

4. 検討項目の測定結果

4.1 ばらつきの検討

測定結果のばらつきの検討は、晴れまたは曇りの屋外で、算術平均粗さ $R_a=0.05, 0.50, 0.72\text{mm}$ の3つの面を対象に行った。それぞれの対象面で、超音波測定器を超音波トランスデューサーがコンクリート面から1,000mmと550mmの計測距離となるように設置し、1箇所当たり125個の最大振幅を得た。この測定結果を算術平均した個数と平均値のばらつきの関係を検討した。

125個の測定結果に対して、1個から25個の移動平均を計算し、各々の平均した個数につき100サンプルの移動平均値を得た。各々の平均した個数について100サンプルの移動平均値の平均値(mV)と100サンプルの移動平均値に対する標準偏差(mV)を計算した。Fig. 5に平均した個数と100サンプルの移動平均値の平均値に対する100サンプルの移動平均値に対する標準偏差の割合を示した。

Fig. 5より、100サンプルの移動平均値に対する標準偏差の割合は、計測した対象コンクリート面の算術平均粗さによって収束する粗さが異なるものの、算術平均粗さが粗くなるほど大きくなるといった傾向は見られなかった。そして、同じ算術平均粗さの面では、測定距離が遠い方が、ばらつきが若干高くなる傾向が見られた。

しかし、測定結果は1箇所の測定につき1つの測定結果でも100サンプルの測定結果の平均値の4%程度の標準偏差以内に収まることが明らかとなった。また、1箇所の測定につき10個以上の測定結果の平均をとれば、その値は100サンプルの移動平均値の平均値の1%以下の標準偏差に抑えることができることが分かった。このため、本研究では以下の測定結果は10回の測定結果の平均値で議論した。本研究で使用した超音波測定器の発信間隔は0.025sであり、1秒間に40回の測定が可能である。測定結果を1%程度の標準偏差に抑えるために10回の平均値が必要とすると、0.25s程度の測定時間となることが分かった。

4.2 距離の検討

距離の検討は、晴れまたは曇りの屋外で、Table 2に示す算術平均粗さ $R_a=0.05\text{mm}$ から 0.79mm までの8つの面すべてを対象として行った。本実験に用いた超音波トランスデューサーの発信トランスデューサーと受信トランスデューサーの間隔は25.0mmである。実験においてはこの影響が小さくなるように空中超音波測定器とコンクリート面との測定距離が400mm以上となるように設定した。測定距離は550mmをコンクリート面から最も近い測定距離とし、1,000mmと1,500mmで計測した。

測定した最大振幅は、4.1節より測定値のばらつきが1%程度となるように、それぞれの距離で10回の測定値の平均をその測定距離の最大振幅とした。

算術平均粗さと最大振幅の関係を図6に示す。Fig. 6より、測定距離550mm、1,000mm、1,500mmの測定結果において、算術平均粗さが増加するにつれて、最大振幅が

Table 2 検討項目と対象面の算術平均粗さ
Arithmetical mean roughness and examination items

R_a (mm)	R_q (mm)	①ばらつき	②距離
0.05	0.06	○	○
0.07	0.09		○
0.15	0.18		○
0.21	0.24		○
0.26	0.32		○
0.50	0.63	○	○
0.72	0.83	○	○
0.79	0.96		○

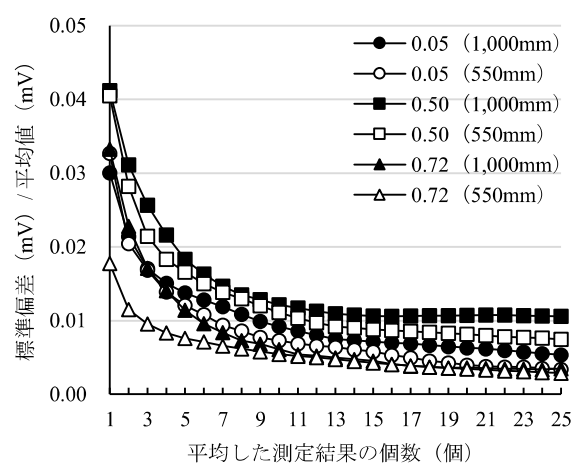


Fig. 5 測定値の移動平均のばらつき
The standard deviations of moving average of measured values

