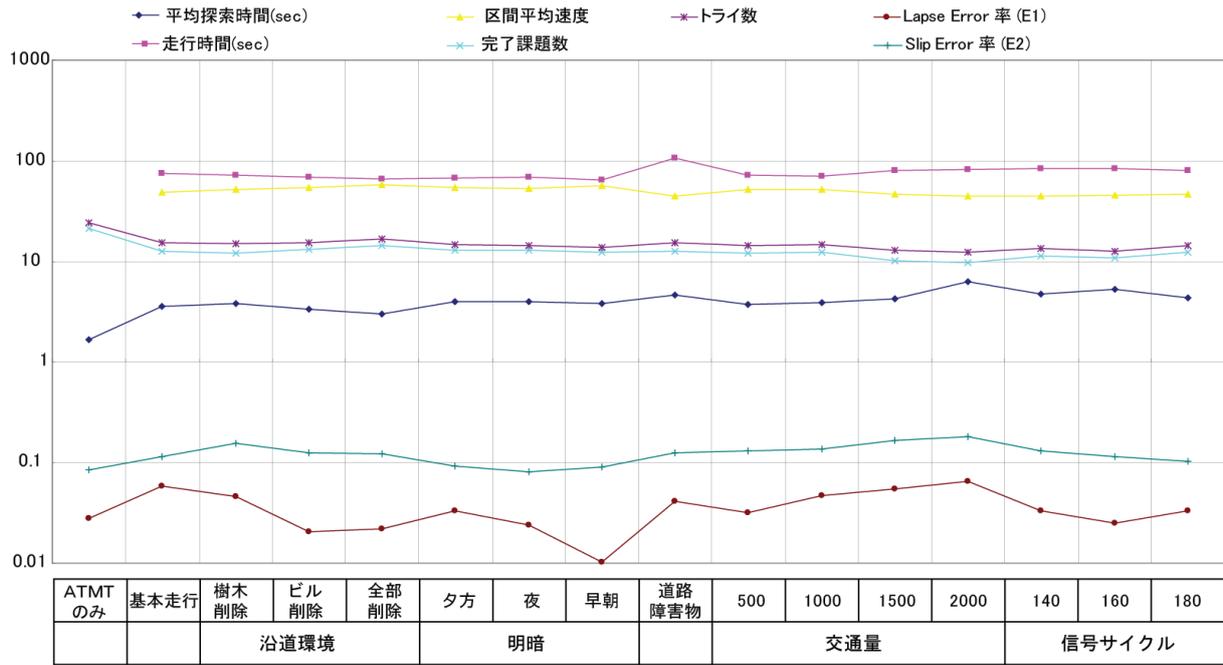


Figure 3-9 道路環境による計測値の比較

### 3-3 実験3：信号交差点流入部の障害物に対する高齢運転者の認知、判断及び運転挙動

本実験は、実験1で成果物とした開発された瀬田交差点の3次元道路データと事故因子をドライビングシミュレータに入れ実験環境を構築し、2つの被験者群（高齢者：35人、若年者：45人）に同じ交通環境を与え運転挙動を調べたものである。ただし、本論文では高齢運転者の運転挙動がどのような違いがあるかに注目して高齢者の運転挙動を中心に書かれている。

なお、本実験の結果は平成20年に国際ジャーナル Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers(IMEchE), Part D, Journal of Automobile Engineering に掲載された<sup>55)</sup>。

#### 3-3-1 概要

平成18年10月1日現在、65歳以上の高齢者人口は、過去最高の2,660万人となり、総人口に占める割合（高齢化率）が20.8%を占めている。また、75歳以上の後期高齢者が前期高齢者の伸びを上回り、総人口が減少するなかで高齢者が増加し続けると、高齢化率は平成25年（2013）には25.2%、平成47（2035）年に33.7%、平成67年（2055）年には40.5%に達して、国民の2.5人に1人が65歳以上の高齢者となる社会が到来すると推計されている<sup>56)</sup>。一方、高齢化の進展に伴い65歳以上の高齢者運転免許保有数は年々増加し、平成17年末現在、65歳以上の運転免許を保有者数は977万人に達し免許保有者の6.7%を達しているが、55～59歳の運転免許保有者が全体の80.9%を占めていることから、今後も運転年齢層の高齢化とそれに伴う高齢運転者の事故問題は加速すると見られる。

このような背景から、警察庁は高齢運転者を対象に認知機能検査を導入する方針を固めたが、高齢者の事故リスクの評価方法には、欧米諸国の例でも相反する研究例が多く、人権問題を引起す恐れもある。さらに、高齢運転免許保有者の85%が返納しない意向を示している理由として、80%の高齢運転者が普通に運転できるからだと答えているが、その裏側には65歳以上の高齢者の51.9%が夫婦のみ又は単独世帯であることから、日常運転をやめるのは厳しい生活環境が実在する。

一般的に、人間の受容系（感覚系）と反応系（運動系）は同時に処理できる能力の限界があり、それがヒューマンエラーの原因につながる。また、その能力は一定ではなく、同じ人間でも直面している外部環境と内部環境によって変化する。人間は加齢とともに感覚、記憶及び運動系のパフォーマンスが徐々に低下して行く。運転作業の90%以上が視覚情報に依存していると言われている<sup>9),10)</sup>。また、交通事故の57%が運転者の単独のヒューマンエラーであり、複合的名原因を取り入れると少なくとも90%以上がヒューマンエラーだと言われている<sup>1)</sup>。

国内及び欧米諸国の交通事故分析を見ると、高齢者の交通事故は他年齢層と比べて有意な特徴が多数取上げられている。特に、交差点関連事故は高齢者の運転パターンだけでなく加齢による運転挙動の変化が深く関連されている。交差点は、地域内の道路ネットワークには避けられない道路構造である。交差点では、交通流の一時停止、合流、分岐、車線変更など複雑な運転挙動が要求される。そのような要求は、ヒューマンエラーの可能性をより高める重要な要因である。

平成16年、東京都内で発生した事故の65%が交差点と関連され、重傷者の82%、死亡者の73%が交差点及び交差点付近で発生している。特に、高齢者の事故率は他の年齢層に比べて高い。米国の例でも同じ傾向が報告され、高齢者以外の運転者が交差点で50%の事故率を占めている反面、高齢者は60%を占めている<sup>50)</sup>。

本実験では、高齢運転者の日常運転環境と事故統計から交差点付近で事故率が高いことに注目し、交差点付近における高齢運転者の運転挙動の特徴を若年運転者と比較して示す。

### 3-3-2 加齢による運転者の認知・生理学的な変化

#### (ア) 高齢運転者の事故特徴

高齢運転者に関する研究は、高齢化が先に進んだ欧米諸国を中心に多く研究されてきたが、大部分の研究が加齢による心身機能の変化と事故リスクを関連づけている。また、高齢運転者の定義も明らかではない。国内では、65歳以上の成人を高齢者として分類しているが、65歳の年齢が心身機能の低下し始める閾値年齢を示している根拠は見当たらない。実際、運転者に重要な心身機能の1つである動体視力や夜間視力において、個人差は多少あるものの、40歳から始まると報告されている。従って、免許取得当時から加齢による心身能力の低下は始まっており、65歳以上の高齢者だけの問題ではないことを認識する必要がある。平成18年警察庁の統計によると、自動車乗車中の死者の約3割(28.6%)が高齢者で、50歳代が16.4%、若者が15.9%の順になっていることから致死率(死傷者に占める死者の割合)と年齢は何らかの相関関係があることを示している。高齢者が若者に比べて体が弱いことと年齢以外の事故要因を考慮しなかったとしても、高齢者の致死率が全体と比べて3.7倍占めていることは、少子高齢化の社会動向からみると深刻な問題である。

事故当時の交通環境からみると、国内外を問わずに複雑な交通環境では、高齢運転者が若年運転者も高い事故率を占めている。特に、加齢とともに交差点、合流、分岐、車線変更及び通行規制道路で相対的に高い事故傾向がある。

科学警察研究所によると、高齢者は全体的に追突され易く、相手が若いほど率が高いという。その理由として、高齢運転者は若者に比べて、走行速度が低く、突然急激な制動をしたり、不必要な制動をしたりする等、追従走行時の制動挙動不安定さを指摘している<sup>57)</sup>。

## (イ) 高齢化による知覚・認知能力の変化

### ① 視覚 (Vision)

加齢は知覚・認知能力に様々な変化をもたらす。特に、視覚機能の低下は、単に静止視力の低下だけでなく、視覚情報処理に全般にわたり現われる。運転情報の90%以上が視覚機能に依存している事実から重要な問題である<sup>10)</sup>。例えば、加齢に伴って水晶体が厚くなると、より遠くの被写体の焦点調節が遅くなったり、注視能力の鋭敏さが低下したりする。これは、運転中に行動判断を迷わせる原因にもなる。加齢に伴い水晶体が黄色に変色すると、色彩の識別能力を低下する。それは、各種道路標示の識別や障害物の発見を遅らせる。45歳以上から多発し、80歳以上のほとんどの高齢者に発病する白内障により、物が霞んだりぼやけて見えたりする。加齢黄斑変性 (Age-related Macular Degeneration: AMD) は、中心視野を破壊させ、失明になる場合もある。緑内障は周辺視野を低下させ、速度感の鈍化、道路周辺の危険予知、及び夜間運転に影響を及ぼす。さらに、加齢による角運動量や奥行き感覚の低下は、周辺車両の運動方向予測や速度判断に影響を与える。

### ② 記憶 (Memory)

加齢は脳の認知能力に様々な変化をもたらす。一般的に、人間の記憶は感覚記憶 (Sensory Memory)、短期記憶 (Short-Term-Memory ; STM) 及び長期記憶 (Long-Term-Memory, LTM) に分類される。近年は、即時の情報処理を作業記憶 (Working Memory) の概念を用いて分かりやすく説明している。高齢者の短期記憶は加齢による影響がほとんどなく、いわゆる Muller の法則 (マジカルナンバー $7 \pm 2$ ) に従う反面、感覚記憶は散漫な周辺環境で干渉しやすく若者より短いと報告されている。特に、運転作業はより多くの作業記憶が要求されるため、高齢者の空間情報処理 (Spatial information) を遅らせる原因になる。

### ③ 注意 (Attention)

運転作業は、自分の車を操作しながら周辺車両、信号機、経路探索など複数の刺激に対して同時に注意を払わなければならない。さらに、運転中には複数の潜在危険に対して迅速に注意を移行されることが重要である。しかし、人間が同時に処理できる情報量は限界があり、人間が持っている情報処理能力を超えない道路環境の構築が必要である。

加齢と注意の関する多くの研究例で、競争する刺激に対する注意の配分能力が加齢とともに低下する結果又は視覚の探索能力と加齢との深い関係を示している。

#### ④ 反応時間 (Reaction Time)

反応時間は、人間がある刺激を認めてから運動系が反応するまでの時間間隔と定義される。その中には、刺激に対する感覚受容系、情報処理系及び運動系の能力が含まれている。また、刺激の種類、同時刺激の数、提示方法などによって異なる。運転者の反応時間は、車両相互関係に大きな影響を与える因子であり、多重衝突や急停止による連鎖反応を評価などに幅広く使われる追従モデルでも、先方車に対する追従車両の反応の遅れを重要なパラメータとして扱われる。本実験においては、第3節(3-2-3)に難易度の異なる作業環境を想定した選択反応時間の変化及び危険認知から危険回避までの時間間隔を分析対象にした実験結果が記されている。

#### (ウ) 事故リスクと人間信頼性

ヒューマンエラーと事故リスクの関係は人間信頼性分野で古くから研究され、様々な評価モデルが提案されてきた。しかし、従来提案された評価モデルの大部分は原子力発電所や大型飛行機など複雑な設備の操作員(パイロット)によるヒューマンエラーの防止を目的としている。そのようなモデルの殆どは、人間が作った設備の中で行われる標準化された作業を対象にしているため、時々刻々変化する道路環境下で行われる運転作業に適用するには限界がある。例えば、Rasmussenによって提案された人間行動の梯子モデル(Step Ladder Model; SLM 又は Skill-Rule-Knowledge based behavior :S-R-K とも呼ばれる)は、人間の認知行動を情報処理機構として見なし、入力に対する出力は3つの行動レベルの中でどこにあるかによって決まる。しかし、梯子モデルは人間の行動に対するルールが多すぎる点、全ての人間の行動をルールの枠に収めることが出来るか等の課題が残されている。

Minchon(1985)らによって提案された3階層モデルは、人間の行動を戦略的行動(Strategic behavior)、戦術的行動(Tactical behavior)、作戦的行動(Operational behavior)の3層に分けている<sup>4)</sup>。しかし、3層モデルは運転者の行動を定性的に分類しているため行動を定量的に分類するためのパラメータが明確に定義されず、専門家の判断による評価が必要とされる。

それらの諸問題に対する対案として提案されたモデルとしては、Hollnagelの人間行動の状況決定制御モデルがある。それは、人間の行動制御レベルを認知的な観点から戦略的制御モード、戦術的制御モード、機会主義的制御モード、混乱状態制御モードの4つの制御モードに分けている。なお、各制御モードを定量的に分類するためのパラメータとして、同時目標課題数、利用可能な時間、実行モード、地象の水平を上げている。本研究は、状況決定制御モデルの概念を取り入れ、実験シナリオの設定と評

価を行っている。

### (エ) 高齢運転は必ず事故リスクが高いのか？

前節までは高齢運転者の心身能力の低下など否定的な研究例を取り上げたが、加齢と高い事故リスクの関係が必ず等しい関係ではない。高齢運転者は心身能力の変化に合わせて、上手に適応して行く例が数多く報告されている。例えば、高齢者は若者より自己中心的な行動が少ないため速度違反、飲酒運転などが少ない。高齢運転者は悪天候、混雑時間帯、深夜運転など厳しい環境での運転や運転しながらの喫煙又ラジオ操作のようなど同時作業を避ける傾向がある。若者より長い車間距離と低速を維持することで距離感覚の低下や反応時間の遅れによる事故リスクを低減させる。高齢の夫婦が助手席に同乗して助けあいながら運転した場合、事故リスクが有意に低下した結果を示した研究例もある。

平均走行速度に関する調査研究によると、75歳以上の高齢者は20歳代の若者より平均6.5Km/hの有意差が見られる。また、平均車頭時間の調査研究によると、50歳以上の運転者グループ（平均1.4秒）と若者グループ（平均1.2秒）の間に平均15%の有意な差が見られた<sup>5)</sup>。

高齢者の低速運転は渋滞また追突される原因につながる意見もあるが、渋滞流の中で長い車間距離を維持させた車両が渋滞を吸収する役割を果たしている結果を示した研究もある。2つの結果は相反するようにも見えるが、後で論ずるように先方車の運転者が高齢者であることを後続車に認識させる方法で事故防止と渋滞緩和策として妥協できる。

## 3-3-3 実験方法

### (ア) 被験者

被験者は高齢者と若年者グループに分かれる。高齢者グループは65～80才の男性で平均年齢は68.5才（N=32,  $\sigma=4$ ）、平均運転歴は45.7年、平均事故件数は0.8回、平均運転時間は月6.5日であった。被験者には5千円の手当を支給した。若年者グループは21～25才の男性で平均年齢は22.35才（N=30,  $\sigma=1.1$ ）、平均運転歴は45.7年、平均事故件数は0.8回、平均運転時間は月5.8日であった。

### (イ) 実験装置

ドライビングシミュレータ、アイマークレコーダー、ATMT(Advanced trail-making test) 計測ソフトウェアが用いられた。

### ① ドライビングシミュレータ (Driving simulator)

本実験で使われたドライビングシミュレータは実車の運転席で作られた固定式、OpenGL ベースの64BITホストパソコン、32BIT制御パソコン、135度3チャンネルスクリーン、XGA級のプロジェクター、UC/WIN Road 3.1 (フォーラム8社製) シミュレーションソフトで構成される。道路空間は東京都世田谷区に位置する瀬田交差点で、実測した交通容量が設定されマイクロシミュレーションで周辺車両が制御される。

