

自動車の操縦安定性

— 運動性能の力学的理解 —

博士(工学) 菅沢 深

博士(工学) 毛利 宏 【共著】

博士(工学) 丸茂 喜高

コロナ社

ま え が き

本書は、自動車の運動性能である「走る」、「曲がる」、「止まる」の3要素のうち、「曲がる」性能を表す操縦安定性（以下、操安性）について解説したものである。操安性理論は、自動車がこれだけ普及した現在でも、その重要性はおろか存在さえも知らない人が多いのが現状である。著者の中には、大学のソーラーカー開発の現場で、直進性の改善に必要なのは「前輪キャスト角の変更」であると思いついていて工学部の先生方に、「後輪の横剛性の改善」の重要性をわかってもらうのに苦労した者もいる。本書が、操安性理論の普及に少しでも役立つことを願っている。

自動車の運動力学の書籍として優れたものがすでに出版されている中、あえて本書を執筆した理由は、読者の方々に操安性をより「深く」理解していただきたいという想いからである。本書では二輪モデルという最もシンプルなものに基づいており、しかも線形特性を主としているため、話せる内容はすでに語り尽くされていると見られることがほとんどである。しかし詳しく見ていくと、まだまだ新しい発見の多い世界である。ちょうど囲碁が、ほんの数個のルールだけで構成されているシンプルな世界でありながら、現在も新しい定石が生まれ続けているのと少し似ている。また、本書は大学の教科書としても使えるように基礎から説き起こしてはいるが、実務経験を積んだ方々にも参考となるよう、著者らが気づいた「重要でありながら、まだまだ知られていないこと」についても解説している点が、特徴の第1である。具体的にはつぎに挙げるものなどである。

- ① 操安性が担当する「曲がる」という運動は、タイヤが横方向の力を出すことで生じているが、それではその力の理想の形とはどのようなものかということ、当たり前の結論ではあるが、あまり意識されていない。と

はいえ必須の概念なので、第0章という変則的な章立てではあるが、初めに詳しく説明した。

- ② スタビリティファクタについては、安定性との関係こそ十分知られているものの、振動／非振動との関係は想像以上に複雑で、詳しく理解している人は少ない。そこで、その関係を図3.14 (p.108) に表した。
- ③ 車体横すべり角を小さくすると良い理由については、あまり比重を置いていない書籍が多いが、本書では重要な概念であるにとらえ、第7章で詳しく説明した。
- ④ 操安性に必要な安定性についても、非線形域においては従来の条件だけでは不十分であることを第6章で説明した。

特徴の第2としては、数式の扱いである。本書では、問題を解ければよしとするのではなく、実作業に当たったときに本書の知見を役立てられるようにしたいと考えている。設計する場面を考えてとき、連立方程式の解を導き出せることは必要条件だが、実務においてはそれだけでは不十分である。鶴亀算で例えると、「鶴は何羽か？」の答えだけなら連立方程式を立てて解ければよいが、実務の場合では「場合によっては足が2本増えるかもしれないし、頭が一つ増えるかもしれないので、そのときの対応も考えておくように」といわれることもある。このような場合、方程式が解けるだけでなく、その答えの「鶴が1羽減る。鶴が2羽増える」や、それ以外の変化への対応策もイメージできるように、条件の周辺を俯瞰できることが重要になる。先の囲碁の例えでいうと、「石の死活が読めるだけでなく、どちらの方向に向かうべきかの大局観も養う必要がある」ということである。しかし、本書の内容すべてを鶴亀算的に理解できるようになるには、著者らもまだ十分理解できていない部分もある。そこで、次善の策として将来そうなれるように、「式の物理的な意味の理解」のための解説を多く加えている。例としては、第2章の安定判別に使う式の説明では、制御理論の適用で終わりにせず、力学的な見方による解釈も加えている。

特徴の第3はコラムである。「式の解釈をさらに追及すると、こういう見方もできる」や「意外と勘違いしている人が多い内容」など、重要度は少し下が

るかもしれないが、知っておいて損はないと思われることを、本文の流れを乱さないようにまとめてある。会社でまだ半人前だった頃、先輩の「こう考える」とわかりやすいんだよな」という何気ない一言が理解に大いに役立った経験をもつ者として、読者にもそのように思ってもらえることを願って綴っている。

