

IV—6 めだり部を走行する車両の運動のダイナミックシステム解析について

北大工学部 正員 萩原 亨 正員 中辻 隆
 “ “ 小野寺 雄輝 “ 藤原 隆
 函館高専 “ 川村 彰
 北大工学部 “ 加来 照俊

1. まえがき

近年の交通量の増大、とりわけ大型重量車両の増大によって、主要幹線道路の舗装面上にめだり堀れが形成され、時として車線逸脱による交通事故の原因となるなど車両の安全な走行にとって大きな阻害要因となっている。

また、北海道のような積雪寒冷地においては、冬期間の圧雪路面上に形成されるめだり堀れのみならず、スパイクタイヤの使用によってアスファルト路面上のめだり堀れが助長されている。

めだり走行時の車両の運動の解析においては、路面形状とタイヤのすべり特性、あるいは車両の各部位の運動のモデル化などに関し多くの難しい問題を念んでいる。本研究は、めだり走行時の車両の運動を力学的にモデル化する事の難しさを認識し、車両の運動を1つのシステムとして捉え、ダイナミックシステムの総計解析理論を用いて車両各部位の運動変量間の特性を明らかにしようとするものである。

最近、システムの解析および制御のために、自己回帰モデルなどの手法が用いられている。制御体、あるいは船舶の制御に関してこれまでいくつかの研究報告がなされているが、車両の運動、とりわけめだり部を走行する時の挙動に関しては研究事例はほとんどない。ここでは、最も基本的な研究の一つとして、ダイナミックシステム解析手法適用の妥当性を検討するとともに、走行試験で得られた車両各部位の運動変量間の関係について若干の考察を加えたい。

2. 多変数自己回帰モデル

$X(s)$ を解析の対象とする運動変量の n 次元ベクトル、 $u(s)$ を、誤差ベクトルとすると、次数 M の多変数自己回帰モデルは次式で与えられる。

$$X(s) = \sum_{m=1}^M A(m) X(s-m) + \varepsilon(s) \quad (1)$$

係数行列 $A(m)$ は、最小二乗推定によって決定されるが、ここでは、Levinson-Wiggins-Durbin法による漸次式解法を用いてその同定を行う。又、

クロススペクトル関数 $P(f)$ は

$$P(f) = [A(f)]^{-1} \Sigma [A(f)]^{-1} \Delta t \quad (2)$$

$$A(f) = \sum_{m=0}^M A(m) \exp[-i2\pi f m] \quad (3)$$

の式で与えられる。この $A(f)$ は周波数応答関数とされる。 Σ は誤差ベクトルの共分散であるが実際の計算にあたってはその推定値 $\hat{\Sigma}$ を用う。この非対角要素が対角要素値に比べて十分小さい時、すなわち誤差ベクトル $\varepsilon(s)$ の相異なる要素間上の無相関性が仮定出来る場合には、ある運動変量に対する各観音源の寄与の度合を次式によ、評価出来る。

$$R_{ij}(f) = \sum_{k=1}^p g_{ik}(f) / g_{ij}(f) \quad (4)$$

ここで、

$$p_{ik}(f) = \sum_{l=1}^p |A(f)_{ik}^{-1}|^2 \sigma_k^2 = \sum_{l=1}^p g_{ik}(f) g_{il}(f) \quad (5)$$

$R_{ij}(f)$ は周波数 f (Hz) 成分における $\varepsilon_i(s)$ のパワースペクトルの中に占める $\varepsilon_j(s) \sim \varepsilon_j(s)$ の誤差成分の累積の寄与率を表わしている。

また、(1)式の最適次数 M の決定は、AIC (Akaike Information Criteria) 最小標準によ、な。

3. めだり路走行試験

乾燥路面上におけるめだり路走行試験を、北大構内北13条通りにおいて実施した。当該路路上には、ほぼ小型乗用車のホイールパスに相応レレめだり堀れが形成されている。走行試験に先立って行われた横断方向の水準測量では、めだりの頂部と底部における高低差は15~20mmであった。

