

風・地震外力を受ける走行自動車の過渡応答

齋藤年正*

Transient Response of Moving Vehicles that Receive External Force from Wind or Earthquake

Toshimasa SAITOU

Numerical simulations carried out to assess the transient response of passenger vehicles on encountering a gust of wind or a major earthquake when driven at a speed of 100 km/h. The transient response of vehicles significantly affected their steering characteristics. When vehicles with over-steering characteristics encounter a gust of wind or a major earthquake while they are being driven at a speed approximately equal to the limit velocity, their resultant responsive displacement is potentially excessive.

Keywords: Transient response, passenger vehicle, gust of wind, major earthquake, over-steering

1. 緒言

高速道路走行中に突風や地震など、普段予想もしない自然現象に遭遇する機会の可能性が、車社会の今日においてますます高まっている。風外力に対する車両の運動や操縦安定性の理論については古くから多くの研究^{(1), (2)}が行われ、ほとんど解明されていると言っても過言ではない。しかし、定量的な評価という具体的側面からみると、必ずしも十分なデータが車購入の顧客に対して、十分に提供されているとはいえない。その要因は現象が複雑であることや、具体的な実測例が少ないことに原因していると思われるが、実験的にも実車規模で行うことは甚だ困難であり、ましてや突風や地震遭遇中の車両の応答を記録することは、実行が困難な課題のように思われる。

しかし、このような状況においても、高速走行中に突風や大地震に遭遇した場合に、車両の初期過渡応答挙動を具体的数値で明らかにすることは、運転する者にとっては意味あることと思われる。横風による車両の運動は多くの報告^{(2)~(4)}がなされているが、地震動に対する報告は例を見るのが少ない。本報は車両の2自由度モデルを用いて、風ならびに地震に遭遇した場合の過渡応答について、数値シミュレーションを試みたので報告する。

2. 基礎運動方程式

車両を剛体と仮定し、平面内における進行方向に直角な並進運動ならびに重心回りの回転運動を考慮する2自由度モデルとする。車両特性を左右対称と仮定すると図2.1に示す等価な2自由度線形モデル⁽²⁾に置換することができる。このとき、地上に固定した座標系に対する運動方程式は式(2.1)、式(2.2)で表わすことができる。なお初期進行方向に対する角変位 θ は微小であると仮定する。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2(K_f + K_r)}{V} \frac{dy}{dt} + \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{V} \frac{d\theta}{dt} - 2(K_f + K_r)\theta = F \quad (2.1)$$

$$\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{V} \frac{dy}{dt} + I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{V} \frac{d\theta}{dt} - 2(l_f K_f - l_r K_r)\theta = M \quad (2.2)$$

* 機械工学科

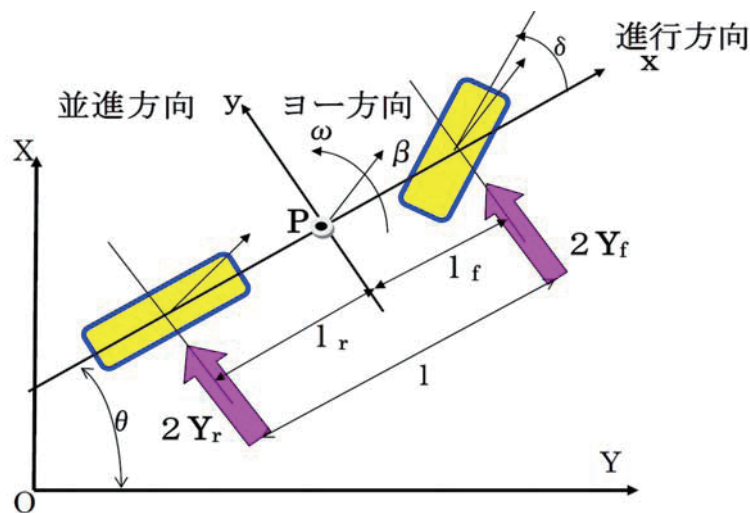


図 2.1 車両の 2 自由度モデル

ここに、

F : 横方向に作用する外力 (風力, 地震力) (N), I : ヨーイング慣性モーメント (kg.m²)

$$K_f, K_r : \text{コーナリングパワー (N/rad)}, \quad l : \text{ホイールベース} = l_f + l_r \text{ (m)}$$

l_f, l_r : 車両重心と前・後輪車軸間の距離(m) , l_N : 重心とニュートラルステアポイント間の距離(m)

l_w : 重心と空力中心間の水平距離(m), M : 重心回りモーメント外力(Nm)

m : 質量(kg), P : 重心点, t : 時間(s), V : 走行速度(m/s), Y_w : 風外力(N)

y : 進行方向に直角な変位 (cm), \ddot{y}_g : 地震動加速度 (gal), 下付添字 f : フロント, r : リア

外力は以下のように定義する.