**Table 3-8 実験環境で設定された交通量**

Root Name Derection Lane	No. 466 (KanPachi)								NO. 246 (Tamagawa)								NO. 427				
	WB(Takaido)				EB(Todoroki)				NB(Sinbuva)				SB(Mizonokuchi)				ESB				
	LT	TH1	TH2	RT	LT	TH1	TH2	RT	LT	TH	RT	TH*	TH*	LT	TH	RT	TH*	TH*	LT	TH	RT
Signal Phasing	φ1		φ2		φ1		φ2		φ5		φ4		φ5		φ4		φ3				
Green Time(sec)	65		15		78		22		13		12		13		12		15				
Heavy Vehicle	.09	.14	.27	.33	.15	.15	.27	.12	.29	.06	.11	.13	.16	.22	.12	.16	.16	.22	.0	.1	.2
T1 (vph)	87	220	181	110	90	159	153	50	109	12	78	150	148	63	13	85	150	148	16	20	10
	597				451				497				457				45				
T2 (vph)	173	439	362	220	179	317	306	100	218	24	156	300	296	125	25	170	300	296	32	39	19
	1,193				901				993				915				90				
T3 (vph)	260	659	542	329	269	476	458	149	327	36	234	449	443	188	38	254	449	443	48	59	29
	1,790				1,352				1,490				1,372				135				
T4 (vph)	346	878	723	439	358	634	611	199	436	48	312	599	591	250	50	339	599	591	64	78	38
	2,386				1,802				1,986				1,829				180				
c.f.	Footbridge				19sec (φ3)				Footbridge				*Underpass				Footbridge				

Note:  
 1) EB: East Bound, WB: West Bound, NB: North Bound, SB: South Bound, ESB: East-South Bound  
 2) LT: Left Turn lane, TH: Through lane, RT: Right Turn lane



**Figure 3-10 ドライビングシミュレータの映像 (例)**

### ② アイマークレコーダー (Eye mark recorder)

被験者の眼運動を計するために EMR-8B アイマークレコーダー (NAC Image Technology Inc. 製) が用いられた。EMR-8B は両眼タイプで近赤外線を使って眼球の角度 (分解能: 0.1 度)、輻輳角 (分解能: 1mm)、瞳孔の大きさ (分解能: 0.02mm) を 60 H Z で計測できる。Figure 3-11 は EMR-8B の計測原理を表している。

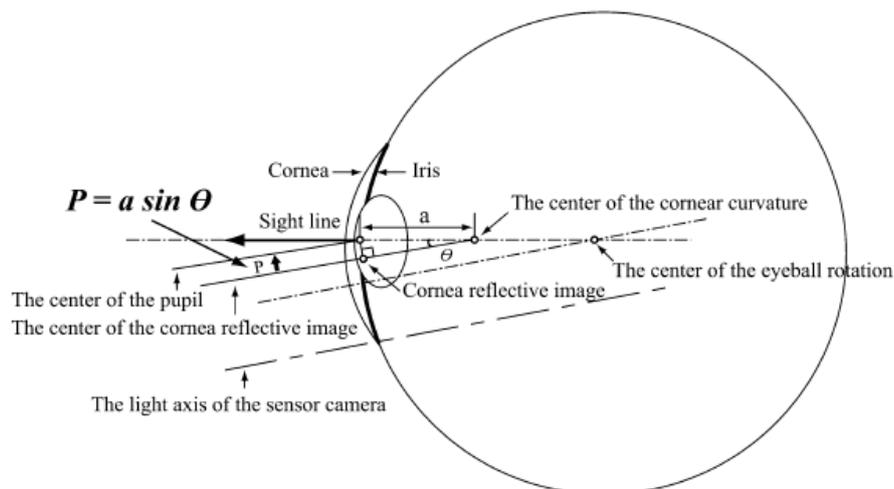


Figure 3-11 The principle of operation of the EMR-8B eye mark recorder

### ③ ATMT (Advanced trail-making test)

ATMT (Advanced Trail Making Test) は総合医科学研究所で開発された探索反応時間計測システムでPCのスクリーン上に表示されたターゲットボタンを押す検査である。検査は難易度によって3種類の検査がある。Mode-Aはターゲットが固定され1から15番まで提示されるターゲットを順番におして計測する。Mode-Bは押されたターゲットが消え新しいターゲットが提示される。Mode-Cは一回ターゲットが押されるとすべてのターゲットが再配置される。即ち、Mode-A、Mode-B、Mode-Cの順に難易度が高くなる。

#### 3-3-4 実験結果

##### ① 探索反応時間 (Search RT)

二つのグループ(高齢者、若年者)における探索反応時間の計測結果は(Table 3-9)、(a) Mode-A,  $F(1, 60)=12.70$ ,  $t(60)=7.61$ ,  $p<0.05$ , (b) Mode-B,  $F(1, 60)=9.05$ ,  $t(60)=7.63$ ,  $p<0.05$ , (c) Mode-C,  $F(1, 60)=13.00$ ,  $t(60)=7.98$ ,  $p<0.05$ であった。

Figure 3-12は作業の複雑度の差における探索反応時間の差を表す。実験の結果、高齢者と若年者グループの間には探索時間に有意差がみられる。特に、複雑度が高くなるとその差が大きくなる特徴がみられた(Mode-A=0.88sec, Mode-B=0.97sec, Mode-C=1.21sec)。それは、加齢によって単純な反応時間の遅れだけでなく、複雑な情報処理に対する対応能力がさらに落ちることを示唆する。

Table 3-9 Comparison of the search RT between the two driver groups

	Older drivers			Young drivers			Independent Samples Test					95% C.I.				
	N	Mean	S.D.	N	Mean	S.D.	F	Sig.	t	df	Sig.	Dif.(sec)	S.E.	Upper	Lower	P < .05
Mode_A	32	1.86	0.55	30	0.98	0.31	12.70	.00	7.61	60	.00	.88	.12	.65	1.11	**
Mode_B	32	2.01	0.67	30	1.04	0.19	9.05	.00	7.63	60	.00	.97	.13	.72	1.22	**
Mode_C	32	2.88	0.80	30	1.67	0.24	13.00	.00	7.98	60	.00	1.21	.15	.91	1.52	**

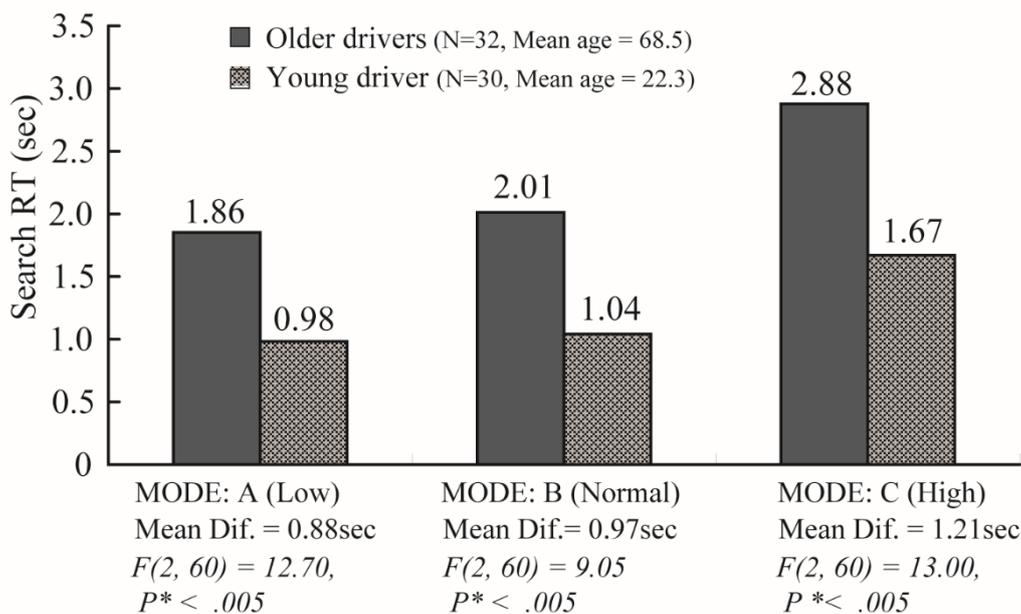


Figure 3-12 Search RT as determined by the ATMT

② 駐車車両に対する危険回避行動

Figure 3-13 は駐車車両に対する危険回避行動を表したものである。Figure 3-13 において、各々の行動ポイントは次のように定義された。

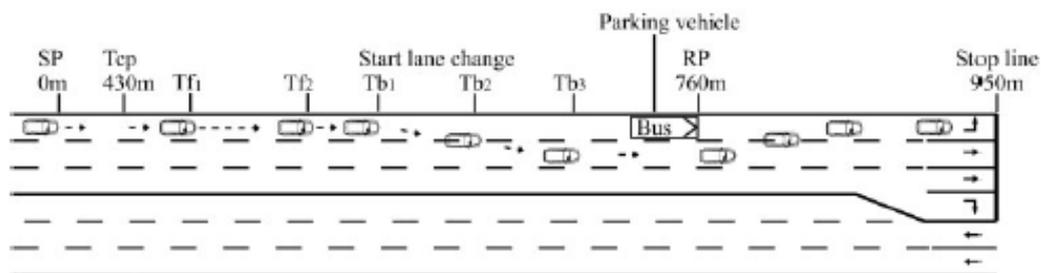


Figure 3-13 Definition of a fixation-action time point by the parked vehicle (hazard)

ここで、

- RP-T<sub>cp</sub>*: from the cognizable point of parking vehicle to releasing the parking vehicle,
- T<sub>f1</sub>-T<sub>cp</sub>*: from the cognizable point of parking vehicle to the first parking vehicle fixation,
- T<sub>b1</sub>-T<sub>cp</sub>*: from the cognizable point of parking vehicle to starting lane change,
- T<sub>b1</sub>-T<sub>f2</sub>*: from fixation of the parking vehicle the just before starting lane change to starting the lane change,
- T<sub>b1</sub>-T<sub>f1</sub>*: from the first fixation of the parking to starting lane change,
- T<sub>b3</sub>-T<sub>b1</sub>*: from starting the lane change to finishing lane change,
- T<sub>b2</sub>-T<sub>b1</sub>*: from start lane change to passing the lane marking,
- T<sub>b3</sub>-T<sub>b2</sub>*: from passing the lane marking to finishing the lane change, and
- RP-T<sub>b3</sub>*: from finishing the lane change to releasing the parking vehicle.
- SP*: Start point. (Time = 0 sec)
- T<sub>cp</sub>*: the cognizable point of parking vehicle on road geometry. (430m from start point)
- T<sub>f1</sub>*: a point where driver gaze at the parking vehicle for the first time.
- T<sub>f2</sub>*: a point where driver gaze at the parking before lane change start.
- T<sub>b1</sub>*: a point where driver starts lane crossing from the first lane to the second lane.
- T<sub>b2</sub>*: a point where driver passes the lane marking between the first lane and the second lane.
- T<sub>b3</sub>*: a point where driver finish a lane change.
- RP*: a point where driver release from the parking vehicle (hazard).

Table 3-10 は2つのグループにおいて交通量の違いによる注視回数、注視時間、注視速度を比較したもので、すべての評価項目で高齢者と若年者グループの有意差が見られた。

即ち、高齢者グループは若年者グループに比べ注視回数が少ない、平均注視時間が短い、注視速度が遅い結果が見られた。しかし、作業の複雑度と思われた交通量の差による高齢者と若年者の有意差は見られなかった。

**Table 3-10 Comparison of the eye movement characteristics between the two groups**

		Older driver			Younger driver			Independent Samples Test				95% C.I.		P < .05		
		N	Mean	S.D.	N	Mean	S.D.	F	Sig.	t	df	Sig.	Dif.		Lower	Upper
T1 : Free flow	N. of Fixation	17	85.76	24.76	16	215.14	74.21	6.22	.02	-6.80	31	.00	-129.38	-168.17	-90.59	**
	Fixation time	17	.32	.07	16	.50	.10	2.83	.10	-4.14	31	.00	-.16	-.24	-.08	**
	Fixation speed	17	25.75	8.96	16	52.29	13.59	3.28	.08	-6.66	31	.00	-26.55	-34.67	-18.42	**
T2 : Cruising	N. of Fixation	17	75.53	26.37	16	246.40	87.83	9.77	.00	-7.67	31	.00	-170.87	-216.31	-125.43	**
	Fixation time	17	.34	.10	16	.50	.13	.70	.41	-5.80	31	.00	-.17	-.24	-.11	**
	Fixation speed	17	26.41	14.01	16	56.79	13.01	.14	.72	-6.44	31	.00	-30.38	-39.99	-20.76	**
T3 : Braking	N. of Fixation	17	84.47	36.58	16	243.56	110.77	15.78	.00	-5.61	31	.00	-159.09	-216.92	-101.26	**
	Fixation time	17	23.66	10.90	16	50.08	10.99	13.66	.00	-4.66	31	.00	-.17	-.24	-.11	**
	Fixation speed	17	.31	.05	16	.48	.14	.07	.80	-6.93	31	.00	-26.42	-34.19	-18.64	**
T4 : Congestion	N. of Fixation	17	71.38	32.25	16	231.13	89.17	18.53	.00	-6.93	31	.00	-159.76	-206.80	-112.72	**
	Fixation time	17	.29	.06	16	.47	.12	4.17	.05	-5.33	31	.00	-.18	-.24	-.11	**
	Fixation speed	17	23.31	13.47	16	46.71	9.35	1.23	.28	-5.76	31	.00	-23.40	-31.68	-15.12	**

Note.

1) Unit: Fixation time (sec), Fixation speed (deg/sec)

