

脳科学的見地から構成する安全運転トレーニング

谷田公二*
菊池 修*

木幡高志*
森永明夫**

ヒトの動作は認知 - 判断 - 行動のプロセスで説明されているが、近年、認知に先立って予測が存在していることが脳科学から明らかとなってきた。時間的階層構造をなす予測的行動を表すTP理論 (Temporal Predictive behavior model) とは予測 - 行動 - 比較という新たな情報処理ループに時間的制約を加えて、自動車運転を含むヒトの行動にあてはめたものである。本稿では、まずTP理論を概説し、次にこの理論に基づいた安全運転指導のカリキュラムを作成し実践した例を挙げ、その適用の妥当性を検証する。

Safety Driving Training Including Brain-Scientific Point of View

Koji TANIDA*
Osamu KIKUCHI*

Takashi KOHATA*
Akio MORINAGA**

Recently, the fact that there is anticipation before cognition in the brain processing is elucidated by brain science, although human behavior has been explained as cognition-judgment-operation loop. The TP-theory (Temporal Predictive behavior model) is a model which applies anticipation-operation-comparison loop as new information processing with temporal frame to human behavior including car driving. This article firstly gives the general explanation about the TP-theory. Next, one example is illustrated where we created and conducted curriculums for safety driving training based on the TP-theory, and the validity of the application of the theory is discussed.

1. はじめに

von Holstらは著書の中で、「大脳生理学が誕生して以来、刺激により誘発され中枢神経系に到達するインパルスと、中枢神経系から直接あるいは間接的に再び出力されるインパルスとの間に、すなわち求

心系と遠心系との間にいかなる規則的關係があるのかが主要課題として取り上げられてきた。この古典的反射理論は、同理論では説明できない事実が十分に知られているにもかかわらず、多くの生理学者は一つひとつの中枢事象の『原因』は必ず『刺激』のみにあると考えている」と記している¹⁾。さらに続けて、「こう考えるのも当然である。なぜならば、より優れた理論が現れない限り、好き好んで単純な理論を放棄する者などいるわけではないからである。さらには、長い年月、『事実』として認められてきたのであるから、なおのことである。我々が導き出した新たな概念の特徴は、物の見方を180度変えたことにある。すなわち、与えられた求心系とこれが

* ㈱本田技術研究所四輪開発センター安全運転普及推進グループ四輪安全運転インストラクター
Automobile safety driving instructor ,Driving safety promotion group ,
Honda R & D Co. ,Ltd . Automobile R & D Center

** ㈱本田技術研究所四輪開発センター安全衛生課課長
Manager , Department of safety and health ,
Honda R & D Co. ,Ltd . Automobile R & D Center
原稿受理 2008年1月7日

引き起こす遠心系との関係、すなわち『反射』を問題にするのではなく、これとは逆に遠心系から効果器および受容器を介して惹起される求心系（『再求心系』と呼ぶ）を使って中枢神経系を考察した」とある。彼らの業績は、認知 - 判断 - 行動という従来の情報処理ループに置き換わる予測 - 行動 - 比較の情報処理ループの発見であり、これは、例えば Teuber²⁾やHawkins³⁾ら最近の研究者に深く浸透し始めている。脳科学ではさらにヒトの行動と時間の関連についての研究が進み、Pöppel⁴⁾らによって、ある一つの意識状態の持続時間は最長3秒であることが突き止められたように、さまざまな脳の解明が進んでいる。

このように、脳が制御するヒトの行動や思考が明らかになってきているが、未だ自動車技術分野では認知 - 判断 - 行動と記されているように予測 - 行動 - 比較の情報処理ループは広まっておらず、また予測は教育現場で導入されているが、根拠となる脳科学的な検討は行われてこなかった。これまでに TanidaとPöppelは脳の予測に始まる情報処理の性質と意識状態の時間的特性、そして心理学分野での知見を融合したヒトの行動モデル（TP理論：Temporal Predictive behavior model）を構築してきた⁵⁾。今回、安全運転教育の場でそのモデルに基づいて講習カリキュラムを提案実施し、そのモデルの実用性を検証するに至ったので、ここに報告する。

2. 運転行動モデル - TP理論 - 概説

2 - 1 理論的背景：予測を伴う再求心系原理

再求心系原理¹⁾とは、von HolstとMittelstaedtが発見した予測に始まる神経学の基礎的な概念である。その原理は、複雑に階層的に構造化された行動を説明する一般化可能な特徴を有す。再求心系原理の基本概念はMach⁶⁾とvon Helmholtz⁷⁾の研究による。彼らは空間知覚と運動過程の関係に着目し、Machは眼球運動が自発的制御下であれば空間安定性が成り立つと説明し、視覚的に理解できる空間能力には自発的なインパルス信号と視覚信号の一致が必然であると指摘した。von HolstとMittelstaedtはこの視覚を含むその他の活動もモデル化しその神経制御を再求心系原理と呼んだ。Fig.1にそのモデルを示す。上位の(戦略的な)中枢 Z_n から命令 K が下位の中枢 Z_2 へ、さらに神経命令が実行中枢 Z_1 へ送られる。 Z_1 は筋肉など効果器EFFを中枢から末梢へ向かう命令(遠心性)Eで刺激する。それと同時に遠心性命