(1) 横風外力の場合

横方向外力： $F = Y_w$ 風速，車速から求められる風外力

回転モーメント外力： $M = I_w Y_w$

(2) 地震動外力の場合

横方向外力： $F = m\ddot{y}_\sigma$ ， 回転モーメント外力： $M = 0$

風外力が作用すると、車両側面に作用する風力の空力中心位置と、車両のニュートラル・ステア・ポイントが一致しない場合には車両にヨーイングモーメントが作用する。地震による車両の慣性力については、慣性力が車両重心に作用し、地震によるヨーイングモーメントは発生しない。したがって、地震外力による過渡応答計算では式(2.2)の右辺外力項は0となる。このような考えの下で、風による横力ならびに地震動加速度による慣性力の時刻歴を与え、式(2.1)、式(2.2)を用いて過渡応答計算を行う。

数値計算の前提として、車両は決められた一定速度で直線走行し、過渡応答計算時間（数秒間）中の操舵角度は固定とし、いかなる制御も行わないとする．この前提は、突風や地震遭遇時直後の数秒間は、運転手はこのような事態に対して直ちに気付かないため、時間遅れが生じるであろうことを想定している．もちろん瞬時に気づき、ブレーキ制動や減速、操舵操作を行う運転者が存在することを否定するものではない．

3. 風外力

車両が走行中に受ける風は、気象条件による風の様子とは切り離して考えるのが妥当であろう。しかし、自然風並の変動風速を平均風速に加算して、風速の時刻歴を与えようとすると、何らかの模擬風を想定しなければならない。そこで本報は風速の詳細な議論は省き、土木、建築物の設計で使用されている模擬風の作成法を踏襲し、車両に与える風速として適用することとした。

3.1 模擬風の推定

風速の推定に際しては文献⁽⁵⁾を参考にして模擬風を作成した.

$$F = \rho \cdot C_d A U(t)^2 / 2 \quad (3.1)$$

ここに, F : 風外力, C_d : 風圧力係数 (車速, 横風, 車体形状から決定⁽⁶⁾する.)

ρ : 空気密度 $1.272 \times 10^{-7} (kg \cdot s^2 / cm^3)$, A : 車両の前面見附面積 (m^2)

$U(t)$: 風速瞬間値 (m/s) $= U_0 + u(t)$, U_0 : 平均風速, $u(t)$: 変動風速

平均風速 U_0 は基準風速 (U_{10}), 再現期間換算係数 (R), 鉛直方向分布係数 (E) より求める⁽⁵⁾.

$$U_0 = U_{10} \cdot R \cdot E \quad (3.2)$$

基準風速 U_{10} は地表面から 10m 高さの風速として与えられる. 本報では高速道路上の車両に及ぼす風速を対象にしているため, 単純に 10 (m/s) というように基準風速を仮定した. また風の再現期間換算係数並びに鉛直方向分布係数については, 設計再現期間 10 年, 海岸あるいは田園地帯における高さ 10 (m) 相当の係数を適用した. 変動風速 $u(t)$ についてはダavenportの風速変動スペクトル⁽⁷⁾を用いて算出した.

基準風速 $U_{10} = 10 (m/s)$, 走行速度 $V = 100 (km/h)$ に対する模擬風速の一例を図 3.1 に示す. なお風は座標軸 y の正の方向を風下とし, 風下に向かって吹いているとした.