なお、本書を読むために前提となる知識としては、一般的な機械力学、振動工学や制御工学が挙げられるが、これらの参考とすべき良書はすでに多数出版されているので、それらを参照されたい。

本書の構成はつぎのとおりである。

全体としては、タイヤが力を出す特性により、「線形」と「非線形」の二つのテーマを扱うが、第0, 1章が線形／非線形によらない共通の内容で、第2～4章がタイヤの線形特性での内容、第5, 6章がタイヤの非線形特性での内容となっている。前述のように、教科書としての利用も想定して、第1～4章には例題および章末問題も記載してある。

第0章では、車両の運動を通して、本書で扱う「操安性」における旋回運動についての復習をする。

第1章では、理論の基本となるモデルと運動方程式について解説する。

第2章では、車両諸元が決まると、そこからじかに読み取ることができる、車両固有の性質を表す各種評価指標について解説する。

第3章では、運動方程式から導かれた伝達関数に基づいて、車両の定常特性、過渡特性などの基本的な事項を数学的に整理して解説する。

第4章では、各種の運動制御システムについて、その狙いと具体的な制御の内容を解説する。

第5章では、どのようなメカニズムによってタイヤが力を出すかについて、簡単なモデルを用いて解説する。

第6章では、タイヤの非線形域における車両の運動を考えるための解析手法について、代表的なものを解説する。

第7章では、それまでに解説してきたより良い操安特性が、ドライバーの運転

しやすさにどのように作用しているかについて解説する。

また、紙面の都合で本文には紹介しきれなかったものの、ぜひ知っておくべき内容を Web 付録[†]としてまとめた。

第 1 章の「運動方程式」から第 3 章の「運動方程式に基づく操舵応答特性」までは、それ以前の内容を前提として説明しているので、順を追って読むことをお勧めする。この三つの章が理解できれば、操安性の基礎理論は習得できしており、ほかの章は順番を気にせず、辞書のようにして読むことができる。ただし、第 6 章の「非線形解析」を読むためには、第 5 章の「タイヤ特性」を理解しておいた方がよい。

本書を上梓するにあたり、多くの方々にご協力いただいた。

横浜ゴム株式会社の宮下直士博士、東京大学の平岡敏洋特任教授からは、資料をご提供いただいた。株式会社三栄書房（現株式会社三栄）、株式会社グランプリ出版および公益社団法人自動車技術会には、車両特性、タイヤ特性および解析法に関する貴重な図の転載許可をいただいた。本書の計算結果については、日本大学大学院生産工学研究科の横田武氏、大明洋輝氏（いずれも当時）に多大なるご支援をいただいた（両氏の助けなくして、本書が世に出ることはなかったものと著者一同確信している）。これらの方々には心から感謝の意を表す。

最後に、本書の出版企画を提案してからすでに 10 年の歳月が経過し、遅々として進まない執筆作業に対して、寛大な心でご尽力いただいたコロナ社に厚く御礼申し上げます。

2021 年 8 月

著者一同

[†] <https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339046748/>（2021 年 8 月現在）

目 次

第0章 イン트로ダクション

0.1 操安性に期待されている性能	1
0.2 時間応答波形	3
0.3 タイミング	6
0.4 系の安定性	7

第1章 運動方程式

1.1 座標系, 名称, 記号	9
1.2 車両固定座標系	10
1.3 タイヤが出すコーナリングフォース	15
1.4 二輪モデル	18
1.5 運動方程式の導出	21
1.5.1 剛体の運動を表す式	22
1.5.2 コーナリングフォースを表す式	22
1.5.3 横加速度を表す式	28
1.5.4 運動方程式	31
1.6 操安性におけるメカニカルなフィードバックループの構成	33
1.7 運動方程式の行列表現	36
1.7.1 ヨーレイトが各運動に及ぼす影響 (a_{11} と a_{21})	38
1.7.2 車体横すべり角が各運動に及ぼす影響 (a_{12} と a_{22})	40
章 末 問 題	44

第1章コラム	コーナリングステイフネス等を左右二輪分になっている理由	21
	タイヤ横すべり角の符号の定義	26
	$\dot{\beta}$ のもつ別の物理的な意味	30
	なぜ γ と β を使って、 a_y を使わないのか?	32
	a_{21} の中にある「-1」のもつ意味	42

