

## 二輪車の運動特性

景山 克三\*

自転車から始まる二輪車発達の初期の歴史と、その運動特性研究の動機について述べた。また四輪車にくらべて構造の簡単な二輪車の運動特性の研究がなぜ遅れたか、その研究上の困難はどこにあったかを説明した。学術的な立場での二輪車の運動特性研究が始まって以来の経過を詳細に述べて現状に至り、さらに今後、研究を要すると思われる問題点を指摘した。

## Current Research on Two-wheel Vehicles in Historical Perspective

Katsumi KAGEYAMA\*

This article begins with a concise review of the early development of two-wheel vehicles, starting with the bicycle. The author then proceeds to explore the reasons that had to research programs on the special features of handling two-wheel vehicles. In addition, an attempt has been to explain why the level of research in this field has fallen behind the study of structurally more complicated four-wheel vehicles. While only a brief summary of the difficulties encountered in studying two-wheel vehicles has been included, the progress to date on the theoretical side of this branch of human transportation is discussed in detail. The author concludes by indicating the areas that he believes are most deserving of future study in this young, but growing field.

## 1. 二輪車誕生のきっかけ

自転車に似たようなものが初めて世の中に現われたのは18世紀の終わりに近い頃で、1790年にフランス人de Sivracが木馬の脚の部分に木製の車輪を取り付け、これにまたがって両足で地面を蹴って進むものとするもので、ド・シヴラックの木馬と呼ばれるものである。二輪車の歴史の第1ページには、必ずこのド・シヴラックの木馬が登場するが、これは文字通り木馬であって、舵が付いていないため、理論的に見て自立して走れるものではなく、両脚の間にはさんで歩くだけのものであり、二輪車と呼ぶに値するものとは思えない。

続いて19世紀に入ってから、1817年頃、ドイツ人Karl von Draisの作ったドライジーネという二輪車が現われたが、これはハンドルが付いていて舵を取ることができるようになっていた。しかしまだ推進装置がなく、やはり両足で地面を蹴って進むものであった。なぜこういうものを考えたかは、今日から見て興味のある問題であるが、おそらく、まじめに交通機械として考えたのではなく、あくまでも遊び道具のつもりであったに違いない。この形の二輪車

は、ヨーロッパにおいては、遊びとしてかなり普及したもので、当時の風俗画にも登場している。ところで、両足で地面を蹴る形式になっていたこの二輪車は、それによって推力を得ること以外に、両足を地面に突いて倒れるのを防ぐ目的があったに違いない。ドライスがこの二輪車を作った頃は、二輪車が自立して走るなどということは全く知らなかったであろう。誰かがこれに乗って遊んでいるうちに、下り坂で両足を地面から放しても、二輪車は倒れないで走れることを偶然に発見したものであろう。当時、これは驚異的な大発見であった筈であるが、それが遊びの中から無造作に発見された点が面白い。こうして二輪車の自立性が公知の事実（理屈は何もわからなかったが）となったのである。1839年、イギリス人Kirkpatrick Macmillanの作った二輪車は、ペダルとリンク機構によって後輪を駆動して走るものであり、初めて両足が完全に地面から離れた二輪車であった。そういう意味で、自転車の元祖はマックミランであるといえないこともない。しかし、蒸気機関でも飛行機でも、すべて人間の作った機械に関しては、誰を元祖とするかは決め難いものである。二輪車の場合、もっとも大切な自立性発見のきっかけとなったという意味で、筆者はドライスを元祖と

\* 日本大学教授 (自動車工学)  
Professor, Nihon Univ.  
原稿受理 昭和52年1月6日

するのが適当であろうと思う。少なくともド・シヴラックではないと思う。

ついでに、その後の二輪車発達の歴史に簡単に触れておく。1872年頃から20世紀の初め頃にかけてヨーロッパで大いに流行したオーディナリーと呼ばれた自転車は、前輪が極めて大きく、人間はほとんどその真上に乗って前車軸のペダルを踏むようになっており、後輪は極度に小さかった。これはスピードを出すには具合が良かったであろうが、今日の二輪車の運動力学の知識をもって見ると、操縦性に問題があるようである。事実、転倒事故が多く、危険な車であったといわれている。1885年、イギリス人、James Starleyの作った自転車は、前後輪の径が同じで、ペダルの回転はチェーンによって後輪に伝えられる構造で、今日の自転車の原型となった。当時の人びとは、オーディナリー車の危険性にはよほど閉口していたためか、特に「スターリーの安全車」と呼んだのは面白い。その後、1888年にダンロップの空気入りタイヤが採用されて、自転車の安全性、実用性は飛躍的に向上し、今日の自転車の形が確立されたといえる。

