

## 「衝突の瞬間、あなたの身体は ～衝突時に作用する力～」

生体機械工学科 教授 渋江唯司

### 1. はじめに

衝突するときには、大きな力が作用します。特に、大きな速度で衝突する場合、硬いものに衝突する場合には、大きな力が作用します。ですから、自動車がフルスピードで橋脚にぶつかった場合には、非常に大きな力が作用することになります。当然のことながら、自動車に乗っている人の体にも大きな力が作用しますので、交通事故で毎年多くの死傷者が発生することになります。

それでは、どのくらい大きい力が作用するのでしょうか？交通事故に巻き込まれて、やっと生き返ったという人には、そのすごさがわかるのではないかと思います。大抵の場合には、衝突のショックで覚えていないことが多いようです。でも、力の大きさが分からないと、「気をつけよう」ということにはなりません。「ちょっとそこまでだし、慣れた道だし、シートベルトするのも面倒で・・・」とか、「わざわざチャイルドシートを取りつけるのが面倒で・・・」ということにもなります。

子供さんが自動車のサンルーフ(屋根の窓)から上半身を乗り出したままで走っていることへの心配をホームページに書いている方がおられました。そのままの状態、衝突事故に巻き込まれた場合に、子供さんの体にどのような力が働き、どんな結果が起きると考えられるのでしょうか？

私たちは、自動車の衝突安全性を重要視し、少しでも安全な自動車を購入しようとしています。意外にもその使い方については無頓着であるように思います。非常に安全性の高い自動車でも、その使い方によっては、危険な凶器にもなることがあります。

そこで、この講座では、まずどのようにして衝突では大きな力が発生するのかについて考えてみます。次に、自動車での衝突を考えてみます。シートベルト、エアバッグなどを使っていない場合に、運転席、後部座席の体に作用する力の大きさについて考えて見ます。次に、シートベルト、エアバッグがどのように衝突時の力を軽減するのかについて考え、どのような役割を果たしているかについても考えてみます。更に、数値シミュレーション法を使って、衝突時の複雑な人体の挙動を再現して見ます。思いがけない人体の動きも再現され、数値シミュレーション法の面白さを知ってもらえるかもしれません。最後に、交通事故で怪我をしないための方法について改めて考えて見ましょう。万が一の場合に発生する交通事故ともうまく付き合う方法がわかるかもしれません。

## 2. 衝突のときに働く力のしくみ

力の単位は、昔はkg(キログラム)でしたが、今はN(ニュートン)を使います。昔の1kgの力は、今は1kgの質量に重力の加速度(9.8m/s<sup>2</sup>)が作用するときの力として、1kg と 9.8m/s<sup>2</sup> をかけて、9.8kg・m/s<sup>2</sup> を9.8N という単位で呼んでいます。ニュートンという名前は、りんごで有名な科学者のニュートンにちなんでつけられています。このように、力は質量に加速度をかけて求めることができます。私の体重は、75kg ですので、地球上で私の体にはたらく力(重力)は、75kg に9.8m/s<sup>2</sup>をかけて735Nということになります。

$$\text{力(N)} = \text{質量(kg)} \times \text{加速度(m/s}^2\text{)}$$



このように、質量が大きいほど、また加速度が大きいほど力は大きくなります。

地球上ではたらく加速度は、重力の加速度(地球の引力)が良く知られていますが、加速度は速度の変化の割合と考えることができるので、電車が動き出すとき、止まる時にも加速度が生じることになります。したがって、加速度の大きさを調べることによって、体にはたらく力の大きさを知ることができます。たとえば、東海道線で、電車の加速度を糸と5円玉と、分度器で計測した岡部拓也さんは、せいぜい重力の加速度の1/10程度であると述べています。電車の中で立って、支柱につかまっているときに、腕で支える力の大きさは、せいぜい体重の1/10を持ち上げるのに必要な力ということになります。



