

論文・解説

42

筋骨格系の特性を考慮した運転支援技術の開発 Development of Driving Support Technology in Consideration of Musculoskeletal System

菅野 崇*¹ 楠本 信平*² 高橋 英輝*³
Takashi Sugano Shimpei Kusumoto Hideki Takahashi中畑 洋一朗*⁴ 山本 康典*⁵ 谷田 晴紀*⁶
Youichiro Nakahata Yasunori Yamamoto Seiki Tanida

要 約

車両とドライバが協調した状態を最適と考え、運転支援システムの技術開発に取り組んでいる。この考え方にに基づき、車両がドライバの期待した動きになっている状態では、修正操作等の無駄な体の動きや筋肉の緊張がないものと仮説を置き、横方向と前後方向の支援制御を構築した。横方向の支援制御では、車線維持支援システム (LAS) において、これまでも車両とドライバの調和を目指し腕の筋活動に注目してきたが、更に腕のみでなく姿勢維持に関わる骨格筋活動まで範囲を広げ、全体として負担低減となる支援方法へと進化させた。前後方向の支援制御では、協調型オートクルーズ制御 (CACC) において、先行車の速度変動を増幅させないことにより後続の渋滞緩和に寄与するという一般的な目的に加えて、その制御性能と乗り心地を両立させるべく、車両の動きとドライバの頭部挙動を関連付けて評価を行うことで、速度変動を抑制させつつ、ドライバの無駄な頭部の動きを発生させない制御手法を開発した。

Summary

Mazda has been conducting technology development for driving support systems under the assumption that a good match between a vehicle and a driver provides a perfect condition for driving. Under such a condition, the vehicle behaves as intended by the driver and thereby he/she is not forced into unnecessary motion or muscular strain for correcting operations. In the development of Lane-keeping Assist System (LAS), which assists the control in the lateral direction, the primary focus had previously been placed on the activity of muscles of arms. This time, the scope of research was expanded to include the activity of skeletal muscles involved with postural maintenance, with the aim of reducing the overall workload of the driver. Another development related to the control in the front-back direction is of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) system. The general purpose of CACC is to contribute to traffic congestion relief by preventing velocity changes of a preceding vehicle from being amplified. With a view to improve both the velocity change control performance and the driver's ride comfort, the motion of a vehicle was evaluated in relation to that of the driver's head. As a result, a control method to restrain unnecessary motion of the driver's head while controlling velocity changes has been realized.

1. はじめに

近年、自動車の周辺環境を認識する技術の発達、通信インフラの整備により、それらを利用した運転支援システムが数多く開発されている。マツダではドライバが中心であるという考え方を運転支援技術にも適用し、操舵の支援システムである車線維持支援システム (LAS : Lane-keep Assist System) , また車車間通信を利用した協調型オー

トクルーズ (CACC : Corporate Adaptive Cruise Control) の技術開発に取り組んできた。本稿では、これらの取り組み事例について解説する。

なお、本研究で行った全ての被験者実験は、試験開始前にインフォームドコンセントを得て行っている。

2. 運転支援開発取り組みの考え方

運転行動の全体の流れを簡略化すると Fig. 1 となる。ド

*1~5 技術研究所
Technical Research Center

*6 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

ライバは運転席に座り、外部環境や自車の運動を車体構造、窓枠形状、シートを通して感覚器官、体性感覚から検出し、状況を認知する。そして行うべき操作を判断して、ハンドルやペダルを動かす、ひとつの大きなシステムである。その操作に基づいて車両が運動を起こし、外部環境との相対関係が変化し、それをまたドライバが知覚するというインタラクションを繰り返す。

