

# 分割主鏡シミュレーター 第3版バージョン6 Result 1

岡山新技術望遠鏡グループ

平成23年1月18日

## 目次

|  |     |
|--|-----|
| 1 概要   | 2   |
| 2 用語定義と特異ベクトル分類・表示                                 | 2   |
| 2.1 図による表示 . . . . .                               | 2   |
| 2.1.1 特異ベクトル . . . . .                             | 2   |
| 2.1.2 ギャップセンサー配置 . . . . .                         | 2   |
| 2.2 基準のギャップセンサー配置 . . . . .                        | 3   |
| 3 線形性確認  | 4   |
| 3.1 ある並進・回転状態における変換行列の線形性 . . . . .                | 5   |
| 3.2 異なる並進・回転状態についての比較 . . . . .                    | 13  |
| 3.2.1 変換行列の比較 . . . . .                            | 13  |
| 3.2.2 並進・回転状態が異なる変換行列を適用した場合の影響 . . . . .          | 14  |
| 4 ギャップセンサー配置による特異値・ベクトルの変化 I—素過程                   | 22  |
| 4.1 ギャップセンサー配置のパターン . . . . .                      | 22  |
| 4.2 特異ベクトル・特異値への影響の評価 . . . . .                    | 22  |
| 4.3 ギャップセンサー配置による特異値への影響 — セグメント間同一・辺毎単独 . . . . . | 22  |
| 4.3.1 内環に対する配置 . . . . .                           | 22  |
| 4.3.2 内周セグメント間に対する配置 — 中心線上 . . . . .              | 23  |
| 4.3.3 内周セグメント間に対する配置 — セグメント内 . . . . .            | 23  |
| 4.3.4 外周セグメント間に対する配置 — 中心線上 . . . . .              | 39  |
| 4.3.5 外周セグメント間に対する配置 — セグメント内 . . . . .            | 39  |
| 4.3.6 内外周セグメント間に対する配置 — 中心線上 . . . . .             | 53  |
| 4.3.7 内外周セグメント間に対する配置 — セグメント内 . . . . .           | 53  |
| 4.3.8 内・外周セグメント間に対する配置 — 中心線上 . . . . .            | 67  |
| 4.3.9 内・外周セグメント間に対する配置 — セグメント内 . . . . .          | 73  |
| 4.3.10 全体評価 . . . . .                              | 90  |
| 4.4 ギャップセンサー配置による特異値への影響 — セグメント間同一・辺毎複合 . . . . . | 94  |
| 4.4.1 内周間ギャップセンサー配置による影響 . . . . .                 | 95  |
| 4.4.2 外周間ギャップセンサー配置による影響 . . . . .                 | 105 |
| 4.4.3 内周間・外周間ギャップセンサー配置による影響 . . . . .             | 115 |
| 4.4.4 内外間ギャップセンサー配置による影響 . . . . .                 | 125 |
| 4.4.5 全体評価 . . . . .                               | 132 |
| 4.5 ギャップセンサー配置による特異値への影響 — 1/3 対称形・辺毎 . . . . .    | 135 |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 4.5.1 内環 . . . . .      | 135        |
| 4.5.2 内周間・外周間 . . . . . | 138        |
| 4.5.3 全体評価 . . . . .    | 150        |
| <b>5 まとめ</b>            | <b>152</b> |

## 1 概要

分割主鏡に取り付けるセグメント間ギャップセンサーについてのシミュレータが3D化されたが、行列解法を適用する上ではいくつかの点で線形性近似を仮定している。この点について実際にシミュレータの出力により線形性近時の妥当性を確認する。同時に、3D化されたことで同一平面上での動きでなくなったセグメントの並進・回転についても、並進・回転の状況の変化による変換行列への影響を確認する。

また、シミュレータで求められるギャップセンサー配置とそれに対する特異ベクトル・特異値の分布の対応関係について、さまざまな配置を検討するための基礎的な検討資料として、個々のギャップセンサーを移動させたときの影響を調べる。

## 2 用語定義と特異ベクトル分類・表示

議論を簡単にするためにいくつかの用語を定義する。また、特異ベクトルと特異値の分布について議論しやすくするために、特異ベクトルの特徴的な形について議論し、分類を定義する。

### 2.1 図による表示

#### 2.1.1 特異ベクトル

特異ベクトルの表示はセグメント配置を模した円の中に、アクチュエータの位置に対応する場所に塗りつぶし円を並べることで表示する。塗りつぶし色<sup>1</sup>は、プラスが青、マイナスが赤で、特記がない限り特異ベクトルの要素が1/3(もしくはそれ以上)になるところで完全な青・赤で表示される。図示のほかに、左上に対応する特異値のID(大きい順に1から並べたもの)、左下に対応する特異値の値、右下に対応する特異値の値を最大特異値で割ったものを表記する。

#### 2.1.2 ギャップセンサー配置

ギャップセンサー配置は主鏡を真上から見たセグメント配置の線上に表示する。なお、ギャップセンサーの定義位置の深さは表示されない。

セグメント間の中点<sup>2</sup>に配置されたギャップセンサーは黒丸で、セグメント間中点から外れたギャップセンサーは白抜き丸で表示される。ギャップセンサーの場所に対応するセグメント間中点を明示し、かつどの程度中点から離れているかを示すために、対応するセグメント間中点より線を引いて強調している。線が実線の場合は75mm以上離れて定義されているギャップセンサーを示し、線の長さは1倍表示、線が点線の場合は75mm以内のギャップセンサーで10倍の長さの線で強調されている。

<sup>1</sup>特異ベクトルは、アクチュエータ空間での正規直交ベクトル系として記述されるため、現実には反転しても

<sup>2</sup>シミュレータの仕様書における定義での中点であり、セグメント端から1-2mm程度外に離れたところに相当。セグメントを2Dに並べたときの中点で定義されているため、3Dにおける中点ではないことに注意。

## 2.2 基準のギャップセンサー配置

ギャップセンサー配置を変更したことによる特異ベクトルの変化について、その比較対象となる基準(もしくは基本形の)ギャップセンサー配置を定義する。

セグメントの配置は中心軸に対して回転対象であるため、基準ギャップセンサー配置も対称形となるように定義する。よって、全てのセグメント間の辺において辺の中点もしくは $1/3$ 点にギャップセンサーが配置されているような状態(図1)を基準のギャップセンサー配置とする。このとき、セグメントの配置とギャップセンサーの配置の両方が中心軸に対して回転対称<sup>3</sup>であるので、その配置から求められる特異ベクトルも対称形であると類推でき分布を考えるときのベースとして利用しやすいと考えられる。

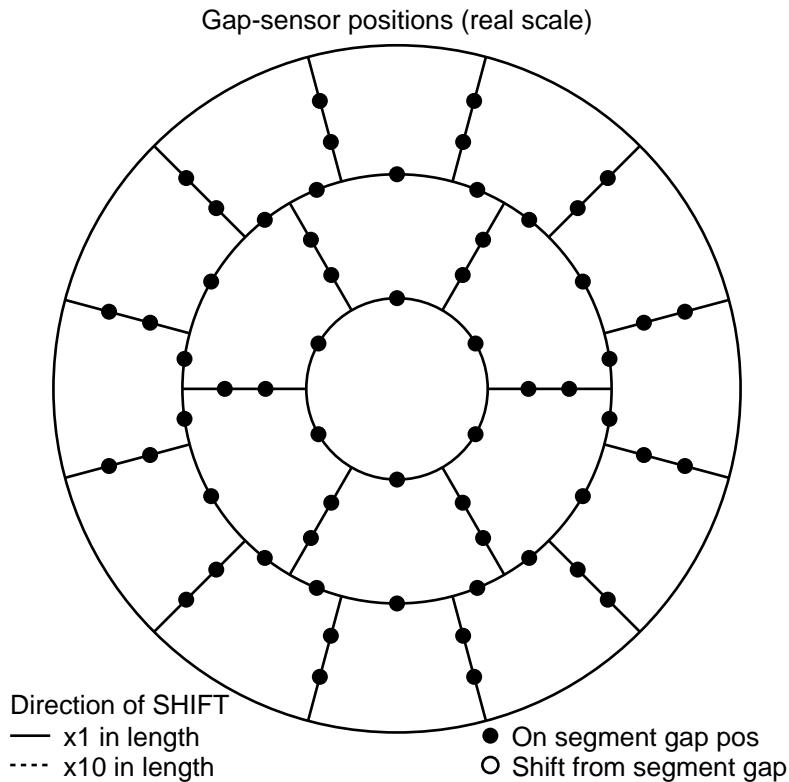


図1: 基準ギャップセンサー配置

このギャップセンサー配置に対して、57個の特異ベクトルは図2,3のようになる。

これらに対して、極座標における直交多項式系であるZernike多項式による分布(図4)のどれに近いかを判別する。Zernike多項式は光学系における収差のモードを示すためにも利用されている極座標での多項式系であり、セグメント配置は中心軸周りの回転対称であるため、形式として類似性がある。

各Zernikeのモードとその収差での呼び名、基準における特異ベクトル分布のうちのどれに近いかをまとめたものが、表1である。なお、内環を入れてセグメントが3周分しかないことから、大きな $n$ のZernikeモードに対応する特異ベクトルの分布は発生しにくいといえる。

表1: Zernikeモードとの対応

| $j$ | $n$ | $m$ | モード名   | ID | 備考 |
|-----|-----|-----|--------|----|----|
| 1   | 0   | 0   | Piston | 57 |    |

<sup>3</sup>内周セグメントの数6の因数である2,3,6のそれぞれの次数において回転対称となる。

表 1: Zernike モードとの対応

| $j$ | $n$ | $m$ | モード名        | ID | 備考 |
|-----|-----|-----|-------------|----|----|
| 2   | 1   | 1   | Tilt        | 56 |    |
| 3   | 1   | -1  | Tilt        | 55 |    |
| 4   | 2   | 0   | Defocus     | 54 |    |
| 5   | 2   | 2   | Astig       | 52 |    |
| 6   | 2   | -2  | Astig       | 51 |    |
| 7   | 3   | 1   | Coma        | 48 |    |
| 8   | 3   | -1  | Coma        | 47 |    |
| 9   | 4   | 0   | Sphere      | 50 |    |
| 10  | 3   | 3   | AstigTri 0  | 49 |    |
| 11  | 3   | -3  | AstigTri 30 | 53 |    |
| 12  | 4   | 2   |             | —  |    |
| 13  | 4   | -2  |             | —  |    |
| 14  | 5   | 1   | Coma5       | —  |    |
| 15  | 5   | -1  | Coma5       | —  |    |

### 3 線形性確認

アクチュエータ制御量からギャップセンサー読み出し値への変換行列とそのSVDによる逆行列による取り扱いを行うためには、どのようなアクチュエータの制御量であっても同じ変換係数でギャップセンサー読み出し値が導出されなければならない。また、セグメントの並進・回転が加わった場合についてもこの同じ変換行列が適用できるかどうかが重要であり、想定される並進・回転量において近似的に同じ変換行列が適用できなければ、異なる並進・回転量ごとに変換行列を用意しておく必要があることになり、同時に並進・回転の状態を把握する必要があるともいえる。

これらの点について確認するため、あるアクチュエータ駆動量で作成した変換行列に対し、次のようなパターンのアクチュエータ駆動量に対応する変換行列で求められたギャップセンサー読み出し量と変換行列を求める際と同じ方法で求めたギャップセンサー読み出し量の差を計算することにした。二つの読み出し量同士の差の評価については、単純平均・分散に意味は無い<sup>4</sup>ため、差の絶対値の平均を代表値として評価することとする。

- 内環の仮想分を含めて57本のアクチュエータを一つずつ駆動したとき
- 全アクチュエータを同じ量駆動したとき
- 全アクチュエータをランダム量駆動したとき

次に、セグメントの並進・回転の状態変化による影響について考える。シミュレータを3D化したことで、アクチュエータを駆動していない(原点にいる)場合でもギャップセンサーの測定方向が並進・回転運動を行う平面であるセグメント背面に対して傾いていた場合には読み出し値は変化する。これは、そもそも並進・回転による影響をギャップセンサーで測定できるようにするために、ギャップセンサーの取り付け方向をセグメント背面に対して傾けているためであり、この変化は発生すべき量である<sup>5</sup>。このため、セグメントが並進・回転している場合の変換行列の算出は、

$$\text{変換行列の要素} = (\text{アクチュエータを } x \text{ 駆動した場合の読み出し値} - \text{アクチュエータが原点での読み出し値}) / x$$

<sup>4</sup>単純平均は系統的な誤差が発生せずにランダム的な差が載るような状況では0になるため指標としにくい。また、分散については駆動するアクチュエータに対応したギャップセンサーのみが値をもつため、駆動した数などに依存することになり指標としにくい。

<sup>5</sup>この場合、全ギャップセンサー数は高々100個のオーダーであるため、一つだけ大きな差が発生した場合には1-2桁小さく評価される可能性はあるが大半の状況下では平均的な代表値となりうる。また、一つのセグメントには10個弱のギャップセンサーが取り付けられているため、一つのアクチュエータを駆動した際に10個弱のギャップセンサーに影響が及ぶと考えると、この影響はより小さくなるはず。

<sup>6</sup>ただし、この逆の論理で言えば、ギャップセンサーの測定方向が従来と同じくセグメント背面に垂直である場合には並進・回転によるギャップセンサー読み出し値に変化がないはずであるが、実際には微少量の変化が発生する。これは、シミュレータを3D化したことによりセグメントの背面同士が同じ平面をなすのではなくある角度を持って交差するようになったため、あるセグメントの並進・回転運動平面に対してギャップセンサーの対抗側の測定方向は垂直でなくなったことによる。

と定義する。逆に、変換行列の検証の際には、バイアス値としてアクチュエータが原点での読み出し値を足し引きして合わせる<sup>7</sup>。

### 3.1 ある並進・回転状態における変換行列の線形性

ギャップセンサー配置は基準の配置に固定して試験を行う。ギャップセンサーと変換行列についての条件は次のようにする。

- $z$  方向は-40.0mm の場所
- ギャップセンサーの測定方向は鏡面に垂直方向
- 変換行列を作成する際のアクチュエータ駆動量は  $1\mu\text{m}$

セグメントの並進・回転については以下のような各条件について試験した。なお、簡単化のために全てのセグメントについて同じ並進・回転の条件を加えている。

- 01 並進・回転なし
- 02 並進 (0.1mm, 0.0mm)、回転なし
- 03 並進 (0.0mm, 0.1mm)、回転なし
- 04 並進 (0.1mm, 0.1mm)、回転なし
- 05 並進なし、回転  $0.1^\circ$
- 06 並進 (0.1mm, 0.0mm)、回転  $0.1^\circ$
- 07 並進 (0.0mm, 0.1mm)、回転  $0.1^\circ$
- 08 並進 (0.1mm, 0.1mm)、回転  $0.1^\circ$

試験で変化させるアクチュエータ駆動量のパターンについては以下の 3 通りの試験を行い、それぞれ表の結果が得られた。

- 内環の仮想分を含めて 57 本のアクチュエータを一つずつ  $1\text{mm}$  駆動: 表 2
- 全アクチュエータを同じ量駆動、 $1 - 19 \mu\text{m}$  を  $1\mu\text{m}$  ごと: 表 3
- 内環以外のアクチュエータをランダム量駆動 固定値  $1\mu\text{m}$ 、ランダム値  $2.5\mu\text{m}$ : 表 4

全てのアクチュエータを同じ量駆動した際の駆動量と差の間には、同じ並進・回転の状態であればほぼ線形の関係がみられており、ギャップセンサーの読み出し値に影響する二つのセグメント上の移動量<sup>8</sup>に対するアクチュエータを駆動したときの影響の足し合わせだけではなく、その両方をパラメータに取るような関数の影響が見えていると考えることができる。この影響は今回のような変換行列による表式ではカバーすることはできないが、アクチュエータを  $1\mu\text{m}$  駆動した際に  $3e-11\text{mm}$  と駆動量に対して  $3e-8$  のレベルであるために影響は近似的には無視することができる。

アクチュエータを 1 本ずつ駆動させたときの値は、内環を除く 54 アクチュエータに対して(オーダーで)ほぼ変わらない値となっている。また、これについても非線形性は  $10^{-9}$  のオーダーであり線形性近似は問題ないことが言える。

最後のランダム量駆動した場合の出力値について、アクチュエータを全て同じ値駆動したとき(2 番目)と比較すると  $4 \sim 8\mu\text{m}$  駆動したときの出力に近い。毎回計算されるランダム量の駆動であるので厳密な比較は無理ではあるものの、固定値  $1\mu\text{m}$  とランダム値(uniform)  $2.5\mu\text{m}$  で  $2 \sim 4\mu\text{m}$  に相当するとすると倍程度大きくなっている<sup>9</sup>。実際の制御の際の状況はこの 3 番目に近いと想定されるが、この場合でも非線形性はアクチュエータ駆動量の  $10^{-7}$  のレベルであるので線形性近似は問題ないと結論付けられる。

<sup>7</sup> 実機では、このバイアス値分は鏡面の位相をそろえるための駆動量として利用されるので取得可能なデータに加算されていても問題ない。

<sup>8</sup> センシング面中心点と対向板中心点の 2 点における移動量。

<sup>9</sup> 2 番目の際の検証でギャップセンサーが載る二つのセグメント両方をパラメータに取るような関数の影響を考えたときに、2 番目ではその片向きだけが(しかもアクチュエータ駆動量に差は無いので小さい値で)影響したが、ここではランダムであるので両方の向きが影響すると思うと 2 倍 …?

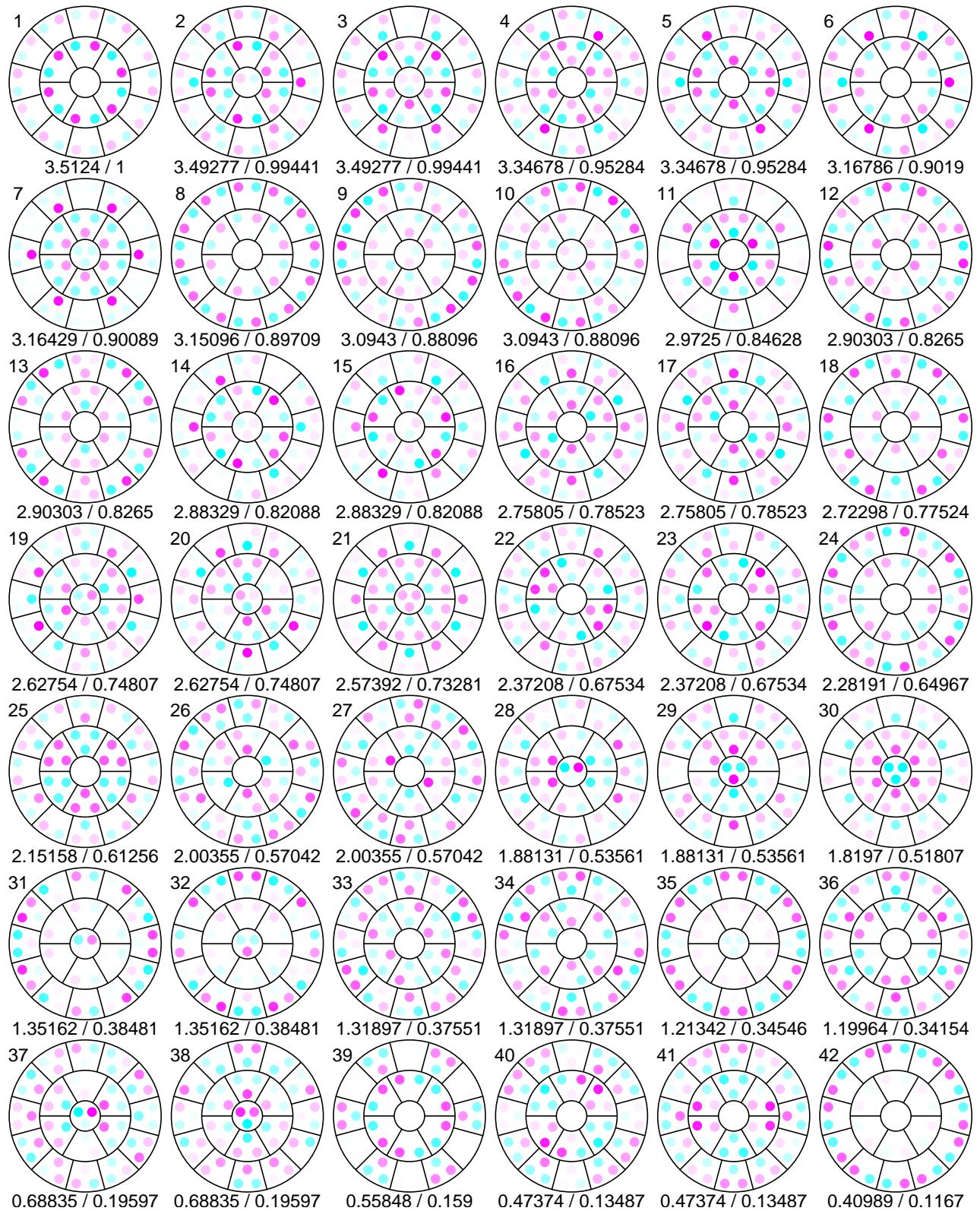


図 2: 基準における特異ベクトル分布 I

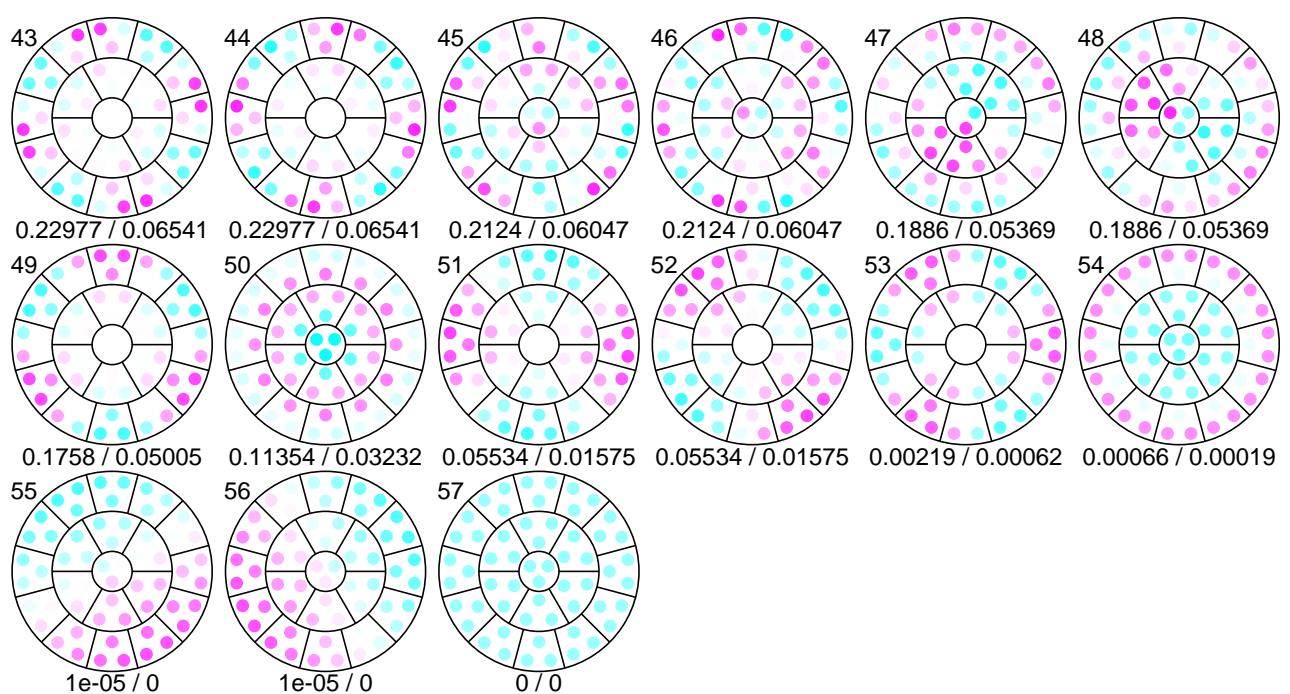


図 3: 基準における特異ベクトル分布 II

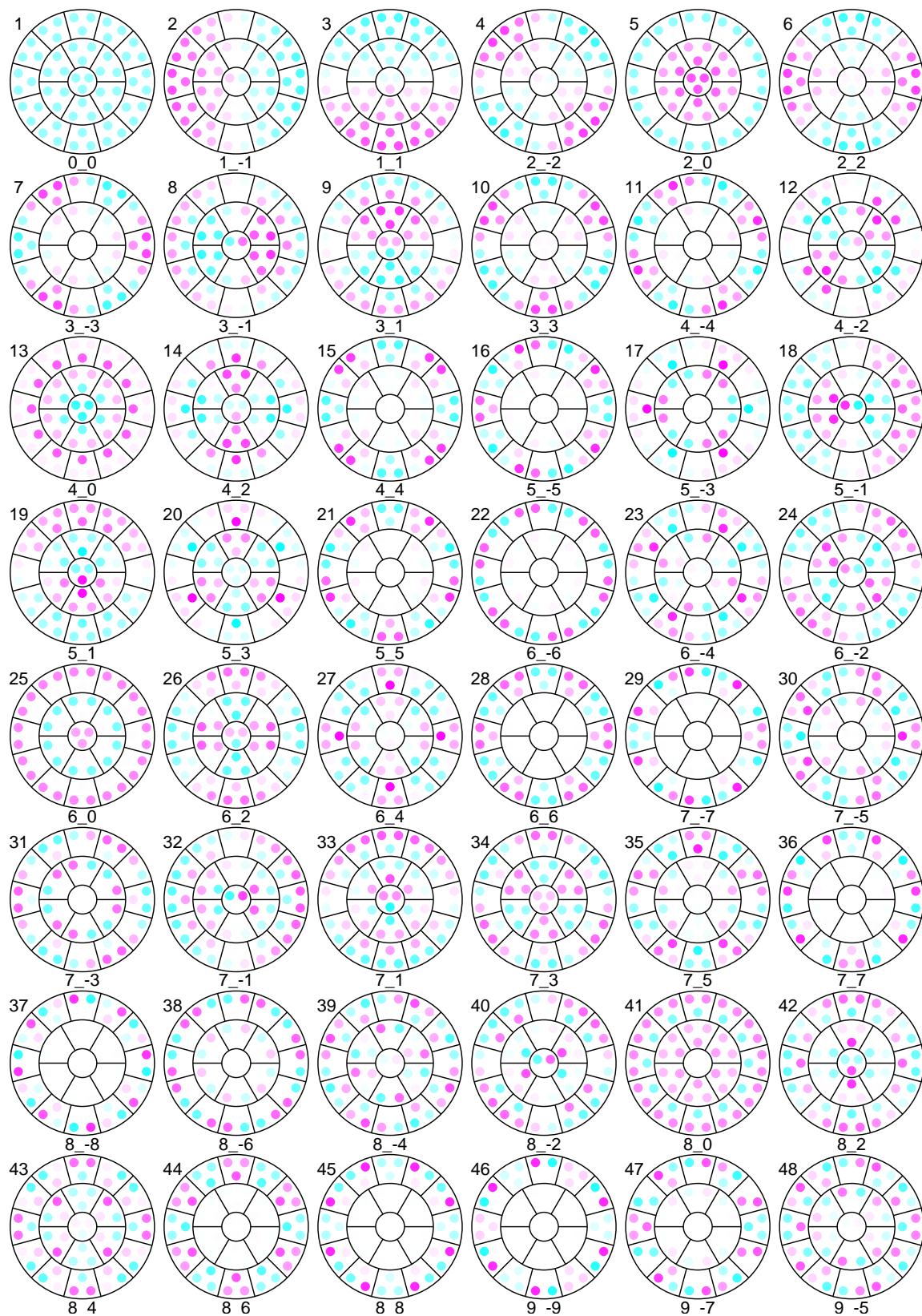


図 4: Zernike 多項式の形状

表2: 非線形成分値指標 — 1本ずつアクチュエータを駆動

| ID | 01          | 02          | 03          | 04          | 05          | 06          | 07          | 08          |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1  | 9.00209e-10 | 8.80443e-10 | 1.0599e-09  | 1.05856e-09 | 1.59297e-09 | 1.59324e-09 | 1.01072e-09 | 1.01278e-09 |
| 2  | 6.61598e-10 | 8.69328e-10 | 9.70481e-10 | 8.68084e-10 | 1.20387e-09 | 1.06757e-09 | 1.55038e-09 | 9.23447e-10 |
| 3  | 8.80907e-10 | 6.11114e-10 | 1.1586e-09  | 7.95341e-10 | 1.00351e-09 | 1.63559e-09 | 6.77147e-10 | 7.85332e-10 |
| 4  | 9.01429e-10 | 8.79939e-10 | 1.05798e-09 | 1.06084e-09 | 1.59491e-09 | 1.5947e-09  | 1.01111e-09 | 1.01264e-09 |
| 5  | 6.58766e-10 | 8.70717e-10 | 9.72451e-10 | 8.69802e-10 | 1.20384e-09 | 1.06613e-09 | 1.55114e-09 | 9.22986e-10 |
| 6  | 8.79433e-10 | 6.13062e-10 | 1.15741e-09 | 7.96195e-10 | 1.00517e-09 | 1.63435e-09 | 6.76498e-10 | 7.85785e-10 |
| 7  | 8.99099e-10 | 8.8096e-10  | 1.05711e-09 | 1.05733e-09 | 1.59558e-09 | 1.59522e-09 | 1.01046e-09 | 1.01202e-09 |
| 8  | 6.59148e-10 | 8.70626e-10 | 9.6814e-10  | 8.68119e-10 | 1.20489e-09 | 1.06915e-09 | 1.54968e-09 | 9.21932e-10 |
| 9  | 8.808e-10   | 6.10056e-10 | 1.15954e-09 | 7.94439e-10 | 1.0042e-09  | 1.63654e-09 | 6.77565e-10 | 7.85034e-10 |
| 10 | 8.99152e-10 | 8.78394e-10 | 1.05871e-09 | 1.05697e-09 | 1.59297e-09 | 1.59371e-09 | 1.01038e-09 | 1.01179e-09 |
| 11 | 6.59339e-10 | 8.70627e-10 | 9.71141e-10 | 8.67654e-10 | 1.20294e-09 | 1.06806e-09 | 1.5517e-09  | 9.22445e-10 |
| 12 | 8.81305e-10 | 6.11302e-10 | 1.15917e-09 | 7.93351e-10 | 1.00417e-09 | 1.63664e-09 | 6.76247e-10 | 7.86999e-10 |
| 13 | 9.00501e-10 | 8.8162e-10  | 1.06051e-09 | 1.06103e-09 | 1.59194e-09 | 1.5911e-09  | 1.0118e-09  | 1.01046e-09 |
| 14 | 6.60574e-10 | 8.7124e-10  | 9.69569e-10 | 8.70698e-10 | 1.20217e-09 | 1.06542e-09 | 1.55214e-09 | 9.24065e-10 |
| 15 | 8.82097e-10 | 6.11173e-10 | 1.15807e-09 | 7.94615e-10 | 1.00142e-09 | 1.63526e-09 | 6.78224e-10 | 7.86627e-10 |
| 16 | 9.0214e-10  | 8.79032e-10 | 1.05939e-09 | 1.05957e-09 | 1.59341e-09 | 1.59384e-09 | 1.01049e-09 | 1.01134e-09 |
| 17 | 6.60437e-10 | 8.70372e-10 | 9.68795e-10 | 8.67868e-10 | 1.20435e-09 | 1.06706e-09 | 1.54998e-09 | 9.2351e-10  |
| 18 | 8.81104e-10 | 6.12227e-10 | 1.15889e-09 | 7.95444e-10 | 1.00455e-09 | 1.63717e-09 | 6.77281e-10 | 7.86875e-10 |
| 19 | 5.85112e-10 | 5.8491e-10  | 4.42697e-10 | 1.38074e-10 | 3.4179e-10  | 3.42351e-10 | 4.42753e-10 | 7.46591e-10 |
| 20 | 8.31006e-10 | 8.31068e-10 | 2.99321e-10 | 3.16223e-10 | 5.63605e-10 | 9.85731e-11 | 3.61485e-10 | 6.82028e-10 |
| 21 | 4.06578e-10 | 7.08509e-10 | 5.31757e-10 | 4.07078e-10 | 6.67941e-10 | 3.47285e-10 | 2.88003e-10 | 7.50938e-10 |
| 22 | 5.86073e-10 | 2.83273e-10 | 4.41736e-10 | 1.40007e-10 | 3.40545e-10 | 3.40573e-10 | 4.4094e-10  | 7.44888e-10 |
| 23 | 8.33056e-10 | 5.30173e-10 | 2.96207e-10 | 3.17054e-10 | 5.62122e-10 | 9.81712e-11 | 3.61963e-10 | 6.81465e-10 |
| 24 | 4.08265e-10 | 4.09063e-10 | 5.29531e-10 | 4.08924e-10 | 6.66397e-10 | 3.47434e-10 | 2.87155e-10 | 7.50294e-10 |
| 25 | 5.85112e-10 | 5.84911e-10 | 4.42501e-10 | 1.37878e-10 | 3.41988e-10 | 3.42547e-10 | 4.42199e-10 | 7.45957e-10 |
| 26 | 8.31006e-10 | 8.31702e-10 | 2.98491e-10 | 3.15393e-10 | 5.63605e-10 | 9.85719e-11 | 3.6093e-10  | 6.81395e-10 |
| 27 | 4.06578e-10 | 7.09143e-10 | 5.31757e-10 | 4.07273e-10 | 6.67309e-10 | 3.47285e-10 | 2.87291e-10 | 7.50305e-10 |
| 28 | 5.86073e-10 | 5.84838e-10 | 4.42536e-10 | 1.38424e-10 | 3.42663e-10 | 3.42324e-10 | 4.42191e-10 | 7.46073e-10 |
| 29 | 8.31173e-10 | 8.30771e-10 | 2.99219e-10 | 3.16162e-10 | 5.63913e-10 | 9.91673e-11 | 3.61526e-10 | 6.81201e-10 |
| 30 | 4.06744e-10 | 7.09137e-10 | 5.31656e-10 | 4.07294e-10 | 6.67774e-10 | 3.47471e-10 | 2.8928e-10  | 7.50226e-10 |
| 31 | 5.85308e-10 | 2.83149e-10 | 4.42893e-10 | 1.39024e-10 | 3.3966e-10  | 3.41322e-10 | 4.41066e-10 | 7.44962e-10 |

表2: 非線形形成分値指標 — 1本ずつアクチュエータを駆動

| ID | 01          | 02          | 03          | 04          | 05          | 06          | 07           | 08          |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 32 | 8.33523e-10 | 5.31103e-10 | 2.96505e-10 | 3.16481e-10 | 5.62609e-10 | 9.76567e-11 | 3.62118e-10  | 6.81849e-10 |
| 33 | 4.08098e-10 | 4.0824e-10  | 5.30266e-10 | 4.07078e-10 | 6.65925e-10 | 3.47175e-10 | 2.87204e-10  | 7.50564e-10 |
| 34 | 5.86073e-10 | 2.81948e-10 | 4.42536e-10 | 1.38424e-10 | 3.42664e-10 | 3.42323e-10 | 4.42627e-10  | 7.45878e-10 |
| 35 | 8.31369e-10 | 5.28078e-10 | 2.98585e-10 | 3.15528e-10 | 5.64349e-10 | 9.85336e-11 | 3.62159e-10  | 6.81202e-10 |
| 36 | 4.06744e-10 | 4.0688e-10  | 5.31022e-10 | 4.06857e-10 | 6.68407e-10 | 3.4744e-10  | 2.88013e-10  | 7.50226e-10 |
| 37 | 5.85112e-10 | 2.82021e-10 | 4.42697e-10 | 1.38074e-10 | 3.41785e-10 | 3.42271e-10 | 4.42558e-10  | 7.45128e-10 |
| 38 | 8.31202e-10 | 5.28374e-10 | 2.98687e-10 | 3.15589e-10 | 5.64042e-10 | 9.86517e-11 | 3.61085e-10  | 6.80762e-10 |
| 39 | 4.06578e-10 | 4.06253e-10 | 5.31124e-10 | 4.0664e-10  | 6.67942e-10 | 3.47175e-10 | 2.87341e-10  | 7.49672e-10 |
| 40 | 5.8616e-10  | 5.84838e-10 | 4.44661e-10 | 1.40007e-10 | 3.42498e-10 | 3.41178e-10 | 4.4219e-10   | 7.46873e-10 |
| 41 | 8.31064e-10 | 8.30829e-10 | 3.00819e-10 | 3.16857e-10 | 5.63912e-10 | 9.93628e-11 | 3.60034e-10  | 6.81743e-10 |
| 42 | 4.06111e-10 | 7.10628e-10 | 5.32456e-10 | 4.07324e-10 | 6.68408e-10 | 3.47441e-10 | 2.87783e-10  | 7.49276e-10 |
| 43 | 2.82192e-10 | 5.8491e-10  | 4.43331e-10 | 1.38074e-10 | 3.41785e-10 | 3.42271e-10 | 4.42753e-10  | 7.45958e-10 |
| 44 | 8.30373e-10 | 8.31069e-10 | 2.99954e-10 | 3.16223e-10 | 5.63605e-10 | 9.86523e-11 | 3.61681e-10  | 6.81395e-10 |
| 45 | 4.06578e-10 | 7.0851e-10  | 5.31758e-10 | 4.07078e-10 | 6.67941e-10 | 3.47205e-10 | 2.88199e-10  | 7.50305e-10 |
| 46 | 5.86073e-10 | 5.84838e-10 | 4.4234e-10  | 1.38228e-10 | 3.42866e-10 | 3.42599e-10 | 4.42902e-10  | 7.46073e-10 |
| 47 | 8.31173e-10 | 8.31405e-10 | 2.9839e-10  | 3.15333e-10 | 5.63912e-10 | 9.9088e-11  | 3.62238e-10  | 6.81202e-10 |
| 48 | 4.06744e-10 | 7.0977e-10  | 5.31656e-10 | 4.0749e-10  | 6.67773e-10 | 3.47519e-10 | 2.877934e-10 | 7.50227e-10 |
| 49 | 5.85804e-10 | 2.82216e-10 | 4.42589e-10 | 1.36566e-10 | 3.41987e-10 | 3.42122e-10 | 4.43553e-10  | 7.4613e-10  |
| 50 | 8.31036e-10 | 5.27516e-10 | 3.0007e-10  | 3.15135e-10 | 5.63611e-10 | 9.86528e-11 | 3.6056e-10   | 6.81717e-10 |
| 51 | 4.06578e-10 | 4.05591e-10 | 5.33249e-10 | 4.07906e-10 | 6.69331e-10 | 3.45874e-10 | 2.88031e-10  | 7.49296e-10 |
| 52 | 5.86073e-10 | 5.84838e-10 | 4.42536e-10 | 1.38424e-10 | 3.4267e-10  | 3.42403e-10 | 4.42823e-10  | 7.46707e-10 |
| 53 | 8.31173e-10 | 8.30772e-10 | 2.99219e-10 | 3.16162e-10 | 5.63912e-10 | 9.90883e-11 | 3.62158e-10  | 6.81835e-10 |
| 54 | 4.06744e-10 | 7.09137e-10 | 5.31656e-10 | 4.07294e-10 | 6.68407e-10 | 3.47549e-10 | 2.88647e-10  | 7.5086e-10  |
| 55 | 1.99716e-12 | 1.10499e-12 | 2.04282e-12 | 1.952e-12   | 1.28067e-12 | 1.90616e-12 | 1.54895e-12  | 1.9916e-12  |
| 56 | 1.99716e-12 | 1.1054e-12  | 1.95643e-12 | 2.02965e-12 | 1.15908e-12 | 1.99708e-12 | 1.48491e-12  | 2.13584e-12 |
| 57 | 1.99705e-12 | 1.10514e-12 | 1.95631e-12 | 2.04656e-12 | 1.18048e-12 | 1.99707e-12 | 1.72151e-12  | 2.1081e-12  |

