

# 論文 コンクリート亀裂面の振幅成分のためのフーリエ 2 次元解析

佐藤 良介<sup>\*1</sup>・和田 俊良<sup>\*2</sup>・上田 正生<sup>\*3</sup>

要旨：コンクリート亀裂面の形状評価に，フーリエ 2 次元解析を初めて導入した。亀裂面は理論的には，周波数領域における 2 つの成分として記述され得るが，本報ではそのうちの 1 つである振幅成分にのみ注目して，これを 2 次元の周波数領域で定量的に評価するための表現手法を提案している。実測データの試行的な解析をとおして，本手法の形状評価手法としての可能性について若干の検討を加えた。

キーワード：コンクリート亀裂面，形状評価，フーリエ 2 次元解析，周波数領域

## 1. はじめに

著者らはこれまで，コンクリート亀裂面の形状をフーリエ 1 次元解析を用いて評価する手法について研究を重ね，この複雑な形状を周波数領域で取り扱うことの有用性を立証してきた<sup>1),2)</sup>。

亀裂面の形状は，周波数領域において振幅と位相の 2 成分に分離され，各々が周波数と関連付けて評価される<sup>2)</sup>。既報の著者らのフーリエ 1 次元解析は，その解析対象を「亀裂面から切り出される断面の形状」に限定するものであり，この際「切り出され，解析される断面の方向」および「切り出された複数の断面同士の関係」について触れるものではなかった。しかしながら亀裂面は元来空間内で 3 次元的に展開しており，これをより現実的に評価するためには，解析方向の相違，あるいは複数の解析方向相互の関係をも評価する高度な解析手法の導入が不可欠である。

本論文は，著者らの知る限りコンクリート亀裂面の形状評価に初めてフーリエ 2 次元解析を導入するものである。空間的な解析方向の関係をも周波数領域で評価することを可能とするフーリエ 2 次元解析は，その難解な解析手法ゆえ，コンクリート材料のみならず一般的な適用例も僅少である。そこで本論文では，この新たな評価手法の導入に際して，まず一般的な適用例で特に重視されることの多い振幅成分に焦点を絞ることとし，亀裂面との

物理的な関係を明らかにしながら，その形状評価手法としての可能性について論じることとする。

## 2. 亀裂面へのフーリエ 2 次元変換の適用理論

コンクリート亀裂面の形状評価にフーリエ 2 次元解析を導入するにあたって，その基礎理論を知ることが不可欠である。ここでは，本論文における「コンクリート亀裂面の 3 次元座標データに基づいたフーリエ 2 次元解析」を円滑に行なうため，その座標データならびに解析の根底を為すフーリエ 2 次元変換への理論的な適用性について記述する。

### 2.1 コンクリート亀裂面の 3 次元座標データ

本論文でフーリエ 2 次元解析の対象とするのは，著者らが既往の実験で光切断法に基づいて測定したコンクリート亀裂面の 3 次元座標データである。本座標データについては既報<sup>3)</sup>に詳しいため，本論文ではその概要を掲げるに止めることとする。

図 - 1 および図 - 2 に，本座標データの概略図を示す。本データは，CCD カメラで撮影された測定参照面上  $T_x \times T_y \text{ mm}^2$  の矩形領域上に展開するコンクリート亀裂面の輪郭線を A/D 変換し，これを  $x$  軸方向に  $M$  点， $y$  軸方向に  $N$  点のサンプリング点で離散化することで獲得されている。このとき直交して隣接するサンプリング点同士の間隔，すなわちサンプリング間隔をそれぞれ  $\Delta x \text{ mm}$ ， $\Delta y \text{ mm}$  とすれば，測定領域は式 (1) に示すようにサ

\* 1 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻博士課程 工修 (正会員)

\* 2 北海道職業能力開発大学校 建築科講師 工博 (正会員)

\* 3 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

サンプリング点数とサンプリング間隔とで表される。

$$\begin{cases} T_x = \Delta x(M-1) \\ T_y = \Delta y(N-1) \end{cases} \quad (1)$$

## 2.2 3次元座標データのフーリエ2次元変換

式(2)に離散フーリエ2次元変換の基礎式を示す。

$$c_{kl} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} z_{mn} e^{-imk2\pi/M} e^{-inl2\pi/N} \quad (2)$$