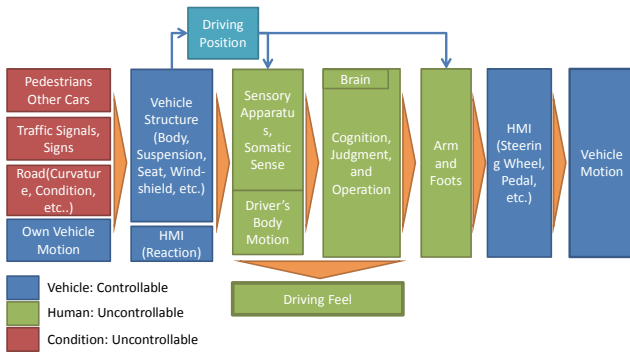


Fig. 1 Schematic of Driving Behavior

運転支援システムの開発において、設計者がコントロールできるのは車両の設計要素だが、その良し悪しは、このインタラクションに内在するドライバによって判断され、運転のしやすさや安心感といった、ドライビングフィールに現れてくる。すなわち良い運転支援とは、ドライバの特性と、車両特性とが調和したものでなければならない。更に、道路形状など外部環境に対して支援するシステムでは、外部環境とドライバの認知特性が調和するよう、その間を仲介する車両や支援方法の設計をしなければならない。

マツダではドライバと車両が調和した状態というのは車両がドライバの意に沿った動きとなっており、そのため無駄な体の動きや筋肉の緊張が少ない状態であると考えた。そこで下記の手順により、運転支援技術の開発をした。

- (1) ドライバの主観評価を表す運転行動の変化や筋活動等の反応を見極め、定量評価を行う。
- (2) 上記(1)の反応が生じる仮説を立て、筋活動や体の動きを低減させる支援方法を立案し、効果を確認する。

3. 操舵支援の設計

3.1 車線維持支援システム (LAS) の主観評価と課題

LASは、走行中に常に舵を支援するシステムであるため、ドライバが操舵する際の違和感がなく、一方で支援感を与えることが要件となる。マツダではこれらの相反する要件の両立のため、ドライバの腕の使い方に注目し、腕の筋負担を効果的に低減する支援手法を提案してきた⁽¹⁾。次に、LASの操舵支援量を0%~100%で変更できる技術検証車両を用意し、支援量に対する負担の軽減度合いを調査する主観評価を行った。支援量0%とは操舵支援が全くない通常の車両の状態であり、支援量100%とはドライバが操

舵しなくても車線内を走行できる支援を意味する。実験は運転支援システムの開発に従事する男性4名を対象として、最小曲率半径R=300mの周回路にて車速100km/hでの定速走行を行うことにより実施した。その結果、提案してきた制御則に基づき支援量を上げていくと腕の負担は下がるものの、あるところから腕以外の部位で負担を感じる主観評価結果が得られた。そこで2章の考えに基づき、運転姿勢維持を含む体全体の変化を捉えた設計に取り組んだ。

3.2 操舵支援量と運転姿勢の関係・仮説立案

主観評価と同じ条件のもと、操舵支援量に応じた頭部/胴体の変動と首・腕・胴・脚の筋電を計測した。実験結果をFig. 2に示す。図の左側のグラフは支援量に対する頭部および胴体の、車両に対するロール方向の傾きである。また右側のグラフは筋活動を示しており、事前に計測した最大随意収縮 (MVC: Maximum Voluntary Contraction) で正規化した値である。結果から操舵支援量を大きくすると、操舵反力が減ることにより、上腕三頭筋などの腕の負担は軽減されることが分かる。ところが主観評価どおり、胸鎖乳突筋(首)や大腿四頭筋(足)の活動量が増えている。

この現象を理解するために、腕の機能を改めて考える。結果の中で、支援により胸鎖乳突筋や大腿四頭筋を活動量が増えるのは、旋回に起因する横加速度が大きくなり、頭部や胴体に強い遠心力が加わるシーンの場合である。この場面で支援が大きい場合、操舵反力が小さくなっているため、力をいれてハンドルを持つことが難しい。そのためドライバは遠心力に抗うために腕が使い難くなり、胴体と足を使って運転姿勢を維持することになり、結果のような筋活動となったと考えることができる。