表3: 非線形成分値指標 — アクチュエータを全て同じ値に駆動

| $\mu m$ | 01          | 02          | 03          | 04          | 05          | 06          | 07          | 08          |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1       | 3.26682e-11 | 2.63721e-11 | 2.84156e-11 | 2.16307e-11 | 3.57819e-11 | 2.47322e-11 | 2.10569e-11 | 3.74435e-11 |
| 2       | 6.62502e-11 | 5.29597e-11 | 5.79233e-11 | 4.32609e-11 | 7.26508e-11 | 5.07377e-11 | 4.24737e-11 | 7.52476e-11 |
| 3       | 9.96482e-11 | 7.97319e-11 | 8.72465e-11 | 6.5619e-11  | 1.09705e-10 | 7.71064e-11 | 6.42586e-11 | 1.13421e-10 |
| 4       | 1.32866e-10 | 1.06504e-10 | 1.15661e-10 | 8.70648e-11 | 1.46392e-10 | 1.02567e-10 | 8.56793e-11 | 1.51411e-10 |
| 5       | 1.66264e-10 | 1.33271e-10 | 1.44802e-10 | 1.09423e-10 | 1.83474e-10 | 1.28753e-10 | 1.07826e-10 | 1.89581e-10 |
| 6       | 2.0039e-10  | 1.60039e-10 | 1.74677e-10 | 1.32148e-10 | 2.20864e-10 | 1.55641e-10 | 1.29973e-10 | 2.27935e-10 |
| 7       | 2.33967e-10 | 1.86807e-10 | 2.0309e-10  | 1.53592e-10 | 2.56823e-10 | 1.80765e-10 | 1.50661e-10 | 2.65374e-10 |
| 8       | 2.67156e-10 | 2.13579e-10 | 2.3296e-10  | 1.75223e-10 | 2.93874e-10 | 2.06952e-10 | 1.72625e-10 | 3.03726e-10 |
| 9       | 3.00039e-10 | 2.4047e-10  | 2.61554e-10 | 1.97035e-10 | 3.30565e-10 | 2.32594e-10 | 1.94231e-10 | 3.41719e-10 |
| 10      | 3.338e-10   | 2.66937e-10 | 2.90881e-10 | 2.19394e-10 | 3.67435e-10 | 2.58781e-10 | 2.15287e-10 | 3.79162e-10 |
| 11      | 3.67198e-10 | 2.93521e-10 | 3.19659e-10 | 2.41205e-10 | 4.03639e-10 | 2.83878e-10 | 2.36522e-10 | 4.16967e-10 |
| 12      | 4.00596e-10 | 3.20655e-10 | 3.48622e-10 | 2.63017e-10 | 4.4045e-10  | 3.10005e-10 | 2.58487e-10 | 4.54957e-10 |
| 13      | 4.34358e-10 | 3.47424e-10 | 3.77764e-10 | 2.8501e-10  | 4.77866e-10 | 3.36253e-10 | 2.80211e-10 | 4.93129e-10 |
| 14      | 4.67486e-10 | 3.73832e-10 | 4.0709e-10  | 3.07005e-10 | 5.14733e-10 | 3.62621e-10 | 3.02052e-10 | 5.31387e-10 |
| 15      | 5.00974e-10 | 4.00783e-10 | 4.36775e-10 | 3.28818e-10 | 5.51789e-10 | 3.88778e-10 | 3.23839e-10 | 5.69653e-10 |
| 16      | 5.34737e-10 | 4.27553e-10 | 4.64829e-10 | 3.50449e-10 | 5.87749e-10 | 4.13722e-10 | 3.44529e-10 | 6.06731e-10 |
| 17      | 5.67953e-10 | 4.54141e-10 | 4.95061e-10 | 3.72986e-10 | 6.24982e-10 | 4.40273e-10 | 3.66308e-10 | 6.44898e-10 |
| 18      | 6.01351e-10 | 4.80726e-10 | 5.24387e-10 | 3.95343e-10 | 6.61854e-10 | 4.6628e-10  | 3.88095e-10 | 6.83101e-10 |
| 19      | 6.34568e-10 | 5.07679e-10 | 5.53164e-10 | 4.17339e-10 | 6.98724e-10 | 4.91919e-10 | 4.09514e-10 | 7.21059e-10 |

表 4: 非線形成分値指標 — アクチュエータをランダム駆動

| ID | 01           | 02           | 03          | 04          | 05          | 06          | 07          | 08           |
|----|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1  | 1.44367e-10  | 1.74412e-10  | 1.43666e-10 | 1.5806e-10  | 1.42482e-10 | 1.66392e-10 | 1.55374e-10 | 1.25742e-10  |
| 2  | 1.60795e-10  | 1.83336e-10  | 1.68531e-10 | 1.26594e-10 | 1.85737e-10 | 1.20839e-10 | 1.35877e-10 | 1.5017e-10   |
| 3  | 1.97567e-10  | 2.05803e-10  | 2.42544e-10 | 1.99121e-10 | 1.70155e-10 | 1.72553e-10 | 2.28714e-10 | 1.41065e-10  |
| 4  | 1.56408e-10  | 1.83592e-10  | 1.34297e-10 | 1.99976e-10 | 1.67484e-10 | 1.52443e-10 | 1.59803e-10 | 2.01312e-10  |
| 5  | 1.58726e-10  | 1.85262e-10  | 1.23546e-10 | 1.9615e-10  | 2.04628e-10 | 1.94125e-10 | 1.88152e-10 | 1.32676e-10  |
| 6  | 1.7515e-10   | 1.64443e-10  | 1.31057e-10 | 1.83347e-10 | 1.41501e-10 | 2.11917e-10 | 1.43936e-10 | 2.36029e-10  |
| 7  | 1.63482e-10  | 1.813e-10    | 1.6936e-10  | 1.46508e-10 | 1.5636e-10  | 1.62259e-10 | 2.0365e-10  | 1.32183e-10  |
| 8  | 1.66317e-10  | 1.61454e-10  | 1.04998e-10 | 1.39939e-10 | 1.17539e-10 | 1.78203e-10 | 1.75526e-10 | 1.16156e-10  |
| 9  | 1.40507e-10  | 1.97623e-10  | 1.7117e-10  | 2.59406e-10 | 2.18955e-10 | 2.06671e-10 | 1.77465e-10 | 1.84977e-10  |
| 10 | 1.04458e-10  | 1.125e-10    | 1.90722e-10 | 1.75212e-10 | 1.05682e-10 | 1.93275e-10 | 1.57871e-10 | 2.23907e-10  |
| 11 | 1.111273e-10 | 2.100111e-10 | 1.36558e-10 | 1.35334e-10 | 1.47961e-10 | 1.48096e-10 | 1.73749e-10 | 1.97795e-10  |
| 12 | 2.30636e-10  | 2.04261e-10  | 1.8293e-10  | 2.01906e-10 | 2.27297e-10 | 2.02046e-10 | 1.83519e-10 | 1.55478e-10  |
| 13 | 1.60288e-10  | 1.55227e-10  | 1.60417e-10 | 1.71329e-10 | 1.60675e-10 | 1.38284e-10 | 1.92038e-10 | 1.58193e-10  |
| 14 | 2.81308e-10  | 1.59073e-10  | 2.02653e-10 | 1.87595e-10 | 2.12637e-10 | 1.28397e-10 | 1.7652e-10  | 1.6928e-10   |
| 15 | 2.19847e-10  | 1.31385e-10  | 1.76807e-10 | 1.39564e-10 | 1.55034e-10 | 1.34099e-10 | 2.00664e-10 | 1.53306e-10  |
| 16 | 1.46796e-10  | 1.26398e-10  | 1.66096e-10 | 2.27242e-10 | 1.61315e-10 | 1.53413e-10 | 2.46365e-10 | 2.15061e-10  |
| 17 | 2.28502e-10  | 1.49506e-10  | 2.428e-10   | 1.64696e-10 | 1.83334e-10 | 1.95578e-10 | 2.21089e-10 | 1.56904e-10  |
| 18 | 1.74341e-10  | 1.5269e-10   | 2.02152e-10 | 1.07907e-10 | 2.4451e-10  | 1.85333e-10 | 1.30172e-10 | 1.64517e-10  |
| 19 | 1.82823e-10  | 1.92568e-10  | 1.09218e-10 | 1.33363e-10 | 1.82469e-10 | 1.03407e-10 | 1.84879e-10 | 1.348825e-10 |

### 3.2 異なる並進・回転状態についての比較

異なる並進・回転状態についての比較には二つあり、一つ目には作成された変換行列の比較と、二つ目はある状態において作成した変換行列を利用して別な状態での線形性確認となる。

#### 3.2.1 変換行列の比較

異なる並進・回転状態についての変換行列の比較について、前節での各条件に対する特異値を並べたものが表 5 となる。表中の特異値の変化は、1 ~ 52 までは 0.1% 以下と微小変化しかしておらず、53,54 についても並進だけならば 1% 程度と変化は大きくない。逆に、セグメントに 0.1° の回転が加わると曲率モードの特異値は 5 割変化するともいえる。ただし、曲率モードをかなり強くしか抑えられていない標準ギャップセンサー配置での結果であるため、より強く曲率モードを把握できるようなギャップセンサー配置をとった場合に改善する可能性は残されている<sup>10</sup>。

特異ベクトルの比較については、基準ギャップセンサー配置図 2, 3 に対して、最も大きく動いているモードである並進・回転モード 08 の図 5, 6 を比較しても明らかに変化しているという様子はない。

表 5: 変換行列の特異値の比較 (並進・回転なしに対する変化 %)

| ID | (01)    | 02     | 03     | 04     | 05     | 06     | 07     | 08     |
|----|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 3.5124  | 0.003  | 0.007  | 0.012  | 0.062  | 0.066  | 0.07   | 0.074  |
| 2  | 3.49277 | 0      | -0.002 | -0.002 | -0.003 | -0.003 | -0.005 | -0.005 |
| 3  | 3.49277 | 0      | -0.002 | -0.002 | -0.003 | -0.003 | -0.005 | -0.005 |
| 4  | 3.34678 | -0.002 | -0.011 | -0.014 | -0.054 | -0.057 | -0.065 | -0.068 |
| 5  | 3.34678 | -0.002 | -0.011 | -0.014 | -0.054 | -0.057 | -0.065 | -0.068 |
| 6  | 3.16786 | -0.002 | -0.017 | -0.019 | -0.059 | -0.062 | -0.077 | -0.079 |
| 7  | 3.16429 | -0.001 | -0.005 | -0.006 | -0.023 | -0.026 | -0.028 | -0.031 |
| 8  | 3.15096 | 0.002  | 0.006  | 0.008  | 0.041  | 0.045  | 0.047  | 0.051  |
| 9  | 3.0943  | 0.001  | 0.006  | 0.007  | 0.036  | 0.038  | 0.043  | 0.044  |
| 10 | 3.0943  | 0.001  | 0.006  | 0.007  | 0.036  | 0.038  | 0.043  | 0.044  |
| 11 | 2.9725  | -0.006 | -0.008 | -0.015 | -0.109 | -0.116 | -0.118 | -0.125 |
| 12 | 2.90303 | 0      | 0.004  | 0.005  | 0.013  | 0.014  | 0.018  | 0.018  |
| 13 | 2.90303 | 0      | 0.004  | 0.005  | 0.013  | 0.014  | 0.018  | 0.018  |
| 14 | 2.88329 | 0.002  | 0.004  | 0.006  | 0.031  | 0.034  | 0.036  | 0.038  |
| 15 | 2.88329 | 0.002  | 0.004  | 0.006  | 0.031  | 0.034  | 0.036  | 0.038  |
| 16 | 2.75805 | -0.004 | -0.017 | -0.021 | -0.101 | -0.106 | -0.118 | -0.122 |
| 17 | 2.75805 | -0.004 | -0.017 | -0.021 | -0.101 | -0.106 | -0.118 | -0.122 |
| 18 | 2.72298 | -0.001 | -0.003 | -0.005 | -0.037 | -0.039 | -0.041 | -0.043 |
| 19 | 2.62754 | -0.004 | -0.019 | -0.023 | -0.103 | -0.107 | -0.122 | -0.127 |
| 20 | 2.62754 | -0.004 | -0.019 | -0.023 | -0.103 | -0.107 | -0.122 | -0.127 |
| 21 | 2.57392 | -0.003 | -0.02  | -0.023 | -0.102 | -0.106 | -0.123 | -0.127 |
| 22 | 2.37208 | 0.002  | 0.007  | 0.009  | 0.041  | 0.043  | 0.048  | 0.051  |
| 23 | 2.37208 | 0.002  | 0.007  | 0.009  | 0.041  | 0.043  | 0.048  | 0.051  |
| 24 | 2.28191 | 0.003  | 0.01   | 0.013  | 0.101  | 0.105  | 0.112  | 0.115  |
| 25 | 2.15158 | 0      | -0.002 | -0.001 | 0.007  | 0.008  | 0.005  | 0.005  |
| 26 | 2.00355 | 0      | -0.004 | -0.004 | 0.021  | 0.021  | 0.016  | 0.016  |
| 27 | 2.00355 | 0      | -0.004 | -0.004 | 0.021  | 0.021  | 0.016  | 0.016  |

<sup>10</sup>逆に特異値の比率での変化でなく絶対値としての変化で見るべきなのかもしれない。変化量の絶対値でみるとどの固有値でもオーダーではあまり変わらない変化量となっている。

表 5: 変換行列の特異値の比較 (並進・回転なしに対する変化 %)

| ID | (01)    | 02     | 03     | 04     | 05      | 06      | 07      | 08     |
|----|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|
| 28 | 1.88131 | 0      | -0.005 | -0.006 | -0.01   | -0.011  | -0.016  | -0.017 |
| 29 | 1.88131 | 0      | -0.005 | -0.006 | -0.01   | -0.011  | -0.016  | -0.017 |
| 30 | 1.8197  | 0      | -0.013 | -0.013 | -0.007  | -0.007  | -0.02   | -0.02  |
| 31 | 1.35162 | 0.008  | 0.025  | 0.034  | 0.218   | 0.227   | 0.244   | 0.253  |
| 32 | 1.35162 | 0.008  | 0.025  | 0.034  | 0.218   | 0.227   | 0.244   | 0.253  |
| 33 | 1.31897 | 0.006  | 0.009  | 0.015  | 0.163   | 0.17    | 0.172   | 0.179  |
| 34 | 1.31897 | 0.006  | 0.009  | 0.015  | 0.163   | 0.17    | 0.172   | 0.179  |
| 35 | 1.21342 | 0.009  | 0.029  | 0.038  | 0.255   | 0.264   | 0.285   | 0.294  |
| 36 | 1.19964 | 0.006  | 0.01   | 0.017  | 0.145   | 0.152   | 0.155   | 0.162  |
| 37 | 0.68835 | -0.005 | 0.013  | 0.007  | -0.073  | -0.079  | -0.059  | -0.065 |
| 38 | 0.68835 | -0.005 | 0.013  | 0.007  | -0.073  | -0.079  | -0.059  | -0.065 |
| 39 | 0.55848 | -0.001 | 0.008  | 0.007  | -0.036  | -0.037  | -0.028  | -0.029 |
| 40 | 0.47374 | 0      | 0.013  | 0.013  | -0.006  | -0.006  | 0.006   | 0.006  |
| 41 | 0.47374 | 0      | 0.013  | 0.013  | -0.006  | -0.006  | 0.006   | 0.006  |
| 42 | 0.40989 | 0.001  | 0.031  | 0.033  | 0.012   | 0.014   | 0.044   | 0.046  |
| 43 | 0.22977 | 0.006  | 0.019  | 0.025  | 0.072   | 0.078   | 0.091   | 0.097  |
| 44 | 0.22977 | 0.006  | 0.019  | 0.025  | 0.072   | 0.078   | 0.091   | 0.097  |
| 45 | 0.2124  | 0.003  | 0.022  | 0.025  | 0.021   | 0.025   | 0.043   | 0.047  |
| 46 | 0.2124  | 0.003  | 0.022  | 0.025  | 0.021   | 0.025   | 0.043   | 0.047  |
| 47 | 0.1886  | -0.001 | 0.008  | 0.007  | -0.03   | -0.031  | -0.021  | -0.022 |
| 48 | 0.1886  | -0.001 | 0.008  | 0.007  | -0.03   | -0.031  | -0.021  | -0.022 |
| 49 | 0.1758  | 0.009  | 0.015  | 0.025  | 0.135   | 0.145   | 0.151   | 0.16   |
| 50 | 0.11354 | -0.007 | 0.006  | 0      | -0.141  | -0.147  | -0.136  | -0.141 |
| 51 | 0.05534 | -0.005 | 0.019  | 0.013  | -0.099  | -0.105  | -0.08   | -0.086 |
| 52 | 0.05534 | -0.005 | 0.019  | 0.013  | -0.099  | -0.105  | -0.08   | -0.086 |
| 53 | 0.00219 | 0.597  | 1.845  | 2.443  | -9.212  | -8.534  | -7.362  | -6.685 |
| 54 | 0.00066 | -1.585 | 0.453  | -1.131 | -42.256 | -43.843 | -41.805 | -43.39 |

### 3.2.2 並進・回転状態が異なる変換行列を適用した場合の影響

ギャップセンサー配置や変換行列作成の条件は並進・回転状態が同じ場合での線形性試験のものと同じものとする。セグメントの並進・回転についても同じく、以下のような各条件について試験した。なお、簡単化のために全てのセグメントについて同じ並進・回転の条件を加えている。変換行列については、並進・回転なし (ID 01) の時の変換行列を全てについて適用した。

- 01 並進・回転なし
- 02 並進 (0.1mm, 0.0mm)、回転なし
- 03 並進 (0.0mm, 0.1mm)、回転なし
- 04 並進 (0.1mm, 0.1mm)、回転なし
- 05 並進なし、回転 0.1°
- 06 並進 (0.1mm, 0.0mm)、回転 0.1°
- 07 並進 (0.0mm, 0.1mm)、回転 0.1°

## 08 並進 (0.1mm, 0.1mm)、回転 0.1°

試験で変化させるアクチュエータ駆動量のパターンについては以下の 3 通りの試験を行い、それぞれ表の結果が得られた。

なお、全てのセグメントを 0.1mm 並進させた場合に、全てのアクチュエータを原点に置いたときのギャップセンサーの読み出し値、つまりギャップセンサーの検知方向が傾いている影響は(ギャップセンサーの配置場所にもよるが) $5 \sim 10 \mu\text{m}$  程度となっている。つまり、並進量の  $1/10 \sim 1/20$  程度の影響が出る。

- 内環の仮想分を含めて 57 本のアクチュエータを一つずつ 1mm 駆動: 表 6
- 全アクチュエータを同じ量駆動、 $1 \sim 19 \mu\text{m}$  を  $1 \mu\text{m}$  ごと: 表 7
- 内環以外のアクチュエータをランダム量駆動 固定値  $1 \mu\text{m}$ 、ランダム値  $2.5 \mu\text{m}$ : 表 8

並進・回転を合わせた変換行列を利用した場合と同じく、全てのアクチュエータを同じ量駆動した際の駆動量と差の間には、同じ並進・回転の状態であればほぼ線形の関係がみられている。セグメントの並進と回転での影響の差を見ると、セグメントの並進の場合は非線形成分はオーダーで変化することなくほぼ同程度の値を示しているが、セグメントの回転のほうでは 30 倍程度大きな非線形成分を示している。これについての評価は微妙ではあるが、 $0.1^\circ$  セグメントが回転した場合にセグメントの 4 隅での移動量が 1mm となり並進で動かしている 0.1mm に比べて 10 倍大きい<sup>11</sup>ことの影響が見えている可能性もある。この  $0.1^\circ$  回転した場合の非線形成分はアクチュエータの駆動量に対して  $10^{-7}$  のオーダーであるので、実際には線形性近似は有効であるといえる。

アクチュエータを 1 本ずつ駆動させたときの非線形量は、内環を除く 54 アクチュエータに対して、リファレンスである並進・回転なしでの結果に比べて、並進では  $10^{4 \sim 5}$  程度、回転では  $10^{5 \sim 6}$  程度大きい。この並進・回転での変化の差は上に述べたように  $0.1^\circ$  回転に相当する並進量が 0.1mm に比べて一桁大きい可能性があるという点に符合するので、変化割合が実際の移動距離量の関数になっている可能性はある。また、非線形量としてはアクチュエータの駆動量は 1mm であるので、0.1mm 並進で駆動量比  $10^{-5}$  のオーダーであるといえる。この比は、アクチュエータの最大駆動量 1mm とギャップセンサーの最小読み出しきっぷ  $10 \text{ nm}$ <sup>12</sup> の比に近く、アクチュエータを最大駆動させた場合に影響が見られる可能性は残る。

最後のランダム量駆動した場合の出力値について、並進・回転量が同じ変換行列を適用したときに比べて、並進の場合は  $10^3$  程度、回転の場合は  $10^4$  程度の非線形量になっている。前と同じく非線形量をアクチュエータ駆動量に対する比で考えると、この場合は並進の場合で  $10^{-4}$ 、回転の場合で  $10^{-3}$  の非線形性が出現していることになり、アクチュエータの最大駆動量 1mm とギャップセンサーの最小読み出しきっぷ  $10 \text{ nm}$  の比よりも大きな非線形性が見られるといえる。アクチュエータを最大駆動量程度になるまで駆動した場合には、変換行列の非線形性に注意する必要がある。

<sup>11</sup> ギャップセンサー取り付け位置もセグメントの縁に相当する場所があるので、回転中心からの距離はセグメントの 4 隅と同程度といえる。

<sup>12</sup> ただし、読み出し制御回路の段階で多数回平均することにより出力値におけるノイズとしてはこれよりも多少小さくなる。

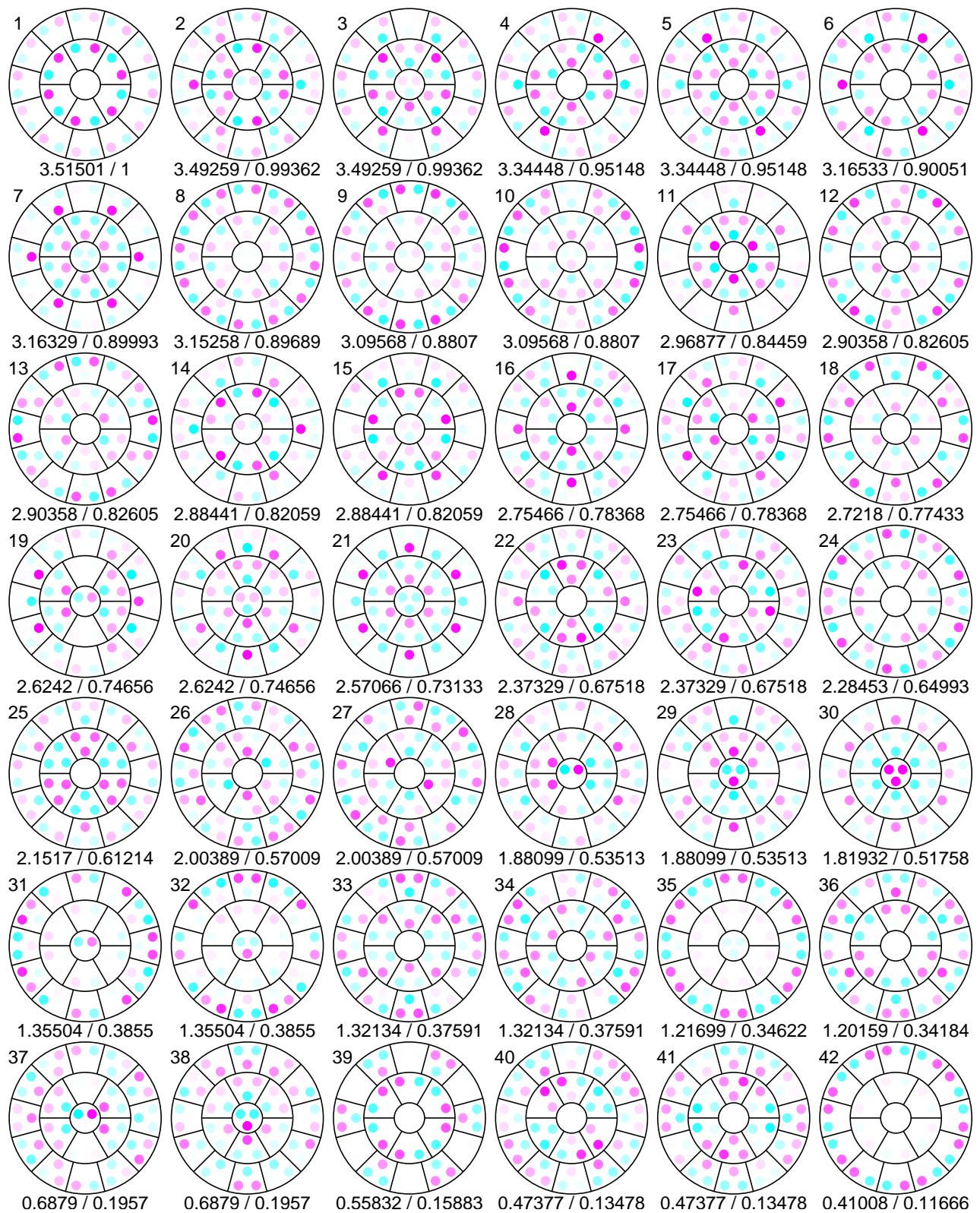


図 5: 並進・回転モード 08 での特異ベクトル分布 I

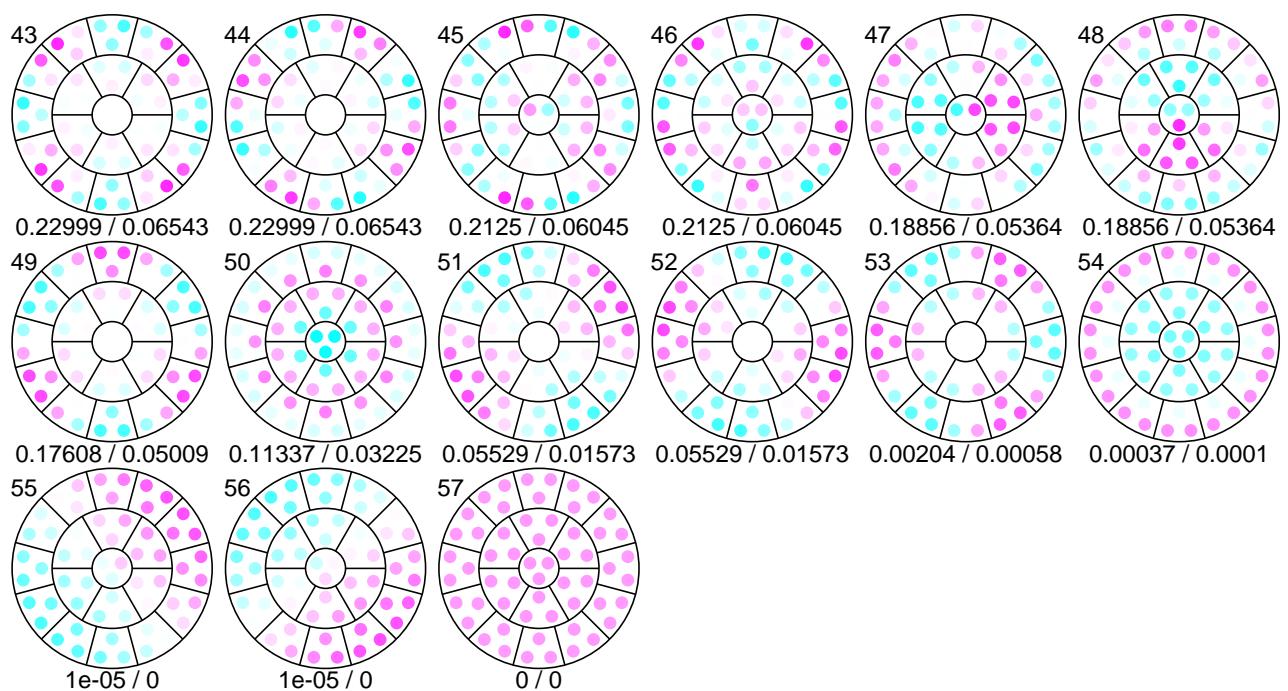


図 6: 並進・回転モード 08 での特異ベクトル分布 II

表 6: 非線形成分値指標 — 1 本ずつアクチュエータを駆動

| ID | 01           | 02          | 03          | 04          | 05          | 06          | 07          | 08          |
|----|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1  | 9.00209e-10  | 8.80541e-06 | 3.57463e-05 | 4.45508e-05 | 0.000208682 | 0.000217487 | 0.000234176 | 0.000242981 |
| 2  | 6.61598e-10  | 1.95088e-05 | 2.30876e-05 | 1.19871e-05 | 0.000160113 | 0.000155452 | 0.000172997 | 0.000168336 |
| 3  | 8.80907e-10  | 2.55512e-05 | 1.79503e-05 | 3.82099e-05 | 0.000140148 | 0.000146191 | 0.000145249 | 0.000151292 |
| 4  | 9.01429e-10  | 8.80541e-06 | 3.57463e-05 | 4.45508e-05 | 0.000208682 | 0.000217487 | 0.000234176 | 0.000242981 |
| 5  | 6.58766e-10  | 1.95088e-05 | 2.30876e-05 | 1.19871e-05 | 0.000160113 | 0.000155452 | 0.000172997 | 0.000168336 |
| 6  | 8.79433e-10  | 2.55512e-05 | 1.79503e-05 | 3.82099e-05 | 0.000140148 | 0.000146191 | 0.000145249 | 0.000151292 |
| 7  | 8.99099e-10  | 8.80541e-06 | 3.57463e-05 | 4.45508e-05 | 0.000208682 | 0.000217487 | 0.000234176 | 0.000242981 |
| 8  | 6.59148e-10  | 1.95088e-05 | 2.30876e-05 | 1.19871e-05 | 0.000160113 | 0.000155452 | 0.000172997 | 0.000168336 |
| 9  | 8.808e-10    | 2.55512e-05 | 1.79503e-05 | 3.82099e-05 | 0.000140148 | 0.000146191 | 0.000145249 | 0.000151292 |
| 10 | 8.99152e-10  | 8.80541e-06 | 3.57463e-05 | 4.45508e-05 | 0.000208682 | 0.000217487 | 0.000234176 | 0.000242981 |
| 11 | 6.59339e-10  | 1.95088e-05 | 2.30876e-05 | 1.19871e-05 | 0.000160113 | 0.000155452 | 0.000172997 | 0.000168336 |
| 12 | 8.81305e-10  | 2.55512e-05 | 1.79503e-05 | 3.82099e-05 | 0.000140148 | 0.000146191 | 0.000145249 | 0.000151292 |
| 13 | 9.00501e-10  | 8.80541e-06 | 3.57463e-05 | 4.45508e-05 | 0.000208682 | 0.000217487 | 0.000234176 | 0.000242981 |
| 14 | 6.60574e-10  | 1.95088e-05 | 2.30876e-05 | 1.19871e-05 | 0.000160113 | 0.000155452 | 0.000172997 | 0.000168336 |
| 15 | 8.82097e-10  | 2.55512e-05 | 1.79503e-05 | 3.82099e-05 | 0.000140148 | 0.000146191 | 0.000145249 | 0.000151292 |
| 16 | 9.02144e-10  | 8.80541e-06 | 3.57463e-05 | 4.45508e-05 | 0.000208682 | 0.000217487 | 0.000234176 | 0.000242981 |
| 17 | 6.60437e-10  | 1.95088e-05 | 2.30876e-05 | 1.19871e-05 | 0.000160113 | 0.000155452 | 0.000172997 | 0.000168336 |
| 18 | 8.811104e-10 | 2.55512e-05 | 1.79503e-05 | 3.82099e-05 | 0.000140148 | 0.000146191 | 0.000145249 | 0.000151292 |
| 19 | 5.85112e-10  | 5.40183e-06 | 2.58818e-05 | 3.1283e-05  | 0.000146973 | 0.000152374 | 0.000172798 | 0.0001782   |
| 20 | 8.31006e-10  | 1.29561e-05 | 1.62109e-05 | 6.72461e-06 | 0.000101849 | 8.88928e-05 | 0.00011806  | 0.000105104 |
| 21 | 4.06578e-10  | 1.83573e-05 | 9.67122e-06 | 2.80284e-05 | 8.46229e-05 | 9.63616e-05 | 8.88407e-05 | 0.000100579 |
| 22 | 5.86073e-10  | 1.08035e-05 | 2.98908e-05 | 3.52921e-05 | 0.000195902 | 0.000206705 | 0.00021633  | 0.000227133 |
| 23 | 8.33056e-10  | 1.53776e-05 | 1.82154e-05 | 1.21398e-05 | 0.000133157 | 0.000117779 | 0.000151372 | 0.000135995 |
| 24 | 4.08265e-10  | 2.07788e-05 | 1.16757e-05 | 3.24545e-05 | 0.000115976 | 0.000125293 | 0.000118189 | 0.000127506 |
| 25 | 5.85112e-10  | 5.40183e-06 | 2.58818e-05 | 3.1283e-05  | 0.000146973 | 0.000152374 | 0.000172798 | 0.0001782   |
| 26 | 8.31006e-10  | 1.29561e-05 | 1.62109e-05 | 6.72461e-06 | 0.000101849 | 8.88928e-05 | 0.00011806  | 0.000105104 |
| 27 | 4.06578e-10  | 1.83573e-05 | 9.67122e-06 | 2.80284e-05 | 8.46229e-05 | 9.63616e-05 | 8.88407e-05 | 0.000100579 |
| 28 | 5.86073e-10  | 1.08035e-05 | 2.98908e-05 | 3.52921e-05 | 0.000195902 | 0.000206705 | 0.00021633  | 0.000227133 |
| 29 | 8.311173e-10 | 1.53776e-05 | 1.82154e-05 | 1.21398e-05 | 0.000133157 | 0.000117779 | 0.000151372 | 0.000135995 |
| 30 | 4.06744e-10  | 2.07788e-05 | 1.16757e-05 | 3.24545e-05 | 0.000115976 | 0.000125293 | 0.000118189 | 0.000127506 |
| 31 | 5.85308e-10  | 5.40183e-06 | 2.58818e-05 | 3.1283e-05  | 0.000146973 | 0.000152374 | 0.000172798 | 0.0001782   |

表 6: 非線形形成分値指標 — 1 本ずつアクチュエータを駆動

| ID | 01          | 02          | 03          | 04          | 05          | 06          | 07          | 08          |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 32 | 8.33523e-10 | 1.29561e-05 | 1.62109e-05 | 6.72461e-06 | 0.000101849 | 8.88928e-05 | 0.00011806  | 0.000105104 |
| 33 | 4.08098e-10 | 1.83573e-05 | 9.67122e-06 | 2.80284e-05 | 8.46229e-05 | 9.63616e-05 | 8.88407e-05 | 0.000100579 |
| 34 | 5.86073e-10 | 1.08035e-05 | 2.98908e-05 | 3.52921e-05 | 0.000195902 | 0.000206705 | 0.00021633  | 0.000227133 |
| 35 | 8.31369e-10 | 1.53776e-05 | 1.82154e-05 | 1.21398e-05 | 0.000133157 | 0.000117779 | 0.000151372 | 0.000135995 |
| 36 | 4.06744e-10 | 2.07788e-05 | 1.16757e-05 | 3.24545e-05 | 0.000115976 | 0.000125293 | 0.000118189 | 0.000127506 |
| 37 | 5.85112e-10 | 5.40183e-06 | 2.58818e-05 | 3.1283e-05  | 0.000146973 | 0.000152374 | 0.000172798 | 0.0001782   |
| 38 | 8.31202e-10 | 1.29561e-05 | 1.62109e-05 | 6.72461e-06 | 0.000101849 | 8.88928e-05 | 0.00011806  | 0.000105104 |
| 39 | 4.06578e-10 | 1.83573e-05 | 9.67122e-06 | 2.80284e-05 | 8.46229e-05 | 9.63616e-05 | 8.88407e-05 | 0.000100579 |
| 40 | 5.8616e-10  | 1.08035e-05 | 2.98908e-05 | 3.52921e-05 | 0.000195902 | 0.000206705 | 0.00021633  | 0.000227133 |
| 41 | 8.31064e-10 | 1.53776e-05 | 1.82154e-05 | 1.21398e-05 | 0.000133157 | 0.000117779 | 0.000151372 | 0.000135995 |
| 42 | 4.06111e-10 | 2.07788e-05 | 1.16757e-05 | 3.24545e-05 | 0.000115976 | 0.000125293 | 0.000118189 | 0.000127506 |
| 43 | 2.82192e-10 | 5.40153e-06 | 2.58821e-05 | 3.12833e-05 | 0.000146973 | 0.000152375 | 0.000172799 | 0.0001782   |
| 44 | 8.30373e-10 | 1.29561e-05 | 1.62109e-05 | 6.72461e-06 | 0.000101849 | 8.88928e-05 | 0.00011806  | 0.000105104 |
| 45 | 4.06578e-10 | 1.83573e-05 | 9.67122e-06 | 2.80284e-05 | 8.46229e-05 | 9.63616e-05 | 8.88407e-05 | 0.000100579 |
| 46 | 5.86073e-10 | 1.08035e-05 | 2.98908e-05 | 3.52921e-05 | 0.000195902 | 0.000206705 | 0.00021633  | 0.000227133 |
| 47 | 8.31173e-10 | 1.53776e-05 | 1.82154e-05 | 1.21398e-05 | 0.000133157 | 0.000117779 | 0.000151372 | 0.000135995 |
| 48 | 4.06744e-10 | 2.07788e-05 | 1.16757e-05 | 3.24545e-05 | 0.000115976 | 0.000125293 | 0.000118189 | 0.000127506 |
| 49 | 5.85804e-10 | 5.40183e-06 | 2.58818e-05 | 3.1283e-05  | 0.000146973 | 0.000152374 | 0.000172798 | 0.0001782   |
| 50 | 8.31036e-10 | 1.2956e-05  | 1.62109e-05 | 6.72461e-06 | 0.000101849 | 8.88928e-05 | 0.00011806  | 0.000105104 |
| 51 | 4.06578e-10 | 1.83573e-05 | 9.67122e-06 | 2.80284e-05 | 8.46229e-05 | 9.63616e-05 | 8.88407e-05 | 0.000100579 |
| 52 | 5.86073e-10 | 1.08035e-05 | 2.98908e-05 | 3.52921e-05 | 0.000195902 | 0.000206705 | 0.00021633  | 0.000227133 |
| 53 | 8.31173e-10 | 1.53776e-05 | 1.82154e-05 | 1.21398e-05 | 0.000133157 | 0.000117779 | 0.000151372 | 0.000135995 |
| 54 | 4.06744e-10 | 2.07788e-05 | 1.16757e-05 | 3.24545e-05 | 0.000115976 | 0.000125293 | 0.000118189 | 0.000127506 |
| 55 | 1.99716e-12 | 7.68823e-06 | 8.84638e-06 | 1.21114e-05 | 4.578e-05   | 5.34682e-05 | 5.02032e-05 | 5.78914e-05 |
| 56 | 1.99716e-12 | 7.68823e-06 | 8.84638e-06 | 1.21114e-05 | 4.578e-05   | 5.34682e-05 | 5.02032e-05 | 5.78914e-05 |
| 57 | 1.99705e-12 | 7.68822e-06 | 8.84638e-06 | 1.21114e-05 | 4.578e-05   | 5.34682e-05 | 5.02032e-05 | 5.78914e-05 |