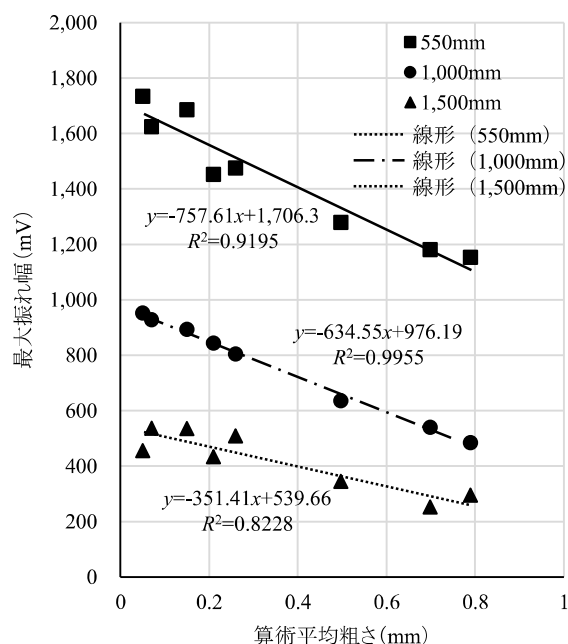


Fig. 6 最大振幅と算術平均粗さの関係
The relationship between peak to peak value and arithmetical mean roughness

減少することが確認できた。また、その最大振幅と算術平均粗さの関係は、線形近似で R^2 値 0.8 以上の高い相関を持つことが確認できた。この近似直線の傾きは測定距離が遠くなるにつれて小さくなった。

4.3 測定領域の検討

本研究で使用したトランスデューサーの 6 dB 減衰指向角は 50 度である。6 dB 減衰指向角は中心音圧が半減する角度であり、対象面から 1,000mm 離れた超音波トランスデューサーの場合、対象面においてトランスデューサー直下から直径約 933mm の領域となる。しかし、指向角はコンクリート粗さ測定における測定領域を表しているものではない。そこで、本研究では Fig. 7 に示すように測定領域についてトランスデューサー直下のコンクリート面上に砂利を同心円状に設置し、その領域を拡大させることで検討した。

使用した砂利は粒径 9.5~19mm, 粒径 2~4.75mm, 粒径 $850\mu\text{m}$ ~2mm の 3 種類とし (Fig. 8), 測定した算術平均粗さは $R_a=2.35\text{mm}$, $R_a=0.89\text{mm}$, $R_a=0.33\text{mm}$ であった。砂利を設置する際は砂利面の高さを一定とするために、砂利の粒子が重ならないように設置した。砂利の同心円の大きさは、直径 200mm, 400mm, 600mm, 800mm, 1,000mm とした。計測はコンクリート面からの距離 1,000mm の位置に超音波トランスデューサーを設置した。

Fig. 9 に測定領域の直径と最大振幅の関係を示す。測定領域が広くなるにつれて、どの砂利においても最大振幅が減少する傾向が見られた。そして、 $R_a=2.35\text{mm}$ と $R_a=0.89\text{mm}$ では測定領域の直径が 600mm 以上で、 $R_a=0.33\text{mm}$ では測定領域の直径が 200mm 以上でほぼ一定の値に収束した。本研究に用いた超音波トランスデューサーの測定領域は、算術平均粗さが大きくなるにつれて拡大する可能性はあるが、 $R_a=2.35\text{mm}$ 以下の粗さにおいては、1,000mm の距離からの計測で直径 600mm 以下の領域を計測していると考えられる。

