

# マイクロ波による路面平坦度の測定

平澤 一浩\* (CAE ソリューションズ)、 荒井 郁男 (荒井電波研究所)

Measurement of the pavement smoothness using the microwave  
Kazuhiro Hirasawa\*(CAE Solutions), Ikuo Arai, (Arai Radio Lab.)

## Abstract

After the asphalt pavement, which are required to measure the flatness of the road. Traditionally, the measure was uneven road surface is irradiated with a laser beam. Recently however, in order to prevent the heat island phenomenon has become asphalt will be used as much of a drainage hole. If the asphalt like this, if the laser beam into the hole, a problem that has emerged as not be measured.

On the other hand by using microwave, the problem described above is appropriate because the large beam width. From this point of view, we have proposed a measurement method using microwave.

キーワード : マイクロ波, 平坦度  
(microwave,smoothness)

## 1.はじめに

アスファルト舗装後の平滑性の測定については、舗装試験法便覧において、舗装路面の平滑性測定方法によりその試験方法が示されている。測定方式には、接触型と非接触型に分けることができる。前者の接触型では、測定機は、車輪で支えられた3mの直線定規の中央に測定用の車輪を設置する。この測定用の車輪を測定路面に接触させ、測定機を移動する際の測定用車輪の上下作用によって凸凹を記録紙に記録していく方法が実用化されている。しかし、この方式では、測定車輪が測定対象の路面に接触しているため、車輪の摩耗やスリップによる誤差の発生などの課題がある。これに対して、非接触方式の装置は、レーザ光を用いて測定を行う。この方式は、レーザ光源から路面を反射

して光センサに到達するまでの距離を三角法により求めている。この方式では、接触方式の課題である車輪のスリップや摩耗といった誤差の問題は解決しており、再計測の必要性が小さいため、効率的な測定方法として利用されている。

一方で、道路舗装にヒートアイランド現象の軽減のため排水性のある多穴性アスファルトが採用される場合がある。このような舗装面の場合、レーザ光のビーム幅は極めて狭いため、路面の孔が比較的大きく、照射したレーザ光の反射光が安定して受光できないという課題が生じている。また、測定結果は、ビーム幅の狭さから微小な凸凹に鋭敏に影響を受ける。そのためデータの平均化処理が重要となり高速な測定が困難になる課題もある。

このような背景から本研究では、非接触型の測定機の方式としてレーザ光ではなく、マイクロ波を用いることで多穴性のアスファルトに対するレーザ光の問題点を解決することを目的とした測定装置を作成し実験を行った。

## 2.マイクロ波による平滑性測定の原理

本方式は、24GHz帯の電波を伝搬させることにより所定距離に対して微小な相対変化する対象距離の変化を相対的に測定する。この距離の測定は次のような原理で行われる。

測定装置の回路構成は、図1に示すようにFM-CW方式である。

送信信号  $e_t$  を

$$e_t = \cos \omega t \quad (1)$$

とすると受信信号  $e_r$  は

$$e_r = a \cdot \cos \omega(t - \tau) \quad (2)$$

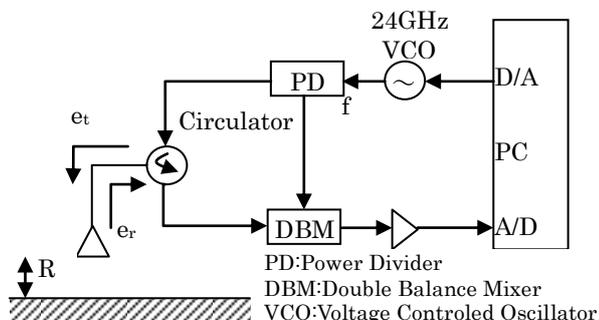


図 1. 測定装置の回路構成

Fig 1 Circuit diagram of measuring equipment

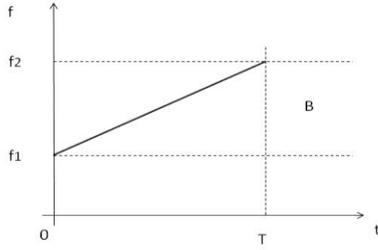


図 2. 周波数の変化

Fig 2 Frequency changes versus time

である。ここで、 $\tau$  はアンテナと路面間距離  $R$  の往復伝搬時間であり、光速を  $c$  と表わすと次式で求められる。

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (3)$$

よって、DBM の出力  $E_0$  は、次式のようになる。

$$E_0 = \text{LPF}[e_t \times e_r] = \frac{a}{2} \cos \omega \tau \quad (4)$$

$\omega = 2\pi f$ ;  $f$ : 周波数であり、 $f$  は図 2 のように  $f_1$  から  $f_2$  の間を直線状に変化するので

$$f = \frac{B}{T}t + f_1 \quad (0 \leq t \leq T) \quad (5)$$

$B$  は周波数掃引幅、 $T$  は掃引時間幅、 $f_2 = f_1 + B$  である。よって

$$E_0 = \frac{a}{2} \cos\left(\frac{2\pi B \tau}{T}t + 2\pi f_1 \tau\right) \quad (6)$$

