

IV-4 わだち路面が車の操縦性・安定性に 及ぼす影響について

函館高専 川村 彰
北大工学部 加来 照俊

1. はじめに

道路交通量の増大に伴い、重交通が道路に占める割合が増したことなどにより、路面においてわだち振れが、各所において発生し、路面の維持・修繕のみならず、その上を走行する車の運転者の乗心地に悪影響を与えるばかりか、わだちによるハンドル取られ現象に見受けられるように、車の操縦性・安定性面に関しても悪影響を及ぼすため、交通安全面からも、わだち路面が車の運動に及ぼす影響評価を行い、その対策を図ることが急務とされている。本研究は、道路交通を評価するには、人間-自動車-道路環境系というシステム全体で把握する必要があるとの認識にたち、わだちという道路環境が車の動的応答特性、ステア特性に及ぼす影響について、わだち路面における車線乗移り走行試験結果をもとに解析を行った。以下、解析に際しての、車-道路間の基本的応答特性、解析方法、結果について報告する。

2. 路面入力と車の応答との線形性について

筆者らは、従来より車の運動に作用する路面からの入力を統計的に把握することを目的として、路面凹凸パワースペクトルにより路面の定量化を行ってきた⁽¹⁾。車が通常の走行速度で、路面上の突起や段差などによる過渡な衝撃を受けず、タイヤホップやサスペンションなどの非線形要因の影響を大きく受けずに走行する時、路面の凹凸とそれによる車の応答に関しては、概ね線形であるとされている。また、車の運動のうち、操縦性・安定性に関係があると思われるのは、進行方向に対し、横向きの運動の他、ヨー角運動、ロール角運動などである。以上より、車の重心横方向振動加速度、路面凹凸パワースペクトルの2変数が、従来より路面-車振動系のモデル変数に用いられている車の重心上下方向加速度などの程度相関があるかを知るために、重回帰分析を行った。なお、解析に用いたデータは、夏期・冬期路面を測定車により実走行した時のもので⁽¹⁾、スペクトルの値は、測定車のロール角運動の固有振動数として算定した1.4Hzのものである。解析に用いた重回帰式は、次のとおりである。

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 Y ; 車の重心上下方向振動加速度のパワースペクトル (VACCPSD)

X_1 ; 車の重心左右方向振動加速度のパワースペクトル (SACCPSD)

X_2 ; 路面凹凸パワースペクトル (RPSD)

α ; 定数

β_1, β_2 ; 偏回帰係数

分析結果は、表-1、図-1に示す。表-1における2自由度でのF-値が、131.60であること、さらに、偏回帰係数に関する帰無仮説に関する検定結果から、本モデルの有意性が示され、車の重心に関する上下方向振動と左右方向振動についても相関性の高いことがわかる。このことは、不規則凹凸路面を走行する際の車の振動状態をより的確に把握するには、車の振動系の非線形性の解析の他、回振系も含めた車の横方向の運動に影響を及ぼす路面の定量化方法に関して、さらに検討する必要があることを示すものと思われる。

表-1 車の重心上下方向加速度に関する重回帰分析結果

LOCATION=THY

DEP VARIABLE: VACCPSD

SOURCE	DF	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB>F
MODEL	2	.00000679636	.00000339818	131.060	0.0001
ERROR	17	4.40783E-07	2.59284E-08		
C TOTAL	19	.00000723714			
ROOT MSE		0.000161023	R-SQUARE	0.9391	
DEP MEAN		0.0003992465	ADJ R-SQ	0.9319	
C.V.		40.33172			

