

スリップ制御による車両のスタビリティとステアアビリティの向上

Improvements in Vehicle Stability and Steerability with Slip Control

金 圭 勇*
Keiyu KIN

矢 野 修*
Osamu YANO

占 部 博 之*
Hiroyuki URABE

要 旨

車両のスタビリティ(安定性)とともにステアアビリティ(操舵特性)も同時に向上させるために、車体スリップ角、路面摩擦係数、タイヤサイドフォース等車両運動パラメータを正確にかつリアルタイムに推定し、4輪スリップ制御を用いて車両運動を最適化するロジックを構築した。制御効果は氷雪路テスト結果に明確に現われロジックの妥当性が証明された。

ABSTRACT

To improve vehicle stability in unison with steerability, vehicle dynamic parameters such as vehicle slip angle, road friction, and tire side forces were precisely estimated in a moment, and utilizing four wheel slip control a logic for optimizing vehicle dynamics was formulated. Tests on ice- and snow-covered roads demonstrated the effectiveness of the control, and confirmed the validity of the logic.

1. まえがき

98年に登場したホンダ VSA (Vehicle Stability Assist)⁽¹⁾は、FF車のスタビリティ向上を目的に前2輪ブレーキ制御を基本技術として開発され現在も進化しつつある。しかし、さらにステアアビリティも両立しかつFF車以外にも適用するためには、4輪全てのスリップを最適に制御可能な技術として発展させることが重要である。本研究では、VSAの性能向上を目標に課題と達成手段を示し、実車による証明をする。制御は4輪ブレーキアクチュエータを用いたスリップ制御とエンジントルク制御である。テスト車はFR車を用い、テストコースは制御効果の高い氷雪路面に限定した。

2. 研究目標

VSAは前2輪のスリップ制御をベースにして車両のヨーレートが規範値を超えた場合にフロント外輪に適正ブレーキをかけて過剰モーメントを抑制する安定化制御である。本研究ではさらに一歩進めて、安定性だけではなくあらゆる路面において可能な限りタイヤのグリップを確保することで、Fig.1に示すような操舵に忠実で回避性にすぐれたハンドリングの実現を目指した。

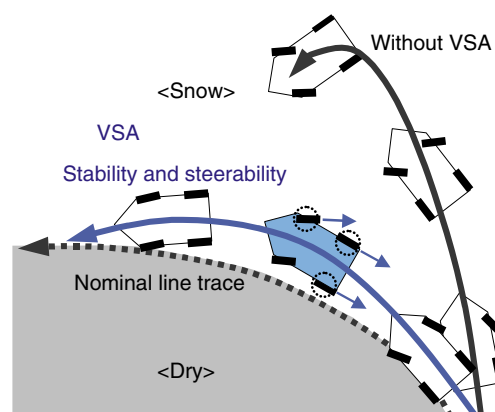


Fig.1 Image of improved VSA

つまり、

- (1) 安定性向上と疲労軽減:スタビリティ(リアタイヤのグリップ)
- (2) 事故回避性能の向上:ステアアビリティ(舵の効き)の両立を基本目標とし、将来の安全技術に結び付けようと考えた。

3. 解決すべき研究課題

旋回中の車両は4輪のタイヤサイドフォースにより横加速度とヨーモーメントが決まる。そのサイドフォースはタ

*栃木研究所

イヤスリップ角に比例して増加するが、ある角度以上では飽和する。このグリップ限界は路面によって異なり、Fig.2に示すように、特に氷雪路ではおよそ1～5度で限界に至り不安定になりやすい。グリップ限界から運動が不安定に至る過程と、車両の作用力とタイヤスリップ角の関係をFig.3に示す。これからわかるように、車両運動を正確に把握するには、車体スリップ角を推定しタイヤのスリップ角に変換して横力・スリップ角特性からタイヤの力を得る必要がある。また、あらゆる路面に適応するために路面摩擦係数も推定する必要がある。さらに、推定した4輪サイドフォースからオーバーステア(OS)とアンダーステア(US)を判断し、車体のヨーモーメントとスリップ角を最適な4輪スリップ制御によって修正し、安定性と舵の効きを両立しなくてはならない。以上から本研究の課題を次の三つにまとめた。

- (1) 車体スリップ角・タイヤスリップ角推定ロジックの開発(β 推定ロジック)
- (2) タイヤ路面間摩擦係数推定ロジックの開発(μ 推定ロジック)
- (3) 最適4輪スリップ制御ロジックの開発(λ 制御ロジック)