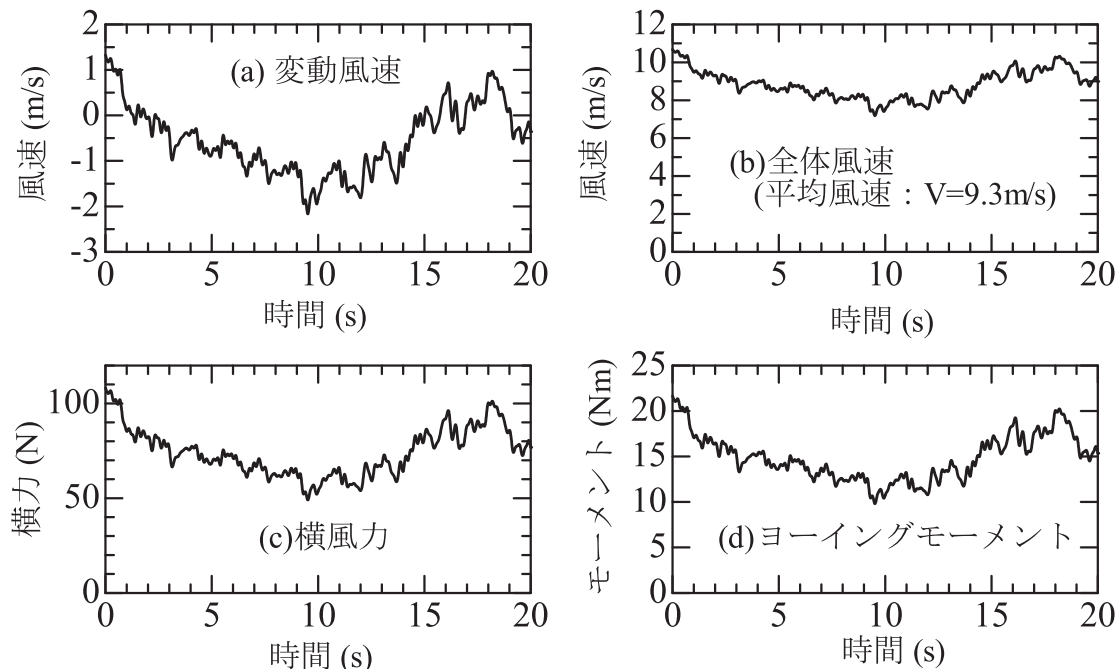


図 3.1 模擬風と模擬風荷重の計算例

3.2 空力中心, ニュートラル・ステア・ポイント, 重心の相対位置関係

風横力が作用する位置, 即ち空力中心 (AC) は車両の応答に大きな影響を及ぼす. 空力中心と重心間の水平距離 (l_w) は厳密に言えば, 車両の運動により変化する. しかし, 解析を簡単化するため, 運動継続時間中の l_w は車両の運動によって変化しないと仮定した.

車両はその諸元によりステア特性が決定される．ステア特性には US（アンダステア）特性，NS（ニュートラルステア）特性，OS（オーバステア）特性の 3 種がある．また車両はその諸元から前後輪に作用するコーナリング・フォースの合力着点（ニュートラル・ステア・ポイント：NSP）が決定される．NSP の位置は US 特性車両では重心より後方に，OS 特性車両では重心より前方に，NS 特性車両では重心位置となる．NSP は重心からの距離(l_N)で表わし，重心から後方にある場合を正，前方にある場合を負で表わす．また AC は重心位置を基準として後方にある場合を正，前方にある場合を負として表わす．なお NSP，AC の位置はホイールベースに対する比で表わし，式(3.3)，(3.4)で定義する．

$$SM = \frac{l_N}{l} \quad (\text{スタテック・マージン}) \quad (3.3)$$

$$\kappa = \frac{l_w}{l} \quad (\text{空力中心比}) \quad (3.4)$$

重心，NSP，AC それぞれ 3 者の相対的な位置関係を分類すると図 3.2，図 3.3 のように表わすことができる．図 3.2(a)の US 車両では，風によるモーメントは AC 点に関わらず，いずれの場合も反時計方向に回転することになるが，AC の作用点によりモーメントの大きさが異なる．図 3.2(b)の OS 車両では風によるモーメントは AC 点に関わらず，いずれの場合も時計方向に回転することになるが，AC の作用点によりモーメントの大きさが異なる．図 3.2(c)の NS 車両では AC の作用点により時計方向，反時計方向のモーメントが作用する場合と，モーメントが作用しない場合の 3 ケースになる．

図 3.3(a)の US 車両の場合は，AC 点が NSP より後方にある場合と，前方にある場合の 2 ケースが出現する場合である．図 3.3(b)の OS 車両の場合は，AC 点が NSP より前方にある場合と，後方にある場合の 2 ケースが出現する場合を表わしている．したがって，US，OS 特性車両でも AC 点の位置によりそれぞれ OS，US 特性的な挙動が出現することが考えられる．

一定速度で直進走行中に横風を受けると，AC の位置に対して風によるモーメントは以下に示す 3 ケースが出現する．

- (1) AC が NSP より前方にあるとき：反時計まわりの旋回モーメントが発生する
- (2) AC が NSP に一致するとき：旋回モーメントは発生しない
- (3) AC が NSP より後方にあるとき：時計回りの旋回モーメントが発生する