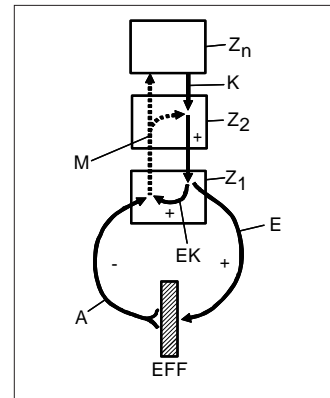


Fig. 1 再求心系原理

令EのコピーEKが蓄積される。効果器EFFでの運動の実行後、末梢から中枢へ向かう求心性信号(“再求心系”)Aが Z_1 に送られ、ここでこの再求心性信号が遠心性コピーEKと比較される。このとき負符号を持つAが正符号を持つEKと一致すると、両信号は互いに打ち消しあい、感覚運動回路は完結する。もしもEKとAが一致しなければ、感覚運動回路を修正するように、あるいは再開始するように、最終的に終わるまでメッセージMが Z_2 と Z_n に送られる。

大脳生理学では運動野から感覚野への情報伝達⁸⁾が発見され、Teuber²⁾は全ての知覚処理に対して予測の存在を示唆し、再求心系原理はさらに発展した。予測はGrossら¹³⁾が開発した知覚を表わす感覚運動モデルの重要要素でもある。またEdelmanとTononi⁹⁾はこれを“高度な脳における原則的な統合的なメカニズム”であると論じた。このように、再求心系原理は感覚器官と運動協調に関する一般形式化可能な概念となり、行動制御の理解と人間行動モデリングへ向けて重要な役割を果たしている^{3,10-12)}。これら理論的かつ実験的な神経科学的アプローチの他に、心理学的にMillerらは、行動は現在の状況と目標状態を比較する一連の試行段階から始まりその差異がなくなると終了するものとして、神経科学的アプローチと似たモデルを考案していた¹⁴⁾。

ここまで述べた分析とモデルは、運転行動のモデル化に必要な概念的背景である。しかしながら、すでに安全運転に関して時間制御がいかに重要であるかが実験的に示唆されてきたように^{15,16)}、このようなモデルに対してZakayら¹⁷⁾の時間知覚の知見を含めることも必要である。

2 - 2 理論的背景：時間統合の枠組み

人間行動には、例えば労働時間など日や年の社会

的環境の周期によって、覚醒と睡眠の位相を決める概日周期¹⁸⁾によって、あるいは脳の神経機構によって決められる多くの時間的枠組みがある⁴⁾。その行動は数分から数時間の範囲にある。例えば、食事の準備、会議、買い物、講義、運動、ガーデニング、職場へのクルマ、バイク、自転車の運転である。またさまざまな活動の多くには、目的のはっきりした、あるいは予測的な行動が備わっている。これら全ての活動には特徴的な類似性がある。すなわち、まず“戦略レベル”があり、ヒトはある特定の活動に対して目的とある長さの時間をあてがう。この決定は、気づくまでは意識に上らない、あるいは無意識のままかもしれない。次に目的へ上手く達するには、一連の順序であるマイルストーンの監視や、感覚運動制御下の活動を行うことや、短時間での感覚統合のような行動制御というさらに下のレベルが備えられていなければならない。

クルマの運転などには、予測した目的地へ達するために必要な階層的に定義される様々な行動が含まれる。NäätänenとSummala による“ゼロリスク理論”⁹⁾やWildeの“リスクホメオスタシス理論”¹⁰⁾のようなモデルは多く話題に上るが、交通行動での予測制御を伴う人間行動の連続的に組織化されたこの特徴^{2,1)}は未だ注目を得てこなかった。すなわち、運転の階層的な組織化を強調したSummala^{2,2,23)}のこれまでの視点を広げつつ、特に時間的にはめ込まれた制御