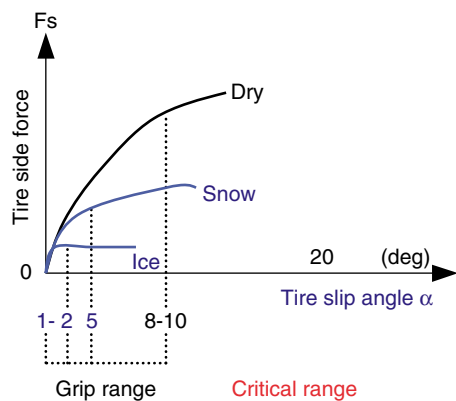


Fig.2 Tire side force characteristics

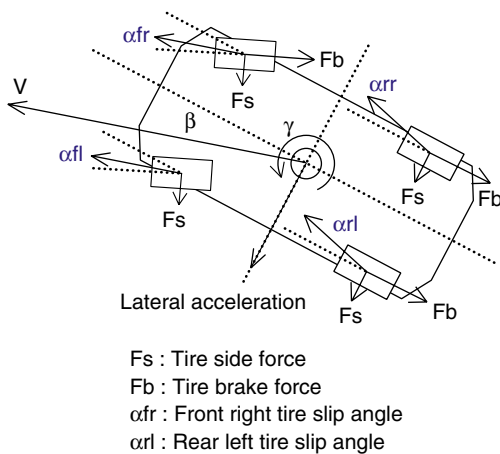


Fig.3 Vehicle dynamics and stabilizing flow

以下、車体スリップ角を β 、タイヤ路面間摩擦係数を μ 、タイヤスリップ率を λ と記述する。

4. タイヤスリップ角 α ・車体スリップ角 β の基本推定ロジック

タイヤスリップ角 α の目標推定精度は氷上でサイドフォースが飽和する1～2度を判別できる ± 0.5 度を目標とする。本技術のシステム構成をFig.4に示す。センサは舵角、前後加速度、横加速度、ヨー速度、車輪回転角の各センサである。次に基本ロジックの構成をFig.5に示す。ロジックは α 、 β 推定、 μ 推定、タイヤ特性データマップと β 制御(4輪スリップ制御)の四つのロジックから構成される。車体スリップ角 β の推定手法は、従来の2輪運動方程式(パネ上)と非線形タイヤ特性(パネ下)を組合わせて各タイヤの力を推定できるロジックとした。さらに、積分ノイズを避けるために横加速度センサ値ではなく4輪の推定サイドフォースの合計をフィードバックし、その推定サイドフォースはタイヤデータマップから読み取るようにした。タイヤデータは三つの特性

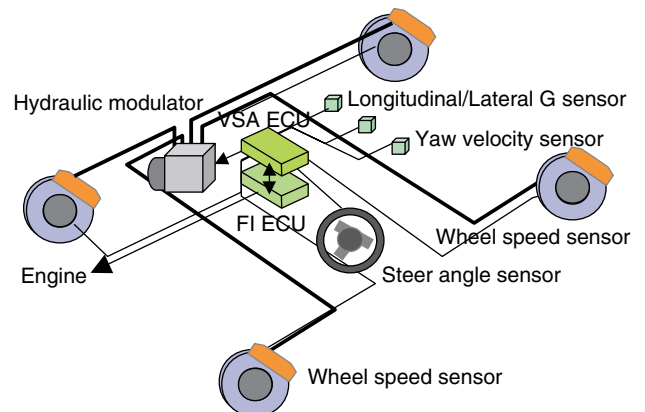
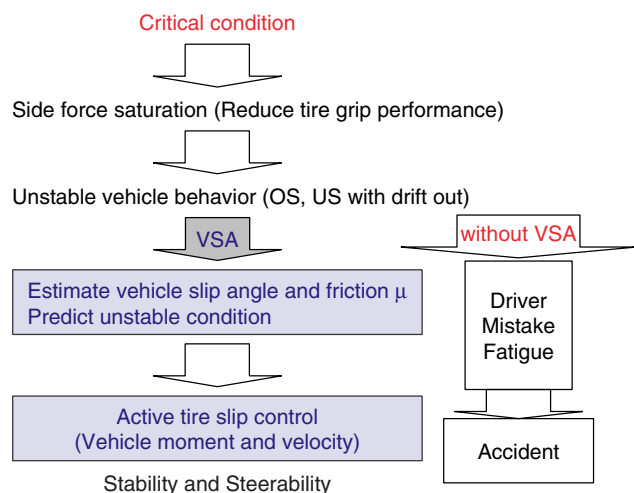