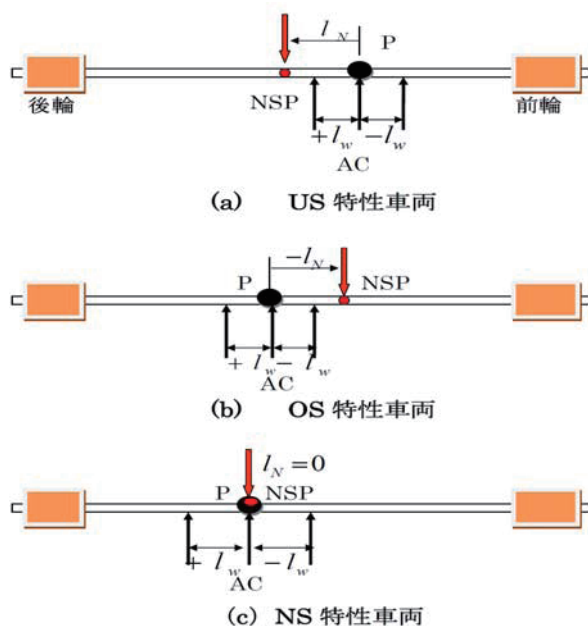


図 3.2 車両重心と NSP，AC の相対的位置関係

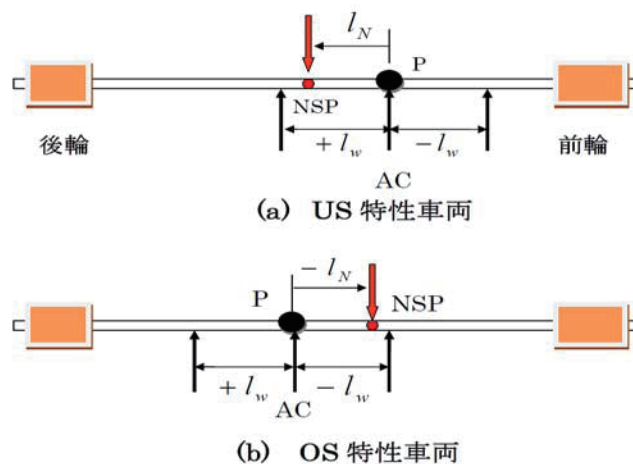


図 3.3 車両重心と NSP, AC の相対的位置関係

4. 地震外力

車両の地震応答計算に適用した地震波の概要を表 4.1 に示す. 模擬地震波は大崎の方法⁽⁸⁾により作成した. また実地震波として阪神淡路大震災(1995)で記録された JR 鷹取(NS 波)を採用した. 模擬地震波の作成では, 車両が高速道路等を直進走行中に地震に遭遇した場合を想定し, 震央距離は 10km, 地震の大きさを表わすマグニチュードは大崎の方法で採用されている 6, 7, 8 の 3 種類とした. 作成した模擬地震波の一例を図 4.1 に示す. また JR 鷹取(NS 方向)地震波形を図 4.2 に示す. 地震波の適用に際しては, これらの地震波の初期 2 秒間を車両重心への地震外力として適用した.

表 4.1 地震波の概要

	地震数値	単位	①	②	③	JR 鷹取
計算条件	マグニチュード	—	6	7	8	7.3
	震央距離	(km)	10			直下
	減衰	(%)	5			—
計算結果	加速度(最大)	(gal)	179	328	320	500
	加速度(最小)	(gal)	-142	-299	-335	-642
	速度(最大)	(kine)	5.8	22	36	
	速度(最小)	(kine)	-6.1	-18	-43	
震度階			5 強	6 弱	6 弱	7

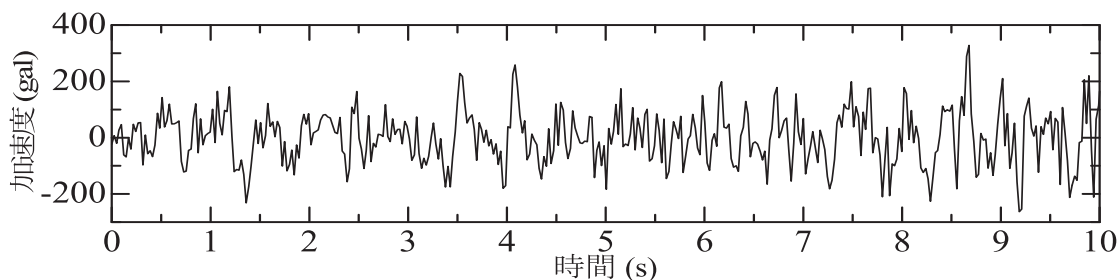


図 4.1 模擬地震動波形 (マグニチュード 7, 震央距離 10km)

