

車両の旋回幾何学

—左折事故に関連して—

西

山

豊

1. バイクの講習を受けて

運転免許だけは絶対とるまい、と堅く決意していた私も、女房の強い説得のまえに、ついにその一角を崩してしまった。

交通事故、排気ガスによる公害、ガソリン等の維持費の増大など、どれ一つとっても、自動車を良しとする理由は見つからない。百害あって一利なしとは、このことを言うのだろうか。それに比べ、自転車や歩きはどうだろう。公害にはならないし、けがもしない。そして、なにより健康にこの上ない。

「自動車=悪」としながらも、不本意に、原付バイクの免許を取ることになった。スーパー・マーケットでの買い物を主な利用目的とした、小回りのきくバイクが、我が家にとってはどうしても必要である、という結論に達したからである。

原付バイクの免許は、免許のうちに入らないかも知れないが、それでも一応試験がある。50点満点の○×式筆記試験である。45点以上とらないと合格しない。なる程と思われる設問もあるが、およそ科学的とはほど遠い設問もある。落し穴も多い。それでも45点はとらねばなら

ない。受験者はみな必死である。バイクに早く乗りたいために。

バイクの講習会に出て、面白くもない交通法規を聞かされるなかで、ひとつだけ興味の持てることばがあった。それは、「内輪差」ということばである。このことばは、「左折事故」とともに、一つの社会問題として、マスコミで取り上げられたこともある。大量輸送のための大型トレーラーが出現することによって、にわかにクローズ・アップされてきたことばである。

車両が左または右に旋回するとき、前車輪と後車輪の径路は異なる。後車輪の方が内側をとおる。このときの両者の回転半径の差を「内輪差」といい、一般に、ホイールベース（前車輪と後車輪との間の長さ）の大きい車両ほど大きい。大型車がハンドルを一ぱいに切ってまがるときは、数メートルに及ぶこともある。

大型トレーラーは「内輪差」が大きいため、左折する際、図1のように大まわりする必要を生じる場合がある。このとき左側が広くあいて、一見左折するとは思えないために、左側を並進または追いついてきた他の車両が、そのまま直進しようし、左折をはじめた大型トレーラーの側面に衝突するケースがよくある。

また、大型トレーラーの前車輪だけに注意していて、それより左側にいれば安心だと勘違いして、自転車がトレーラーの後車輪にまき込まれ、事故につながることが多い。

これは、「内輪差」に対する知識が不充分であることに帰因する。このことは、非常に問題がある。

2. 角を回るということ

車の歴史は古い。

重量物を運搬する場合、引きずれば地面と荷物との間に摩擦が生じ、運動を妨げる。そこで考え出されたのが、「ころ」である。これは、ころがり摩擦による抵抗が、すべり摩擦によるそれより、格段に小さいという自明の原理に基づくものである。ところが、「ころ」は荷物の移動とともに、あとに残されるという欠点をもって

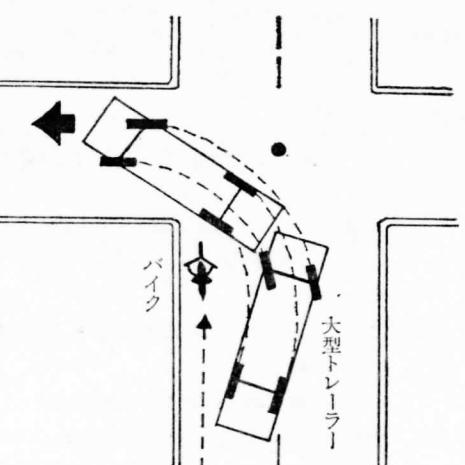


図1 左折事故の例 (参考文献(1)より)

いる。それを補ったのが車である。車は、二輪車または四輪車が多い。

車輪は、抵抗をへらすためにあることは、いうまでもないが、忘れてはならない、もう一つの大変な役目がある。それは、車輪がころがる向きに対して直角の方向には、車体をすべらせまいとする働きである。つまり、車輪は、横すべりをおこさず、前後にスムーズに車体を動かせるのである。