Fig.4 System configuration



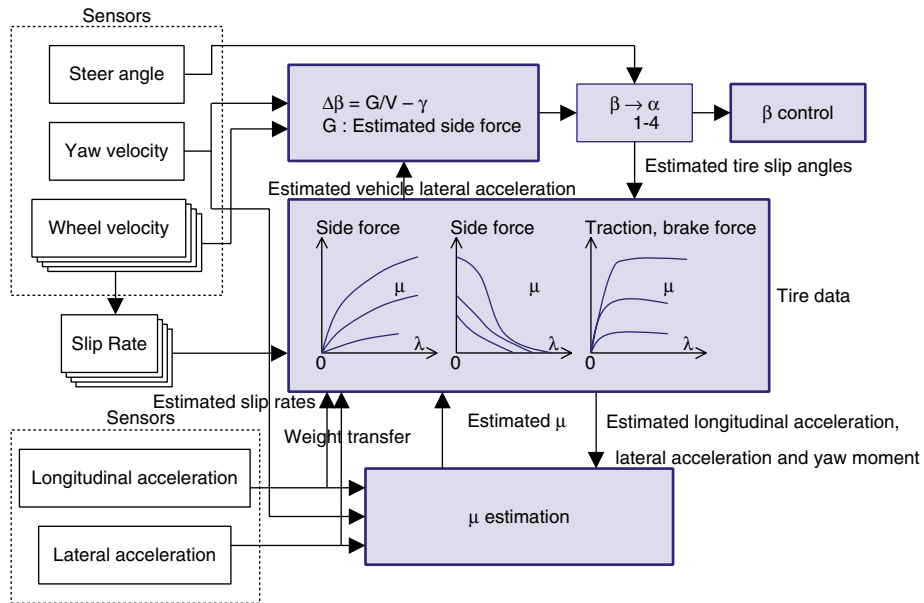


Fig.5 Basic estimation logic

- (1) スリップ角－横力
 - (2) スリップ率－横力
 - (3) スリップ率－制駆動力
- で表し、推定 μ により適応させている。

5. タイヤ－路面間 μ 推定ロジック

μ 推定ロジックは本研究の最重要課題である。推定すべき状況は、定常的な直進走行から限界に近い旋回や μ ジャンプ、さらにABS等タイヤスリップ制御中と広範囲に及び、その全てにおいて推定精度が安定維持されなくてはならない。そのために、次のフローを基本にFig.6のようにロジックを構築した。

- (1) 直進走行、旋回走行、ジャンプ μ の各モード別に μ 推定

- (2) 推定タイヤスリップ角 α とタイヤデータマップから前後・横加速度、ヨーモーメントを算出
- (3) 推定値(前後・横加速度、ヨーモーメント)と各センサ値との比較から μ 補正值算出
- (4) μ 補正值をもとにタイヤ特性データマップのゲインを適応

さらに、図に明記してはいないが、前後荷重移動によるタイヤデータマップの適応も含まれている。

μ 推定の目標精度は、スリップ角の目標精度 0.5 度から換算して 0.05 に設定した。

6. 車体スリップ角 β ・路面 μ 推定実車データ

実車による前記二つの推定ロジックのテスト結果を示す。

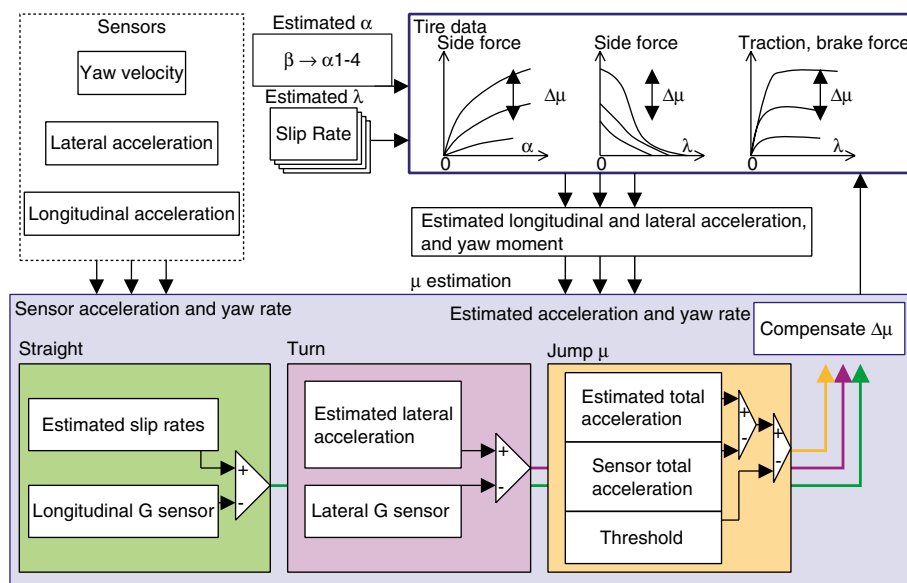

 Fig.6 μ estimation logic

Fig.7 は水上スラローム走行(40km/h)時の β 推定結果である。車体スリップ角測定器(オノビット)にほぼ一致する推定値が得られていることが確認できる。Fig.8はドライ路面から低 μ 路面(ウェットバサルト)へ左右に操舵しながら進入(40km/h)した時の μ 推定結果である。低 μ 突入時にリアルタイムに μ 補正していることが確認できる。車輪速度データは制御動作を示している。

7. タイヤグリップ力推定とスタビリティ判断

OS について推定タイヤスリップ角 α 、車体スリップ角 β 、ヨーレート、横加速度、タイヤサイドフォースを用いて分析した結果を Fig.9 に示す。それによると、OS 開始から