5. Kirchhoff モデルとの比較

粗面からの超音波散乱強度を評価するモデルとして最もよく使用されるモデルに Kirchhoff モデルがある。このモデルは、単純な理論をもとに構成されており、極微小な粗さを対象とした面からの反射強度の計算においてある程度の有効性も確認されている (井原・スクマナ, 2008)。Kirchhoff モデルでは、反射強度 I はコヒーレント成分 I_{coherent} とインコヒーレント成分 $I_{\text{incoherent}}$ の和として次式で表される。

$$I = I_{\text{coherent}} + I_{\text{incoherent}} \quad (3)$$

入射波と反射波が対象面に対して垂直となる場合、コヒーレント成分は、平滑な表面からの反射波の強度 I_0 との関係で、対象表面の二乗平均平方根粗さ R_q , 入射波の波数 k を用いて次式のように表される。

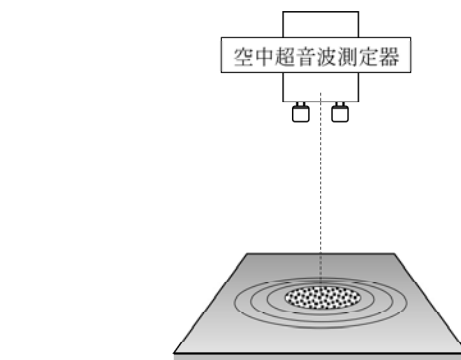
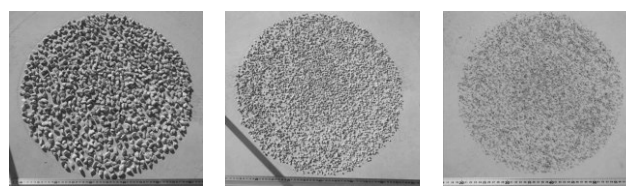


Fig. 7 測定領域の検討のための実験概要図
The diagram of experiments for searching the measuring range



$R_a=2.35\text{mm}$ 粒径 9.5~19mm
 $R_a=0.89\text{mm}$ 粒径 2~4.75mm
 $R_a=0.33\text{mm}$ 粒径 $850\mu\text{m}$ ~2mm
(※写真中の斜めの黒いラインは支柱の影)

Fig. 8 測定領域の検討に使用した砂利
Gravels applied for searching the measuring range

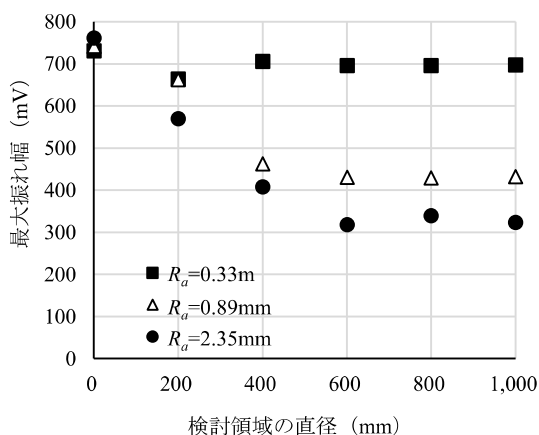


Fig. 9 測定領域の直径と最大振幅の関係
The relationship between peak to peak values and measuring ranges

$$\frac{I_{\text{coherent}}}{I_0} = e^{-k^2 R_q^2 / 2} \quad (4)$$

一方、インコヒーレント成分は、散乱点と観測点との距離 r と超音波照射面積 S , 対象面の相関長 λ を用いて次式で表される。

$$\frac{I_{\text{incoherent}}}{I_0} = \frac{k^2 \lambda^2 e^{-k^2 R_q^2} S}{4\pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k^2 R_q^2)^n}{n! n} \quad (5)$$

本研究では、反射強度を最大振幅とし、平滑な表面からの反射波の強度 I_0 は 4.2 節の測定結果の近似直線の切片の値とした。超音波照射面積は 4.3 節より、測定距離