それでは、衝突の場合を考えて見ましょう。例えば秒速10mで走っている私が壁にぶつかり、衝突後1秒間で速度がゼロになるものと考えて見ましょう。このときの加速度は1秒間で速度が-10m/s変化するので-10m/s<sup>2</sup>となります。

$$\text{加速度(m/s}^2\text{)} = \text{衝突速度(m/s)} \div \text{時間(s)}$$



この場合には、私の体には水平方向に重力とほぼ同じ大きさの力が働いていることとなります。体が止まるまでの1秒間の間、私の体は速度を弱めながらも動き続け、5m動いてやっと止まることとなります。

$$\text{移動量(m)} = \text{衝突速度(m/s)} \times \text{時間(s)} \div 2$$

5mも動く壁というのは余りありませんね。では壁にぶつかって壁と体の変形を合わせて50cm動いたとします。そのときには、衝突後1/10秒で速度がゼロとなることとなります。すると、加速度は1/10秒間に速度が-10m/s変化するので-100m/s<sup>2</sup>となります。この場合には重力の10倍の力が働いていることとなります。これは私の場合、75kgの10倍ですから750kgの荷物を持ち上げる力となります。

$$\begin{aligned} \text{時間(s)} &= 2 \times \text{移動量(m)} \div \text{衝突速度(m/s)} \\ \text{加速度(m/s}^2\text{)} &= [\text{衝突速度(m/s)}]^2 \div [2 \times \text{移動量(m)}] \\ \text{力(N)} &= \text{質量(kg)} \times [\text{衝突速度(m/s)}]^2 \div [2 \times \text{移動量(m)}] \end{aligned}$$

このように、衝突時に働く力の大きさは、衝突するものの質量と、衝突速度、および衝突後停止するまでの時間の長さに関連していきます。衝突後停止するまでの時間は、衝突するものの硬さ、衝突する相手(壁)の硬さに関係してきます。硬ければ硬いほど、衝突時に作用する力の大きさが大きくなります。

これは、ふかふかの布団の山に飛び降りるのと、せんべい布団の上に飛び降りるのとで、子供がどちらに飛び降りるのが好きか？を考えればよくわかることだと思います。

以上が、衝突のときに働く力のしくみの概要です。それでは、この仕組みを自動車事故の場合に当てはめて考えて見ましょう。

### 3. 自動車事故で体に生じる力の大きさ

自動車の走行速度は道路や混雑により変わりますが、国内の公的機関として自動車の衝突安全に関する評価を行っている独立行政法人自動車事故対策機構では、正面衝突事故を再現するために、自動車を衝突する相手の自動車の変形を表すための構造に時速55kmの速度で衝突させる実験を行っています。そこで、ここでは時速55km(秒速15.3m)を衝突速度として考えることとします。

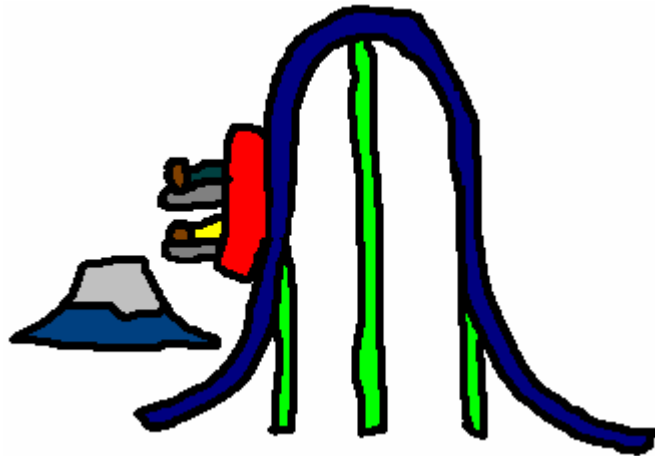
衝突のときに作用する力の大きさは、質量と加速度の掛け算で表されることをまなびました。では、実際の衝突の場合、加速度はどのようになるのでしょうか？速度がゼロになるまでの変形が大きいほど、停止するまでの時間が長くなるので、加速度は小さくなります。速度がゼロになるまでの変形を大きくするために、多くの自動車では「クラ