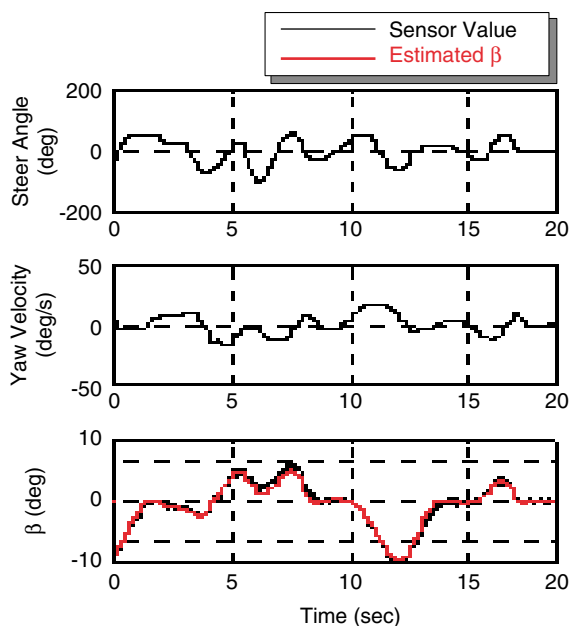


Fig.7 β estimation test data

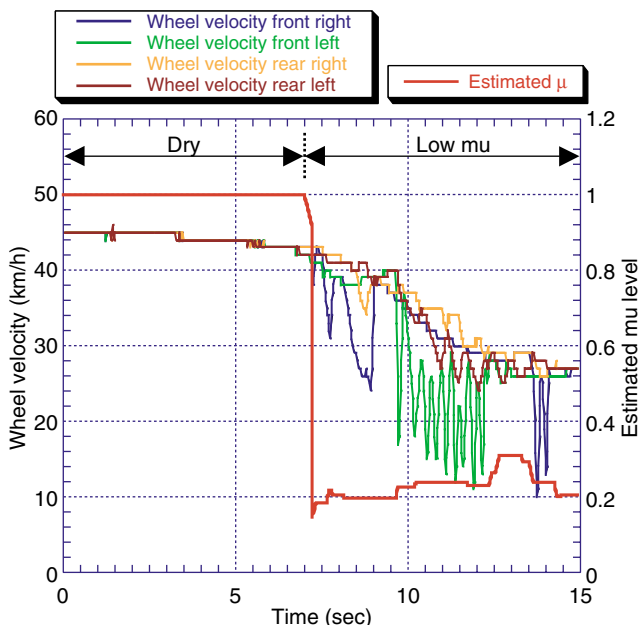


Fig.8 μ estimation test data

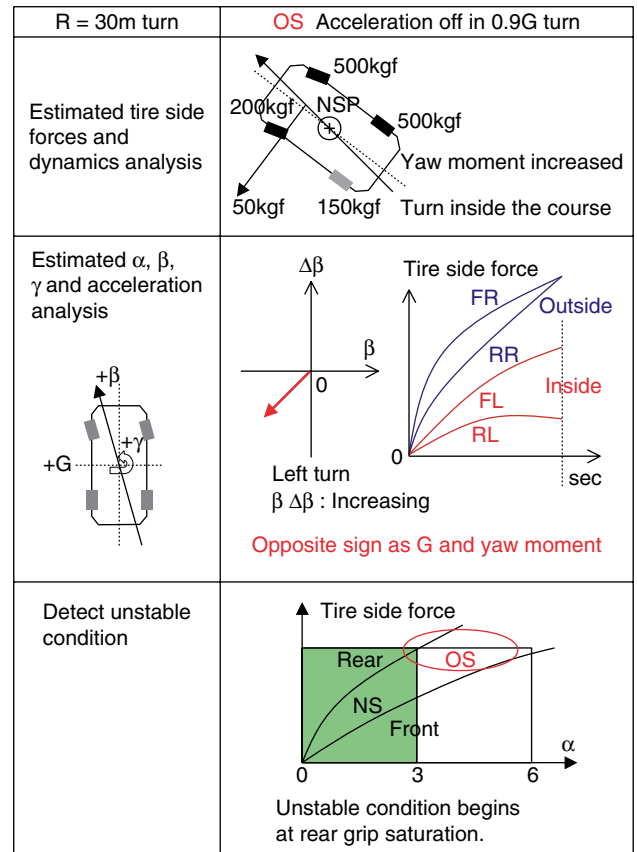


Fig.9 Stability analysis

リアタイヤのサイドフォースが飽和していることがわかる。そこで、 α_r (後輪のスリップ角)の絶対値とその微分値 $\Delta \alpha_r$ を算出し、各リミット(判定値)と比較することで限界の早期予測が可能になる。

補足として US についても少し触れる。OS がリアタイヤのグリップ低下による過剰モーメントであるのに対して、USのほとんどが速度オーバーによる目標ライン外への逸脱であり、逸脱量を定量化するのは現状のセンサとロジックだけでは困難である。目標となるべき走行ラインを正確に知る方法が無いからである。

また、従来の US 制御は、舵角から推定したその速度における規範ヨーレートとセンサヨーレートとの比較から制御量を設定しているが、この方法では、ヨーモーメントを制御できたとしても走行軌跡を目標ラインに修正できず、事故回避という観点からは充分ではない。

以上から、本研究では OS 制御に限定してスタビリティとステアアビリティを満たす最適制御について述べ、従来のヨーレート制御と比較する。US制御については、車両単体の制御だけでは現状性能を超えることができないと判断し、今後の課題とした。

8. 車両運動の最適制御

本研究三番目の課題である最適制御について述べる。

氷雪路旋回中の OS・スピン現象について分析すると、その過程は Fig.10 に示すように四つの段階に分けて考えられる。

- (1) リアタイヤスリップ角 α_r が限界値を超える。
- (2) リアタイヤのサイドフォースが飽和する。
- (3) 車体スリップ角とヨーモーメントが増加する。
- (4) グリップを失い、舵が効かず操縦不能に陥る。

この過程から解るように、(1)の段階で OS を予測できれば、(2)と(3)においてカウンターモーメントと減速の二つの制御を交互に繰り返すことで車両の安定性を確保しつつ舵も効く運動状態に回復できる。そのイメージを Fig.11 に示す。

つまり、安定性—スタビリティは前外輪ブレーキ制御を用いて、舵の効き—ステアアビリティは後2輪のブレーキ制御によってグリップ域に戻すことで実現できる。その制

御フローを Fig.12 に示す。

本研究の新規性は従来のスタビリティ制御に加えてステアアビリティ制御も同時に実現した点であり、それはリアタイヤの安定維持に最低限必要なサイドフォースを残しながら最大の減速を得る最適制御(以下 β 制御)である。そのためにタイヤスリップ角 α と路面 μ の推定ロジックが不可欠である。