ドイツ人Gottlieb Daimlerが初めてガソリンエンジン付き二輪車を作ったのは、1885年であり、スターリーの安全車の誕生と同年である。この車はオートバイの元祖であると同時に、ガソリンエンジン自動車の元祖でもあるが、両側に小さい補助輪が付いており、完全な二輪車ではない。ダイムラーは初めから二輪車に興味があったわけではなく、簡単に試作できる四輪車として、あのような補助輪付き二輪車の形を採ったとも考えられる。

## 2. 運動特性研究の始まり

二輪車の運動特性研究の必要性は、二輪車の誕生からその実用化の過程において関係者にはすでに強く感じられていたことに違はなく、その切実さは四輪車の場合の比ではなかったと思われる。なぜならば、他の交通機械ではめったに起こらない転倒が、二輪車では絶えず起こり、これが二輪車の一大欠点であって、実用化のためには、この問題を何とかしなければならなかったからである。「何とかする」ためには、二つの方法があった。その第一は、人間が練習によって軽業師のように巧みに乗りこなす術を身につけることであった。しかしその過程において、二輪車の設計の違いによって乗り易い車と乗りにくい車とがあることが発見され、第2の方法として乗

りやすい車を作る努力が行なわれるようになった。しかし、運動特性とか運動力学とかというような言葉さえなかった当時としては、試作しては乗ってみてまた改良するというやり方以外にはなかったわけで、試行錯誤の繰り返しによって少しずつ物から学びながら進歩を続けて来た。当然途中には幾つかの失敗があった……というよりも、むしろ失敗の連続であって、前述のオーディナリー車などはその代表的なものの一つであろう。その間の努力が、いかに大変なものであったかは、ドライジーネからスターリーの安全車までに68年を要しているし、マックミランの発明から数えても46年も必要であったことから想像できる。しかしその間に、二輪車の運動特性に支配的な影響を及ぼす、キャスト、トレール、操舵部分の重心位置、全体の重心位置などが次第に合理的なものに近づいて来たことは驚くべきことで、人間の努力の偉大さに感服せざるを得ない。多くの要素が複雑にからみ合って構成されているものを、手さぐりで探し出す努力は実に大変なものであったであろうが、同時に物が比較的小さくて試作が容易であったことが幸いしたのであろうと思われる。

このように、手探りによって得られた経験則に基づいて二輪車の運動特性の改善を行なうというやり方は、その後も永く続き、ほとんど20世紀の半ばまでは、それが主流となっていた。その間に、解決を要する問題は次々に提供された。最初はただ直進中の安定の良さだけであったが、高速度でコーナリング中に道路からの外乱でコントロール不能に陥る問題とか、直進状態から急に旋回に入ろうとするときの操縦性とか、悪路走行時の安定性とか、スピードの速いスポーツモデルでの操縦性とか、ハンドル系に生じる振動とか、更に自転車にエンジンを取り付けたためにスピードが上がり、そのため自転車では起こらなかったような不安定な運動が起きる問題とか……とにかく研究課題は尽きることがなかった。特にエンジン付き二輪車では、問題の範囲が自転車よりも一層広範囲となり、メーカーは運動特性の研究に夢中で取り組んで来たといっても過言ではない。ここで二輪車の運動特性に関して考える場合に、忘れてはならないことを一言述べておきたい。そもそも二輪車は、その誕生のきっかけが遊びであった。遊びから出発した二輪車が発達して実用的な交通機関としての役割を果すようになったのであるが、今日でも実用性と同時に趣味的な面が強く残っていることである。実用性から見れば、安全に直接関係の

ありそうな問題だけを考えればよいと考えられる。ところが一方、趣味というものは実用の域外にあるような微妙な味の違いのようなものを大切にすることである。二輪車では、趣味的な微妙な味の違いを無視することはできない。それは単にユーザーの嗜好に合う車を作るという営業上の要求だけではなく、一見非実用的な趣味の世界の問題と思われるものが実は運動特性の本質的な問題として、実用的な問題と深く関わり合っていることが多いからである。