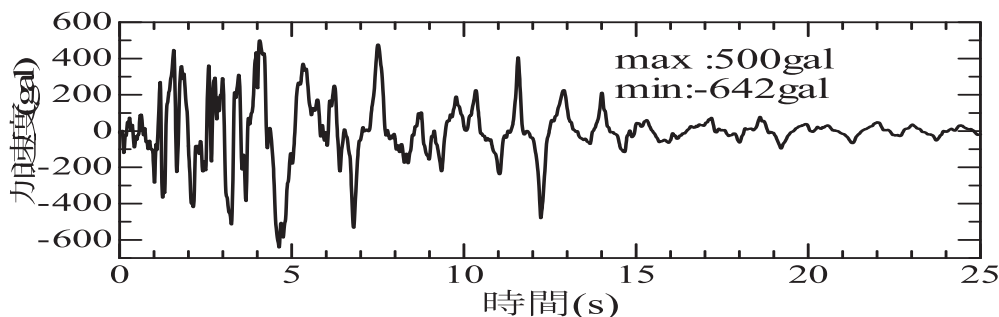


図 4.2 JR 鷹取 NS 地震動波形(1995)

なお表 4.1 に示した最大, 最小加速度は, 地震波の継続時間中に生じる最大, 最小数値を表わしており, 地震動初期の 2 秒間に発生する大きさを表わしたものではない. 図 4.1, 図 4.2 を比較すると, 模擬地震波は波形が比較的短周期が中心であり, 200gal 近辺の加速度が主体であるのに対して, JR 鷹取地震波は波形に長周期成分が存在すること, また地震動初期の 2 秒間に 400gal を超える大きな加速度が発生している様子が見られる.

5. 数値計算

高速走行中に車両が突風や地震に遭遇した場合, 直ちに異常に気がつく場合や, 数秒後に気がつく場合など様々であると推測される. 本報で試みたシミュレーションは以下を仮定して行った.

- (1) 走行中の車両速度は一定とする.
- (2) 走行中の車両舵角は 0 度に固定とし, 運転手はいかなる制御も行わない.
- (3) 応答計算時間は突風あるいは地震発生初期の数秒(2 秒)とする.

5.1 適用車両諸元

応答計算に適用した車両諸元は景山が文献⁽³⁾に示した US 特性車両諸元を基本として, 表 5.1 に示すように OS ならびに NS 特性になるように車両の各諸元を設定した. 通常の車両は弱い US 特性車両となるように設計されていると言われている⁽⁹⁾. したがって, ここに示したような車両諸元は実際には実在しない諸元と思われるが, 各ステア特性の過渡応答特性を具体的に比較するために設定した. 空力中心については具体的データや資料が見当たらないため, 仮定した数値である. なお表 5.1 に示した空力中心の条件は, 図 3.2(a)に示した条件に対応している.

表 5.1 車両諸元

諸 元	記号	単位	US ⁽³⁾	OS	NS
重 量	m	kgw	1100	1100	1100
ヨー慣性モーメント	I	kg.m ²	1600	1600	1600
前輪コーナリングパワー	K_f	kN/rad	32	45	32
後輪コーナリングパワー	K_r	kN/rad	45	32	45
前輪-重心間距離	l_f	m	1.15	1.35	1.461
後輪-重心間距離	l_r	m	1.35	1.15	1.039
ニュートラル・ステア・ポイント	l_N	cm	31	-31	0
空 力 中 心	l_w	cm	25	-25	0
スタテック・マージン	SM	-	0.124	-0.124	0
空 力 中 心 比	κ	-	0.10	-0.10	0

5.2 数値計算

車両のステア特性ごとに, 空力中心比を-0.1, 0, +0.1 と変更して数値計算を行うと図 5.1 になる. US 特性車両は図 3.2(a)の場合に相当するため, 空力中心比が-0.1, 0, +0.1 となるにしたがって, モーメ