第2章 車両固有の力学的性質

2.1	評価指標の概要	45
2.2	スタビリティファクタ	47
2.3	ステア特性	53
2.4	ニュートラルステアポイントとスタティックマージン	64
2.5	操安キャパシティ	66
2.6	収束係数	71
2.7	制振係数	72
2.8	旋回応答係数	73
2.9	評価指標のまとめ	76
	章末問題	84

第2章コラム	カウンタステア走行中タイヤはどちらを向いているか	58
	加速円旋回試験と定常円旋回試験の違いの本質	63
	慣性モーメントの前後非連成近似	69
	宮田の式（旋回を支配する三つの基本物理量）	77
	安定性を力学的つりあい考える	81

第3章 運動方程式に基づく操舵応答特性

3.1	伝達関数	85
3.2	定常特性	87

3.2.1	定常ヨーレイトゲイン	91
3.2.2	定常車体横すべり角ゲイン	92
3.2.3	定常横加速度ゲイン	95
3.3	過渡特性	97
3.3.1	ステア特性の影響	99
3.3.2	車速の影響	102
3.3.3	ステア特性と振動限界	106
3.3.4	車両諸元の影響	108
3.4	状態速度ベクトル図	112
	章末問題	118
<div style="background-color: #e0e0e0; padding: 5px;"> 第3章コラム 車速に関連する特性値に類出するスタビリティファクタ 96 特性方程式の定数項とスタビリティファクタとの関係 98 市販車はなぜみなUSなのか（安定性だけではない役割） 106 </div>		

第4章 運動制御

4.1	制御方式の分類	120
4.1.1	フィードフォワード制御	120
4.1.2	フィードバック制御	121
4.1.3	条件付きフィードバック制御	123
4.1.4	2自由度制御系（モデルマッチング制御）	124
4.1.5	フィードフォワード制御とフィードバック制御の得失	124
4.2	車両運動制御の一般形（操舵制御，ヨーモーメント制御を例にして）	125
4.3	フィードフォワード制御の例（後輪操舵システム）	129
4.3.1	後輪操舵制御	129
4.3.2	一般的なフィードフォワード制御器の求め方	141
4.3.3	前後輪操舵制御（フィードフォワードの組み合わせ制御）	144
4.4	フィードバック制御	146
4.4.1	ヨーレイトフィードバック（後輪操舵制御）	146

4.4.2	フィードバック制御による直感的な性能設計法（ブロック線図の等価変換）	149
4.4.3	車体横すべり角フィードバック（ヨーモーメント制御）	154
章 末 問 題		157
第4章コラム 小さい制御入力でも効く微分制御		139

第5章 タイヤ特性

5.1	用語の定義	158
5.2	タイヤが力を出すメカニズム	160
5.2.1	横力およびコーナリングフォース	161
5.2.2	セルフアライニングトルク	165
5.2.3	制駆動力の発生メカニズム	166
5.3	タイヤ摩擦円	169
5.4	コーナリングステイフネスの変化	173
5.4.1	コンプライアンスステアによる変化（等価コーナリングステイフネス）	173
5.4.2	接地荷重変動による変化	176
5.5	キャンバによる横力の発生	178
第5章コラム 止まるためだけではないABS		172
じつはすべていないタイヤ横すべり角		179

第6章 非線形解析

6.1	ハンドリング線図法	180
6.1.1	線形域（旋回半径と横加速度の関係）	180
6.1.2	非線形域	183
6.2	車体横すべり角・モーメント線図法（ β メソッド）	184

6.3 状態速度ベクトル図法	185
6.4 等高線法	191
6.5 ハンドリング線図法, β メソッド, 等高線法の3解析法の関係	194
第6章コラム 図による解法で俯瞰的な理解を	195

第7章 車両特性と運転しやすさ

7.1 車体横すべり角と運転しやすさ	197
7.1.1 横加速度の遅れの減少	198
7.1.2 運動エネルギーの減少	199
7.1.3 オーバーシュートの減少	200
7.2 位相遅れと運転しやすさ	204
7.3 安定性と運転しやすさ	211
第7章コラム シミュレータ実験を実車走行で行えるシミュレータビークル	207
操安性に必要な安定性とは？(収束できればOKか)	213
違和感の元はロール角かロール角速度か	214