表 7: 非線形成分値指標 — アクチュエータを全て同じ値に駆動

| $\mu\text{m}$ | 01          | 02          | 03          | 04          | 05          | 06          | 07          | 08          |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1             | 3.26682e-11 | 3.31835e-11 | 3.32152e-11 | 3.37596e-11 | 9.90979e-10 | 9.91163e-10 | 9.90799e-10 | 9.90797e-10 |
| 2             | 6.62502e-11 | 6.62193e-11 | 6.67945e-11 | 6.75215e-11 | 1.98196e-09 | 1.98214e-09 | 1.9816e-09  | 1.9816e-09  |
| 3             | 9.96482e-11 | 9.98005e-11 | 1.00195e-10 | 1.00558e-10 | 2.97276e-09 | 2.97239e-09 | 2.97239e-09 | 2.97239e-09 |
| 4             | 1.32866e-10 | 1.33018e-10 | 1.33048e-10 | 1.33412e-10 | 3.96282e-09 | 3.96319e-09 | 3.96319e-09 | 3.96337e-09 |
| 5             | 1.66264e-10 | 1.66598e-10 | 1.66629e-10 | 1.66811e-10 | 4.95426e-09 | 4.95399e-09 | 4.95399e-09 | 4.95453e-09 |
| 6             | 2.0039e-10  | 2.00541e-10 | 2.00207e-10 | 2.00572e-10 | 5.94551e-09 | 5.94548e-09 | 5.94551e-09 | 5.94515e-09 |
| 7             | 2.33967e-10 | 2.33756e-10 | 2.33788e-10 | 2.34151e-10 | 6.93667e-09 | 6.93667e-09 | 6.93631e-09 | 6.93631e-09 |
| 8             | 2.67156e-10 | 2.67338e-10 | 2.67733e-10 | 2.67916e-10 | 7.92747e-09 | 7.92747e-09 | 7.92729e-09 | 7.92729e-09 |
| 9             | 3.00039e-10 | 3.00313e-10 | 3.00768e-10 | 3.01495e-10 | 8.9179e-09  | 8.91809e-09 | 8.91754e-09 | 8.91754e-09 |
| 10            | 3.338e-10   | 3.33952e-10 | 3.34164e-10 | 3.34529e-10 | 9.90888e-09 | 9.90888e-09 | 9.90906e-09 | 9.90906e-09 |
| 11            | 3.67198e-10 | 3.67351e-10 | 3.67018e-10 | 3.67382e-10 | 1.08994e-08 | 1.08997e-08 | 1.09e-08    | 1.09002e-08 |
| 12            | 4.00596e-10 | 4.0093e-10  | 4.00779e-10 | 4.00962e-10 | 1.18905e-08 | 1.18905e-08 | 1.18907e-08 | 1.18912e-08 |
| 13            | 4.34358e-10 | 4.34511e-10 | 4.34359e-10 | 4.34722e-10 | 1.2882e-08  | 1.28816e-08 | 1.28814e-08 | 1.28813e-08 |
| 14            | 4.67486e-10 | 4.67366e-10 | 4.67759e-10 | 4.68124e-10 | 1.38726e-08 | 1.38726e-08 | 1.38725e-08 | 1.38725e-08 |
| 15            | 5.00974e-10 | 5.01127e-10 | 5.01522e-10 | 5.01704e-10 | 1.48634e-08 | 1.48634e-08 | 1.48638e-08 | 1.48638e-08 |
| 16            | 5.34737e-10 | 5.35071e-10 | 5.35099e-10 | 5.35463e-10 | 1.58542e-08 | 1.58544e-08 | 1.58546e-08 | 1.58546e-08 |
| 17            | 5.67953e-10 | 5.68106e-10 | 5.67955e-10 | 5.68683e-10 | 1.68452e-08 | 1.68452e-08 | 1.68457e-08 | 1.68457e-08 |
| 18            | 6.01351e-10 | 6.01504e-10 | 6.01352e-10 | 6.01716e-10 | 1.78362e-08 | 1.78362e-08 | 1.78366e-08 | 1.78366e-08 |
| 19            | 6.34568e-10 | 6.34902e-10 | 6.34934e-10 | 6.35116e-10 | 1.88272e-08 | 1.88273e-08 | 1.88275e-08 | 1.88275e-08 |

表 8: 非線形成分値指標 — アクチュエータをランダム駆動

| ID | 01          | 02          | 03          | 04          | 05          | 06          | 07          | 08          |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1  | 1.74418e-10 | 3.02186e-07 | 2.9285e-07  | 3.12189e-07 | 1.65776e-06 | 1.87333e-06 | 2.08769e-06 | 2.30407e-06 |
| 2  | 1.42051e-10 | 2.28388e-07 | 3.1027e-07  | 3.90108e-07 | 1.90362e-06 | 2.49315e-06 | 2.65255e-06 | 2.62472e-06 |
| 3  | 1.80216e-10 | 2.66512e-07 | 3.24375e-07 | 4.06392e-07 | 1.55e-06    | 1.97205e-06 | 1.60753e-06 | 2.48945e-06 |
| 4  | 1.72218e-10 | 2.9201e-07  | 2.86084e-07 | 3.91052e-07 | 1.55117e-06 | 2.61455e-06 | 2.3582e-06  | 2.30358e-06 |
| 5  | 2.08263e-10 | 2.28161e-07 | 2.08009e-07 | 3.98022e-07 | 2.23582e-06 | 2.0078e-06  | 2.27346e-06 | 1.91787e-06 |
| 6  | 1.9339e-10  | 2.80564e-07 | 2.88219e-07 | 4.28262e-07 | 2.03246e-06 | 2.48068e-06 | 1.84909e-06 | 2.11256e-06 |
| 7  | 1.80385e-10 | 2.82055e-07 | 2.90612e-07 | 4.27253e-07 | 2.15658e-06 | 2.59125e-06 | 2.25338e-06 | 1.80522e-06 |
| 8  | 1.32388e-10 | 2.31408e-07 | 4.61339e-07 | 4.07749e-07 | 2.02783e-06 | 2.18583e-06 | 2.54472e-06 | 2.62528e-06 |
| 9  | 1.79737e-10 | 2.17863e-07 | 3.21397e-07 | 2.28343e-07 | 1.76808e-06 | 2.56868e-06 | 2.56607e-06 | 2.32049e-06 |
| 10 | 1.65812e-10 | 2.57393e-07 | 2.97094e-07 | 3.81504e-07 | 2.13213e-06 | 1.61864e-06 | 2.07725e-06 | 2.67023e-06 |
| 11 | 1.33364e-10 | 2.43996e-07 | 3.84483e-07 | 4.29802e-07 | 2.308e-06   | 2.18124e-06 | 2.44086e-06 | 2.32514e-06 |
| 12 | 1.84636e-10 | 2.05728e-07 | 3.06928e-07 | 3.85014e-07 | 2.06979e-06 | 2.33116e-06 | 2.30478e-06 | 2.09768e-06 |
| 13 | 1.39423e-10 | 2.42146e-07 | 2.99931e-07 | 3.82818e-07 | 2.4911e-06  | 2.32235e-06 | 2.51359e-06 | 3.64306e-06 |
| 14 | 1.47027e-10 | 2.83333e-07 | 2.7575e-07  | 4.07342e-07 | 1.86543e-06 | 1.87537e-06 | 2.43374e-06 | 2.40588e-06 |
| 15 | 1.65927e-10 | 3.08632e-07 | 2.87333e-07 | 2.53028e-07 | 2.10357e-06 | 2.61409e-06 | 1.99303e-06 | 2.41035e-06 |
| 16 | 9.53595e-11 | 2.60009e-07 | 2.74764e-07 | 3.30398e-07 | 1.84565e-06 | 1.79793e-06 | 1.98514e-06 | 2.37429e-06 |
| 17 | 2.16741e-10 | 1.9516e-07  | 3.41658e-07 | 3.81184e-07 | 1.86617e-06 | 2.02582e-06 | 2.27715e-06 | 2.94547e-06 |
| 18 | 1.66879e-10 | 1.95807e-07 | 3.79178e-07 | 4.8166e-07  | 2.22381e-06 | 2.08531e-06 | 1.51177e-06 | 2.55915e-06 |
| 19 | 1.69181e-10 | 1.67938e-07 | 3.05149e-07 | 3.59442e-07 | 2.10406e-06 | 1.8664e-06  | 1.92091e-06 | 2.42113e-06 |

## 4 ギャップセンサー配置による特異値・ベクトルの変化 I — 素過程

基準ギャップセンサー配置ではあえて対称形を維持する形でギャップセンサーを配置しているため、対称なモードの特異ベクトルに対応する特異値が縮退に近くなっていた。これに対してギャップセンサー配置を変更することによって対象性を崩すと縮退でなくなることが期待されるが、それぞれのギャップセンサーについてどのようなモードに対して効果があるかについてまず確認する。

なお、結果を簡単に把握しやすくするために、セグメントの並進・回転については理想位置である(全て 0 にする)とする。

### 4.1 ギャップセンサー配置のパターン

ギャップセンサーは取り付いている部分によって大きく 5 種類に分けられる。

- 内環と内周セグメントの間
- 内周セグメント同士の間
- 内周・外周セグメントのうち奇数 ID を持つ外周セグメントにつくもの
- 内周・外周セグメントのうち偶数 ID を持つ外周セグメントにつくもの
- 外周セグメント同士の間

セグメントの ID は内周が 1–6、外周が 7–18 となるシミュレータでの定義を意味し、奇数 ID の外周セグメントは一つの内周セグメントだけに接するが、偶数 ID の外周セグメントは二つの内周セグメントに接する。この二つの内周・外周セグメント間のギャップセンサーについて、奇数 ID をもつ外周セグメントにつくものは内周・外周セグメントともに辺の中央近くにギャップセンサーが配置され、逆に偶数 ID を持つ外周セグメントにつくものは辺の端に配置されることになるため、ギャップセンサーにより把握できるセグメントの相対変動モードが異なる。

このそれについてセグメント間中心線上でギャップセンサーを移動させた場合と、中心線からどちらかのセグメントの内部へギャップセンサーを移動させた場合の二つによる影響を検証する。

### 4.2 特異ベクトル・特異値への影響の評価

Zernike 多項式で表したときの表 1 にあるよりも高次の項に対応するモードや、基準ギャップセンサー配置(図 2)にある ID 35 や ID 42 のような緩やかに変化するのではなく隣り合うセグメントで折れ曲がるようなモードは、基準ギャップセンサー配置よりも(数を減らして)ギャップセンサーをより対称形にしない限り縮退に近づくことは無いと考えられ、どちらかというと評価は基準ギャップセンサー配置で特異値が小さいものを中心として行うべきである。よって、この評価では ID 43 以降の特異ベクトル・特異値についてみるとこととし、それぞれのギャップセンサー配置に対して

- ギャップセンサー配置図(ex. 図 1)
- ID 43–57 の特異ベクトルの表示(ex. 図 3)
- 表 1 に対応する特異値・ベクトルの一覧

を作成することで評価する。

### 4.3 ギャップセンサー配置による特異値への影響 — セグメント間同一・辺毎単独

#### 4.3.1 内環に対する配置

内環について、ギャップセンサーの取りえる配置はセグメントの内周辺の中央からずらした配置のみとなる。中央点に対して左右どちらにずらすかは対称であるので同じ効果であるはずで、片側についてずらす量を変えた 2 つ(X 軸 100mm と 200mm)についての結果が、それぞれ図 8(100mm, 配置図 7) 図 10(200mm, 配置図 9) となる。

Zernike AstigTri 30 のモードに効果が見られる。

#### 4.3.2 内周セグメント間に対する配置 — 中心線上

内周セグメント間のギャップセンサーの配置を、セグメント間の中心線上で  $1/3, 2/3$  でなく近づけたり端に配置したりすることでどのように変化するかを見る。ギャップセンサーをセグメント間中心線の中央点に対して対称になる配置で位置をずらすものと、二つのギャップセンサーを内環側、もしくは外周側にずらすものの両方について調べる。

試行するギャップセンサーの配置は以下のようにとる。

- 3 (2/5, 3/5) : 中心対称で中心から 1/10
- 4 (1/4, 3/4) : 中心対称で中心から 1/4
- 5 (1/10, 9/10) : 中心対称で中心から 2/5
- 6 (0, 1) : 両端
- 7 (1/4, 2/4) : 内環側にずらす
- 8 (2/4, 3/4) : 外周側にずらす
- 9 (1/4, 2/3) : 非対称

#### 4.3.3 内周セグメント間に対する配置 — セグメント内

内周セグメント間の中心線からセグメント内に入った位置にギャップセンサーを定義すると、ギャップセンサーによる測定点 2つが作る直線が主軸とねじれの位置にくるようにでき、より対象性を崩すことが可能になる。このセグメント内部の位置について入る距離、2つのギャップセンサーでの方向などを変えて試験を行う。

セグメント間中心線から入る距離として試行する配置は以下のように取る。なお、中心線上は  $(1/3, 2/3)$  とし、両方に  $-1$  をかけた配置は裏・表の対称形になるだけであるので試験しない。

- 10 (0, +25)
- 11 (0, +50)
- 12 (+25, 0)
- 13 (+50, 0)
- 14 (+50, +50)
- 15 (-50, +50)