ントが大きくなるため、応答変位もモーメントに比例して大きくなり、いずれも風下側に変位する。

NS 特性車両は図 3.2(c) の場合に相当する。したがって、 κ が -0.1 の場合には反時計まわりのモーメントが作用するため車両は風下側に応答する。 $\kappa=0$ の場合にはモーメントは作用しないが、風横力が作用するため車両は風下側に変位する。

OS 特性車両は図 3.2(b) の場合に相当する。したがって、空力中心 κ が 0 もしくは 0.1 の場合には、時計回りのモーメントが作用するため、応答初期から風上側に応答変位が生ずる。 $\kappa=-0.1$ の場合には、応答初期においては風下側に応答するが、時間の経過につれて、図 5.2 に示すように風上側に応答していく。なお、角度についても応答変位と同様な応答を示すことが図 5.1 からわかる。

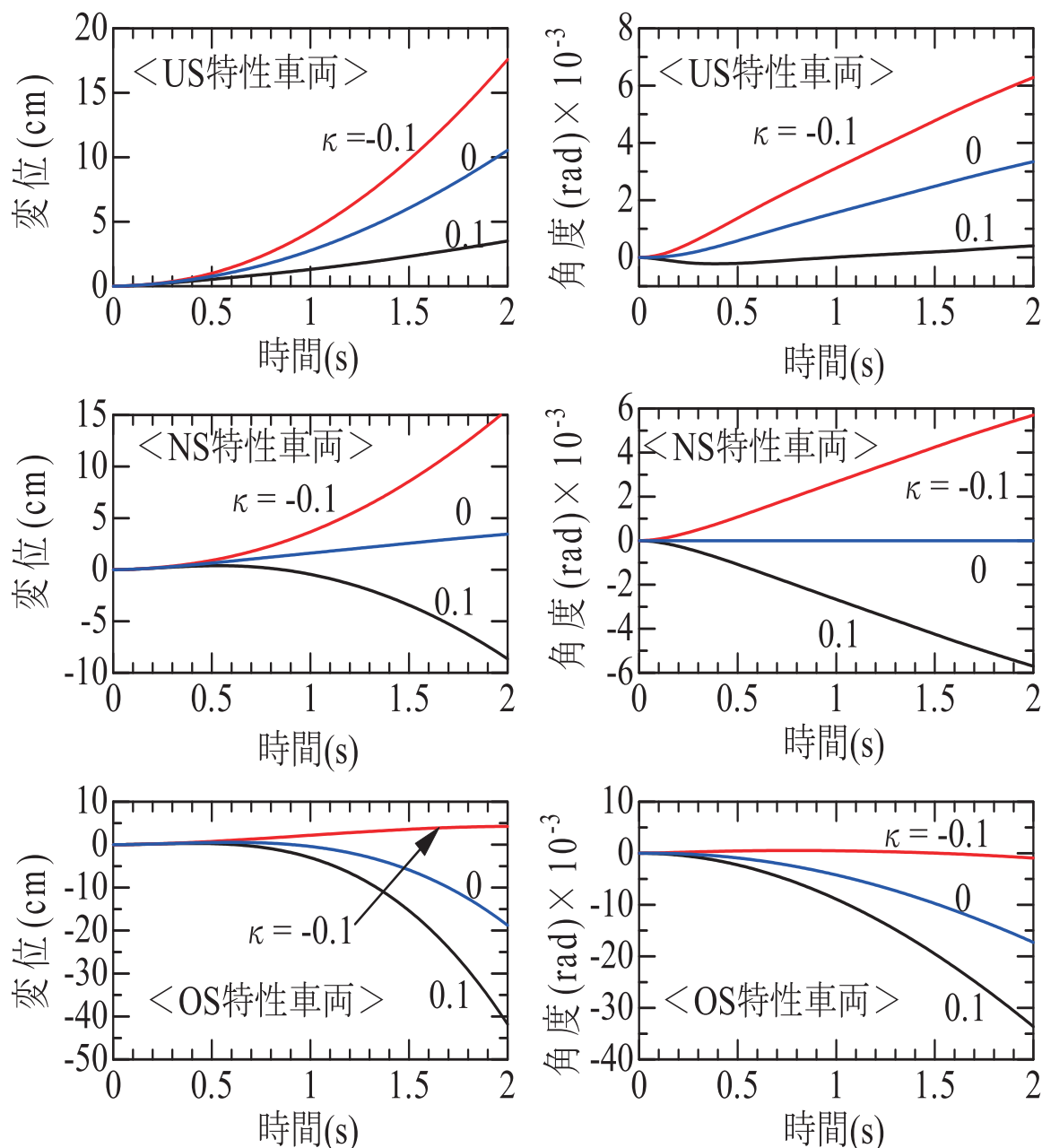


図 5.1 空力中心位置と車両の過渡応答

地震動に対する車両の応答変位並びに応答ヨー角度について、図 5.3～図 5.7 に示す。この時の車両速度は US, NS ステア特性車両については $V=100$ (km/h) であるが、OS 特性車両は限界速度が存在し、その大きさは $V_c=94$ (km/h) となる。そのため、計算に用いた車両速度は限界速度に近い $V=93$ (km/h) として計算を行った。