引用・参考文献 215

章末問題解答 217

索引 226

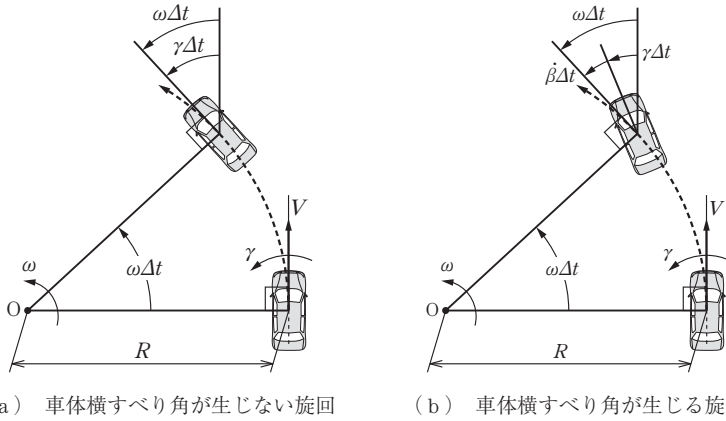


図 1.15 旋回時の横加速度

重心点の旋回角速度 ω (公転角速度) と車両のヨーレート (自転角速度) γ が一致することは、つぎのように考えれば容易に理解できる。かりに、旋回半径 R のコースを 1 周する時間を T とすると、公転の角速度は $2\pi/T$ [rad/s] である。また、一周してきた車両も元の状態に戻っているのちょうど $360^\circ = 2\pi$ [rad] 回転しており、自転の角速度 γ も $2\pi/T$ [rad/s] である。

ところで、重心点の横加速度 a_y は遠心加速度であり

$$a_y = R\omega^2 = \frac{V^2}{R} = V\omega \quad (1.43)$$

である。先に述べたように $\omega = \gamma$ であるので、横加速度 a_y は $V\gamma$ で表される。つまり、 $V\gamma$ の正体は旋回に伴う遠心加速度である。