Table 3-11 Comparison of the fixation-action point between the two driver groups

		Older driver			Younger driver			Independent Samples Test					95% C.I.		P < .05	
		N	Mean	S.D.	N	Mean	S.D.	F	Sig.	t	df	Dif.(sec)	Sig.	Upper		Lower
T1 : Free flow	RP-T <sub>cp</sub>	17	34.66	10.42	16	19.52	3.39	16.36	.00	5.54	31.00	15.14	.00	9.56	20.71	**
	T <sub>fl</sub> -T <sub>cp</sub>	17	4.83	5.24	16	6.91	4.83	.26	.62	-1.18	31.00	-2.08	.25	-5.66	1.51	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>cp</sub>	17	21.73	8.26	16	12.64	3.18	6.95	.01	4.12	31.00	9.09	.00	4.59	13.59	**
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	3.66	7.78	16	1.70	1.36	2.59	.12	.99	31.00	1.96	.33	-2.07	5.99	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	16.90	8.57	16	5.73	2.97	14.78	.00	4.94	31.00	11.17	.00	6.55	15.78	**
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b1</sub>	17	7.43	4.46	16	4.28	2.20	4.77	.04	2.55	31.00	3.15	.02	.63	5.67	**
	T <sub>b2</sub> -T <sub>b1</sub>	17	4.55	3.46	16	2.33	1.40	6.99	.01	2.39	31.00	2.22	.02	.33	4.12	**
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b2</sub>	17	2.88	1.64	16	1.95	1.27	2.03	.16	1.80	31.00	.92	.08	-.12	1.97	
	RP-T <sub>b3</sub>	17	5.50	3.41	16	2.60	1.06	10.72	.00	3.25	31.00	2.90	.00	1.08	4.72	**
T2 : Cruising	RP-T <sub>cp</sub>	17	30.89	5.11	16	23.41	4.73	.52	.48	4.36	31.00	7.48	.00	3.98	10.98	**
	T <sub>fl</sub> -T <sub>cp</sub>	17	9.99	6.90	16	11.14	5.03	2.84	.10	-.54	31.00	-1.15	.59	-5.46	3.16	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>cp</sub>	17	19.37	6.55	16	17.10	3.79	2.23	.15	1.21	31.00	2.27	.24	-1.56	6.11	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	2.08	1.79	16	1.04	0.78	3.35	.08	2.13	31.00	1.04	.04	.04	2.03	**
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	9.38	5.34	16	5.96	3.07	1.15	.29	2.24	31.00	3.42	.03	.31	6.54	**
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b1</sub>	17	6.43	2.57	16	3.84	1.28	5.80	.02	3.64	31.00	2.60	.00	1.14	4.05	**
	T <sub>b2</sub> -T <sub>b1</sub>	17	4.04	1.74	16	1.88	0.79	5.12	.03	4.54	31.00	2.16	.00	1.19	3.13	**
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b2</sub>	17	2.39	1.22	16	1.96	0.79	3.41	.07	1.22	31.00	.44	.23	-.30	1.17	
	RP-T <sub>b3</sub>	17	5.08	3.46	16	2.47	1.23	11.62	.00	2.85	31.00	2.61	.01	.74	4.48	**
T3 : Braking	RP-T <sub>cp</sub>	17	33.99	4.25	16	30.73	9.02	1.77	.19	1.34	31.00	3.26	.19	-1.70	8.22	
	T <sub>fl</sub> -T <sub>cp</sub>	17	9.36	7.06	16	10.07	6.78	.11	.75	-.29	31.00	-.71	.77	-5.63	4.21	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>cp</sub>	17	18.37	6.58	16	17.29	7.09	.12	.74	.45	31.00	1.08	.65	-3.77	5.93	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	3.53	3.72	16	1.52	2.06	.84	.37	1.90	31.00	2.01	.07	-.15	4.16	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	9.01	4.44	16	7.22	7.08	4.13	.05	.87	31.00	1.79	.39	-2.38	5.96	
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b1</sub>	17	9.38	3.48	16	5.40	1.84	2.34	.14	4.07	31.00	3.98	.00	1.99	5.98	**
	T <sub>b2</sub> -T <sub>b1</sub>	17	6.11	2.51	16	3.12	1.75	1.82	.19	3.94	31.00	2.99	.00	1.44	4.53	**
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b2</sub>	17	3.27	1.62	16	2.27	0.77	4.44	.04	2.24	31.00	1.00	.03	.09	1.90	**
	RP-T <sub>b3</sub>	17	6.24	4.72	16	8.04	13.38	2.46	.13	-.52	31.00	-1.80	.61	-8.84	5.24	
T4 : Congestion	RP-T <sub>cp</sub>	17	38.18	5.89	16	31.38	4.71	.06	.80	3.65	31.00	6.80	.00	3.00	10.60	**
	T <sub>fl</sub> -T <sub>cp</sub>	17	12.66	7.60	16	14.88	7.30	.01	.93	-.85	31.00	-2.21	.40	-7.51	3.09	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>cp</sub>	17	19.56	7.69	16	21.20	4.16	2.84	.10	-.75	31.00	-1.64	.46	-6.07	2.79	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	2.61	3.32	16	1.82	1.50	.71	.41	.87	31.00	.79	.39	-1.06	2.64	
	T <sub>b1</sub> -T <sub>fl</sub>	17	6.90	4.82	16	6.33	7.40	3.01	.09	.27	31.00	.57	.79	-3.83	4.98	
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b1</sub>	17	10.02	4.43	16	6.15	2.43	2.96	.10	3.09	31.00	3.88	.00	1.31	6.44	**
	T <sub>b2</sub> -T <sub>b1</sub>	17	6.04	2.81	16	3.74	1.98	2.56	.12	2.71	31.00	2.31	.01	.57	4.04	**
	T <sub>b3</sub> -T <sub>b2</sub>	17	3.98	2.29	16	2.41	1.11	1.10	.30	2.48	31.00	1.57	.02	.28	2.86	**
	RP-T <sub>b3</sub>	17	8.59	6.50	16	4.03	2.38	7.51	.01	2.64	31.00	4.56	.01	1.04	8.08	**

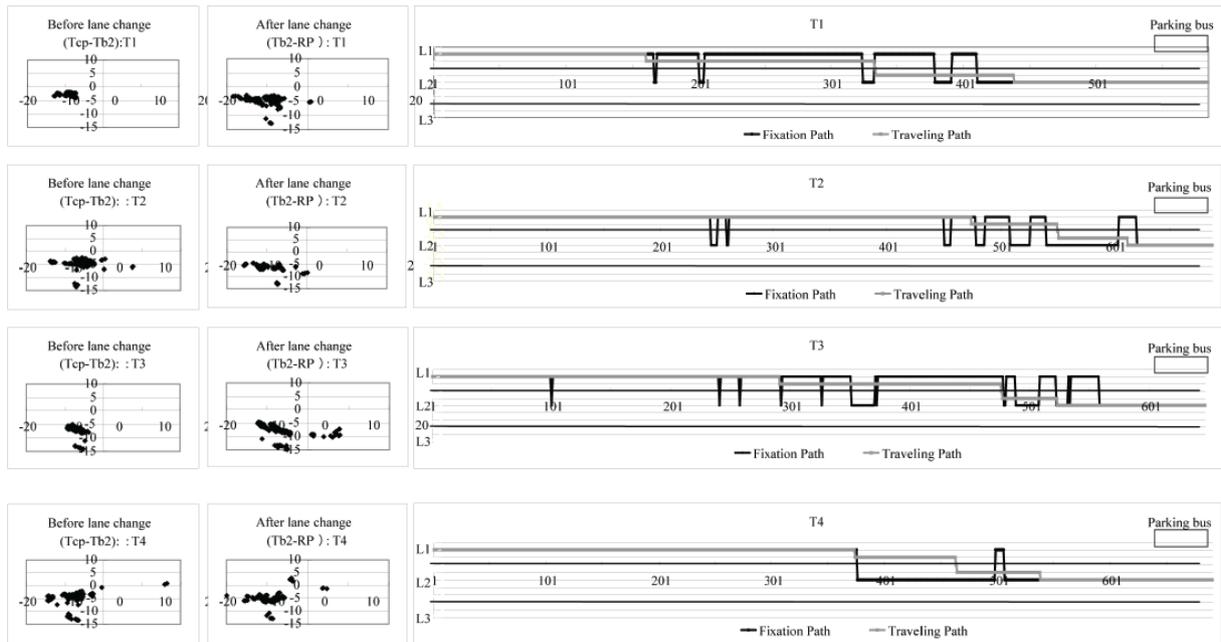
### 3-3-5 結論

少子高齢社会で、高齢者の交通事故が増えているのは事実である。しかし、高齢者の交通事故問題を単に認知能力の低下や運動能力の低下だけを原因にすることは問題の解決策にならない。それは原因というより自然現象であるかもしれない。

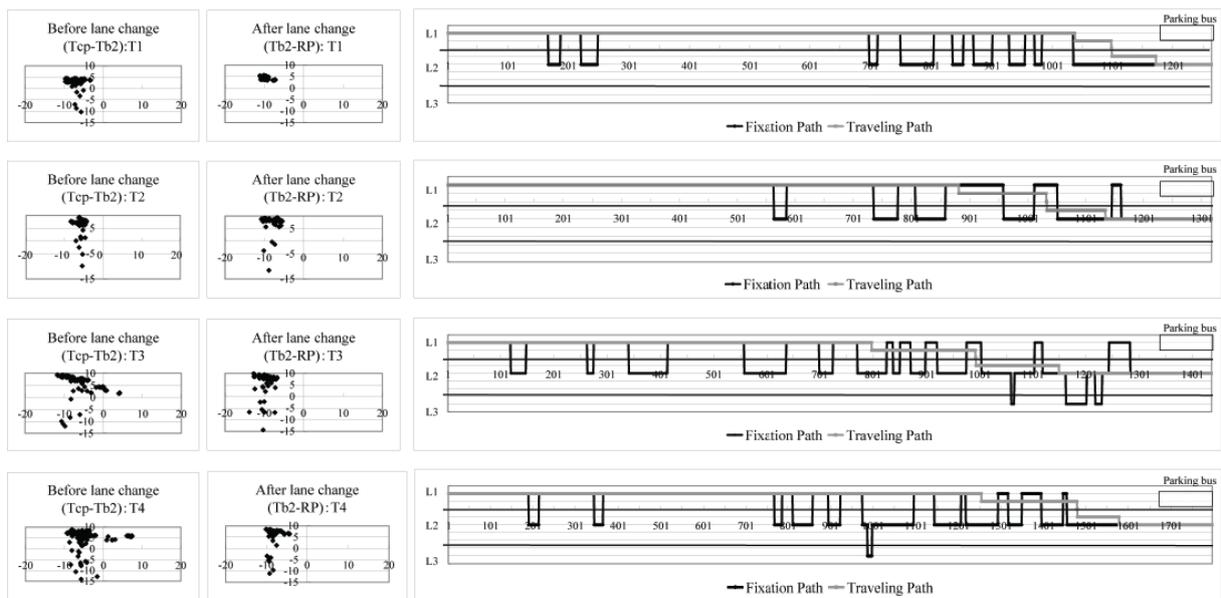
Figure 3-14 は交通量を 4 段階に分け運転負荷を増やししながら、駐車車両に対する高齢者と若年者の注視挙動と危険回避行動を行った地点 (Action Point) を比較した例である。高齢者の実験結果 (a) では交通量が増加することに連れ一車線にある駐車車両と駐車車両を回避するために 2 車線の車両を注視する頻度が減っている。その反面、若年者の実験結果 (b) では交通量が増加することに連れ一車線にある駐車車両と駐車車両を回避するために 2 車線の車両を注視する頻度が増えている。特に、飽和交通量に近い状況 (上から 4 番目の図) で高齢者は 2 車線を殆ど注視しなくなり駐車車両を通過する直前に無理な車線変更をしている傾向がある。それは、高齢者が若年者に比べ複雑な環境での情報処理能力が低下し、同時に処理できる注意資源が若年者に比べ少ないことを示唆するものである。

そのような結果から、本研究の結論としては次のような解決策を提案する。

- A T M T 実験で加齢によって認知反応時間が遅くなることを再度確認された。単に、認知反応時間が遅れるだけで事故を起こりやすいとは言い切れない。重要なポイントは、危険を事前に予測することが出来れば反応時間が少し遅れても事故を回避できることである。即ち、高齢者が自身の認知能力が鈍化していることを理解し、防御運転をする方法と訓練をすることで事故を防げることが出来る。
- 駐車車両の危険回避実験で、高齢者が駐車車両 (危険) を注視するポイント危険認知距離 が短いことが確認された。その原因とした周辺環境に対して注視回数が少ないことと注視時間が短いことが上げられた。即ち、高齢者が危険を早目に認知するよう運転支援をする方法を検討することで危険に対応する余裕時間を増やすことが出来る。それは、本研究で提案された統合運転者モデルの評価パラメータの 1 つである利用可能な時間を増やすことにつながる。利用可能な時間を増やすことで高い認知レベルを維持することが出来る
- 最後、高齢運転者の交通事故を減らすためには同じ道路空間を利用するすべての者が高齢者の特徴を理解し互いに配慮する交通文化を作ることが最も重である。



(a) Example of fixation eye movement and an older drivers' hazard avoidance behavior



(b) Example of fixation eye movement and a younger drivers' hazard avoidance behavior.

**Figure 3-14** Example of fixation eye movement for (a) an older driver's hazard avoidance behaviours and (b) a younger driver's hazard avoidance behaviours

## 第4章 統合運転者行動制御モデル

本章で提案される統合運転者行動生業モデル (Joint Driver Model ; JDM) は運転者が直面している複雑な運転環境からヒューマンエラーの可能性を推定することを目指している。しかし、本研究で提案されたモデルが運転者のすべての行動 (タスク) を記述し次の行動を予測できるものではない。提案されたモデルは Hollnagel の状況決定制御モデル (COCOM) に基づいて運転者の情報処理過程を認知的な観点からモデル化することを志している。

運転者の行動制御をモデル化することにおいて、交通環境の変化は運転者の情報処理の原点であり、運転者の次の行動を決定する手掛かりとなる状況を理解することが重要である。統合運転者モデルは運転者のヒューマンエラーを引き起こす可能性のあるパラメータを同定するのに既存の交通工学、人間工学、自動車力学の観点を合わせ新たなそれぞれのモデルに含まれている長所採ったものであり、現在もモデルをアップグレードするために研究を続けている。

## 第4章 統合運転者行動制御モデル

### 4-1 概要

交通システムの高度情報化により、目的地までの最短経路、渋滞情報、安全運転支援等様々な方向からドライバーの的確な意思決定や行動判断に必要な情報を提供することができた。一方、交通システムの高度情報化によりシステムが巨大化、複雑化されシステムの運用者（Operator）で、監視者（Monitor）である運転者の精神的・物理的な負荷を増加させ、人間が同時に処理可能な情報量と遂行可能な作業数の限界を超える問題を引起した。人間はその限界を超えると、作業パフォーマンスが急激に低下され、ヒューマンエラーの主な原因になる。本研究は、従来の交通流理論、車両力学理論、認知理論における運転者の認知行動に関する知見と実験結果を基に、高度情報化、複雑化された交通環境下で運転者がどのように周辺環境を認知・行動制御を行うかを交通システム全体における人間信頼性の観点から広い意味での運転行動モデルを提案することを目的としている。

### 4-2 運転者モデルに関する既存の研究

#### 4-2-1 既存研究の流れ

運転者モデルは主に認知工学理論、交通流理論、車両力学理論で行われている。Figure 4-1 は既存研究の流れを図式化したものである。

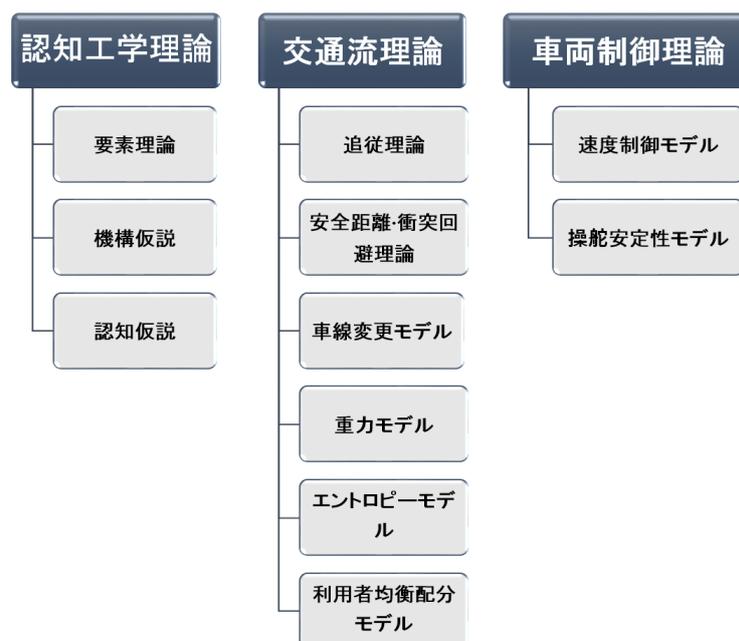


Figure 4-1 既存研究における運転者モデル

#### 4-2-2 認知工学理論

認知工学分野では、外部環境に対して視認性がよく危険を察知しやすい道路環境、運転が快適にできて疲れにくい車を目指し、マンマシーンインターペースの観点からの研究が行われてきた。例えば、運転者の脳波、眼球運動、心電図、筋電図、皮膚電位(発汗)等の物理実験法と NASA-TLX、SWAT のような心理実験法など様々なメンタルモデルが提案されている。認知モデルは、人間の認知行動に対するアプローチ方法から三つの仮説、①要素仮説 (Atomistic assumption)、②機構仮説 (Mechanistic assumption)、③認知仮説 (Cognition assumption) に分類できる。

要素仮説は、機械の機能は各々の要素を結合したもので、作業の分割との関係から Taylor の「科学的管理 (Scientific management)」にその起源がある。要素仮説は、人間に対する刺激-生体-反応 (Stimulus-Organism-Response; S-O-R)、FTA (故障の木解析; Fault Tree Analysis)、FEMA (故障モード影響解析; Failure Mode and Effect Analysis)、THERP (ヒューマンエラー率予測技法; Technique for Human Error Rate Prediction) 等であり、システム信頼性分析に大きな影響を与えた。しかし、要素仮説は、システム内の人間を決定論的な機械と見なしているため、機械と人間の相互作用が欠落しているという問題がある。

機構仮説は、人間の心を情報処理システム (IPS; Information Process System) としてみる観点から情報処理論にその起源がある。情報処理理論では、人間の行動をすべていくつかの要素ステップに分解し、システムの相互作用を非常に明確に表現する。しかし、システム内の人間の行為を決定論的に見る見方は、要素仮説と変わらない。機構仮説として広く知られている認知モデルは、Rasmussen によって提案された梯子モデル (Step ladder model) があげられる。梯子モデルは、複雑な人間の信頼性問題を次の3つの行動階層、①スキルベース行動 (Skill-based behavior)、②ルールベース行動 (Rule-based behavior)、③知識ベース行動 (Knowledge-based behavior) に分け扱うことを提案したものであり、S-R-K モデルとも呼ばれる<sup>2)</sup>。