一般に、剛体は空間の中で6つの運動の自由度をもっている。 x , y , z 軸方向に沿った3つの並行移動と、各軸まわりの3つの回転移動がそれである。車は、2つの自由度しかもっていない。1つは、車体の前後方向に働く自由度、もう1つは、鉛直軸のまわりに回転する自由度である。この2つの自由度さえあれば、平面上のどの地点にも行くことができる。

さて、車が直進状態から左にまがるときの、車輪の動きに注目してみたい。

車には、4つの車輪がある。ひとつひとつの車輪は、2つの自由度をもっているが、別々に動くことはできない。図2に示すように、4つの車輪は、定点Oを中心とした、円周の接線方向を向いていなければならない。

この図からもわかるように、各車輪のまわる半径はすべて異なる。内側の前車輪の回転の半径を R_1 、内側の後車輪の回転を R_2 とすれば、

$$R_1 - R_2$$

が、「内輪差」になるのである。

幾何学に強いものは、この大きさを容易に計算することができるだろう。そして、ホイール・ベースの大きい車ほど「内輪差」が大きいことを、証明するだろう。

4つの車輪の回転半径が、それぞれ異なることがわかったが、それでは、車輪の横すべりをなくすには、これらの車輪をどのように制御すればよいのだろうか。

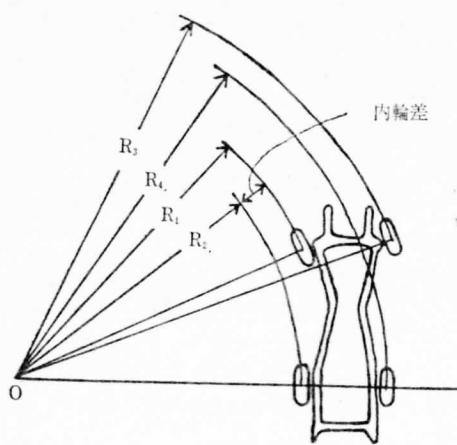


図2 車輪の回転半径

3. かじ取り装置にみられる工夫

自動車を上からは見ても、おそらく下からは見た人はいないだろう。運転するのに、必要ないからだ。ところが、車体の腹部ともいべき裏側には、素晴らしい工夫がなされている。そして、この恩恵によって、快適な運転が保証されているのだ。

アッカーマン式かじ取り装置が、それである。

この装置は、はじめドイツのバーガーなどが考えだし、イギリスのアッカーマンが特許をとり、その後多くの人によって改良が加えられたものである。

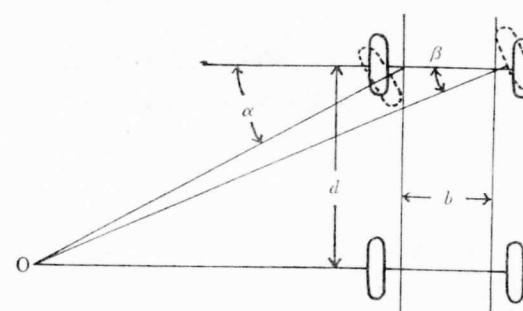


図3 前車輪と後車輪の関係

4つの車輪に対して、4つのかじ取り装置があればよいのだろうか。理論上はそうであっても、実際は実現できない。なぜなら、かじ取り装置が4つもあれば、操縦が非常に複雑になるからだ。ちょうど、ドラマーが、両手両足を使い、タコやシンバルをたたく様である。こんなことはできない。

現在の四輪車では、後車輪は、車体に並行に固定され、エンジンにより駆動され、前車輪にかじ取り装置がつけられている。車輪の横すべりをなくすためには、図3に示すように、後車輪の軸の延長線上に、前車輪の2つの回転半径の中心が、ともに等しくなるようにしなければならない。