一方、図 (b) に示すように車両に横すべり角が生じる場合には、車体の進行方向の変化と車体の向きの変化が異なり、その差が車体横すべり角 β となる。 β は

$$\beta = \dot{\beta}\Delta t \quad (1.44)$$

で表されるから、図 (b) より

$$\omega\Delta t = \gamma\Delta t + \dot{\beta}\Delta t \quad (1.45)$$

となり、 Δt を消去すると

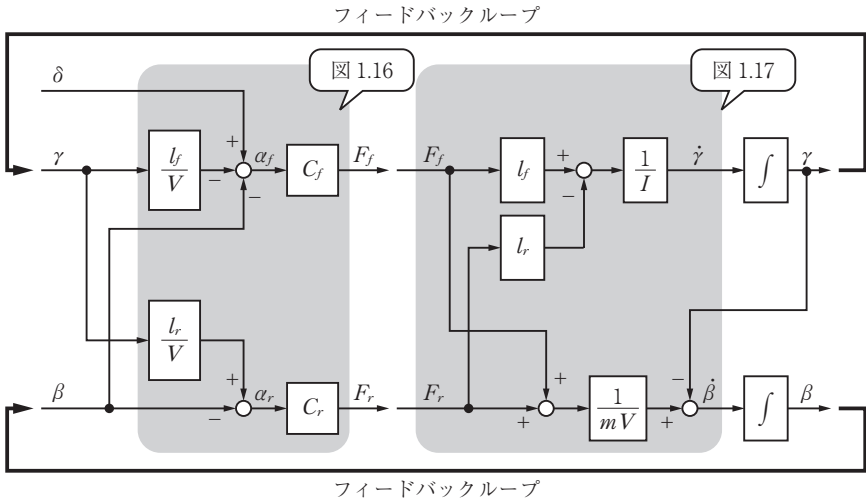


図 1.18 二輪モデルのブロック線図

γ, β がフィードバックされる 前輪舵角 δ が入力される

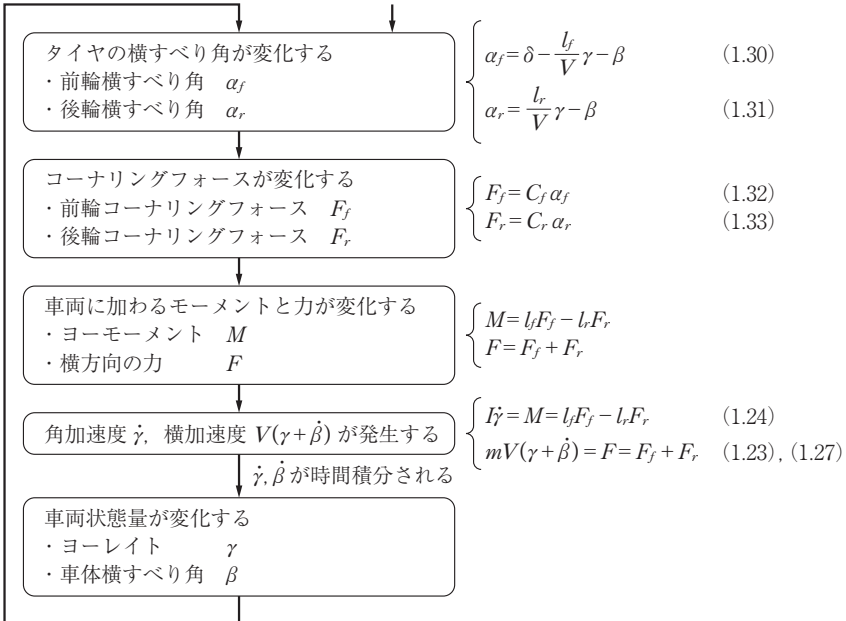


図 1.19 車両運動のフローチャート

なお、ここまでの説明から、「 $(l_r C_r - l_f C_f)$ を大きくすると、制振係数は変わらないものの旋回応答係数が大きくなり、悪い面がなく、良いことづくめである」と思われるかもしれない。しかし、ばね・マス・ダンパ系で用いられている減衰比 ζ を考えると、 ζ が小さくなれば振動的になるというマイナス面をもっていることにも注意が必要である。具体的には、ここでの ζ は $\zeta = K_{vib}/2\sqrt{K_{cnv}}$ となるので、収束係数 K_{cnv} の大きなUSでは ζ が小さくなり振動的になる、という欠点も認識しておかねばならないということである。



2.9 評価指標のまとめ



これまでに出てきたスタビリティファクタ K_s を始めとする各指標の定義式を見比べると、共通して見られる項があることがわかる。これらをグループごとにまとめて整理したものが表2.3であり、三つのグループに分けられてい

表2.3 評価指標のまとめ

共通要素	名称	記号	定義式	単位
$l_r C_r - l_f C_f$		a_{12}	$\frac{l_r C_r - l_f C_f}{I}$	$1/s^2$
	スタビリティファクタ	K_s	$\frac{m(l_r C_r - l_f C_f)}{I^2 C_f C_r}$	s^2/m^2
	ニュートラルステアポイント	x_N	$\frac{l_r C_r - l_f C_f}{C_f + C_r}$	m
	スタティックマージン	M_s	$\frac{l_r C_r - l_f C_f}{I(C_f + C_r)} = \frac{x_N}{l}$	—
$\frac{I^2 C_f C_r}{m V^2} + (l_r C_r - l_f C_f)$	収束係数	K_{cnv} $= a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$	$\frac{I^2 C_f C_r}{m I V^2} + \frac{l_r C_r - l_f C_f}{I}$ $= \frac{I^2 C_f C_r}{m I V^2} (1 + K_s V^2)$	$1/s^2$
	旋回応答係数	K_{rsb} $= -a_{11} + \frac{a_{12} a_{21}}{a_{22}}$	$\frac{I^2 C_f C_r + (l_r C_r - l_f C_f) m V^2}{I V (C_f + C_r)}$ $= \frac{m V}{C_f + C_r} K_{cnv}$	$1/s$
$\frac{C_f + C_r}{m} + \frac{I_f^2 C_f + I_r^2 C_r}{I}$	操安キャパシティ	C_h	$\frac{C_f + C_r}{2m} + \frac{I_f^2 C_f + I_r^2 C_r}{2I}$	m/s^2
	制振係数	K_{vib} $= -(a_{11} + a_{22})$	$\frac{C_f + C_r}{m V} + \frac{I_f^2 C_f + I_r^2 C_r}{I V} = \frac{2}{V} C_h$	$1/s$