「ツシャブルボディ」と呼ばれるつぶれやすい車体が使われています。これは、車体の前後部を柔らかくして、衝突したときにその部分がつぶれることによって変形を大きくして、加速度を小さくしようとするものです。つぶれる部分に硬いエンジンなどが入っていると、この効果がなくなりますので、衝突時にエンジンが落下して車体をつぶれやすくするという工夫も使われています。もちろん、人が乗る部分はつぶれにくく設計されています。



そのような工夫をして車体が自転車と他車を合わせて1mもつぶれたとしましょう。すると、速度がゼロになるまでの時間は0.13秒となり、停止するまでの平均加速度は、 $117\text{m/s}^2$ 、すなわち重力の加速度の11.9倍となります。したがって、この衝突であなたの体に作用する力は、あなたを持ち上げるのに必要な力の11.9倍ということになります。

これを、最新鋭のジェットコースターに乗ったときに体に作用する力と比べてみましょう。富士山のふもとにある遊園地にドドンパという名前のジェットコースターがあります。スタート後1.8秒で時速172kmに達するという高加速性(3.2G)と、高速で垂直面を駆け上がるときの最大加速度4.25Gを売り物にしています。この加速度と比べても、衝突の場合には約2.8倍もの力が作用することになります。衝突時に体に作用する力が非常に大きいことがわかりますね。



#### 1) シートベルト、エアバッグを使用していない場合

もし、あなたが後部座席に座っており、体を支えるものが何もなかったとすると、あなたの体には0.13秒間 $117\text{m/s}^2$ の加速度が作用し、その結果あなたの体は0.13秒後には秒速15.2m(時速54.7km)の速度で投げ出されることとなります。

運転席の場合には、あなたの頭とハンドルやフロントガラスとの距離は0.5m程度と考えられます。すると0.092秒後にはあなたの頭はハンドルやフロントガラスと衝突して



しまいます。このときの衝突速度は秒速 10.8m (時速 38.7km) です。

それでは、運転席にいるあなたの頭がハンドルやフロントガラスと衝突するときに、どのくらいの力が働くのでしょうか？いま、頭の質量を体重の約 10%、7kg と仮定し、ハンドルとあなたの頭の変形が合計で 5cm あったと仮定すると、作用する力は 8,160N になります。トヨタ中央研究所

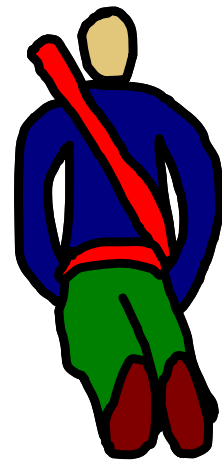
などの研究によれば、前頭骨が骨折するときの力は 5,000N から 6,000N といわれており、作用する力はこれらの値を上回るようになります。もしハンドルとあなたの頭の合計の変形量が 8.2cm になれば作用する力は 5,000N に減少することになります。このような理由で、ハンドルの表面は柔らかい素材で作られることがありますし、フロントガラスも室内からの衝撃に対して簡単に壊れるように工夫して作られています。