レベルの階層的な組織化の観点を加えるべきである。

複雑な神経情報の時間的枠組み^{2,4)}で考えなければならないのは、例えば、刺激伝達時間が聴覚系では1ミリ秒以下、視覚系では20ミリ秒以下という異なる感覚モダリティ間での差である。聴覚と視覚の情報は中枢構造の中で異なる時間で到達するので、中枢は別々なモダリティの局所活動の時間差をニューロン振動で対処しているとされる^{4,2,5)}。この振動による30~40ミリ秒の周期的持続時間は時間的かつ空間的に分布した情報を統合する形式的基礎を表わすと考えられ、この情報統合が複数のモダリティ間の情報に同時性を与え“根本的な事象”を作る神経基盤となり、意識活動の基礎的要素であると考えられている(後述、Fig.2中のレベルE)。

これら根本的な事象は上位層のおよそ2~3秒の時間枠で互いに結びつく。これは、時間知覚特性、発話、運動制御、視聴覚、そして短期記憶のようなさまざまな領域でさまざまな実験的パラダイムから支持されている。これら全ての実験結果は、神経活動が数秒間毎へ時間分割され、この分割が意識活動の時間基盤をもたらす自動的(前意味的)な統合処理に基づいていることを示唆している。意識(心理)活動の時間基盤は物理的に一定ではないが、およそ2~3秒である。例えば、花瓶や互いに向き合う2人の顔のように2とおりの見え方をもつ曖昧な視覚刺激に対して、およそ3秒毎に知覚的な意味の自動的

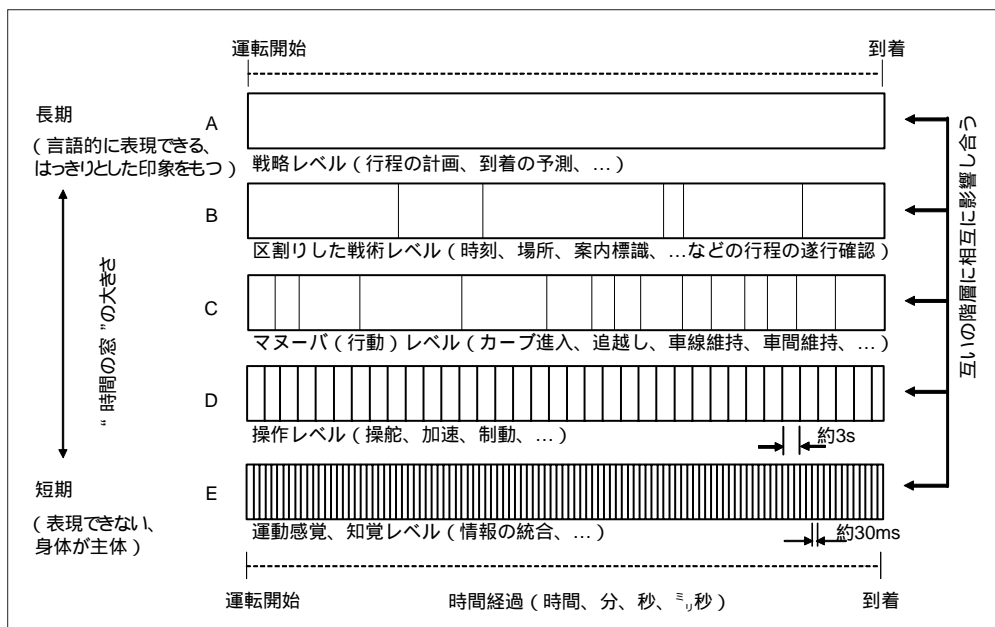


Fig. 2 運転行動の時間的階層モデル

な転換が経験される。このような知覚的転換は、KUBAあるいはBAKUのどちらかを聞くこととなる音素連続KU BA KU ...のような曖昧な聴覚的な題材でも起こる。3秒後にどちらか一方の知覚現象が意識的な意味をもつことをヒトは主観的に防ぐことはできない。2~3秒の区間の時間統合化は感覚運動制御でも見られる。被験者に指タッピングで2~3秒内の規則的な一連の聴覚刺激に同期するように求めると、数十ミリ秒という非常に小さな誤差で刺激は予測されるが、もしも刺激間隔が5秒のように長ければ、刺激発生に対して正確なタイミングで予測ある運動をプログラムすることはできない^{26,27)}。この場合は、運動は不規則となり、予測でなく刺激に対する反射となる。

このように2~3秒の範囲での時間統合化は神経認知機構の一般特性であると提起されている。この普遍的で自動的な統合化処理は、何が処理されるかによって決まるのではなく、意識に上る、あるいは意識に上らない活動が中に備わる時間の枠を決める(後述、Fig.2中のレベルD)。このように、30~40ミリ秒の、そして2~3秒の両方の時間統合化のメカニズムを運転行動モデルは含まねばならない。

2-3 予測を伴う階層構造のTP理論

先の二節を考慮して、交通行動での作業の予測時間枠の階層モデルを系統立てて説明する。自動車運転について言及するが、このモデルはバイクや自転車など他の運転行動、一般的な目的指向の歩行行動も含む。