以上から腕の機能は、「舵を回す」だけでなく「運転姿勢の維持」という機能があると再定義し、両方を考慮した支援にする必要があると考えた。

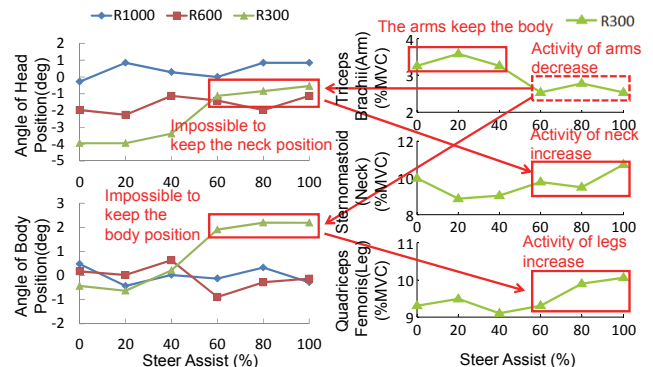


Fig. 2 Relationship Between Steer Assist and Muscular Activities

3.3 制御則と効果確認

運転姿勢の維持の観点で、腕が果たしている機能について考察する。Fig. 3に示すように、ドライバはシート座面

に胴体押し当てて、運転姿勢を維持していると考え、ドライバーの自重およびハンドルからの反力成分が垂直抗力となり、シートとの摩擦を利用して、旋回時の横力とつりあいを保って運転姿勢を維持していると仮説を立てた。

この仮説の下、速度100km/hで曲率半径300mの旋回をしているときの遠心力と、操舵トルク（すなわちドライバーが発生する操舵力）によって発生する摩擦力を計算するとFig. 4となる。なお、この計算にはTable 1に示す実測値を使用した。Fig. 4より、ドライバーの操舵トルクが1.2Nm以下となると、遠心力が摩擦力を上回ることになる。

そこで、このつりあいを超えないように操舵支援量の上限を抑える制御則を構築し、効果を確認した。Fig. 5に結果を示す。胸鎖乳突筋や大腿四頭筋の力みなく、上腕三頭筋などの腕の操舵負担のみを軽減できている。

以上のように操舵支援に関して、2章に示した考え方に基づいた設計により、腕のみならず全体としての負担を低減できる支援量を決定することができた。

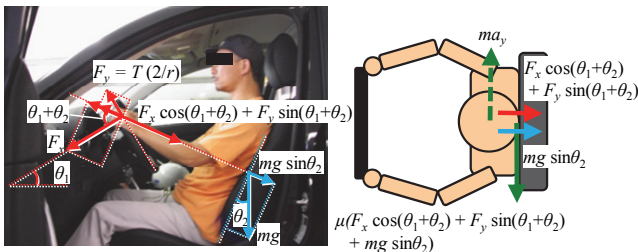


Fig. 3 Force during Cornering

Table 1 Simulation Parameters

Symbol	Parameter	Value	Unit
m	Mass of Upper Body	412	N
g	Gravity Acceleration	9.81	m/s ²
r	Diameter of Steering Wheel	0.350	m
θ_1	Angle of Seat	0.414	rad
θ_2	Angle between Seat and Steering Force	0.305	rad
μ	Static Friction Coefficient	0.44	
a_y	Lateral Acceleration	1.96	m/s ²

