

車両挙動に基づく舗装わだち掘れの評価方法

Evaluation Method of the Pavement Rutting Based on the Vehicle Dynamics

北見工業大学大学院	○学生員	富山和也 (Kazuya Tomiyama)
北見工業大学工学部	正会員	川村 彰 (Akira Kawamura)
北見工業大学	非会員	阿里木江依明 (Alimujiang Yiming)
寒地土木研究所	正会員	石田 樹 (Tateki Ishida)
北見工業大学	学生員	中島繁則 (Shigenori Nakajima)

1. はじめに

道路構造令の改正（昭和 43 年）以来，車線主義の徹底によりわだち掘れが舗装破損の主要因となっている．近年供用中の舗装においても依然として，車両の安全性や快適性に影響を与える事から，わだち掘れが大きな問題となっている．そのため，適切な時期に適切な補修が施されなければならない，舗装の必要とされる供用性能を確保するための計画的な維持補修が必要である¹⁾．

道路利用者費用や維持管理費用といった道路管理者側の費用の総和にに関する最適化を目的とした舗装マネジメントシステム（PMS）においても舗装供用性能の評価は重要な事項として扱われている．また，供用性能には乗り心地やすべり抵抗，路面損傷等が挙げられるが，路面損傷の一つであるわだち掘れは，日本国内のみならず諸外国においても重要な評価項目となっている²⁾．

今日，路面の評価手法は，従来の仕様規定から性能規定へと変遷してきており，利用者の意識を考慮した評価基準策定への要望が高まっている．車両の動的応答に基づく平坦性評価指標である国際ラフネス指数（IRI: International Roughness Index）を用いた振動乗り心地の評価がその代表例である³⁾．

日本において現在，わだち掘れの評価はその深さにより行われているが，(a)算出基準が道路管理機関毎に異なる，(b)形状が考慮されていない，(c)利用者意識が考慮されていない等のように指標が標準化されていない問題がある．筆者らの研究では，現在の評価指標である深さが同一のわだち掘れ断面であっても，その形状が異なれば，車両に及ぼす影響が異なる事を示している⁴⁾．このように，舗装路面の評価において固有の指標を用いる事は，経済的損失を生む等 PMS の運用に際し悪影響を招く事が示唆されている²⁾．

上記の背景に基づき，本研究では，わだち掘れ路面を車両が走行する場合，左右輪への異なる路面入力外乱となり，車両の操安性に影響を及ぼす事に着目し以下の検討を行う．

- (1) 実車両による走行試験から，わだち掘れが車両挙動に与える影響について，特に車両の操安性に着目し考察する．
- (2) (1)の考察を踏まえ，わだち路を走行する車両挙動を単純な運動モデルで表現し，車両応答を考慮したわだち掘れ評価について思案する．

2. 実車試験

2.1 試験概要

走行試験は寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路のわだち路（延長 100m）にて行った．

わだち掘れは路面横断方向における平坦性であり，車両の横方向の運動，いわゆる操安性に影響を及ぼす事が知られている⁵⁾．そこで，操安性試験の代表であり ISO3888-1(1999)に規定される車線乗移り試験（Double Lane Change 試験：以下「DLC 試験」とする）を実施した⁶⁾．試験コースの概要を図-1 に，試験路の外観を図-2 に示す．また，試験路におけるわだち掘れプロファイルの一例を図-3 示す．

なお ISO で定める試験コースの延長が 125m であるのに対し，わだち路の延長が 100m であることから，乗移り区間がわだち路に入るよう設定した．また，同様の試験を平坦路面においても行った．