ただし,  $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

先述の3次元座標データに本式を適用することで, その形状は面領域で展開する複数の三角関数の合成波へと分解され, 周波数領域での処理が可能となる。フーリエ係数  $c_{kl}$  は成分波となる各三角関数の形状を表現する物理量であり, 通常複素数で算定されるこの  $c_{kl}$  の実部を  $a_{kl}$ , 虚部を  $b_{kl}$  とすると, 各三角関数の特性値である振幅  $F_{kl}$ , 位相角  $\phi_{kl}$ , 周波数  $f_{kl}$  は, 式(3)として算定される。

$$\begin{cases} F_{kl} = |c_{kl}| = \sqrt{a_{kl}^2 + b_{kl}^2} \\ \phi_{kl} = \arg(c_{kl}) = \tan^{-1} \left( \frac{b_{kl}}{a_{kl}} \right) \\ f_{kl} = \frac{\sqrt{(lM\Delta x)^2 + (kN\Delta y)^2}}{M\Delta x N\Delta y} \end{cases} \quad (3)$$

これらの特性値は, 成分波の形状の凹凸について,  $F_{kl}$  はその出入りの激しさを,  $\phi_{kl}$  はその出現位置を,  $f_{kl}$  はその周波数, すなわち凹凸が単位長さ内で出入りする回数を表現する。なお  $f_{kl}$  の逆数は凹凸の波長  $\lambda_{kl}$  である。

上式(3)では,  $F_{kl}$  と  $\phi_{kl}$  が  $c_{kl}$  をもとに,  $f_{kl}$  が座標データの測定・解析条件および変数  $k, l$  によって算定されている。換言すれば, 個々の亀裂面の形状変化は, 周波数領域において,  $f_{kl}$  に依存する  $F_{kl}$  と  $\phi_{kl}$  によって記述されることになり, これより本論文では  $F_{kl}$  と  $\phi_{kl}$  を亀裂面の形状の振幅成分と位相成分,  $f_{kl}$  を支配する上掲の2変数  $k$  と  $l$  を周波数指標と呼ぶこととする。 $k, l$  は数値演算上それぞれ  $x$  方向と  $y$  方向のサンプリング数と同数だけ算定されるが, このうち真に有効なものは, Nyquistの定理が示す次式(4)の不等式をみたす  $k, l$  に制限され, 本論文では同式を満足する  $k$  と  $l$  の最大値

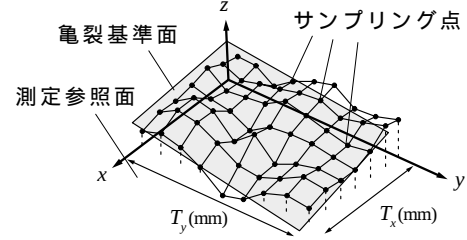


図 - 1 コンクリート亀裂面の3次元座標データ

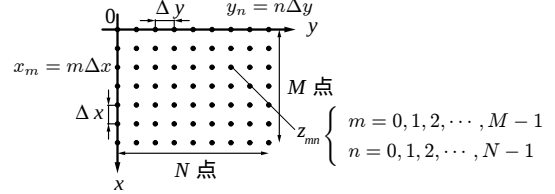


図 - 2 サンプリング点による離散化

をそれぞれ  $u, v$  と定義する。

$$\begin{cases} \frac{2k}{M} \leq 1 \\ \frac{2l}{N} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

また,  $k=l=0$  となる場合のフーリエ係数  $c_{00}$  はいわゆる直流成分であり, 全サンプリング点の  $z$  方向の平均高さを示し, 亀裂面の形状変化そのものには関与しない。

## 3. 物体形状と振幅成分の関係, 及びその可視化手法

一般的なフーリエ解析では, 主に振幅成分の評価に重点が置かれることが多い<sup>4)</sup>。振幅成分は, その形状が変化する細かさとその出入りの激しさとの関係を表現する成分であるが, 本論文でも, 2次元解析導入の第一段階として, まず振幅成分に焦点を絞ることとする。