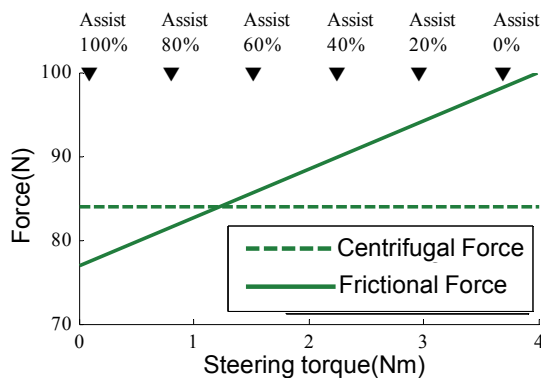


Fig. 4 Centrifugal Force and Frictional Force Which Act on the Body

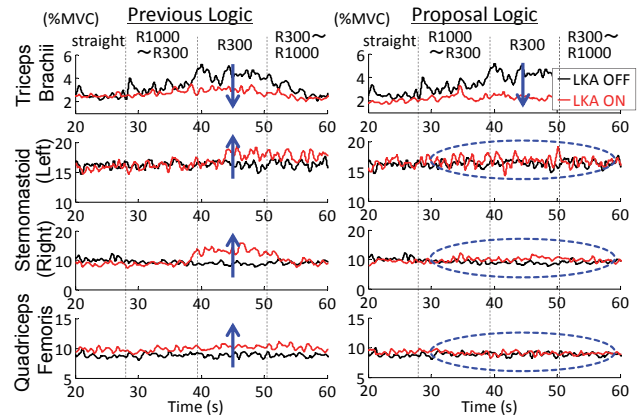


Fig. 5 Reduction Effect of Muscles Activity by LAS

4. 速度制御への設計

4.1 協調型ACC (CACC) の狙いと課題

ACC (Adaptive Cruise Control) についても、ドライバーとの調和を目指して取り組んでいる。ACCの機能を拡張し、車間通信を活用して車両の状態量のやり取りを行い、制御に活用することにより、複数の車両で協調しながら車群の制御を行う協調型クルーズコントロール (CACC) という考え方がある⁽²⁾。CACCでは、Fig. 6に示すように、自車の速度変動を先行車の速度変動よりも小さくコントロールする (速度増幅率: 自車の速度変動/先行車の速度変動 を1以下に抑える) ことにより、後続への速度変動の伝播を抑制し渋滞を緩和する。この技術開発が国交省、国総研と自動車各社による共同開発で進んでいる。そしてITS世界会議2013では通信プロトコルを共通化した上で、各社が独自に開発した制御方法による隊列走行実証実験を実施した⁽³⁾。

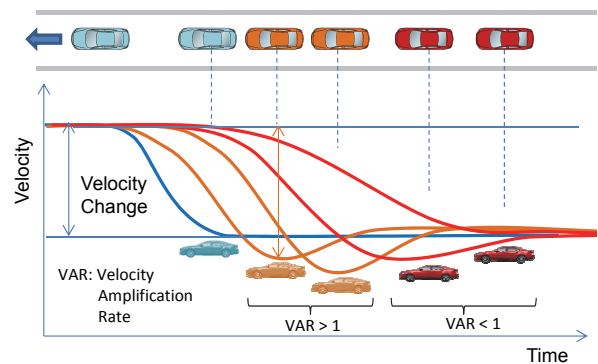


Fig. 6 Concept of CACC to Suppress Traffic Congestion

先行研究より、速度増幅率を抑制するには先行車の速度変動に対する応答性を上げることが有効であることが分かっている⁽²⁾。しかし単純に応答性を上げると、先行車の動きに過敏に追従することになり、乗り心地等のフィーリングが悪化する。それを防止するには、車両の挙動がドライバーの知覚と調和させることにより解決できると考えた。

4.2 追従減速における評価軸とドライバの反応

(1) 評価軸の策定

LASでの取り組み⁽¹⁾と同様、ターゲットとしている追従～減速シーンにおけるACCの評価の良いベンチマーク車両(車両A)と技術検証車両(車両B)との比較評価を行った。主観評価のコメントからテキストマイニングを行ったところ、追従減速という動的なシーンでの評価軸として下記(a)～(c)の三つが挙げられた。なお車間距離も重要なファクターだが、対象としているシーンでは、(a)と(c)に関わる一因子となる。この三つの評価軸の中でベンチマーク車両Aは、特に(b)の性能が技術検証車両を上回っていた。

