

トレーラがトラクタに及ぼす慣性力について

AOKIDS

2008年2月24日

1 はじめに

平成14年に「道路運送車両法の保安基準に基づく制動時の加速度」という考察文を掲載しました。前稿は「トラクタとトレーラを連結するヒッチ・メンバの取り付けにあたり、制動時の慣性力を考えないとトラクタが破損することがあり、安全上も問題がありますよ。」という主旨で簡単にまとめたものでした。その後、法律の解釈が曖昧な部分、内容に誤解を生む部分が見つかりましたので、同じ主旨で新たに「トレーラがトラクタに及ぼす慣性力について」という考察文を掲載することにします。

2 制動力に関する法の規定

自動車の制動力に関する規定として、「道路運送車両の保安基準」(以下、保安基準とします。)第12条および「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示」(以下、告示とします。)第171条の二つがあります。また、牽引自動車(トラクタ)および被牽引自動車(トレーラ)の制動力に関する規定として「保安基準 第13条」および「告示 第172条」が別途定められています。[1]

以下、本稿に関連する部分を条文から引用し、制動力について若干の解説を行います。なお、条文中に含まれるカッコ書き等で、本稿で主に扱うポート・トレーラに直接関係のない部分は割愛しています。また、法令の引用においては「牽引自動車」および「被牽引自動車」を用いていますが、解説では「トラクタ」(牽引自動車のこと)および「トレーラ」(被牽引自動車のこと)を用いることにします。

2.1 保安基準について

1. 第12条 第1項

自動車には、走行中の自動車が確実に安全に減速及び停止を行うことができ、かつ、平坦な舗装路面等で確実に当該自動車を停止状態に保持できるものとして、制動性能に関し告示で定める基準に適合する独立に作用する2系統以上の制動装置を備えなければならない。

自動車全般の制動装置について規定しています。2系統というのは、主制動装置とそれ以外の制動装置を指し、乗用車では油圧式フット・ブレーキと手動式または足踏み式のサイドブレーキとなります。

2. 第12条 第2項

車両総重量750キログラム以下の被牽引自動車にあつては、当該被牽引自動車を牽引する牽引自動車の車両重量の2分の1を当該被牽引自動車の車両総重量が超えない場合には、主制動装置を省略することが出来る。

トレーラの車両総重量が750キログラム以下で、かつトラクタの車両総重量の2分の1以下であれば、トレーラ側に主制動装置(トラクタの主制動装置と連動して作動する制動装置)が必要なく、駐車ブレーキのみで良いこととなります。

3. 第13条

牽引自動車及び被牽引自動車の制動装置は、牽引自動車と被牽引自動車とを連結した状態において、連

結状態における制動性能に関し告示で定める基準に適合しなければならない。

第 12 条の規定は自動車について規定していますが、第 13 条は敢えてトラクタとトレーラのみ
に限定して規定しています。詳細は告示で述べられています。

2.2 告示について

1. 第 171 条 第 6 項

被牽引自動車には、次に掲げる基準に適合する制動装置を備えなければならない。

2. 第 171 条 第 6 項 第 3 号

主制動装置は、牽引自動車の主制動装置と連動して作用する構造であること。

公道を走る大型車のトレーラは油圧や空気圧で作動するブレーキを装備しており、トラクタ側と油圧配管やエア配管で結合されています。したがって、トラクタ側で運転者がブレーキを踏むと、トレーラ側のブレーキ装置も同時に作動することになりますが、ポート・トレーラでは殆ど見られない形式です。

3. 第 171 条 第 6 項 第 4 号

主制動装置は、乾燥した平坦な舗装路面で、被牽引自動車のみ主制動装置を作動させることにより、セミトレーラにあってはイ、それ以外の被牽引自動車にあってはロの計算式に適合する制動能力を有すること。

$$\text{イ } S \leq 0.15V + 0.0086V^2$$

$$\text{ロ } S \leq 0.15V + 0.0077V^2$$

この場合において、被牽引自動車を牽引する牽引自動車の原動機と走行装置の断続は断つこととし、

S は、被牽引自動車単体の停止距離（単位 m）

V は、制動初速度（被牽引自動車を牽引する牽引自動車の最高速度とする。ただし、最高速度が 60km/h を超える牽引自動車に牽引される被牽引自動車にあっては、60 とする。）（単位 km/h）