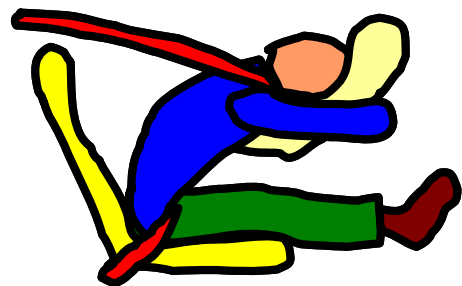
## 2) シートベルト、エアバッグの働き

しかし、実際にはシートベルト、エアバッグが作動して、あなたの体がハンドルやフロントガラスと衝突しないように護ってくれます。

シートベルトは、乗員の体をベルトによりシートに密着させることにより、体がハンドルやフロントガラスに衝突することを防止するための装置です。シートベルトは、単なるベルトではなく、衝突時にベルトを巻き上げるプリテンショナーという機能や、エアバッグが展開し始めた頃を見計らって、ベルトを緩めるフォース・リミッターという機能を持っています。プリテンショナーは、衝突の瞬間にベルト巻き上げによりベルトの初期の緩みを無くして、体が行かなくないようにするものです。フォース・リミッターは、頭がエアバッグで支持されるタイミングでベルトを緩めることにより、ベルトで拘束された体に過大な加速度がかかるのを防ぐための機能です。



エアバッグは、衝突直後に乗員とハンドルやフロントガラスなどの車体との間に風船を火薬の爆発で膨らませることにより、体が直接車体と衝突することを防止するための装置です。人体に障害をおきないようなわずかな衝撃で作動しないように、また衝突時には確実に短時間で作動するようにと、作動時の高い安定性が求められるほか、乗員が風



船との衝突や摩擦でけがをしないように、風船の圧力の調整や表面素材の選択が行われます。側面からの衝突に備えたサイドエアバッグ、ダッシュボードやフロントガラスへの衝突を防ぐカーテンエアバッグも装備・開発されつつあります。

これらの機器が作動する場合には、あなたの体に作用する力はシートベルトやエアバッグで支持されますが、衝突速度が大きく、非常に硬い壁に衝突するなどの理由で、設計値以上の力が作用する場合には、力を支え切れない場合もあります。

#### 4. 衝突時の複雑な人体の挙動の再現

これまで、簡単な計算でどのような力が作用するのかについて考えて来ました。このような計算では、人体というかたまりにはたらく力は分かりますが、頭と首の相互作用などといった詳細にわたる検討には不十分です。実際のところ、人体も自動車も非常に複雑です。そこで、複雑な構造について、その動きや作用する力を知るために、実際の人体の動きを正確に再現するための人形(ダミーモデル)と本物の自動車を使った実験が行われます。特に、独立行政法人自動車事故対策機構では、毎年多くの自動車を対象に衝突実験を行い、その結果を報告しています。ここでは、その実験のビデオと、実験で計測された人体各部に作用する力をご紹介します。

**表1 正面衝突試験の結果抜粋  
(独立行政法人 自動車事故対策機構)**

	頭部 障害値 (HIC)	頸部		
		せん断 荷重(kN)	引張 荷重(kN)	伸張モー メント(Nm)
ヴィッツ	506.4	0.65	1.73	15.72
RAV4	443.0	0.39	1.44	23.57
	胸部		下肢部	
	合成加速 (G-3m秒)	胸部変位 (mm)	大腿骨荷重(kN)	
			右脚	左脚
ヴィッツ	44.27	28.78	3.57	5.39
RAV4	47.10	27.02	3.04	3.56

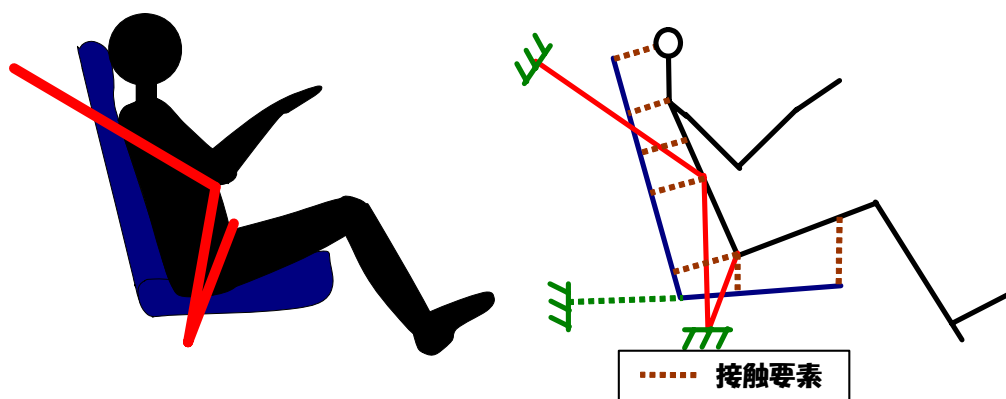
たとえば、ヴィッツであれば、時速 55km の速度で正面衝突した場合に、頭部障害値(1,000で脳震盪が発生するといわれる)が約506、頸部に作用する剪断力が650N、引張荷重が1,730N、胸部合成加速度が44.3G、胸部の変位が28.78mm、左右の大腿骨に生じる力がそれぞれ3,570N、5,390Nであることを示している。5,390Nの力が550kgの質量を持ち上げる力に相当することを考えると、体には非常に大きな力が作用していることに改めて驚くと共に、大きな力に耐えることができる人体の強さにも驚かされます。