このとき、前車輪左側の傾きを α 、右側の傾きを β とすれば、 α と β はわずかに異なり、

$$\alpha > \beta \quad (1)$$

である。ホイール・ベースの大きさを d 、車輪の間隔を b とすれば、

$$\cot \beta - \cot \alpha = \frac{b}{d} \quad (2)$$

なる関係がある。

このような条件を満たしたかじ取り装置は、一体可能なのであろうか。現在もちいられているかじ取り装置について、次に紹介していこう。

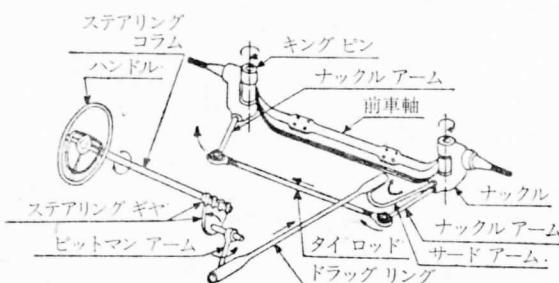


図4 アッカーマン式かじ取り装置（参考文献(2)より）

図4に示すように、固定した前車軸体の両端に、前輪軸を取り付け、これを運転席のかじ取りハンドルから、リンク仕掛けで動かすようになっている。

タイロッド・アームの長さが適切に選ばれ、ハンドルを切った場合、内側車輪は外側車輪よりも旋回角度が大きく、各車輪は、後車軸線上の1点を中心にして回り、横すべりをしないようになっている。

この関係を図5と図6に示していく。白丸印で書いた節点は、回転にたいして自由になっている。

初期の段階のかじ取り装

置は、図5に示すように平行四辺形が用いられていた。

1個のハンドルで、2つの前車輪を回すことができるが、車輪の傾く角度 α , β はともに等しく、図3で検討した $\alpha > \beta$ の条件は満たされていない。

そこでアッカーマンによって改良されたのが、図6に示すような等脚台形（逆転している）である。この工夫は非常に素晴らしい、偉大な発見であった。これでいけば、車輪の傾く角度 α , β の条件は満たされることになる。前車輪によってできる交点は、正確には、常に後車軸の延長線上にあるとはいえないが、ほぼ近い点にあつまる。

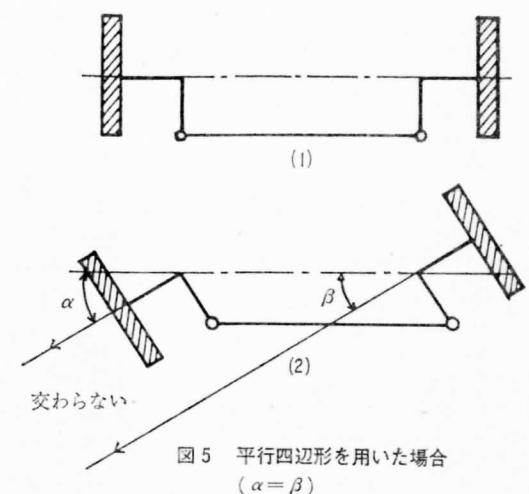


図5 平行四辺形を用いた場合
($\alpha = \beta$)