前稿で引用した規定ですが、 V^2 に掛かる係数が少し変更されています。

この引用については、トラクタ側のブレーキは使わないでトレーラ側のブレーキのみで制動するという普通にはあり得ない状況を意味します。実際はトラクタ側のブレーキも併用するわけですから、更に急制動となるわけで、前稿のようにこの規定を使って制動時の慣性力を求めるには問題があります。

4. 第 171 条 第 7 項

次に掲げる被牽引自動車の主制動装置は、前項第 3 号の基準にかかわらず、被牽引自動車とこれを牽引する牽引自動車とが接近することにより作用する構造とすることが出来る。この場合において、同項第 2 号および第 4 号の基準は適合しない。

5. 第 171 条 第 7 項 第 1 号

車両総重量 3.5 t 以下の被牽引自動車（セミトレーラを除く。）

「被牽引自動車とこれを牽引する牽引自動車とが接近することにより作用する構造」とは、いわゆる慣性ブレーキを指します。トラクタが減速するとトレーラが慣性で前に押し出されますが、この力を利用してトレーラのブレーキを働かせます。多くのポート・トレーラ（主制動装置が不要なものを除く）は、この慣性ブレーキまたは電磁ブレーキを装備しています。

6. 第 171 条 第 8 項

自動車の制動装置は、ブレーキ・テストを用いて第 1 号の状態で計測した制動力が第 2 号に掲げる基準に適合しなければならない。ただし、ブレーキ・テストを用いて検査することが困難であるときに限り走行その他の適切な方法により検査し、第 2 号に掲げる基準の適合性を判断することが出来るものとする。

陸運事務所の検査場へ行くと、ブレーキ・テストと呼ばれるゆっくりとローラが回転する装置に

タイヤを乗り入れ、ブレーキをかけて制動力を検査します。このときの制動力が第 2 号に適合するかどうかで、制動力の良否を判定しています。

7. 第 171 条 第 8 項 第 2 号

計測値の判定

イ 自動車（被牽引自動車を除く。）の主制動装置にあっては、制動力の総和を検査時車両状態（注 1）における自動車の重量で除した値が 4.90N/kg 以上（注 2）であり、かつ、後車輪にかかわる制動力の和を検査時車両状態における当該車両の軸重で除した値が 0.98N/kg 以上であること。

ハ 被牽引自動車の主制動装置にあっては、制動力の和を検査時車両状態における当該車両の軸重で除した値が 4.90N/kg 以上（注 3）であること。

ヘ 第 172 条第 4 項の被牽引自動車の制動装置にあっては、制動力の総和を検査時車両状態における自動車の重量で除した値が 1.96N/kg 以上であること。

（注 1） 検査時車両状態における自動車の各軸重を計測することが困難な場合には、空車状態における前車軸に 55kg を加えた値を検査時車両状態における自動車の前車軸とみなして差し支えない。

（注 2） ブレーキ・テストのローラ上で前車軸のすべての車輪がロックし、それ以上制動力を計測することが困難な場合には、その状態で制動力の総和に対し適合すると見なして差し支えない。

（注 3） ブレーキ・テストのローラ上で当該車両のすべての車輪がロックし、それ以上の制動力を計測することが困難な場合には、その状態で当該車両の軸重で除した値が 4.90N/kg とみなして差し支えない。

ブレーキ・テストで測定した制動力の基準を示しています。

検査場のブレーキ・テストでは殆どの車のタイヤはロックしますので、基本的には基準値（4.90N/kg）をクリアしていると解釈して良いと思います。この場合、例えば自分の乗っているホンダのステップワゴン（GF-RF2）について少し考察してみます。

車検証を見ると、前前軸重 870kg、後後軸重 680kg とあるので、大雑把に「検査時車両状態における自動車の重量」を、

$$870 + 680 + 100 = 1650(\text{kg})$$

としましょう。検査時にブレーキを踏む人の体重や燃料・水その他の重さを単純に合計 100kg とし加算しました。（ちなみに車両総重量：全装備重量は 1990kg です。）

この重量に基準値を掛け合わせると、

$$1650 \times 4.90 = 8085(\text{N})$$

となり、タイヤがロックしている場合だとこれ以上の制動力を有することになります。

この制動力によって動いている車を停止させるわけですから、逆に運動方程式を用いれば、

$$F = m \times \alpha \text{より} \quad (F: \text{力} (\text{N}), \quad m: \text{質量} (\text{kg}), \quad \alpha: \text{加速度} (\text{m/s}^2))$$

$$\alpha = \frac{F}{m} = \frac{8085}{1650} = 4.9(\text{m/s}^2) = 0.5(\text{G}) \quad (\text{加速度} \div 9.8\text{m/s}^2)$$