2.2 試験車両

試験車両は，道路パトロール車と同等の諸元を有する SUV タイプの車両（以下「試験車両」とする）を用いた．試験車両を図-4 に示す．

試験車両には，前後左右上下方向の並進加速度及び回転角運動といった車両の 6 分力特性の計測が可能な姿勢

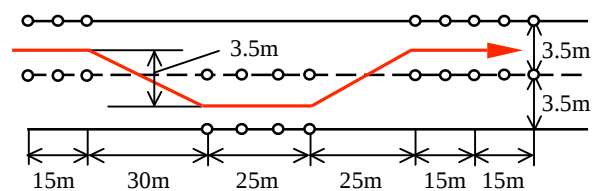


図-1 試験コース概要⁶⁾



図-2 試験路外観

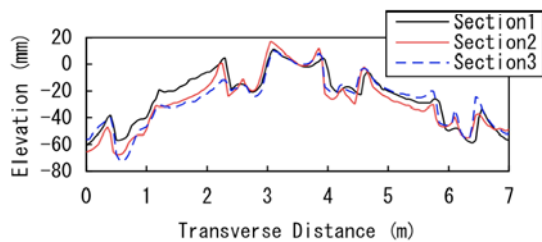


図-3 横断プロファイルの一例



図-4 試験車両

制御装置を車両バネ上重心位置付近に設置した。また操舵角及び操舵トルクの計測が可能な操舵計をステアリングホイールに設置した。

2.3 車両挙動分析

わだち掘れが車両へ与える影響について、わだち路及び平坦路における同一条件下での DLC 試験結果を比較し検討する。

(1) 解析対象

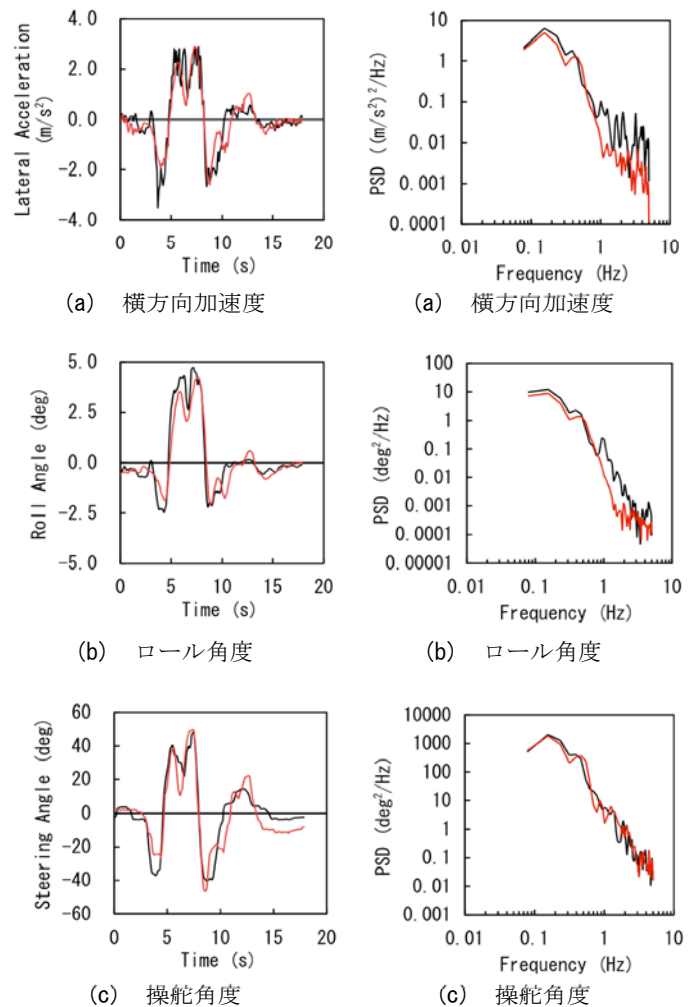
解析対象となる計測項目は、車両の操安性並びに振動特性に関係の深い、横方向加速度、ロール角度及び操舵角とした。上下方向の振動に関しては、ロール角運動において、左右輪への路面入力が同一である特殊な場合とし、解析対象から除いた。なお、試験車両の走行速度は 60km/h であり、計測項目のサンプリング周波数は最も低い操舵計に合わせ 10Hz に統一した。

(2) 波形解析

わだち路及び平坦路での DLC 試験結果を図-5 に示す。また、それぞれの周波数成分を調べるため、解析対象波形のパワースペクトル密度（以下「PSD」とする）を求めた。PSD の算出結果を図-6 に示す。

図-5 より、わだち路及び平坦路において傾向に大きな違いはないが、わだち路では平坦路に比べ振動成分の増加が見られる。これは PSD に顕著に現れており、図-6 から、およそ 0.8Hz 以下の低周波成分ではわだち路、平坦路とも同様の値であるが、高周波成分においては操舵角を除き、わだち路が平坦路に比べ増加している。また操舵角の PSD は、周波数成分によらずほぼ同様の大きさであるが、およそ 0.8Hz 以上の帯域での周波数変動が激しくなっている。