### 3. 二輪車研究の困難

二輪車の研究、特にその運動特性の研究は、四輪車にくらべて、著しく遅れをとったのは事実である。その原因は、永い間、実用性という点で四輪車に劣ると考えられていたため、世間一般がその研究の必要性を認めようとしなかったことにもあるであろうが、何と云っても、四輪車にくらべて、問題があまりにも複雑すぎて、手がつけられなかったのが真の原因であろう。構造的には、四輪車よりもはるかに簡単な二輪車のほうが、運動特性の研究においては、なぜそのように複雑な問題となるのかは、二輪車の本質に関わることであるから、まずその点を明らかにしておく必要がある。

#### 3-1 実験研究上の困難

すべての研究は、まず現象の確実な把握から始まるものであり、二輪車の運動特性の研究においても科学的計測によって運動の状態を知る必要がある。例えば、走行中の操舵角、操舵力、ロール角、ヨー角の変化の状態とこれらの相互の関係、あるいは操舵系に発生する振動の実態などを数値的に知ることである。ところが、これらの計測のためには、多くの計測器類が必要であるが、四輪車の場合と違って、計測器類を積載することが非常に困難であり、二輪車に適した計測器類が容易に得られないという問題があった。例えば、記録計ひとつにしても、その大きさや重量もさることながら、前後左右に激しく振りまわされる二輪車上で、デリケートな機器を使うことがいかに困難なものであるかは容易に理解できよう。

そこで、計測器によらない、いわゆるフィーリングテストが二輪車においては多く使われたのであって、過去における二輪車の運動特性の技術的改善はフィーリングテストの結果によるものが大部分であり、その功績は大きい。しかし、フィーリングテストに全面的に依存するかぎり、その場合場合の技術

的解決はできても、根本的な問題解決はむずかしい。フィーリングテストに代わる科学的実験研究の方法を開拓する努力は続けられ、次第にその効果が発揮されるようになって来たが、永い間、これが進歩発展の障害となっていたのであり、現在でも四輪車にくらべるとこの面から大きい制約を受けていることも事実である。

#### 3-2 理論研究上の困難

実験研究が困難に遮られて進めない状態にある一方で、理論研究は更にそれ以上の困難に出合って手も足も出せないような状態が永く続いたのである。

##### (1) マン・マシンシステムの複雑さ

人間によって操縦され、自由な軌跡を描いて運動する乗物はすべて、マン・マシンシステムとして考えるべきものである。その中でも二輪車はマン・マシンシステムの典型的なもので、人間の働きを除外してその運動を論じて、なかなか実際の運動に合致しにくい。今日でこそ、マン・マシンシステムという言葉は聞き馴れた言葉になったが、こういう言葉もなかった時代には、このような考え方も存在しなかったであろう。ときには人間の特性を考慮すべきものであると気付いた人があっても、人間の特性の複雑怪奇さを思うと、「これこそ研究上の危険な泥沼である」と察知して近付かないように用心した。そのため、マンを無視したマシンだけの研究を押し進めるようになった。これはやむを得ない事情ではあるが、その後も永く、理論研究の結果を物足りないものにした。

##### (2) 自由度

二輪車はその構造が一見して簡単であるにもかかわらず、その運動力学が意外に複雑なものとなる原因の一つは、自由度が多いことである。四輪車では単純化して考える場合には、全体を1個の剛体とみなし、重心を通り、前後に $x$ 、左右に $y$ 、上下に $z$ の3軸を定め、走行速度を一定と仮定すれば、 $y$ 軸方向の力および $z$ 軸まわりのモーメントの2自由度について運動方程式をたてることができる。ところが、二輪車では全体を1個の剛体とみなすことは無理であって、上記3軸以外に、いま一つ、操舵軸( $z'$ 軸)を考え、どんなに単純化しても、 $y$ 方向の力、 $x$ 軸まわりのモーメント、 $z$ 軸まわりのモーメントおよび $z'$ 軸まわりのモーメントの4つを考える必要があり、結局4自由度の運動方程式となる。これがもっとも基本的な形であるが、より実際的な状態について考えようとすれば、 $y$ 軸まわりの運動も