モデルでは運転行動は5階層の作業に分けられる(Fig.2)。これらの(AからEまでの)レベルは運転開始から目的地へ達するまでのさまざまな作業を表わす。レベルAは目的地や経路が予測される長期展望を備えた戦略レベルである。運転開始前に運転目的と目的地が決定される。ドライバーは以前の交通状況の知識やナビゲーションシステムのような情報源からの情報を用いて、移動行程のおおよその時間長さを計上する。これには、時間の主観的表現とあらかじめ時間を見積もる能力が必要である¹⁷⁾。レベルBは、レベルAにはめ込まれ、目的地到達までの具体的なマイルストーンを備える。この戦術レベルBでは、クルマの現在地を示す道や角、ランドマークなどの具体的なセグメントが定義される。ドライバーはこのレベルで実績をモニタリングし、予定時刻に目的地へ到着するかどうか戦略計画を保守する。レベルCには、先と同様に、上位の戦術レベルより

短い時間展望を伴う具体的なマヌーバ(行動)が備わる。このレベルでは、追い越しや車線維持、カーブ進入のような運転能力が重要となる。レベルAとBは高次の認知的作業であるが、レベルC以下は、個々人の運転経験で培ってきた感覚運動制御である。初心ドライバーは主にこのレベルに注意を集中し、しばしば上位レベルの作業を顧みない。例えば、熟練ドライバーがよりよく予測できる^{28,29)}ように、戦略レベルAや戦術レベルBに対してより注意資源を配分できる運転能力獲得は、ドライバーが自身のクルマを苦もなく巧みに操れることを意味する。次に、操作時間枠として約3秒の時間基盤を有する予測制御がレベルDに備わる。このレベルは上位のマヌーバレベルに必要な行動要素をもたらす。例えば、クルマを操舵するには数秒の時間基盤が必要であり、その基盤の中でクルマの未来の位置が予測される。本モデルの最下位レベルEは、数十ミリ秒の範囲の高周波の神経処理であり、感覚運動系と知覚系の短時間の情報統合化などを司り、行動決定のための最小の時間的枠組みを作る³⁰⁾。レベルAで始まる低周波処理は意味のはっきりとした表現によって支配されるが、特にレベルDとEでの高周波処理は意味のはっきりとした意識に上る制御の外に脳のハードウェア特性を構成する。しかしながら、例えば、ある内部経験則の神経経路が用いられると、階層構造の上位レベルでの作業も意識外のみである。

基本的に、このモデルの階層構造は、意識的な活動と無意識の活動の両方を統合している。意識に上らない処理は神経システムの短時間活動を表わす一方で、(もしも経験則が広まらないなら)意識的な処理は主に長い時間展望について触れる。

Fig.2の右に見られるように、さまざまなレベルが互いに作用し合っている。特定の運転状況がレベルCからBとAへフィードバックされ(詳細はFig.3参照)あるいは反対に上位レベルは下位の作業レベルを調整する。もしもセグメント化された戦術レベルで途絶(例えば、結果として全交通流がスローダウンする事故)が起きたなら、ドライバーはレベルAの戦略を変更せねばならない。同時に、普段しないような追い越しをしようとマヌーバレベルでの運転行動を変更するかもしれない。もしも到着時刻を変更できなければ、レベルAは全ての下位の作業レベルに対して運転行動を制約し、レベルBで予測されたマイルストーンへ再度合わせるため車速を増すかもしれない。マヌーバレベルCでは運転行動はそ

れに応じて適合され、レベルDでの短時間予測制御は高い注意を引き出す。

このモデルの全てのレベルで、予測の原理が働く (Fig.3) 。はじめに、最終目的地を予測して戦略が全体の移動行程について選ばれる(“運転開始”)。交通状況の評価の後、ドライバーは運転し始める。マヌーバレベル (Fig.2参照)での中間目標の予測は結果的に運動プログラムの選択と開始となり³¹⁾、同時に遠心性コピーが蓄積され、並行してセルフモニタリングが可能となる。運動プログラムは運転操作を導き、そしてドライバーは自身の運転結果の情報を受け取る。次に、予測された目標は運転結果と比較され、予測が結果と一致する(差が小さい)と、フィードフォワードモードにおいて次の操作が引き継がれる。運転の支配的なモードであるこの予測モード内では、ドライバーの主観の状態は快適な感情である。しかしながら、もしも予測と運転結果が大きな差を持つなら、すなわち予測が侵害されたなら、新たな情報処理ルートが開かれる(予測内容、予測精度、差の知覚は個人個人の経験に依存)。ここでは予測外の付加的な情報を処理せねばならず、作業の