- (a) 加減速タイミングの良さ
- (b) 加減速度の滑らかさ
- (c) 加減速度の絶対量の適切さ

実験を通してこれらの評価軸を示す客観指標を調べ、それを用いて性能を計った。

(2) ドライバの反応調査 I : ベンチマーク車両との比較

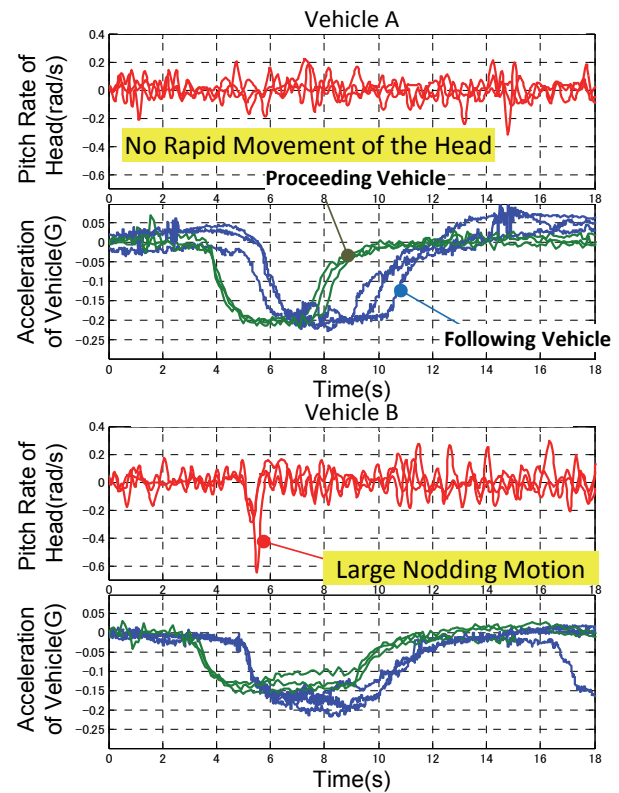
- ① 一定速度で走行する先行車と、ACCにて追従する後続車を用意し、被験者は後続車に乗る。
- ② 先行車は指示された加速度で減速し、①に対して低速となる定常走行をする (Fig. 6と同様の走行)。
- ③ 上記②に追従して減速した際の先行車および後続車の車両挙動と被験者の状態を計測する。

上記の性能に関してフィーリングを評価・比較できそうな物理量として、車両の挙動(速度変化, 加減速度)と、人間の加速度の知覚に関連の深い顎部の筋活動⁽⁴⁾および頭部の動きを計測した。被験者は3人であり、先行車は0.1Gおよび0.2Gを目標とした減速を行った。

この実験では、車両が車両Aと車両Bとで異なるため構造の特性も異なる。しかしながら本実験は動きの評価が中心となる点と、評価の良い車両Aをそのまま比較したことから、シートや窓枠形状等の構造部材の変更はせず、またシートポジションについて厳格な規定は行わず、被験者にとって、それぞれの車両で違和感のないドライビングポジションを取ることにした。

実験の結果として先行車および自車の加速度と、頭部のピッチ角速度(前屈がマイナス)をFig. 7に示す。また、同じ実験ケースでの顎部の筋活動として、胸鎖乳突筋の反応をFig. 8に示す。なお胸鎖乳突筋は、顎を上げ頭部を上に向ける際に使う筋肉である。

Fig. 7から車両Bは車両Aと比較して、減速Gが小さいにもかかわらず、頭部が急激に前屈することが分かる。またFig. 8から車両Aに対して車両Bは、常に筋の活動量が大きく、姿勢維持の負担が大きいことが分かる。頭部の動きや筋負担が車両挙動の知覚に影響があることが分かっている⁽⁴⁾ので、この挙動を抑えることが乗り心地の改善につながると考えた。



(※It is superimposed on three persons' result)