考えなければならないし、さらにはばね下質量をも考慮することになると、自由度はさらに多くなる。

自由度が多いことは、これらの間の力やモーメントの関係が複雑で、運動方程式をたてることが困難な仕事となるが、これを解くことがまたさらに困難な仕事となるのである。

永い間、この複雑さが二輪車の運動特性の理論研究をさまたげて来た。

### (3) 幾何学的関係

運動方程式を組立てて行くに当って、二輪車特有の幾何学的関係を明らかにしておく必要がある。例えば、操舵角・操向角・バンク角・トレール・キャスト角およびタイヤ接地点位置など、これらの相互関係を解明しておくことが大切である。特に大きいバンク角をとったときに、前輪および後輪の接地点がどの位置に移動するかを知らなければ、二輪車特有の性質を明らかにする上で支障を来す。この点を明らかにしないまま、簡単な仮定に基づいて計算すると、どうしても上すべりした議論となりがちである。また目的に応じて、これらの関係をどこまで簡略化できるかを明らかにしておくことも大切である。

### (4) 人体の取扱い

二輪車では、全体の重心位置を決定するにしても人間の重量が大きい影響を与える。また重心を通る  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸まわりの慣性モーメントに対しても人体の影響が極めて大きい。したがって車両に対して人体が動くとき、これらの値はかなり大きく変化する。一例をあげれば、 $x$  軸まわりのロール角が周期的に変動する場合、振動数が高くなると、人体の頭部はあまり横揺れしないで、下半身のみが横揺れするのが観察される。四輪車でも同様であるが、全体への影響が少ないため無視している。しかし二輪車ではこの影響が大きい。筆者はかつて室内実験で、剛体のダミーを載せてみて、その運動が人間の乗ったものと非常に異なることを確認した。理論研究においては、簡単にするために、人体を剛体として取扱うものが多かった。人体の柔軟性を運動方程式の中にどのような形でとり入れるかが問題で、実際の運動によく合うような人体の力学モデルを捜さなければならないし、それがまた自由度の増加をもたらすのである。

### (5) 操縦操作の自由度

二輪車の操縦操作は、簡単にいえば舵の操作と操縦者の上体の移動の2つから成り立っているといえる。舵の操作は、舵を廻して舵角を与える操作と、

舵に適当なモーメントを与えて舵の自由な振動的な動きをある程度拘束する操作とに分けられる。これらの操作の組み合わせは無限に存在することになる。四輪車の舵の操作が、舵角だけで考えられるのとは大きい違いである。したがって、二輪車については、操縦を加えた状態での運動の理論研究に当っては、入力決め方だけでも、いろいろな条件が考えられ、複雑なものとなる。

### (6) 車両諸元の測定

理論研究が進んで、精密な運動方程式が確立されたとしても、これを解いて数値計算を行なうには、実車についての力学上の諸元、例えば全体系の重心位置、前輪系の重心位置、各軸まわりの慣性モーメントなどを実測しなければならないが、これらの測定が必ずしも容易ではない。またタイヤ特性を知らなければならないが、永い間、これが不明なため数値計算の障害となっていた。近年、タイヤ試験機の普及によって、大いに前進したけれども、タイヤの過渡的コーナリング特性については、今日でもまだ不明な点が多い。

上に述べたように、実験的にも理論的にも、あまりにも多くの困難のため、その進展がさまたげられている状況のもとで、ベテランライダーによるフィーリングテストのみが信頼される時代が永く続いた。そのためフィーリングテストは二輪車の神秘性をいよいよ高めるような働きをしたことも事実である。神秘性は、人びとを誤った方向に導びくこともあったが、学究心を高揚する効果もあった。そして高級なライディングテクニックを要するような、限界状態での運動は別としても、ごく普通の運動に関しては、研究者自身がフィーリングテストを体験できることが、二輪車の研究には大いに幸いであった。こうして、研究者達は、実験と理論の両面から、この立ちすくみの状態を突破する試みを、つぎつぎにおこなって来たのである。

## 4. 研究の経過と現状

二輪車の運動特性に興味を抱き、その研究に手をつけた人は多かったが、それらの多くは、現在ある二輪車の改良を目的とした現場的な手探り作業であったことは先に述べた通りである。一方、純粋に学術的興味から、理論研究の道を切り開こうとする人びとも少数ながらあった。