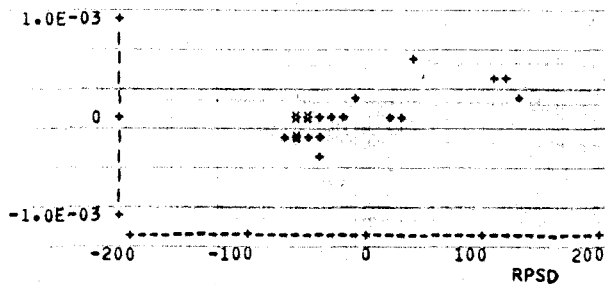
LOCATION=THY

VARIABLE	DF	PARAMETER ESTIMATE	STANDARD ERROR	T FOR H0: PARAMETER=0	PROB > T
INTERCEP	1	-0.000032496	.00005276151	-0.616	0.5461
RPSD	1	.00000238625	5.75220E-07	4.148	0.0007
SACCPSD	1	1.222482	0.081369	15.024	0.0001

LOCATION=THY

PARTIAL REGRESSION RESIDUAL PLOTS

VACCPSD



LOCATION=THY

PARTIAL REGRESSION RESIDUAL PLOTS

VACCPSD

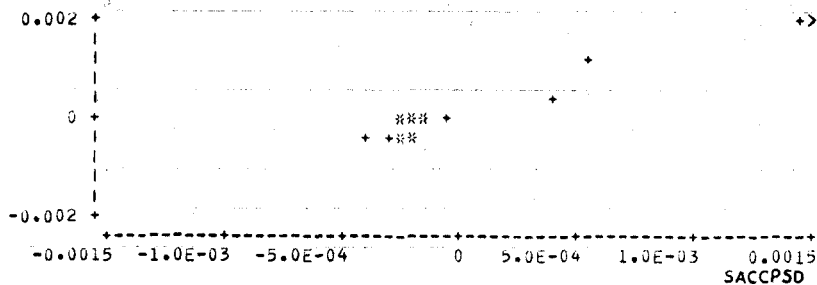


図-1 重回帰分析における偏相関関係

3. わだち路面の車線乗移り走行試験に基づく車の操縦性・安定性の評価

3-1 車の操縦周波数応答特性による評価

先の解析結果より、車の振動と路面の凹凸間には、ある程度線形関係のあることが確認されたが、わだち路面が道路の対象とされる場合には、車の路面からの応答に関して、操縦系への影響を把握する必要があるため、実車走行による操縦性・安定性試験のうち、コース追従性、ロール特性、操縦のしやすさなどを評価する際に用いられる車線乗移り試験により、わだち路面走行時の車の操縦性・安定性の評価を行った。⁽²⁾ 車線乗移り試験は、図-2で示されるコースで行い、走行速度は時速40 km、50 km、60 kmの3通り、乗移り距離Lは、15 m、30 m、50 mの3通り、乗移り幅Bは、3.1 m、わだち振れの深さは、50 mm、わだち振れの最深部間の距離Dは、1.8 mである。また、車の操縦に関する復元性の検討を行うことに、運転者自身の操縦特性の影響が関与しないように、走行はフリーコントロール状態で行った。図-3、図-4に試験結果得られた車の操縦角変化、車の重心における左右方向加速度の値の測定例を示す。図より、車の周波数応答特性に関して、かなり相関の高いことが推察される。

このことを定量的に把握するため、入出力間の周波数成分ごとの線形性の程度を表すのに用いられるコレレンスにより解析を行った。

コレレンスは、次式で定義される。

$$\text{Coh}_{XY}^2(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_X(f) \cdot G_Y(f)} \quad (2)$$