走行試験は、西→東向きに一定速度40km/hで約80mの区間を、両輪がめだり底部に位置して走行するようにして行われた。

測定項目と測定位置を表1に示した。

その他にも、別途ジャイロを用いて重心位置におけるヨーレート、ロール角等の測定も行なわれたが、ここでは主に表2に示した測定変量に関する解析結果について報告したい。表1の中で又方向は車両の進行方向に、又方向は鉛直方向に、又方向は、それぞれに垂直な水平横方向を意味している。

なお、走行試験は運転者による特性の変化を併せて分析するため、職業運転手では同じ名前の運転手(No.1~No.3)が同じ走行を行なった。

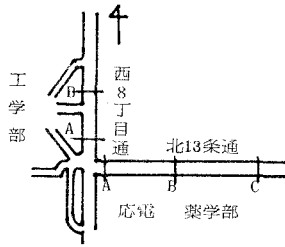


図-1 車両走行試験地

NO	測定変量	略号
1	重心 Y方向加速度	GY
2	“ Z方向 “	GZ
3	前輪左バネ下Z方向加速度	FLZ
4	“ 右 “ Y “ “	FRY
5	“ 右 “ Z “ “	FRZ
6	操舵力(ハンドル)	SPW
7	操舵角(“)	SAG

表1 測定変量

自己相関、相互相関に基づく解析にあり最も難しい問題の一つは、自己相関および相互相関関数の推定である。ここでもラゲマックに対する相互相関関数は、データのエルゴード性を仮定し、

$$\hat{C}_{ij}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{s=m}^{N-1} x_i(s) x_j(s-m) \quad (6)$$

をもってその推定値としているが、上の式に見る通り、データ数Nの取り方によって $\hat{C}_{ij}(m)$ の値が変動する。

図-2は、表1に示した7変量に関して左上隅角を $\hat{C}_{ii}(m)$ とし、右下部を $\hat{C}_{yy}(m)$ として、 $N=400, 800$ 、および1600に対する相互相関係数 $(\hat{C}_{ij}(m)/\hat{C}_{ii}(0)\hat{C}_{jj}(0))$ を同時に重ね示したものである。横軸のタイムラグは、0~0.5秒 ($m=0\sim50$) を取っている。

図が若干小さいので3本の曲線の識別が難しいが、(6,6)~(7,7)に示されている操舵力と操舵角に関する相関係数が、タイムラグが大きく対角にあり、データ数の影響が表われているが、その差は小さく他の変量に関するものも含め、定量的な特徴を示していると考えられる。