国内では、1986年に小島が梯子モデルとファジー推論を融合し交差点右折時の運転者-車系の運転者モデルを提案した例がある<sup>3)</sup>。これは、機構仮説による決定論的なモデルの限界を乗り越えることを試みた研究例であるが、ITSのような大規模なシステムを評価するための後続研究の報告は見当たらない。

海外では、1985年に Minchon によって提案された運転者行動の階層構造がある。この研究では、運転者行動を認知判断のレベルによって戦略的行動、戦術的行動、運用的行動に分類した。しかし、Minchon のモデルは定性的な評価方法であり、結果的に梯子モデルの3つの行動階層とほぼ同じである<sup>4)</sup>。

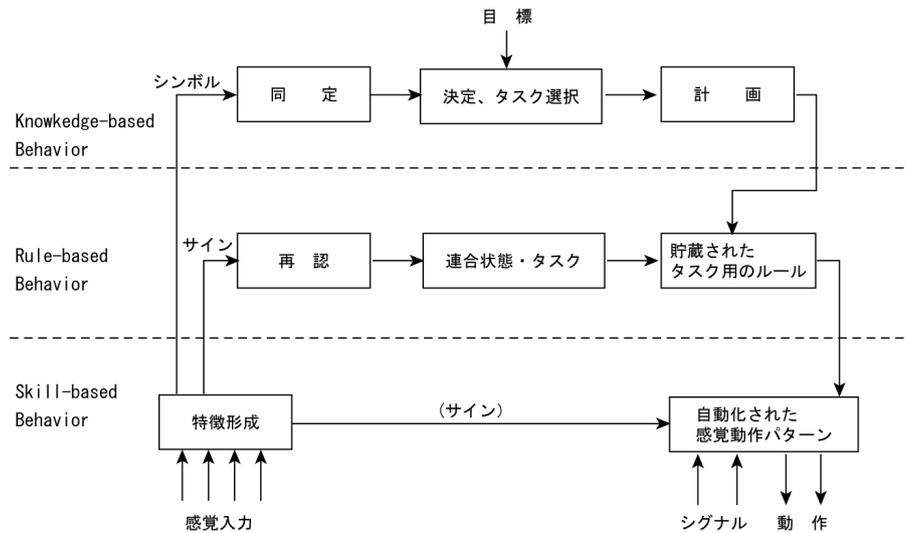


Figure 4-2 Rasmussen の梯子モデル(1983)

認知仮説は、人間の認知作用が能動的なものであって、反応的なものではない見方をしている。即ち、システム内の人間の行為は前もって提示された決定論的なものではなく、その時の状況によって形成される自律的な過程または機能の集合としてみなされる。認知仮説で最も知れているモデルとしては、1991年に Hollnagel によって提案された状況決定制御モデル(COCOM; Contextual Control model)があげられる。

COCOM では、ある人が直面している状況に対して変動する次の4つ行動制御モード、戦略的制御(strategic control mode)、戦術的制御(tactical control mode)、機会主義的制御(opportunistic control mode)、混乱状態制御(scrambled control mode)を提案している。戦略的制御は合理的な目標を予め立案し、その目標を達成するための戦略を決定している状態を、戦術的制御モードは状況に対する適切な行為のテンプレートである計画や手順、規定などを見つけ、それにしたがって行動している状態をいう。機会主義的制御モードは次の行為が現在の状況のみに基づいて選択される状態をいう。混乱状態制御モードはパニックに陥っている状態のことである。現在の状況に対する次の行為は無作為に選択させる。

なお、制御モードは次の4つパラメータ、①利用可能な時間、②利用可能な計画、③同時目標数、④事象の認知範囲等によって遷移する<sup>5)</sup>。

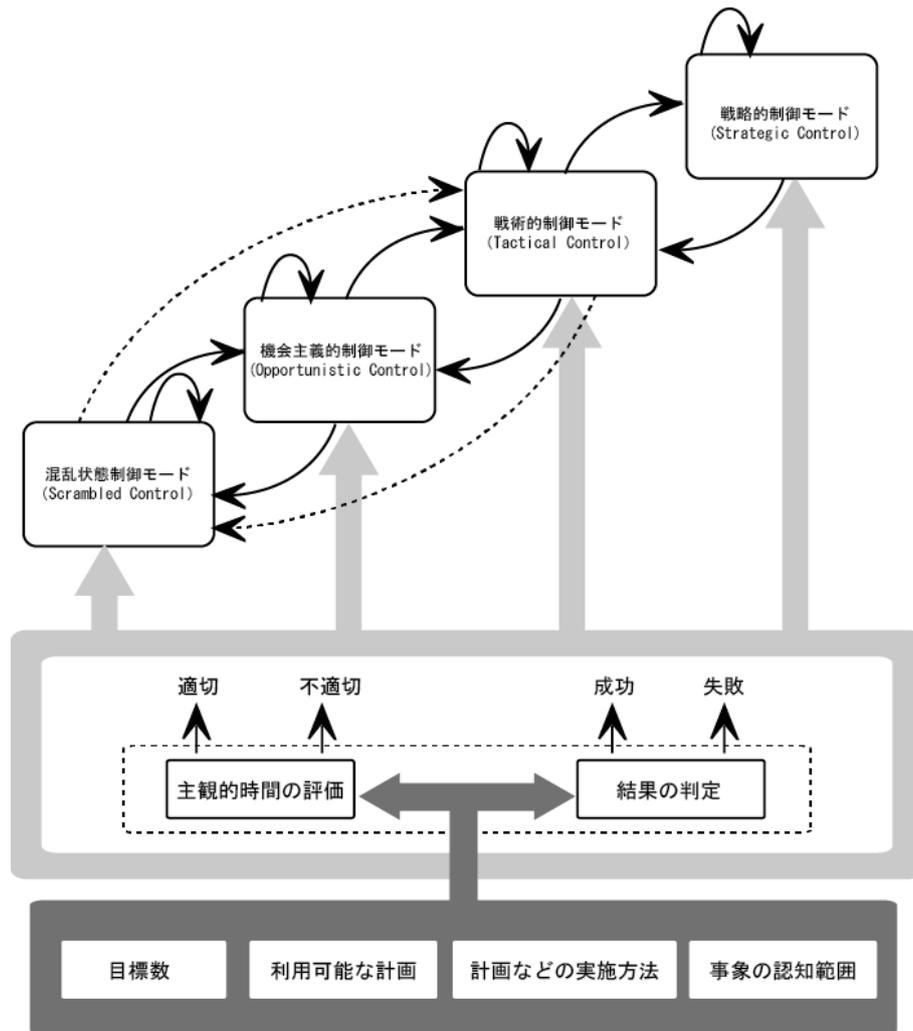


Figure 4-3 状況決定制御モデルの内部構造

### 4-2-3 交通流理論

交通流理論分野では、定点観測、車両感知器、ドライブレコーダ等を用いて運転者の行動を観察し、追従走行モデル(car following model)、安全距離・衝突回避モデル(safety distance or collision avoidance model)、車線変更モデル(lane changing model)、等が提案されている。特に、追従走行モデルはミクロ交通流モデルの中核であり、ショックウェーブ、多重衝突等の交通流の安定性評価、交通渋滞のメカニズムの分析に用いられるほか、ACC(adaptive cruise control)、CA(collision avoidance)等のASV(Advanced Safety Vehicle)にも応用されている。General Motorsの理論(以下、GMモデル)は追従理論の代表的なものであり、追従車両の反応(response)を前方車両の速度変化による前方車両と追従車両の相対速度(stimuli)を包括的走行実験に基づいた関数で表わしたもので、巨視的交通理論と微視的交通流理論との数学的架橋の役割を果たしている。なお、刺激(前方車両の速度変化)に対する運転者の反応(追従車両の速度制御)を「反応(出力) = 反応強度(感度) × 刺激(入力)」に表

した点から、認知工学理論における要素仮説にその起源があると言える。式4-1は、継続的に行われた走行実験の結果を基に、感度パラメータを改良した GM モデルの最終モデル（GHR モデル）であり、多くの文献で追従モデルの基本式としてあげられ、一般追従モデルとも呼ばれている<sup>37)</sup>。

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha_{l,m} [\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [x_n(t) - x_{n+1}(t)] \quad (\text{式 4-1})$$

安全距離・衝突回避モデル（Safety distance or collision avoidance model）は、1959年米谷と佐々木によって初めに提案されたもので、GHR モデルにおける刺激-反応の関係関数の代わりに運転者が先方車の予期されていない行動に対して衝突回避ができる安全な追従距離を関数で表したものである<sup>44),47)</sup>。

車線変更モデルは、運転者が現在の車線から別の車線へ移動する際に行われる「認知-判断-行動」の過程を関数で表したものである。運転者の車線変更には、運転者が現在の車線での混雑を避けるために自発的に行う場合と現在の走行車線から危険を回避するために不本意に行われる場合がある。式3は、先方車と追従車両との速度差による心理的な圧迫（Pressure）を数式化したモデルで、現在の走行車両で感じる心理的な圧迫感（P1）が目的車線（車線変更後の車線）の潜在的先方車との速度差による心理的な圧迫感（P2）より大きい場合車線変更を決断する。

$$P = \frac{(v_{des} - v_{obs})}{2 * S} \quad (\text{式 4-2})$$

ここで、

P=圧迫感(Pressure)  $v_{des}$ =先方車の希望速度  $v_{obs}$ =先方車の観測速度 S=相対距離

さらに、車線変更には目的車線の潜在的先方車と後続車（車線変更後の前後車両）との許容ギャップが最小安全距離とのより長いかが否かが車線変更を実行する決め手となる。

#### 4-2-4 車両力学理論

車両力学理論における運転者モデルは、運転者の操作に対する車両の反応を関数で表したものであり、道路の形状、路面状態、障害物、他車両の動き、外乱（空気抵抗、摩擦係数）等の様々な交通環境に対する運転者のステアリング操作、アクセル、ブレーキペダル操作特性を力学理論に基づいて数式化した速度制御モデル（speed control model）、操舵安定性モデル（steering stability model）、道路モデル（road model）等が提案されている。最近では、車線離脱警告システム（LDWS; Lane Departure

Warning System)、LKS(Lane Keeping System)、ACC(Adaptive Cruise Control)、CA(collision Avoidance)等の先進安全自動車(ASV)の開発にも応用されている。

速度制御モデル(speed control model)は、変速、アクセル、及びブレーキ操作により運転者が希望する速度を維持する行動をモデル化したものである。即ち、他車両の干渉を受けない時には巡航速度を、他車両の干渉を受ける時には安全な距離を保つようにフィードバック制御を行い、希望速度と実際の速度との誤差をゼロにする努力を常に続ける運転行動を数式化したものである。操舵安定性モデルは、ステアリングに操作による運転者の方向制御命令に対する車両の横方向の運動特性を数式化したもので、道路の中心部から車両の中心までの距離の時系列的変位を積分した関数（積分制御）で表す。即ち、運転者のステアリング操作は車両を道路（車線）の中心から離れないようにフィードバック制御して、その誤差をゼロにする努力を常に続ける行動を数式化したものである。道路モデルは、平面線形、縦断線形、勾配等による車両の運動特性（例、遠心加速度）や運転者の認知特性（例、視認距離）を数式化したものであり、道路設計において重要な要素である。

### 4-3 統合運転車制御モデル

本章では、統合運転者モデルの構造とその詳細について述べる。統合運転者モデルは、従来の研究から同定された7つのモデルパラメータ（入力）、入力パラメータ情報を基にファジー推論を行う推論機構（Fuzzy Inference System; FIS）、Hollnagelの状況決定制御モデルに基づいて運転者の行動制御レベルを推定する出力メンバシップ関数から構成される。

入力パラメータは、運転者の行動制御レベルを推定するための説明変数である。統合運転者モデルには、既存の研究からその計測過程と結果から信頼性が高いと知られている結果をメンバシップ関数（Membership Function）の中に組み込まれている。被験者から入力されたデータはメンバシップ関数に組み込まれた指標と比較しその結果を自然言語に表現され、If-then形式の関数群であるファジー演算子（Fuzzy operator）に入力される。ファジー演算子は、複数入力パラメータからファジールールに基づいて運転者の行動制御レベルを4つのモード、戦略的制御(strategic control mode)、戦術的制御(tactical control mode)、機会主義的制御(opportunistic control mode)、混乱状態制御(scrambled control mode)に推定する。

統合運転者モデルは、次に示す7つのパラメータから構成される。被験者の実測データは「1×7」の行列、[ブレーキ認知反応時間, ステアリング認知反応時間, 注視運動の安定性, 追従安定性, 操舵安定性, 利用可能な時間, 運転者への安全運転支援水準]として入力される。

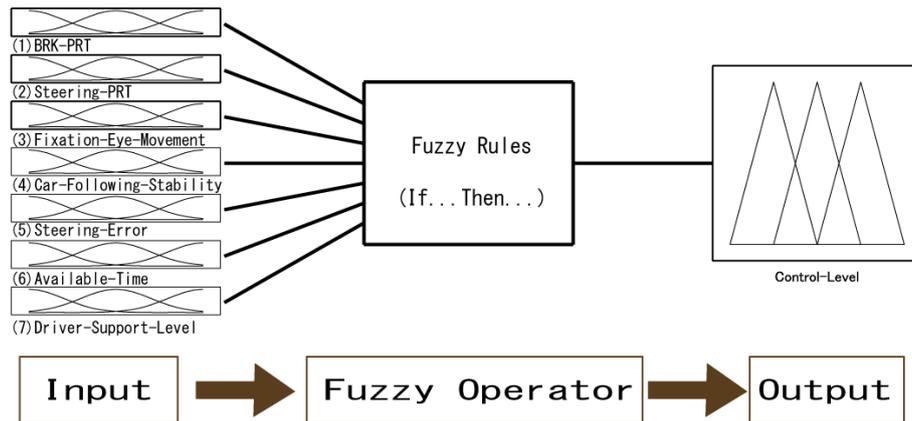


Figure 4-4 統合運転者モデルの構造

#### 4-3-1 ブレーキ認知反応時間 (Brake perception reaction time)

認知・反応時間に関する研究は古くから行われて来た。反応時間は刺激の種類、強度、反応動作の種類などの条件によって異なると知られている。道路構造令では運転者の認知・反応時間を2.5秒と設定している。それは、道路の視認距離を確保することが目的であり、視界内に障害物が突然現れる場合の反応時間がランプの点灯などの認知反応時間より長と想定している。自動車の操作系においてブレーキ操作は、車両を停止させるだけでなく速度の制御、危険回避などを行うために欠かせないものであり、アクセル操作と切替えられる場合が多い。ブレーキ反応時間は、ブレーキの操作が求められる外部刺激を感知してから認知・判断までの時間 (CDT)、行動判断の結果を筋肉に伝え足をブレーキまで移動して適切な量を操作するまでの時間 (CMT) に構成される。

Hooper と McGee は、感覚器による刺激の受容から運動系による出力までの一連の過程を分解し連鎖モデル(Chaining model of PRT)を提案した(Table 4-1)。

<sup>10)</sup>。

$$\text{PRT} = \text{CDT} + \text{CMT} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (\text{式 4-3})$$

ここで、

PRT: 認知・反応時間 (Perception response time)

CDT: 認知判断時間 (Cognition and decision Time)

CMT: 制御移動時間 (Control movement Time)

$\varepsilon_1$ : 信号伝達の遅れ (Signal transmitting and transferring delay)

$\varepsilon_2$ : 機械的な遅れ (Mechanical delay)

Table 4-1 認知・反応時間の連鎖モデル 10)

区分	パーセンタイル値 (%)					
	50%	70%	80%	90%	95%	99%
1. 認知						
a. 情報伝達(Latency)	0.24	0.27	0.31	0.33	0.35	0.45
b. 視線移動(Eye Movement)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
c. 注視(Fixation)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
d. 認識(Recognition)	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
2. 判断(Decision)	0.50	0.75	0.85	0.90	0.95	1.00
3. ブレーキ反応	0.85	1.11	1.24	1.42	1.63	2.16
計 A (1a-d+2+3)	2.28	2.87	3.19	3.49	3.82	4.55
計 B (1c-d+2+3)	1.95	2.51	2.79	3.07	3.38	4.01
計 C (1a-d+3)	1.78	2.12	2.34	2.59	2.87	3.55