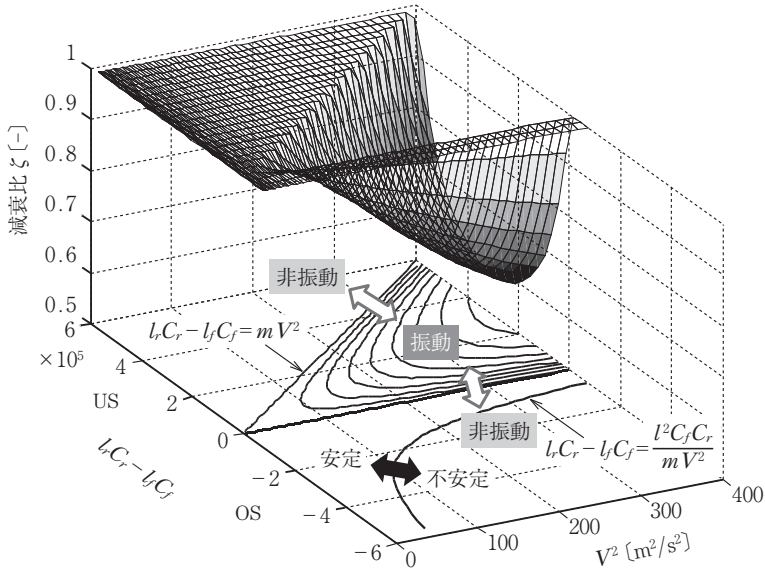


図 3.14 ステア特性と車両の応答の関係

た、 ζ の様子をわかりやすくするために、底面には等高線を $\zeta \leq 1$ の範囲で描いてある。

振動的な領域 ($\zeta < 1$) は US に限定されており、さらに、 $l_r C_r - l_f C_f$ の大きさに応じた下記の所定車速 V_ζ より高い車速のみ振動的で、低速では非振動的であることが示されている。

$$V_\zeta = \sqrt{\frac{l_r C_r - l_f C_f}{m}} \quad (3.62)$$

また、OS では全域で非振動的であるが、車速によっては不安定になり、同図に示した安定限界線からわかるように、 $l_r C_r - l_f C_f$ の値がマイナス方向に大きくなるに従って、より低い車速で不安定になっていることが読み取れる。不安定になる臨界車速は、2.2 節で示した式 (2.34) である。

3.3.4 車両諸元の影響

ここでは、車両諸元が車両の応答に及ぼす影響について調べる。本来、車両

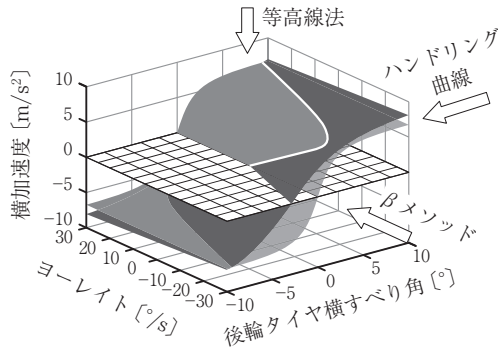


図 6.18 3解析法の比較

コラム

図による解法で俯瞰的な理解を



非線形域を扱う本章では、数式で解けないのでやむを得ず図による解法を用いている印象を与えてしまったかもしれない。しかし、数式で解ける線形域の問題でも、図による解法のメリットが大きい場合も多い。カウンタステアについての解析はその一例であり、第5章の図5.20も作図による例である。ここではまえがきで触れた鶴亀算に適用した例を紹介する。

図は、縦軸「足の数」、横軸「頭の数」のグラフ上に、亀の特性線（破線、傾き4（足／頭））と鶴の特性線（実線、傾き2（足／頭））を描くことによって解を求める方法である。亀の特性線の原点をグラフの原点に置き、鶴の特性線の