となり、全制動するとこの平均加速度で車を停止させることが出来ます。

文献 [2] によると「一般道路を走行中の自動車ブレーキをかけた場合、0.4G をこす減速度を生じることがきわめてまれだとする報告があり、また、自動車の急制動時の最大減速度は 0.8G 程度である」とあるので、上記計算はまずまずの妥当性があります。

ただし、この値はトラクタ単体での計算ですから、主制動装置を持たない重いトレーラが後から押してくる場合だと制動時間が長くなり、減速度（負の加速度）は小さくなります。

8. 第 172 条 第 2 項

牽引自動車及び被牽引自動車の制動装置は、牽引自動車と被牽引自動車を連結した状態において、前条第 2 項第 3 号及び第 8 号の基準並びに次の基準に適合しなければならない。

9. 第 172 条 第 4 項

牽引自動車及び被牽引自動車の制動装置（被牽引自動車の制動装置であって当該被牽引自動車を牽引する牽引自動車と接近することにより作用する構造であるもの（以下「慣性制動装置」という。）を除く。）は、走行中牽引自動車と被牽引自動車とが分離したときに、それぞれを停止させられる構造でなければならない。ただし、車両総重量が 1.5t 以下の一軸を有する被牽引自動車（セミトレーラを除く。）で連結装置が分離したときに連結装置の地面への接触を防止し、牽引自動車と被牽引自動車との連結状態を保つことが出来るものにあつては、この限りでない。

10. 第 172 条 第 8 項

前条第 3 項の自動車に牽引される車両総重量 750kg 以下の被牽引自動車であつて、次の各号のいずれかに該当するものにあつては、主制動装置を省略することができる。

11. 第 172 条 第 8 項 第 1 号

連結した状態において、牽引自動車の主制動装置のみで別添 12「乗用車の制動装置の技術基準」の別紙 1 の 2.1.2. に定める基準及び前条第 2 項第 3 号の基準に適合するもの

12. 第 172 条 第 8 項 第 2 号

牽引自動車の車両重量の 2 分の 1 を当該被牽引自動車の車両総重量を超えないもの
トラクタとトレーラの制動装置について、さらに細かく規定しています。

以上、ポート・トレーラに関わる「保安基準」および「告示」を引用し、少々解説を加えてみました。ただ、これら法令によって規定されている基準値は最低限の基準であり、実際に全制動時したときの挙動と一致するわけではありません。

次節では、急ブレーキをかけ、タイヤがロックした状態での制動状態を考察します。

3 エネルギーから見た車の制動

一般に「自動車がブレーキをかけて制動する」という物理的な意味は、動いている自動車が持つ運動エネルギーを制動装置によって消費することにあります。摩擦式ブレーキの場合、運転者がブレーキ・ペダルを踏むことにより、油圧・空気圧あるは機械的操作により回転部分と摩擦材が強く押しつけられ、このときに発生する熱によりエネルギーを消費しています。（厳密には摩擦材のはく離による機械的エネルギーや音のエネルギーでも消費されます。）

ところが急制動時を行う場合は少々話が変わります。走行中の車のブレーキを目一杯踏み込むとタイヤがロック（回転しない状態）し、路面とタイヤとの摩擦力で停止します。事故現場で見られるスリップ痕はタイヤがロックした状態で路面を滑った痕です。

制動初期（非常に短時間）においては、上記の摩擦ブレーキが作用して徐々にタイヤの速度が減少しますが、急制動の場合はその後にタイヤがロックしてしまい、もはやブレーキ装置はタイヤを固定する役目のみとなり、制動の主役はタイヤと路面との摩擦力となります。この場合も、制動自体はエネルギーの変換に変わりありませんから、熱や音、タイヤ表面の消耗などによってエネルギーが消費されます。

3.1 トラクタ単体での制動

参考文献 [3] によると「制動前の速度を V_B 、制動後の速度を V_A とすると、エネルギー保存の法則により、次式が成り立ちます。

$$\frac{1}{2}mV_B^2 = \frac{1}{2}mV_A^2 + \mu_B mGS_B$$

制動前の運動 エネルギー	制動後の運動 エネルギー	制動摩擦仕事
-----------------	-----------------	--------

ただし、 m ：車の質量 [kg] μ_B ：制動摩擦係数
 S_B ：制動距離 [m] G ：重力加速度 ($9.8m/s^2$)