以上より横方向加速度及びロール角度において 0.8Hz 付近を境に、低周波成分は乗移り時の遠心力成分に起因し、わだち掘れの影響が高周波成分に現れているものと



(凡例:

— わだち路 — 平坦路)

図-5 DLC 試験結果

(凡例:

— わだち路 — 平坦路)

図-6 パワースペクトル密度算出結果

考えられる。また、わだち路における操舵角の大きな増加はないが、ステアリング操作の複雑さが窺える。

(3) 周波数伝達特性

DLC 試験結果のさらに詳細な分析を行うため、周波数の伝達特性を利用した方法を提案する。

まず平坦路での試験結果を入力とし、わだち路での試験結果を出力とする。ここで、DLC 試験において路面以外の条件が等しいことから、わだち掘れをある種のシステムとして考える事ができる（図-7）。入出力の PSD をそれぞれ G_{in} 、 G_{out} とすると、わだち掘れを式(1)により求められる周波数領域での伝達特性 H_a により表現することができる⁷⁾。

$$H_a = \sqrt{G_{out}/G_{in}} \quad (1)$$

図-8 に解析対象の周波数伝達特性を示す。図-8 より、図-6 に示す PSD 同様、およそ 0.8Hz 以下の帯域では各解析対象が概ね同様の傾向で推移している。このことから

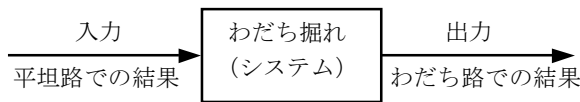


図-7 わだち掘れ伝達システム概念

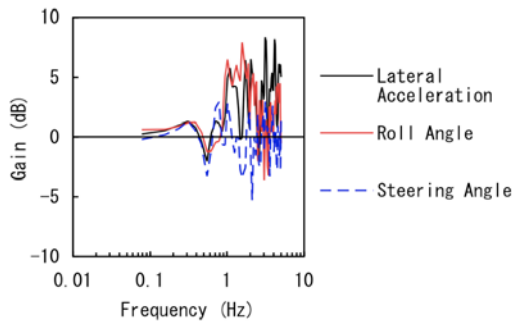


図-8 周波数伝達特性

も、0.8Hz以下の成分は、DLC試験において、路面状況に関係なく、乗移り時の遠心力成分によるものが主であるとわかる。また、横方向加速度、ロール角度ともステアリング操作と密接に関係している事がわかる。

一方、0.8Hz以上の帯域では、どの解析対象もその変動が大きくなっているが、特に横方向加速度及びロール角度の増加が著しい。しかし、操舵角においては、ステアリング操作の複雑さが窺えるものの、0dB付近を基線に変動しており、横方向加速度及びロール角度に比べその増加量は小さい。さらに、横方向加速度とロール角度がほぼ同様の傾向で推移していることから、わだち掘れによる左右輪への入力の違いが、車両のローリングとして現れ、その影響により車体が傾斜し横方向加速度が増加しているものと考えられる。

以上より、わだち掘れの評価では、左右輪での異なる路面入力による、車両のローリングを把握する事が必要であるとわかった。以上を踏まえ、次章では、わだち路を走行する車両を単純な運動モデルで表現し、車両応答に基づくわだち掘れ評価について思案する。

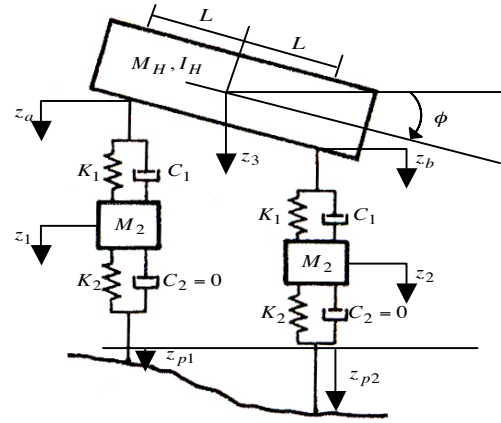
3. Half-Car モデルによるわだち掘れ評価

3.1 Half-Car モデル

わだち掘れが車両挙動に与える影響は、主に車両のローリングによるものである事を上述した。そこで、左右輪への異なる路面入力、及びそれに起因する車両のローリングを表現できる単純な車両の運動モデルを作成する。