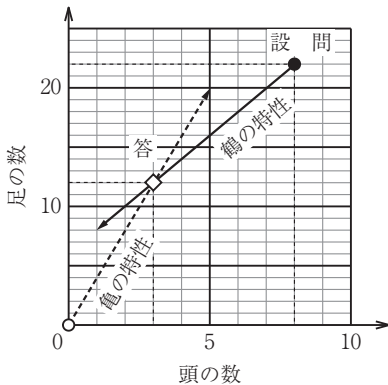


図 鶴亀算の図による解法の例

索引

【あ】		【し】		タイヤ横すべり角	15
アンダーステア	56	車速	10	【て】	
アンチロックブレーキシステム	172	車体横すべり角	13	定常円旋回試験	54
【え】		車体横すべり角速度	36	定常車体横すべり角	88
遠心力	2	車両諸元	20	定常旋回	47
【お】		状態速度ベクトル図	112	定常特性	36
オーバーステア	56	状態変数	36	定常横加速度	89
【か】		状態方程式	36	定常ヨーレイト	47
カウンタステア	58, 187	【す】		【と】	
加速円旋回試験	54	スタティックマージン	64	等高線法	192
過渡特性	36	スタビリティファクタ	47	ドライビングステイフネス	169
可変ギア比	121	ステア特性	21	【に】	
【き】		ステアバイワイヤ	121	ニュートラルステア	56
キャンバ角	158	スピン	5	ニュートラルステアポイント	64
キャンバスラスト	178	スリップ率	168	二輪モデル	18
【く】		【せ】		【は】	
駆動力	167	制動力	167	ハンドリング線図	180
【こ】		接地荷重	16	ハンドル角	2, 54
向心力	2	セルフアライニングトルク	165	【ひ】	
後輪操舵システム	129	旋回中心	1	非線形域	18
コーナリング係数	60	旋回半径	28	【ふ】	
コーナリングステイフネス	16	線形域	18	復元ヨーモーメント	65
コーナリングパワー	18	前輪アクティブステア	126	ブレーキングステイフネス	169
コーナリングフォース	15	【そ】		【ほ】	
コンプライアンスステア	175	操安キャパシティ	66	ホイールベース	47
		操縦安定性	2		
		操舵角	14		
		【た】			
		タイヤ	1		

	【ま】		横運動	10		【り】	
			横加速度	1			
摩擦円		161	横すべり防止装置	154	臨界車速		56
	【よ】		横力	15		【ろ】	
ヨー運動		10	ヨーセンタ	204	路面摩擦係数		162
ヨー角		12	ヨーモーメント制御	125	ロール剛性		177
ヨー角加速度		5	ヨーレイト	2			

【ギリシャ文字】

β メソッド		184
--------------	--	-----

— 著者略歴 —

菅沢 深 (すがさわ ふかし)

<学歴>

1973年 千葉大学工学部機械工学科卒業
1975年 千葉大学大学院工学研究科修士課程修了
1995年 東京農工大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士 (工学)

<職歴>

1975年 日産自動車株式会社勤務
1997年 玉川大学助教
2000年 玉川大学教授
2016年 玉川大学名誉教授

毛利 宏 (もうり ひろし)

<学歴>

1982年 東京大学工学部機械工学科卒業
1984年 東京大学大学院工学系研究科機械工学専門課程修了
2001年 東京農工大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士 (工学)

<職歴>

1984年 日産自動車株式会社勤務
2010年 山梨大学教授
2014年 東京農工大学教授
現在に至る

丸茂 喜高 (まるも よしたか)

<学歴>

1998年 東京農工大学工学部機械システム工学科卒業
2000年 東京農工大学大学院工学研究科博士前期課程修了
2006年 東京農工大学大学院工学府博士後期課程修了, 博士 (工学)

<職歴>

2000年 財団法人日本自動車研究所勤務
2005年 日本大学助手
2007年 日本大学専任講師
2012年 日本大学准教授
2020年 日本大学教授
現在に至る

自動車の操縦安定性 — 運動性能の力学的理解 —

Vehicle Handling and Stability

© Sugawara, Mouri, Marumo 2021

2021年10月15日 初版第1刷発行



検印省略

著者 菅沢 深
毛利 宏
丸茂 喜高
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04674-8 C3053 Printed in Japan

(柏原)



©COPY <出版者著作権管理機構委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@copy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。