実験を行うことで、これまでにわからなかったいろいろなことが解明されてきています。何よりも、事故を実証するのですからこれほど確かなことはありませんが、実際の実験には多くの時間と費用がかかります。これに代わる方法としてコンピュータを使った数値シミュレーション法が用いられるようになってきています。次に、簡単な数値シミュレーション法を使用して、より複雑な人体の動き、人体に作用する力について考えて見ましょう。

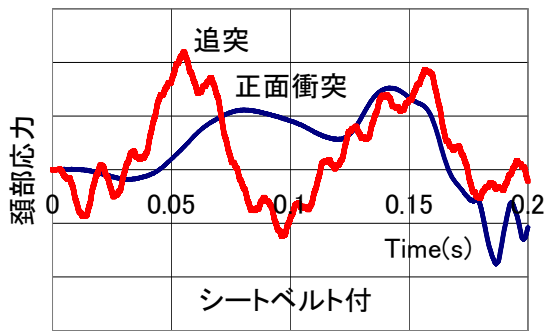
ここで使用する数値シミュレーション法は、再現する対象を“要素”に細かく分割し、それぞれの部分に、力学(流体、材料、熱、振動)の原理を利用して、全体の動きを求めする方法です。ここで使われている原理は、以下の3項目です。

- ①要素内で力と変形の間に関係が成り立っている。
- ②隣り合っている要素は、お互いにつながっている。
- ③加えられた力などのエネルギーは、何らかの形で残り、なくなる。

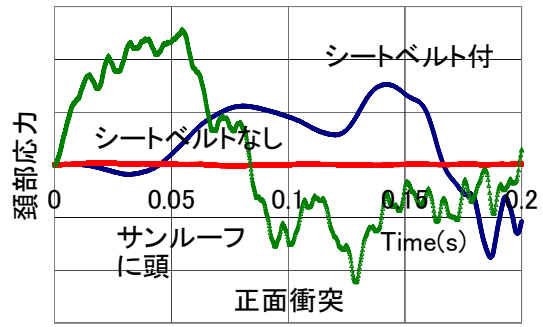
数値シミュレーション法で取り扱う対象を“モデル”といいます。それでは、座席に座っている人についてモデルを考えて見ましょう。ここでは、体、座席、シートベルトを取り扱います。それぞれの部分を“要素”で表しています。体、座席、シートベルトは、お互いにつながっています。体と座席の間は少し複雑です。普通はつながっていますが、体が座席から離れる方向に力がかかると簡単に離れてしまいます。ところが、体を座席に密着させる方向に力がかかると座席が変形し、その分だけ体は座席から力を受けます。この部分は、接触要素で現すことにします。体とシートベルトも同様ですが、シートベルトは最初は簡単に動きますが、体が大きく動くとき締め付け力が大きくなります。ここでは、もう一つ座席のお尻の部分と車体との間にばねが入っているものとしてしました。