統合運転者モデルにおけるブレーキ認知反応時間の評価モデルは、予期されていない交通場面を基本とし、Table 4-2 に示した McGee の連鎖モデルを基に 3 段階評価(遅い、普通、速い) をするメンバシップ関数が組み込まれている (Figure 4-5)。なお、メンバシップ関数の詳細については次章のファジー推論機構で説明する。

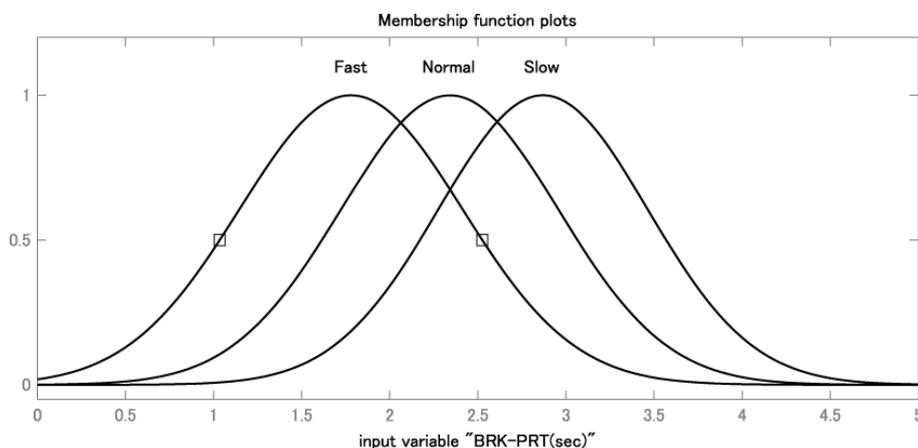


Figure 4-5 メンバシップ関数 (ブレーキ認知反応時間)

#### 4-3-2 ステアリング認知反応時間 (Steering perception reaction time)

ステアリングの操作は、車を走行車線の中心に維持しながら交差点や曲線部で左右折を遂行するほか、障害物の回避、追越等に欠かせない操作である。一般的に、運転中のステアリング操作はブレーキ操作又アクセル操作が同時に行われる場合が多い

め運転者の作業負担が高い。Simmala らは、被験者に事前に告知されていない状況で前方の駐車車両のドアが急に開く場面を演出し、ステアリングの変異を3段階（最小、中央、最大）に分けて時間間隔を計測した。計測結果によると、ドアが開いてからステアリングの初期変異（最小）が発生するまで平均1.5秒、中央まで約2.5秒、4秒で最大になった。Summala は、その結果を基に道路環境の急激な変化に対するステアリング操作時間は少なくとも「3秒」以上であると提案した<sup>24)</sup>。統合運転者モデルにおけるステアリング認知反応時間の評価モデルは、Simmala の実験結果を基に3段階評価（遅い、普通、速い）をするメンバシップ関数が組み込まれている (Figure 4-6)。

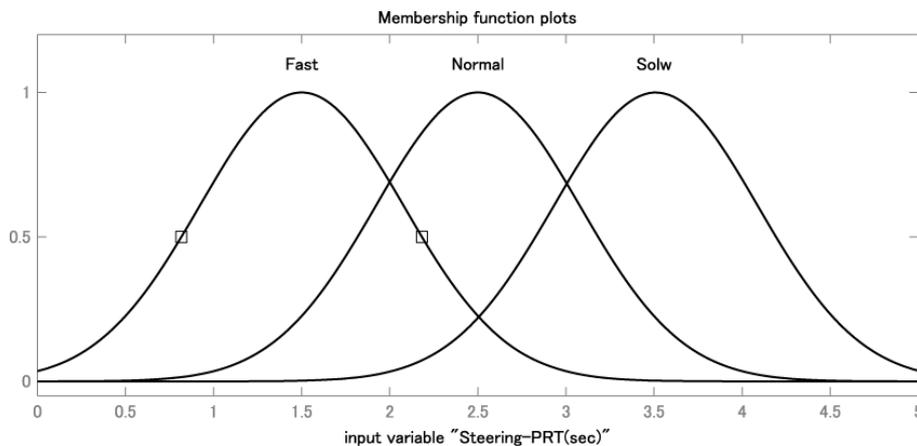


Figure 4-6 メンバシップ関数（ステアリング認知反応時間）

#### 4-3-3 注視運動の安定性(Fixation eye movement stability)

眼球運動は大別して、視線移動運動 (Gaze shifting mechanism)、視線安定化運動 (Gaze stabilizing mechanisms)、注視運動 (Fixation eye movements) に分けられる。視線移動運動は共同運動、輻輳運動、固視微動で構成され視対象物に視線を移動させる運動で探索運動 (Saccadic eye movement) とも呼ばれる。視線安定化運動は、頭部が動いている間にも網膜に対象物の像を維持するための反射運動 (Oculo-vestibular reflex) また頭部は止まっている状態で体が動く場合にも対象物を追いかける反射運動 (Opt-kinetic reflex) を称する。注視運動とは、視線を視対象物に移動させ網膜中心窩で視対象を捉っている状態をいう。一般的に、視線が 5deg/sec 以内の速度範囲で 0.2sec 以上間停留している状態を1回の注視と判定する<sup>59)</sup>。視対象物に対する1回当たりの注視時間と注視回数にはトレードオフ関係が認められている。即ち、高度な視覚情報処理が要求される交通場面では1回当たりの注視時間が短く、短い注視時間（1回あたり）から生じる不足分の情報を注視回数の増加によって補正する。次に示す式4-4～6は、注視時間と注視回数の関係を表したものである<sup>60)</sup>。

- 対象区間における平均注視時間 (sec) :  $T_a = \frac{T_t}{N_t}$  (式 4-4)
- 対象区間における一秒当たり注視回数 (回/sec) :  $N_a = \frac{N_t}{T_t}$  (式 4-5)
- 平均注視時間 ( $T_a$ ) と注視回数 ( $N_a$ ) の関係式 :  $a = T_a N_a$  (式 4-6)

ここで、

$T_1$  : 対象区間を通過するまでの時間 (秒)

$T_t$  : 対象区間に行ける総注視時間 (秒)

$N_t$  : 対象区間における総注視回数 (回)

- 対象区間における平均注視速度 (deg/sec) :

$$E_a = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta e_j}{t_1 - t_{n-1}} \quad (\text{式 4-7})$$

ここで、

$\Delta e_j$  : 対象区間を通過するまでの時間 (秒)

$t_1$  : 対象区間に行ける総注視時間 (秒)

$t_n$  : 対象区間における総注視回数 (回)

統合運転者モデルにおける注視行動の評価モデルは、式 4-6 の平均注視時間と平均注視回数の関係係数に基づいたメンバシップ関数が組み込まれている (Figure 4-7)。岩崎らの研究報告によると、事故率の高い首都高速道路の曲線部では関係係数「a」は相対的に大きいという。

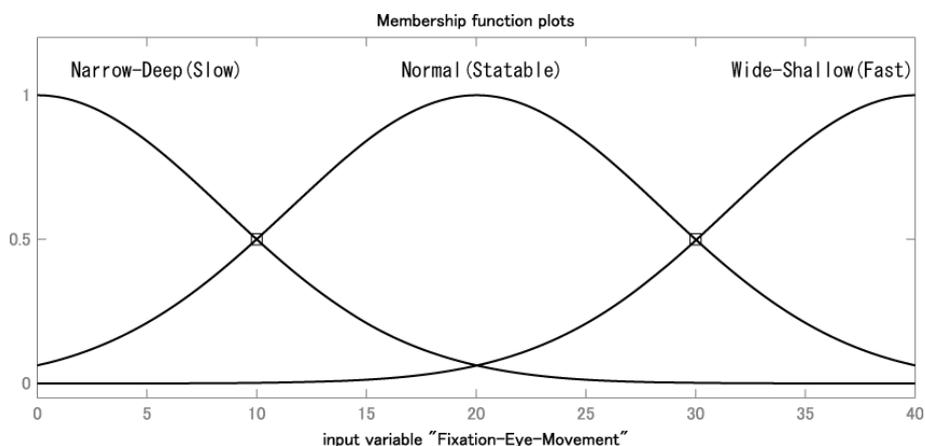


Figure 4-7 メンバシップ関数 (注視運動の安定性)

#### 4-3-4 追従安定性 (Car following stability)

追従安定性は、次の式 4-8 に示した追従モデルにおける、係数  $C$  によって表す[参考文献]。

$$\ddot{x}_f(\tau + 1) = C[\dot{x}_l(\tau) - \dot{x}_f(\tau)], \quad C = \lambda T \quad (\text{式 4-8})$$

ここで、

$\dot{x}_l$  : 前方車の速度

$\dot{x}_f$  : 追従車両の速度

$\ddot{x}_f$  : 追従車両の加速度

$T$  : 運転者の反応の遅れ (sec)

$\tau$  :  $T$  を  $t = \tau T$  に変換した時の係数

$\lambda$  : 比例係数

係数  $C$  は、追従走行状態にある前方車と追従車両の距離の時系列的な変動（振動）を表したものである。即ち、 $C$  が大きくなるほど前方車と追従車両の距離変動が激しく変化する状態である（不安定状態）。Herman によると、 $0 < C < 0.5$  の時、安定した追従状態という<sup>35)</sup>。統合運転者モデルにおける追従安定性の評価モデルは、Herman の実験結果を基にしたメンバシップ関数が組み込まれている (Figure 4-8)。

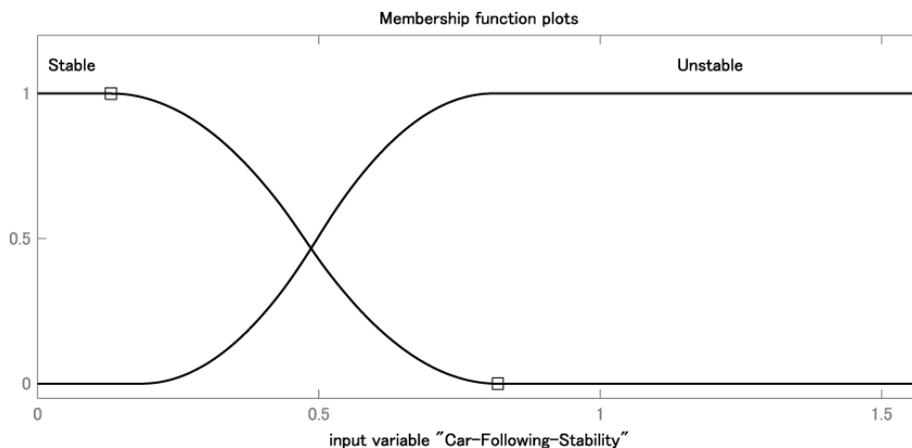


Figure 4-8 メンバシップ関数 (追従安定性)

#### 4-3-5 操舵安定性 (Steering stability)

ステアリング操作の安定性は、式 4-9 に示す運動中心と走行車線の中心との位置誤差で表す。また、道路の曲線部で時系列的な位置誤差が激しく振動する。

$$C. F. = \frac{1}{L} \int_0^L |y_{veh}(x) - y_{path}(x)| dx \quad (\text{式 4-9})$$

ここで、

L: 走行区間 (距離)

$y_{veh}(x)$ : 車両中心の横方向座標

$y_{path}(x)$ : 走行車線における横方向の中心座標

Godthelp によると、道路の直線区間では平均±23cm、曲線区間では平均 46cm で安定した安定した走行ができるという<sup>61)</sup>。統合運転者モデルにおける追従安定性の評価モデルは、Godthelp の実験結果を基にしたメンバシップ関数が組み込まれている (Figure 4-9)。

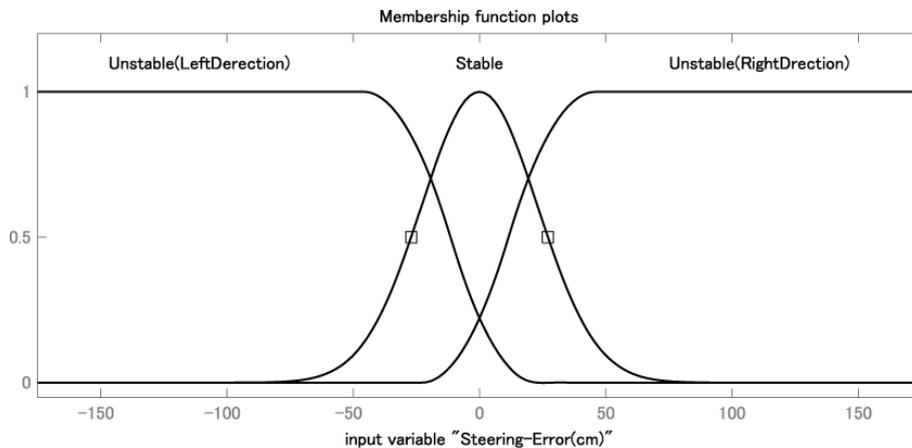


Figure 4-9 メンバシップ関数 (操舵安定性)

#### 4-3-6 利用可能な時間 (Available Time)

利用可能な時間は、外部刺激の受容から認知・判断を行いある行動を遂行するまでにどのくらい時間的余裕があるかを表すもので交通量、道路幾何 (視認距離) に影響を受ける。利用可能な時間が行動をするのに必要な時間より長くなるほど運転者はより余裕を持った運転ができ、ヒューマンエラーが発生する可能性が低くなる。さらに、安全運転支援システム (DSSS) による注意喚起や警告が事前に行われると利用可能な時間が増える効果が期待される。しかし、安全支援システムによる情報提供が別の運転作業を遂行中に行われると、作業負荷を増加させ否の効果が生じる恐れもある。

米国全州道路交通運輸行政官協会 (AASHTO) のガイドラインにおける意思決定視距離 (Decision sight distance) は、Table 4-2 に示した実験による交通場面毎の回避行動に必要な時間を基に設定されている。

Table 4-2 回避行動別の所要時間<sup>21)</sup>

区分	回避行動	所要時間
A	停止（地方部の道路）	3.0 秒
B	停止（都市部の道路）	9.1 秒
C	車線変更（地方部の道路）	10.2-11.2 秒
D	車線変更（都市部の郊外道路）	12.1-12.9 秒
E	車線変更（都市部の道路）	10.0-14.5 秒

統合運転者モデルにおける利用可能時間の評価モデルは、Table 4-2 に示した回避行動別の所要時間の分布を基にした5つのメンバシップ関数が組み込まれている (Figure 4-10)。

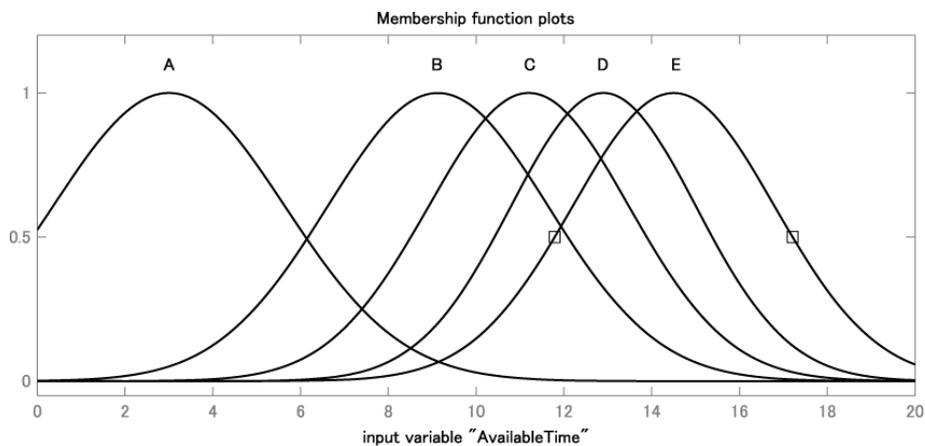


Figure 4-10 メンバシップ関数（利用可能な時間）

#### 4-3-7 運転者への安全運転支援水準 (Driver Support Level)

高度道路交通システム (ITS) は経路案内、渋滞情報、衝突警告等の警告型運転支援に加え、車両が危険を感知し自動制御によるブレーキやステアリング操作が行われる。統合運転者モデルは、安全運転支援システムによる運転行動を反映するために運転者への安全運転支援水準を取入れた。しかし、現時点では安全運転システムによる運転行動へ影響に関するデータが十分ではない。そのような理由から、安全運転支援水準の指標を4段階 (L1: 経路案内が可能、L2: L1+渋滞情報の提供、L3: L2+警告型安全運転支援、L4: L3+介入型安全運転支援) で評価するメンバシップ関数を導入することにしたが、定量評価という観点からみると課題が残っている (Figure 4-11)。