出力  $E_0$  は周波数  $f_b = \frac{B\tau}{T}$  で変化し、初期位相  $\theta_0$  は  $2\pi f_1 \tau$  である。式(6)の周波数  $f_b$  から路面まで距離が次式より計測できる。

$$f_b = \frac{B\tau}{T} = \frac{2BR}{Tc} \quad (7)$$

$$R = \frac{Tc}{2B} f_b \quad (8)$$

距離  $R$  の変位量は式(8)の  $R$  の変化から読み取れるが、帯域幅  $B$  が制限されており大きな値はとれないので十分な分解能が得られない。一方、路面平坦度の分解能は  $\pm 1\text{mm}$  以下が求められるので、位相変化から計測することとする。初期位相  $\theta_0$  は、

$$\theta_0 = 2\pi f_1 \tau = 2\pi \frac{c}{\lambda_1} \cdot \frac{2R}{c} = 2\beta_1 R \quad (\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}) \quad (9)$$

式(9)は距離  $R$  が  $\frac{\lambda_1}{2}$  変化すると  $2\pi$  変化することを表わしている。例えば、 $f_1 = 24\text{GHz}$  のとき  $\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = 12.5\text{mm}$  であるから

距離  $R$  が約  $6\text{mm}$  変化すれば  $2\pi$  すなわち  $360^\circ$  変化することになり、十分に検出感度を高めることができる。

なお、式(6)を FFT すればピークを与える周波数 ( $f_b$ ) から距離  $R$  が求まり、 $f_b$  における位相 (=  $\theta_0$ ) の変化  $\Delta\theta_0$  から

$$\Delta\theta_n = \theta_0(n) - \theta_0(n-1) \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

を用いて距離  $R_n$  の微小変化が計測できる。

$$R(n) = R(n-1) + \frac{1}{2\beta_1} (\theta_n(n) - \theta_0(n-1)) \quad (11)$$

このような原理に基づく本方式の特徴は、ビーム幅がレーザ光にくらべ適度に広いのでアスファルト舗装の孔や微小な凸凹の影響を受けにくくなり、取得した波形データから平均的な距離を算出する処理が簡略化できることである。そのため、実用化の際に高速な測定を行うことが可能となる。

### 3.原理の確認

本節では、波形を擬似的に発生させ、得られた波形に対して、前節の原理に基づき、距離の測定および目的の分解能が得られるかどうかの確認を行った。

#### Case 1:

まず、ビート信号として1周期分の波形を発生させ、1mのときの反射波の解析を試みた。

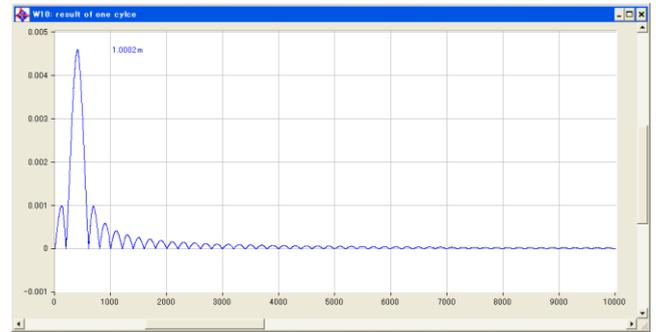


図 3. 1周期分のビート信号のスペクトル

Fig 3 One cycle of the beat signal spectrum

図 3 の縦軸は、振幅を表わし、横軸は周波数である。図 3 のピーク値から算出される距離は、1.0002m である。距離を正確に抽出できることがわかる。

#### Case2:

実用の装置の場合、電波法により 24GHz 帯では1周期分の周波数掃引をすることはできない。電波法で可能な掃引幅は、ほぼ半周期分である。この条件で Case1 と同様に解析を試みた。

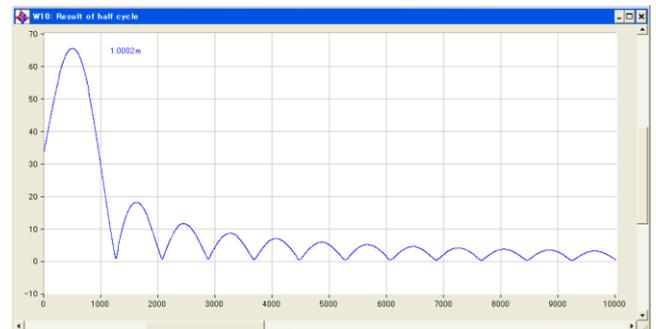


図 4. 半周期分のビート信号のスペクトル

Fig 4 half cycle of the beat signal spectrum

図 4 の縦軸は、振幅を表わし、横軸は周波数である。図 4 のピーク値から算出される距離は、1.0002m である。1周期分がなくても十分に距離を正しく抽出できることが分かる。

### Case3:

半周期分のとき距離が求められるかどうかを確認する。対象物の位置を1mから1mm単位で10cmまでとした場合の解析を試みた。



図 5. 半周期分のビート信号における距離の算出結果  
Fig 5 Distance calculation results in a half cycle of the beat signal (Distance R=1.0-1.1m)