時間枠内で二者択一がなされる。もしも自発的制御が可能な時間が十分にあるなら、ドライバーは短時間の中断をのみ被りつつ直ちに予測モード (Fig.3の左側)へ戻ることができる。しかしながら、もしも自発的制御が可能な時間が十分なければ、ドライバーはフィードバック(反射)モードを強いられ、あるいは反射できないかもしれない(事故に遭うように)、もしも反射が可能なら、状況に依存した新たな求心性情報が以降の段階を決定する。運転は制御可能で続くかもしれない。しかし、もしも状況が制御不能であれば、運転の調整や、あるいは運転中止を含めた新たな戦略を選ばねばならない。なお、危険事象を主観的に捉えるヒヤリハットはこのフィードバックモードに含まれる。

快適な感情を導く運転の予測のフィードフォワードモードと不快な感情を導く反射的なフィードバックモード(灰色の二領域)の補完性は、上層の作業レベルにはめ込まれ、階層は入れ子状となる。マヌーバレベルでの運転状況は上位なる戦略レベルへ結びつき、予測と運転結果が比較される。小さな差はドライバーがマイルストーンへ達したことを、あるいは

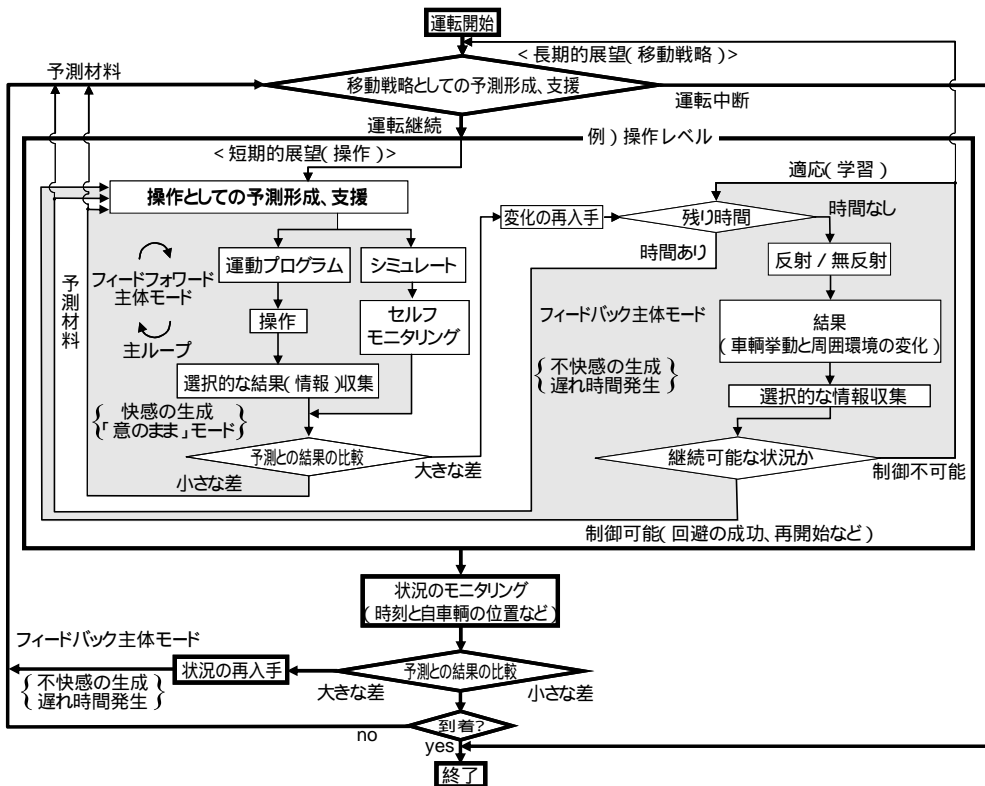


Fig. 3 情報処理における予測モードと反射モードに基づいた運転行動モデル

は最終目的地へ着いたことを示す。もしもまだ到着していないなら、上位の全体評価へ戻る(Fig.3の上)。しかしながら、差が大きければ、付加的な情報を処理せねばならず、(結果として不快となる)フィードバックループで、新たな状況評価に基づいた行動を決定する。概して、フィードフォワードモードが快適に対する神経基盤をもたらすので、本モデルでの運転は常に予測モードへ引き戻される。

フィードフォワード制御によって表わされる予測モードは運転モデルの主要な特徴であるが、フィードバック制御への操作回路は必要である。フィードフォワードモードとフィードバックモードもまた、脳の情報処理のトップダウン面とボトムアップ面を反映している。フィードフォワード(予測)モードはトップダウン処理として、一方で、フィードバックの反射的モードはボトムアップ処理として解釈される。両処理モードの補完性は運転行動の本モデルの重要な要素であり、二重制御のこの一般的概念は多くの研究によって支持されている³²⁻³⁴⁾。