ここに、

$\text{Coh}^2(f)$; コレレンス

$G_{XY}(f)$; クロススペクトル

$G_X(f)$; 入力のパワースペクトル

$G_Y(f)$; 出力のパワースペクトル

図-5に、乗移り距離に関するコレレンスの値を示す。

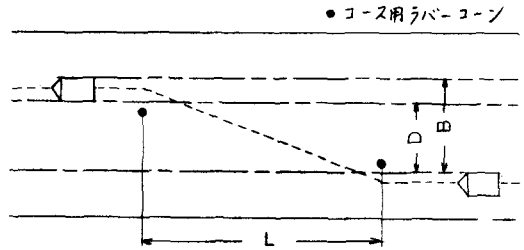


図-2 車線乗移り試験コース

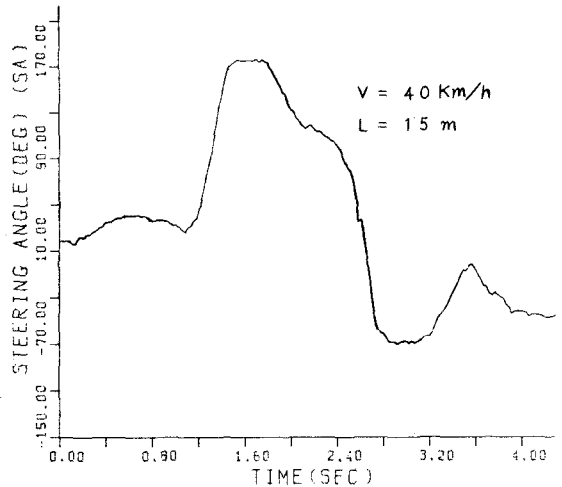


図-3 わだち路走行時の操縦角変動

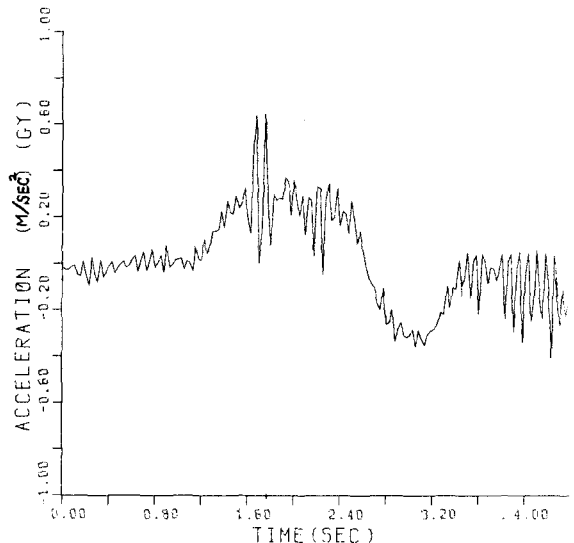


図-4 わだち路走行時の横方向加速度変化

なお、解析に用いられた操舵角と車の横方向振動加速度のデータは、低周波数域でのゲイン特性が問題であり、5 Hz以上のものは車の過渡応答特性とは直接関係のないものであると、取り除くことにした。図より、1.5 Hzまでは、いずれもコレレンスの高い値を示し、入出力間で相関のきわめて高いことがわかり、ゆたか路面による車の運動への入力か、操舵角で代表されるならば、(タイヤの実舵角がゆたか路面により生じ、ステアリング系の剛性が十分大きい時に相当する)ゆたか路面の車の操縦性・安定性に寄与する割合が、低周波数域において高いといえる。

また、同時に、操縦性・安定性に関する周波数応答特性の表現には、横方向加速度に対する操舵角のゲイン・位相によっても行われる。

ゲイン・位相に関しては、次式で定義される。

$$|G_{XY}(f)| = \sqrt{K_{XY}^2(f) + Q_{XY}^2(f)} \quad \text{----- (3)}$$

$$\Theta_{XY}(f) = \tan^{-1}\left(\frac{Q_{XY}(f)}{K_{XY}(f)}\right) \quad \text{----- (4)}$$

$|G_{XY}(f)|$; ゲイン

$\Theta_{XY}(f)$; 位相

$K_{XY}(f)$; クロススペクトルの実部
(コスペクトル)

$Q_{XY}(f)$; クロススペクトルの虚部

図-6に、ゲイン・位相図を示す。図より、レベルに関して、乗移り距離の違いにより段分差は生じているが、ゲインに関する周波数ごとの変動特性は類似している。また、位相図より、0.6 Hz以下の周波数では、入出力間の変動の時間遅れは小さいことがわかる。このことをさらに、走行速度も加味して、ゲインの特性が変化するかを示したのが、図-7、図-8である。