車両の運動モデルとしては、IRIの算定に資するQuarter-Carモデルの様に比較的単純なものから、車両運動シミュレータで利用されるような複雑なものまで用途に合わせ様々な自由度を持つモデルが提案されている。本研究では、左右輪が独立し、車両のローリングを考慮できるモデルであり、比較的単純なHalf-Carモデル（以下「HCモデル」とする）とした。

HCモデルとは、4輪2軸の車両のうち、2輪1軸の前輪もしくは後輪を取り出したものであり、左右路面凹凸の違いや、車両の回転運動を考慮できる比較的単純な運動モデルである。本研究ではASTM（American


 図-9 ASTM Half-Car モデル⁸⁾

Society of Testing Material)で規格化されている独立懸架式のHCモデルを用いた⁸⁾。ASTMのHCモデルを図-9に示す。また、運動方程式は以下の通りである。

$$M_2 \ddot{z}_1 = K_2(z_{p1} - z_1) - C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_a) - K_1(z_1 - z_a) \quad (2)$$

$$M_2 \ddot{z}_2 = K_2(z_{p2} - z_2) - C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_b) - K_1(z_2 - z_b) \quad (3)$$

$$M_H \ddot{z}_3 = C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_a) + K_1(z_1 - z_a) + C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_b) + K_1(z_2 - z_b) \quad (4)$$

$$I_H \ddot{\phi} = \{C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_a) + K_1(z_1 - z_a)\}L - \{C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_b) + K_1(z_2 - z_b)\}L \quad (5)$$

ここで（[]内は使用した値），

C_1 : ダンパ減衰定数 [40 kgs/m]

I_H : 車体ロール慣性モーメント [1.29 kgs²m]

K_1 : サスペンションバネ定数 [575 kg/m]

K_2 : タイヤバネ定数 [3110 kg/m]

L : 車両重心位置-懸架装置間距離 [1.455 m]

M_H : 車体質量 [10 kgs²/m]

M_2 : バネ下質量 [1.25 kgs²/m]

z_a, z_b : バネ上変位

z_{p1}, z_{p2} : 路面変位入力

z_1, z_2 : バネ下変位

z_3 : 車体重心上下変位

ϕ : 車体ロール角

なお、ASTMのHCモデルにおいてタイヤ減衰定数 $C_2=0$ であることから、運動方程式中 C_2 及び C_2 の係る項は省略した。

3.2 Half-Car シミュレーション

HCシミュレーションの手順を以下に示す。

- (1) トレッド（懸架装置間距離：図-9中2L）は試験車両に合わせ、1.455mとする。その他の諸元はASTMモデルに準ずる。
- (2) 図-10に示すように、車速に対する乗移り方向の速度ベクトルを求め、乗移り速度とする。車速60km/hに対する乗移り速度は1.9313m/sである。
- (3) 乗移り速度をVとすると、路面変位入力を右輪に対し、2L/Vの遅れを持たせて左輪に入力させる。

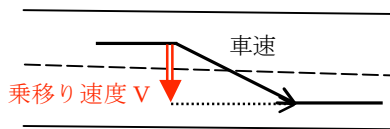


図-10 乗移り速度

3.3 実車試験との比較

試験路から得られたわだち掘れプロファイル（図-1に示す3断面）を路面変位入力とするHCシミュレーションを行い、実車試験結果との比較検討を行った。なお、前章で示したように、わだち掘れの評価には車両のローリングを把握する事が重要であることから、ロール角度に着目した。

なお、運動方程式の解法には The MathWorks 社の MATLAB/Simulink を用い、Runge-Kutta 法により計算した⁹⁾。また、出力結果のサンプリング間隔は実車試験に合わせ 10Hz とした。

(1) 波形解析

HC シミュレーションによるロール角度の計算結果を図-11に示す。図-11から、DLC試験における乗移り部分だけを取り出しているため、図-5に示す実車試験の結果のように遠心力に起因する大きな変動は見られない。これは、HCシミュレーションが車線乗移り走行時におけるわだち掘れの影響成分のみを検出しているといえる。また、入力された路面に片勾配（排水勾配）が設けられているため、基線のずれが生じている。