本階層的なモデルはMichonが心理学的に提案したモデル³⁵⁾を脳科学的知見から支持するものであり、更にTP理論では、その一つひとつの階層構造の入れ子状態の中でフィードフォワードモードとフィードバックモードの両情報処理が存在し、時間と予測によって両モードが切り替わることを述べている。以上がTP理論で説明される運転行動モデルである。

3. 安全運転講習カリキュラムの実施と検証

3-1 講習の狙いとカリキュラムの策定

安全講習会は、受講生が自身の運転行動を振り返り、注意をどのように払うかなどを理解する契機となることが理想である。なぜなら、一般的な「何々に注意しましょう」という指導法では、指導項目が散逸的かつ並列的なテーマとなり受講生へ項目を伝えることが主となり、どのように運転行動に注意を払うのかを伝えにくかったと思われるからである。前述のTP理論は予測、時間、階層構造などを含む。講習では、上位階層の運転計画、戦略を立案する面と、下位階層の運動予測制御いわば走行テクニックに相当する面の両方の存在を受講生へ伝え、またその関連性を体験させることが必要である。関連し合うこれらを別々に指導してしまうと、運転計画指導だけでは運転操作向上はなく結局は運転計画改善につながらず、一方、高度な操作テクニックのみを獲得していても交通事故が多い事例³⁶⁾のように、操

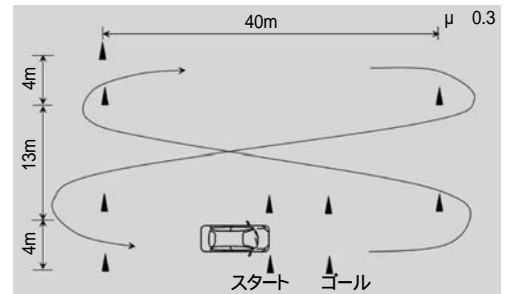


Fig. 4 カリキュラムコース

作のみを指導しても運転計画やマヌーバは改善されない。以上を踏まえ、次のカリキュラムを設定した。

不適切な車両操作が結果として不安定な車両挙動として現れ、自身の操作の不適切さが参加者に伝わりやすいように、滑りやすい路面(路面摩擦係数 $\mu = 0.3$)に 13×40 m四方に設置した4本のパイロンを8の字状で一走行あたり続けて3周走行するコースを設定した(Fig.4)。受講生には、タイヤを滑らさないように走行するように教示し指導した。この狙いは、運転操作(レベルD)を向上させることで、自身の運転技量を自覚し、どのような走行軌跡を描くのか、どのような車速管理をするのか(レベルC)など、下層から順に上層レベルAなる運転計画を整えていくことにある。周回時間がほぼ一定になった後で、次に同じコースで先ほどよりも周回時間をさらに短縮するように教示した。この狙いは、自身に不相应な時間短縮を強制した運転計画(不適切なレベルA)が、それ以下の階層のさまざまな行動へ影響を及ぼすことを体験させることにある。実施に先立ち、指導者へ同カリキュラムを適用しても走行は安定し周回時間が変化しないことが確認された。これは安全運転には戦略レベルAから操作レベルDまで運転管理を全て体得する必要があることを裏付けている。

3-2 カリキュラム実施と検証

本カリキュラムの実施に伴い、受講生にはカリキュラムの主旨、データの取り扱い、カリキュラム途中でも辞退できることを書面にて説明し、あらかじめ署名にて参加同意を得た。受講生は男性18名(平均25.7歳、標準偏差6.9歳)であり、車両は受講生が普段使用している車両であった。運転しているとき、そして運転していないときも指導者からの解説(下位レベルに関する、例えば、早めに操舵を開始できるように、早めに制動を終えられるように、旋回の

際はアクセルペダルを微調整して操舵輪のグリップを失わないようにしましょう、など車両挙動が力学的に安定する運転操作についてのコメント)を聞きながら自他の受講生の走行を省みる環境を整えた。