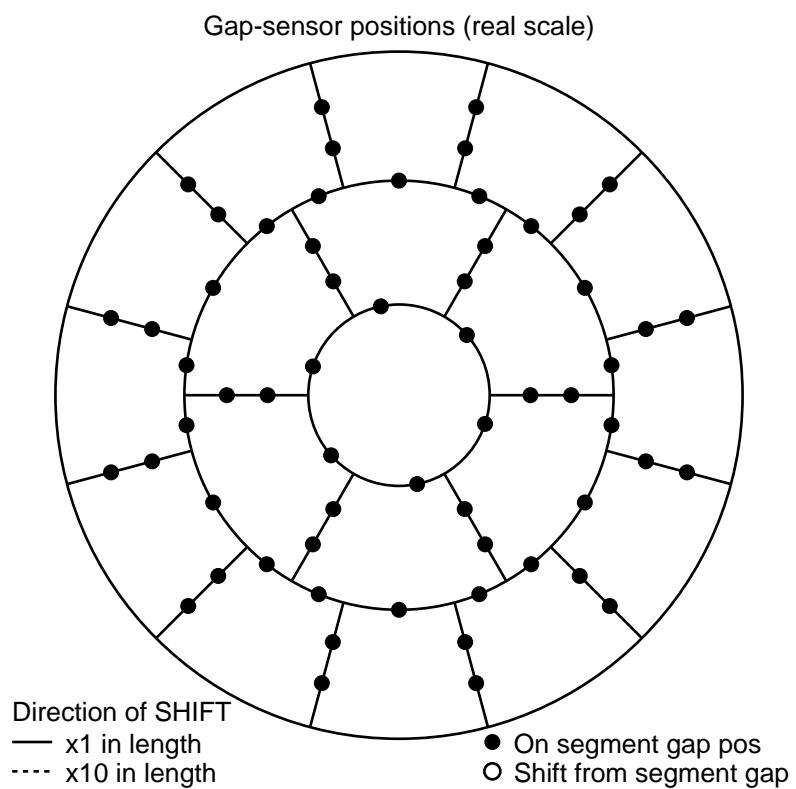


図 7: 試行 1 — ギャップセンサー配置

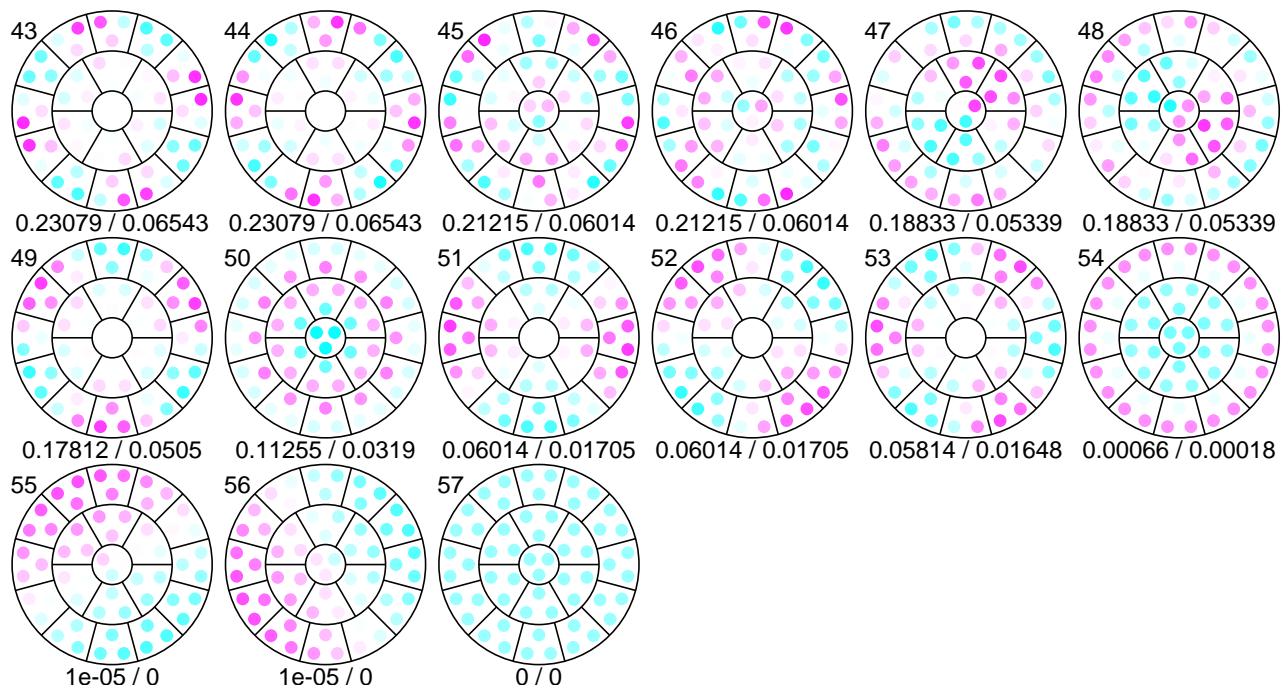


図 8: 試行 1 — 特異ベクトル分布

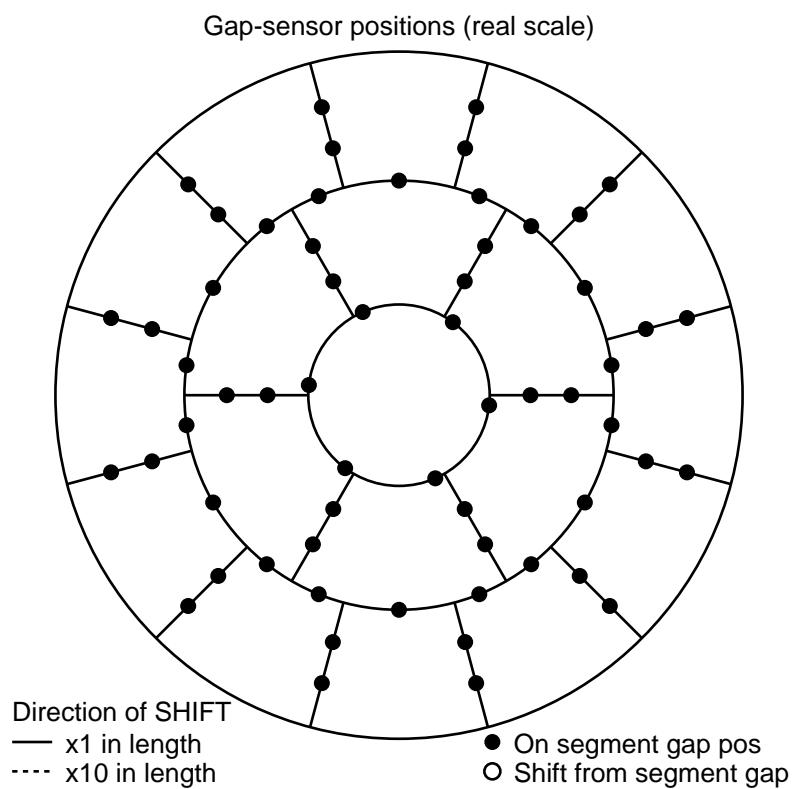


図 9: 試行 2 — ギャップセンサー配置

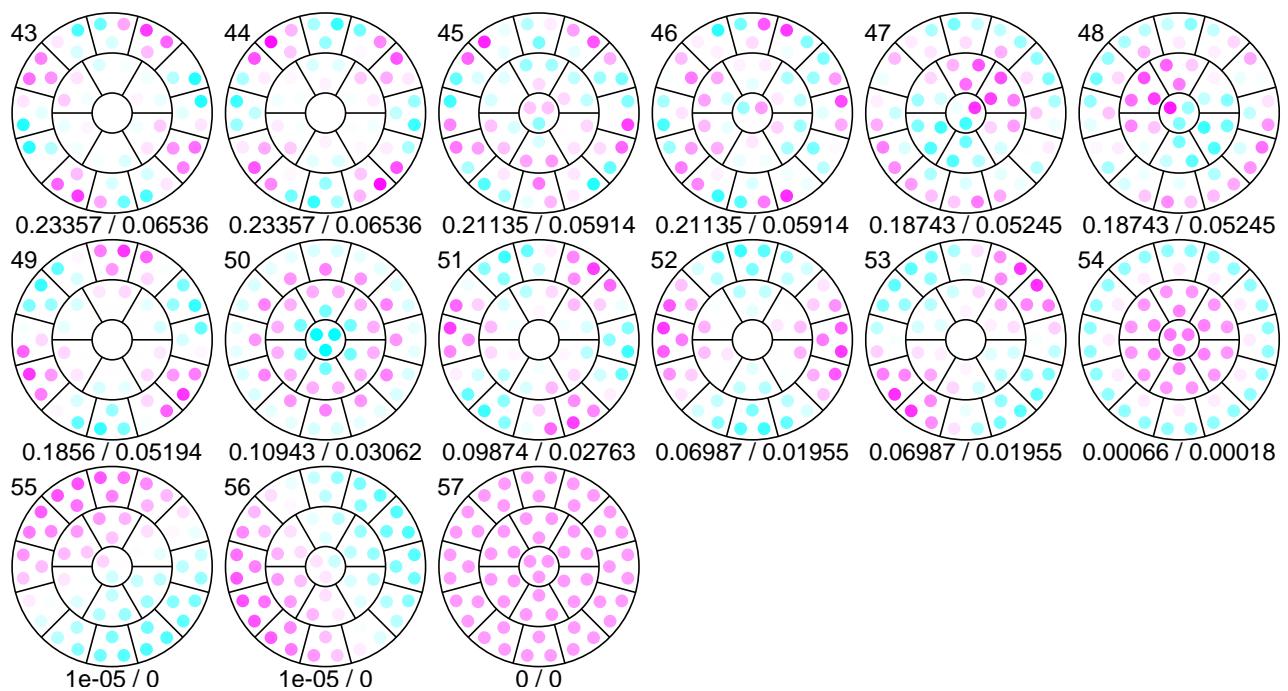


図 10: 試行 2 — 特異ベクトル分布

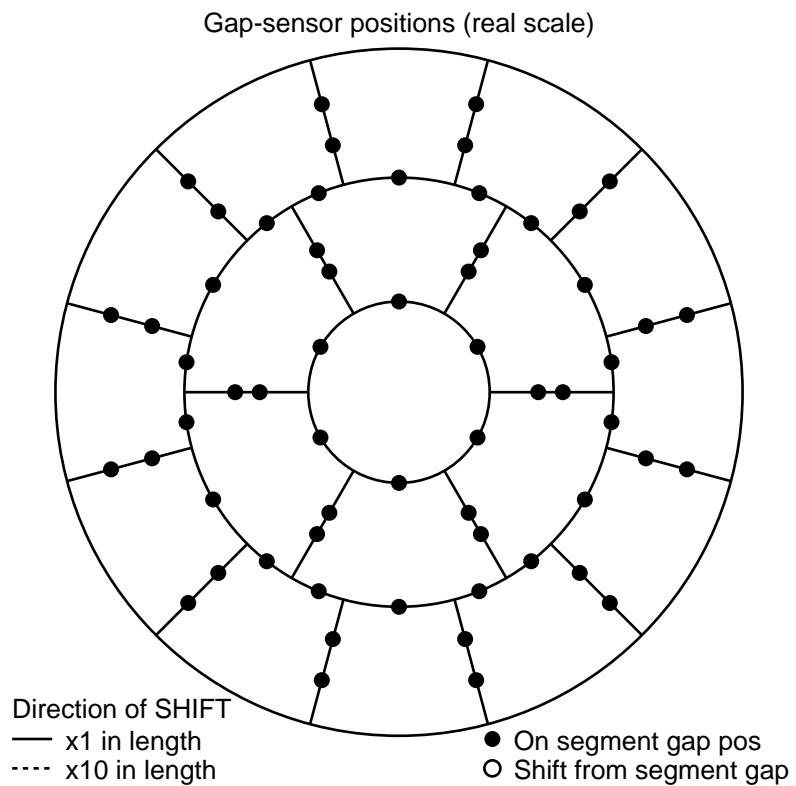


図 11: 試行 3 — ギャップセンサー配置

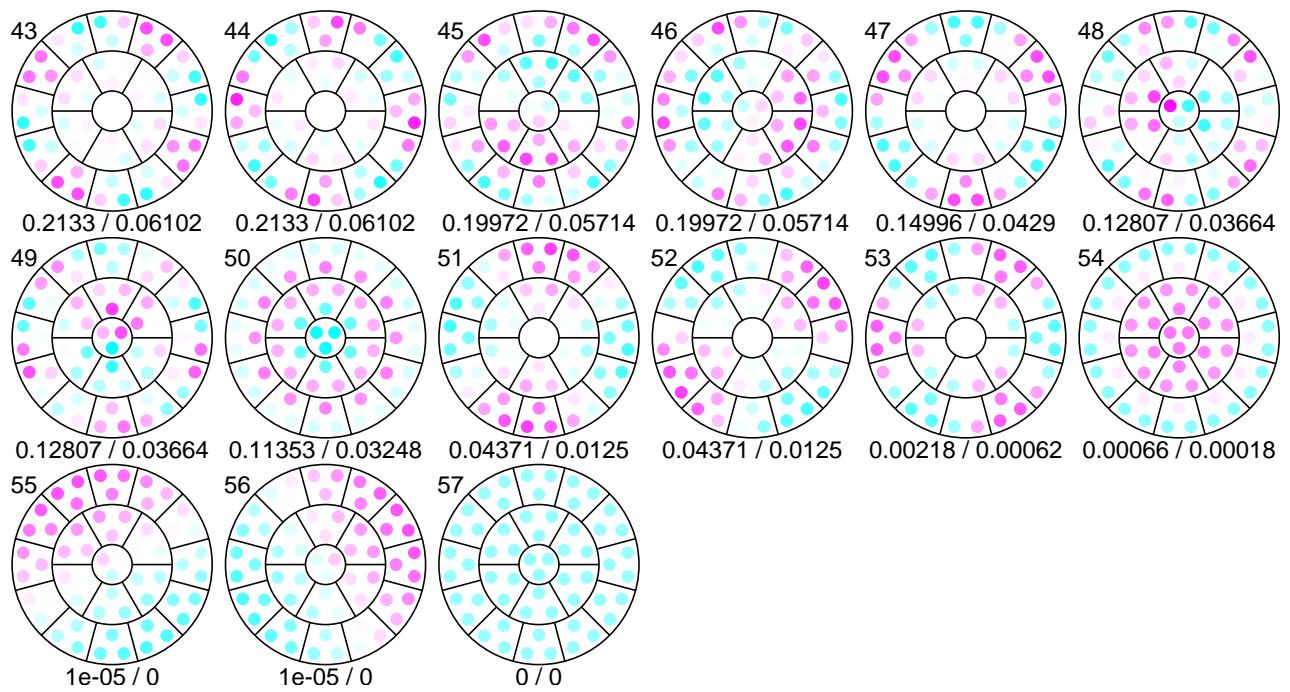


図 12: 試行 3 — 特異ベクトル分布

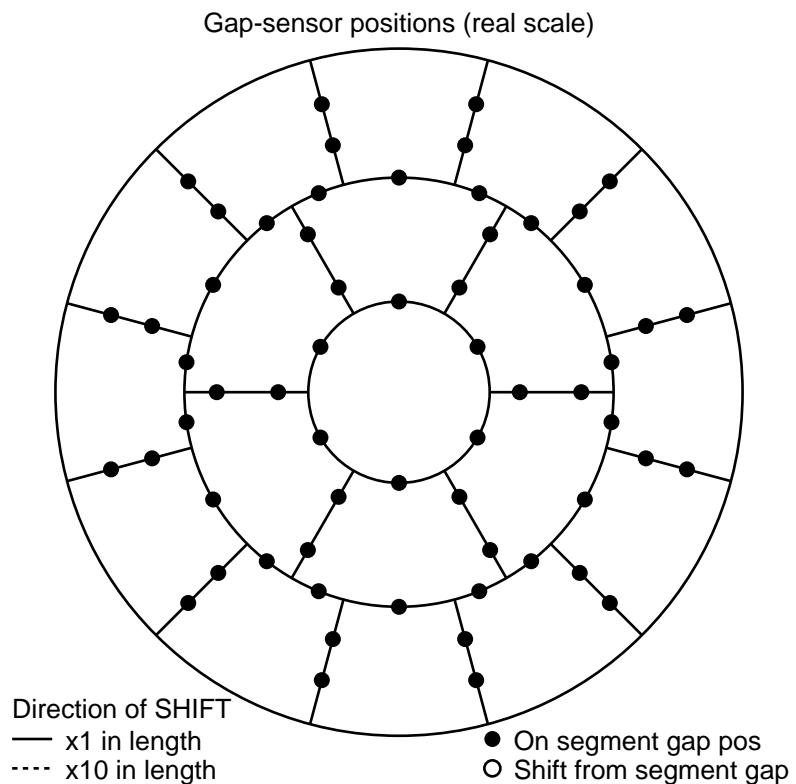


図 13: 試行 4 — ギャップセンサー配置

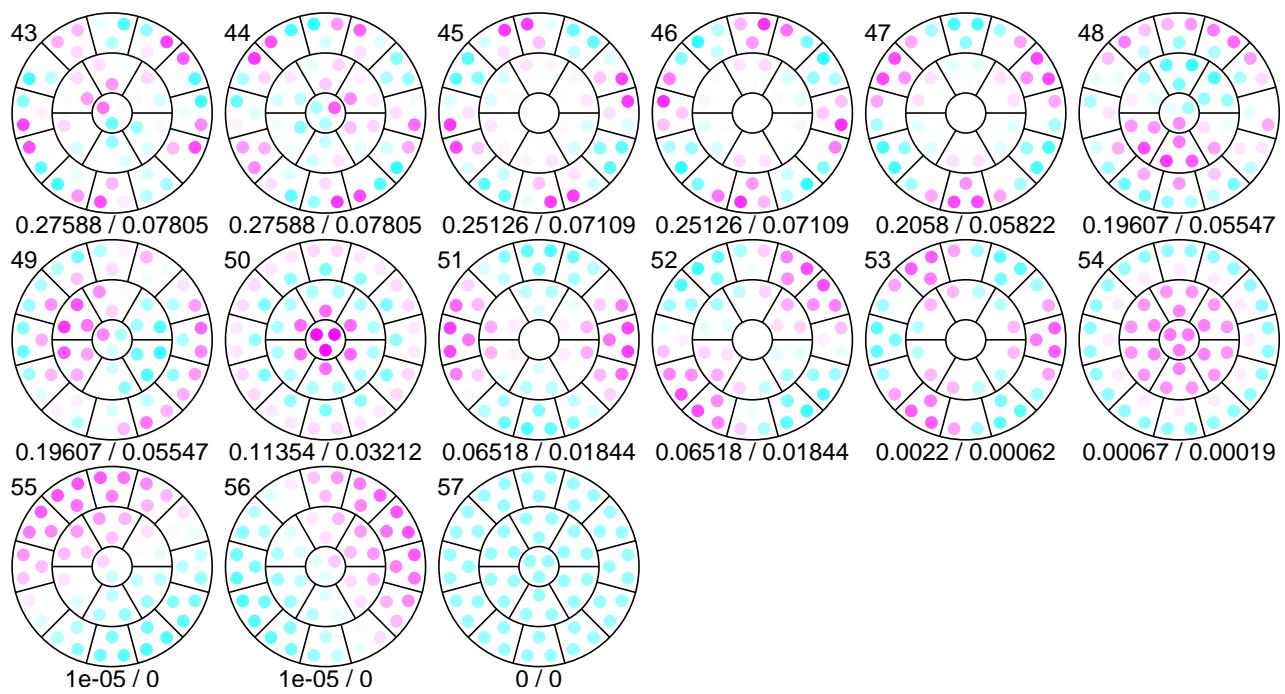


図 14: 試行 4 — 特異ベクトル分布

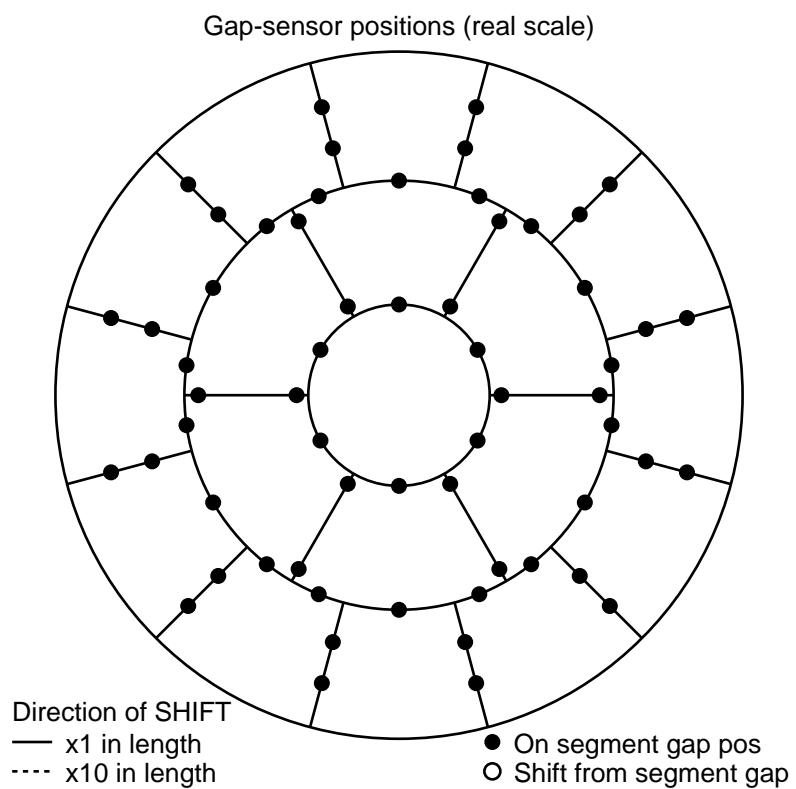


図 15: 試行 5 — ギャップセンサー配置

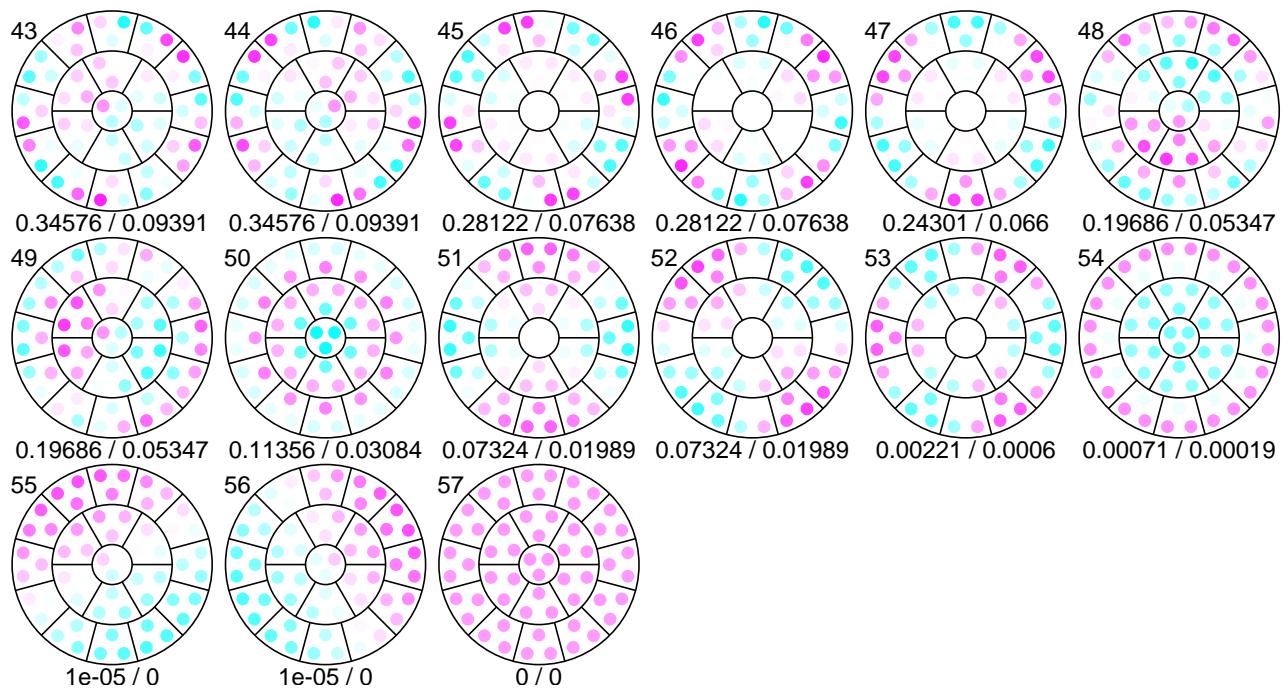


図 16: 試行 5 — 特異ベクトル分布

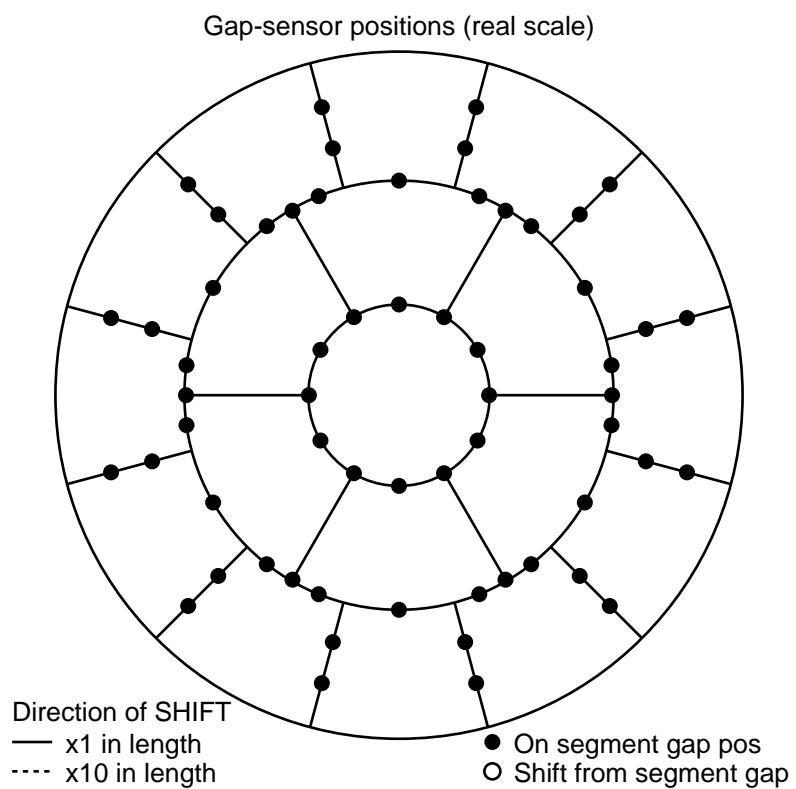


図 17: 試行 6 — ギャップセンサー配置

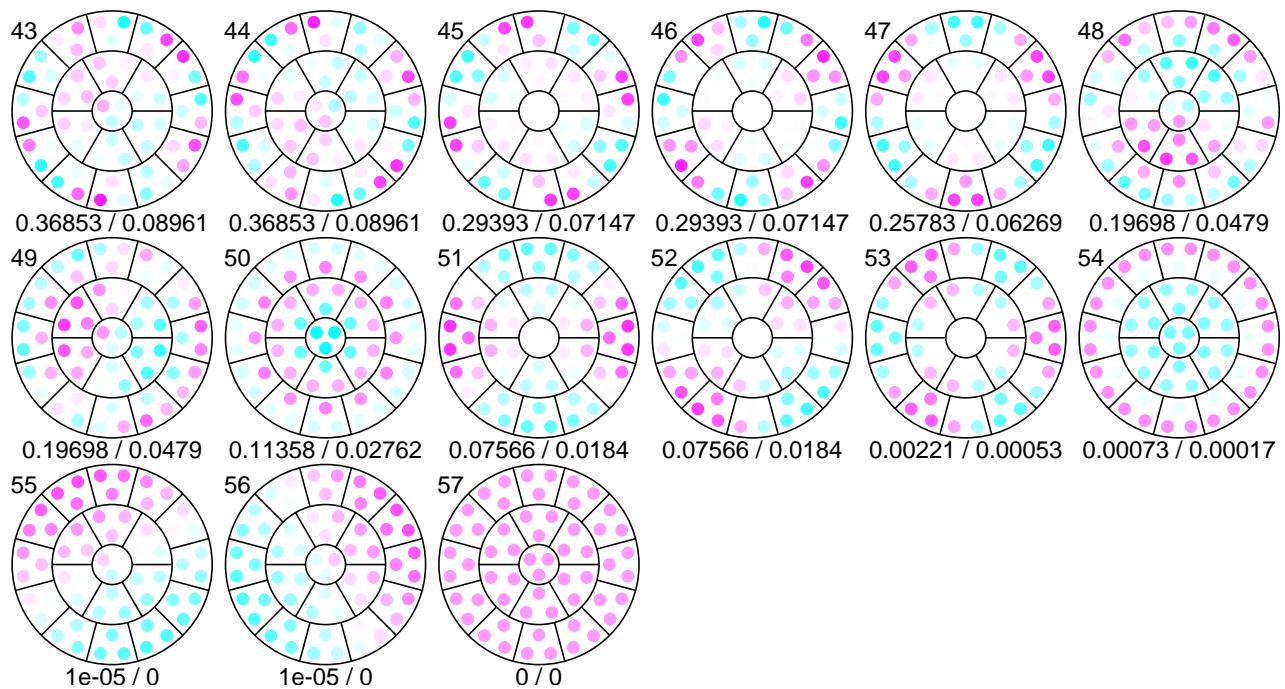


図 18: 試行 6 — 特異ベクトル分布

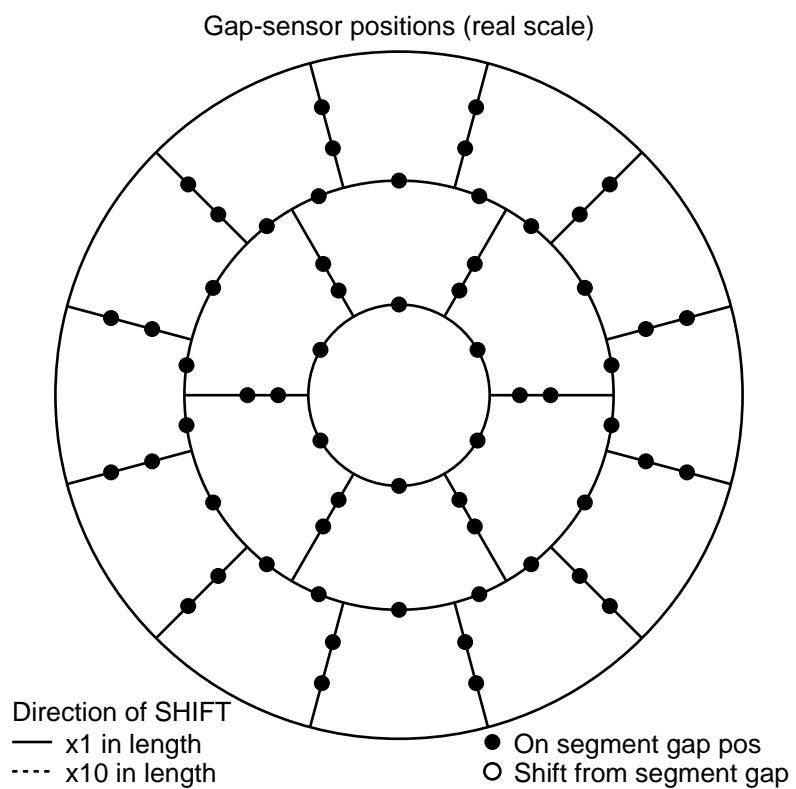


図 19: 試行 7 — ギャップセンサー配置

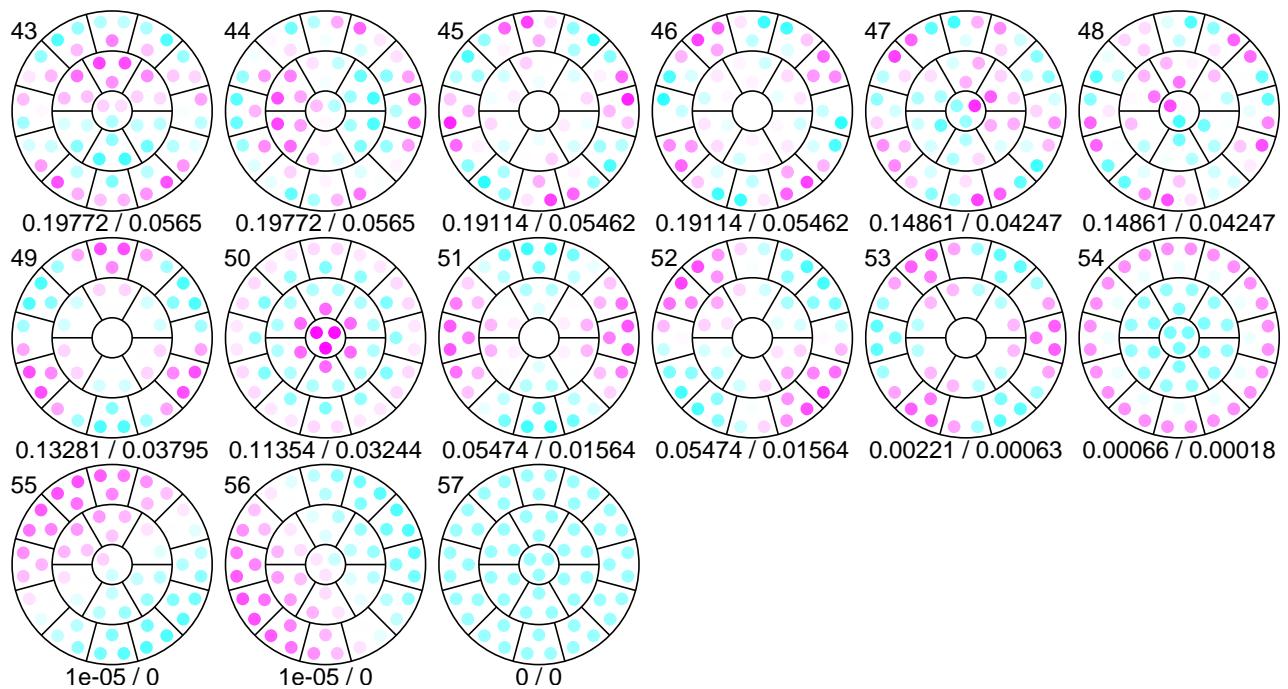


図 20: 試行 7 — 特異ベクトル分布

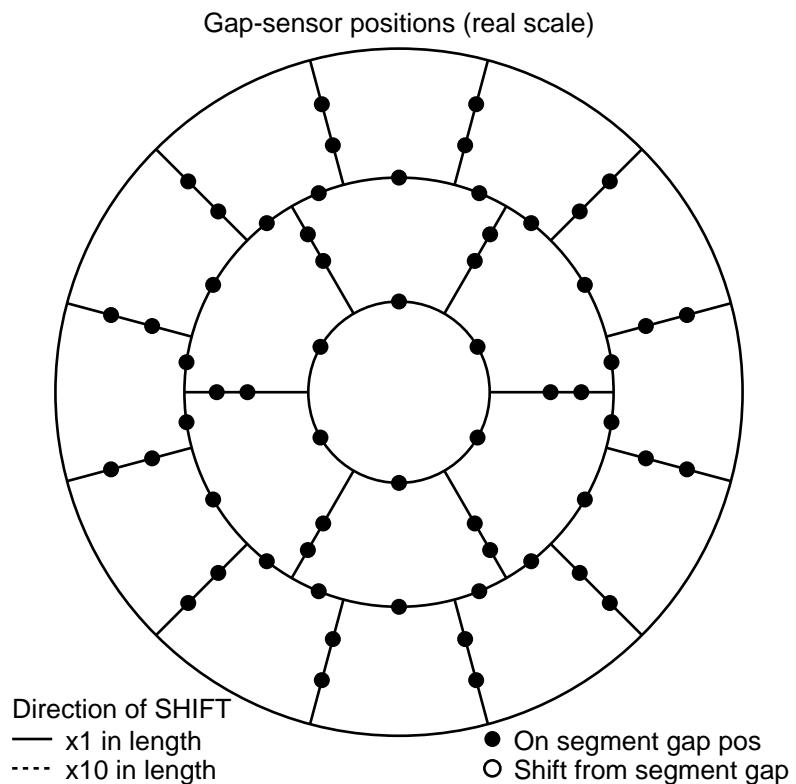


図 21: 試行 8 — ギャップセンサー配置

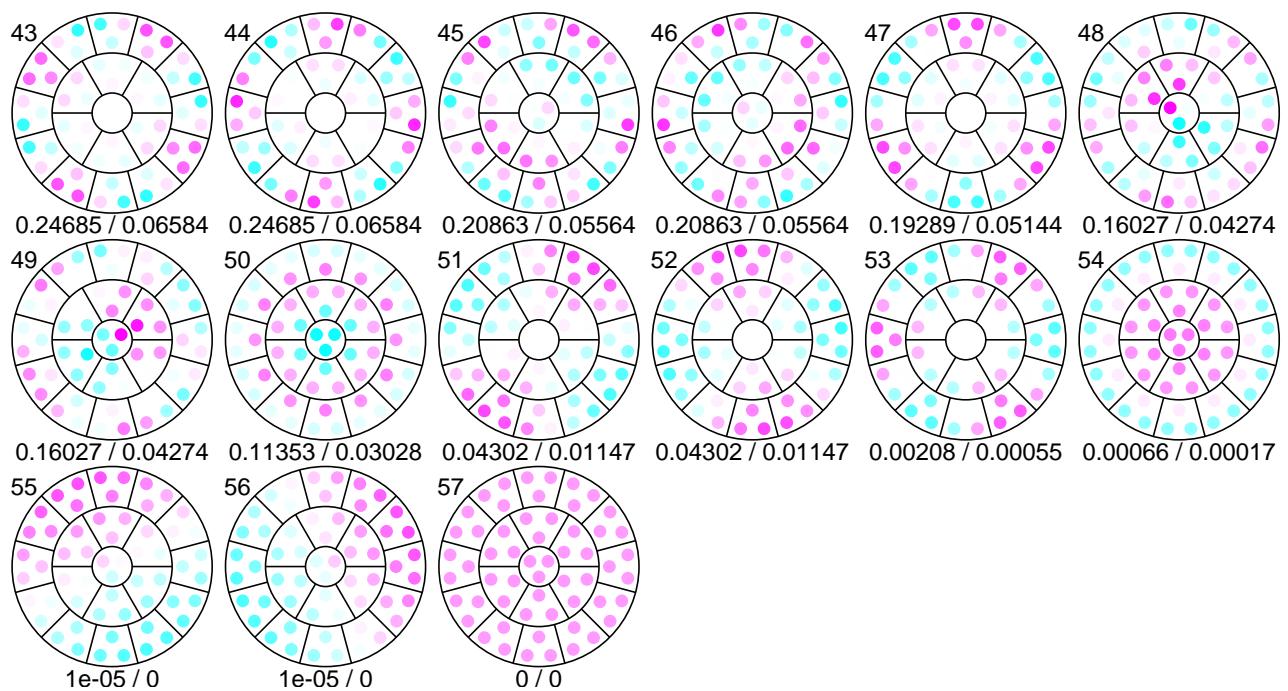


図 22: 試行 8 — 特異ベクトル分布

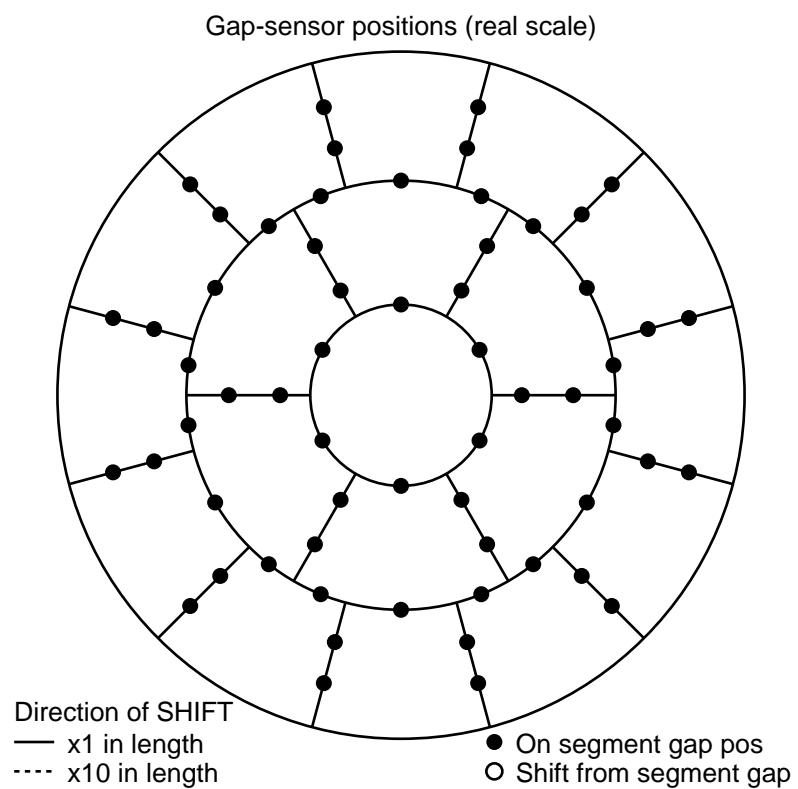


図 23: 試行 9 — ギャップセンサー配置

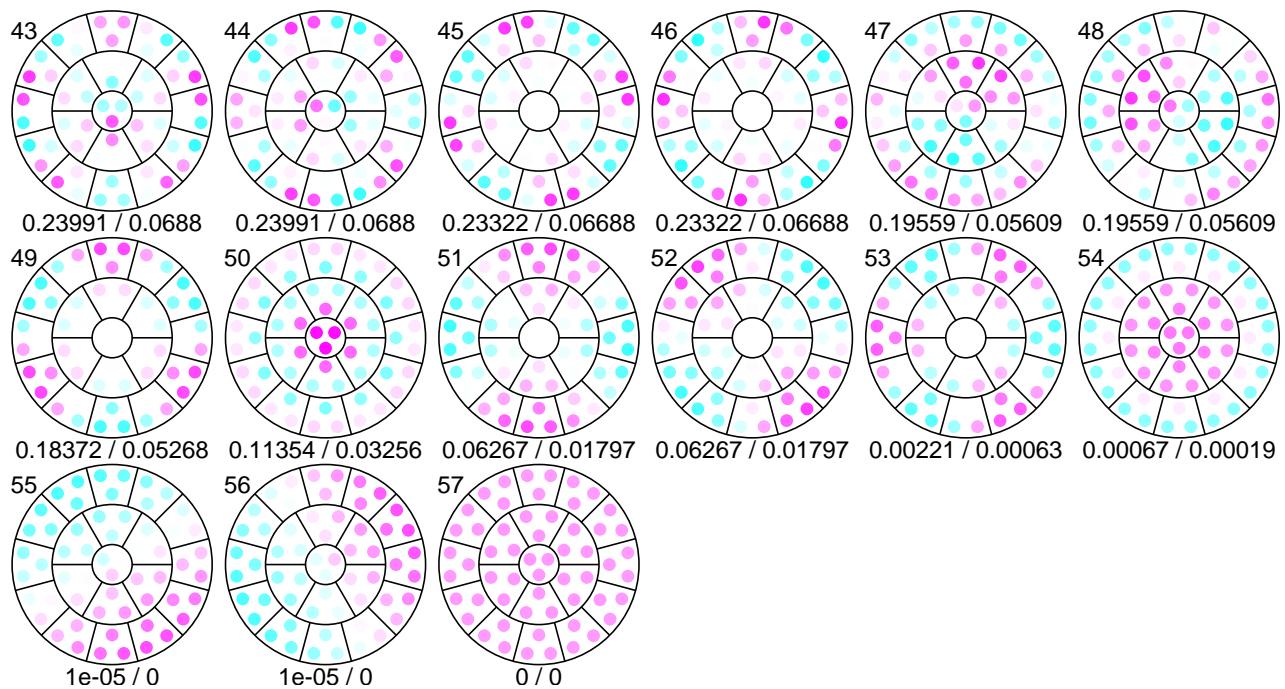


図 24: 試行 9 — 特異ベクトル分布

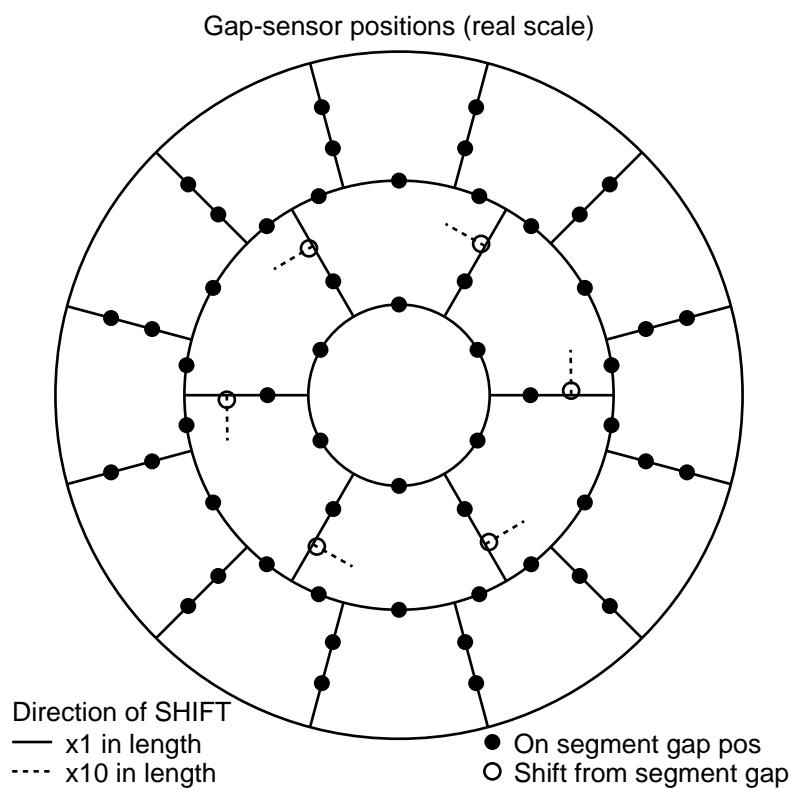