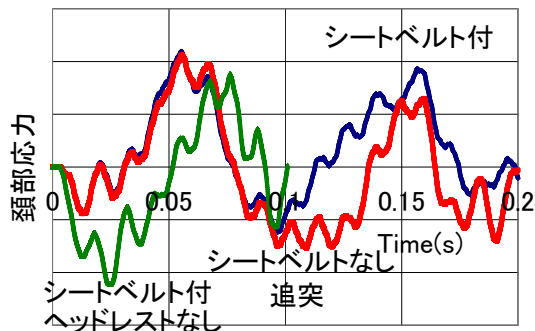
このモデルでは、いずれも秒速 5m でシートベルトをつけた状態とつけない状態で正面衝突と追突の合計4ケースのシミュレーションを行いました。この結果は、アニメーションでご紹介します。



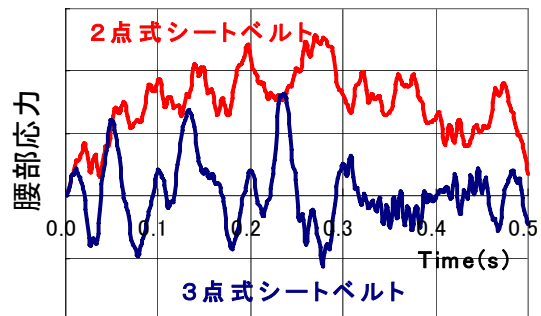
正面衝突と追突の違い



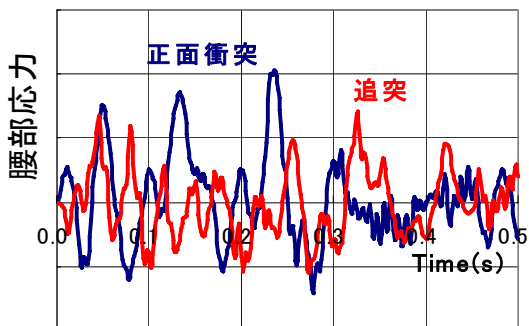
正面衝突での各条件比較



追突での各条件比較



シートベルト方式が腰に及ぼす影響



衝突方向が腰に及ぼす影響

また、今年の春に鹿児島で、高速船が鯨？に衝突して多数のけが人が出る事故が起りましたが、このときシートベルトを締めていた乗客も腰の骨を折るなどの重傷を負っていることが分かりました。そこで、シートベルトをつけている場合の腰に作用する力の大きさについても調べて見ることにしました。

この結果、以下のことが分かりました。

- 正面衝突と追突を同じ条件で比べると、追突の場合には首に大きな力が作用し、正面衝突の場合には腰に大きな力が作用する。
- 正面衝突では、3点式のシートベルトをつけていると、2点式のシートベルトをつけているときより腰に作用する力が少ない。
- シートベルトをつけないと、座席との衝突の反動などで、体が座席から大きく跳ね上げられ、フロントガラスや天井などに衝突する危険性がある。

次に、自動車の誤った使い方の例として、ヘッドレストのない状態での追突と、サン



ルーフから頭を出している状態で正面衝突について数値シミュレーションで推定しました。これについても、同様に結果をアニメーションでご紹介します。

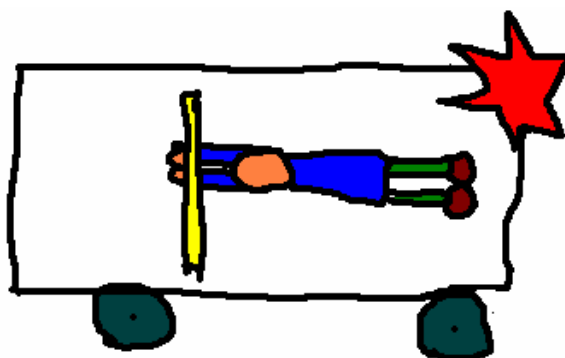
この結果、ヘッドレストがない状態では大きな変形が頸部に生じて障害の原因になる可能性があること。サンルーフから頭を出している状態では、首と自動車の屋根が激しく衝突して、大きな力が首の部分に集中して作用することが分かりました。