この式は、追突などで車が制動後に追走している状態をも考慮したものなので、制動後も運動エネルギーを持っています。しかし、本稿のようにフル・ブレーキで車が完全に停止した状態を考えると、右辺の「制動後の運動エネルギー」は「0」と考えられ次式のようになります。

$$\frac{1}{2}mV^2 = \mu mGS \quad (1)$$

ただし、 m ：車の質量 [kg] μ ：制動摩擦係数 V ：車速 (m/s)
 S ：制動距離 [m] G ：重力加速度 ($9.8m/s^2$)

この式から制動距離 m を導く次式は、事故鑑定などでよく使われる「制動距離計算式」です。

$$S = \frac{V^2}{2\mu G}$$

上記の「制動距離計算式」は車速を秒速で入力しなければならないので「時速」で使えるように変形し、ついでに重力加速度 $G = 9.8$ も代入しておきます。

$$S = \frac{\left(\frac{V}{3.6}\right)^2}{2\mu \times 9.8} = \frac{V^2}{254 \times \mu}$$

ただし、 S ：制動距離 [m] V ：車速 (km/h) μ ：制動摩擦係数

それでは具体的な数値を代入してみましょう。

「ある車が 60km/h で乾いたアスファルト路面を走行しています。全制動した場合の制動距離は何 m になるでしょう。」

上記の式を使えば簡単な計算で制動距離を求められますが、実は μ で示されている「制動摩擦係数」には注意が必要です。この係数は路面の種類や状態、タイヤの種類や摩耗状態、空気圧、車速などで大きく変わり、文献 [4] では、0.7 (乾いたアスファルトまたはコンクリート) から 0.07 (氷) の 8 種類が提示されていますが、文献 [3] では、0.8~0.05 の間で細かく分類されています。今回は事故鑑定ではありませんので、「0.7」を採用することにします。上記の式に代入すると以下のようになります。

$$S = \frac{60^2}{254 \times 0.7} \doteq 20.25m$$

さて、初速 60km/h の車が全制動して 20.25m で停止したとすると、

$$S = \frac{1}{2}Vt \quad \therefore \quad t = \frac{2S}{V} \quad \text{ただし、} \quad t: \text{制動時間 (s)} \quad V: \text{秒速 (m/s)} \quad (2)$$

で制動時間が求められます。この場合だと、

$$t = \frac{2S}{V} = \frac{2 \times 20.25}{\left(\frac{60}{3.6}\right)} = 2.43(\text{秒})$$

で停止し、加速度 α は、

$$\alpha = \frac{\left(\frac{60}{3.6}\right)}{2.43} \doteq 6.86(m/s^2) = 0.7(G)$$

とかなりの重力を体験し、体重 60kg の人なら 42kg の力で前方に押されることとなります。

3.2 トレーラが連結されている場合の慣性力

それでは本題に入りましょう。トレーラを連結している場合、トレーラから大きな力 (慣性力) を受けるので、ヒッチ・メンバの取り付け部の強度については十分注意するようという意図で本稿を書いています。保

安基準の考察では、主制動装置を有する一般的なトレーラについても紹介しましたが、私の回りで見られるポート・トレーラについては主制動装置を持っていないか、あるいは少し大きいトレーラでは慣性制動装置（慣性ブレーキ）を備えているものが主流です。

トラクタのヒッチ・メンバ取り付け部に受ける慣性力を考えると、主制動装置を持たないトレーラの方が大きいので、ここでは車両総重量 500kg 程度のポートを積んだトレーラを考えてみます。

前述の式 (1) をもう一度見直してみます。

$$\frac{1}{2}mV^2 = \mu mGS$$

ただし、 m : 車の質量 [kg] μ : 制動摩擦係数 V : 車速 (m/s)
 S : 制動距離 [m] G : 重力加速度 ($9.8m/s^2$)

この式は左辺のトラクタが持つ「運動エネルギー」を右辺の「制動摩擦仕事」で消費するというものですが、トレーラを牽引している場合は左側の「運動エネルギー」にトレーラの運動エネルギーが加算されます。ところが、主制動装置を持たないトレーラを牽引している場合、右辺の「制動摩擦仕事」はトラクタのみが作り出すことになり、上式は以下のように書き直せます。

$$\frac{1}{2}m_1V^2 + \frac{1}{2}m_2V^2 = \mu m_1GS$$

ただし、 m_1 : トラクタの質量 [kg] m_2 : トレーラの質量 [kg] μ : 制動摩擦係数
 V : 車速 (m/s) S : 制動距離 [m] G : 重力加速度 ($9.8m/s^2$)