マグニチュードの大きさ 7、震央距離 10km の地震動に対する応答を図 5.3、図 5.4 に示す。2 秒後の

応答変位は OS, US, NS の順に大きくなっている． OS 特性車両は約 10 (cm) の横変位が発生する． US, NS 特性車両は約 3 (cm) の応答変位を示すが、この程度の応答変位に運転手が気がつくかどうかは微妙な大きさのように思われる． 図 5.5 に示すように、震央距離が 150 (km) の場合にはいずれのステア特性についても応答変位は 0.5 (cm) 以下となるため、ほとんど気がつくことはないと予想される．

しかし、JR 鷹取 NS 地震 (NS) による応答変位は図 5.6、図 5.7 に示すように、応答変位の大きさは US 特性車両で 10～20 (cm)、NS 特性車両で最大約 10 (cm)、OS 特性車両の応答変位は時間の経過につれて次第に大きくなり、2 秒後に約 50 (cm) の変位が発生すると予想される． この程度の大きさになれば、大半の運転手は気がつくのではないかと予想される． ヨー角度の大きさは比較的小さく、約 2° 以下の大きさとなる． なお、大半の車両は軽い US 特性になるように設計されているとすると、よほどの OS 特性車両でない限り、応答変位は約 10 (cm) 程度の応答変位になると考えられる．

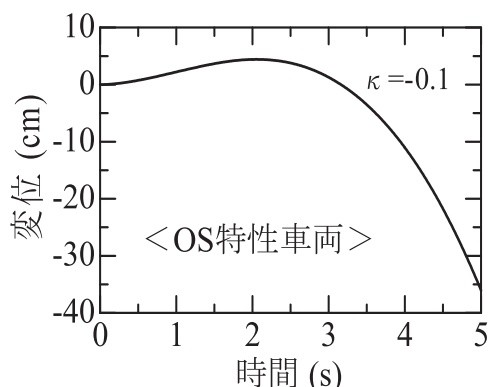


図 5.2 OS 特性車両の 5 秒間横風応答変位

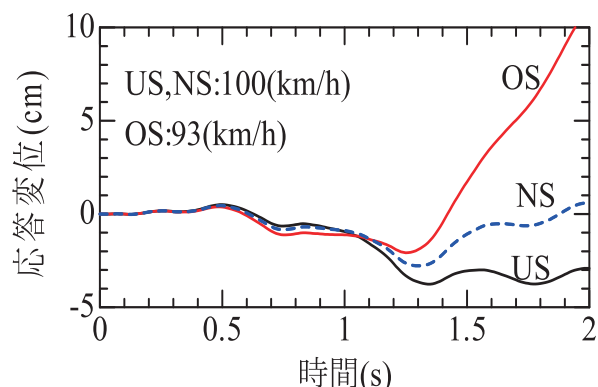


図 5.3 地震動応答変位 (M=7, R=10km)

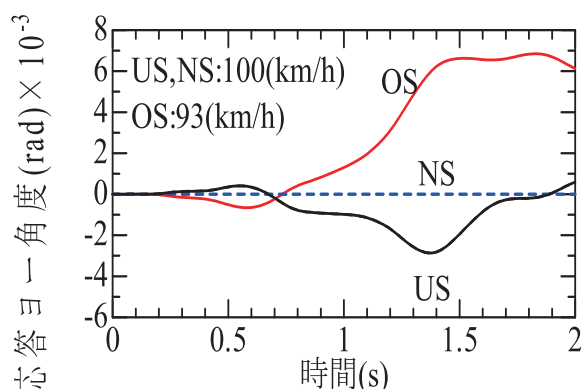


図 5.4 地震動応答ヨー角度 (M=7, R=10km)