著者らのこれまでのフーリエ1次元解析では, 成分波の周波数はただ1つの周波数指標によって支配されており, これに基づいて振幅成分が整理されていた<sup>1), 2)</sup>。一方, 本2次元解析においては, 周波数  $f_{kl}$  は  $k$  のみならず  $l$  によっても変動する。したがって当然  $F_{kl}$  の評価も双方と関連付けた, いわゆる2次元の周波数領域で為されねばならず, これより, 既往の1次元解析では触れることの叶わなかった「解析方向の相互関係」の記述が可能となる。ここでは, 物体形状と振幅成分との物理的な関係を明確にするとともに, その性質を2次元の周波数領域において可視化する手法について述べることとする。

### 3.1 自乗平均粗さ $P_{tf}$

一般のフーリエ解析において，入力データ  $z_{mn}$  とその解析結果である振幅  $F_{kl}$  との間には式 (5) に示す Parseval の等式が成立する。

$$\frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} z_{mn}^2 = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} F_{kl}^2 \quad (5)$$

左辺は全入力データの分散である。JIS B 0601において，粗面の輪郭線を離散化した座標点の標準偏差を用いた「二乗平均平方根粗さ  $P_q$ 」が，その粗さを表現する評価値として提案されていることから，式 (5) の右辺に示す  $F_{kl}$  の自乗和もまた，粗面の粗さを表現し得るものと考えられる。

そこで，式 (6) に示すように式 (5) の右辺を新たに自乗平均粗さ  $P_{tf}$  と定義し，これを亀裂面の粗さを代表する評価値として用いることとする。

$$P_{tf} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} F_{kl}^2 \quad (\text{mm}^2) \quad (6)$$

### 3.2 振幅成分の 2 次元周波数領域表現

先に示した自乗平均粗さ  $P_{tf}$  は，亀裂面のフーリエ解析結果である  $F_{kl}$  の単純な自乗和であり，いわば亀裂面の振幅成分をスカラー表示したものと考えられる。すなわちこの評価値は，振幅  $F_{kl}$  と周波数  $f_{kl}$  との関係を示すものではない。

一方先述のように，フーリエ 2 次元解析においては，その解析結果を 2 次元の周波数領域で評価することに最大の利点がある。ここでは，2 次元の周波数領域を表現するために，周波数を支配する 2 変数  $k$  および  $l$  で定義される  $k$ - $l$  空間を導入し，この空間内で振幅成分を評価する手法について述べることにする。

#### 3.2.1 2 次元振幅スペクトルによる定性的解釈

2 次元の周波数領域における振幅成分の定性的な傾向を可視化する方法としては，2 次元振幅スペクトルが一般的である。これは， $k$ - $l$  空間において  $F_{kl}$  の値を周波数に順じて列挙するものであり，その定性的な傾向が，等高線表示された  $F_{kl}$  の密度分布から読み取られることが多い<sup>4)</sup>。本論文では実際の解析に先立って，単純な三角関数を例にとって，実際の形状と振幅成分との物理的な関係を明らかにする。

ここで解析の対象として例示するのは 3 次元空

間において面領域で展開する単純な三角関数  $z=z(x,y)=A\cos(px+qy)$  である。図 - 3 (a) にその概形を，図 - 3 (b) にはこれを等高線表示したものを掲げる。これらの図より明らかなように， $z(x,y)$  の振幅は  $A$  mm であり，その形状は  $\lambda_{kl}$  の波長と共に方向ベクトル  $(p,q)$  で示される明確な指向性を有する。一方図 - 3 (c) は  $z(x,y)$  の 2 次元振幅スペクトルである。全体的に零を基調とした分布を示す等高線は， $(k,l)=(p,q)$  および  $(k,l)=(-p,-q)$  のただ 2 点のみでピークを持つ。このときのピーク値はともに  $A/2$  mm であり，両者の和は  $z(x,y)$  の振幅に等しい。また式 (4) より，その周波数  $f_{kl}$  は  $k$  と  $l$  の自乗和の平方根，すなわち直流成分からの距離をもとに算定され，この逆数が  $z(x,y)$  の波長  $\lambda_{kl}$  に一致する。更に各ピーク点の直流成分からの方向ベクトル  $(p,q), (-p,-q)$  は，図 - 3 (b) において  $z(x,y)$  の指向性を示していた方向ベクトルとの平行を保つ。

このように，2 次元振幅スペクトルの等高線分布は，その形状の凹凸の周波数（うねりの細かさ）を直流成分からの距離によって，またその周期性が見出される解析方向を直流成分からの方向ベクトルによって同時に表示する。しかしながら 2 次元振幅スペクトルは，その等高線表示の性質上， $F_{kl}$  の値やその座標を正確に読み取ることは難しく，定量的な評価の面で欠点を持つと言える。