9. 実車制御テストデータ

実走行テストは、スラローム、Jターン、ワインディングの3モードについて各々圧雪($\mu = 0.4$ 程度)と氷上($\mu = 0.15$ 程度)で実施した。紙面の制限上、圧雪におけるスラロームとJターンのデータのみ掲載する(Fig.13, Fig.15: β 制御と Fig.14, Fig.16: 従来型ヨーレート制御)。グラフ

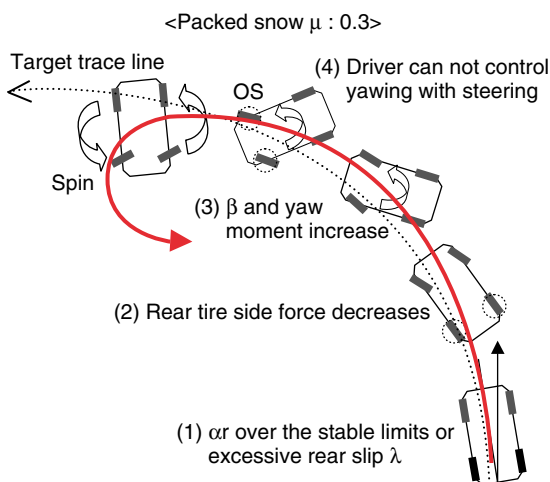


Fig.10 Over steer dynamics analysis

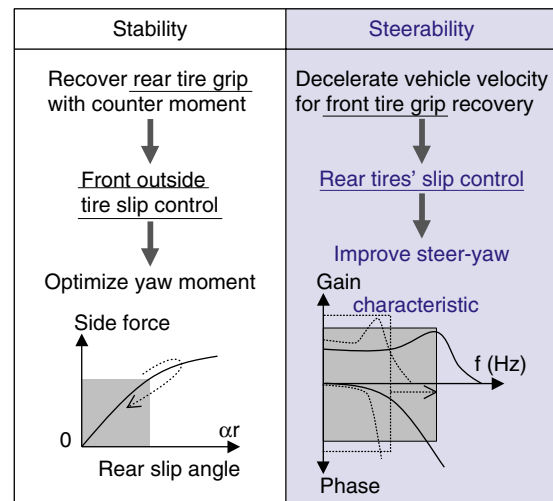


Fig.11 Optimum control concept

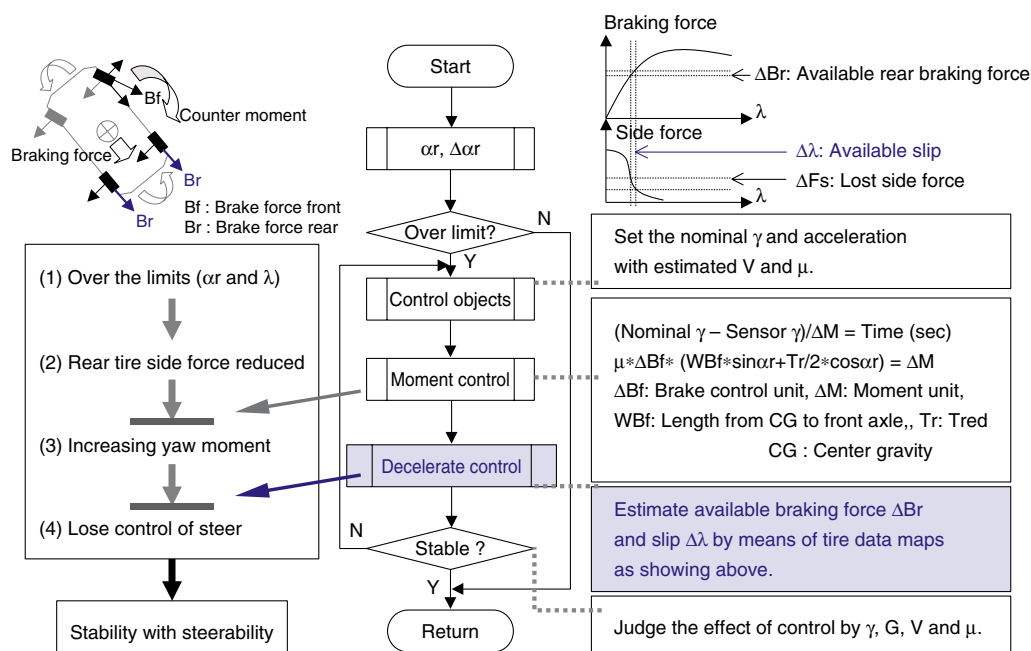


Fig.12 Basic control logic

は操舵角(赤 左転舵が+)，推定車体スリップ角 β (青)，ヨーレート(緑 左回りが+)の時系列データを表している。

β 制御を従来制御と比較すると，安定性(スタビリティ)と舵の効き(ステアアビリティ)ともに優れていることがわかる。制御によってヨーレートとスリップ角の収束性が良く，操舵角の動きが(ドライバー入力)安定している。ドライバーは確かなグリップ力を感じ取ることができ，疲労軽減も含めて回避性能の向上という当初のコンセプトに見合った効果が得られた。