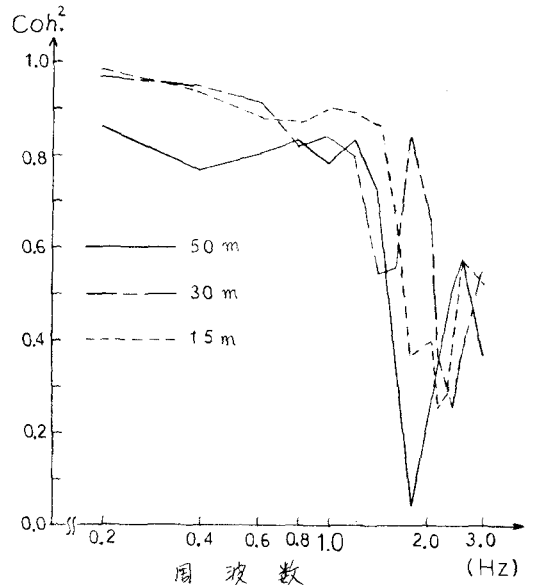


図-5 操舵角と車の横方向加速度間の相関性

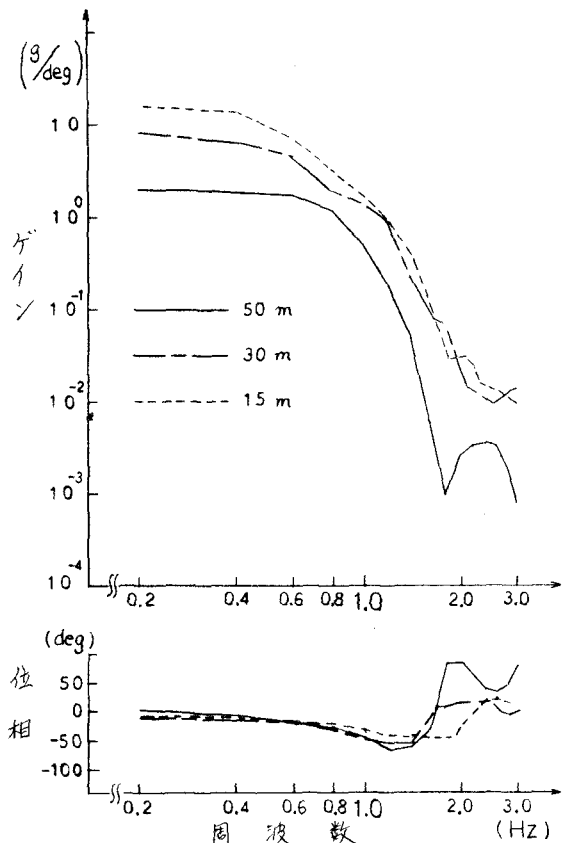


図-6 車の操舵周波数特性

図におけるゲインの値は、コレレンスの値が定常値であるときのものを採用した。(この場合、0.6 Hzを採用了。) 図では、乗移り距離に関して、乗移り距離が長くなるにつれて、ゲインの値が減少し、走行速度に関して、50 km/hのものが、高いゲインの値を示す結果となったが、乗移り距離に関しては、図-6より、0.6 Hz以下の低周波数域では、乗移り距離50 mのもののゲインが最も小さいこと、30 m、15 mでは、特に相違は見られず、走行速度別のゲインの値も、乗移り距離の値と比較するならば、著しい違いは無いと評価できよう。

3.2 スタビリティファクターによる評価

車の操縦性・安定性の特性を表現する際、自動車工学の分野では、古くから、アンダステア(US特性)、オーバステア特性(OS特性)で代表的に表現されてきた。US特性とは、車の実舵角を一定に保ったまま、速度を増すとき、一定速度で円旋回する時の旋回円の半径と同等の旋回をするには、実舵角が不足する特性であり、OS特性とは、逆に、実舵角が過剰となる特性のことである。これらの特性は、車の水平面内の運動を記述する基本的な運動方程式により示される。(3),(4)