Fig. 7 Test Result of Following and Braking

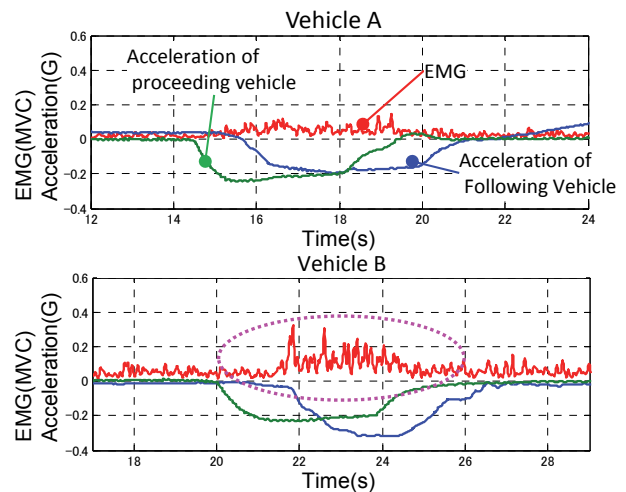


Fig. 8 Muscular Activity on Proceeding Vehicle Braking

(3) ドライバの反応調査 II : ドライバ自身の運転との比較

次に、ドライバ自身が後続車である車両Bを運転し、上述(2)項と同様に追従～減速～追従の一連の走行を行った場合と、車両BのACCによる追従減速との比較である。

Fig. 9に、実験結果として頭部のピッチ角と先行車両および自車両の減速度を示す。ドライバ自身による運転では、減速度の傾きが急であり、かつ減速度そのものもACCよ

り大きいですが、頭部の動きは安定している。一方でACCでは、一旦頭部を仰げ反らせた後、大きく下に向ける挙動となった。制動開始のタイミングは図中(a)として示すようにドライバーの方が早いことが分かった。

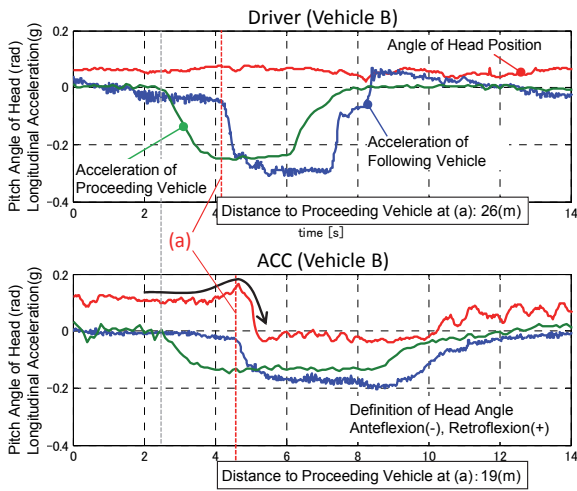


Fig. 9 Comparison with Driver Operation and ACC

上記の2つの結果を考察する。ACCの場合、ドライバーは車両の挙動が出る前に顎を上げ、頭部を後屈する。車両の応答前なので慣性力が筋を活動させている原因にならないことから、この反応は先行車両の減速をドライバーが知覚したことに起因していると考えられる。このことから、ドライバーが期待する減速タイミングは、制御ブレーキのタイミングよりも早いと解釈できる。そしてその後、すでに緊張した筋に対して減速度が加わることにより、頭部（または上体とともに）前方に倒れると考えることができる。

以上の考察から、制御タイミングをドライバーの姿勢変化に調和させて減速度を発生させることにより、ドライバーの期待にあった車両挙動となり、頭部の挙動が小さくなると考えた。それに加え速度増幅率抑制の条件を満たすよう減速量を制御することにより、乗り心地と速度増幅率低減性の両立が可能との仮説を立て、制御則の構築を行った。

4.3 仮説および制御則の立案と効果確認

制御モデルのエッセンスをFig. 10に、基本となる制御則を式[1]に示す。式[1]の右辺第一項は相対距離に比例する項、右辺第二項は相対速度に比例する項であり、右辺第三項は、先行車加速度のフィードフォワード項である。この加速度は、ACCの場合、カメラまたはレーダによる相対速度推定値の微分を伴うためノイズ等の影響が大きく主な要素として使用できないが、CACCでは通信により高精度な先行車両の状態量が取得できるため使用可能である。すなわちACCでは、右辺第一項と第二項にて制御するが、CACCではすべての項を使用する。