1,000mmにおいて、直径200mmから直径600mmの範囲といえる。そこで、測定距離1,000mmのときは $R_a=0.05\text{mm}$ のとき直径200mmで $R_a=0.79\text{mm}$ のとき直径600mmとして、その間の R_a における超音波照射面積は線形補間で求めた直径とした。また、その他の測定距離では相似の関係にあると仮定し、測定距離550mmのときは $R_a=0.05\text{mm}$ のとき直径110mmで $R_a=0.79\text{mm}$ のとき直径330mm、測定距離1,500mmのときは $R_a=0.05\text{mm}$ のとき直径400mmで $R_a=0.79\text{mm}$ のとき直径900mmとして、その間の R_a における超音波照射面積は線形補間で求めた直径とした。また、相関長 λ は定義より対象面の自己相関係数を C_R とし、 $f(x)$ の標準偏差が σ のときに、次式のようになる長さとする。

$$C_R(\lambda) = \frac{\langle f(x) \cdot f(x+\lambda) \rangle}{\sigma^2} = \frac{1}{e} \quad (6)$$

ここで、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均。

Kirchhoffモデルでは、コヒーレント成分は平均値平面による鏡面反射成分のみを持ち、インコヒーレント成分はあらゆる方向への散乱波を含む。インコヒーレント成分は、凹凸の鉛直方向の情報を表現する二乗平均平方根粗さに加えて、凹凸の水平方向の情報を表現する相関長 λ を含む式となる。ただし、Kirchhoffモデルは、対象面の凹凸の変化がゆるやかで、凹凸の曲率半径は入射波の波長に比べて充分大きく($2k^2 R_a^2 \ll 1$)、Gaussian分布を持っているという仮定を置いている。

Fig. 10に実験結果の最大振幅(測定距離)、Kirchhoffモデルのコヒーレント成分の反射強度(Ico 測定距離)、反射強度(I 測定距離)と二乗平均平方根粗さの関係を示した。

Fig. 10より、実験結果の最大振幅(測定距離)とKirchhoffモデルのコヒーレント成分の反射強度(Ico 測定距離)を比較すると測定距離が遠く、二乗平均平方根粗さが小さいとき実験結果とよく一致していることが分かる。測定距離が遠く、粗さが小さい場合は反射強度におけるコヒーレント成分が支配的であると考えられる。測定距離が近く、二乗平均平方根粗さが大きい領域では、実験結果がKirchhoffモデルのコヒーレント成分の反射強度よりも大きくなる。この要因としては、反射波におけるコヒーレント成分の割合が減少しインコヒーレント成分が相対的に増加し始めたことによると考えられる。

次に、実験結果、Kirchhoffモデルのコヒーレント成分の反射強度(Ico 測定距離)と反射強度(I 測定距離)を比較する。反射強度(I 測定距離)は、二乗平均平方根粗さが大きい領域で、反射強度がコヒーレント成分の結果より大きくなり実験値に近づいていることが分かる。しかし、測定距離550mmの二乗平均平方根粗さが大きい領域で未だ実験値よりも低い値となっている。この要因としては、超音波照射面積 S の影響が考えられ、実際の照射範囲を測定してさらに検討を重ねる必要がある。