3周連続でタイヤを滑らさないように走行するモードでは受講生5名が自身の運転操作で安定した走行を習得した。残り13名もどの操作でもタイヤを滑らせることはなくなり、自身でブレーキングやステアリングを切り始めるタイミング、そして車速など管理できるようになった。このことは運転計画立案が可能となったことを意味する。これはFig.2で示したように下位レベルの運転操作を向上させることで上層の計画がまとまって行くことを実践させたものである。この後(走行数3~5回)、周回時間を短縮する課題を課すと、16名がタイヤを滑らせ車両コントロール不能状況を招くようになった。また残り2名も車外からこの状況を見学することができた。受講生から、車両コントロールが不能となり「緊張した」「焦った」という感想が寄せられ、予測外の反射的な操作がストレスとなることも経験できていた。これはFig.3に示したフィードフォワードモードがフィードバックモードに切り替わるとストレスになることを経験させたものである。また、不適切な運転計画を立てると、次のパイロンまでの制動開始遅れの発生、走行する軌跡が一定しないなど、どのように走るかのマヌーバが変わることも体験できていた。さらに、マヌーバの下位層でも、不適切なアクセル開度によるタイヤの空転の発生や強いブレーキを踏むようになってタイヤロック解除(ABS作動)が必要となるなど操作が変わることも経験させることができた。これはFig.2で示したように上位の計画が下位レベルの運転操作まで影響を及ぼすことを体験させたものである。

このカリキュラム実施後、車両挙動を力学的に安定させる運転操作向上と適切な運転計画立案の双方が欠けてはならないと受講生に説いた。その後、受講生に全体を通じてこの指導法についての印象をたずねると「とても有意義」が15名、「やや有意義」が2名、「どちらでもない」が1名、「やや不満」ならびに「不満」は各々0名であり、1%有意(コルモゴロフ・スミルノフ検定)で有意義との感想が寄せられた。このように指導の観点からも、階層的な運転モデルを体験させることで、自身の運轉行動の理解が深まり、どのように運轉を考えればよいのか、その契機を受講生に伝えることが可能となった。

なお、今回のカリキュラムが非常に滑りやすい路面で設定されたように、受講生の車両コントロールが運転計画立案に影響を及ぼし、運転計画立案の失敗が車両コントロール不能につながるようなカリキュラム設定が必要である。TP理論は交通教育の場では新しい観点であるので、現段階では指導者の解説なしに受講生のみで主体的に運轉行動全体を理解できるものではない。今後、指導法を含めた理論の普及や講習の工夫が必要である。

4.まとめ

以上、近年、脳科学の分野で明らかとなった脳の特성에基づいた運轉行動モデルを概説した。次にこのモデルに基づいて、安全運轉講習カリキュラムを作成し、その検証を行った。その結果、階層的に指導することで安全運轉の理解が得られることが明らかとなった。今後、このモデルを用いた安全運轉講習のカリキュラムを数多く考案実践し、交通事故防止に貢献していきたいと考えている。

最後に、TP理論は脳の性質の一面を描写したものであるが、数多くの交通安全教育に役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) von Holst, E. & Mittelstaedt, H.: Das Reafferenzprinzip. (Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie). Naturwissenschaften, 37, pp 464-476, 1950
- 2) Teuber, H. L.: Perception. In: Field, J., Magain, H. W. & Hall, V. E. (Eds.) Handbook of Physiology: Neurophysiology III. American Physiological Society, Washington, DC, pp. 1595-1668, 1960
- 3) Hawkins, J.: On Intelligence. Times Books, New York, 2004
- 4) Pöppel, E.: A Hierarchical Model of Temporal Perception, TRENDS in Cognitive Sciences, 1, pp 56-61, 1997
- 5) Tanida, K. & Pöppel, E.: A Hierarchical Model of Operational Anticipation Windows in Driving an Automobile. Cognitive Processing, 7, pp 275-287, 2006
- 6) Mach, E.: Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen. Gustav Fischer, Jena, 1885