なお 2 次元振幅スペクトルの等高線分布は， $k$ - $l$  空間において常に直流成分を中心に点対称に表示

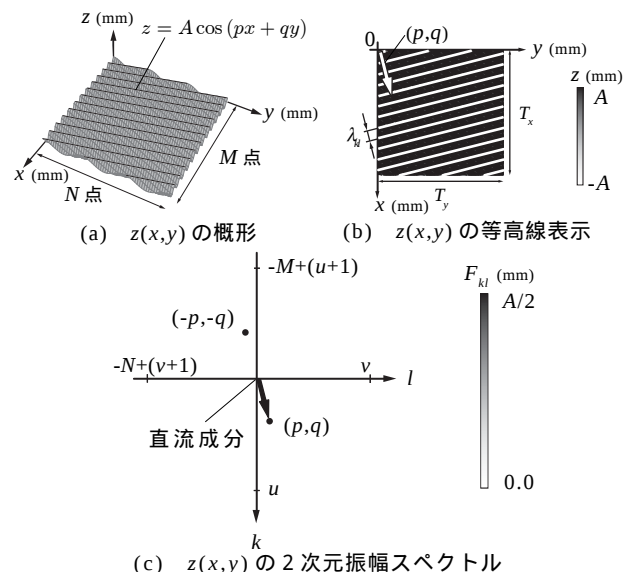


図 - 3 関数  $z=A\cos(px+qy)$  のフーリエ 2 次元解析

される。これは、図 - 3 に示した形状が波動であると仮定した場合、その進行方向を示す方向ベクトルとして  $(p, q)$  以外にも  $(-p, -q)$  が考え得ることに起因する。本解析のように形状のみに着目する場合、両者は本質的に同じであると考えられるため、以後の  $k-l$  空間における考察は、第一象限と第二象限についてのみ行うこととする。

### 3.2.2 $P_{tf}$ を用いた定量評価

先述したように、自乗平均粗さ  $P_{tf}$  は  $F_{kl}$  を用いて亀裂面の粗さを一括表記したものであり、周波数領域において、その形状の振幅成分を代表する。一方、 $k-l$  空間における座標点の直流成分からの距離は形状の周波数を、またその直流成分からの方向ベクトルは空間的な周期性が認められる方向を指す。従って、図 - 4 に示すように  $k-l$  空間を「直流成分からの距離  $r_f$  と微小距離  $dr_f$  から成る帯状の領域」および「直流成分を中心に  $k$  軸から測った角度  $\alpha_f$  と微小角度  $d\alpha_f$  から成る扇形の領域」を用いて分類し、これをもとに  $P_{tf}$  を整理すれば、形状の周期性および解析方向同士の関係がより具体的に抽出されることが考えられる<sup>4)</sup>。 $r_f$  と  $\alpha_f$  は、 $k-l$  空間内における幾何条件から容易に算定することができ、これを式 (7) に掲げる。

$$\begin{cases} r_f = \sqrt{k^2 + l^2} \\ \alpha_f = \tan^{-1} \left( \frac{l}{k} \right) \end{cases} \quad (7)$$

また、式 (3) で示した周波数  $f_{kl}$  は、 $r_f$  と  $\alpha_f$  を用いることで式 (8) のように書き改めることができる。

$$f_{kl} = \frac{r_f \sqrt{M^2 \Delta x^2 \sin^2 \alpha_f + N^2 \Delta y^2 \cos^2 \alpha_f}}{M \Delta x N \Delta y} \quad (8)$$

なお、実際の数値演算においては  $dr_f, d\alpha_f$  ともに有限の値を持たせて離散化して扱うこととなるが、これより各領域に分類される座標点数の偏りが不可避免的に生ずることを、ここに註記する。