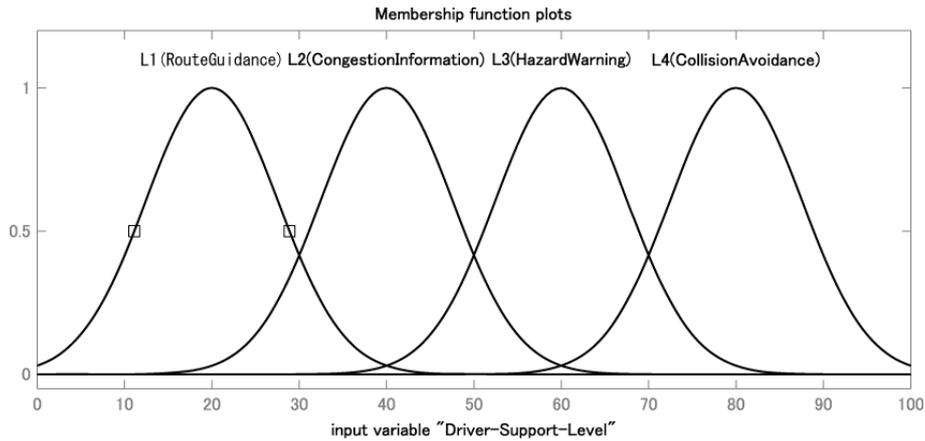


Figure 4-11 メンバシップ関数 (安全運転支援水準)

#### 4-4 ファジー推論機構 (FIS) による行動制御レベルの推定

ファジー推論機構は集合と呼ばれる集合とその度合いを表すメンバシップ関数によって構成される。例えば、ブレーキ認知反応時間を Slow、Normal、Fast という 3 種類の集合にわけるときを考えた場合、どのぐらいの速さを Fast とするか Slow とするかは明らかな定義がなく曖昧な側面がある。ファジー推論ではこのような曖昧な事象を定量化することで数学の集合論的な解釈を可能にする。

入力された 7 つのパラメータはファジー推論機構 (FIS) により推論結果を出力する。統合運転者モデルのファジー推論機構は、Hollnagel の状況決定制御論 (COCOM) をその理論的背景とする 40 種類以上の If-then ルールの集合から、運転者の行動制御レベル (Control level) を 4 つのモード、戦略的制御 (strategic control mode)、戦術的制御 (tactical control mode)、機会主義的制御 (opportunistic control mode)、混乱状態制御 (scrambled control mode) に推定する。Figure 4-12 は、推論結果を導くメンバシップ関数を示す。運転者の行動モードは、X 軸に 0 ~ 100 の間に 4 つの分布があり、Y 軸に 0 ~ 1 の確立分布で表現される。

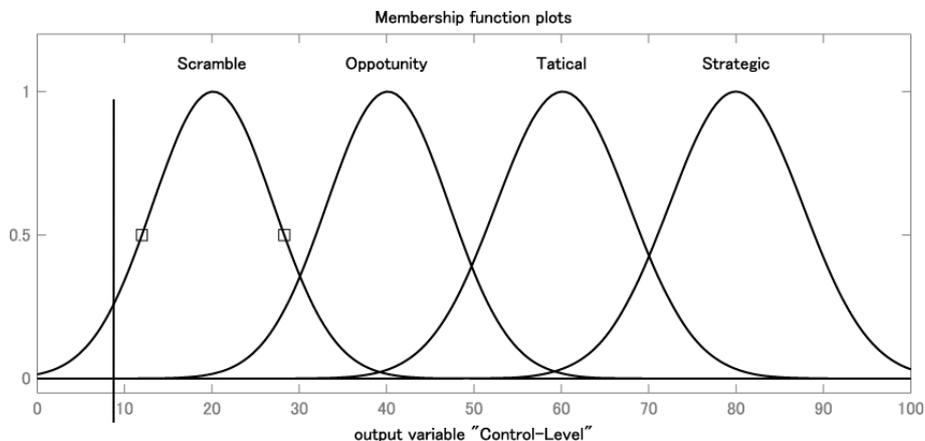


Figure 4-12 ファジールールによる運転者の制御制御レベル推定

例えば、入力パラメータとして[ブレーキ認知反応時間=3, ステアリング認知反応時間=4 秒、注視運動の安定性=17, 追従安定性=0. 8, 操舵安定性=80, 利用可能な時間=2. 5, 運転者への安全運転支援水準=0]が入力された場合[Control Level=20. 5]と推定され、制御モードが Scramble 状態である確立が約 0. 95 と解釈される。

#### 4-5 事例： 飲酒運転の危険性を体験するための教育用運転模擬装置の開発

本実験は、本書で提案された統合運転制御モデル (JDM) を用いて、飲酒運転に運転行動の変化をパラメータとして飲酒運転の危険性を体験できる教育用運転模擬装置 (以下、飲酒運転体験シミュレーター、DUI-DS : Driving under Influence Driving Simulator) を開発した事例である。2012 年 6 月、韓国道路交通法改正に当たって法規違反者、常習飲酒運転者、重傷以上の事故を起こした運転車の特別交通安全教育 (法定教育) で採用され、毎年 2 万人の運転者が飲酒運転の危険性を体験するのに使われている。

なお、本実験の結果は 2011 年米国 TRB (Transportation Research Board) が主催する RSS 2 0 1 1 (ROAD SAFETY AND SIMULATION) で発表された<sup>62)</sup>。2012 年には RSS の推薦を受け国際ジャーナルである「Advanced Transportation Study (ATS)」の論文集に掲載された<sup>63)</sup>。

##### 4-5-1 概要

飲酒運転による事故・違反は飲酒運転の罰則強化や根絶キャンペーン等により年々減少しているが、いまだに飲酒運転による事故は根絶されていない。「ビール一杯だから問題ない」、「お酒に強いからこれくらいは大丈夫」と安易な気持ちで運転したことにより、事故を引き起こすケースが多い。警察庁が発表した、2009 年中に起こった飲酒有無別の死亡事故率 (死亡事故件数 ÷ 交通事故件数 × 100) をみると、飲酒運転による事故の死亡事故率 (5. 10%) は飲酒なし (0. 59%) と比べて約 8. 7 倍高くなり、飲酒運転は一旦事故が発生すると死亡者を出す重大事故につながる危険性が高い。

飲酒して運転することは一般的に飲酒運転といわれているが、法令ではお酒の量にかかわらず、お酒を飲んで運転することが禁じられている。飲酒運転のうち、行政処分の対象となるものには「酒気帯び運転」と「酒酔い運転」がある。呼気中アルコール濃度が 0. 15mg/l 以上である場合を「酒気帯び運転」、お酒の量に関係なく飲酒した影響によってまっすぐ歩けないなど、車を正常に運転できない状態を「酒酔い運転」と呼び、それぞれについて罰則が設けられている。警察庁が発表した、2009 年中に起こった「酒気帯び運転」による事故の死亡事故率 (4. 59%) は飲酒なしと比べて約 7. 8 倍高く、さらに「酒酔い運転」による事故の死亡事故率 (18. 75%) は約 31. 9 倍も高くな

り、いかに「酒気帯び運転」よりも「酒酔い運転」のほうが重大事故につながりやすい。

本実験の目的は運転者に飲酒運転が運転挙動に与える悪影響を検証し、それを運転模擬装置で再現し安全運転教育に取り入れることであったが、その背景には本研究で提案された統合運転挙動モデルの一部が応用されている。

#### 4-5-2 実験方法

##### (ア) アルコールが運転挙動に及ぼす影響

アルコールは人間の中樞神経に影響を与える物質である。アルコールは運転挙動に次のような悪影響を与える。

- その1、認知反応時間、空間認知能力、均衡感覚を低下。
- その2、目の探索運動、注視運動、手足作業の正確度が鈍化。
- その3、警戒心、注視力及び感情のコントロール能力の低下。

また、飲酒量が多くなると、Table 4-3、Figure 4-13 ように段階的に悪影響を及ぼす。

**Table 4-3 Performance and behavior characteristics that have been associated with increasing BAC levels <sup>64)</sup>**

BAC	Performance and behavior change
0.01%	Normal actions hardly influenced.
0.02%	Change in social behavior, mild euphoria, relaxation, increased gregariousness.
0.05%	Feeling good, less inhibited, altered judgment, lowered alertness
0.07%	Judgment impaired, likely to take risks and action not taken when sober, release of inhibitions, impulsive behavior, and slight decrease in fine motor skills.
0.10%	Slower reaction times and impaired motor function, less caution, slightly slurred speech, increased aggressiveness.
0.15%	Large, consistent increases in reaction time, balance impaired, slurring of speech.
0.20%	Major memory impairment
0.27%	Confusion, slurred speech.
0.30%	Double vision may occur; most drinkers become unconscious or fall asleep at this level and difficult to awaken.
0.40%	Barely conscious.

※ BAL/BAC: 血液中アルコール濃度 (Blood alcohol level/blood alcohol content)

※ 血液アルコール濃度の推定式

$$\text{血液中アルコール濃度(\%)} = \frac{\text{飲酒量(ml)} \times \text{アルコール度(\%)}}{833 \left( \frac{\text{ml}}{\text{kg}} \right) \times \text{体重(kg)}}$$

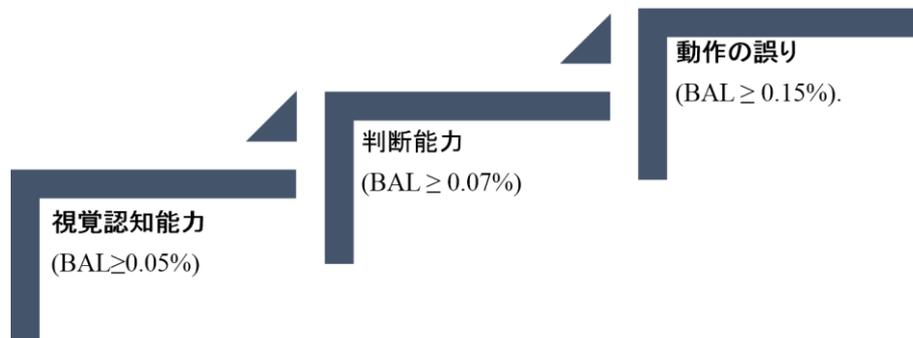


Figure 4-13 飲酒が人体に与える影響

#### (イ) 飲酒運転の危険性を体験させる原理

DUI-DS には 3 種の道路（都心部、地方部、高速道路）、飲酒運転の事故データをもとに 20 種の走行シナリオが再現された。

模擬運転装置による実験では 30 人の被験者を対象に 3 回の走行実験が行われた。一回目は酒を飲んでない状態、2 回目は血中アルコール濃度が約 0.05% の状態、3 回目は血中アルコール濃度 0.1% 状態であった。血中アルコール濃度の計測に警察が飲酒運転取締りで用いられる呼気アルコール能動系が用いられた。そして、眼球運動装置 (Seeing Machines 製, FaceLab 4.5) から飲酒状態での眼球運動を計測した。

走行実験で記録されたデータは各々の走行シナリオと血中アルコール濃度毎に分類され統計処理を行った。

飲酒による認知反応時間を体験されるために模擬運転装置の車両力学モデルに走行実験から得られた認知反応時間を入れた。そして、視覚系への影響を再現するために眼球運動データに基づき‘周辺視縮小、弁別力低下、画面の揺れ’等の特殊映像効果を開発した。飲酒による視覚系、運動系への影響を模擬運転装置で再現した。

#### (ウ) DUI-DS の構成

##### ① 本体の構成

DUI-DS は実車の運転席部品をそのまま用いて再現した運転席、40 インチの LCD

TV、運転中の様子を録画するためのカメラ、教官システムで構成される。特に、交換システムはシミュレーターを制御するだけでなく運転データの記録、運転装置の操作（ブレーキ、アクセル、ギア、方向指示燈、ハザードランプ、ワイパー、前照灯、シートベルト等）、計器類の変化をリアルタイムで録画しなら講義室にある大型プロジェクターに表示する。

走行後には、記録されたデータを読み出し統合運転制御モデル（JDM）を用いて運転者の運転挙動を自動評価して評価シートを出力する。録画された映像を再生しながら間違っただ行動、ルール違反、事故場면을提示することも可能である。



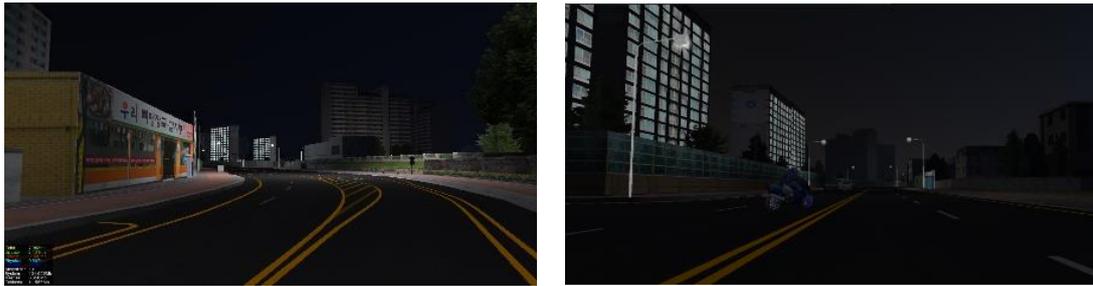
Figure 4-14 ハードウェアの構成

## ② 道路環境（3次元CG）

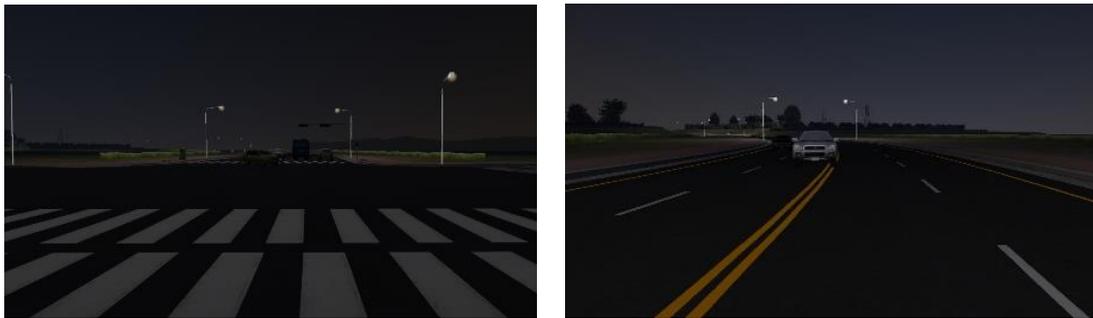
実験で使われた道路は高速道路、都心部道路、地方部道路である。道路は航空写真とそれぞれの道路規格に基づいて作られたものである。Figure 4-15 は開発された道路環境の例である。



(a) 高速道路



(b) 都心部道路



(c) 地方部道路

Figure 4-15 道路の構成 (例)

③ 走行シナリオ

走行シナリオはドライビングシミュレータに慣れるための練習用シナリオ、道路種別の事故調査記録（警察庁）を参考して開発されたシナリオがある Table 4-4 は走行シナリオの内容である。

Table 4-4 走行シナリオ

シナリオ名	シナリオ番号	シナリオ内容
Exerise (10 km)	000	The exercise road was designed for practicing basic operations such as acceleration, deceleration, lane change, and curved-road passage on a virtual high-grade motorway.
Urban→rural (10 km)	101	A child walks across a danger zone.
	102	A motorcycle on the left road suddenly turns left and crosses the road.
	103	A bicycle running along the shoulder of a road suddenly loses balance and enters into the road before returning to its original position.
	104	On a crossroad, a vehicle running in the opposite direction passes across the front of the simulation participant's car and turns right.