このように、簡単な数値シミュレーションを使うと、実際に試してみることが危険な状態について、どのような現象がおきるのかを推定することができます。

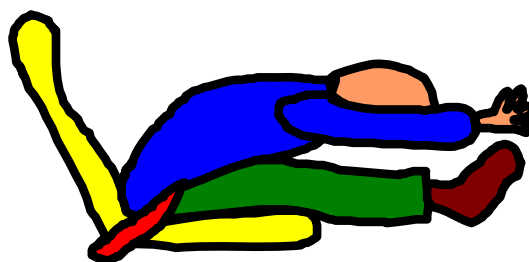
## 5. 交通事故で怪我をしないための方法

自動車に乗っていて、衝突時に体を支えてくれるのは、床、座席、つり革、ハンドル、ダッシュボード、シートベルト、エアバッグ、ヘッドレスト、チャイルドシートなどです。

バスに乗っている場合には、床に立ちつり革につかまることが多いのですが、この姿勢では腕だけで自重の10倍ほどの力を支えることになるために、多くの場合には支えきれずに転倒してしまいます。バスに乗っているときには、可能な限り座席に座って体を安定させることが重要です。



また、座席に座っていても衝突時の大きな加速度によって座席から振り飛ばされることが考えられるので、安全のためには前部座席はもちろん、後部座席でもシートベルトで体を支えることが重要です。乗用車の後部座席や高速バスには2点シートベルトが装備されていることが多いのですが、2点シートベルトは、衝突時に3点シートベルトよりも腰に大きな力がかかります。できれば3点シートベルトを装着できる座席を選んでください。



特に追突の場合に、ヘッドレストは頭部を支持してくれます。ヘッドレストがない座席に座った状態では頸部が大きく変形し、その結果障害を発生する危険性が生じると考えられます。

幼児をつれて自動車に乗る場合には、幼児を抱きかかえたまま乗車しているケースが良く見かけられますが、重力の加速度の10倍もの加速度が水平に作用する場合に、幼児の体重が6kgの場合には588Nもの力が瞬時に作用するために、幼児を抱きかかえることが困難になり、非常に危険です。面倒でもチャイルドシートを使用することで危険を免れることができます。

#### 参考文献

パッシブ・セーフティについて <http://www1.harenet.ne.jp/~noriaki/link65-2.html>

メルセデス・ベンツの安全性 [http://www.mercedesbenz-net.com/entrance/safety\\_lo.html](http://www.mercedesbenz-net.com/entrance/safety_lo.html)

10秒キャンペーン [http://www.motodoc.jp/free/f\\_mp11\\_car/free\\_mp11\\_3.html](http://www.motodoc.jp/free/f_mp11_car/free_mp11_3.html)

交通事故の力学 <http://www5.ocn.ne.jp/~matsnoge/ta.htm>

自動車事故対策機構 <http://www.nasva.go.jp/index.html>

衝突の衝撃を考える [http://www.motodoc.jp/free/f\\_mp6\\_dale/free\\_mp6\\_6.html](http://www.motodoc.jp/free/f_mp6_dale/free_mp6_6.html)

チャイルドシートの安全性テスト <http://www.nsknet.or.jp/katoh/childseat.html>

側面衝突事故とその評価方法 [http://www.nissan.co.jp/COMPASS/ISF/2nd/paper2/ref\\_B.html](http://www.nissan.co.jp/COMPASS/ISF/2nd/paper2/ref_B.html)

Real World Safety <http://www.nissan.co.jp/SAFETY/STEP2/headrest.html>

WORLD BUCHIGIRI COASTER ドドンパ <http://www.dodonpa.net/>

自動車アセスメント、交通事故対策機構、2006.3

チャイルドシートアセスメント、交通事故対策機構、2006.3

衝突時の人体に及ぼすシート剛性の影響シミュレーション、渋谷唯司、速水尚、日本機械学会年次大会講演論文集、2005