対して，従来のヨーレート制御は過度なヨー運動そのものは素早く抑え込まれているが，安定した姿勢(スリップ角)の持続性に欠ける。つまり，旋回中にグリップ力が変動して操舵修正が大きく頻繁である。

他の走行モードにおいても， β 制御がより安定していてラ

イントレース性も高かった。特に， μ が低いほど車体速度が高いほどに，つまり限界に近いほど β 制御の効果が大きかった。

10. 制御効果と評価方法

氷雪路テストの結果を考察する。まず，評価方法について述べる。

非線形ダイナミックスを評価する場合， $\beta - \Delta\beta$ の位相平面リサージュを考察すべきだが，Fig.17 に示すようにあえて操舵とヨー運動，操舵とスリップ角の二つの評価に分けて吟味した。理由は，車両運動制御はドライバーとの関連において良好な入出力特性を維持することで，スタビリティとステアアビリティを両立できると考えたからである。つまり，ドライバーの操舵入力に対する車両のヨーレートとス

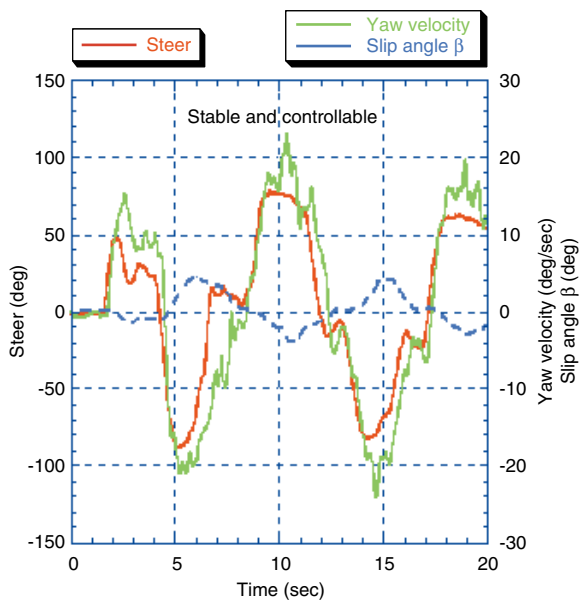


Fig.13 Slalom test on snow (β control)

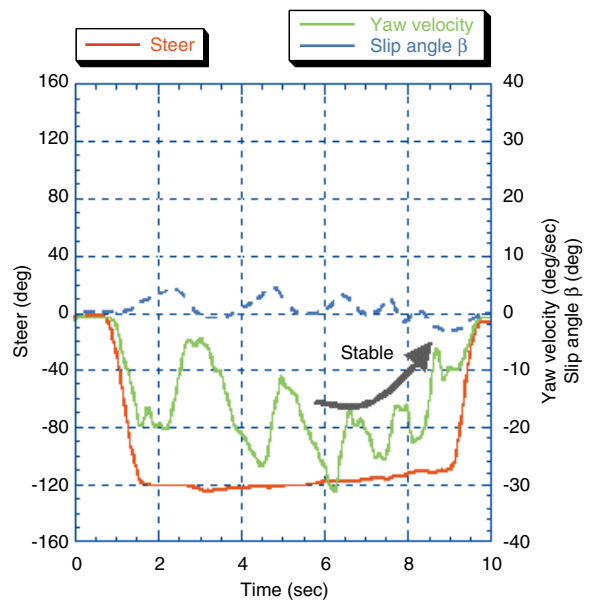


Fig.15 J turn test on snow (β control)

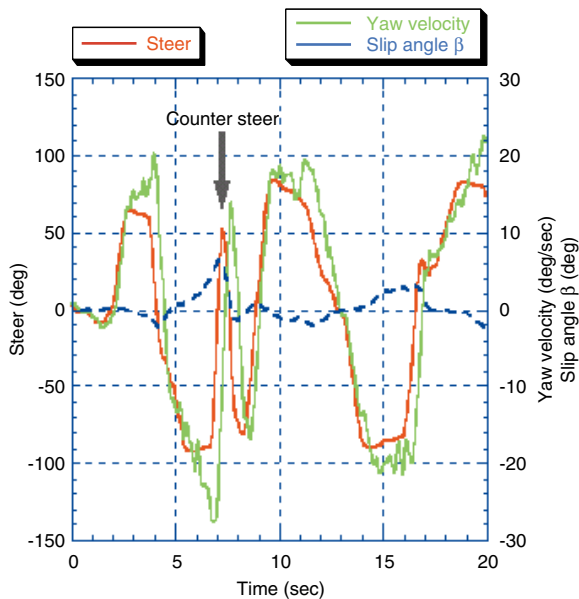


Fig.14 Slalom test on snow (Yaw rate control)