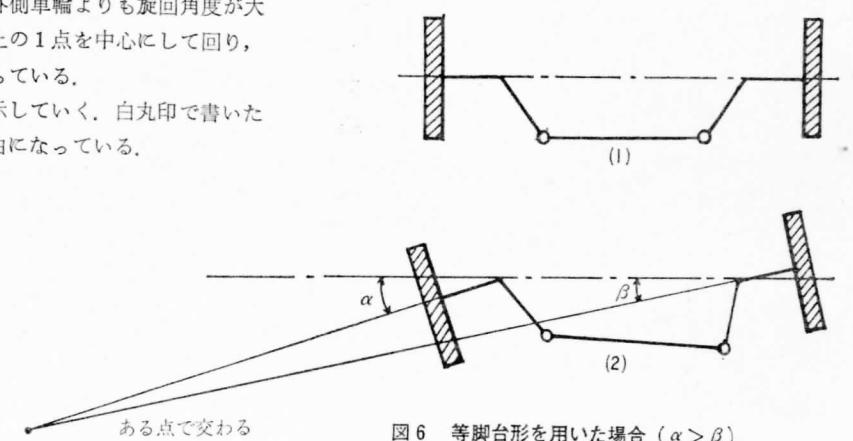


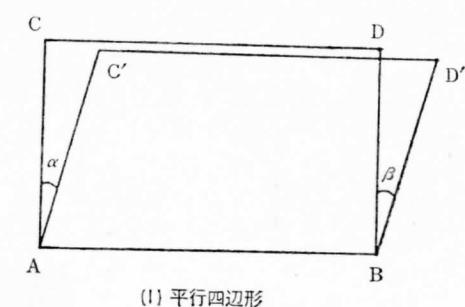
図6 等脚台形を用いた場合 ($\alpha > \beta$)

アッカーマン式かじ取り装置は、車体の裏側に隠された、知られざる技術の発達史というところか。

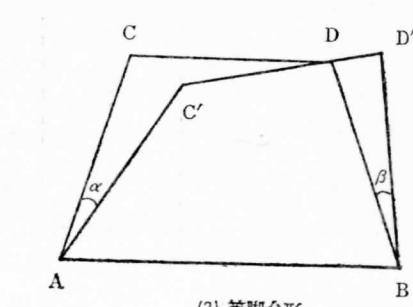
4. 図形問題

かじ取り装置に、なぜ等脚台形をもってくるとよいかを、もう少し詳しく説明しておきたい。

図5と図6で示した機械のうち、必要な部分だけを取



(1) 平行四辺形



(2) 等脚台形

図7 α と β の関係

り出してみると、図7のようになる。図は上下が逆転していて、 α と β の場所も移動してある。

さて、下底ABを固定したまま、点CをC'に、角CAC'が α になるように動かす。四辺形の各辺の長さは変わらないから、点DはD'に移る。そこで角DBD'の大きさを β とする。

図から明らかなように、平行四辺形の場合は、対辺ABとCDの長さが等しいため、 α と β の大きさは常に等しい状態が保たれている。一方、等脚台形の場合は、 $CD < AB$ であるから、点CがC'に移ったとき、上底C'D'は尻上がりになり、したがって、その分だけ β は α より小さくなる。つまり $\beta < \alpha$ の関係がある。

等脚台形の α と β の関係を、式を用いれば、どのように表わされるのであろうか。一見簡単なようであるが、少し複雑である。しかし、高校程度の数学の知識があれば充分である。ここでは、詳しくは触れない。

注意すべきことは、求まった式からは、 α と β をうまく分離することができない。つまり、 $\beta = f(\alpha)$ のような形にすることのできないので、反復法などを用いた数値計算で解を求める事になる。

等脚台形を用いれば、 $\alpha > \beta$ なる関係がつくれることがわかったが、図3にもどって、角 α 、 β と車輪の間隔 b やホイール・ベースの大きさ d の関係についてみておきたい。

d や b の大きさは、自動車に固有なもので、大きさは変わらない。一方、 α や β は、直進のときのゼロから、まわる角の大きさによって、任意の値をとることになる。

α や β が任意の値をとっても、式(2)が常になりたつことが理想であるが、それはできない。実際は、あらかじめ自動車の回転半径を決めておき、そこから α と β を求め、そして d や b の大きさが計算されている。

式(2)の左辺の値、 $\cot\beta - \cot\alpha$ は、 α と β が任意であるから、さまざまな値をとりうる。 α と β には等脚台形によって決められた関係があるため、ほぼ一定の値をとりつづける。