#### (1) $P_{tf}$ の周波数分布 $P_{tf}(r_f)$

$P_{tf}(r_f)$  を、亀裂面全体の自乗平均粗さ  $P_{tf}$  の直流成分からの距離  $r_f$  の関数と定義すると、 $P_{tf}(r_f)$  と  $P_{tf}$  との関係は次式 (9) で示される。

$$P_{tf} = \int_0^{\sqrt{u^2 + v^2}} P_{tf}(r_f) dr_f \quad (9)$$

$P_{tf}(r_f)$  は周波数が近接する振幅成分をスカラー表

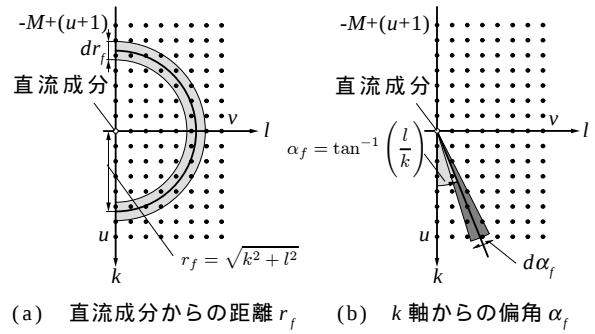


図 - 4  $k-l$  空間の分割

示するものであり、その  $r_f$  に伴った推移は、亀裂面の振幅成分の周波数に依存した性質を抽出する。ただし、 $P_{tf}(r_f)$  では全解析方向の振幅成分が平均化されているため、これよりその空間内における解析方向の関係を知ることはできない。

#### (2) $P_{tf}$ の角度分布 $P_{tf}(\alpha_f)$

振幅成分を  $k$  軸からの偏角  $\alpha_f$  で整理した  $P_{tf}(\alpha_f)$  は、 $P_{tf}$  を用いることで式 (10) ように表される。

$$P_{tf} = \int_0^\pi P_{tf}(\alpha_f) d\alpha_f \quad (10)$$

$k-l$  空間における直流成分からの偏角が、空間内における解析方向と一致していたことから、 $P_{tf}(\alpha_f)$  の  $\alpha_f$  への対応は、 $P_{tf}(r_f)$  から欠落していた振幅成分の解析方向に依存した関係、あるいは積分領域の離散化に起因して生ずる座標点数の偏りを補間する関係を検出すると考えられる。

### 4. コンクリート亀裂面のフーリエ 2 次元解析例

これまで明らかにしてきたように、フーリエ 2 次元解析から獲得される振幅成分の性質は、2 次元振幅スペクトルの等高線によって定性的に、自乗平均粗さ  $P_{tf}$  を  $k-l$  空間で再整理した  $P_{tf}(r_f)$  ならびに  $P_{tf}(\alpha_f)$  によって定量的に評価される。著者らの最終的な目標は、これらを用いて種々のコンクリート亀裂面の形状を系統立てて評価することにあるが、その前に本手法の妥当性について確認しておくことは不可欠と思われる。そこで本論文では、実際に著者らが既往の実験<sup>3)</sup>によって作成したコンクリート亀裂面を用いて解析を行い、この試行解析の結果をもとに、その妥当性について検討を加えることとする。

#### 4.1 コンクリート亀裂面の形成実験

本解析の対象となる引張亀裂面 Tn-3 について，その概要を示す。表 - 1 がコンクリートの調査，表 - 2 がコンクリートの材料特性であり，コンクリート構造物に用いられるごく一般的なコンクリートを採用した。

#### 4.2 測定・解析条件

表 - 3 に測定・解析条件を掲げる。既報<sup>3)</sup>で述べたが，著者らは光切断法による亀裂面形状測定における測定パラメータとして，分解能(画像の A/D 変換率)とサンプリング間隔を設定している。本論文では，試行解析にあたって分解能 0.159mm/dot，サンプリング間隔 2.0mm を選定することとしており，表 - 3 の条件はこれに従って定められたものである。

またフーリエ解析の特性上，その解析精度は，亀裂面全体の測定参照面からの傾きに多大な影響を受けるが，著者らは図 - 1 中に示す亀裂基準面を用いた座標変換が，この影響に対して有効となることを確認している<sup>1)</sup>。亀裂基準面は全サンプリング点に最小自乗法を適用することで算定されるが，表 - 4 にはその緒元が示されている。

#### 4.3 引張亀裂面 Tn-3 の振幅成分

前述の解析条件の下，実際にコンクリート亀裂面のフーリエ 2 次元解析を実施し，その振幅成分の性質について考察を加えるとともに，本手法の可能性について検討する。

##### (1) 自乗平均粗さ $P_{tf}$ の評価

Tn-3 の自乗平均粗さ  $P_{tf}$  は約 5.19mm<sup>2</sup> であった。この評価値は，本論文のような比較の対象がない単体の解析ではなく，複数の亀裂面を対象とする際に，粗さの相互比較等に活用できると考えられる。