図 25: 試行 10 — ギャップセンサー配置

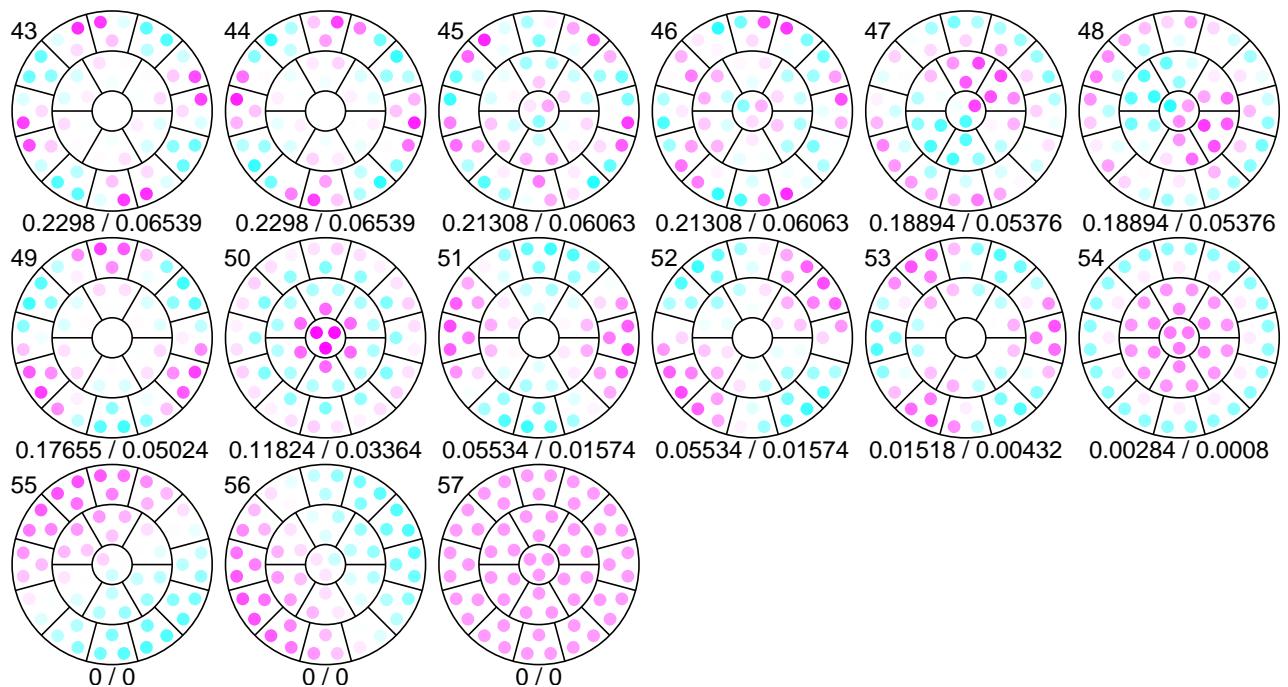


図 26: 試行 10 — 特異ベクトル分布

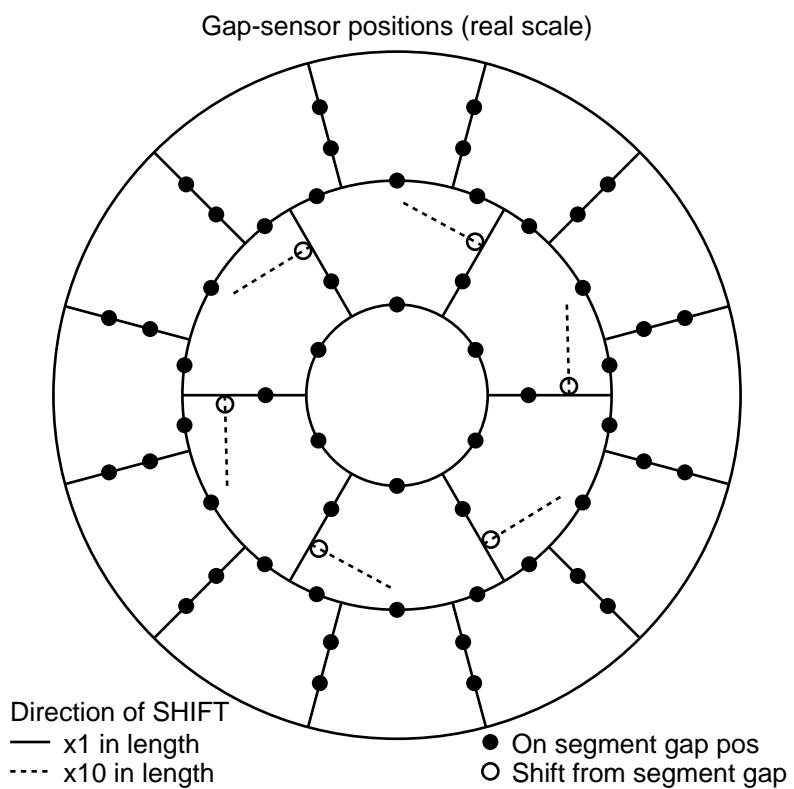


図 27: 試行 11 — ギャップセンサー配置

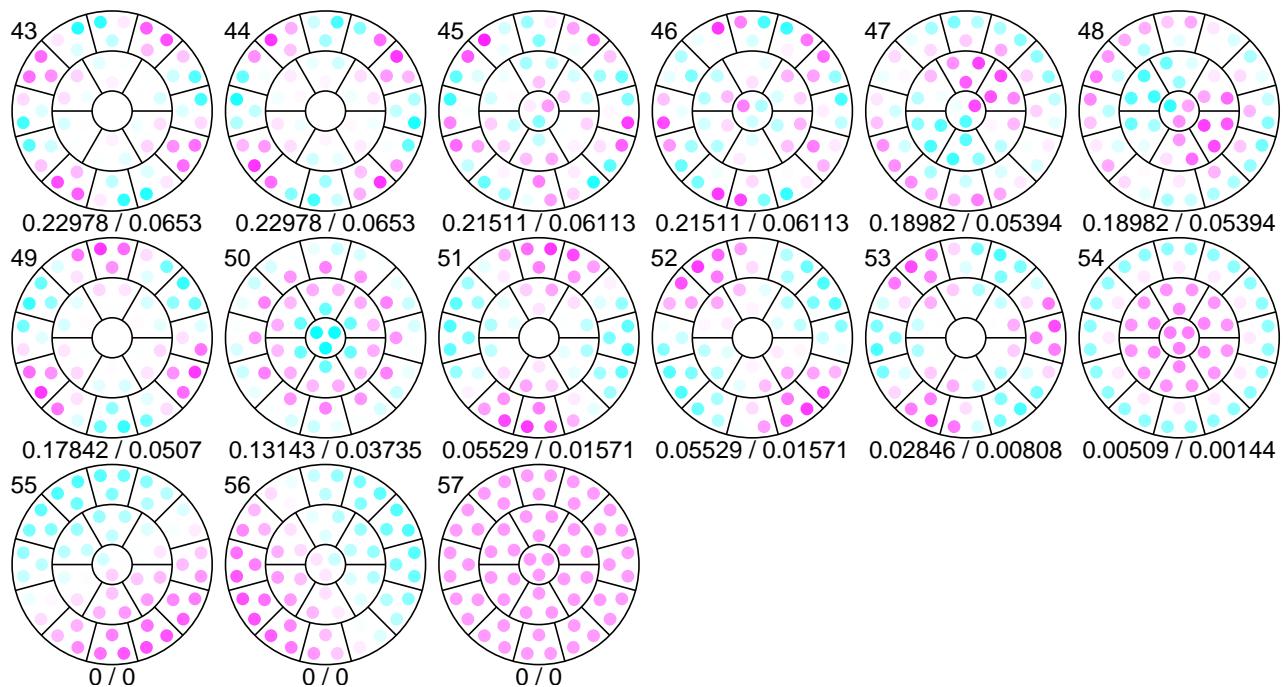


図 28: 試行 11 — 特異ベクトル分布

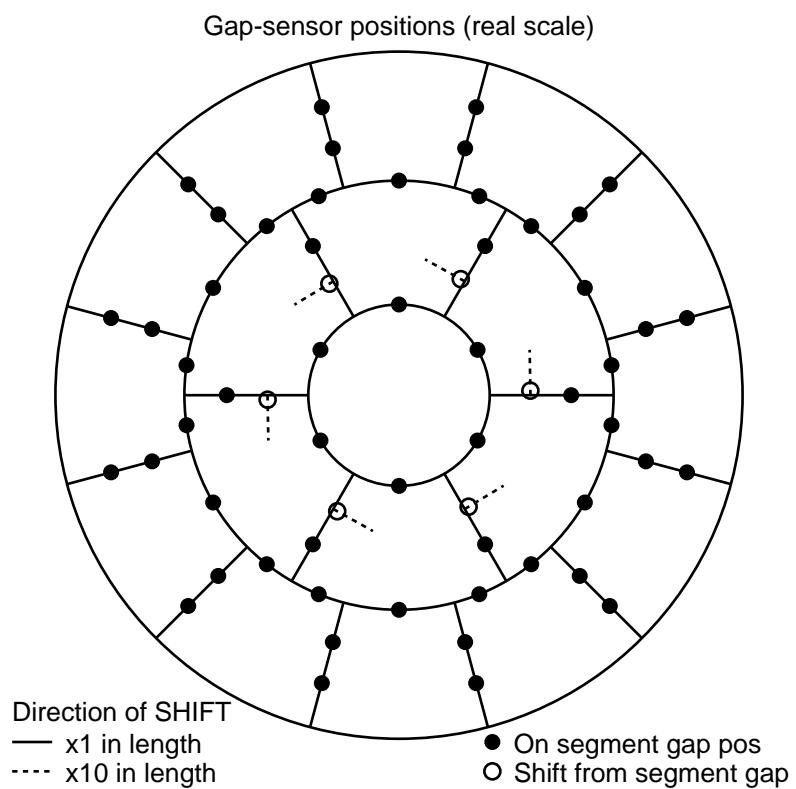


図 29: 試行 12 — ギャップセンサー配置

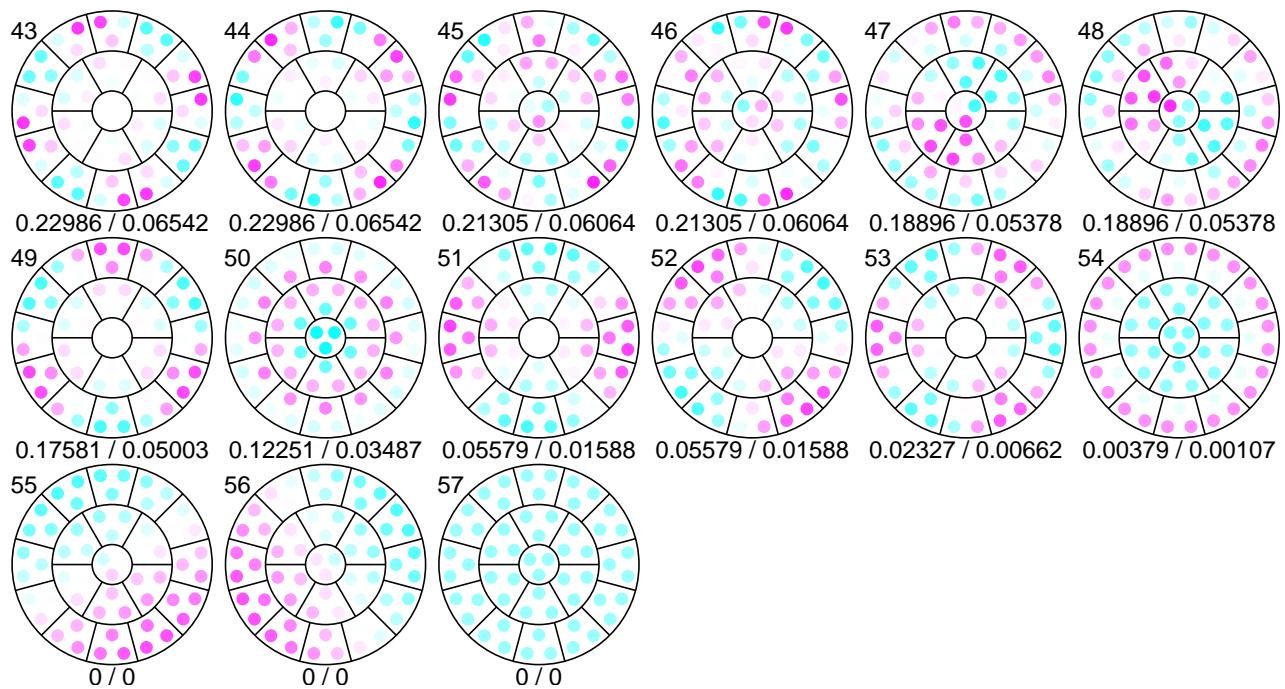


図 30: 試行 12 — 特異ベクトル分布

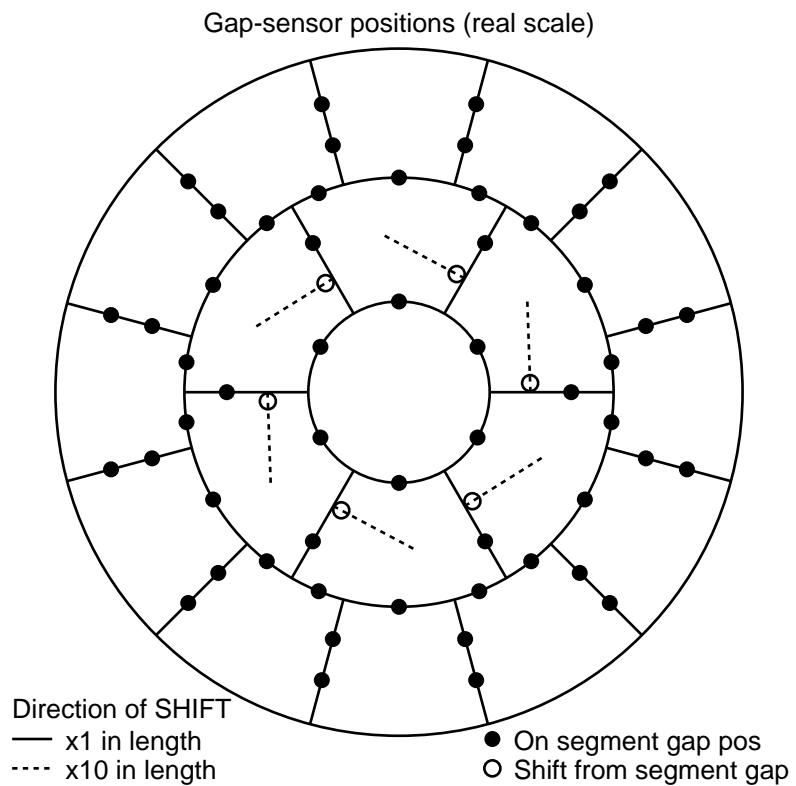


図 31: 試行 13 — ギャップセンサー配置

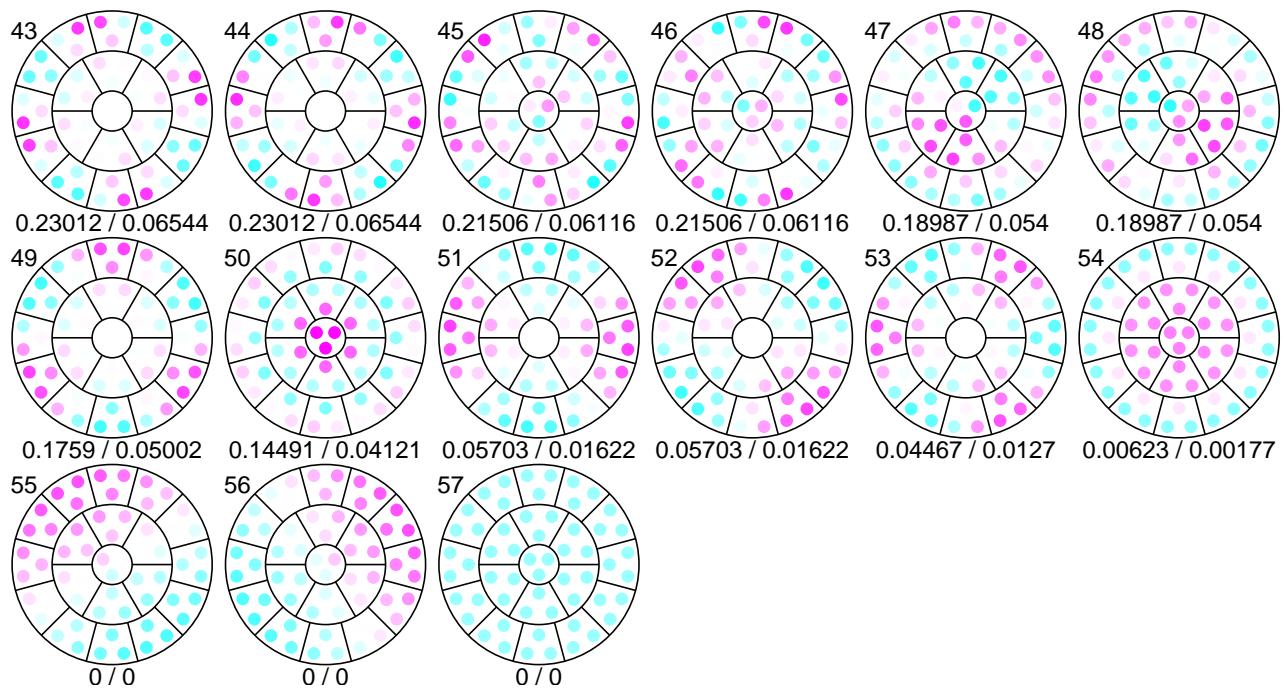


図 32: 試行 13 — 特異ベクトル分布

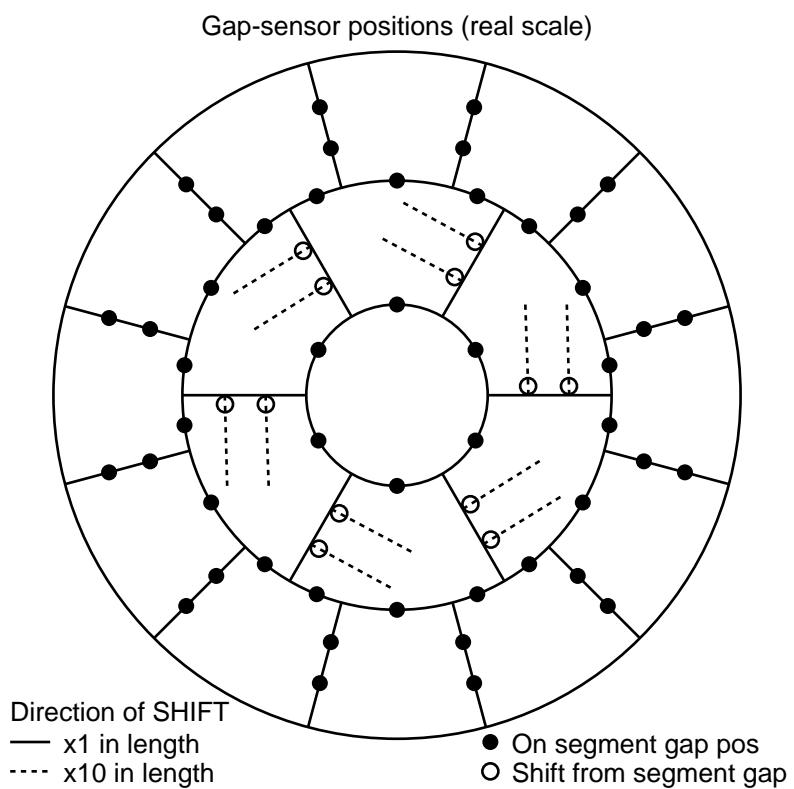


図 33: 試行 14 — ギャップセンサー配置

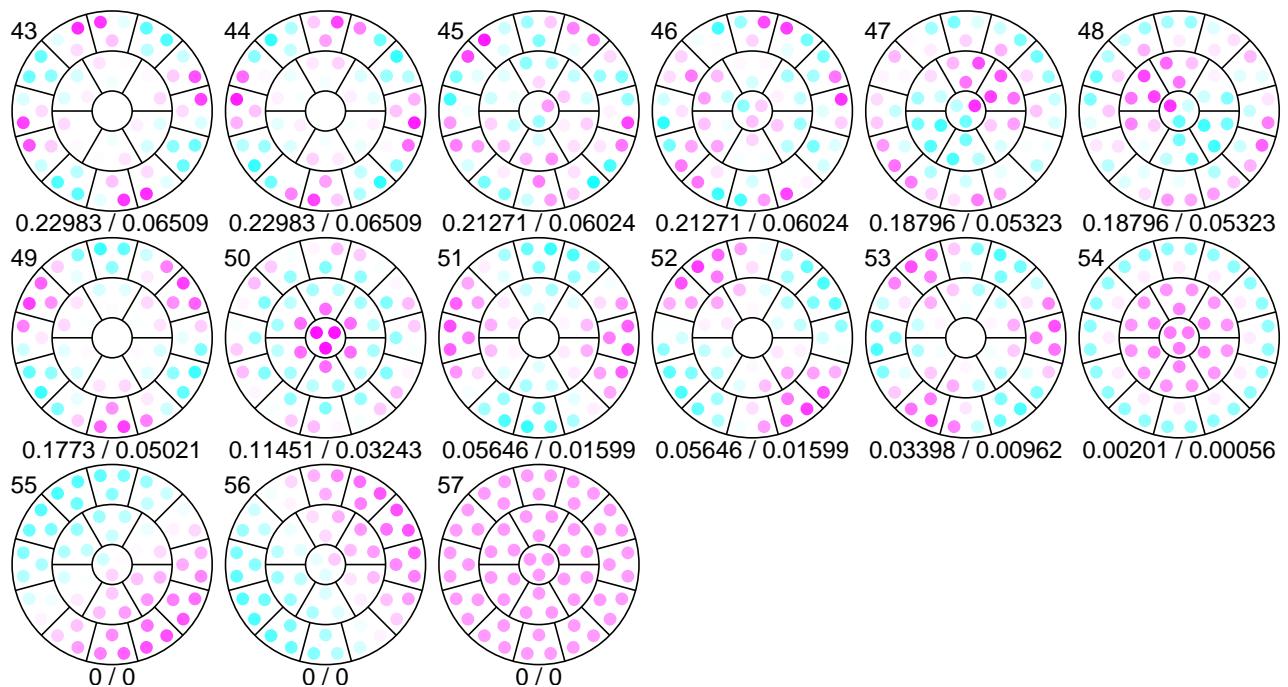


図 34: 試行 14 — 特異ベクトル分布

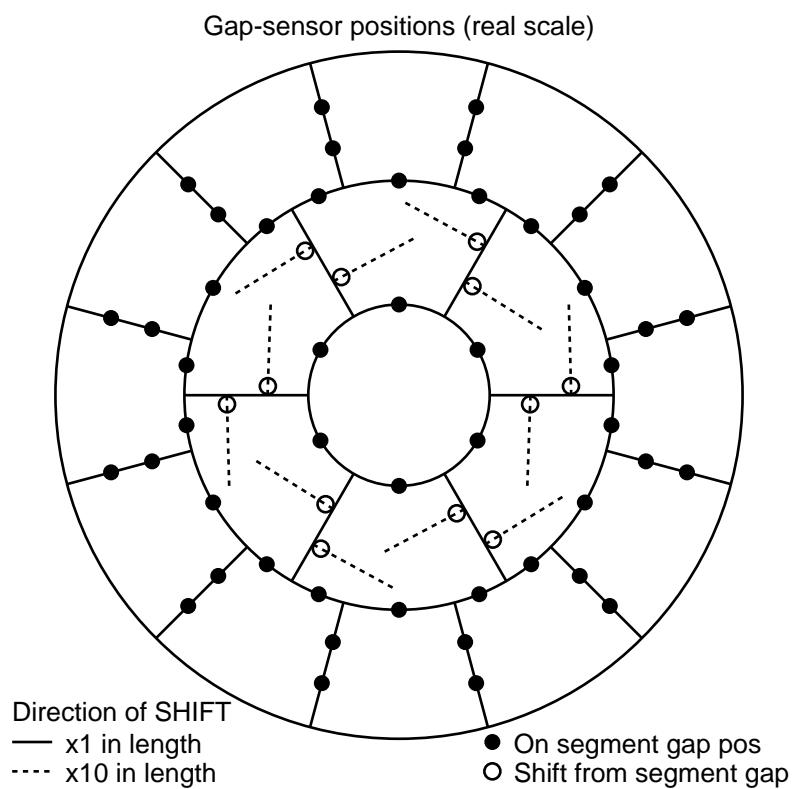


図 35: 試行 15 — ギャップセンサー配置

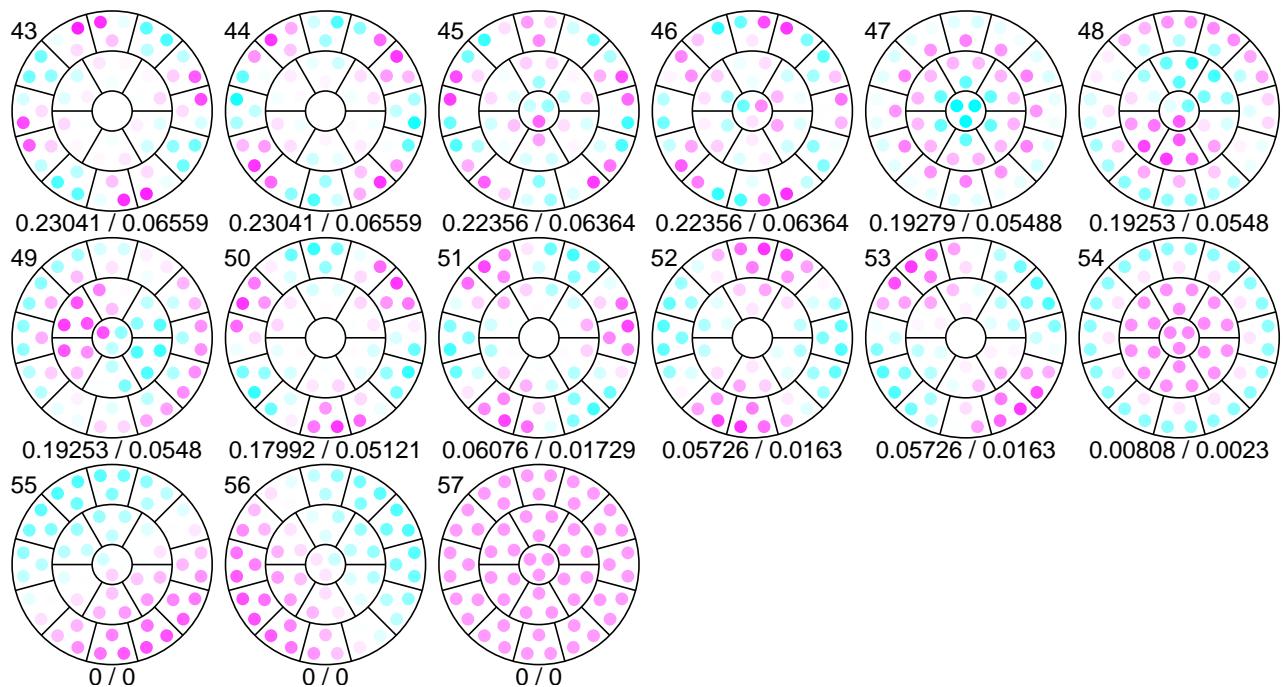


図 36: 試行 15 — 特異ベクトル分布

#### 4.3.4 外周セグメント間に対する配置 — 中心線上

内周セグメントと同じく、外周セグメントに対しても中心線上で以下のようにずらした配置を検証することで、ギヤップセンサー取り付け位置の影響を見る。

16 (2/5, 3/5) : 中心対称で中心から 1/10

17 (1/4, 3/4) : 中心対称で中心から 1/4

18 (1/10, 9/10) : 中心対称で中心から 2/5

19 (0, 1) :両端

20 (1/4, 2/4) : 内環側にずらす

21 (2/4, 3/4) : 外周側にずらす

22 (1/4, 2/3) : 非対称

#### 4.3.5 外周セグメント間に対する配置 — セグメント内

内周セグメントと同じく、外周セグメントに対しても中心線からセグメント内に入った位置にくるようなずらした配置を検証することで、ギヤップセンサー取り付け位置の影響を見る。

23 (0, +25)

24 (0, +50)

25 (+25, 0)

26 (+50, 0)

27 (+50, +50)

28 (-50, +50)