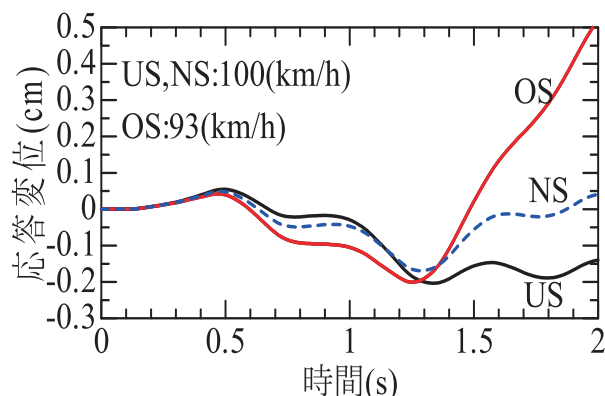


図 5.5 地震動応答変位 (M=7, R=150km)

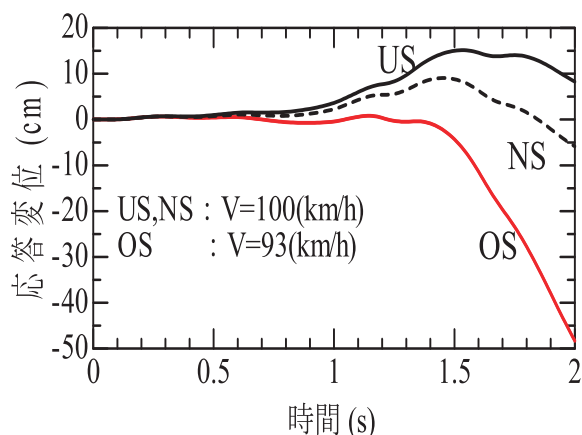


図 5.6 JR 鷹取 (NS) 地震動応答変位

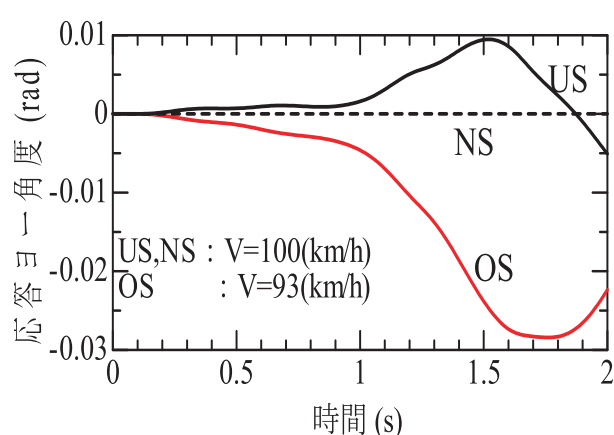


図 5.7 JR 鷹取 (NS) 地震動応答ヨー角度

6. 結言

本報では風ならびに地震による車両の過渡応答について数値計算を試みた。条件によっては2秒後に約50cmも横移動する可能性のあることを示した。地震に気づく時間が遅くなるほど、この横移動距離は大きくなることになる。

本報に示した計算例はあくまでもある一例の車両データについての試計算であるため、この結果が全ての車両に当てはまるというものではない。特にOS特性車両については限界速度の大きさにより、応答に対して異なった結果になると予想される。限界速度が通常の運転速度をはるかに超えるものであるならば、何ら問題は生じないと考えられるからである。なお、車両は常に一人の人間だけが乗車するものでもなく、定員一杯の人間が乗車したり、後部トランクに重量物を積載したりするようなことがあるため、条件によってはステア特性が変化することもあると考えられる。このような場合には、極端に大きな車速を出すことなく、大地震に遭遇しても安全となるような、ゆとりのある運転を心掛けることが望ましいと思われる。

参考文献

- (1) 井口雅一, 今泉博英, 横風を受けた自動車の運動—基礎的な解析—, 日本機械学会講演論文集, No. 182 (1967-10), p101.
- (2) 安部正人, 自動車の運動と制御, 山海堂 (2004), p105
- (3) 景山克三, 景山一郎, 自動車力学, 理工図書 (2005), p141.
- (4) 操縦性, 安定性, 空力特性小特集, 自動車技術 32-4 (1978).
- (5) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 丸善 (1983), p81.
- (6) 市村博久, 乗用車の空力特性, 自動車技術, 32-4 (1978), p290.
- (7) 日本鋼構造協会編, 構造物の耐風工学, 東京電機大学 (1997), p390.
- (8) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会 (1994), p199.
- (9) 自動車技術ハンドブック, 1 基礎・理論編, 自動車技術会, (2005), p257

(平成 23 年 3 月 31 日受理)