1890年にKleinおよびSommerfeldは自転車の運動

方程式を発表した。また1899年にF. J. W. Wippleは二輪車の手放し安定に関する論文を発表した。これらは、いずれも応用数学の問題として、当時ようやく実用化された自転車を取りあげたものであったが、勿論、今日から見れば不完全なものであったのはやむを得ないところである。また現場的な改良は、目前の実利の追求であったのに対して、理論研究は好奇心を動機とするもので、この当時、両者は互いに全く無縁の存在であった。

その後、永い間、理論研究に手を染める人は、あちこちにあったであろうし、筆者も幾つかの例を聞いてはいるが、公表された研究はあまり見当たらない。

1948年に相ついで発表された近藤の研究<sup>1)2)</sup>は、今日の二輪車運動特性研究の口火を切ったものであり、厳密な運動方程式を立てて数値計算を行ない、二輪車の特性を明らかにしたものであったが、当時は二輪車用タイヤのコーナリング特性の資料が皆無であったため、数値計算にあたっては、不確かな推定値を用いなければならなかった。

1951年に、A. Wilsonは二輪車の安定性と操縦性に関する走行実験の結果を発表した。<sup>3)</sup>

1954年に、E. Döhringは、ロール角とハンドル角だけを考慮に入れた2自由度の方程式による解析をおこなって、安定・不安定を論じ、なお特殊な計測用トレーラをけん引して走行実験を行ない、計算結果が実験と合うことを確かめた。<sup>4)</sup>

1955年に、近藤らは、二輪車の運動を室内において再現して、その運動の実態を把握しようとする実験をおこなった。<sup>5)</sup> すなわち、二輪車の前輪を回転ドラムの上に、後輪をターンテーブル上において、車体をばねでささえ、ドラムを回転させながらハンドル角・ロール角・ヨー角の変動を計測し、そのとき現われる運動様式から、安定・不安定を判別し、トレール・キャスト角・重心位置などが安定性におよぼす影響を調べた。また走行実験をおこなって舵の特性について調べた。

1961年に、景山らは近藤らの研究をさらに発展させて、より実走行に近い状態での室内実験による研究を発表した。<sup>6)7)</sup> すなわち、二輪車をベルト装置の上で手放し状態で運転することによって、その運動特性を調べた結果、二輪車には“手放し安定限界速度”が存在すること、トレール・重心位置・ハンドル軸まわりの慣性モーメントなどによって安定限界速度が変化することを認め、これによって、これら設計諸元が安定性におよぼす影響を調べた。また

実走行実験によっても、これを確かめた。さらにシミー発生条件についても実験をおこない、シミー防止方法について明らかにした。これらの実験研究により、安定性の立場から見た場合に、とるべき設計方針をかなり明らかにすることができた。しかし同時に、この研究によって、理論研究の必要性および安定性とは対立の立場にある操縦性に関する研究の必要性が痛感されるようになった。

1963年に、近藤・長岡らは、手放し走行の条件のもとに、4自由度の運動方程式を立て、安定性に関する解析をおこなった。この頃から電子計算機の導入が普及し、運動力学の研究に大きい力を発揮したのである。

これまで、二輪車の運動力学の研究は、主として日本およびドイツにおいておこなわれて来たが、この頃からアメリカにおいて理論研究が盛んになり、R. N. Collinsの安定性に関する理論解析が発表された。<sup>8)</sup>

自動車の操舵系に発生するシミーに関しては、古くから多くの研究が行なわれているが、Döhringは二輪車の前輪系のシミーについて解析をおこない、前輪系に発生したシミーと全体系のロール振動との共振について述べ、高速二輪車設計に関して、重要な示唆を与えた。<sup>9)</sup>

二輪車はマン・マシンシステムとして考えるべきものであることは先に述べたが、井口は、二輪車の直立安定は操縦者による適度の操舵によって保たれるという考えに立って、二輪車一人間系を単純化した運動方程式を立て、諸元変化が安定性に与える影響について解析をおこなった。<sup>10)</sup> Eatonは、マン・マシン系としての二輪車の運動から、人間の伝達関数を求める研究をおこなった。<sup>11)</sup> 日本では、比較的新しいものとしては、小林の研究がある。<sup>12)</sup>