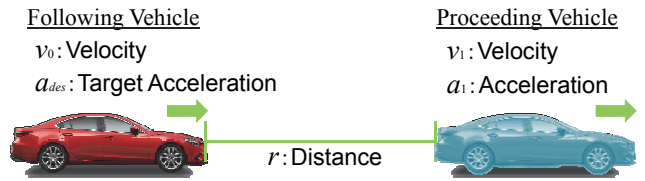


Fig.10 Simplified Control Model

$$a_{des} = K_1(r - hv_1) + K_2(v_1 - v_0) + \frac{K_3}{(Ts + 1)^2} a_1 \dots [1]$$

- K_1 : 車間距離ゲイン
- K_2 : 相対速度ゲイン
- K_3 : 加速度フィードフォワードゲイン
- h : 車頭時間(sec)
- T : FF項伝達特性係数

上記の構成による基本特性を解析的に評価すると、式[1]の右辺第三項がないACCでは、速度増幅率を抑制するためのパラメータは限定的であることが知られている⁽⁶⁾。そのため、乗り心地との両立が困難である。一方で右辺第三項を利用するCACCでは、速度増幅率を満たすパラメータに幅をもたせることができる。そこで右辺全体として、ドライバーのブレーキタイミングを模擬する伝達特性とし、かつ速度増幅率1以下となるよう K_3 と T を設定した。

制御の効果を確認するため検証実験を行った。実験はACC,CACCの制御手法の異なる車両3車種3台に、先行車を加えた4台による追従減速について、ドライバーによる運転とACCおよびCACCについて実施した。実験はテストコースにて行われたが、ドライバーによる運転では一般道での運転を模擬するように指示した。速度増幅率の低減効果の確認結果をFig. 11に示す。

結果を見るとドライバーによる運転では、先行車の挙動を見ながらの操作であるため、動きが安定せず3台後の速度変動量が38%増加している。また先行車の減速に対する、制動行為のタイミング（アクセルオフを含む）は、car1, car2は先行車の停止灯に反応し0.8~1.2秒後に開始しているが、car3については先行車の接近を視認して制動を行っているため反応が遅く減速幅も大きいことになった。ACCの結果では、制動開始は遅いものの動きは安定しており、3台後の速度変動量は22%増加と改善している。CACCでは、制動開始は停止灯により制動する運転に近く、動きも安定していて3台後も先行車の最低速度を下回らないように制御できている。次に、フィーリングの結果として顎部の筋負担の比較をFig. 12に示す。実験結果から、ACCでは自車の減速の直前から筋活動が増加しているが、CACCでは減速タイミングが早まっており、目立った筋活動が発生せずに顎部の負担が低下していることが分かる。次にベンチマークとの比較で差があった「加減速の滑らか