アッカーマン式かじ取り装置が、いかに素晴らしいものであるかがわかる。

5. 内輪差は解消できるか

車が旋回するとき、どのような仕組みになっているのかを見てきたが、ここでもう一度、「内輪差」と「左折事故」

の話に戻ってみよう。

運転席をエンジンの上に乗せ、荷台を広げられるだけ広げた、キャブ・オーバー型トラックをはじめ、車両制限法いっぱいに大型化した大量積載型トラックは、高度成長のかけ声とともに、続々登場してきた。その数は、全国でざっと50数万台はあるといふ。

トラックの大型化と高運転席化は、内輪差と死角を拡大し、危険をますます大きくしている。

運輸省は、事故防止の緊急通達として、

- 1) ミラーをふやすこと。
 - 2) 荷台の中ほどに方向指示灯をつけること。
 - 3) 現在むき出しの前輪と後輪の間にあるサイドガード（横棒）をもう1本ふやし、45センチ以下のところにつけること。
- を出している。

「道路交通民主化の会」は、これでは抜本的な解決にならないとし、特に死角の問題について触れ、低運転席化を提案している。これによれば、運転席から見た死角の範囲は、ぐんとせばまるというのである。

私は、もう一步議論を進めたい。なぜなら、「内輪差」のことが充分検討されていないからだ。トラックが大型である限り、内輪差は絶対に小さくならない。せまい道路に、大型トラックを走らせる。バックミラー・サイドミラーを沢山つけて走らせる。これでは、運転手ただひとりの、神経疲労と労働強化につながることは間違いない。

結論は、はっきりしている。大型車をつくらないことである。さもなければ、大型車を一般道路から締め出すことである。この主張は、短絡しているだろうか。

少し余談になると思うが、大型トラックに対する代案として次のようなものを考えてみた。

内輪差の大きさは、図2、図3から次式でもとまる。

$$R_1 - R_2 = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot d \quad (3)$$

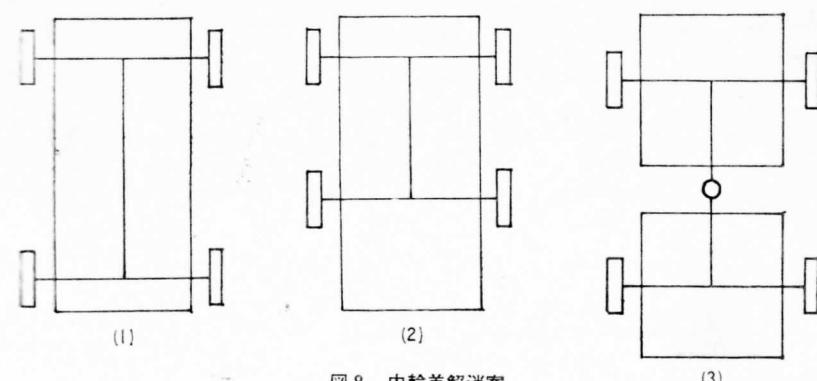


図8 内輪差解消案

したがって、内輪差を小さくするためには、車軸間の距離 d を小さくすることである。

図8の(1)に、現在の大型トラックを示す。(2)のように、後車輪を前にもって行けば内輪差は小さくなるであろうが、構造や安定感に問題がありそうだ。また(3)のように、トラックを2つに分割し、各々をピン結合すれば内輪差は小さくなるであろうが、製作がむつかしくなるだろう。