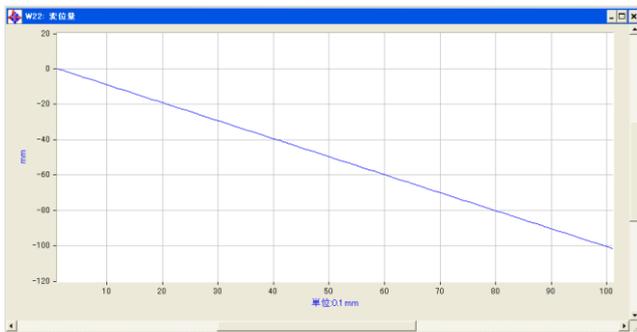


図 6. 半周期分のビート信号から算出した変位量  
Fig 6 Calculated displacement of the distance from the beat half cycle signal (Distance R=1.0-1.1m)

図 5, 図 6 の横軸は, 測定回数を表わし, このケースでは, 1.0m から 0.1 mm 刻みで対象物を変化させた結果である。図 5 の縦軸は, 検出距離(m)を表わし, 図 6 の縦軸は, 検出した距離の変位量(mm)を表わしている。本方式は, 図 5 では, 必ずしも 1mm の分解能はないが, 位相から求めた図 6 では, 1mm 単位の分解能を有している。

### Case4:

本方式は, 変位を検出しているのので, 対象物の位置が大きく変動した際には, 検出結果にも乱れが生じる。ここでは, 大きく変動した際の検出結果の解析を試みた。

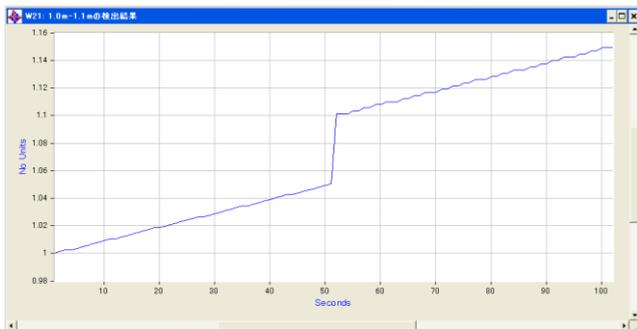


図 7. 1.050m 近辺で 5cm の段差がある場合の距離算出結果

Fig 7 Calculation results of a step of 5cm around 1.05m

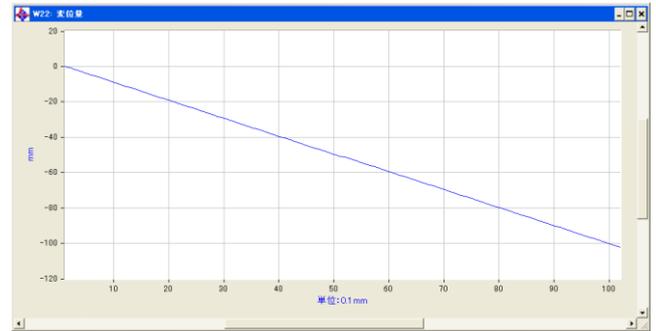


図 8. 変位量の変化

Fig 8 Variation of displacement

図 7, 図 8 の縦軸は, 図 5, 図 6 と同じである。横軸も測定回数を表わしているが, 50 回目で対象物の位置に 5cm の段差があるものとして計測している。

図 7 のグラフの中央部で, 測定距離が大きく (5cm) 変動している。一方, 図 8 の変位量では, 大きな変化がみられない。これは, 変位計測では,  $\lambda/2$  すなわち約 6mm の ambiguity があるため, 6mm 以上の変動は示さないためである。このような結果より, 本方式では, 大きな変動は絶対距離で算出し, 細かな変動は変位量で測定することで, 精度よい測定を行うことが可能であることが示された。

## 4.測定装置

測定装置の外観は図 9 のようになっている。装置は, マイクロ波の送受信を行うアンテナ部と受信信号から距離算出, 変位量を求める PC 部からなっている。



図 9. 装置外観

Fig 9 Appearance measurement system

## 5.おわりに

非接触型の測定方法で用いられているレーザー光による測定で課題となる多孔性のアスファルトの測定精度を向上するために, マイクロ波による測定方法を提案した。提案する測定方法で十分な距離測定および 1mm の変位量の測定が可能であることを示した。提案する方式では, フーリエ変換時に I 信号のみではなく, Q 信号も用いることで精度を高めることに成功した。処理方法の今後の課題は, Q 信号を得られない場合の処理方法の検討である。また, 開発した装置を用いて, 波形に含まれるノイズ対応などの実運用上の問題点の解決がある。

## 文 献

- (1)“舗装調査・試験法便覧”,社団法人日本道路協会,2007/07
- (2)荒井, 鈴木:“マイクロ波生体変位計の一方式”,信学会論文誌, pp.513-520,84/6,Vol.J67-C,No.6.