さ」と「加減速タイミング」の主観評価の結果をFig. 13に示す。いずれの指標についてもACCよりも改善した結果となっている。

以上の結果から制御則は、速度増幅抑制と、乗り心地の両方の性能を向上できていることが確認できた。

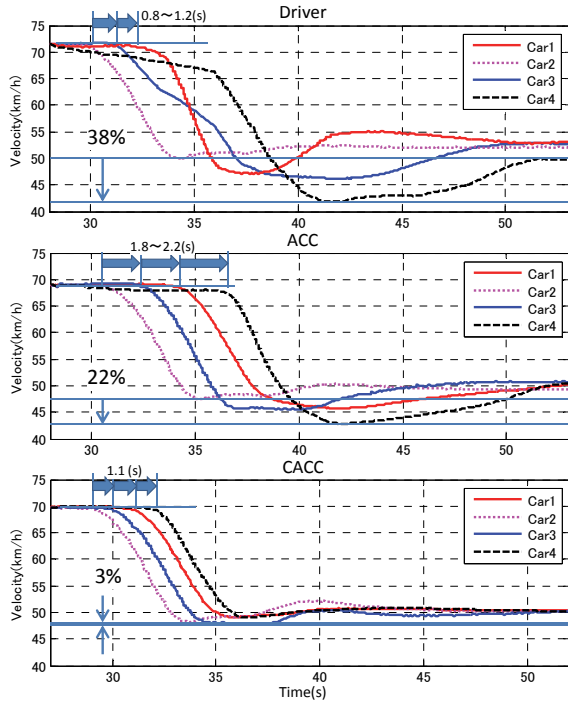


Fig. 11 Result of Damping Traffic Shockwave

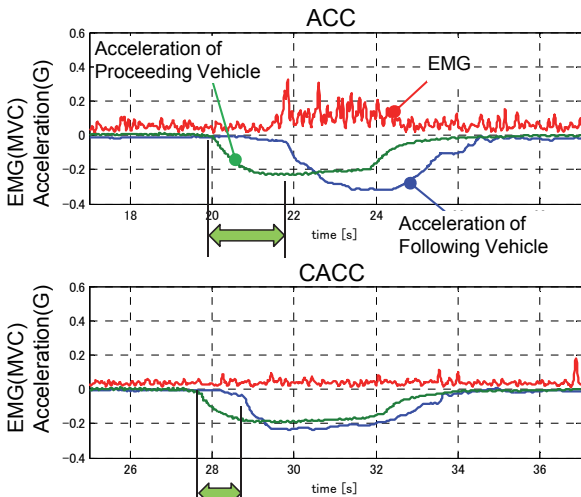


Fig. 12 Result of Muscular Activity on ACC and CACC

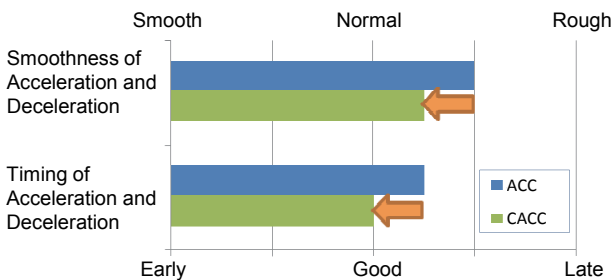


Fig. 13 Result of Subjectivity Evaluation (N=3)

5. おわりに

今回、車両の動きと体の動かし方の両方を評価・考察して、ドライバーに無駄な動き・筋活動をさせない支援手法を開発した。横方向の支援（LAS）と前後方向制御（ACC）の両方で同じ考え方で評価と課題設定、仮説とロジック構築、効果検証を進め、いずれにおいてもドライバーの無駄な動きが減り、フィーリングの良い操縦支援が実現できた。今後、この考え方を発展させていき、人間はどのようにしてクルマを運転しているかを解明する研究へと結びつけていく。

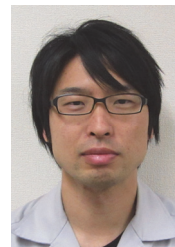
参考文献

- (1) 高橋ほか：ドライバーの筋活動に基づく車線維持操舵支援制御の研究, *マツダ技報*, No.31, pp131-136 (2013)
- (2) 日高ほか：ACCを活用した高速道路サグ部の交通流円滑化, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.87-12, pp.1-6 (2012)
- (3) 土井ほか：通信利用レーダークルーズコントロールによる渋滞抑制に向けた取り組み, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.50-14, pp.5-8 (2014)
- (4) 梅津ほか：新型プレマシー ダイナミックフィールの統一感, *マツダ技報*, No.28, pp.13-18 (2010)
- (5) 大前ほか：大型トラックのCACCにおける車間距離制御アルゴリズムの開発 -エネルギーITS推進事業における自動運転・隊列走行の開発-, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.56-13, pp.11-16 (2013)

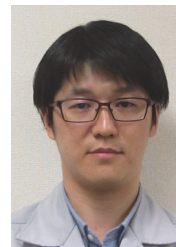
■ 著 者 ■



菅野 崇



楠本 信平



高橋 英輝



中畑 洋一郎



山本 康典



谷田 晴紀