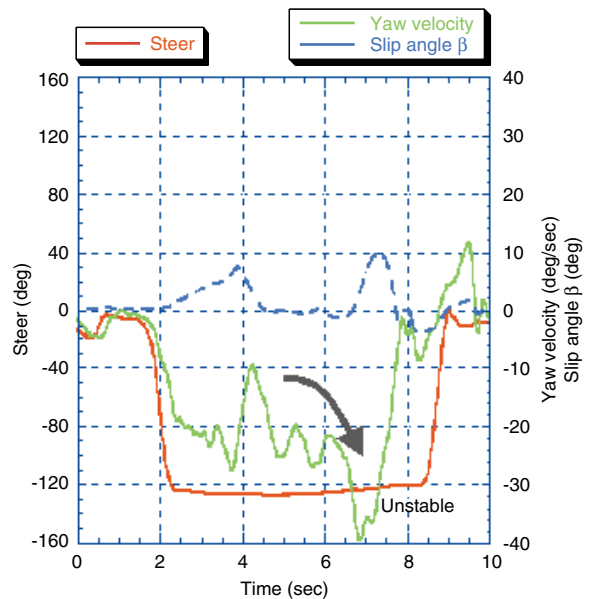


Fig.16 J turn test on snow (Yaw rate control)

リップ角応答過程が、安定で予測に見合う量と方向でドライバにフィードバックされているか否かを検証すべきであると考えたからである。また、この結果が良好であれば、 $\beta - \Delta\beta$ 位相上も結果としてよい特性を示すはずである。

(1) ステアアビリティ評価

操舵角－ヨーレート平面の軌跡が全体的に広がらず狭い帯状の領域に納まるほど、時間位相遅れが少なく過剰操舵と操舵遅れを防止できる(舵の効き)。さらに、軌跡が原点近くを通過するほどに制御が確実でドライバによる修正が少なく安定を持続できる。

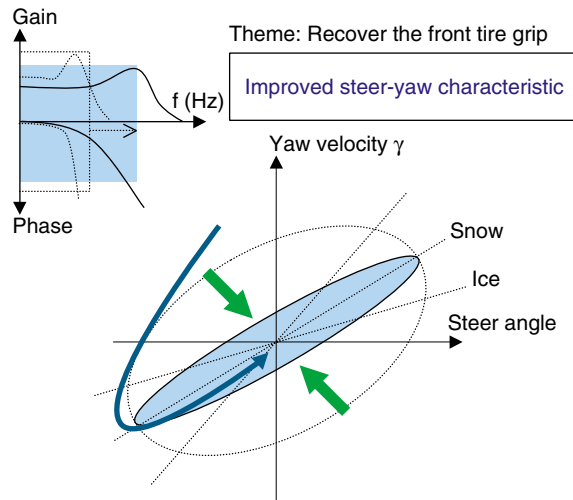


Fig.17 Evaluation method for VSA

(2) スタビリティ評価

操舵角－スリップ角平面の軌跡がリアスリップ角 α_r の限界値以下に抑えられているほど、ヨー運動が安定している(安定性)。さらに、軌跡が原点近くを通過するほど、制御が確実でドライバによるカウンタステアも少ない。スラローム走行(S字コーナ)における発散を防止できる。

次に、圧雪スラロームとJターンのテストデータを示す (Fig.18, Fig.20: β 制御と Fig.19, Fig21: 従来型ヨーレート制御)。

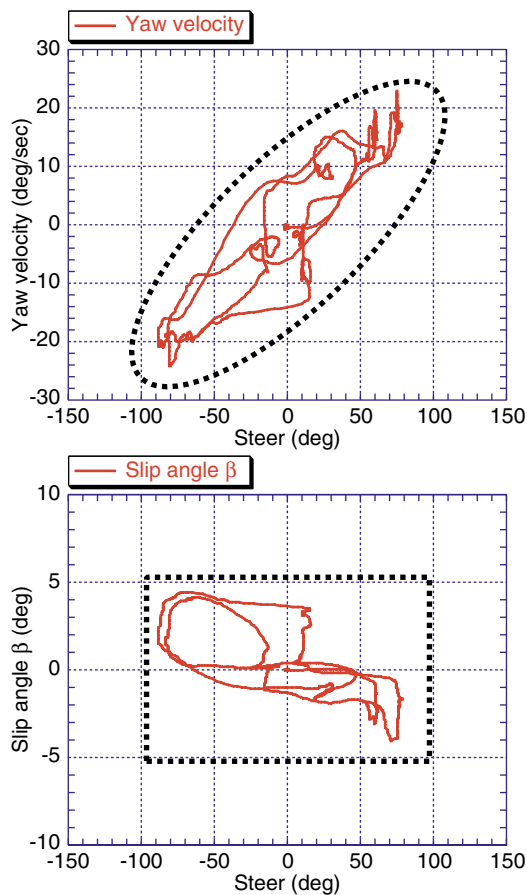


Fig.18 Slalom evaluation on snow(β control)

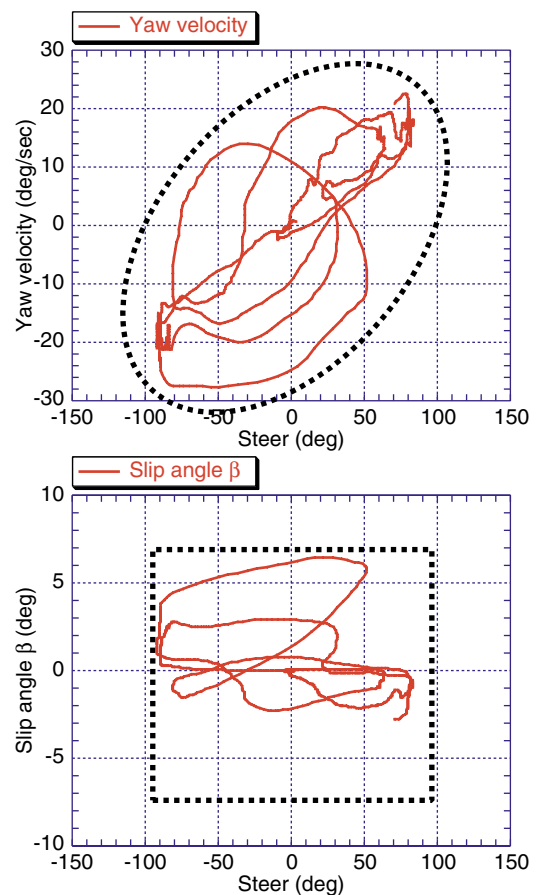


Fig.19 Slalom evaluation on snow (Yaw rate control)