##### (2) 2 次元振幅スペクトルの評価

図 - 5 に，Tn-3 の 2 次元振幅スペクトルを掲げる。 $F_{kl}$  が大きく評価される点が直流成分近傍に集中して分布していることから，低周波領域の振幅が卓越していると判断される。著者らが既往の論文で示してきた 1 次元振幅スペクトルも「低周波領域にピークを有し，周波数の増大にしたがって逓減する」傾向にあったことから，本解析結果はこれを裏付けるものと考えられる。一

表 - 1 コンクリートの調査

| 種類        | セメント | 呼び強度(N/mm <sup>2</sup> ) | スランプ(cm) |
|-----------|------|--------------------------|----------|
| 普通        | N    | 30                       | 18       |
| 水セメント比(%) | 骨材種類 | 最大骨材寸法(mm)               | 細骨材率(%)  |
| 48.0      | 碎石   | 20                       | 47.7     |

表 - 2 コンクリートの材料特性

| 名称     | スランプ (cm) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------|---------------------------|---------------------------|
| S18-II | 21.7      | 36.2                      | 2.64                      |

表 - 3 測定・解析条件

| 分解能(mm/dot) | $\Delta x$ (mm) | $\Delta y$ (mm) | $T_x$ (mm) | $T_y$ (mm) | M  | N  | u  | v  |
|-------------|-----------------|-----------------|------------|------------|----|----|----|----|
| 0.125       | 2.0             | 2.0             | 58         | 60         | 30 | 31 | 15 | 15 |

表 - 4 亀裂基準面諸元

| 水平方向角 $\phi_{t0}$ | 鉛直傾斜角 $\theta_{t0}$ | z 切片       |
|-------------------|---------------------|------------|
| -0.27 $\pi$ (rad) | 0.02 $\pi$ (rad)    | -0.09 (mm) |

方その分布の方向性に着目すると，やや不整形ではあるものの際立って乱れる様子が窺われることもなく，本亀裂面の形状が比較的等方性に近い状態で展開していることが推測される。

##### (3) $P_{tf}$ の周波数分布 $P_{tf}(r_f)$ の評価

図 - 6 (a) に Tn-3 の  $P_{tf}(r_f)$  を示す。 $k$ - $l$  空間を分割する  $dr_f$  は定義域における直流成分からの最大距離  $\sqrt{u^2 + v^2}$  の 30 分の 1 を選択した。2 次元振幅スペクトル同様，低周波領域における  $P_{tf}(r_f)$  が大きく評価されている。更に  $r_f=5$  を超えた辺りでその値がほぼ零に収束していることから，先の 2 次元振幅スペクトルの周期性に関する解釈が妥当であったと判断される。すなわち本亀裂面の形状に高周波成分が寄与する影響は極めて少なく，微細な凹凸よりも緩やかな形状変化が卓越していると考えられる。

なお，先述のように， $P_{tf}(r_f)$  の算出に際して積分領域が離散化されているため， $r_f$  が最大周波数指標  $u=v=15$  を超える領域では当然そこに分類される座標点数が減少することになる。しかしながら， $P_{tf}(r_f)$  は明らかに  $r_f=15$  に達する以前にほぼ零に収束しており，ここではその影響について考慮しなくとも差し支えないものと判断される。

##### (4) $P_{tf}$ の角度分布 $P_{tf}(\alpha_f)$ の評価

最後に同試験体の  $P_{tf}(\alpha_f)$  を図 - 6 (b) に示す。 $k$ - $l$  空

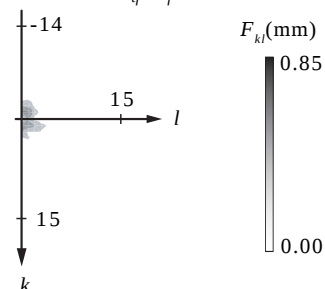


図 - 5 引張亀裂面 Tn-3 の 2 次元振幅スペクトル

間を分割する扇形の中心角は $\pi/30$ とした。同図によれば、 $P_{tf}(\alpha_f)$ からは $P_{tf}(r_f)$ のような極端に偏った分布が検出されることはなく、大小様々な値を伴った数点のピークがその定義域全域に亘って確認される。これは、本亀裂面からは、先に示した $P_{tf}(r_f)$ の分布があらゆる解析方向から検出され得ることを示唆しており、その形状の等方的な性質を指摘した2次元振幅スペクトルへの評価が裏付けられるものと考えられる。