図-3には、表1に示した7変量の中から代表的な GY, FRY, および SPW の

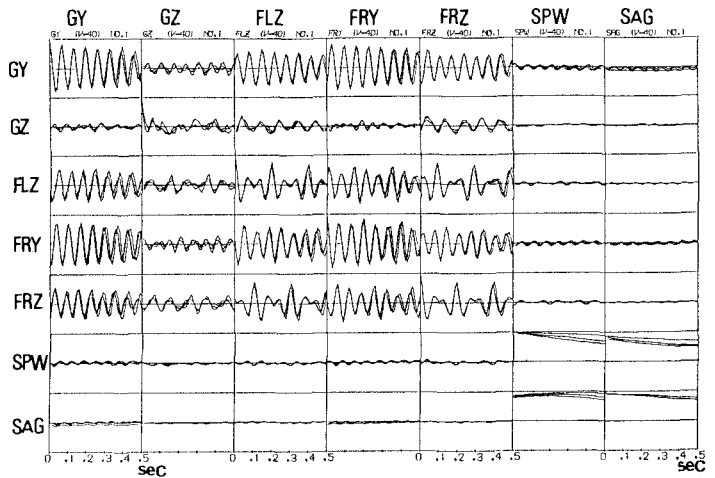


図-2 データ数Nの相互相関係数に与える影響

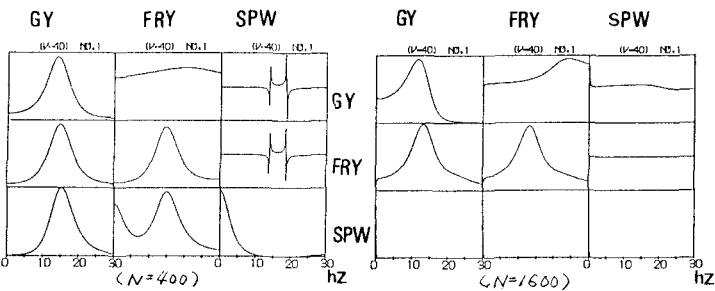


図-3 データ数Nのクロススペクトルに与える影響

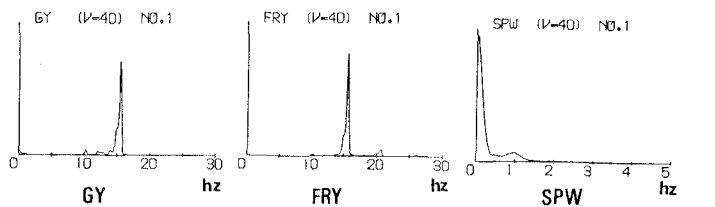


図-4 FFT法によるパワースペクトルの推定

7つの変数を選び、それらの間のクロススペクトルとコヒーレンスをマトリックス表示した。(1)がデータ数 $N=400$ に、(2)が $N=1600$ に対するものである。マトリックスの構成法は図2と同様であるが、対角を含め左下三角がクロススペクトルを、右上三角がコヒーレンスを表わしている。横軸の周波数は0〜30 Hzである。

図4は、図3の結果と比較するためFFT (Fast Fourier Transform) により求めた各変数に対するパワースペクトル(図3の対角要素に対応)である。

図3の(1)と(2)を比較すると、対角の位置にあるパワースペクトルにおいては、 N が小さい(1)ではやや分解能が悪くなっているがその差は小さい。しかしながらGYとSPW、あるいはFRYとSPWのクロススペクトルにおいては、 N が小さい時は、GYやFRYの影響を受けて10〜15 Hz成分に卓越が見られているが、 N が大きい場合には、対応する周波数成分には卓越は見られず、ほぼSPWのパワースペクトルと類似したものとなっている。これは、いずれかが誤ったスペクトルを推定しているということではなく、解析の対象とする時間幅のとり方によってスペクトルが大きく変動することを表わしている。図4、および図5に示す通りに、解析手法あるいは変数のとり方によってスペクトルの推定が大きく変化することにも十分留意する必要がある。

図5は、表1の7変数全てに関し、その全走行期間データより求めたクロススペクトルおよびコヒーレンスである。マトリックスの構成法は図3と同一である。図3の図はそれぞれNo1〜No3の運転者による走行試験結果である。