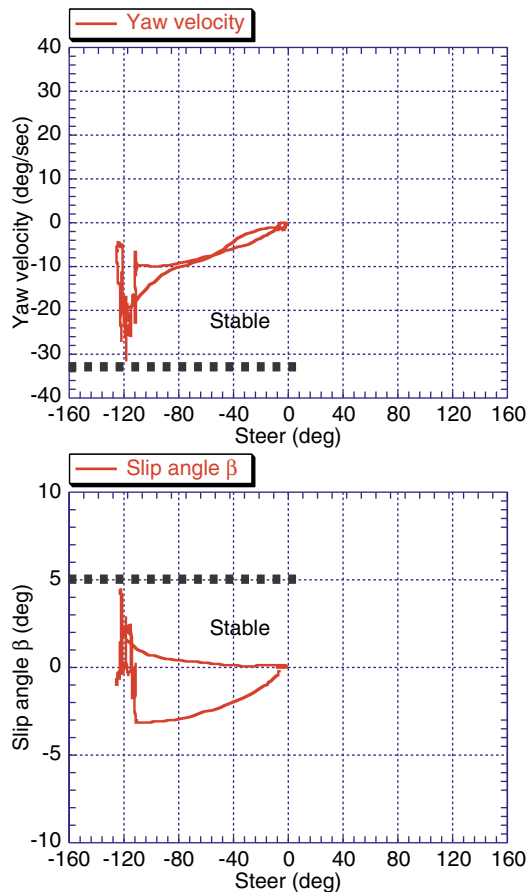
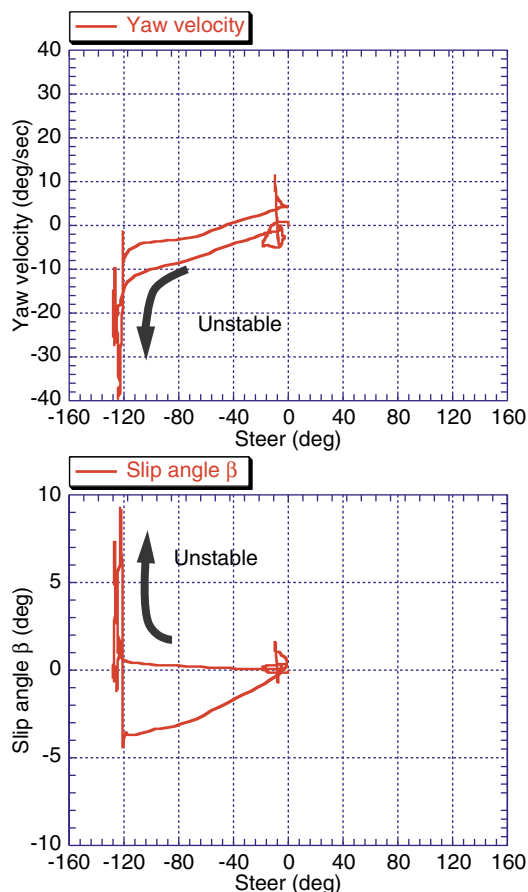
Fig.20 J turn evaluation on snow (β control)

Fig.21 J turn evaluation on snow (Yaw rate control)

β 制御はヨーレート制御に対して、次のようなアドバンテージがある。

- (1)操舵－ヨー特性では、時間位相遅れが小さく制御が確実であることから舵の効き(回避性)が高い。
- (2)操舵－スリップ角特性では、過剰なスリップ角が抑え込まれて安定性が高い(疲労が少ない)。

11. 結論

本研究では、

- (1)安定性向上と疲労軽減(スタビリティ向上)
- (2)事故回避性能の向上(ステアアビリティの向上)

の両立を目標としてきたが、前の章で示した実車制御効果から「安定して操舵に忠実なハンドリング」が実現でき、基本的には最適4輪スリップ制御ロジックの妥当性が証明できたと考える。

具体的な成果は次の三つである。

- (A)正確で安定したスリップ角(車体、タイヤ)推定の基本ロジックを構築した。
- (B)リアルタイムで実用的なタイヤ路面間 μ 推定の基本ロジックを構築した。
- (C)安定性と回頭性(舵の効き)の両方を備え得る最適スリップ制御の基本手法を構築した。

今後は事故回避技術分野で実用化に向けた開発を進めていく。

参考文献

- (1)堀内泰 他：VSA(車両挙動安定化制御システム)，自動車工学 5月号 Vol.47, No.7, p.36-43 (1998)

■ 著 者 ■



金 圭 勇



矢 野 修



占 部 博 之