また、図-6(a)より明らかなように、亀裂面の $P_{tf}(r_f)$ は直流成分に隣接した形で際立って高く評価される。当然のことながら、このような値を有する座標は積分領域の離散化にあたって $\alpha_f=0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ に分類される可能性が高く、上で指摘した各ピーク値の相違はこの影響を反映したものと思われる。すなわち、コンクリート亀裂面形状のフーリエ2次元解析に際しては、積分領域の離散化の影響が $P_{tf}(\alpha_f)$ の評価において最も顕著に現れると考えられ、その解析結果の考察には、このことを考慮に入れることが不可欠になると思われる。

## 5. まとめ

本論文では、コンクリート亀裂面の形状評価に初めてフーリエ2次元解析を導入し、実際の亀裂面への試行解析結果をもとに、その亀裂面の形状評価手法としての可能性について検討した。

フーリエ解析によって分離される亀裂面の2つの成分のうち特に振幅成分に着目した本論文では、まずその2次元の周波数領域における物理的な位置付けを明らかにし、ついで引張応力モードで形成されたコンクリート亀裂面の解析結果をもとに、その定量的解釈を試みた。得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 亀裂面の2次元振幅スペクトルは、低周波領域に集中した比較的等方的な分布を示しており、ここに著者らがこれまで示してきた1次元振幅スペクトルとの相関が認められた。
- 2) 亀裂面を構成する凹凸の激しさについて、その周波数分布を表現する $P_{tf}(r_f)$ が、低周波領域にピークを持って周波数の増大とともにその値を逡減させていたことから、亀裂面の形状について、そ

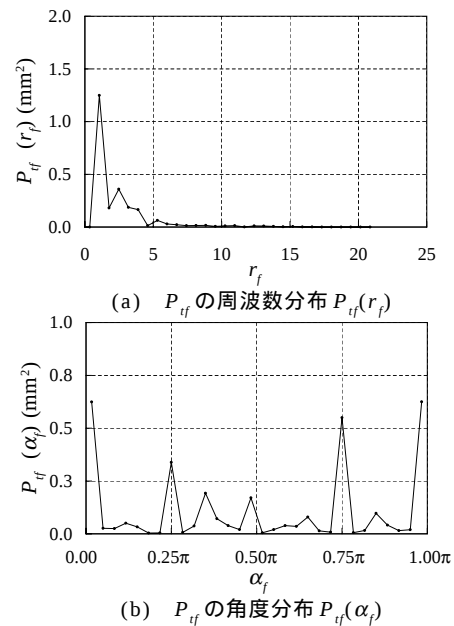


図-6 引張亀裂面 Tn-3 の自乗平均粗さ  $P_{sf}$  の比較的緩やかな変化の卓越が認められた。

- 3) 亀裂面の振幅成分の指向性を表示する  $P_{tf}(\alpha_f)$  は、その形状の等方性を裏付けるような定義域全域に亘る分布を呈したが、その評価には数値演算における離散化の影響を考慮する必要がある。

今後は、これらの手法を用いて亀裂面を評価するのに最適な測定・分析パラメータを決定するとともに、位相成分についても、その2次元解析の長所を利用した評価手法の構築が必要と考えている。

## 参考文献

- 1) 佐藤良介, 和田俊良, 佐藤龍司, 上田正生: 光切断法によるコンクリート亀裂面3次元座標データの高速フーリエ1次元解析, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.357-366, 2002.3
- 2) Ryosuke SATO, Toshinaga WADA and Masaiki UEDA: Study on shape properties of concrete crack surface in the frequency domain, Computational Modelling of CONCRETE STRUCTURES, pp.315-323, Mar.2003
- 3) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線による亀裂面形状測定手法の開発とデータの2次元分析手法の提案 - コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究(その1) -, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.179-188, 1996.12
- 4) 藤田稔, 梶田熙, 前川知之, 佐伯浩: パワースペクトルパターンの極座標解析による細胞配列の樹種の特徴抽出, 材料, Vol.42, pp.126-131, 1993.2