シナリオ名	シナリオ番号	シナリオ内容
	105	On a sharply curving road, the simulation participant encounters a vehicle in the opposite lane that breaks away from the lane.
Urban→ Expressway (10 km)	201	The simulation participant meets a vehicle running on the main lane at the converging point to the outskirts expressway from the urban road.
	202	While the simulation participant is driving at a high speed, the front vehicle suddenly decelerates.
	203	The simulation participant encounters an accident site while passing through a tunnel, and he/she quickly decelerates and changes lanes.
	204	A vehicle stuck in the traffic at the shoulder suddenly transfers to the main lane.
	205	At an off ramp, a guiding voice says “Go straight” and then suddenly says “Go out to the right road.”
Expressway (10 km)	301	The simulation participant accomplishes certain missions while following the front car.
	302	While following the front car, the simulation participant encounters traffic congestion, and the surrounding cars suddenly decelerate.

#### ④ 実験データの記録と評価

Figure 4-16 は教官システムの画面である。上の絵は、リアルタイムで DUI-DS を制御しながらデータを記録するリアルタイムモードの画面である。下の絵は、記録されたデータを読み出し運転挙動を評価しながら運転場面を再生するプレゼンテーションモードの画面である。

特に、プレゼンテーションモードでは統合運転者モデルを用いて運転者の行動を道路交通法のルール違反に当てはめフィードバックを提示し、教育性は自分の運転挙動について教官から助言を受ける。

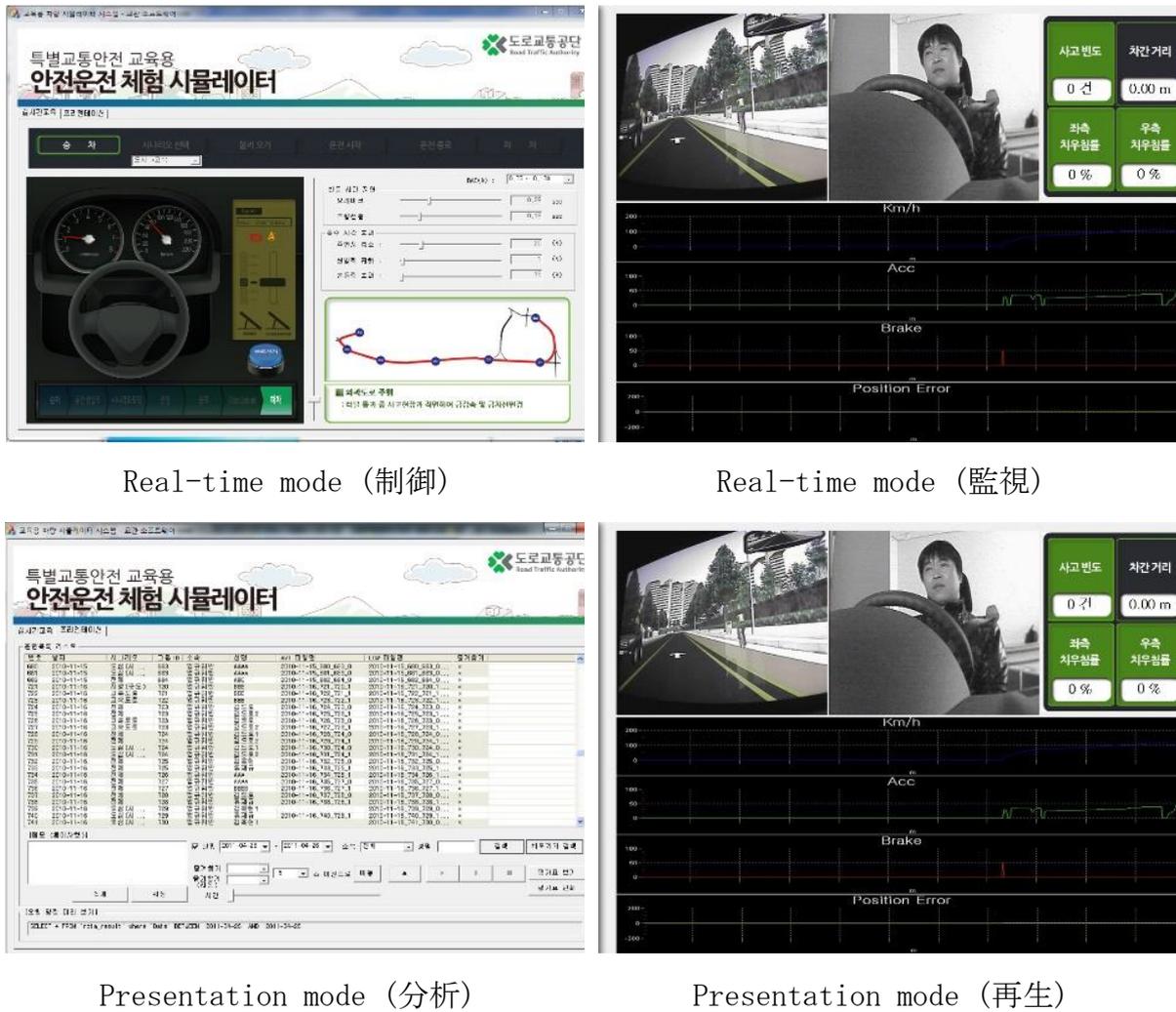


Figure 4-16 実験データの記録 (例)

### 4-5-3 飲酒運転の危険性を体験する。

飲酒運転の体験は、飲酒によるブレーキとステアリング操作時の運動系の影響（反応遅れ）、中枢神経系の影響による視覚系の中心視野の弁別力低下、周辺視野の縮小、平衡感覚の低下を体験する。

飲酒特殊効果は、30人の運転者にお酒を飲んでもらい  $BAC \approx 0.00$ 、 $BAC \approx 0.05$ 、 $BAC \approx 0.10$  の状態でDS実験を行い、その結果から血中アルコール濃度の変化による反応時間の遅れ、特殊視覚効果の設定値を求め飲酒評価モデルを開発した。開発された飲酒評価モデルの設定値はTable 4-5に示されている。

Table 4-5 血中アルコール濃度による反応時間と特殊視覚効果の決定値

区分	設定値	備考
Delayed brake reaction	Adjustable range: 0.00-1.00 sec 0.00-0.05% (0.1 sec) 0.05-0.10% (0.2 sec) 0.10-0.15% (0.3 sec) 0.15-0.20% (0.4 sec)	Delay in brake reaction and increased braking distance due to such delay are reproduced.
Delayed steering wheel reaction	Adjustable range: 0.00-1.00 sec 0.00-0.05% (0.2 sec) 0.05-0.10% (0.3 sec) 0.10-0.15% (0.4 sec) 0.15-0.20% (0.5 sec)	Danger avoidance ability and lane maintenance ability to horizontal dangers due to delayed steering wheel reaction are reproduced.
Down scaled peripheral vision scope	Adjustable range: 0-100% 0.00-0.05% (10%) 0.05-0.10% (20%) 0.10-0.15% (30%) 0.15-0.20% (40%)	The objects in the peripheral vision appear blurred, which decreases the sense of speed and impairs the ability to respond to sudden situations from the sides of the road.
Impairment of discrimination	Adjustable range: 0-100% 0.00-0.05% (10%) 0.05-0.10% (20%) 0.10-0.15% (30%) 0.15-0.20% (40%)	Impairment of vision due to drinking is reproduced. As the discrimination of the objects at the front is impaired, it affects the judgment ability in various situations.
Wave effect	ON/OFF	Decline of the sense of equilibrium due to drinking is reproduced. Objects are shaken, and lights appear scattered.

特殊視覚効果は、世界中に幅広く使われている飲酒ゴーグルと似ている。DUI-DS の特殊映像効果は、走行中にリアルタイムでレンダリングされる映像であるため飲酒ゴーグルのように掛け替える必要がなく、目の負担が少ない。そして、特集効果の設定値を指導教官が変えることが出来る (Figure 4-17)。



Figure 4-17 特殊視覚効果

#### 4-5-4 教育効果の検証

DUI-DS の教育効果を検証するために飲酒運転違反者を対象にする交通安全教育過程の教育性に DUI-DS を体験したあとアンケート調査を行った。その結果、アンケートに答えた 200 人の中で 138 人が飲酒運転の危険性を体験するのに効果があると答えた (Figure 4-18)。

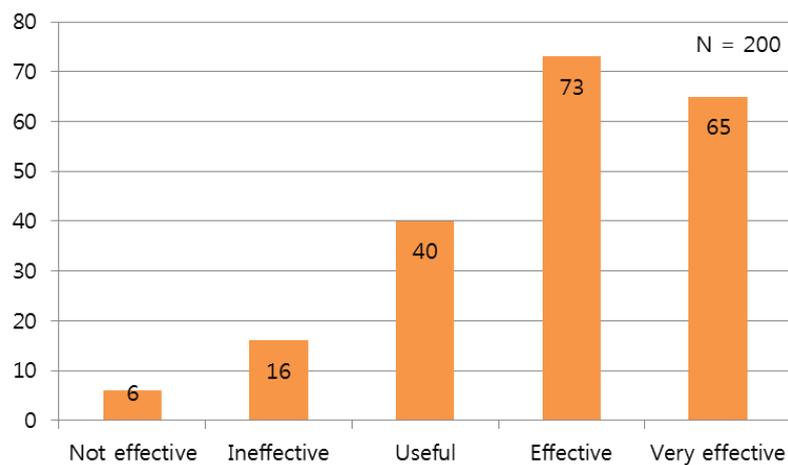


Figure 4-18 DUI-DS の教育効果に関するアンケート調査結果

#### 4-5-5 まとめと今後の課題

DUI-DS は、本研究で提案した統合運転者モデル（JDM）を実際の教育現場に応用した例である。飲酒モデルは、統合運転者モデルに飲酒の影響を評価するために追加された特殊モデルであり後続研究が進められている。

特に、国内でも使われている飲酒ゴーグルと同様にアルコールによる視覚系の影響を視覚化した映像について定量的な検証が足りない。しかし、飲酒運転の危険性を体験するための教育効果については国内外の研究者と教育現場の人々から肯定的な評価を受けていることは、本研究が目指している「交通事故をゼロにする」という目的に当たる。

## 第5章 結論と今後の課題

## 第5章 結論と今後の課題

### 5-1 結論

本研究では、既存の運転者モデルが人間の情報処理過程を決定論的に見ているため、ITSのような巨大化、複雑化に伴う運転者の予想外の行動に対する評価が困難であることに着目し、人間の認知作用を決定論的な観点ではなく能動的なものとする Hollnagel の人間行動の状況決定制御論を基に、人間との親和性の高い知識を扱うファジー推論を応用した運転行動の評価モデルを提案した。

Figure 5-1 は本研究で提案された運転者の情報処理に対する見方をまとめたものである。運転者が時々刻々変化する交通状況を「感知>認知>解釈>修正」する情報処理過程を遂行する。それぞれの情報処理段階で「追尾・追跡>調整>監視>目的設定」が行われる。そのような過程を通じて最終的に、現在の状況における次の行動を計画し、計画した行動の順番を決め実行する。

統合運転者行動モデル (JDM) は、「道路交通環境から同定された7つのモデルパラメータ (入力) を 運転者の行動制御レベルを推定するための説明変数として用いる。入力されたデータはメンバシップ関数に組み込まれた指標と比較されその結果を自然言語に表現され、If-then 形式の関数群であるファジー演算子 (Fuzzy operator) に入力される。ファジー演算子は、複数入力パラメータからファジールールに基づいて運転者の行動制御レベルを4つのモード、戦略的制御 (strategic control mode)、戦術的制御 (tactical control mode)、機会主義的制御 (opportunistic control mode)、混乱状態制御 (scrambled control mode) に推定する

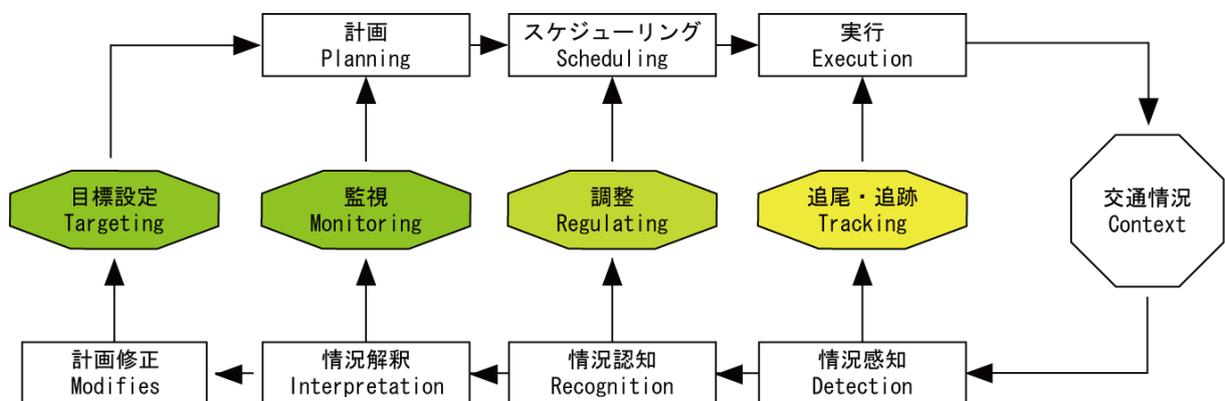


Figure 5-1 研究成果のイメージ

統合運転者行動モデル（JDM）が既存の研究で提案された運転者モデルと異なる特徴は次のようになる。

- その1、道路交通環境から同定された7つのモデルパラメータ：「ブレーキ認知反応時間（Brake perception reaction time）、ステアリング認知反応時間（Steering perception reaction time）、注視運動の安定性（Fixation eye movement stability）、追従安定性（Car following stability）、操舵安定性（Steering stability）、利用可能な時間（Available Time）、運転者への安全運転支援水準（Driver Support Level）」は既存の人間工学理論、自動車工学理論、交通工学理論から得られた知見をまとめファジー推論機構におけるメンバシップ関数（Membership Function）として用いられるようにした。
- その2、そうすることによって既存のIPSモデルが入力パラメータに対して決められた結果を出力する限界を避け曖昧な人間行動を定量化することを試みた。
- その3、本研究で提案された統合運転者モデルは曖昧な人間行動を定量化する1つの方法としてマイクロ交通シミュレーション、運転者支援システムの開発、自動運転車を開発する際に制御パラメータとして応用できると考えられる。

## 5-2 今後の課題

本研究では、運転者のヒューマンエラーを引き起こす可能性のある要素をパラメータとして同定し、ファジー推論機構を用いて運転車の運転パフォーマンスを評価する方法を提案した。

本研究が目指している最終目的は「ヒューマンエラーによる交通事故をゼロする」ことである。

今後は、実際の走行環境やドライビングシミュレータから取得される交通環境、運転情報、生体情報等の時系列的な出力データを統合運転者モデルに直接入力して運転者の制御レベルの変化をリアルタイムで評価するシステムを構築し、実走行の環境で検証が求められる。そして、そのシステムを用いて様々な交通場面でのパラメータを入力しメンバシップ関数に組み込まれているファジー集合、ファジールールを追加するなどモデルの改良をし続けることが望まれる。

## 参考文献

- 1) Treat, J. R., Tumbas, N. S., McDonald, S. T., Shinar, D., Hume, R. D., Mayer, R. E., Stansifer, R. L., and Castellan, N. J. Tri-level study of the causes of traffic accidents: executive summary. Report NHTSA DOT HS 034-3-535-77, National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation, 1977.
- 2) Rasmussen, J. Skills, rules and knowledge; signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE Trans. System, Man, Cybernetics*, 13(3), 257-266, 1983.
- 3) 小島幸夫、交通事故発生過程のモデル化の試み(信号交差点における右折事故)、日本シミュレーション学会、第7回研究資料、No.VI-2, 1986.
- 4) Minchon, J. A. A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In *Human behavior and traffic safety*, Eds L. Evans and R. C. Schwing, Plenum Press, 485-520, 1985.
- 5) Hollnagel, E. *Human reliability analysis: context and control*, Academic Press, London, 145-300, 1990.
- 6) Wickens, C.D., Processing resources in attention, in R. Parasuraman & R. Davies, *Varieties of Attention*, New York: Academic Press, 63-101, 1984.
- 7) Hick, William E.; on the rate of gain of information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol 4, 11-26, 1952
- 8) Miller, G. A. "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information". *Psychological Review* 63 (2), 81-97, 1956.
- 9) Hartman, E. Driver vision requirement. In *International Automobile Safety Conference*, New York, SAE paper 700392, pp. 629-630, 1970.
- 10) Sivak, M. The information that drivers use: is it indeed 90% visual? , *Perception* Vol 25, 1081-1089, 1996.
- 11) McGee, H., K. Hooper, W. Hughes, and W. Benson *Highway Design and Operational Standards Affected by Driver Characteristics*. FHWA RD 78-78, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1983.
- 12) Neuman, T. R. *New Approach to Design for Stopping Sight Distance*. Transportation Research Record, 1208, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1989.
- 13) Taoka, G. T., *Brake Reaction Times of un-alerted Drivers*. ITE Journal, Washington, DC, 1989.
- 14) Ang, A. H-S., and W. H. Tang *Probability Concepts in Engineering Planning and Design* Vol. 1: Basic Principles. New York: John Wiley and Sons, 1975.