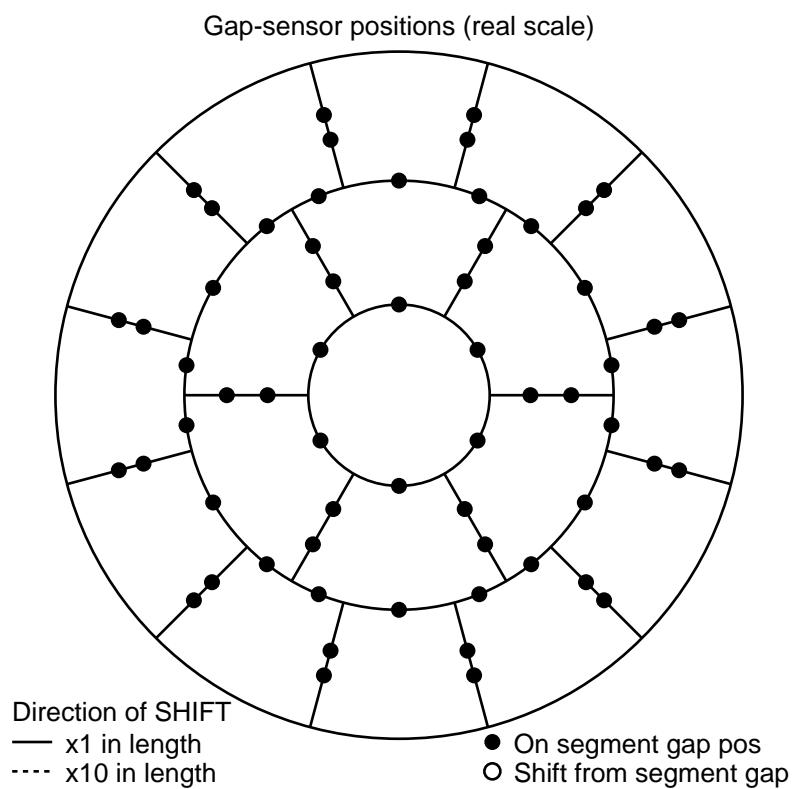


図 37: 試行 16 — ギャップセンサー配置

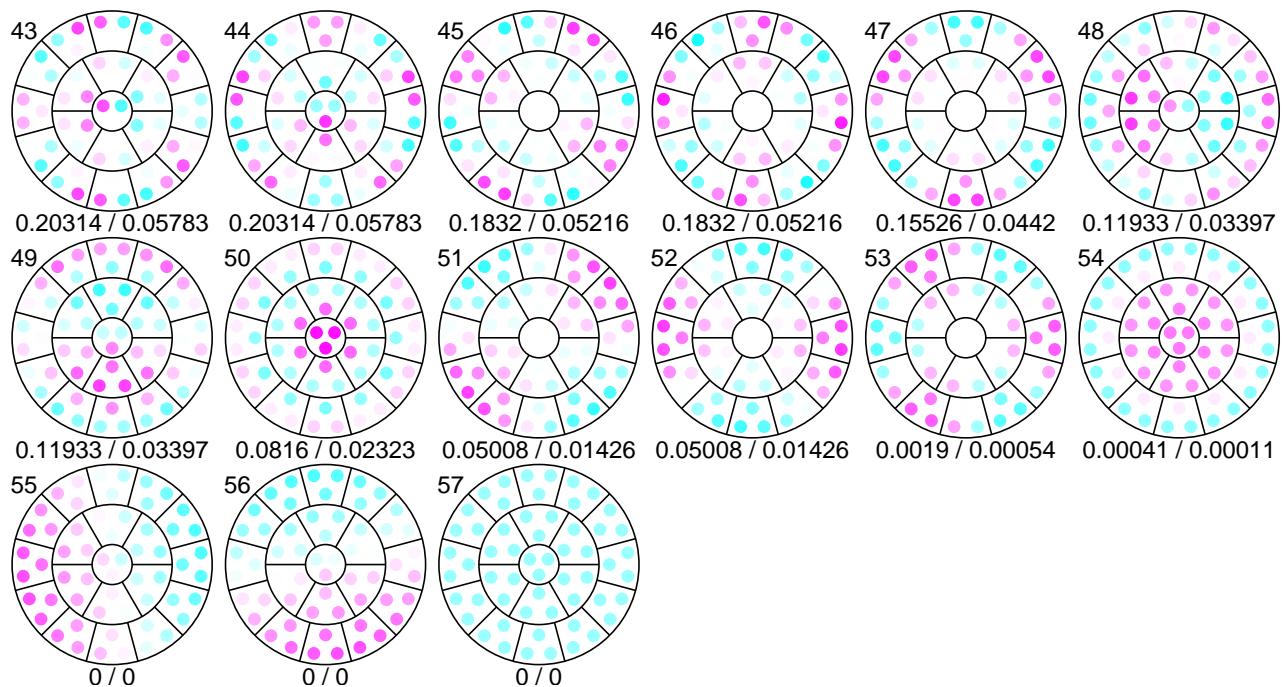


図 38: 試行 16 — 特異ベクトル分布

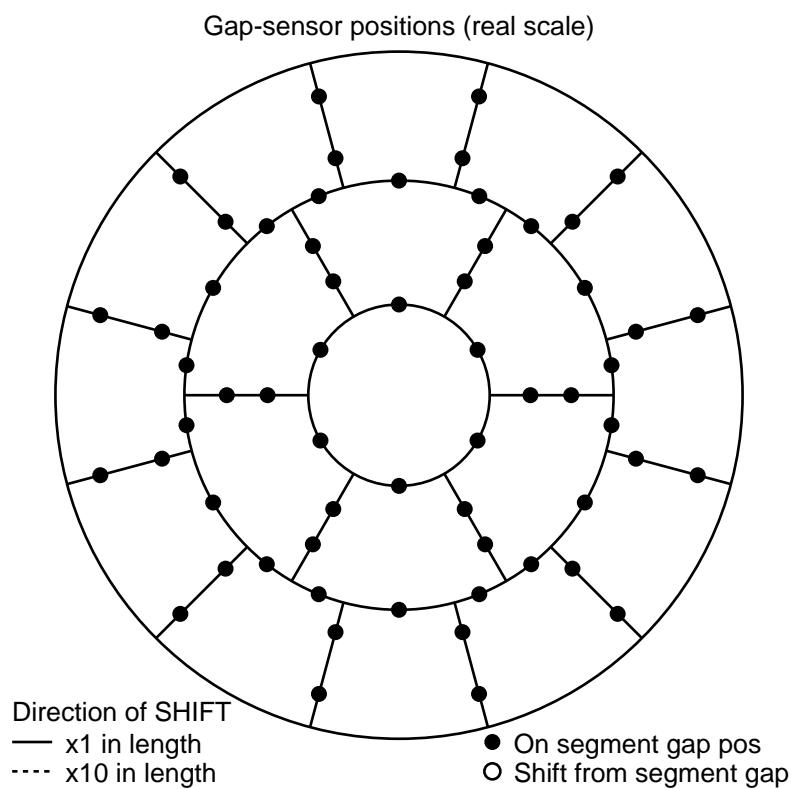


図 39: 試行 17 — ギャップセンサー配置

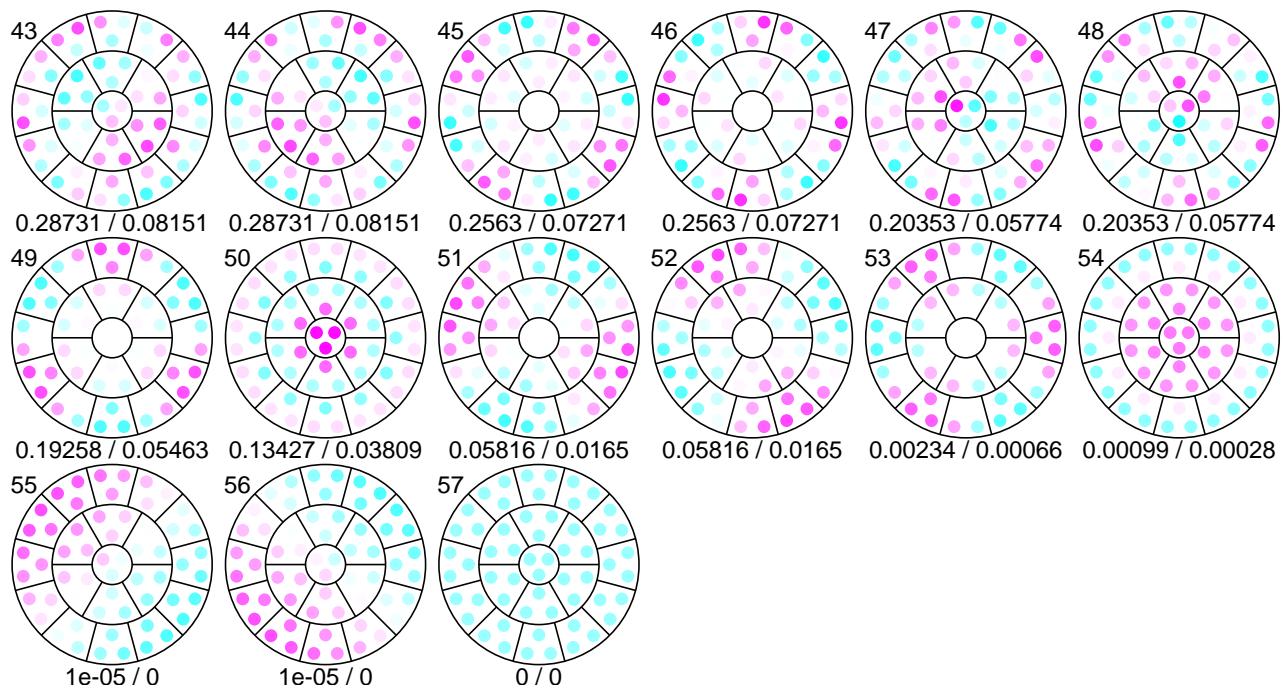


図 40: 試行 17 — 特異ベクトル分布

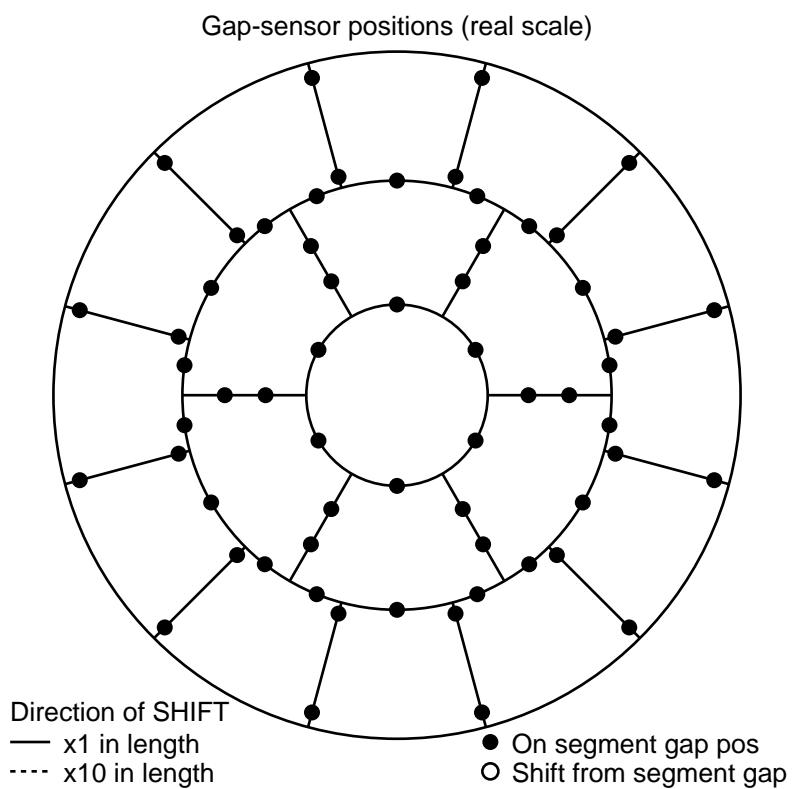


図 41: 試行 18 — ギャップセンサー配置

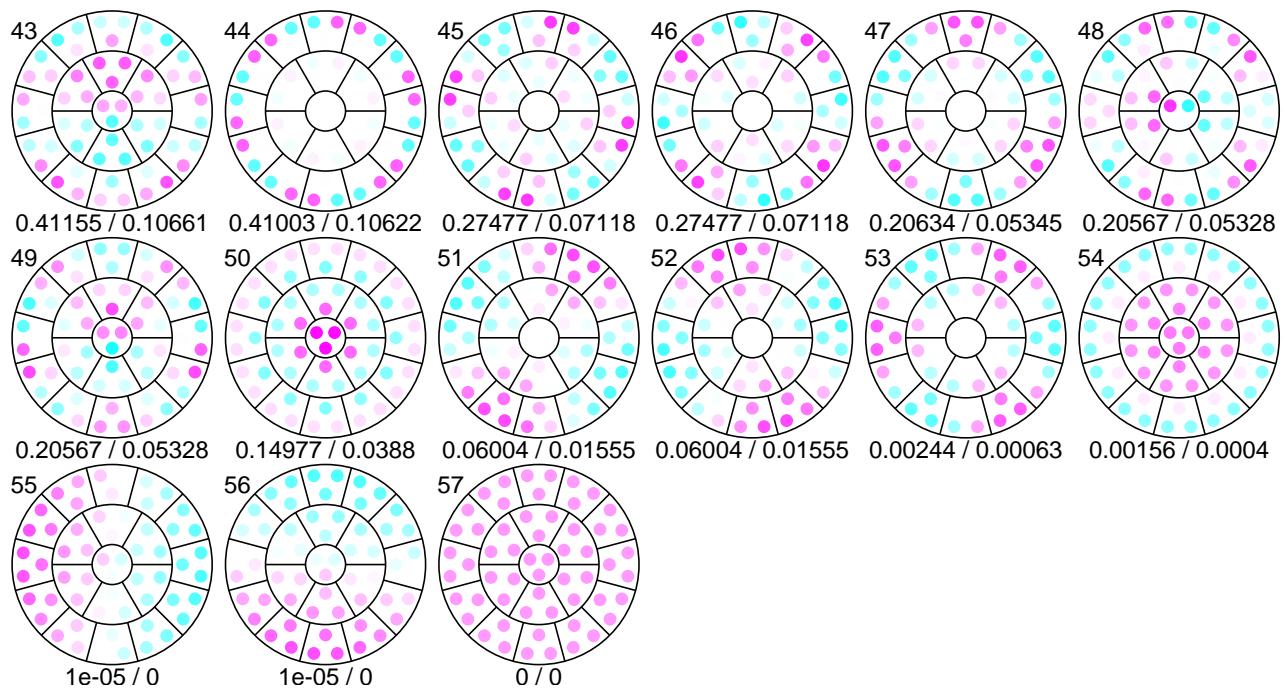


図 42: 試行 18 — 特異ベクトル分布

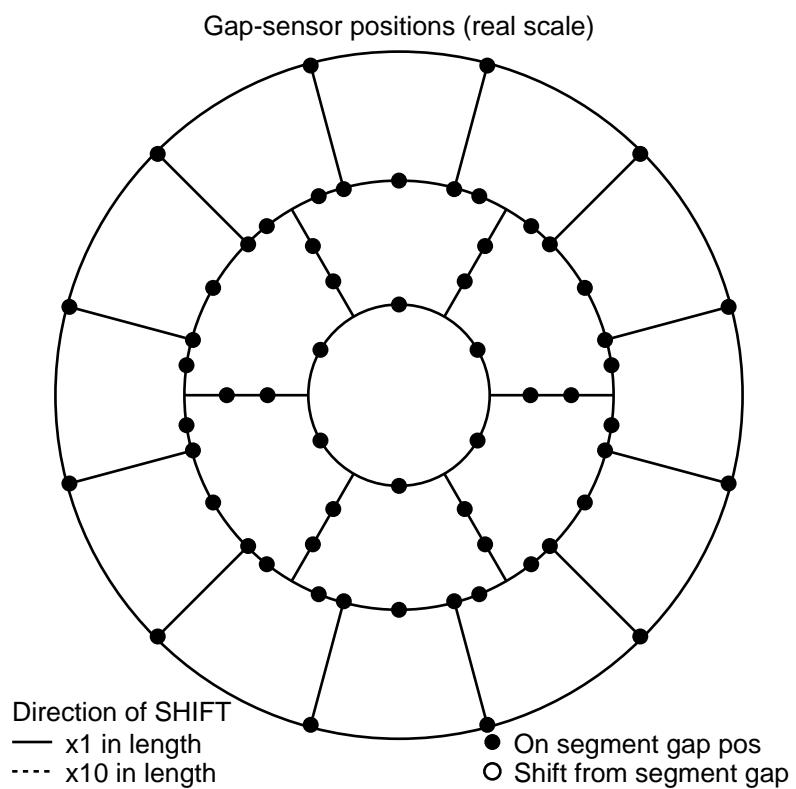


図 43: 試行 19 — ギャップセンサー配置

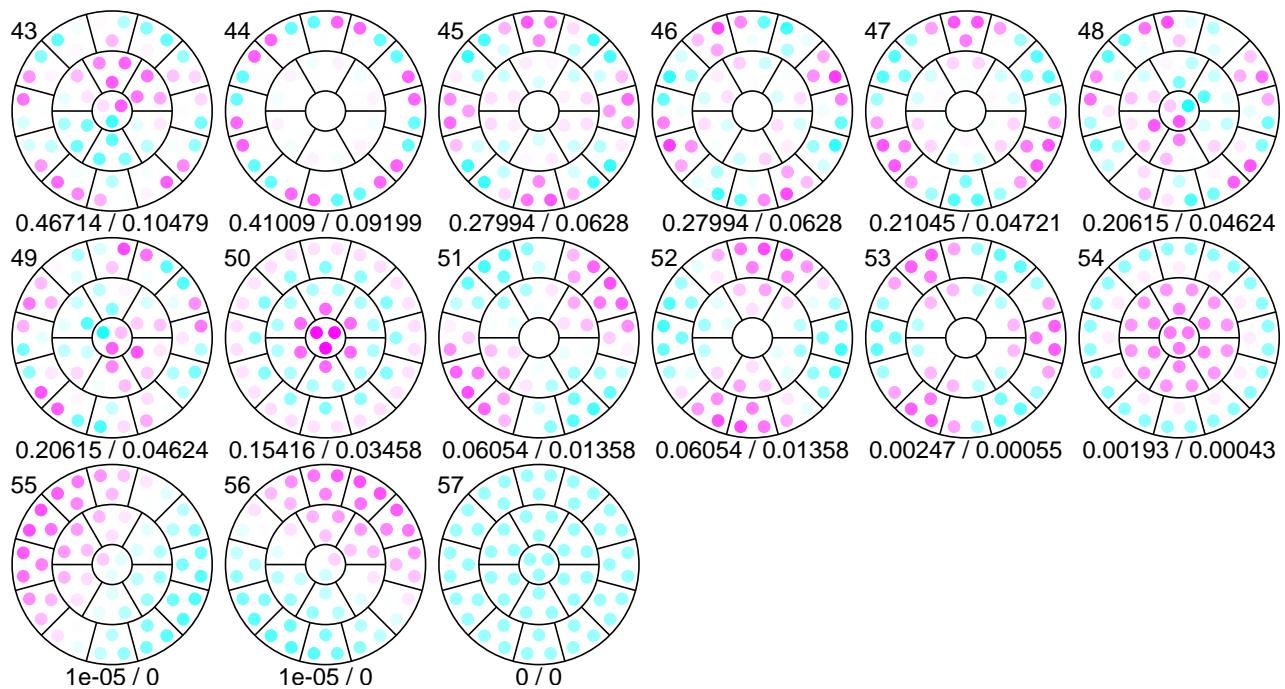


図 44: 試行 19 — 特異ベクトル分布

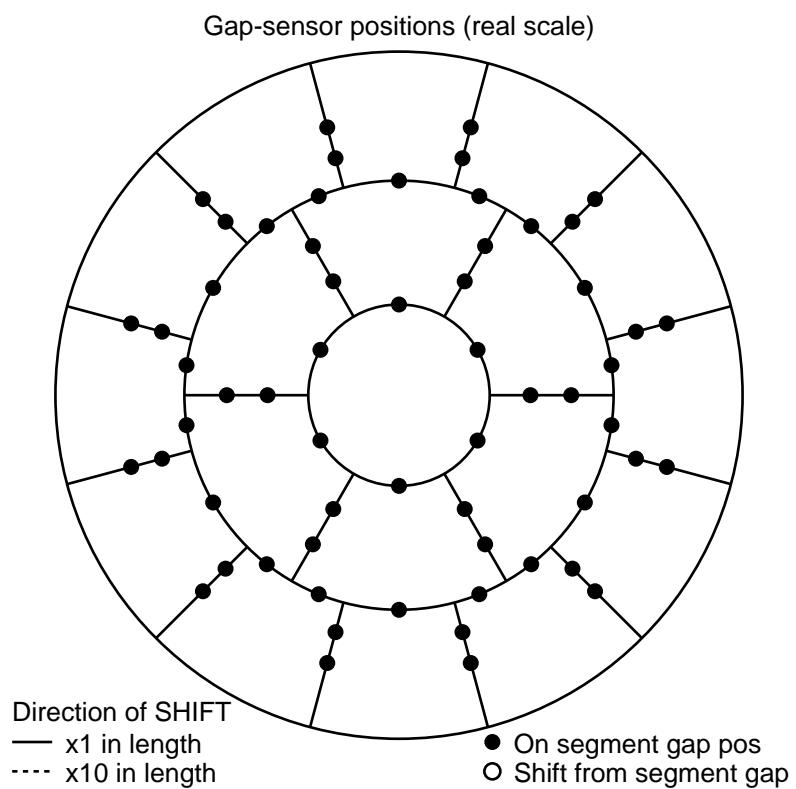


図 45: 試行 20 — ギャップセンサー配置

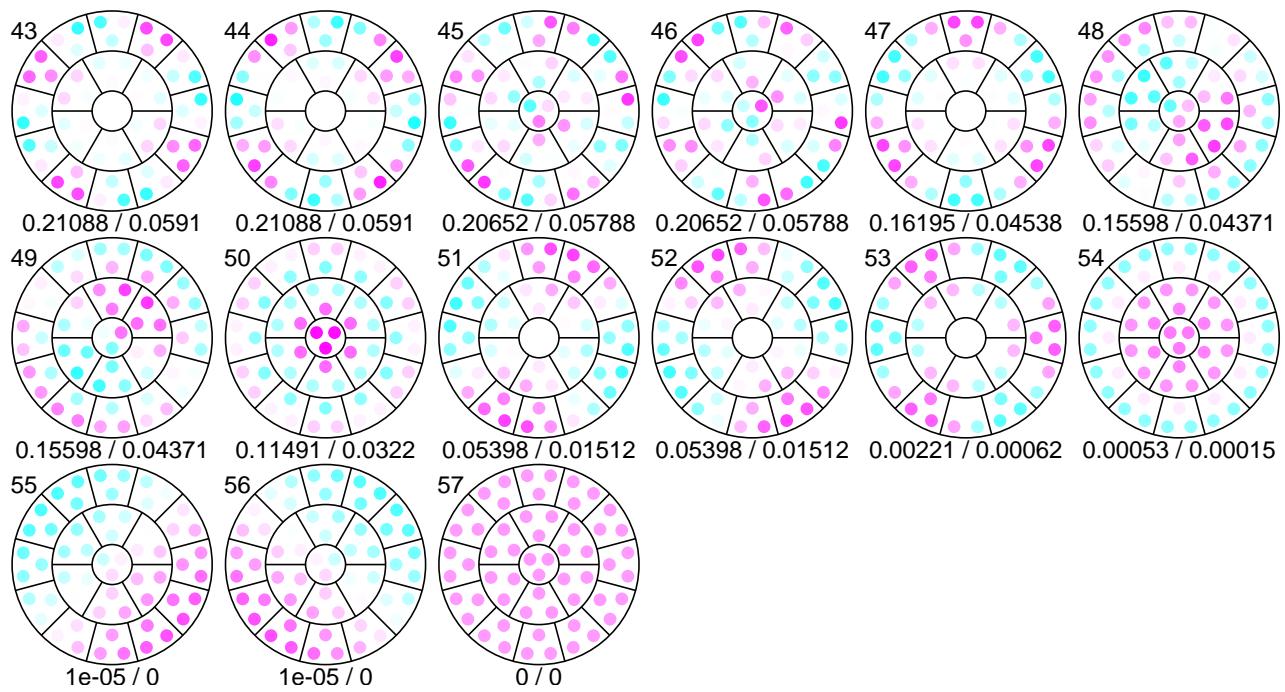


図 46: 試行 20 — 特異ベクトル分布

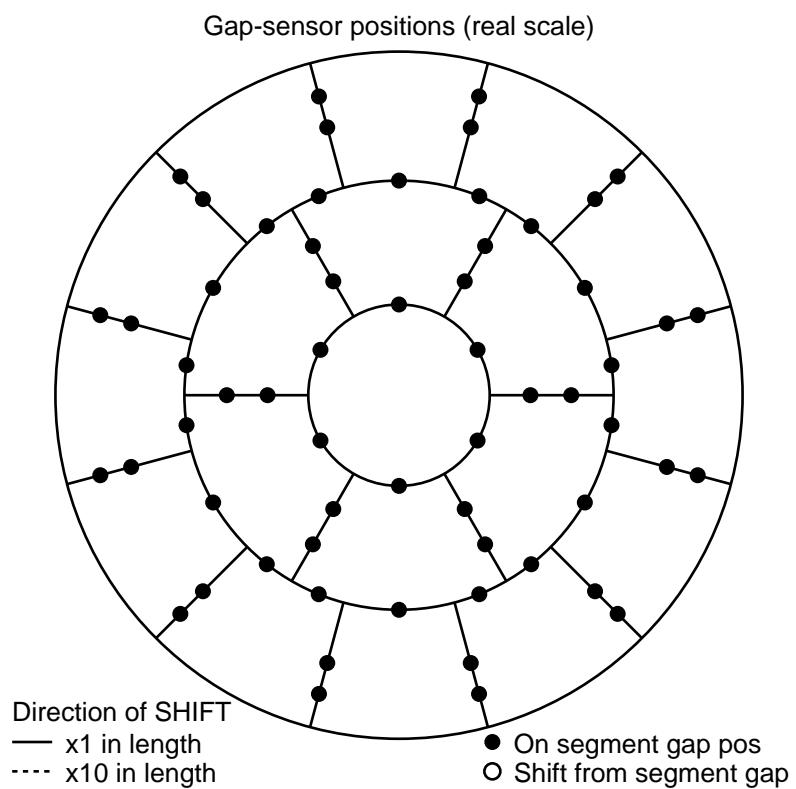


図 47: 試行 21 — ギャップセンサー配置

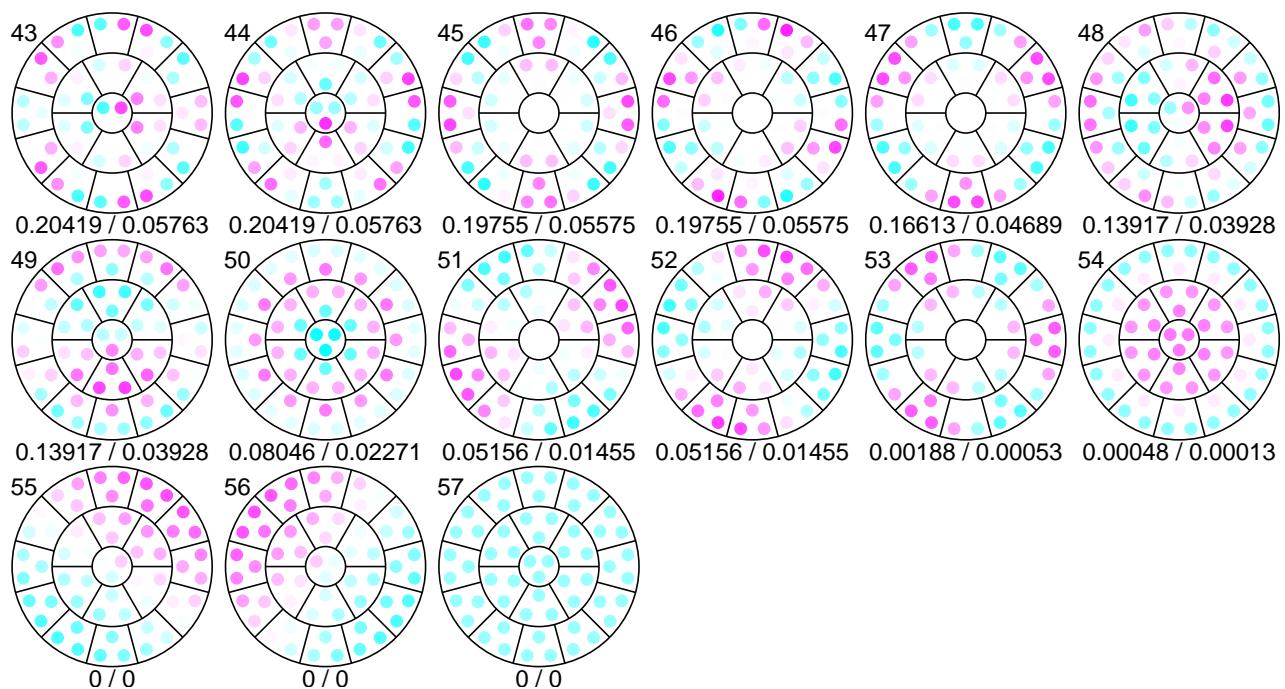


図 48: 試行 21 — 特異ベクトル分布

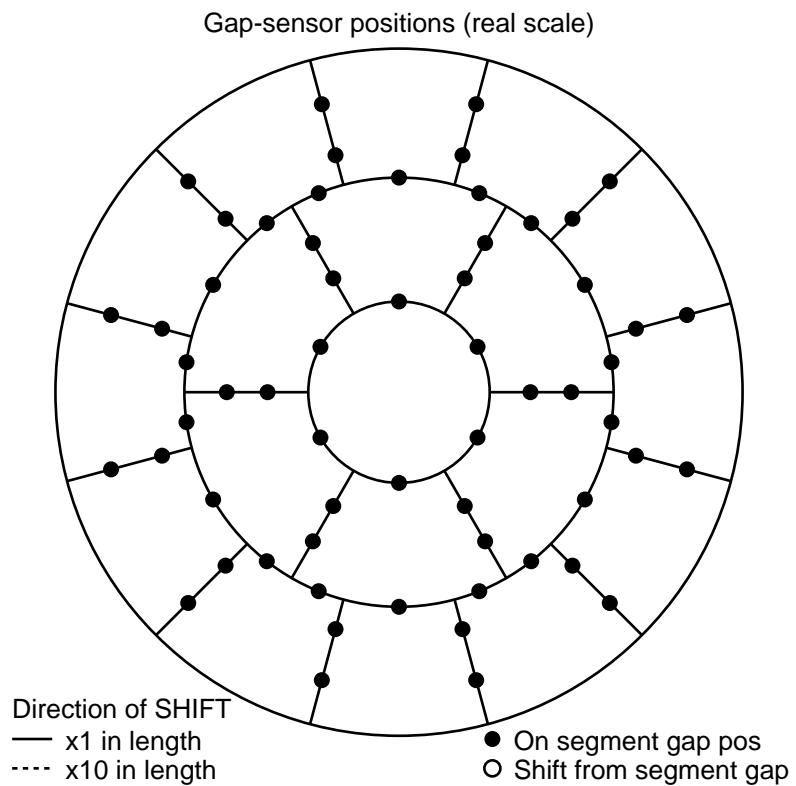


図 49: 試行 22 — ギャップセンサー配置

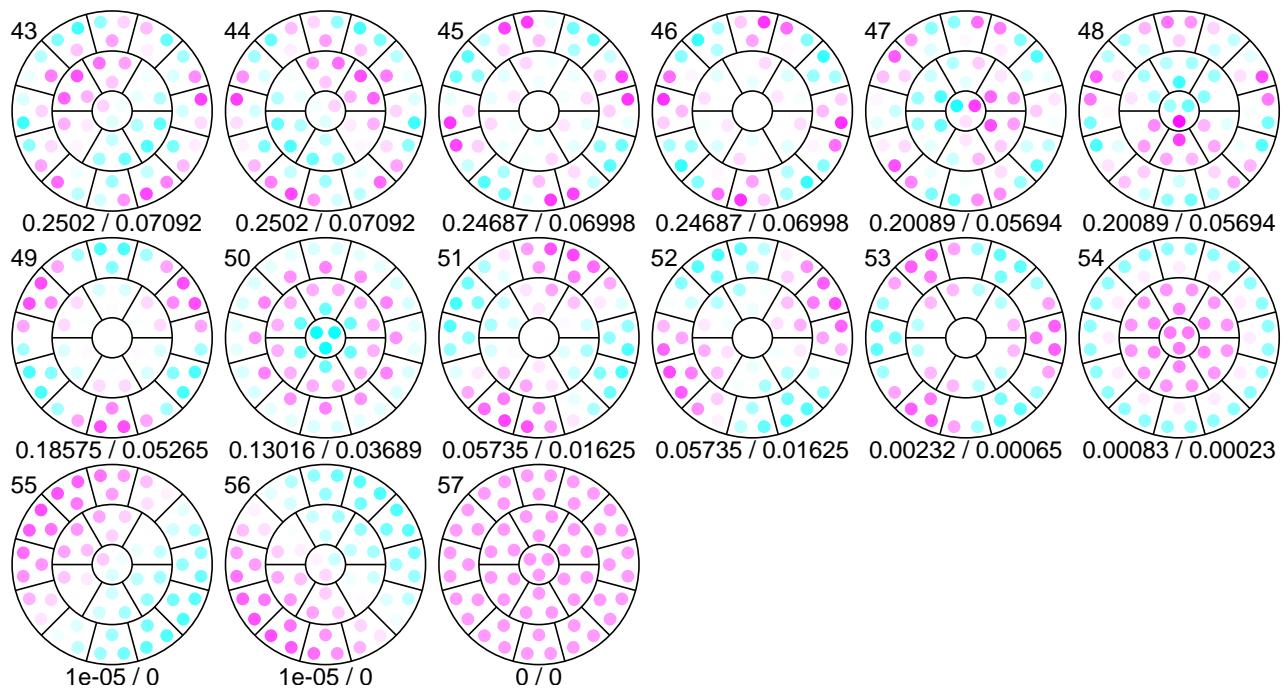


図 50: 試行 22 — 特異ベクトル分布

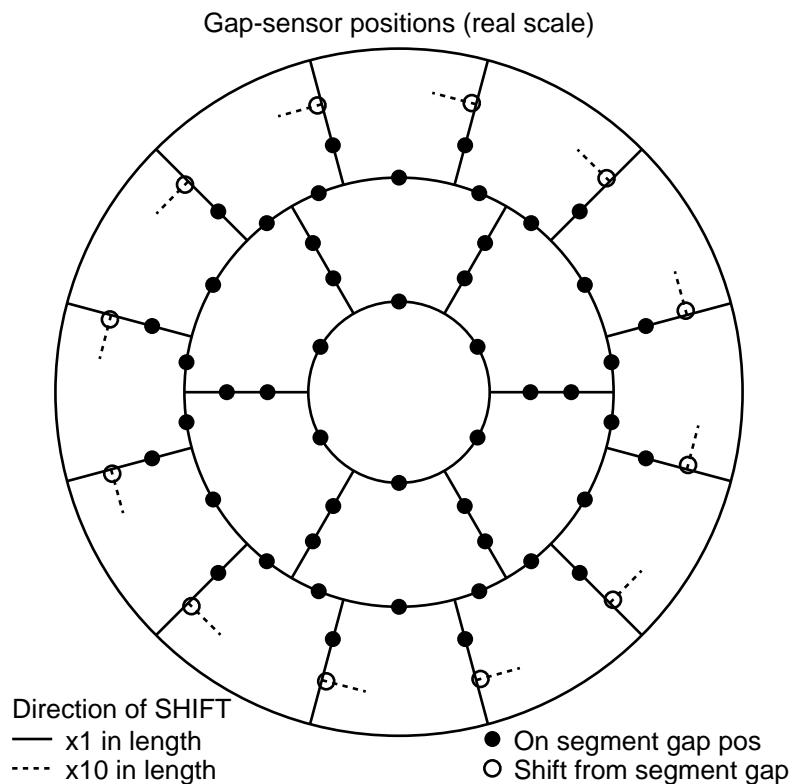


図 51: 試行 23 — ギャップセンサー配置

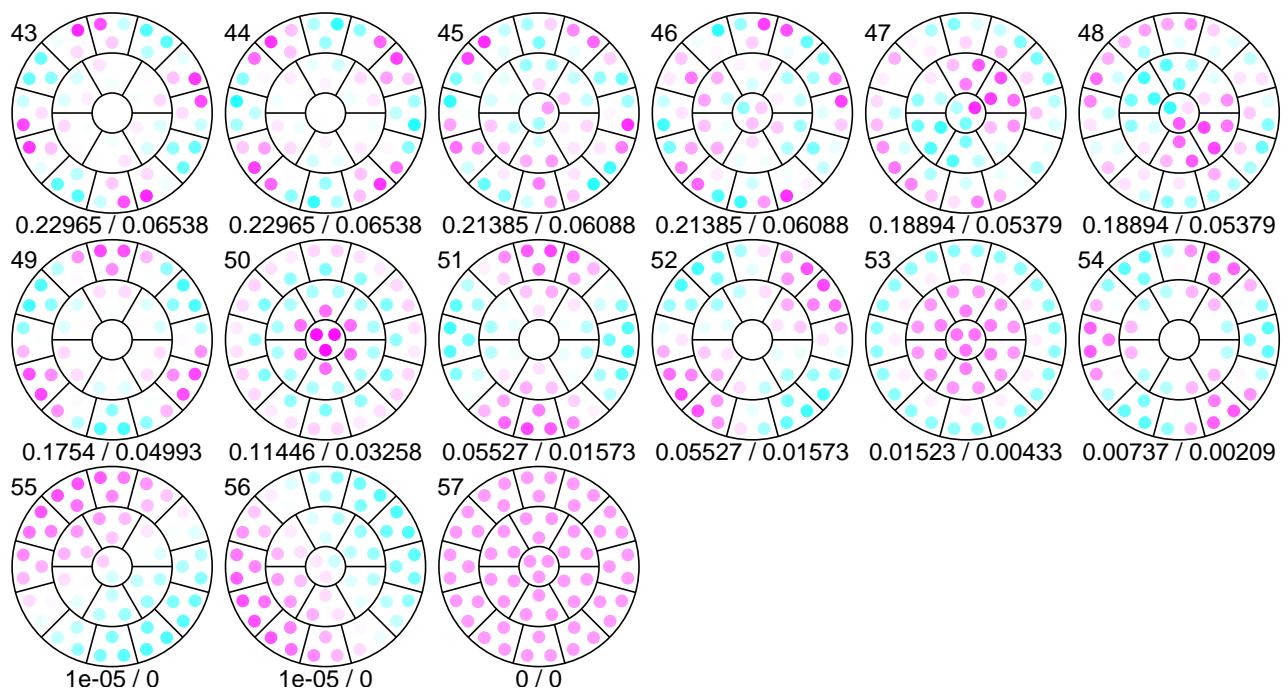


図 52: 試行 23 — 特異ベクトル分布

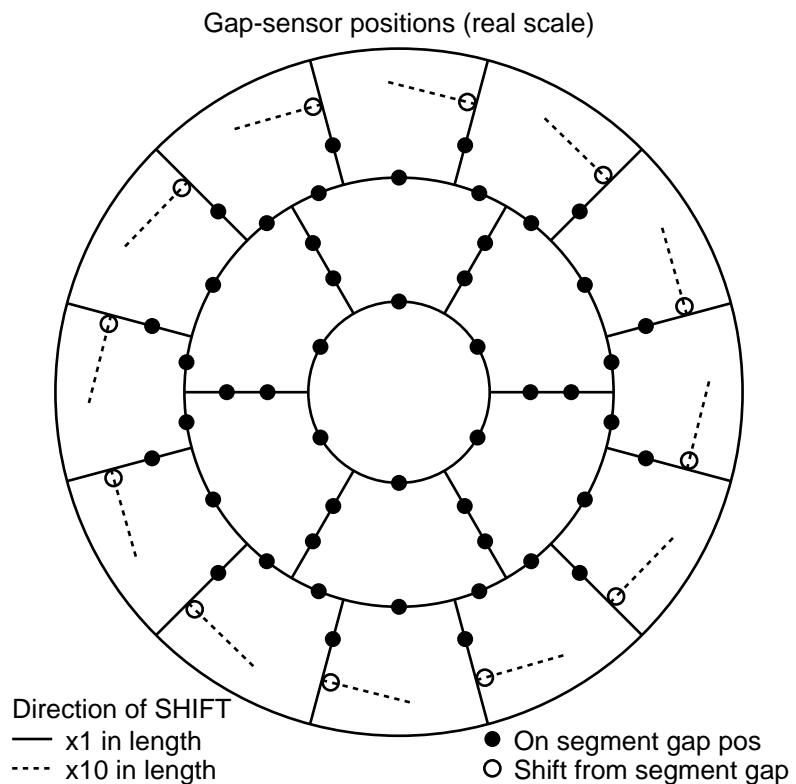


図 53: 試行 24 — ギャップセンサー配置

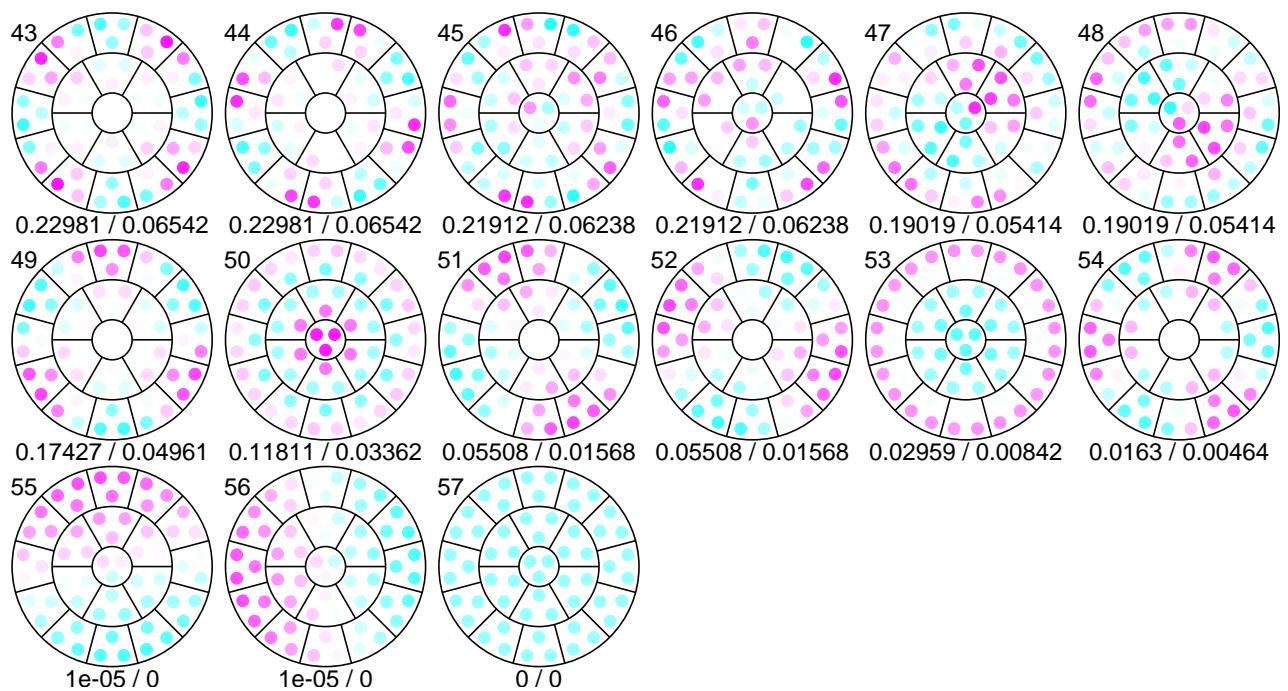


図 54: 試行 24 — 特異ベクトル分布

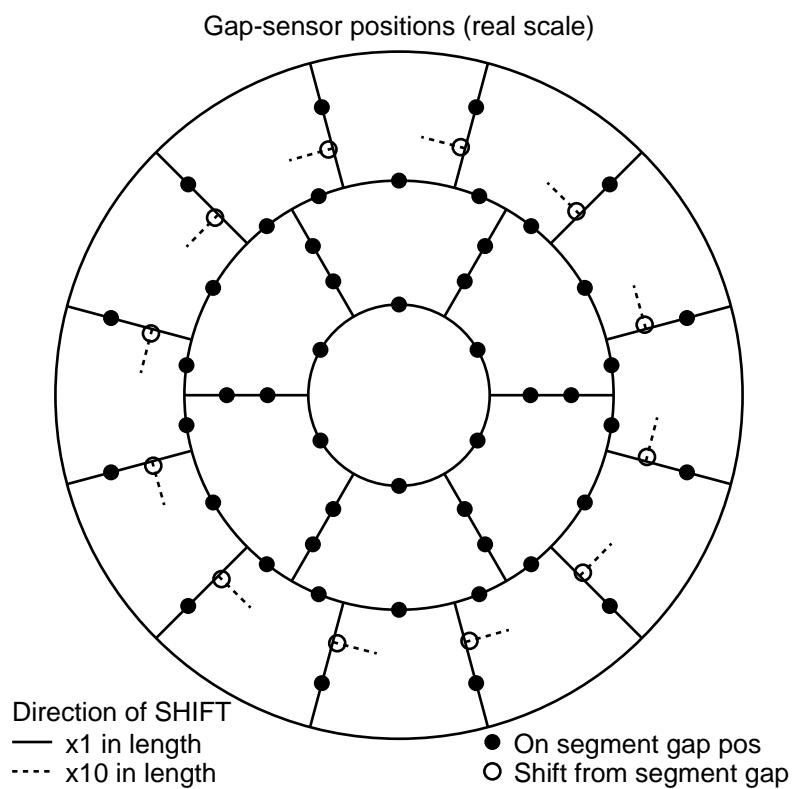


図 55: 試行 25 — ギャップセンサー配置

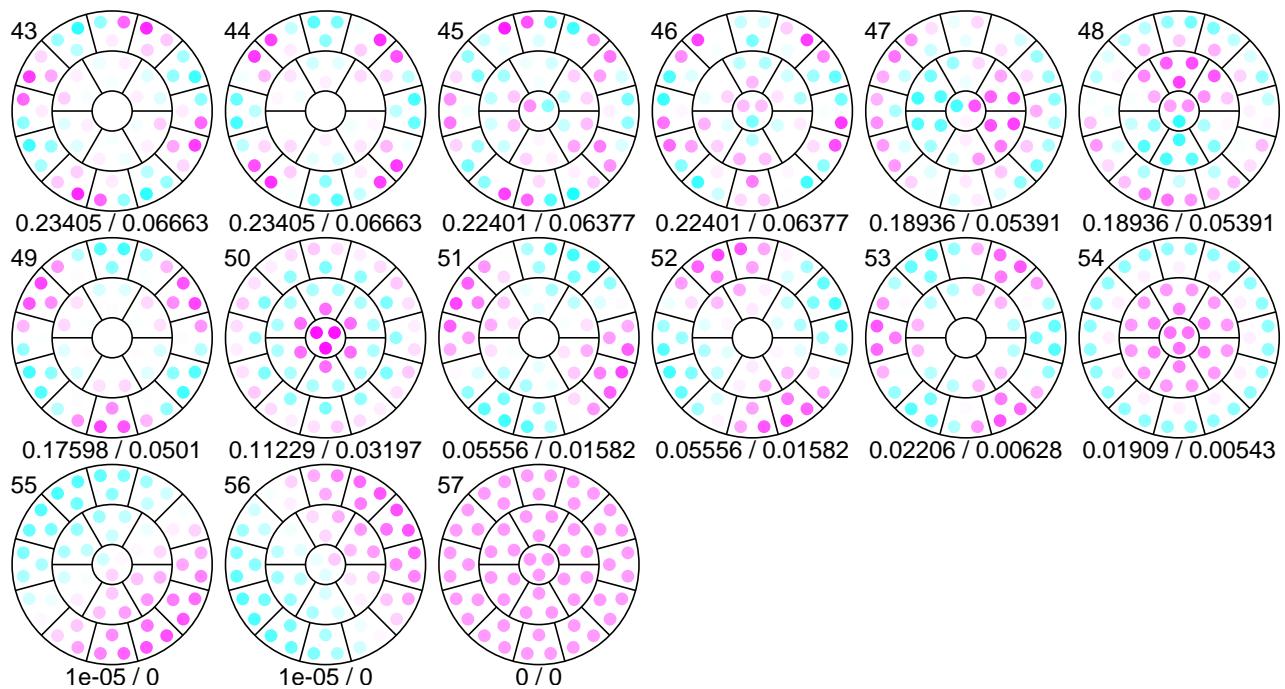


図 56: 試行 25 — 特異ベクトル分布

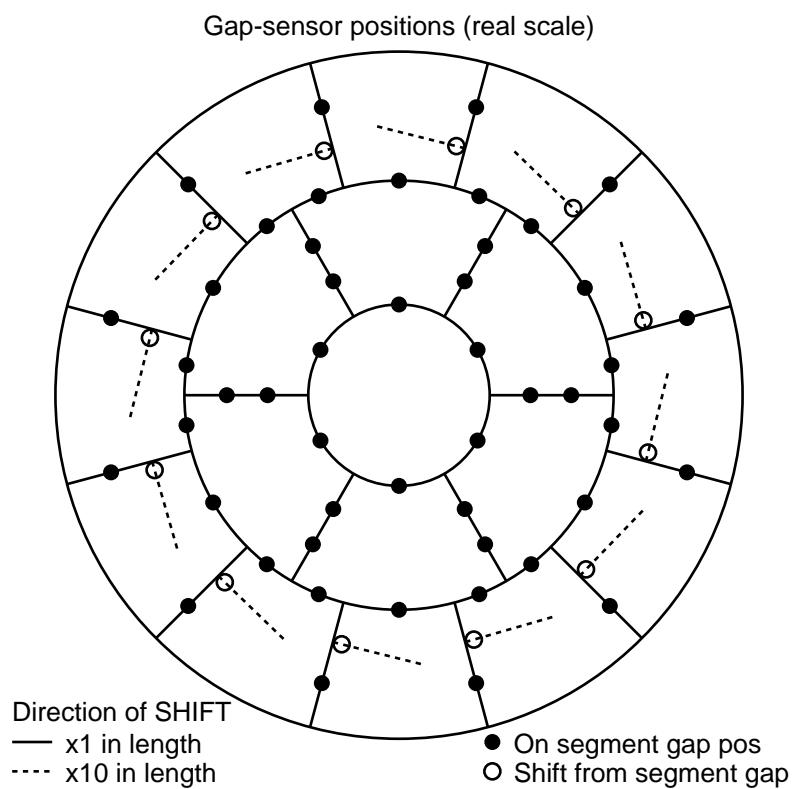


図 57: 試行 26 — ギャップセンサー配置

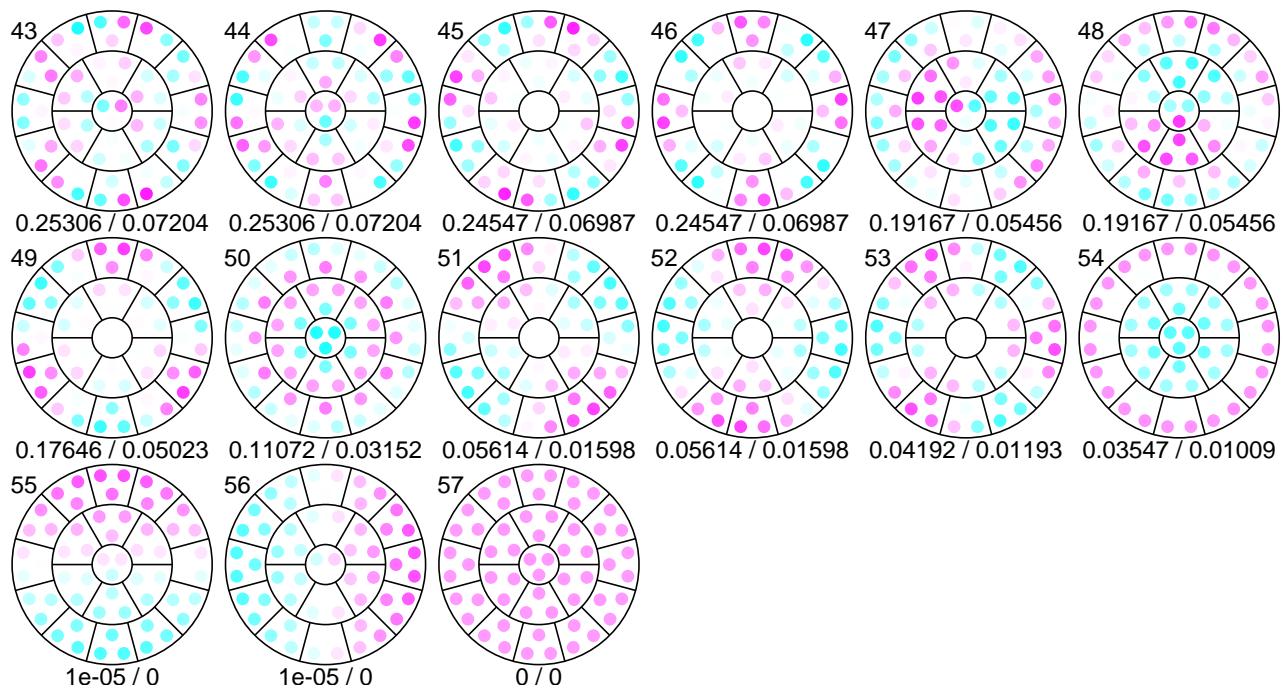


図 58: 試行 26 — 特異ベクトル分布

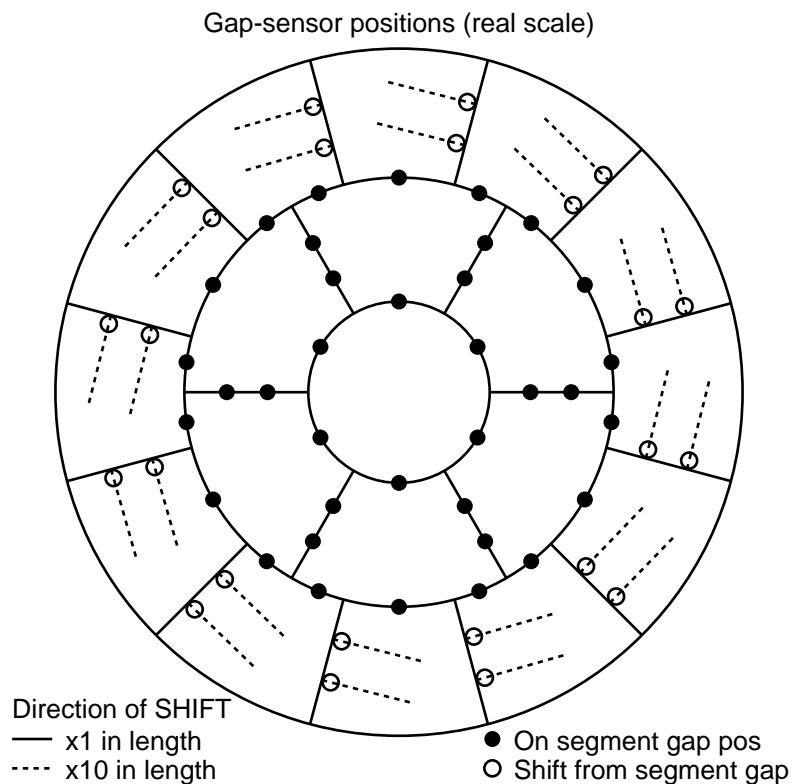


図 59: 試行 27 — ギャップセンサー配置

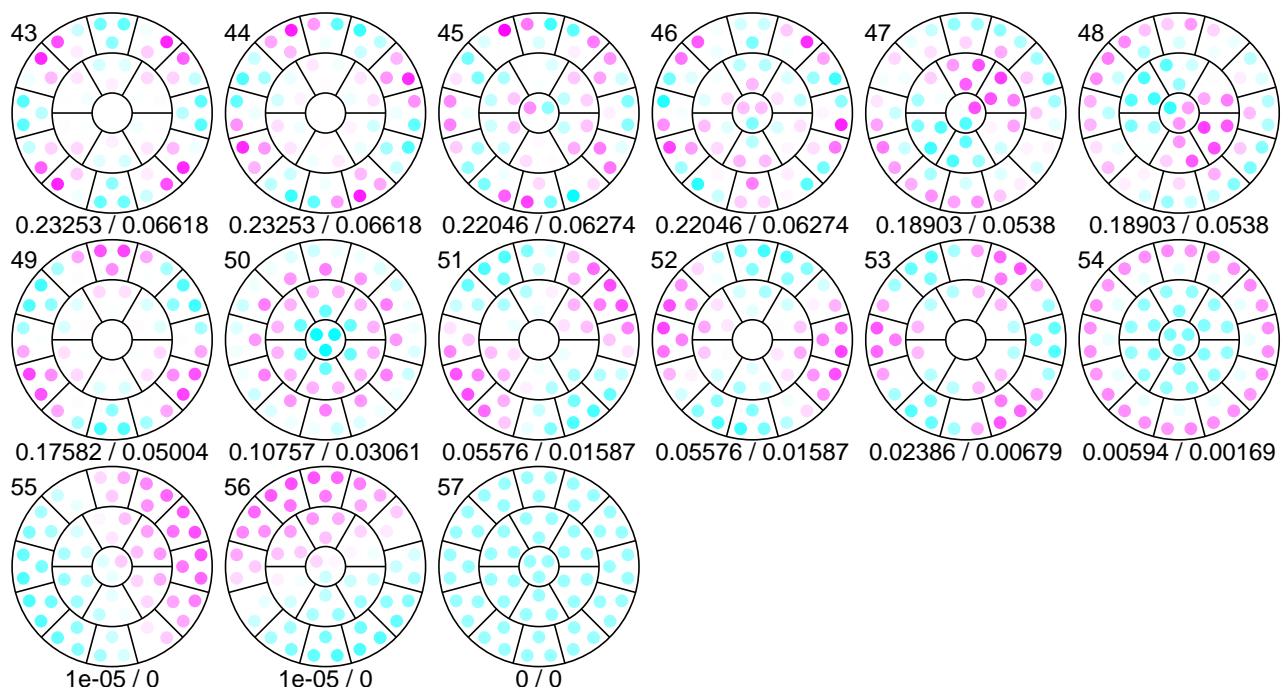


図 60: 試行 27 — 特異ベクトル分布

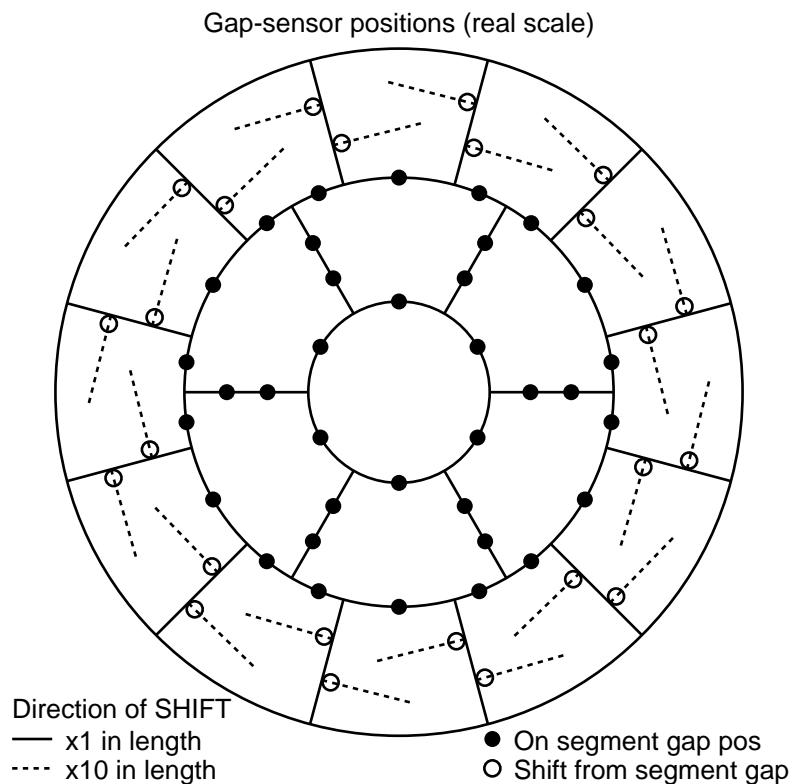


図 61: 試行 28 — ギャップセンサー配置

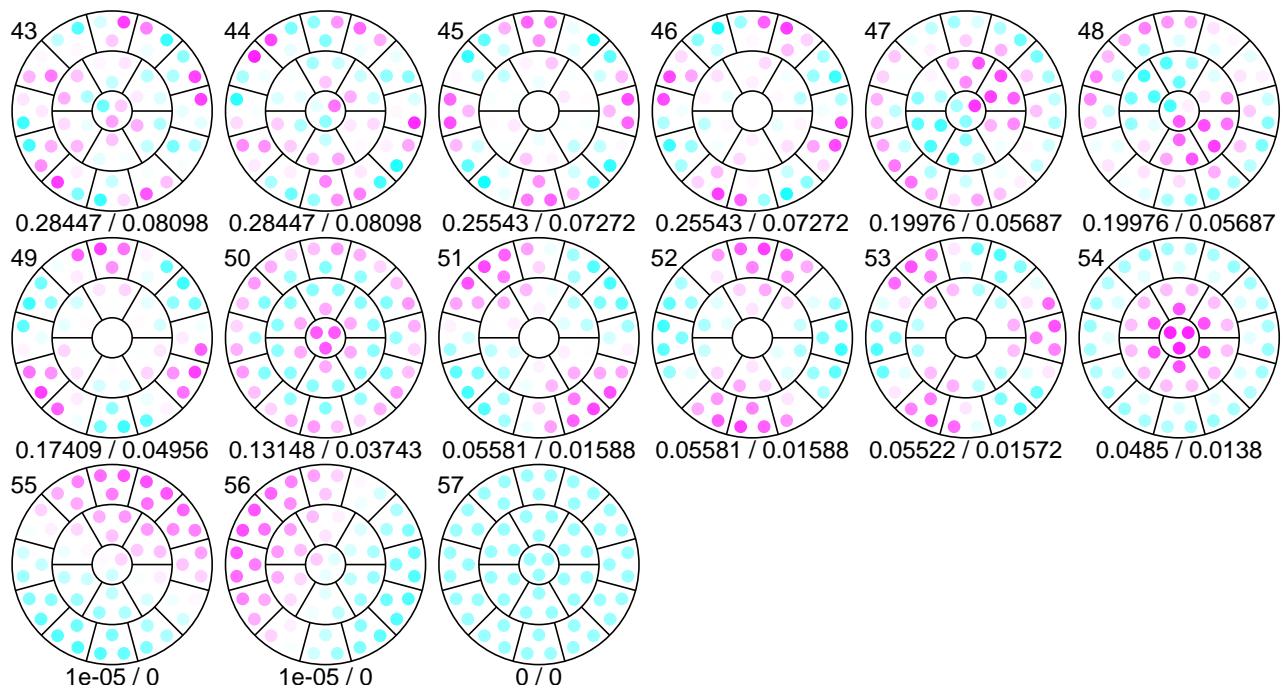


図 62: 試行 28 — 特異ベクトル分布

#### 4.3.6 内外周セグメント間に対する配置 — 中心線上

内周・外周の片側ずつでなくて両方に対して同じ配置を試し、ギャップセンサー取り付け位置の影響を見る。

29 (2/5, 3/5) : 中心対称で中心から 1/10

30 (1/4, 3/4) : 中心対称で中心から 1/4

31 (1/10, 9/10) : 中心対称で中心から 2/5

32 (0, 1) : 両端

33 (1/4, 2/4) : 内環側にずらす

34 (2/4, 3/4) : 外周側にずらす

35 (1/4, 2/3) : 非対称

#### 4.3.7 内外周セグメント間に対する配置 — セグメント内

内周・外周の片側ずつでなくて両方に対して中心線からセグメント内に入った同じ位置にくるようなずらした配置を検証することで、ギャップセンサー取り付け位置の影響を見る。

36 (0, +25)

37 (0, +50)

38 (+25, 0)

39 (+50, 0)

40 (+50, +50)

41 (-50, +50)