運動方程式は、次式で表わされ、運動の自由度は、車の横方向、ヨーイングの2つである。

$$m v \frac{d\beta}{dt} + 2(K_f + K_r)\beta + \left\{ m v + \frac{2}{V}(l_f K_f - l_r K_r) \right\} r = 2K_f \delta \quad \dots (5)$$

$$2(l_f K_f - l_r K_r)\beta + I \frac{dr}{dt} + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{V} r = 2l_f K_f \delta \quad \dots (6)$$

ここで、

m ; 車の質量

K_f, K_r ; 前後輪タイヤのコーナリングパワー

l_f, l_r ; 車両重心点と前後車軸間の距離

I ; 車のヨーイング慣性モーメント

β ; 車の重心点の横すべり角

δ ; 前輪の実舵角

r ; ヨー角速度

V ; 車の走行速度

l ; ホイールベース ($l = l_f + l_r$)

上式を用いると車が定常旋回するときの条件、

$\frac{d\beta}{dt} = 0, \frac{dr}{dt} = 0$ を代入して、 β, r について解けば、定常円旋回の半径 P を一定として、

$$\delta = \left(1 - \frac{m}{2l^2} \cdot \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} v^2 \right) \frac{l}{P} \quad \dots (7)$$

が導かれる。

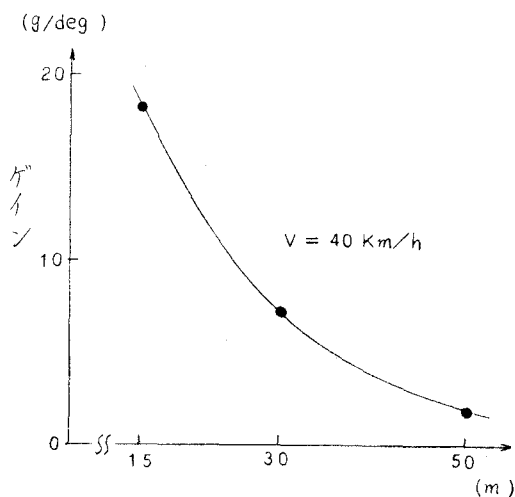


図-7 乗移り距離の違いとゲイン特性

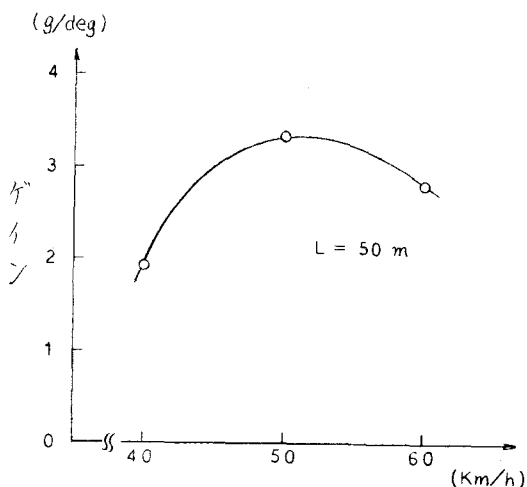


図-8 走行速度の違いとゲイン特性

したがって、OS特性、US特性が速度Vの増加に伴う δ の増減であるから、 $l_f K_f - l_r K_r$ の値の正負とOS、US特性とは同一のものである。また、OS、US特性は、スタビリティファクターによっても表わされる。スタビリティファクター(K)とは、次式で定義される。

$$K = -\frac{m}{2l^2} \cdot \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f + K_r} \quad \text{--- (8)}$$