以上の考察を踏まえても、Kirchhoffモデルによる反射強度 I は、実験結果をよく表現できているといえる。このた

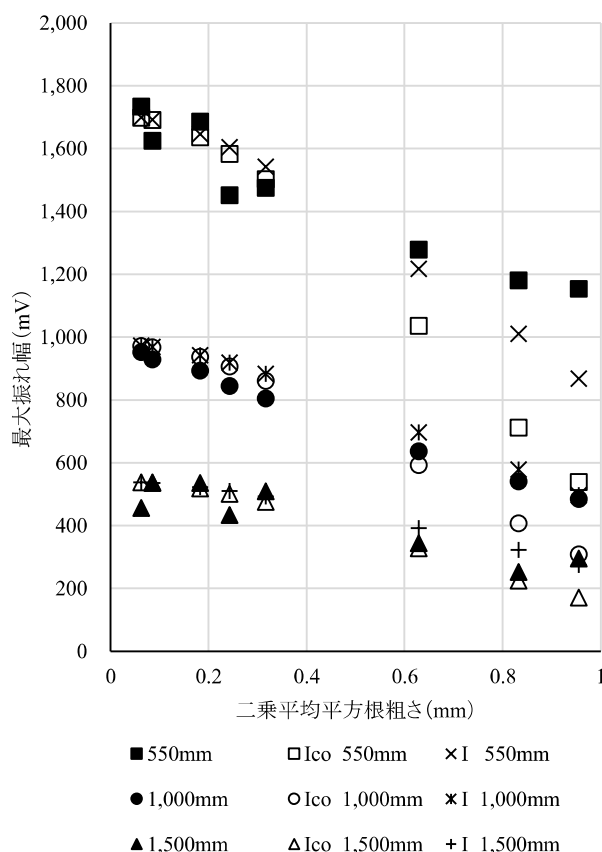


Fig. 10 Kirchhoffモデルと最大振幅の関係

The relationship between peak to peak values and calculated results by Kirchhoff theory

め、Kirchhoffモデルを用いて、空中超音波の最大振幅に対して、対象面の粗さを推定することができると考えられる。今後超音波照射範囲に関する検討を重ねることで、高さ方向の情報である二乗平均平方根粗さだけでなく、横方向の情報である相関長も定量的に評価できる可能性がある。

6. まとめ

本研究では、算術平均粗さを求める手法として空中超音波の反射波の強度を測定する手法を検討した。検討においては、①測定値のばらつきの検討、②空中超音波トランスデューサーとコンクリート面との距離を変えた空中超音波の最大振幅とコンクリート面の算術平均粗さの関係の検討、③空中超音波による粗さ測定の測定領域に関する検討を行った。

その結果、測定値のばらつきは、10回程度の測定結果の平均をとれば、100回の移動平均値の平均値の1%程度の標準偏差に抑えることができることが分かった。また、測定距離550mm、1,000mm、1,500mmの測定結果において、その最大振幅と算術平均粗さの関係は、線形近似で R^2 値0.8以上の高い相関を持つことが確認できた。さらに、超音波トランスデューサーの測定領域は、1,000mmの距離からの計測で直径600mmの領域を計測していることが分かった。

以上の結果を用いて Kirchhoff モデルとの比較を行ったところ、Kirchhoff モデルは実験結果をよく表現しており、Kirchhoff モデルを用いることで空中超音波の最大振れ幅から二乗平均平方根粗さだけでなく相関長も定量的に評価できる可能性を示した。

これらの結果から、摩耗した水路壁の粗さの定量的な測定法として、空中超音波の最大振れ幅が有効となる可能性を示唆することができた。しかし、これらの測定結果のばらつきの要因となる環境要因についての検討が不十分であり、温度、湿度、風速などについての検討を行う必要がある。また今後、Kirchhoff モデルの適用条件を精査する必要がある。さらに、送受信一体型の超音波トランスデューサー、対象面と超音波トランスデューサーのなす角の影響、外形寸法や周波数が同様の超音波トランスデューサーの個体差などを検討することで、実用に資する技術となる可能性がある。