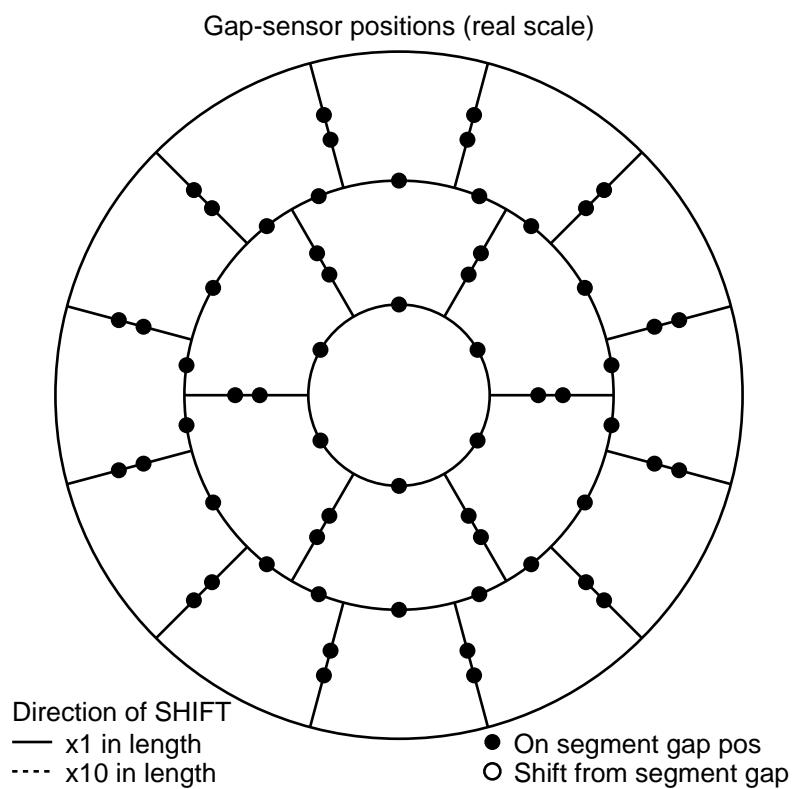


図 63: 試行 29 — ギャップセンサー配置

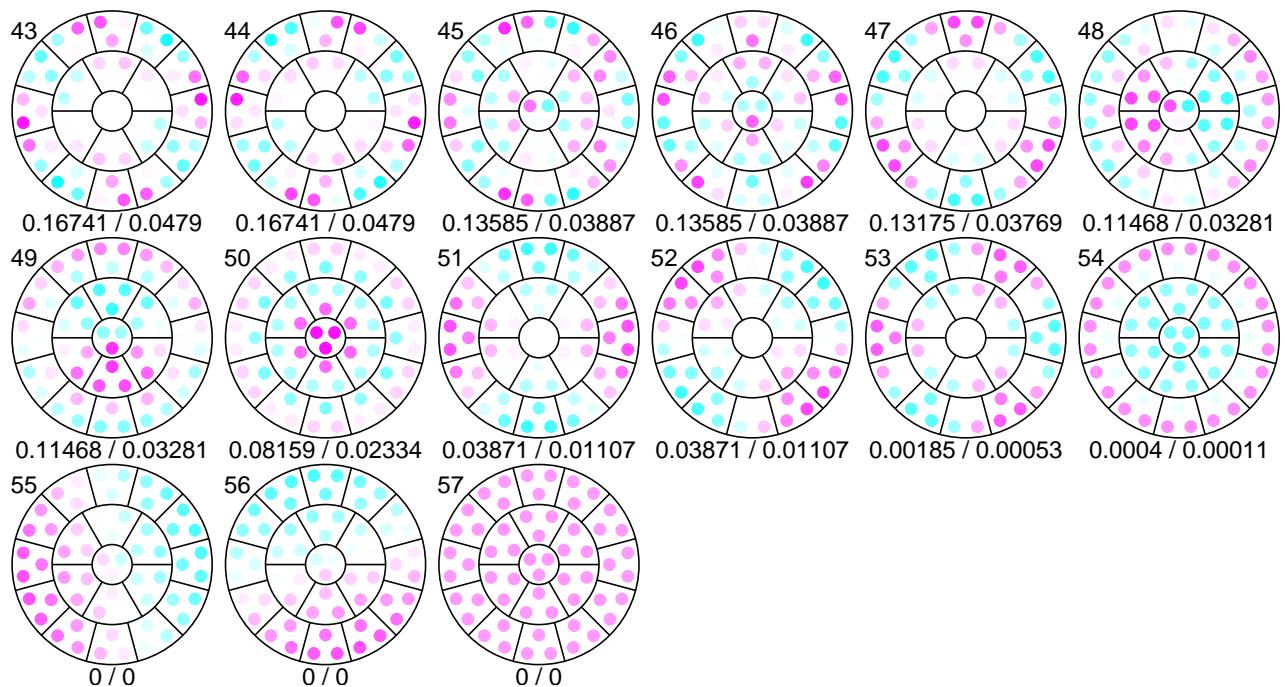


図 64: 試行 29 — 特異ベクトル分布

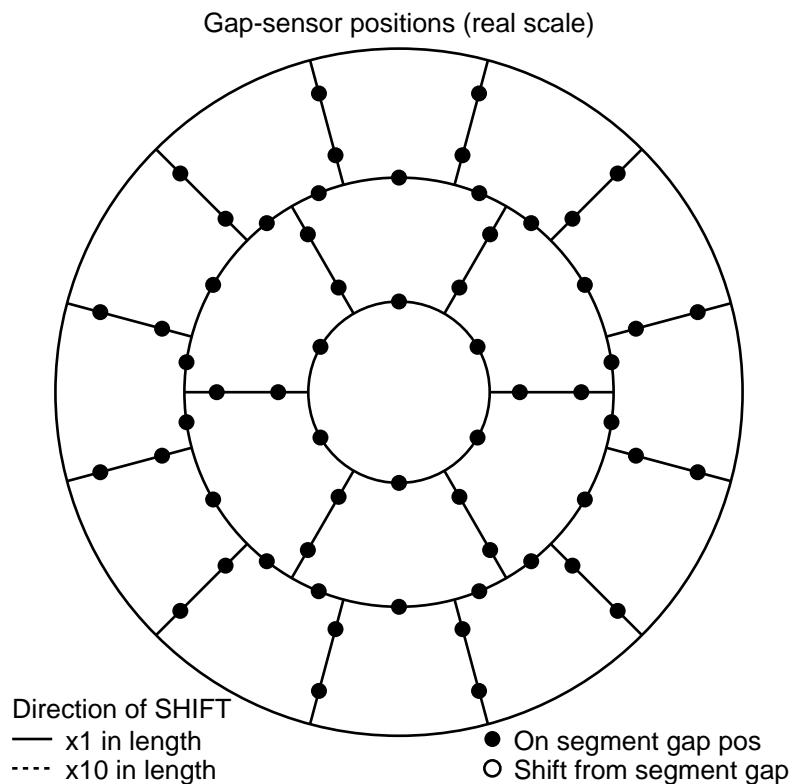


図 65: 試行 30 — ギャップセンサー配置

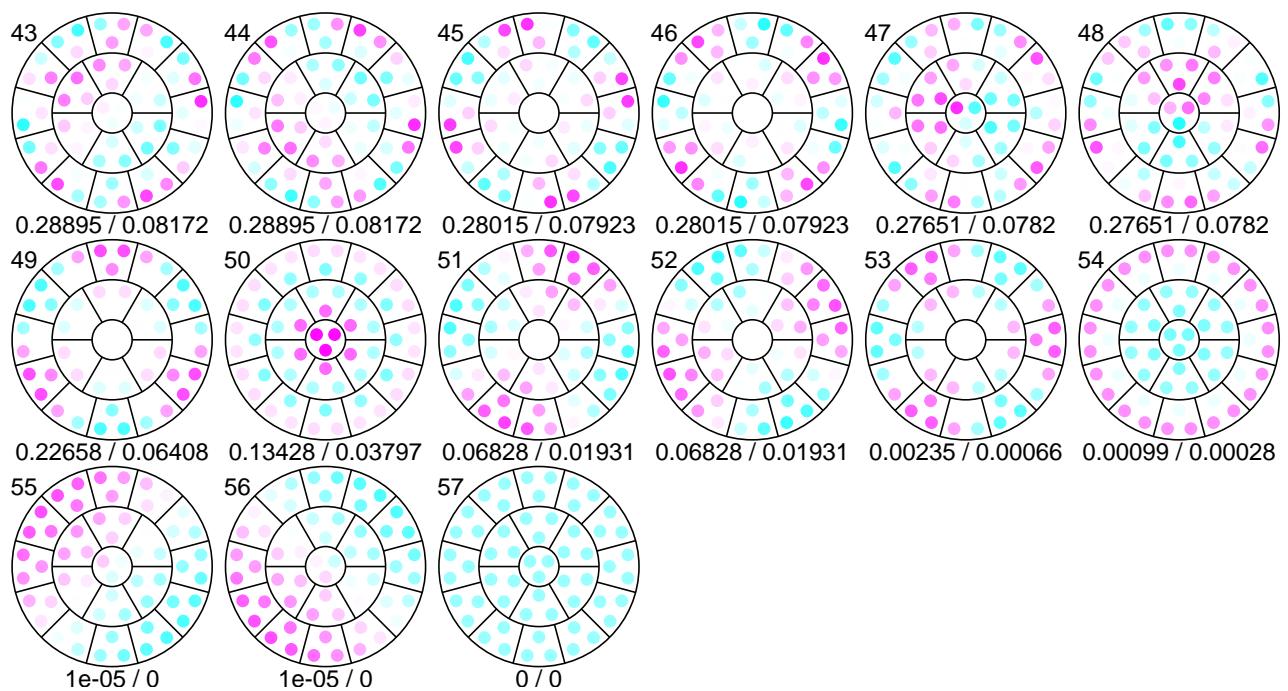


図 66: 試行 30 — 特異ベクトル分布

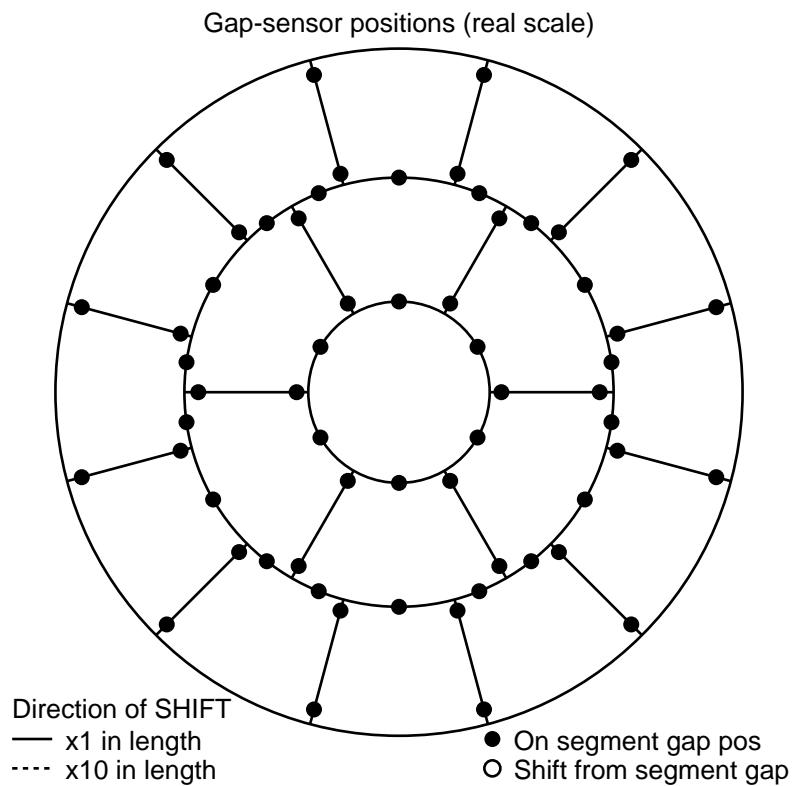


図 67: 試行 31 — ギャップセンサー配置

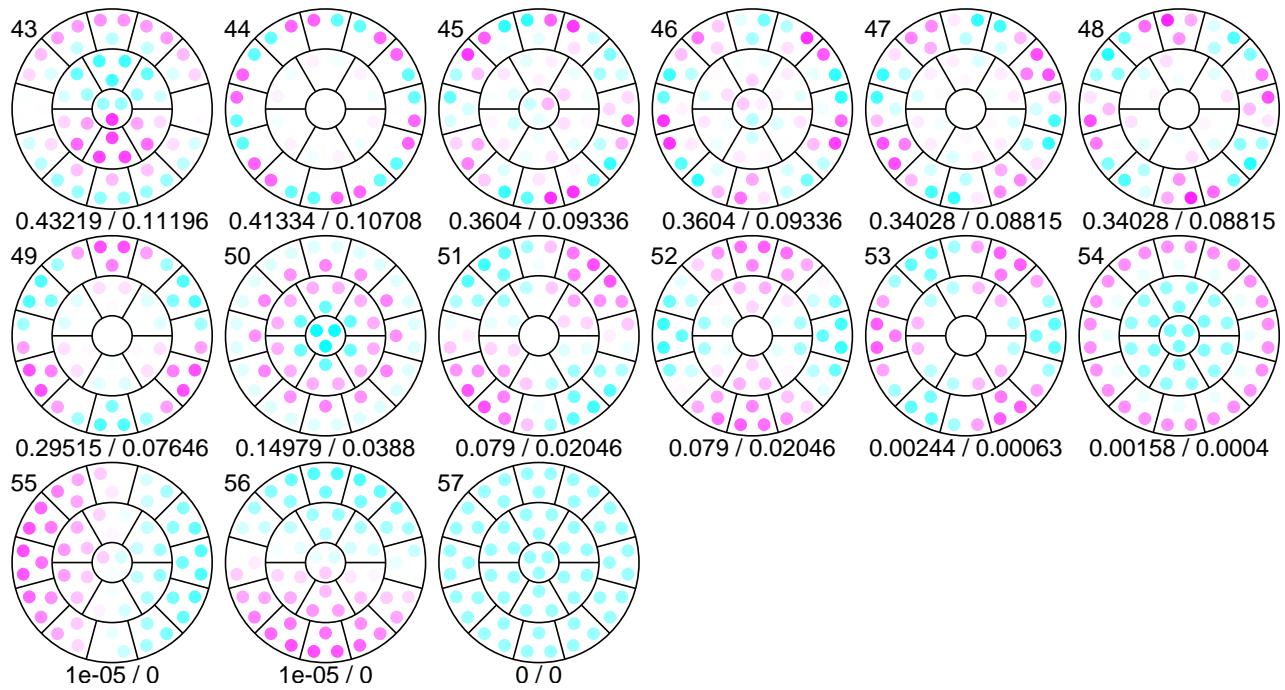


図 68: 試行 31 — 特異ベクトル分布

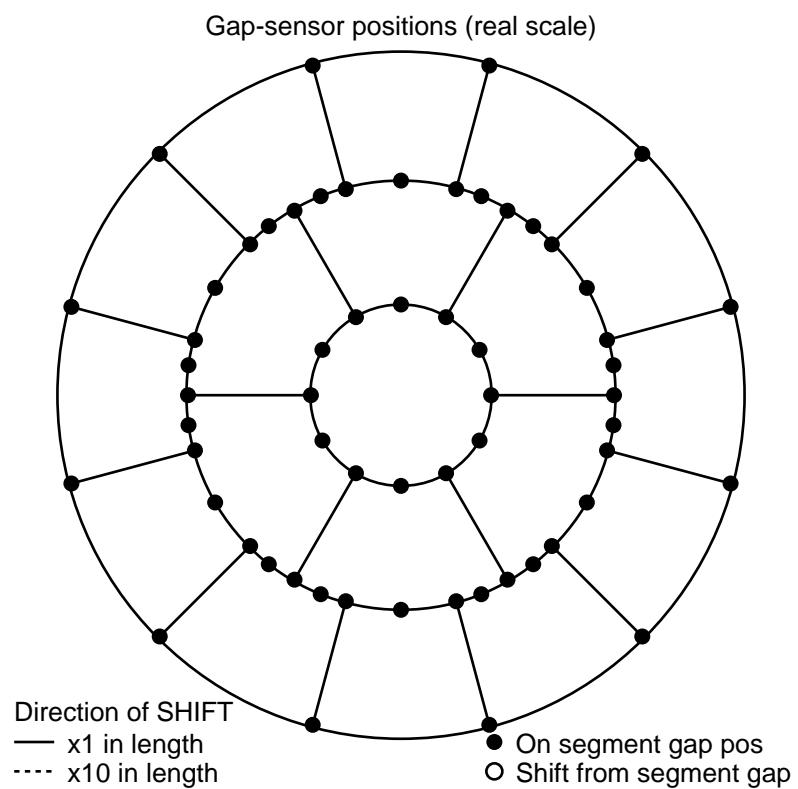


図 69: 試行 32 — ギャップセンサー配置

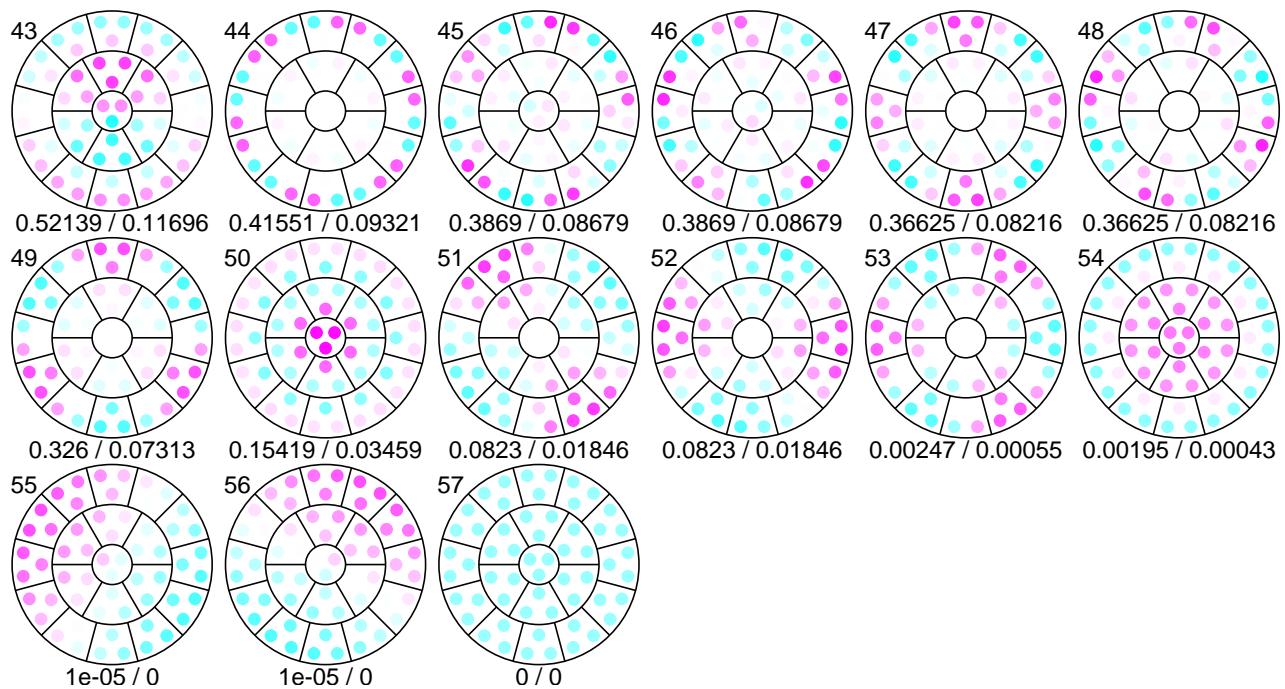


図 70: 試行 32 — 特異ベクトル分布

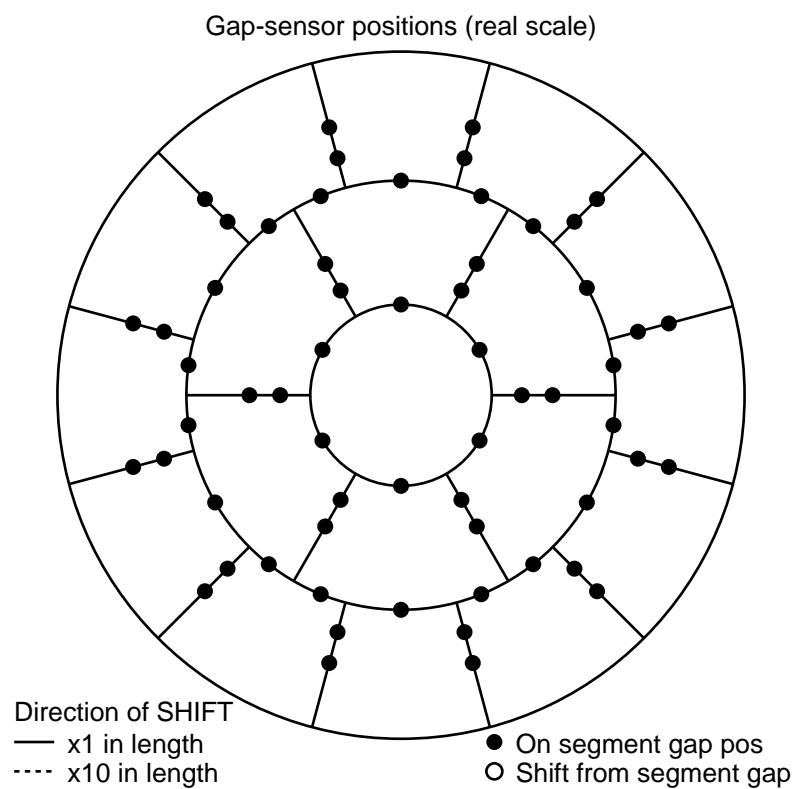


図 71: 試行 33 — ギャップセンサー配置

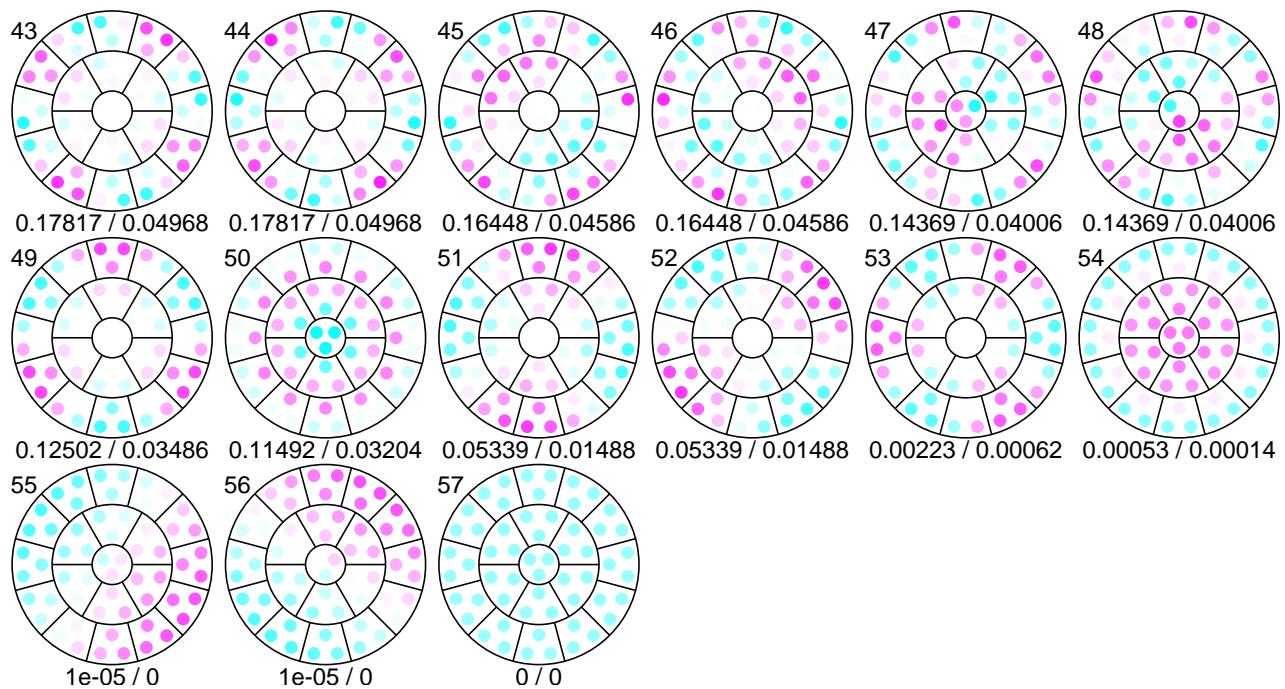


図 72: 試行 33 — 特異ベクトル分布

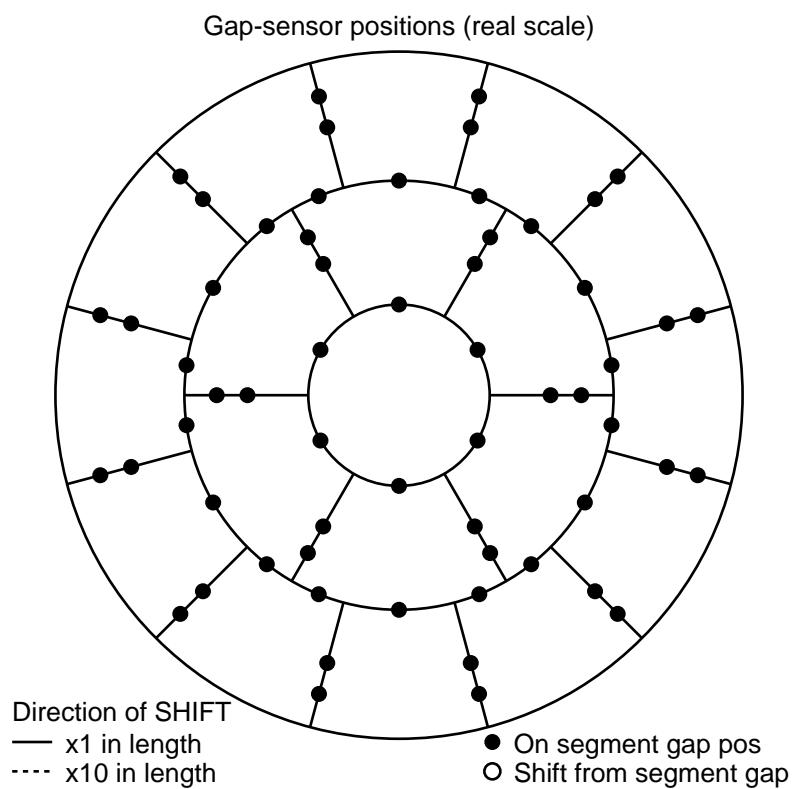


図 73: 試行 34 — ギャップセンサー配置

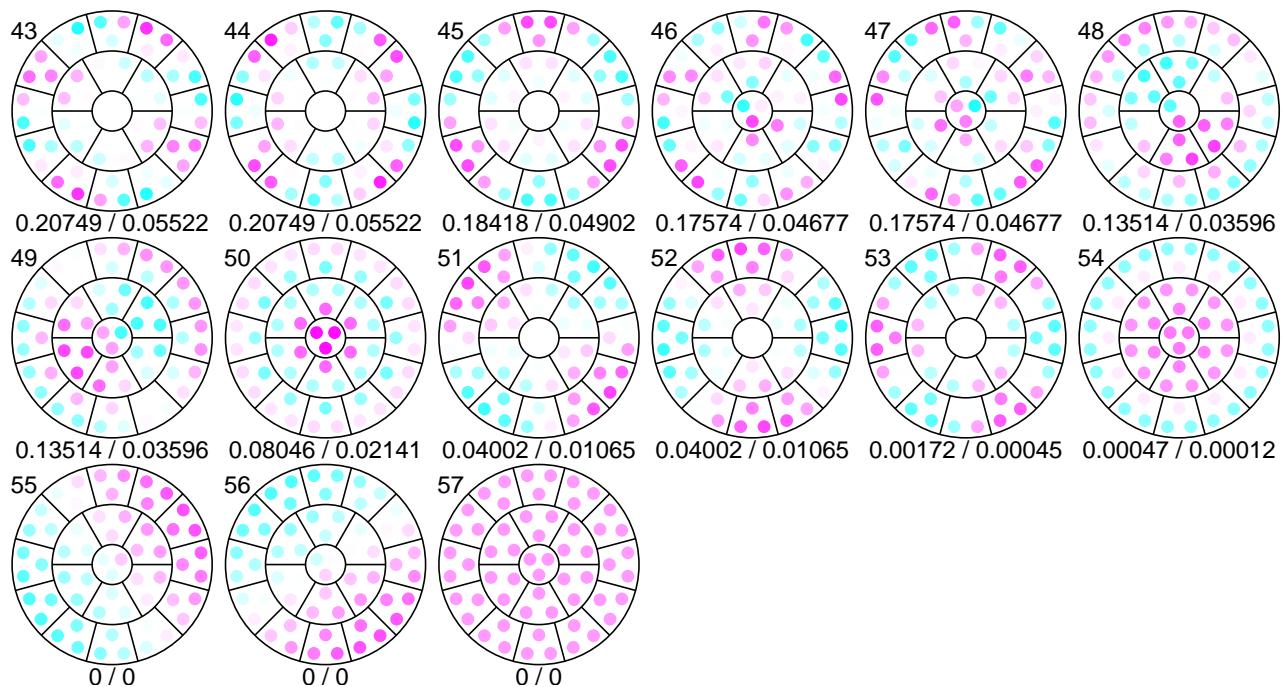


図 74: 試行 34 — 特異ベクトル分布

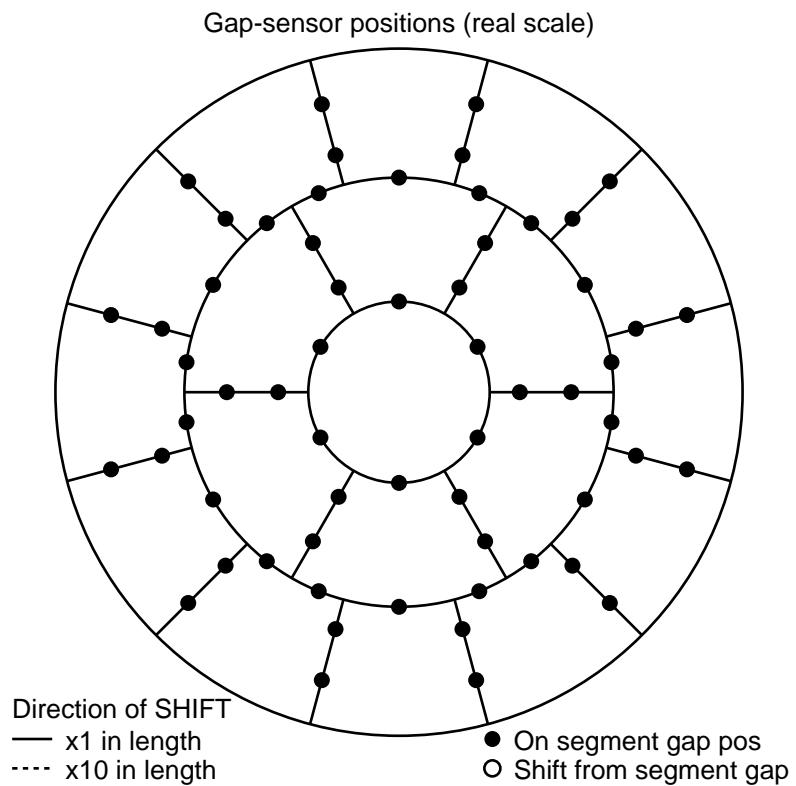


図 75: 試行 35 — ギャップセンサー配置

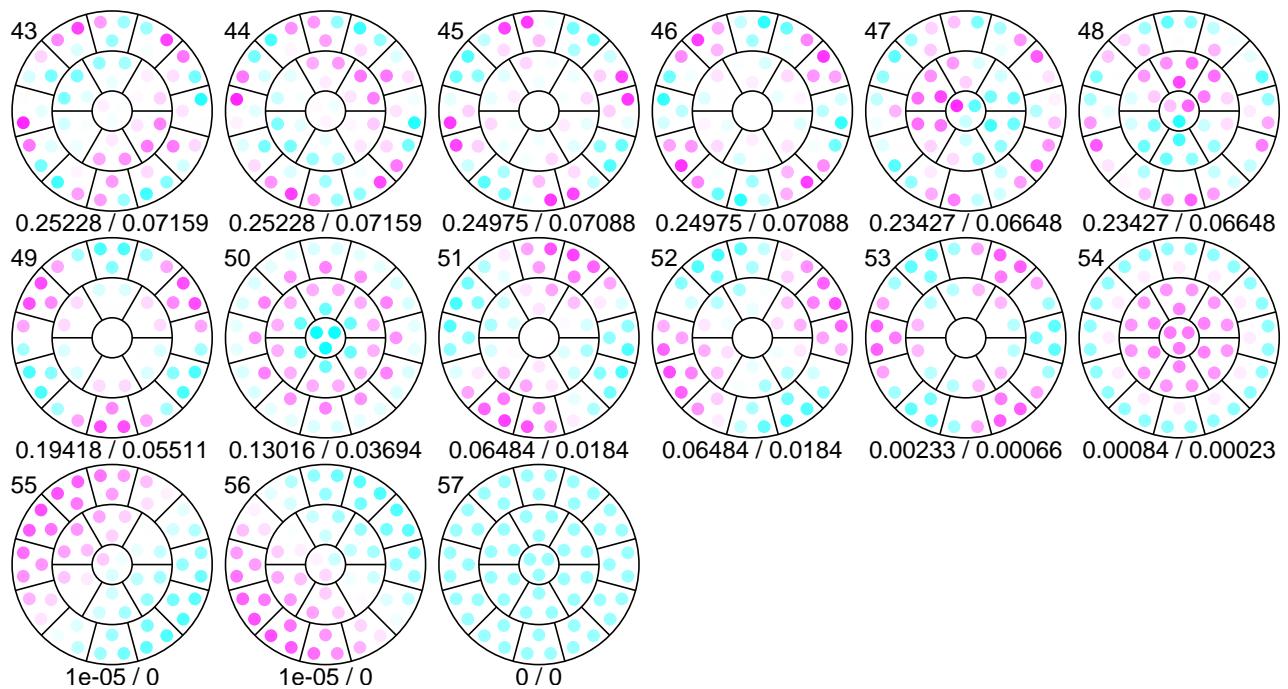


図 76: 試行 35 — 特異ベクトル分布

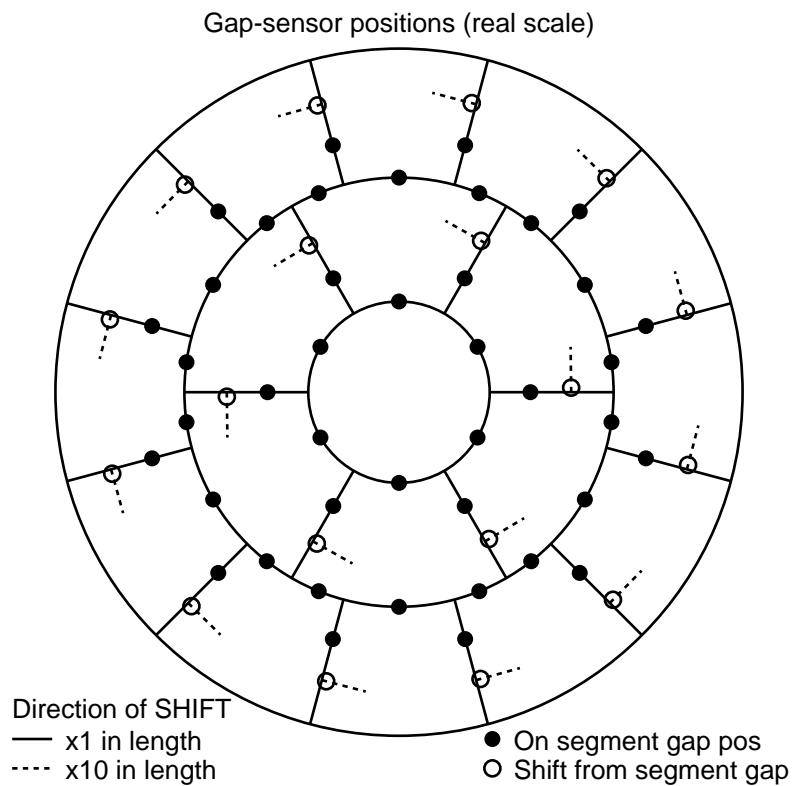


図 77: 試行 36 — ギャップセンサー配置

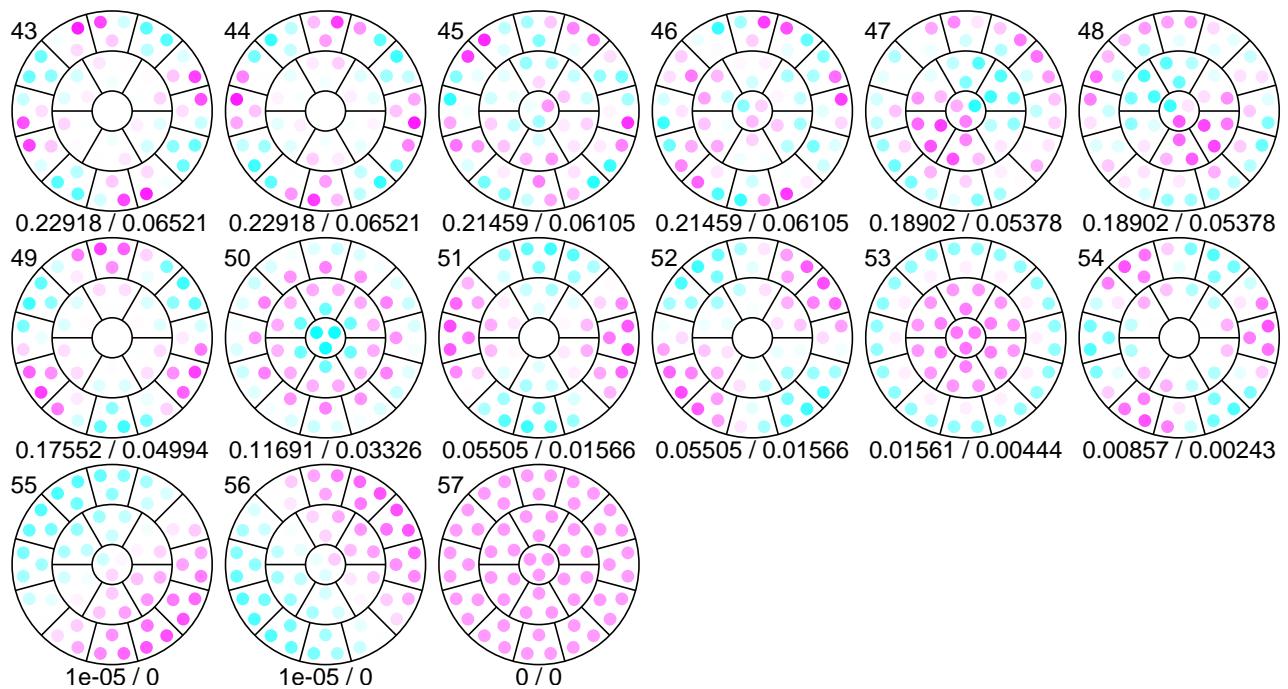


図 78: 試行 36 — 特異ベクトル分布

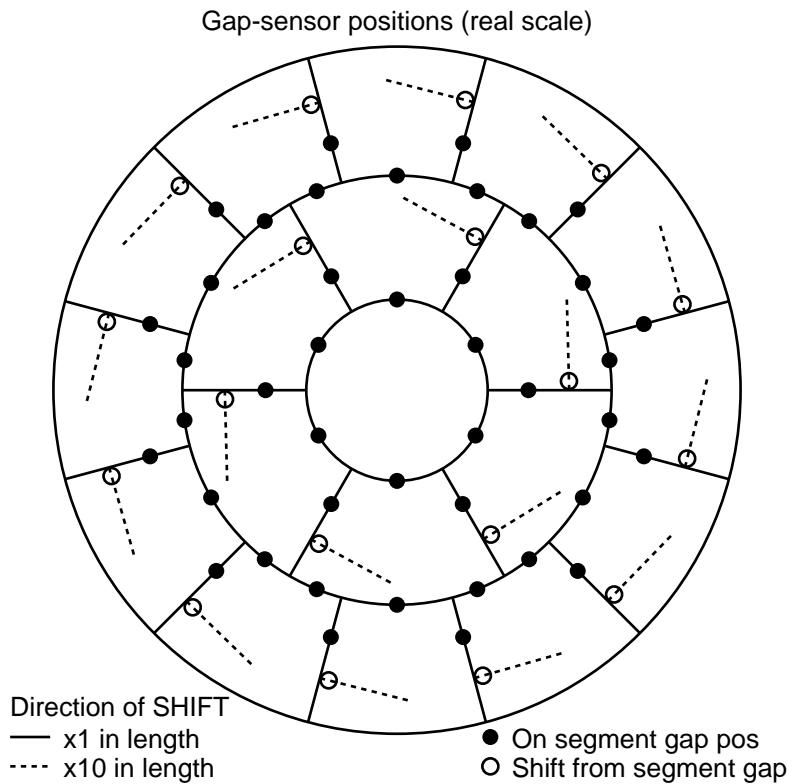


図 79: 試行 37 — ギャップセンサー配置

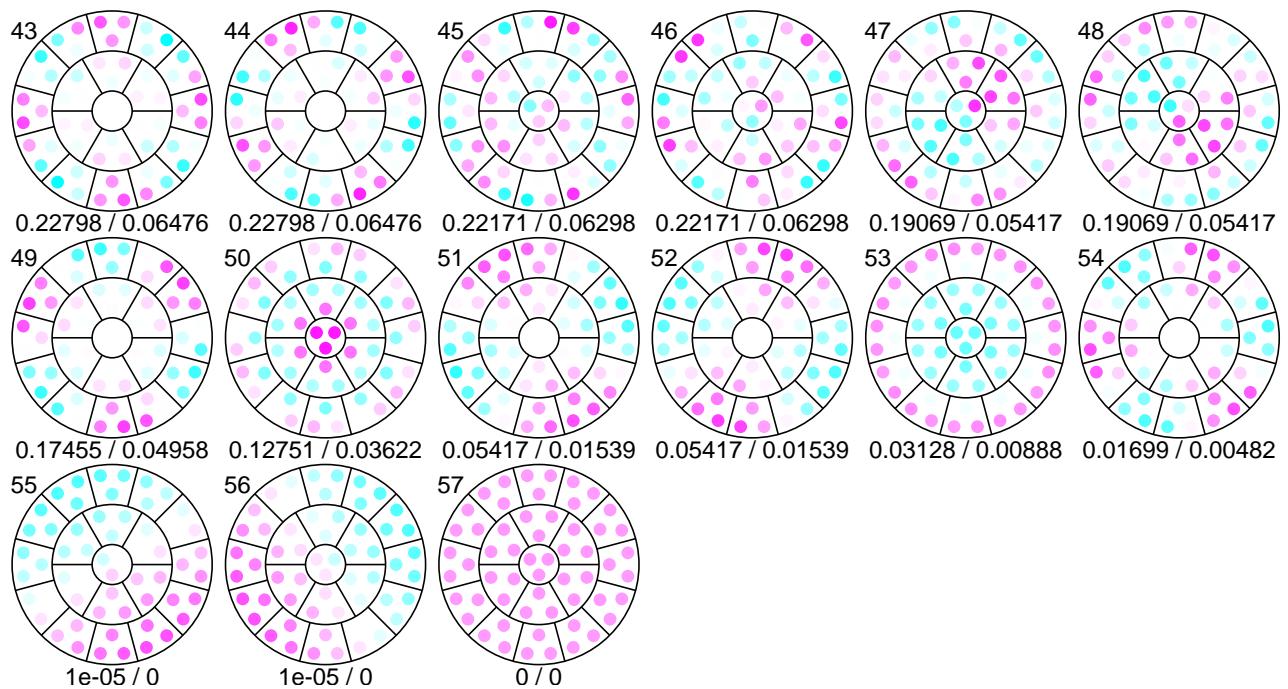


図 80: 試行 37 — 特異ベクトル分布

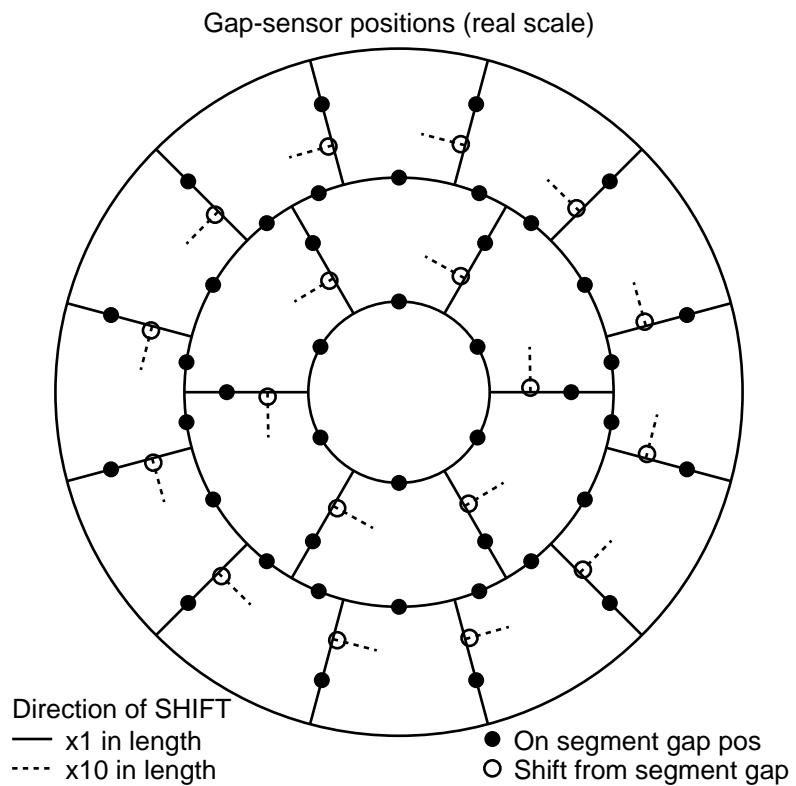


図 81: 試行 38 — ギャップセンサー配置

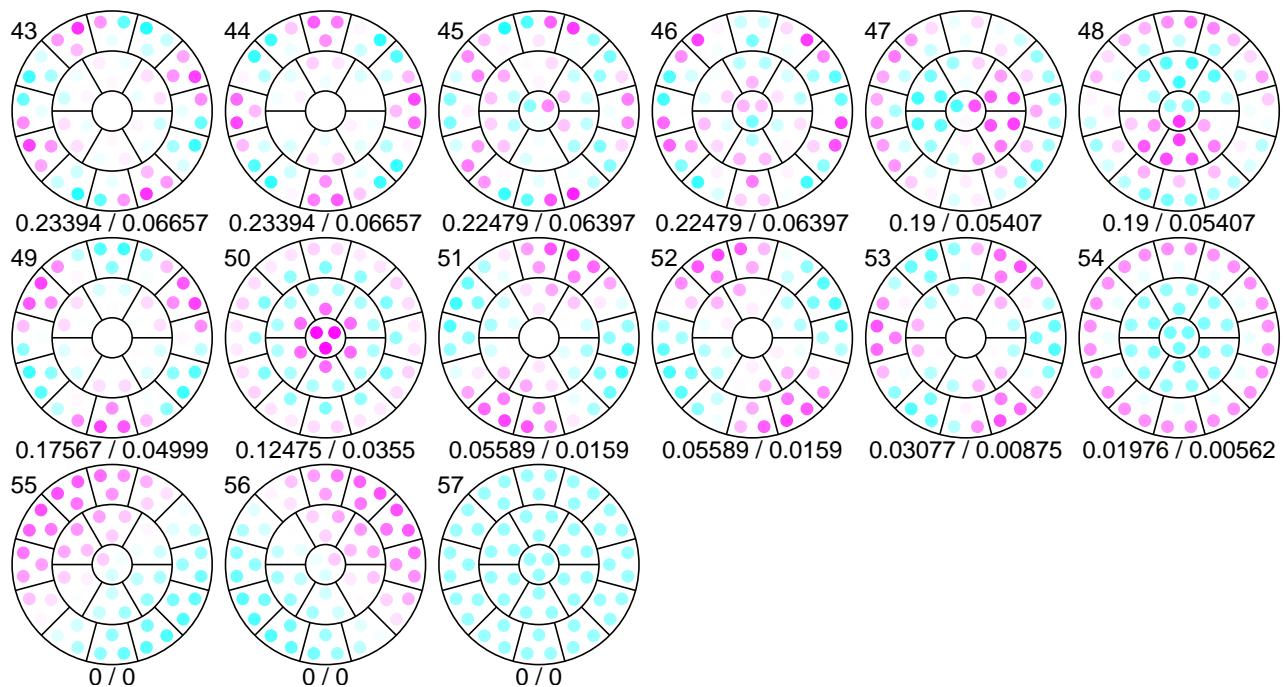


図 82: 試行 38 — 特異ベクトル分布

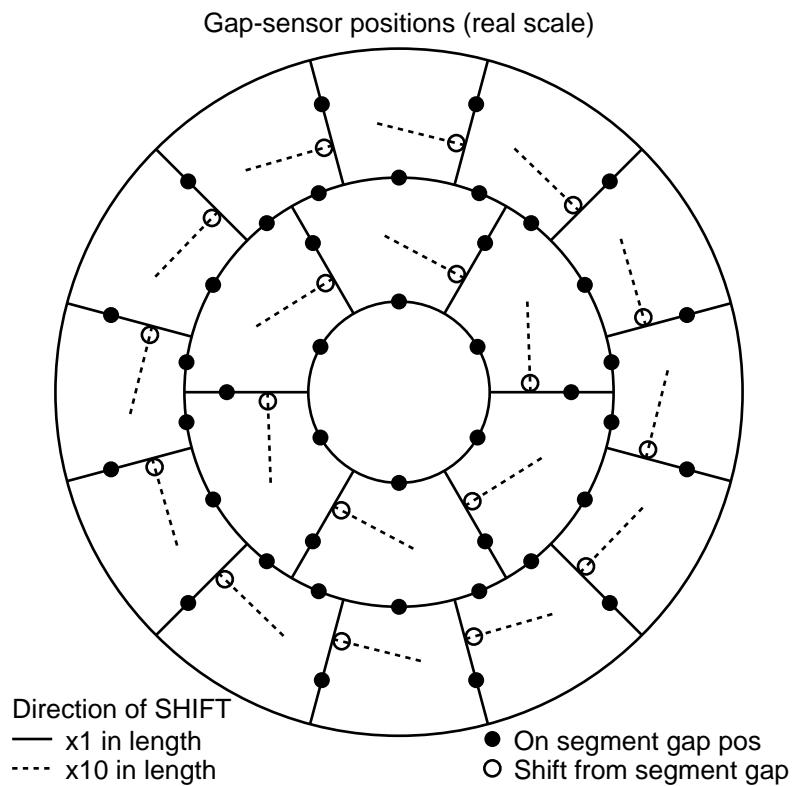


図 83: 試行 39 — ギャップセンサー配置

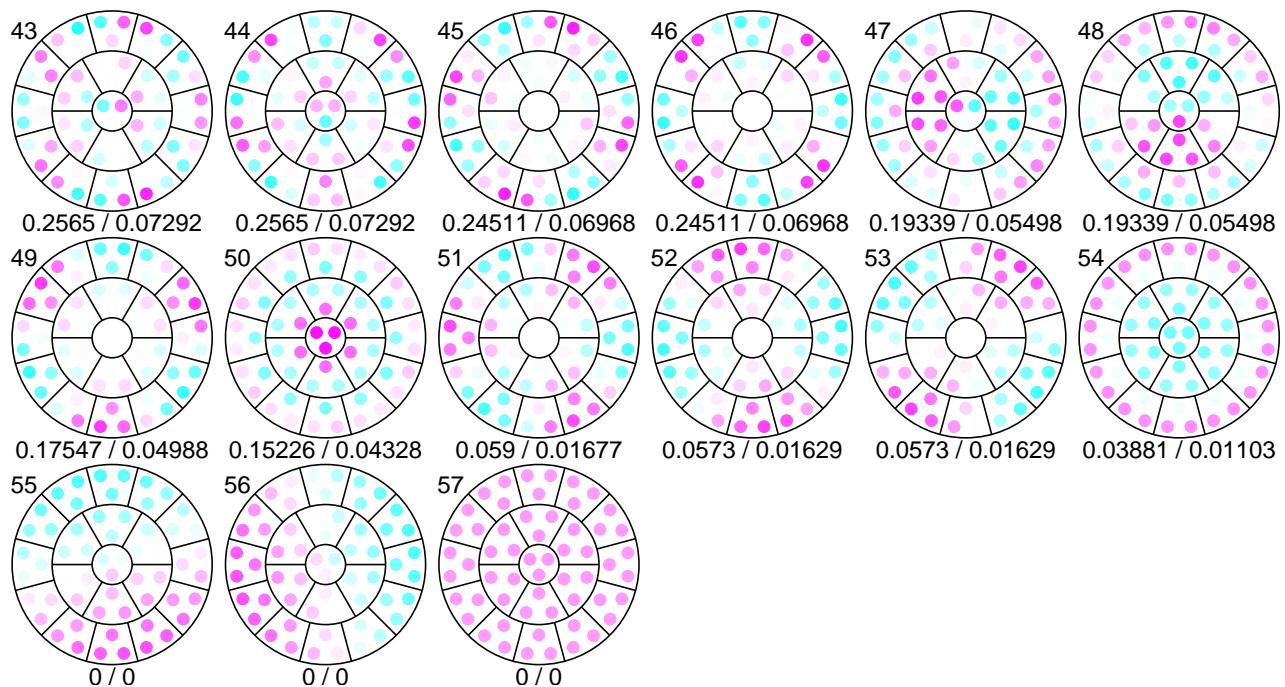