これを制動距離で解くと、

$$S = \frac{V^2(m_1 + m_2)}{2\mu m_1G} \tag{3}$$

それでは具体的な数値を代入してみましょう。

「乾いたアスファルト路面上を車両総質量 1650kg の車が車両総質量 500kg のトレーラ（主制動装置は持たない）を 60km/h で牽引走行しています。全制動した場合の制動距離は何 m になるでしょう。」

具体的な数値を代入してみます。制動摩擦係数は前回と同じ「0.7」を用います。

$$S = \frac{\left(\frac{60}{3.6}\right)^2 \times (1650 + 500)}{2 \times 0.7 \times 1650 \times 9.8} \doteq 26.38m$$

となります。トレーラを引いていないときに比べると 6.13m 制動距離が伸びたこととなります。停止時間は、式 (2) から

$$t = \frac{2S}{V} = \frac{2 \times 26.38}{\left(\frac{60}{3.6}\right)} \doteq 3.17(\text{秒})$$

となり、このときの加速度 α は、

$$\alpha = \frac{\left(\frac{60}{3.6}\right)}{3.17} \doteq 5.26(m/s^2) \doteq 0.54(G)$$

となります。

この加速度は前稿の試算（前稿は 0.31G）に比べるとかなり大きいですが、実際の全制動に比較的整合していると考えられます。この場合、トレーラの質量が 500kg なので、270kgf(2630N) の慣性力でトラクタが前方に押されます。なおこれらの結果は、トレーラとトラクタの相関関係で決まりますので、サイズの異なるトレーラを計算する場合は、式 (3) で計算してみてください。

3.3 ABS 付車両について

最近の車はほぼすべて ABS(Antilock Braking System、Antiskid Break System(三菱旧呼称)：ブレーキ・ロック防止システム)を装着しています。タイヤはロックすると摩擦係数が大きく低下するため、ABS は最も摩擦係数減少の少ない「スリップ率」20% 前後を維持するための装置です。

ブレーキを掛けると、ホイールは滑りながら転がります。制動力が小さいときはこの滑りは少なく、制動力が増すにつれて大きくなります。摩擦係数はスリップ率が20% 前後のとき最大となり、それ以降はスリップ率が増すに伴い低下し、ホイールが完全にロックした状態ではスリップ率が100% となります。[5]

ブレーキ装置の作動を見ても、タイヤに装着された速度センサからの車輪速度と実車体速度との差が大きくなるとコントロール・ユニットはタイヤがロックしていると判断し、ホイール・シリンダへ送る油圧を自動的に下げてタイヤ・ロックを回避します。油圧はタイヤ・ロックが収束すると元に戻りますが、ブレーキ操作中は油圧制御を小刻みに行って、常にスリップ率を20% に保つように動作します。

以上のことから、ABS 装置が装着された車は路面との摩擦係数を最大限に維持しようとするので、ABS 不装着者の制動距離と比べて短い距離で制動することが出来、これまで述べてきた制動距離の算出式に近い値を示すと思われます。

4 おわりに

前稿は法令で規定されている基準値を曖昧に使って試算していましたが、今回は運動エネルギーからアプローチしてみました。結果的には前稿と同じで、後ろに重いポート・トレーラを引っ張っていると、急制動時には思わぬ力が牽引装置に掛かることが分かります。ヒッチ・メンバは僅か数本のボルトでフレームないしサイド・メンバに取り付けられていますから、取り付け部の強度が十分でないと、部分的な負荷により牽引自動車の損傷を招く結果となります。特にモノコック・ボデー車は部分負荷に弱いので、取付け、取扱いには十分注意したいものです。

参考文献

- [1] 下平 隆 『自動車整備関係法令と解説』(平成19年版) 社団法人 日本自動車整備振興会連合会
- [2] 吉川泰輔 『事故解析技法』株式会社 自研センター
- [3] 林 洋 『実用 自動車事故鑑定工学 [新装版]』株式会社 技術書院
- [4] 江守一郎 『新版 自動車事故工学』株式会社 技術書院
- [5] 社団法人 日本自動車整備振興会連合会
『自動車整備技術 二級ガソリン自動車 二級ジーゼル自動車 シヤシ編』
社団法人 日本自動車整備振興会連合会