(2) 周波数分析

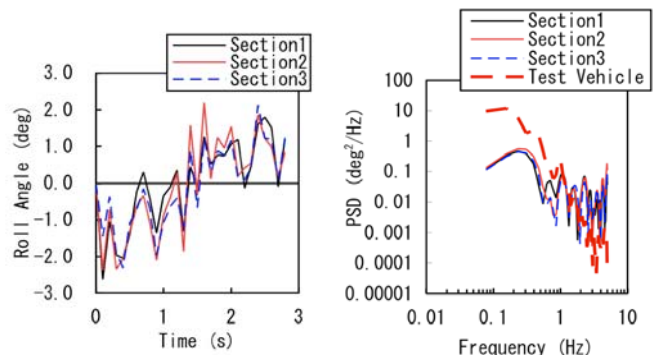
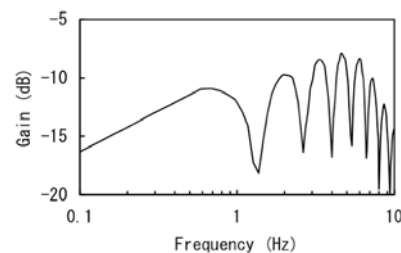
出力結果の周波数成分を調べるため PSD を算出し、実車試験から得られたロール角度の PSD と比較した。図-12に PSD の算出結果を示す。図-12より、およそ 0.8Hz 以下の低周波成分で実車に比べ HCシミュレーションの値が小さい。これは、およそ 0.8Hz 以下の成分が、車線乗移り時の遠心力を主要因とするためである。一方、0.8Hz 付近以上の成分では、2.5Hz 以上の帯域で HCシミュレーションの値がやや大きいものの、実車試験と概ね同様の傾向にある。HCモデルが比較的単純なモデルであり、懸架装置等の諸元が異なる事を考えれば妥当な結果であり、1Hz 及び 1.7Hz 付近に同様の共振が見られる事からも、HCモデルはわだち掘れの影響を良く再現しているといえる。

4. まとめ

以上より、車両挙動を考慮したわだち掘れの評価では、Hal-Car モデルを用いたシミュレーションが有効である事がわかった。結果として、図-13に示す様な周波数応答（車速 60km/h の場合、0.01 秒刻みで計算）を持つフィルタ「Half-Car フィルタ」を通過させる事に等しい。

Half-Car フィルタは $\left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{V}{2L}$ ($n=1,2,3\cdots$) (V : 乗移り

速度, $2L$: トレッド) でピークを持つ。そのため、最適な V と L を求める事が今後の課題である。

図-11 Half-Car
シミュレーション結果図-12 パワースペクトル
密度の比較図-13 Half-Car フィルタ
(車速 60km/h での乗移り走行時)

謝辞

実車試験を行うにあたり、ワーカム北海道関係各位には車両の整備に、また計測機器の取付けにご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 菊川滋, 久保和幸, 達下文一, 羽山高義, 丸山暉彦, 山之口浩: 最新アスファルト舗装技術 舗装学のすすめ・A から Z まで, 山海堂, 1995.
- 2) 笠原篤: 舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.1-12, 1993.
- 3) 例えば, 石田樹, 岳本秀人, 川村彰, 白川龍生: ドライビングシミュレータによる舗装路面の乗り心地・安心感評価, 舗装工学論文集, 第9巻, pp.49-56, 2004.
- 4) 富山和也, 川村彰, 白川龍生: わだち掘れ形状の違いが車両挙動に与える影響に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第62号, V-2, CD-ROM, 2006.
- 5) 例えば, 川村彰, 榊本友紀, 大野滋也, 佐藤正和, 鈴木一隆: 道路利用者の視点から見た高速道路の路面プロファイルについて, 舗装工学論文集, 第5巻, pp.102-111, 2000.
- 6) ISO: Passenger cars -Test track for a severe lane-change manoeuvre, Part1: Double lane-change, ISO3888-1. (1999).
- 7) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1985.
- 8) ASTM: Standard Practice for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profile of Traveled Surface, No. E1170-97, ASTM.
- 9) The MathWorks, Inc.: Using Simulink Version 6.