(1) および(2)の記録において、右〜左の車内各部位のパワースペクトルを見ると

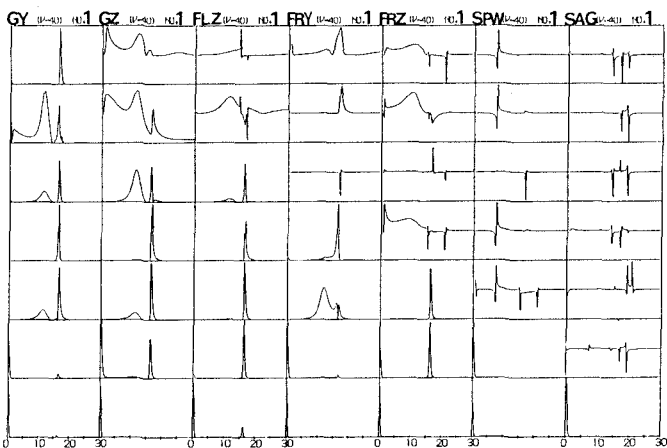


図5(1) 運転者 No1 走行試験

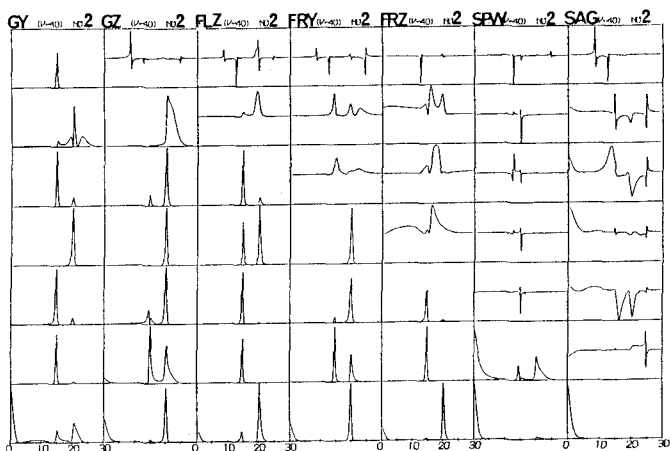


図5(2) 運転者 No2 走行試験記録のクロススペクトル、コヒーレンス

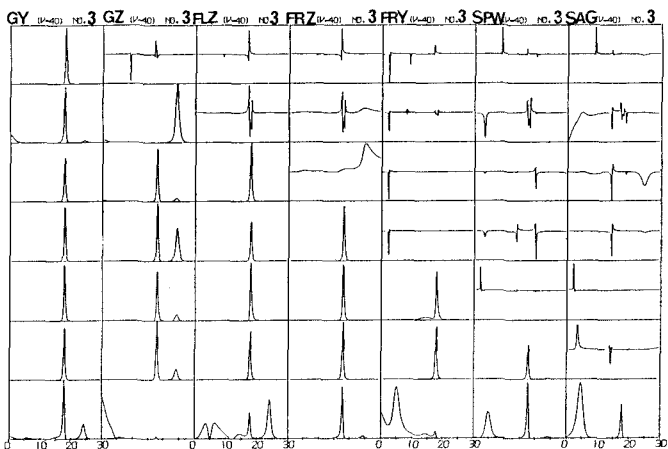


図5(3) 運転者 No3 走行試験記録のクロススペクトル、コヒーレンス

④では、約18Hz付近に、①では18Hz付近に卓越が見られ、車両全体が1つの周期運動をしている。一方、②の記録では、15Hzおよび20Hzにそれぞれ卓越性が表われている。これをもとに行われる走行試験を通して、今回試験に用いた車両(三菱ジープ)のバネ上、およびバネ下の卓越周波数がそれぞれ3Hz、18Hz付近である事が知られている。④の図において、バネ下の卓越周波数よりやや小さい周波数で卓越が現れているのは、重心GZのバネ(2,2)に見るようなバネ上部の運動による連成作用を受けた車による振動であるが、②と③のGZに現れている20~23Hz程度の周波数と④において卓越周波数が分離している事の原因はとらえては、この図からは判断しえない。

グーレンスに関しては、卓越周波数付近で正、負の相関が現れているが、それ以外の領域では一般的に相関は小さく、なっている。

表2は、N01~N03の運転者の試験データを多変数自己回帰モデル化した時の誤差の共分散の推定値である。(正規化)操舵力と操舵角の相関が高く、なっているのは予想されるが、FLZがFRYおよびFRZとやや高い相関を示している。

表2の対角要素が対角要素に比べて十分小さいと見られ、④式より多変数の周波数応答関数を図-6に、④式より誤差の累積寄与率を図-7に示した。図-6ではN01とN02の運転者の応答関数が比較的類似しているが、N02のものは異なる形状を示した。各行目変数に対するj列目変数の誤差の累積寄与率では、自身による誤差の影響が大きい事、運転者による差異が比較的小さい事、バネ下部による誤差の影響が全般的に大きいなどの特徴が見られるが、応答関数に関する特徴も併せて、それらに対する説明は今後更にデータの集積を重ね検討して行なう必要がある。

4 おとがさ 自己回帰モデルによる予測的解析を行なったが、有用な解析手法であると思われる。走行試験および解析の事例を増やし、バネ下部を走行する車両の挙動特性を明らかにして行なう。