謝辞：本研究は、農林水産省平成 26 年度官民連携新技術研究開発事業により補助をいただきました。

引用文献

- 平岡伸隆, 三品 健, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村 誠, 外狩麻子 (2011) : 超音波土中水分・水位計測における周波数特性の検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会要旨集, 629-630.
- Hiraoka, N., Suda, T., Hirai, K., Tanaka, K., Sako, K., Fukagawa, R., Shimamura, M. and Togari, A. (2011) : Improved Measurement of Soil Moisture and Groundwater Level Using Ultrasonic Waves, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**(7), 07HC19.
- 井原郁夫, デデン ディアン スクマナ (2008) : エアカップル超音波による材料表面の非接触トポグラフィー, 精密工学会誌, **74**(7), 691-695.
- 加藤 敬, 本間新哉, 北村浩二, 今泉真之 (2008) : 開水路における壁面の凹凸から水路の粗度係数を求める試み, 農村工学研究所技報, **207**, 183-193.
- 中矢哲郎, 渡嘉敷 勝, 森 充広, 森 丈久 (2008) : 摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法, 農業農村工学会論文集, **258**, 23-28.
- 中山純一 (1982) : 不規則表面による波動散乱理論, 京都大学, 博士論文, 1-186.
- 日本水士総合研究所 (2013) : 平成 24 年度水路保全技術検討業務委託事業報告書, 571-618.
- 農林水産省農村振興局 (2011) : 平成 21 年度農業基盤情報基礎調査報告書, 61-82.
- 太田垣晃一郎, 長谷川雄基, 鈴木哲也, 松本伸介, 佐藤周之 (2012) : 三次元画像解析によるコンクリート水路表面粗度の測定手法に関する研究, 農業農村工学会論文集, **280**, 7-13.
- Perez, N. and Negreira, C. (2008) : Evaluation of Air Coupling Ultrasonic Transducers for Surface Roughness Measurement, *Proceedings of the 6th Ibero-American Congress on Sensors*, 263-268.
- 須田剛文, 平井一弘, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一 (2009) : 斜面崩壊予知のための超音波による土中水分状態モニタリングの検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **108**(410), 117-122.
- Sukmana, D.D. and Ihara, I. (2005) : Application of Air-Coupled Ultrasound to Noncontact Surface Roughness Evaluation, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**(6), 4417-4420.
- 竹村武士, 丹治 肇, 蘭 嘉宜 (2001) : 開水路の現場粗度係数の推定方法の検討, 農土誌, **69**(5), 25-28.
- 渡嘉敷 勝 (2013) : 農業用コンクリート水路における摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究, 農村工学研究所報告, **52**, 1-57.
- 内田晃一, 石田征男, 小川彰一 (2008) : コンクリート開水路の表面形状測定による粗度係数の評価, 平成 20 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 432-433.

Measurement of the Roughness of the Concrete Surface by the Peak to Peak Value of the Aerial Ultrasonic Wave

OKAJIMA Kenji*, NAGAOKA Seiya*, ISHIGURO Satoru*, ITO Ryouei*, WATANABE Ken** and
ITO Tetsu***

* Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Machiyacho, Kurima, Tsu, Mie 514-8507, JAPAN

** Maruei Concrete Industry Co., Ltd., 1518 Majima, Fukujyu-machi, Hajima, Gifu 501-6293, JAPAN

*** X-Ability Co., Ltd., 4-1-5 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, JAPAN

Abstract

The hydraulic performance decline of the concrete agriculture irrigation canal often depends on roughness coefficients the evaluation criteria. The arithmetic mean roughness of the concrete surface is applied to the estimate of the roughness coefficient. In this study, we focused on that the aerial ultrasonic reflection wave has the feature of the peak to peak value varies according to the roughness of the wall surface. We suggested the measurement method of the roughness of the degraded concrete wall surface using the aerial ultrasonic wave. We conducted a series of experiments about relation of arithmetic mean roughness with the peak to peak value of the reflection wave. Next we verified about the measuring range. As a result, following became clear. The peak to peak value of reflection wave could estimate arithmetic mean roughness of concrete surface well. In addition, the calculated results by Kirchhoff theory predicted the peak to peak values well. We can get the root mean square surface roughness and the correlation length of the wall surface by applying Kirchhoff theory to the peak to peak value.

Key words : *Aerial ultrasonic, Peak to peak value, Arithmetical mean roughness, Kirchhoff theory, Root mean square surface roughness*