- 15) Lerner, Neil, et al., Literature Review: Older Driver Perception-Reaction Time for Intersection Sight Distance and Object Detection, Comsis Corp., Contract DTFH 61-90-00038 Federal Highway Administration, Washington, DC, Final Report, 1995.
- 16) Fambro, D. et al., Determination of Factors Affecting Stopping Sight Distance. Working Paper I: Braking Studies (DRAFT) National Cooperative Highway Research Program, Project 3-42, 1994.
- 17) Paul M. Fitts and James R. Peterson. Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, 67(2):103–112, February 1964.
- 18) Brackett, R. Q. and R. J. Koppa (1988). Preliminary Study of Brake Pedal Location Accuracy. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 32nd Meeting, 1998.
- 19) Hoffman, E. R., Accelerator to Brake Movement Times and A Comparison of Hand and Foot Movement Times. *Ergonomics* 34, 277-287 and 397-406, 1991.
- 20) Berman, A. H. A Study of Factors Affecting Foot Movement Time in a Braking Maneuver. Unpublished MS Thesis, Texas A&M University. Blackwell, O. and H. Blackwell, 1994.
- 21) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). A policy on geometric design of highways and streets 5th edition, ch3, pp110-113, 2001.
- 22) I Hong, M Iwasaki, Older drivers' perceptions, responses, and driving behaviours during complex traffic conditions at a signalized intersection, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE), Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol.222, No.11, 1879-1892, 2008.
- 23) Fambro, D. B., K. Fitzpatrick, and R. J. Koppa. Determination of Stopping Sight Distances, NCHRP Report 400, Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1997.
- 24) Summala, H. (1981). Driver/Vehicle Steering Response Latencies. *Human Factors* Vol. 23, 683-692, 1981.
- 25) Chang, M-S, C. J. Messer, and A. J. Santiago, Timing Traffic Signal Change Intervals Based on Driver, Behavior. Transportation Research Record 1027, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1985.
- 26) Wortman, R. H. and J. S. Matthias (1983). Evaluation of Driver Behavior at Signalized Intersections, Transportation Research Record 904, TRB, NRC, Washington, DC, 1983.
- 27) 日本交通工学会, 交通工学ハンドブック2005, 2005.
- 28) Pipes, L. A., A Proposed Dynamic Analogy of Traffic. ITTE Report, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, 1951.
- 29) Gazis, D. C., Herman, R., & Potts, R. B., Car following theory of steady state traffic flow. *Operations Research*, 7, 499-505, 1959.
- 30) Pipes, L. A., An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics* 24, pp 271-281., 1953.

- 31) Forbes, T.W., M. J. Zagorski, E. L. Holshouser, and W. A. Deterline, Measurement of Driver Reaction to Tunnel Conditions. Proceedings of the Highway Research Board 37, 345-357, 1959.
- 32) Forbes T.W., Human Factors Consideration in Traffic Flow Theory, Highway Research Record, Vol. 15, 60-66,1963.
- 33) T. Forbes and M. Simpson, Driver and Vehicle Response in Freeway Deceleration Waves, Transportation Science, Vol.2 No. 1, 77-104, 1968.
- 34) Chandler, R. E., Herman, R., & Montroll, E. W. Traffic dynamics: studies in car following. Operations Research, 6, 165-184, 1958.
- 35) Herman, R., & Potts, R.B., Single Lane Traffic Theory and Experiment. In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Labs, General Motors, New York: Elsevier, 147-157, 1959.
- 36) Helly, W., Simulation of Bottlenecks in Single Lane Traffic Flow. In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow., Research Laboratories, General Motors (pp. 207±238). New York: Elsevier, 1959.
- 37) Gazis, D. C., Herman, R., & Rothery, R. W. Nonlinear follow the leader models of traffic flow, Operations Research, Vol 9, 545-567, 1961.
- 38) May, Jr., A. D, & Keller, H. E. M. (1967). Non integer car following models. Highway Research Record, 199, 19-32, 1967.
- 39) Heyes, M. P., & Ashworth, R., Further research on car following models. Transportation Research, 6, 287-291, 1972.
- 40) Hoefs,D.H.,Entwicklung einer Messmethode uber den Bewegungsablauf des Kolonnenverkehrs, Universitat (TH), Karlsruhe, Germany, 1972.
- 41) Treiterer, J., & Myers, J. A., The hysteresis phenomenon in traffic flow. In Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Sydney, 13-38, 1974.
- 42) Ceder, A., A deterministic traffic flow model for the two regime approach. Transportation Research Record, 567, 16-30, 1976.
- 43) Aron, M., Car following in an urban network: simulation and experiments. In Proceedings of Seminar D, 16th PTRC Meeting, 27-39, 1988.
- 44) Ozaki, H., Reaction and anticipation in the car following behaviours, In Proceedings of the 13th International Symposium on Traffic and Transportation Theory 349-366,1993.
- 45) M. Brackstone, M. McDonald, Car-following: a historical review, Transportation Research Part F, No 2, 181-196,1999.
- 46) Gipps, P.G. "A behavioral car-following model for computer simulation." Transportation Research B 15: 105–111, 1981.

- 47) Kometani, E., & Sasaki, T., Dynamic behavior of traffic with a nonlinear spacing-speed relationship. In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors, 105-119). New York: Elsevier, 1959.
- 48) P. Hidas Modelling Vehicle Interactions in Microscopic Simulation of Merging and Weaving. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.13, Issue 1, 37-62, 2005.
- 49) Fritzsche, H-T. "A model for traffic simulation." Transportation Engineering Contribution 5: 317-321, 1994.
- 50) 東京警視庁, 警視庁の統計(平成17年), 2005.
- 51) I Hong, T Kurihara, M Iwasaki, K. Tanii, W.S. Lee, Quantitative Evaluation of Accidents Due to a Complex Traffic Environment, ITS World Congress 2010 CD-ROM, Evaluation Tools and Strategies Part II Evaluation tools and strategies, TP 090, T\_AP00432, 2010.
- 52) National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), "Traffic Safety Facts 2005", NHTSA's National Center for Statistic and Analysis (NCSA), Washington, D.C., 2005.
- 53) 広井章人, 松本卓也, 洪一基, 岩崎征人, 道路環境の変化が運転者の認知行動に及ぼす影響に関する研究、2006年度土木学会全国大会(秋大会)、日本土木学会、2006
- 54) 広井章人, 松本卓也, 洪一基, 岩崎征人, 道路環境の変化が運転者の認知行動に及ぼす影響に関する研究, 交通と運輸(Traffic & Transportation) 4月号, 中国(上海), 2007.
- 55) I Hong, M Iwasaki, Older drivers' perceptions, responses, and driving behaviours during complex traffic conditions at a signalized intersection, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE), Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol.222, No.11, pp1879-1892, 2008.
- 56) The Ministry of Health, Labor and Welfare (Japan) National Livelihood Survey, Statistics and Information Department, 2006.
- 57) Y. Nishida Older driver's driving characteristics. Older driver's driving characteristics (in Japanese), JSAE, Vol. 52 No.4, 15-20, 1995.
- 58) Pettigrew, J. D., Wallman J., and Wildsoet, C. F., Saccadic oscillations facilitate ocular perfusion from the avian pecten. Nature, 25 January 343, 362-363, 1990
- 59) Fukuda, R., Sakuma, M., Nakamura, E., and Hukuda, T. Experimental considerations on the definition of eye fixation points. J. Japan Ergonomics Soc., 28, 197-204, 1996.
- 60) I.Hong, M Iwasaki, T Furuichi, and T Kadoma Eye Movement and Driving Behavior in Curved Section Passages of Urban Motorway, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol.220, No.10, 2006.
- 61) Godthelp, H., Vehicle Control During Curve Driving. Human Factors, Vol28, No. 2, 211-221, 1986.

- 62) Il-Ki Hong, Jun-Beom Ryu, Jun-Hee Cho, Woon-Sung Lee, Development of a driving simulator for virtual experience and education on drunk driving, *Advances in Transportation Studies an international Journal RSS2011 Special Issue*, pp 139-149, 2012.
- 63) Il-Ki Hong, Jun-Beom Ryu, Jun-Hee Cho, Woon-Sung Lee, Development of a Driving Simulator for Virtual Experience and Training on Drunk Driving, 3rd International Conference on Road Safety and Simulation (RSS 2011), Purdue University and Transportation Research Board (TRB), *Driving simulators Behavior I*, No. 162(CD-ROM), 2011.
- 64) Leonard Evans, *Traffic Safety*, Science Serving Society, Bloomfield Hills, Michigan, U.S.A., 2004.

## 付録：学術詩掲載論文

## 審査付き原著論文 (SCI又はSCOPUS)

- 1) **Il-Ki Hong**, Jun-Beom Ryu, Jun-Hee Cho, Woon-Sung Lee, Development of a driving simulator for virtual experience and education on drunk driving, *Advances in Transportation Studies an international Journal RSS2011 Special Issue*, pp 139-149, 2012.  
(題名: 飲酒運転の危険性を体験するための教育用運転模擬装置の開発)
- 2) **Il-Ki Hong**, Jun-Beom Ryu, Jun-Hee Cho, Woon-Sung Lee, Development of a Driving Simulator for Virtual Experience and Training on Drunk Driving, 3rd International Conference on Road Safety and Simulation (RSS 2011), Purdue University and Transportation Research Board (TRB), *Driving simulators Behavior I*, No. 162(CD-ROM), 2011.
- 3) **I Hong**, T Kurihara, M Iwasaki, K. Tanii, W.S. Lee, Quantitative Evaluation of Accidents Due to a Complex Traffic Environment, *ITS World Congress 2010 CD-ROM, Evaluation Tools and Strategies Part II Evaluation tools and strategies*, TP 090, T\_AP00432, 2010.  
(題名: 複雑な交通環境からの事故因子の定量的な評価法)
- 4) **I Hong**, M Iwasaki, Older drivers' perceptions, responses, and driving behaviours during complex traffic conditions at a signalized intersection, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMechE), Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol.222, No.11, pp1879-1892, 2008. (ISBN 0954/4070)  
(題名: 信号交差点の複雑な交通環境下における高齢運転者の認知、反応及び運転挙動)
- 5) **I Hong**, M Iwasaki, T Furuichi, and T Kadoma, Eye Movement and Driving Behavior in Curved Section Passages of Urban Motorway, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMechE), Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol.220, No.10, pp1319-1331, 2006.  
(題名: 都市高速道路の曲線部における運転者の注視及び運転挙動)

## 講演会及び共著論文

- 1) 広井章人, 松本卓也, 洪一基, 岩崎征人, 道路環境の変化が運転者の認知行動に及ぼす影響に関する研究、2006年度土木学会全国大会(秋大会)、日本土木学会、2006。(共著)
- 2) 洪一基, 岩崎 征人, 多変量分散分析法を用いた交通環境からの事故因子の定量的な評価、2007年度土木計画会全国大会(秋大会)、日本土木学会、2007.
- 3) 広井章人, 松本卓也, 洪一基, 岩崎征人, 道路環境の変化が運転者の認知行動に及ぼす影響に関する研究、交通と運輸(Traffic & Transportation) 4月号, 中国(上海)、2007.
- 4) I.K. Hong, Iwasaki Masato, Older Driver's Perception Response and Driving Behavior due to Complex Traffic Conditions at Signalized Intersection, Vietnamese Symposium on Economics and Technology (VSET2007), (国際政策大学院大学、2007。(国際シンポジウム、口頭発表)  
(題名：信号交差点の複雑な交通環境下における高齢運転者の認知、反応及び運転挙動)。
- 5) I.K. Hong, Iwasaki Masato, Quantitative Evaluation of the Accident Factor Due to the Traffic Environment by Factor Analysis, THE 4th VIETNAMESE & JAPANESE STUDENTS' SCIENTIFIC EXCHANGE CONFERENCE, 京都大学国際交流センター、2008。(国際シンポジウム、口頭発表)  
(題名：因子分析を用いた交通環境に起因する事故因子の定量的な評価法)
- 6) 山口 大, 須田 義, 織田 利彦, 大貫 正明, 石川 裕記, 洪一基, 研究用ユニバーサルドライビングシミュレータの臨場感向上の取り組み、自動車技術会2009春季学術講演会No.61-09 pp11-14 (共著)
- 7) Daisuke Yamaguchi, Yoshihiro Suda, Masaaki Onuki, Toshihiko Oda, Hiroki Ishikawa and Igi Hong, Improvement of Realistic Sensation on Universal Driving Simulator, International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD'09), The Royal Institute of Technology, SWEDEN, 2009. (共著)  
(題名：研究用ユニバーサルドライビングシミュレータの臨場感向上)

## 謝 辞

日本に来て一年目の平成13年1月26日午後6時30分頃、友たちから一通の電話が掛かってきた。新大久保駅で韓国の留学生と見られる20才代の男と40才代の任本陣男性が線路に落ちたある男性を助けようとして飛び降り駅に進入する電車にはねられ現場で即死した。そのうち韓国の男が新大久保駅前の店でアルバイトをしていた私の親友である可能性があるということだった。毎日午後6時から彼とスポーツクラブでジムをしていた。夏休みに自転車を乗って本州を縦断する計画を立て訓練をしていた。遅れたことがほとんどない彼がその日は来なかった。“まさか、そんなはずがない”と思いつつも新大久保病院の地下にある霊安室へ入った。遺体はあまりにも悲惨な状態に損傷され顔を識別することが出来なかった。しかし、彼が着ている切れた服、靴が見られた瞬間、彼が私の親友である‘李秀賢’さんであることがすぐ判った。

その年の9月、研究生として東京都市大学（当時、武蔵工業大学）に入った。システム工学部の人間工学研究室（谷井克則先生）で交通事故を防ぐための研究が始まった。平成16年修士課程を修了後、都市基盤工学専攻として交通工学研究室に（岩崎征人先生）を進学し交通安全について幅広く学ぶことが出来た。私は“人間は行動をするのになぜ振舞うのか、交通事故の90%以上を占めている運転者のヒューマンエラーを引き起こす原因が何か”を探るため研究をして来た。ヒューマンエラーを減らすことが出来れば交通事故も確実に減ると確信している。

ヒューマンエラーの発生原因を理解するには人間が周辺環境の変化をどのように受け取り、どのような判断をして行動するかを理解する必要がある。しかし、人間の行動をすべて理解し次の行動を予測することは不可能である。不可能というより自分自身も人間である以上機械のように決められたプログラムで行動するわけではない。私の研究は人間の代わりに確実な判断と制御を行う自動化された機械を開発することではない。人間が不安全な状況・不安全な行動をする時、人間を守る方策を探すことを目指している。今まで1千人以上の運転者から実験サンプルを取って分析してきたが、砂浜から一粒の砂を取っただけでありこれからも研究を続けなければならない。本書を通じて交通安全の技術者として導いてくれた 李秀賢君、谷井克則先生、森博先生、岩崎征人先生、皆川勝先生に心から感謝の意を表す。そして、これからも交通事故のない世界を目指し研究を続ける。