こういった試みは、多分なされていると思う。街を走

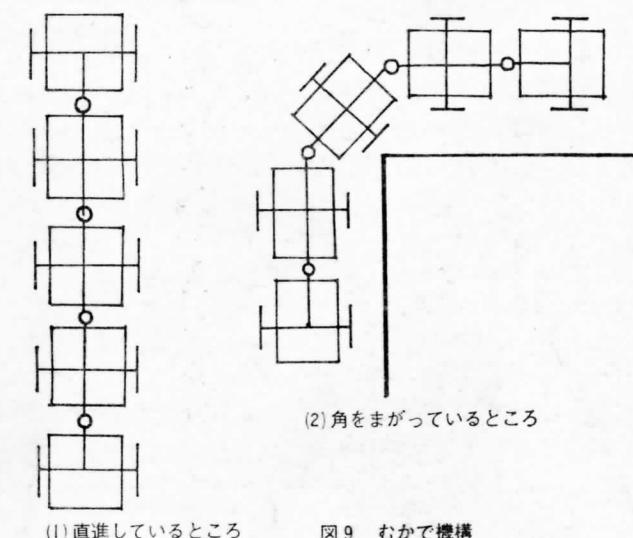


図9 むかで機構

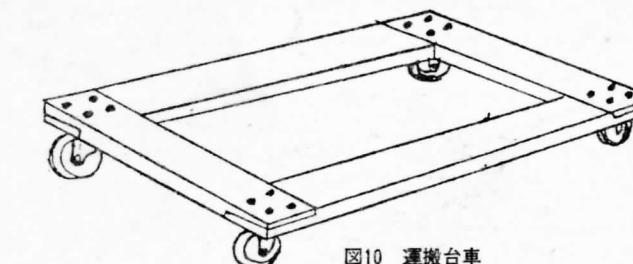


図10 運搬台車

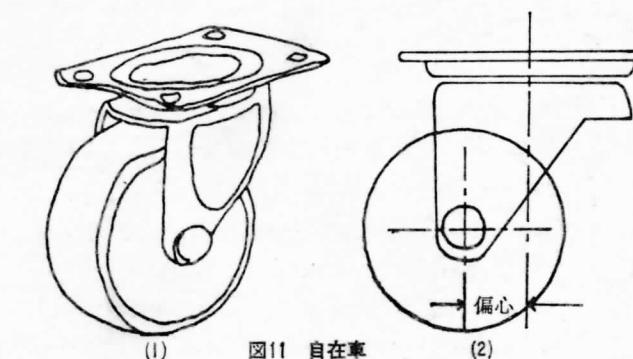


図11 自在車

っている大型トレーラーの中には、この工夫を部分的にとりいれられたのが見かけられる。

(3)の考え方が実用化されているものに、駅構内でよく見かける運搬車がある。小さい車が沢山連結されていて、まるで蛇のように、あの狭い構内をうまくきりぬけている。

図9に示すように、運搬車は長いが、各車両が分割されているため、内輪差の問題がおこらない。交差点も、ほぼ直角にまがることができる。むかでの歩行を連想されるとよい。

このあたりの議論は、文献(3)に詳しい。確かに内輪差は解消されるが、後続車両の軌道の安定性が、ここでは問題になっている。

さて、むかで機構が大型トラックにとりいれられたとすると、この場合の車輪には、どのようなものを用いればよいのだろうか。

車輪の横すべりをなくすには、ベッドやピアノの下に取りつけられてあるキャスターがよいと思う。重い荷物の運搬に図10のような台車が用いられている。これは、車輪の軸とキングpinの中心がずれていることによって、進行方向に向きが保たれやすく、安定な走行ができるようになっている(図11)。

しかし、これはあくまで余談である。小さい車両をつなげた場合、各車両間の制御はますますむつかしくなり、危険が一層増すかも知れない。ただ、駅構内の運搬車のように、低速で走行すれば、絶対に事故にはつながらないことだけは確かである。

参考文献

- (1) 道路交通民主化の会「大型トラックの視界と左折事故」。
- (2) 嶋山重信「総説自動車工学」理工学社。
- (3) ロゲルギスト「新物理の散歩道・第二集」中央公論社。

(日本科学者会議大阪支部)

□.....□