二輪車の操縦性は、安定性よりも取扱にくい問題であるためか、永い間、比較的研究が少なかった。

1959年に、景山らは、旋回中の二輪車の舵の特性に関する実験的研究を発表した。<sup>13)</sup> すなわち、旋回中の二輪車の保舵角は速度の上昇につれて減少し、保舵モーメントは、速度の上昇につれて、負から正に移行する傾向があり、しかも、これらの値はいわゆるリーニン、リーンウイズ、リーンアウトと呼ばれるような乗車姿勢によって、著しく変わるといふ、二輪車特有の性質を初めて見出したのである。

景山は、簡単で実用的な安定性試験法の確立をめざして、走行中のハンドル振れ角を記録して、振れ

角度頻度曲線を求め、これとフィーリングテストとの間に相関があることを発見し、この方法によって実用的な比較試験をすることを提案した。<sup>14)</sup>

二輪車の運動特性に与えるタイヤのコーナリング特性の影響は極めて大きい、四輪車にくらべて、大きいキャンバー角をとる二輪車用タイヤの特性は永い間知られていなかった。光成らは、初めて二輪車用タイヤの、コーナリング特性を測定し、<sup>15)</sup>その後の二輪車の運動特性の研究に貢献した。その後、タイヤ特性の研究は盛んになり、多くの研究<sup>16)17)</sup>が発表されるようになった。これによって運動特性研究上の障害の一つは除かれるようになった。

キャスト角やトレールを有する前輪系において、舵角変化によるタイヤ接地点の移動に関する幾何学的関係については、三輪車に関する研究<sup>18)</sup>が最初であり、続いて二輪車についても研究された。<sup>19)20)</sup>

景山・伝はバンク角の大きい二輪車について、これらの幾何学的関係を研究した。<sup>21)</sup>従来、二輪車の運動に関する理論研究は、ハンドル角、ロール角などをすべて微小角とみなし得る範囲に限っていたが、この研究によって、限界特性のように、大きい角の範囲までの計算が可能となった。

伝は定常旋回中の車体バンク角・保舵角・車輪横すべり角などが旋回半径・速度・重心位置・回転質量によるジャイロ効果およびタイヤ特性によって、どのような影響を受けるかを理論的に解明し、実験と対比して二輪車の静特性を明らかにした。<sup>22)23)</sup>これによって、従来実験的に知られていたものが理論的に裏付けられた。

二輪車の空力特性は、動力性能の点からも、運動特性の点からも極めて重要であるので、実車風洞実験が行なわれた例が多い。<sup>24)25)26)</sup>Froedeは密閉した車室を有する速度記録用二輪車の直立安定性と方向安定性の関連について、空力特性が重大な影響を持つことを述べ、実際の速度記録車の比較をおこなった。<sup>27)</sup>

1967年に、景山は過去の運動特性研究の結果を整理して、問題点を指摘した。<sup>28)</sup>

1971年に、Sharp は二輪車の操縦性、安定性に関する理論研究を発表した。<sup>29)</sup>

1972年に吉田らは、いろいろな二輪車について、操縦性の違いを発表した。<sup>30)</sup>

1973年7月に、第2回自動車安全国際会議が、サンフランシスコで開催された。この会議は、National Motor Vehicle Safety Advisory Council と U. S. Department of Transportation の主催によって毎年

開催されているが、第2回会議はテーマをモーターサイクルとレジャー用車両としたため、二輪車の安全に関する多くの研究が発表された。その中で、二輪車の運動特性に関しても多くの研究が発表され、<sup>31)</sup><sup>32)33)34)</sup>この問題についての関心の深さが示された。

この会議において、渡辺らは、二輪車の回避性能に関する実験と解析結果を発表して注目を集めた。また景山は、走行中の二輪車のハンドルにパルス入力を与えて、その振動数を測定し、車速と振動数の関係を図に示し、その図中に手放し安定限界速度を同時に記入することによって、操縦性と安定性の関係を1枚の図に示すことを提案した。<sup>35)</sup><sup>36)</sup>