スタビリティファクターは、車のOS、US特性の他、車のステア特性の速度による変化の大きさを示す指数ともなるうえ、ロール角運動も含めた車の旋回運動において、横加速度(A_y)に対する突航角ゲインを表わしたり、車に外乱が作用するときの車の安定性を評価する際にも用いられることから、わだち路面に於ける車の安定性を知るうえで便利な指標と思われる。なお、 A_y と δ に関して、

$$A_y = v^2/p = \delta(v^2/l)(1 + Kv^2) \quad \text{--- (9)}$$

であることがいえるため、先の走行試験における操舵角と横方向加速度のゲインの値から、オーバーオールステアリング比を2.0と仮定し、Kの計算を行った。

結果を図-9、10に示す。図より、Kの値は、乗換り距離を変化させたものと、走行速度を変化させたものとが、おおむね同じ値の範囲に示されるのかわかる。さらに、Kの値が負の時は、車の走行状態が不安定となり、車が直進中に外乱が生じたとき、その進行方向に車を戻す方向に車のヨーイングモーメントが必ずしも作用しなくなることから、このような状態を生じる時の乗換り距離、走行速度を求め、車の安定限界を知る必要があると思われる。

4. おわりに

本研究は、路面が車の運動に及ぼす影響のうち、わだち路面が車の主として操縦性、安定性に及ぼす影響を車の外乱に対する周波数応答特性、スタビリティファクターにより考察を行ったものである。路面をわだち路面に限定し、車の挙動を解析した例は、過去にあまり少なく、スタビリティファクターによる解析は、本研究が初めてかと思われる。

わだち路面が車の運動に及ぼす影響を評価する際には、さらに考慮しなくてはならない車の性能、運転者の特性、冬期路面も含めた道路状況の把握を行う必要があろうかと思われることから、関係各位からの御教唆、御批判をいただきたく思う次第である。

参考文献

- 1) 加東・川村 ; 路面の凹凸と車の運動に関する一考察、第14回日本道路会議一般編文集、1981
- 2) 加東・佐々木・藤原 ; わだち路面と車両の振動特性について、第15回日本道路会議一般編文集、1984
- 3) 安部正人 ; 車両の運動と制動、共立出版、1979
- 4) L. Segel ; Theoretical Prediction and Experimental Substantiation of the Response of the Automobile to Steering Control, Proc. I. Mech. E. (A.D.) 1956-1957

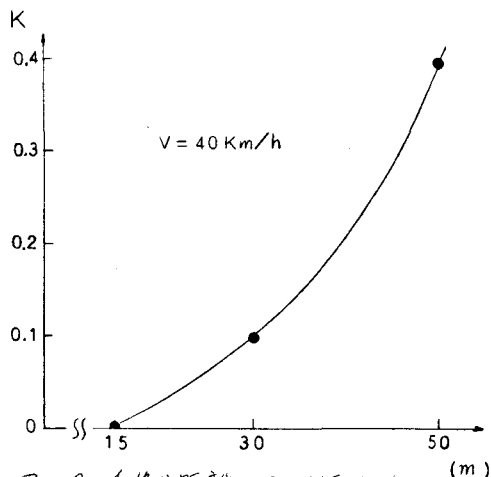


図-9 乗換り距離とスタビリティファクター

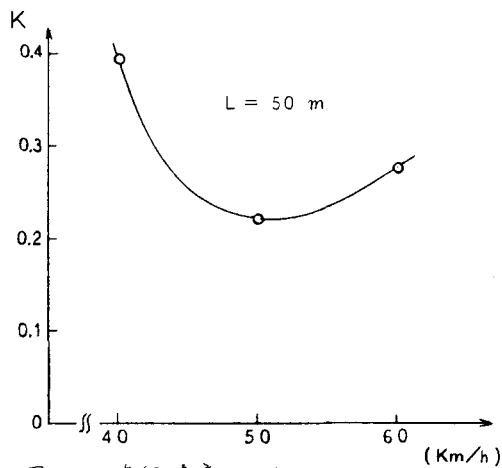


図-10 走行速度とスタビリティファクター