--- EC e(s)*e(s)' ---							
N01							
1	2	3	4	5	6	7	
1	1.0000	-0.0297	-0.2059	-0.2774	-0.2458	0.1269	-0.0736
2	-0.0297	1.0000	-0.0288	-0.0420	-0.0414	0.0398	0.0613
3	-0.2059	-0.0288	1.0000	0.4827	0.5342	-0.0281	-0.0569
4	-0.2774	-0.0420	0.4827	1.0000	0.1413	-0.1677	-0.0602
5	-0.2458	-0.0414	0.5342	0.1413	1.0000	0.0558	-0.0444
6	0.1269	0.0398	-0.0281	-0.1677	0.0558	1.0000	0.1853
7	-0.0736	0.0613	-0.0569	-0.0602	-0.0444	0.1853	1.0000
--- EC e(s)*e(s)' ---							
N02							
1	2	3	4	5	6	7	
1	1.0000	0.1245	-0.0585	-0.1963	-0.2209	0.1434	-0.0715
2	0.1245	1.0000	0.0265	-0.0040	-0.1172	-0.0542	-0.1090
3	-0.0585	0.0265	1.0000	0.3653	0.4529	0.0228	-0.0435
4	-0.1963	-0.0040	0.3653	1.0000	-0.0667	-0.1441	-0.0302
5	-0.2209	-0.1172	0.4529	-0.0667	1.0000	-0.0710	-0.0232
6	0.1434	-0.0542	0.0228	-0.1441	-0.0710	1.0000	0.3708
7	-0.0715	-0.1090	-0.0435	-0.0302	-0.0232	0.3708	1.0000
--- EC e(s)*e(s)' ---							
N03							
1	2	3	4	5	6	7	
1	1.0000	-0.0516	-0.0128	-0.1476	-0.0822	0.1436	0.1778
2	-0.0516	1.0000	0.0141	0.0443	0.0255	-0.0334	0.0182
3	-0.0128	0.0141	1.0000	0.4018	0.3170	0.1478	0.0455
4	-0.1476	0.0443	0.4018	1.0000	-0.1971	-0.0697	0.0126
5	-0.0822	0.0255	0.3170	-0.1971	1.0000	0.0022	0.0321
6	0.1436	-0.0334	0.1478	-0.0697	0.0022	1.0000	0.6073
7	0.1778	0.0182	0.0455	0.0126	0.0321	0.6073	1.0000

表2 予測誤差の推定値の比較 (運転者 N01~N03)

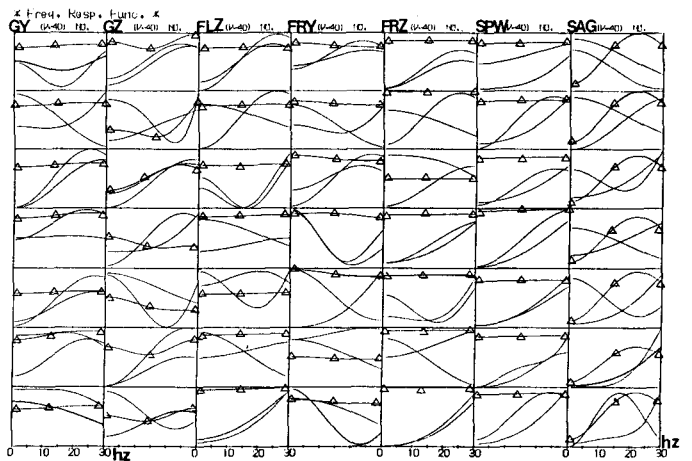


図6 周波数応答関数の比較 (運転者 N03)

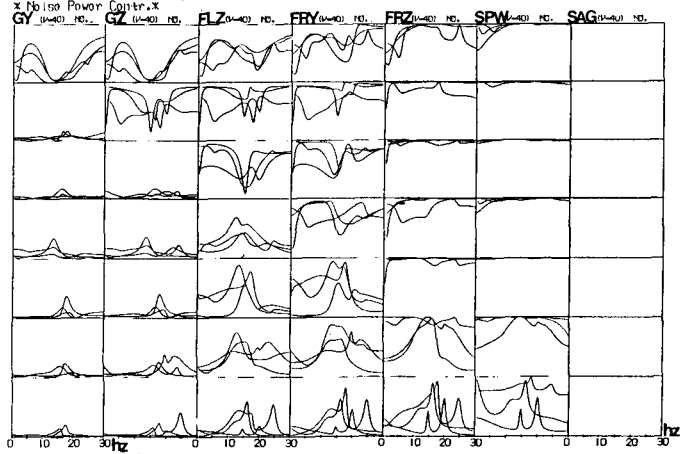


図7 誤差累積寄与率の比較