1976年に伝は、7自由度の運動方程式を導びき、計算の実用性を考えて4自由度に削減した方程式を用い、定常円旋回における特性について、計算と実験の対比をおこない、この方程式によって基本特性を損なわないで表現できることを確認した。<sup>37)</sup>

さらに伝は、4自由度の方程式によって手放し運動の安定性を検討した。その結果、自由運動のモードは、Wobble、Weave と呼ばれる2組の振動根と、Capsize と呼ばれる2個の実根からなることを明らかにし、自転車から最近の大型二輪自動車までの幾種類かの車について計算をおこなった結果、その根軌跡の形が大きく3種類に分類でき、それぞれの二輪車の特性を表わしていることを示した。特に、最近の大型車で問題になっている高速での不安定運動が理論計算と一致することを指摘した。<sup>38)</sup>このことは今後の大型高速二輪車の開発に貢献するであろう。

## 5. 今後の研究

これまでに、二輪車運動特性研究の流れを見て来たが、最初に述べた研究上の困難は、全部ではないが少しずつ解消して来ていることがわかる。理論研究の分野では、入り組んで複雑な関係が解き明かされて来たとし、実験研究の分野では、主として計測器の進歩により、二輪車自体の特性を損なうことなく実験ができるようになった。理論研究と実験研究とは今後も共に必要であるが、新しい問題と取組んで行くためには、どちらかといえば、理論研究が主となって進み、実験は理論の実証のためおこなう、いわば従の立場となるであろう。なぜならば、ひと頃のように、やたらに実験をおこなっても、そこから新しいものを知ることは困難となって来ているからである。ただ、いつの時代にも、実車のテストが必要であることは変わらない。

理論研究も、定常特性に関してはほとんど問題がないところまで来ている。今後研究を要するのは、非定常特性である。例えば回避運動特性とか、右旋回から急に左旋回に入るときのピッチング運動とか、激しい横すべりをともなう運動とか、車体の弾性を考慮に入れた非定常運動とか、これらの問題を解くには、4自由度程度の方程式では無理であって、自由度を増した複雑な方程式を取扱わなければならない。現在すでに一部の研究者の間には、多自由度化競争が展開されているかの感がある。より高度の問題を取扱うために、多自由度化して精密な理論を展開するのは、確かに一つの進歩ではあるが、現状では4自由度の方程式で表わせる範囲のことで、解明されていないところが非常に多いのである。頭ばかりが進む前に、もっと足元をしっかりと固める必要があるのではないだろうか。

近年、人間—二輪車系としての研究が盛んになって来た。特に1970年代になってからは、この方面の研究が多く発表されるようになっており、誠によこばしい。この傾向は今後も続いて行くであろう。本来、二輪車は「人車一体」のものであり、人間を忘れた理論は、どう見ても不完全なものである。

高速化にともない、空気力学特性研究の必要性が高まって来たのは当然である。初めは単に空気抵抗の低減のみを狙って始められた空力特性の研究も、運動特性への影響が大きいことが判明してからは、少しずつ違った角度から見直されるようになって来た。また二輪車は横風に対しては宿命的な弱みを持っている。そこで現在でも、テストコースに設けられた横風送風装置を利用して走行実験がおこなわれているが、これらの実験から発展して理論研究に進む必要がある。そして将来は、横風に強い二輪車の実現に進展させることが必要であろう。

#### 参考文献

- 1) 近藤政市：二輪車の走行安定などを論ずる基礎運動方程式およびその自転車への1応用、日本機械学会、昭和23年11月3日講演(於大阪)
- 2) 近藤政市：二輪車の手放し走行の安定不安定様式と定常円旋回について、日本機械学会、昭和23年11月13日講演(於東京)
- 3) A. Wilson-Jones: Steering and Stability of Single-track Vehicle, Proc. Auto. Div., Inst. Mech. Engr., Part IV, 1951-52.
- 4) E. Döhring: Die Stabilität von Einspurfahrzeugen, ATZ, Jahrg 56, Nr. 3, März 1954.
- 5) 近藤政市、広瀬藤五郎、涉川侃二：二輪車の安定性の実験的研究 日本機械学会誌、Vol. 58, No. 442, 1955.
- 6) 景山克三、伝啓泰、小佐文雄：二輪車の安定性の実験的研究、日本機械学会誌、Vol. 64, No. 508, 1961.
- 7) K. Kageyama, H. Fu, F. Kosa: Experimental Study on Standing Stability of the Motor-cycle, Bulletin of J S M E, Feb. 1962.