- 7) von Helmholtz, H. : Handbuch der Physiologischen Optik . 2 . Auflage , Verlag von Leopold Voss , Hamburg und Leipzig , 1896
- 8) Sperry , R . W . : Neural Basis of Spontaneous Optokinetic Response Produced by Visual Inversion . Journal of Comparative and Physiological Psychology , 43 , pp 482 489 , 1950
- 9) Edelman , G . M . & Tononi , G . : A Universe of Consciousness . How Matter Becomes Imagination . Basic Books , New York , p .102 , 2000
- 10) Glimcher , P . W . : Decisions , Uncertainty , and the Brain . The Science of Neuroeconomics . MIT Press , Cambridge , 2003
- 11) Merker , B . : The Liabilities of Mobility: A Selection Pressure for the Transition to Consciousness in Animal Evolution . Consciousness and Cognition , 14 , pp 89 114 , 2005
- 12) Lindner A . , Their P . , Kircher , T . T . , Haarmeier , T . & Leube , D . T . : Disorders of Agency in Schizophrenia Correlate with an Inability to Compensate for the Sensory Consequences of Actions . Current Biology , 15 , pp .1119 1124 , 2005
- 13) Gross , H . M . , Heinze A . , Seiler , T . & Stephan , V . : Generative Character of Perception: A Neural Architecture for Sensorimotor Anticipation . Neural Networks , 12 , pp .1101 1129 , 1999
- 14) Miller , G . A . , Galanter , E . & Pribram , K . : Plans and the Structure of Behaviour , Holt , Rinehart and Winston , New York , 1960
- 15) 名切末晴、土居俊一、武井一剛、水野雅彦「ドライビングシミュレータによる緊急時の回避運転挙動の解析」『自動車技術会学術講演前刷集』941、pp .17 20、1994年
- 16) 宇野宏、平松金雄「緊急状況における余裕時間とドライバの操舵回避との関係」『人間工学』Vol 35、No 4、pp .219 227、1999年
- 17) Zakay , D . & Block , R . A . : Temporal Cognition . Current Direction in Psychological Science , 6 , pp .12 16 , 1997
- 18) Aschoff , J . : Circadian Rhythms in Man . Science , 148 , pp .1427 1432 , 1965
- 19) Näätänen , R . & Summala , H . : Road User Behavior and Traffic Accidents . North Holland , Amsterdam , 1976
- 20) Wilde , G . J . S . : Risk Homeostasis Theory and Traffic Accidents . Propositions , Deductions and Discussion of Recent Commentaries . Ergonomics , 31 , pp 441 468 , 1988
- 21) Lashley , K . S . : The Problem of Serial Order in Behaviour . In Jeffress , L . A (Ed) Cerebral Mechanisms in Behaviour . John Wiley , New York , pp . 112 136 , 1951
- 22) Summala , H . : Modeling Driver Behavior: A Pessimistic Prediction? In Evans , L . & Schwing R . C . (Eds .) Human Behavior and Traffic Safety . Plenum Publishing Corporation , New York , pp 43 65 , 1985
- 23) Summala , H . : Accident Risk and Driver Behaviour . Safety Science , 22 , pp .103 117 , 1996
- 24) Pöppel , E . : Lost in Time: A Historical Frame , Elementary Processing Units and the 3 Second Window . Acta Neurobiologiae Experimentalis , 64 , pp 295 301 , 2004
- 25) Podvigina , N . F . , Bagaera , T . V . , Boykova , E . V . , Zargarov , A . A . , Podvigina , D . N . & Pöppel , E . : Three Bands of Oscillatory Activity in the Lateral Geniculate Nucleus of the Cat Visual System . Neuroscience Letters , 361 , pp . 83 85 , 2004
- 26) Mates , J . , Radil , T . , Müller , U . & Pöppel , E . : Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization . Journal of Cognitive Neuroscience , 6 , pp 332 340 , 1994
- 27) Miyake , Y . , Onishi , Y . , & Pöppel , E . : Two Types of Anticipation in Synchronisation Tapping . Acta Neurobiologiae Experimentalis , 64 , pp . 415 426 , 2004
- 28) 小島幸夫「初心運転者と熟練運転者の運転特性 第1報：注視特性について」『自動車技術会学術講演会前刷集』956、pp 21 24、1995年
- 29) 永井正夫、音田稔、宮本直也、小島幸夫「山岳曲線部走行時の運転者の運転特性」『自動車技術会学術講演会前刷集』975、pp .177 180、1997年
- 30) Körner , E . , Gewaltig , M . O . , Körner , J . , Richter , A . & Rodemann , T . : A Model of Computation in Neocortical Architecture . Neural Networks , 12 , pp 989 1005 , 1999
- 31) Grillner , S . , Høllgren , J . , Ménard , A . , Saitoh , K . & Wikström , M . A . : Mechanisms for Selec-

- tion of Basic Motor Programs Roles for the Striatum and Pallidum .TRENDS in Neurosciences , 28 , pp 364 37 , 2005
- 32) Desmurget , M .& Grafton , S . : Feedback or Feedforward Control . End of a Dichotomy . In Johnson S . H (Ed .) Taking Action . Cognitive Neuroscience Perspectives on Intentional Acts . MIT Press , Cambridge , pp . 289 338 , 2003
- 33) Schill , K . , Umkehrer , E . , Beinlich S . , Krieger , G . & Zetsche , C . : Scene Analysis with Saccadic Eye Movements: Top down and Bottom up Modelling . Journal of Electronic Imaging , 10 , pp . 152 160 , 2001
- 34) Summala , H . : Top Down and Bottom Up Processes in Driver Behavior at Roundabouts and Crossroads . Transportation Human Factors , 2 , pp 29 37 , 2000
- 35) Michon , J . A . : A Critical Review of Driver Behavior Models : What Do We Know , What Should We Do ? In: Evans , L . A . & Schwing , R . C . (Eds .) Human behavior and traffic safety . Plenum Press , New York , pp . 487 524 , 1985
- 36) Williams , A . F . & O'Neill , B . : On the road Driving Records of Licensed Race Drivers . Accident Analysis and Prevention , 6 , pp 263 270 , 1974