- 8) R. N. Collins: A Mathematical Analysis of the Stability of Two Wheeled Vehicle, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, 1963.
- 9) E. Döhring: Das Lenkungsflattern von Einspurfahrzeugen, ATZ, Jahrg 58, Nr. 10, 1956.
- 10) 井口雅一：二輪車の運動力学、機械の研究、Vol. 14, No. 7-8, 1962.
- 11) D. J. Eaton: Man-Machine Dynamics in the Stabilization of Single-track Vehicle, Ph. D. Thesis, University of Michigan, 1973.
- 12) 小林忠孝：人間—二輪車系の運動、自動車技術、Vol. 28, No. 4, 1974.
- 13) 景山克三、伝啓泰：二輪自動車の定常旋回における操縦性、自動車技術、Vol. 13, No. 10, 1959. (論文集第6号)
- 14) 景山克三：二輪自動車の砂利路における安定性の比較実験、モーターファン、Vol. 12, No. 6, 1959.
- 15) 光成卓志、坂下和史：自動二輪車前後輪の対路面特性、東洋工業(株)研究報告、実試研96, 1954.
- 16) 酒井秀男：二輪車タイヤのコーナリング特性、自動車技術会講演会前刷、1965年10月
- 17) 景山克三、伝啓泰：試作した平板式タイヤ試験機と二三の実験、自動車技術、Vol. 20, No. 5, 1966.
- 18) 光成卓志、坂下和史：キャスト角の大きい操舵機構の保舵モーメントについて、自動車技術、Vol. 9, No. 2, 1955.
- 19) 大串雅信：二輪車および三輪自動車前輪のキャスト角およびトレールと操縦性について、関東学院大学工学部研究報告、第1巻第2号、1956.
- 20) 大串雅信：同上続編、研究報告第4巻、1959.
- 21) 景山克三、伝啓泰：二輪車の前輪系の幾何学、自動車技術、Vol. 18, No. 11, 1964.
- 22) 伝啓泰：定常旋回における二輪車の基本特性、日本機械学会論文集、Vol. 31, No. 229, 1965.
- 23) H. Fu: Fundamental Characteristics of Single-track Vehicles in Steady Turning, Bulletin of J S M E, Vol. 9 No. 34, 1966.
- 24) 日本小型自動車工業会：二輪車の風洞試験について、連報第1報、1956年8月.
- 25) 同上連報第2報、1956年11月.
- 26) 高木秀夫：二輪車の風洞試験、モーターファン、Vol. 15, No. 1-2, 1961.
- 27) W. Froede: Einspurfahrzeuge mit geringstem Luftwiderstand, ATZ, Jahrg 59, Nr. 5, Mai. 1957.
- 28) 景山克三：二輪車の安定性・操縦性、自動車技術、Vol. 21, No. 7, 1967.
- 29) R. S. Sharp: The Stability and Control of Motorcycle, Journal Mechanical Engineering Science, Vol. 13, No. 5, 1971.
- 30) 吉田恵吾、神谷忠：二輪車の操縦性・安定性、自動車技術、Vol. 26, No. 7, 1972.
- 31) David H. Wier: A Manual Control View of Motorcycle Handling, Proceedings of The Second International Congress on Automotive Safety, 1973.
- 32) J. R. Ellis and G. F. Hayhoe: The Steady State and Transient Handling Characteristics of a Motorcycle, 文献(31)
- 33) R. Douglas Roland: Simulation Study of Motorcycle Stability at High Speed, 文献(31)
- 34) David J. Eaton, Leonard Segel: Lateral Dynamics of the Uncontrolled Motorcycle, 文献(31)
- 35) Yoshinori Watanabe and Keigo Yoshida: Motorcycle Handling Performance for Obstacle Avoidance, 文献(31)
- 36) Katsumi Kageyama: The Outlook of Improving Steering on Motorcycle, 文献(31)
- 37) 伝啓泰：定常旋回における二輪車の保舵モーメント、日本機械学会講演論文集No. 760, 1966年4月
- 38) 伝啓泰：二輪車の運動特性に関する研究、日本大学学位論文、1967.