図 84: 試行 39 — 特異ベクトル分布

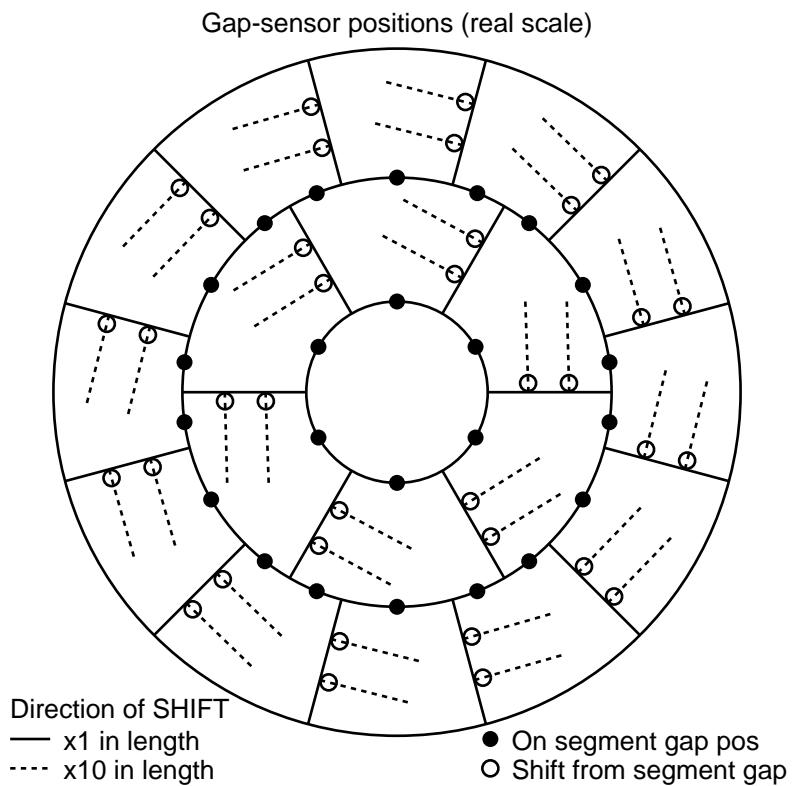


図 85: 試行 40 — ギャップセンサー配置

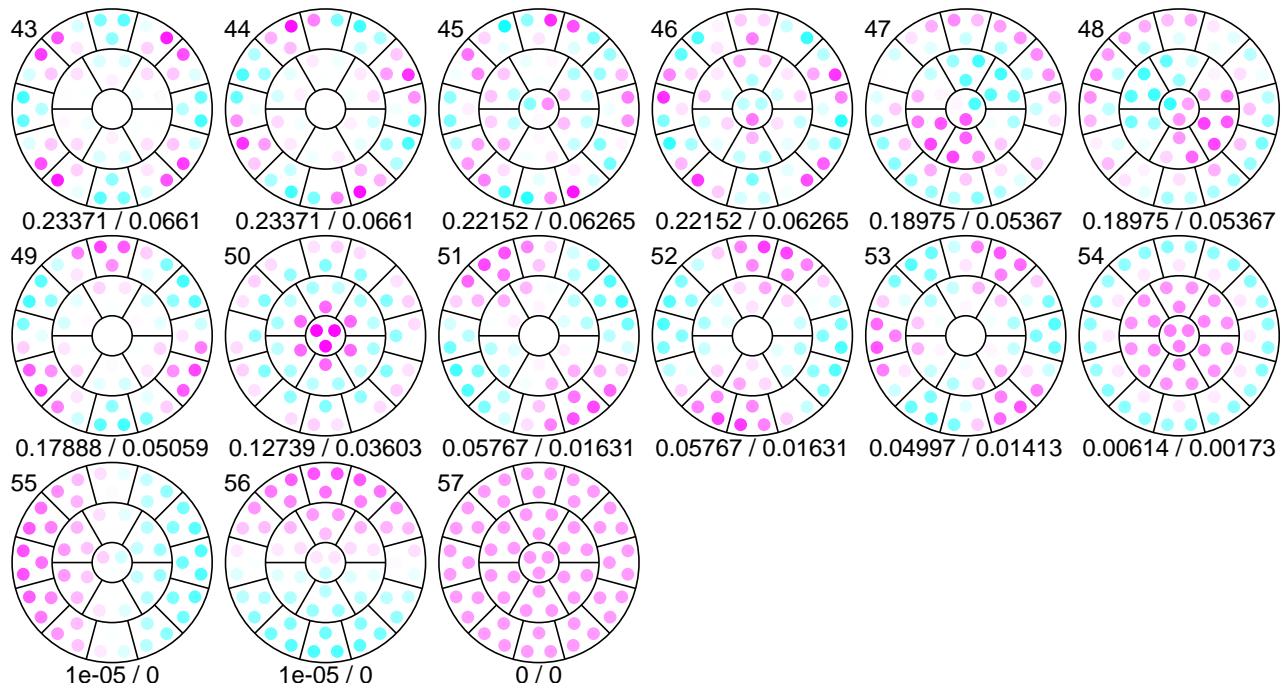


図 86: 試行 40 — 特異ベクトル分布

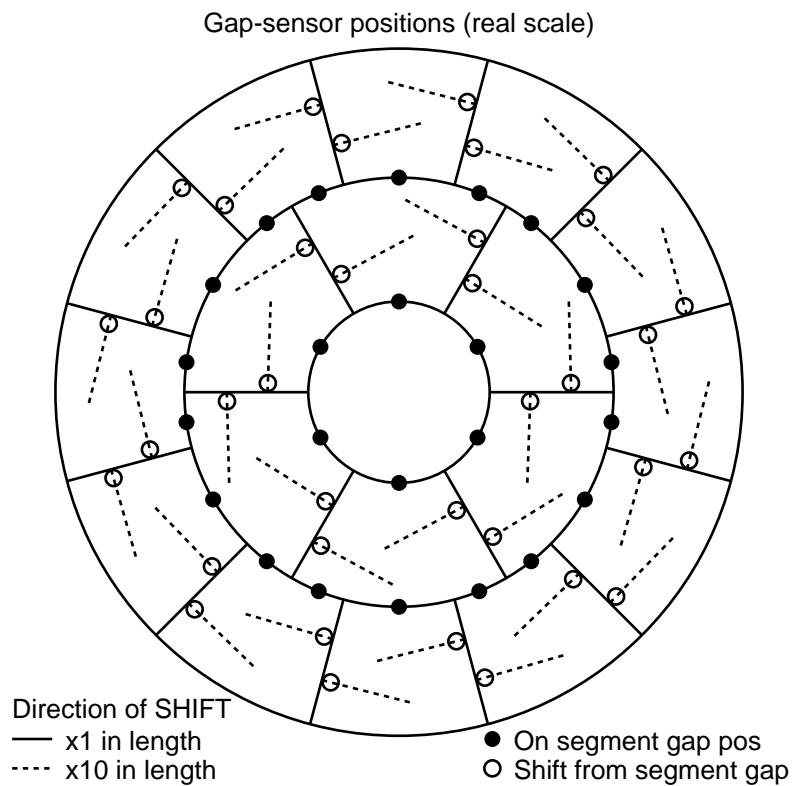


図 87: 試行 41 — ギャップセンサー配置

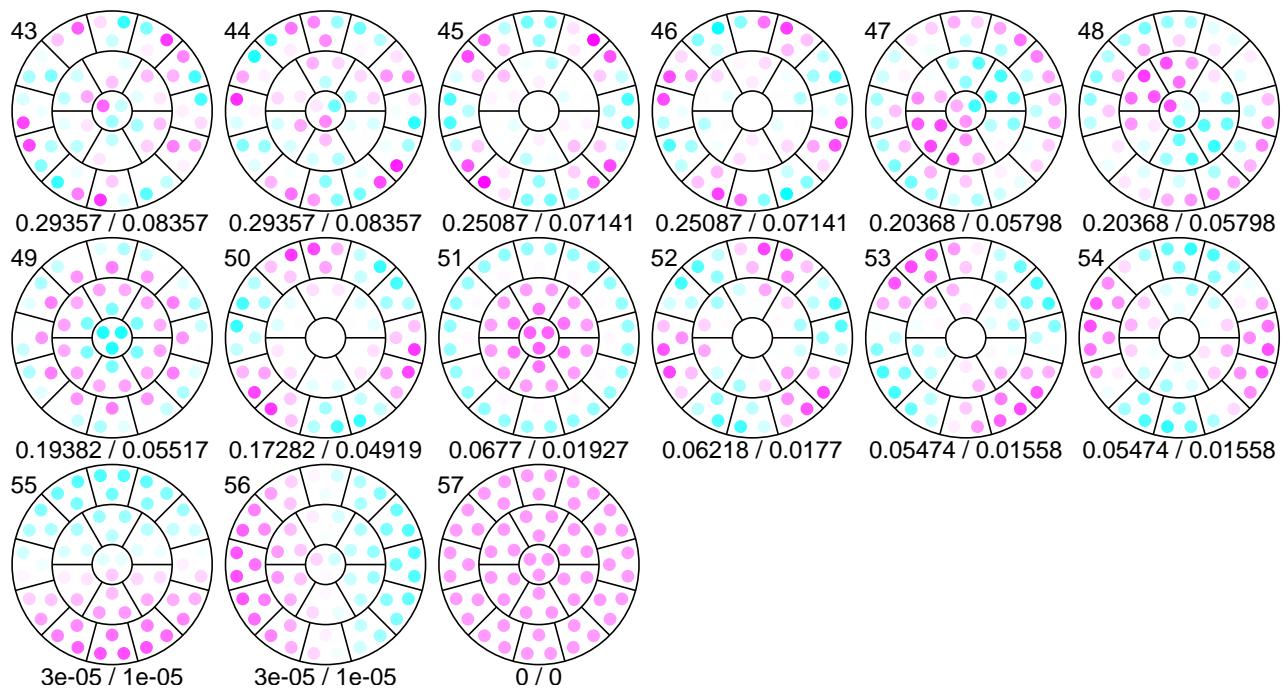


図 88: 試行 41 — 特異ベクトル分布

#### 4.3.8 内・外周セグメント間にに対する配置 — 中心線上

内・外周セグメント間にに対する配置は、奇数の外周セグメントに 1 つ、偶数の外周セグメントに 2 つのギャップセンターが取り付けられるようになっている。

この配置を以下のように少しずつ変化させて様子を見る。記述されている値は、内周セグメントの外周側辺における位置に変換している。

42 (-7/16, 0, 7/16)

43 (-5/16, 0, 5/16)

44 (-7/16, 2/16, 7/16)

45 (-6/16, 2/16, 6/16)

46 (-5/16, 2/16, 5/16)

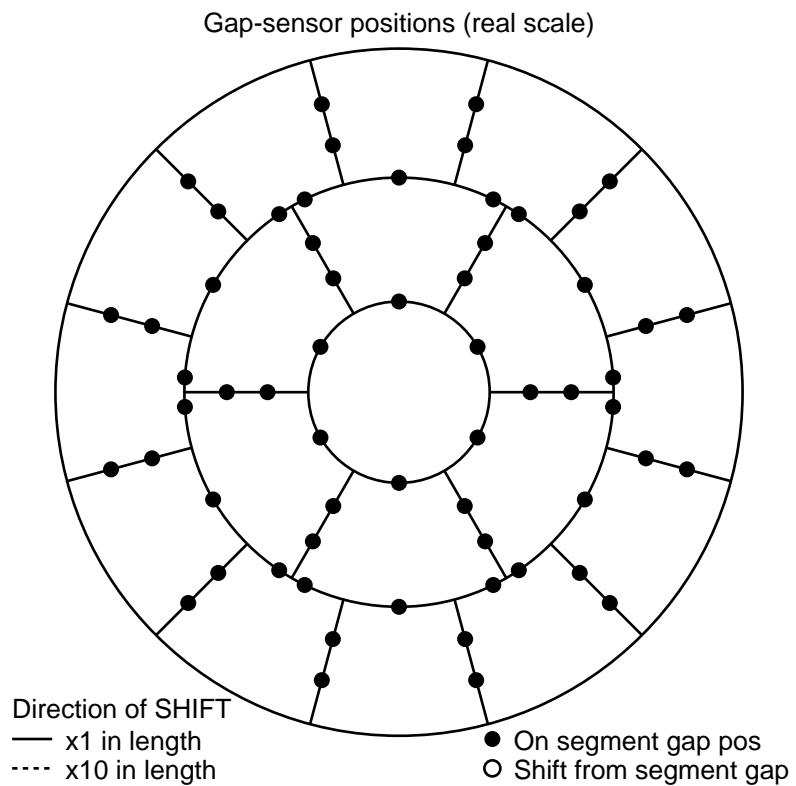


図 89: 試行 42 — ギャップセンサー配置

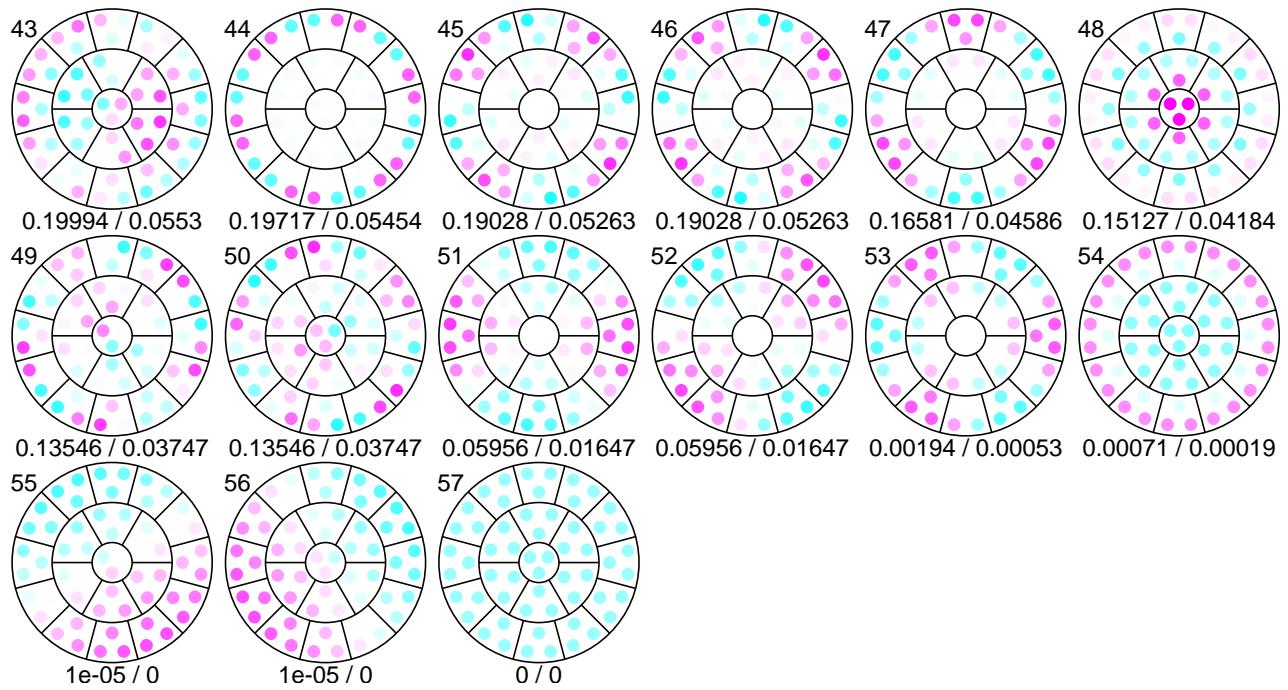


図 90: 試行 42 — 特異ベクトル分布

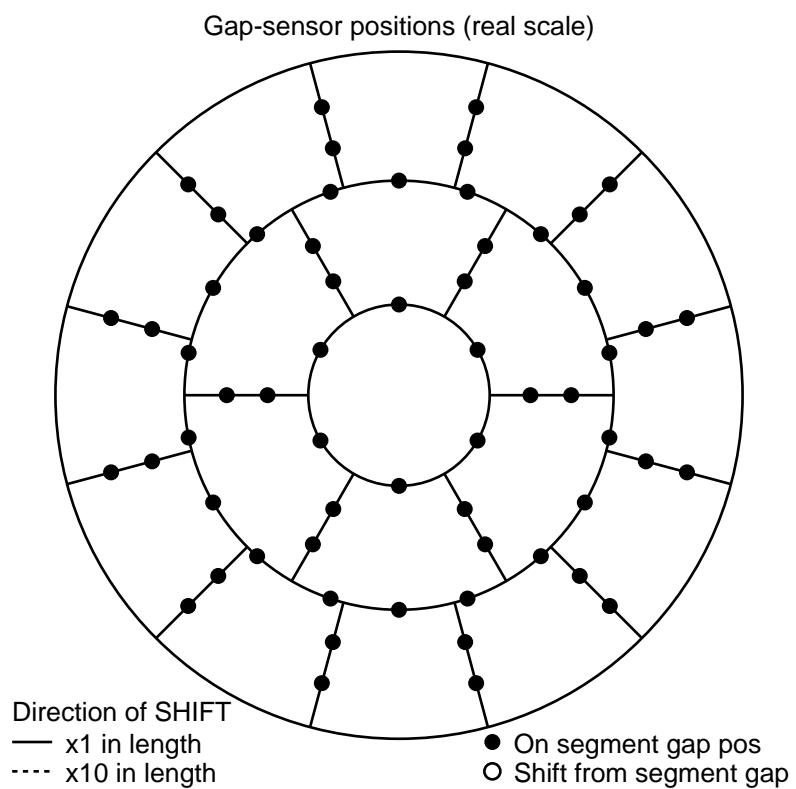


図 91: 試行 43 — ギャップセンサー配置

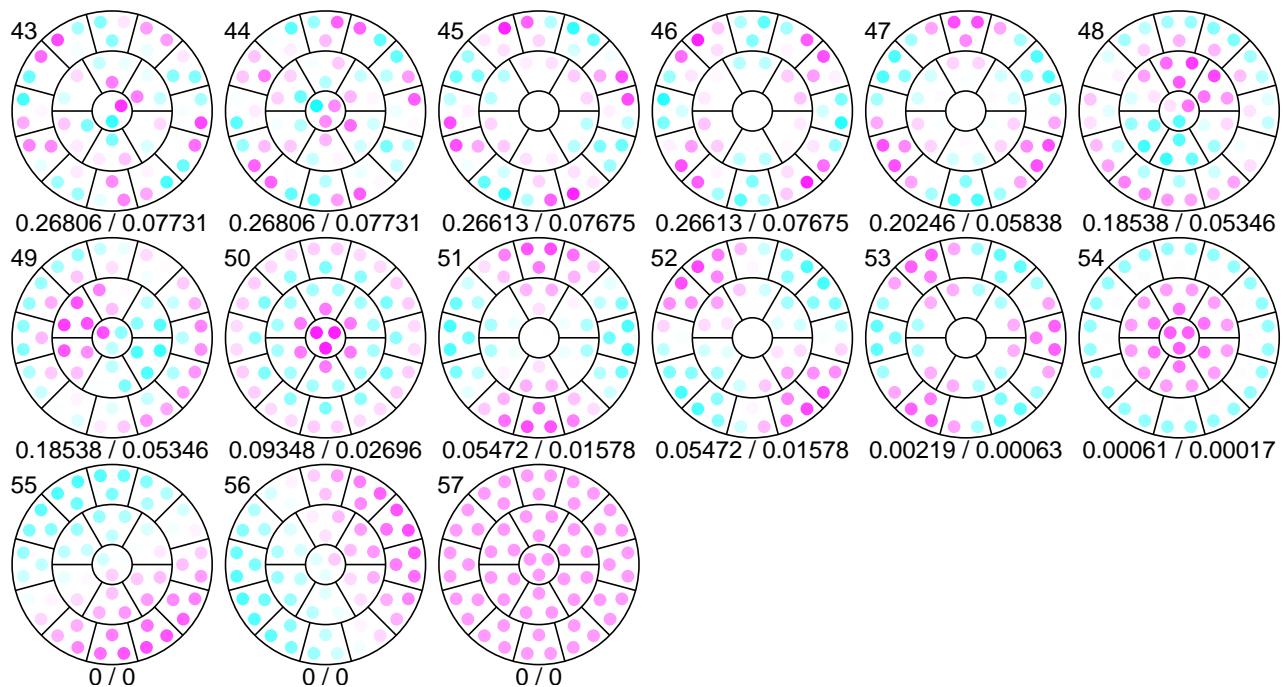


図 92: 試行 43 — 特異ベクトル分布

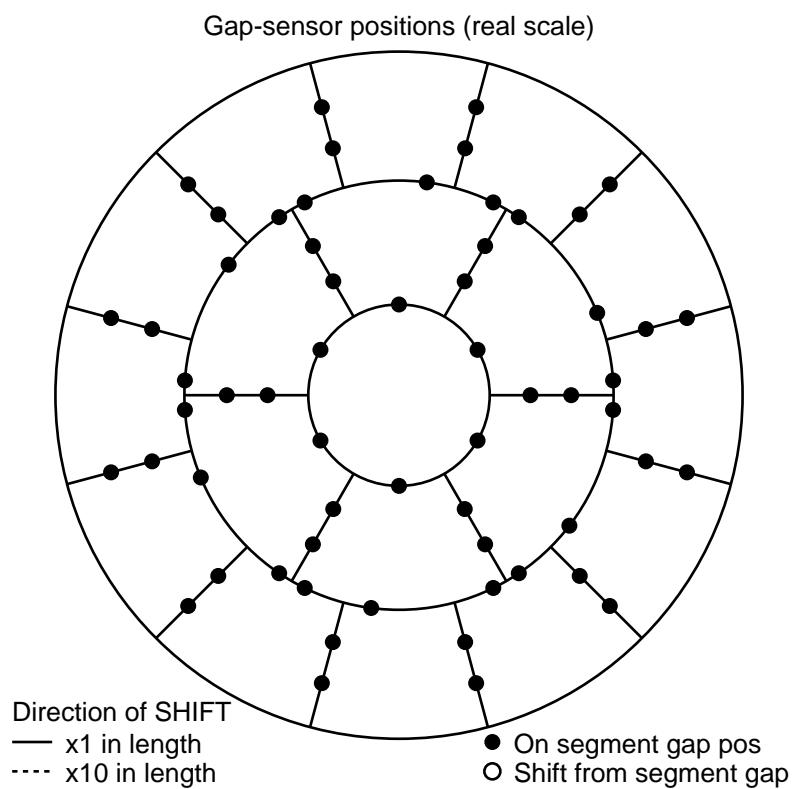


図 93: 試行 44 — ギャップセンサー配置

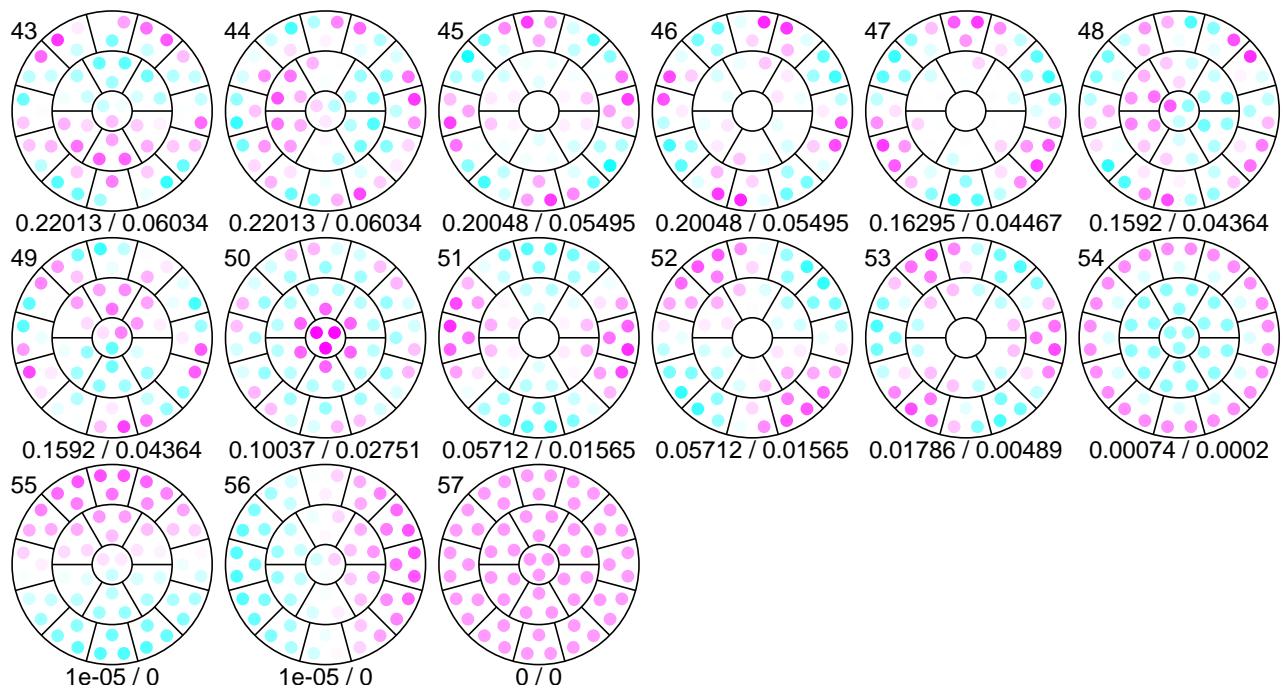


図 94: 試行 44 — 特異ベクトル分布

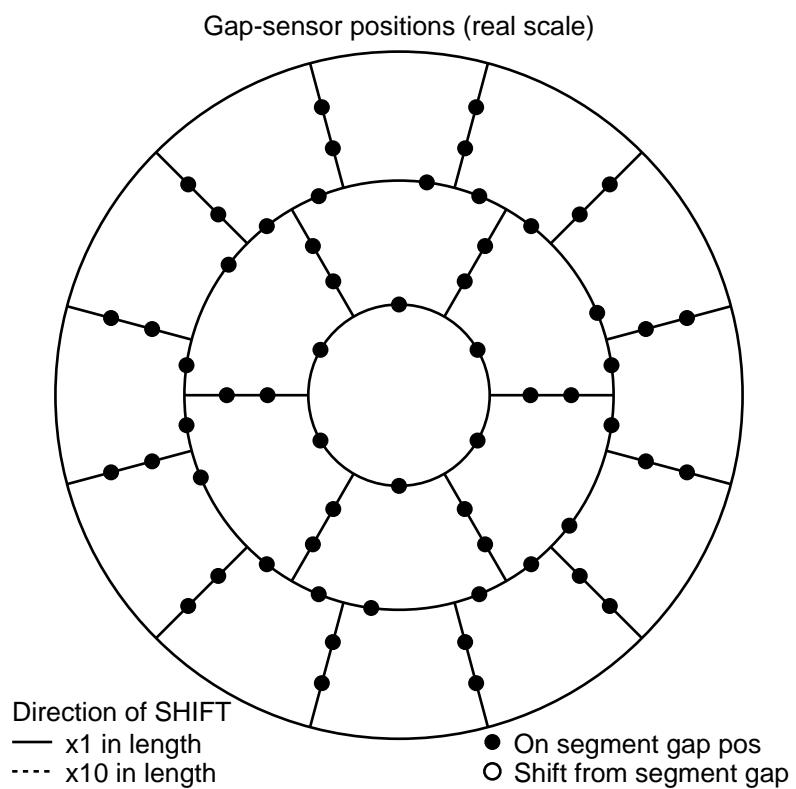


図 95: 試行 45 — ギャップセンサー配置

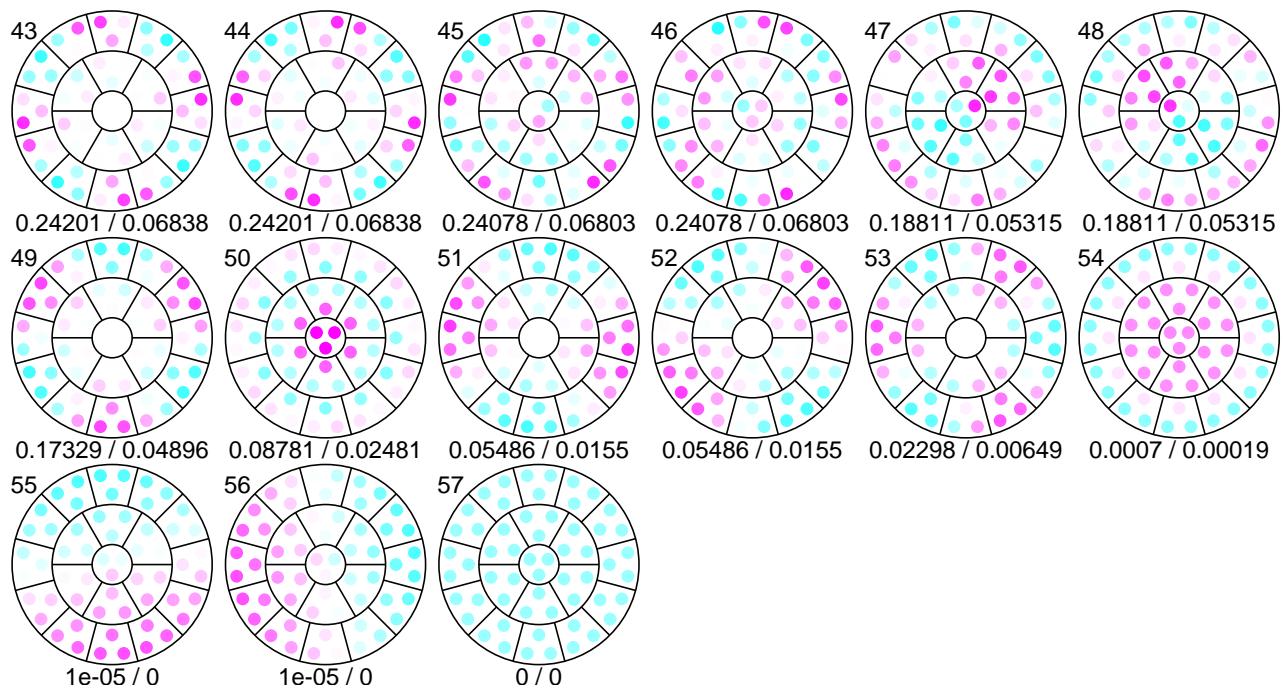


図 96: 試行 45 — 特異ベクトル分布

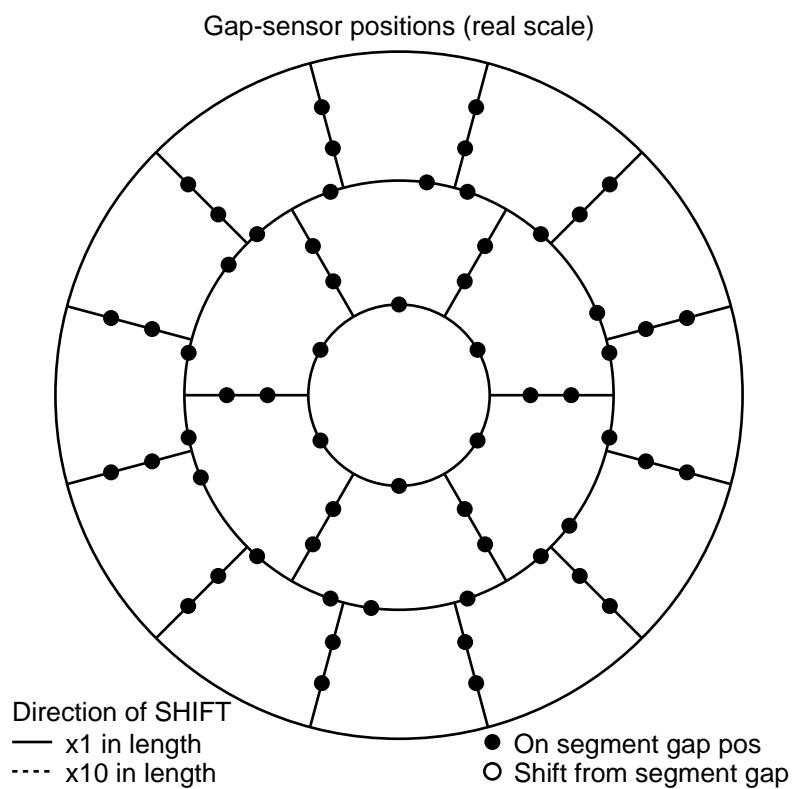


図 97: 試行 46 — ギャップセンサー配置

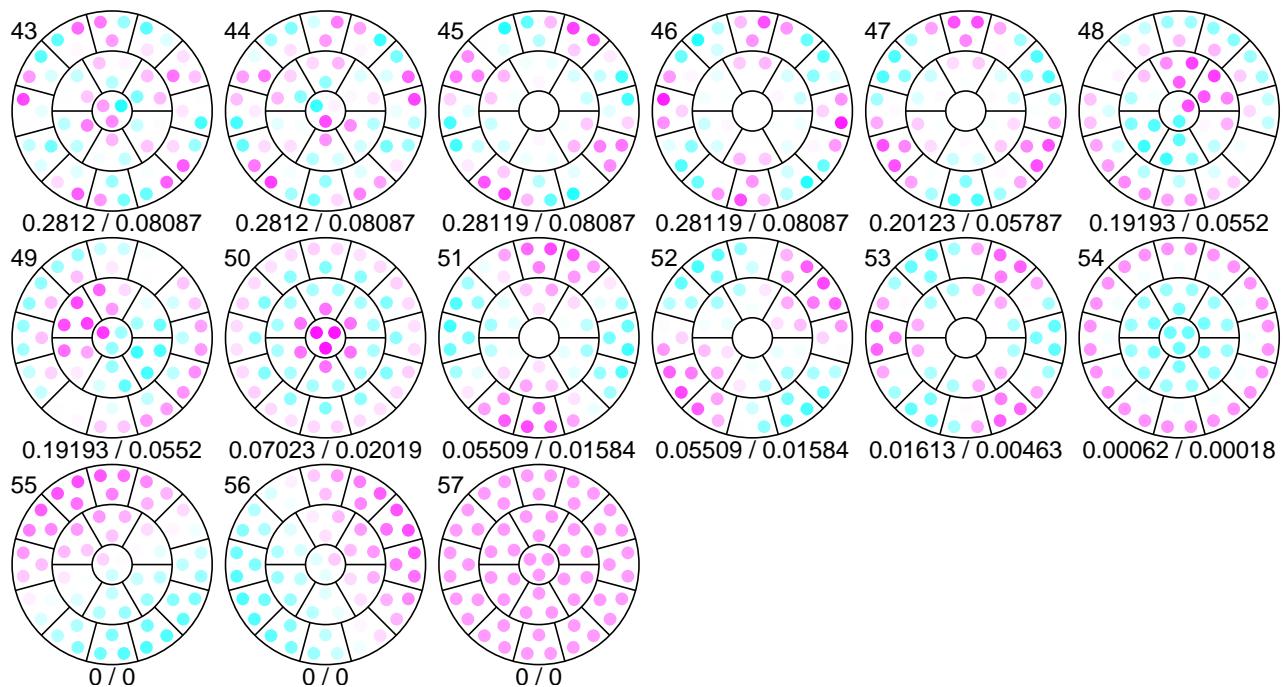


図 98: 試行 46 — 特異ベクトル分布

#### 4.3.9 内・外周セグメント間に対する配置 — セグメント内

3つのギャップセンサーを内・外周セグメントの中央点からセグメントの内側へずらした配置を検証する。3つのギャップセンサー (-4/16, 0, 4/16) に対する中央点からの距離を以下のように取る。

47 (+25, 0, +25)

48 (+50, 0, +50)

49 (-50, 0, -50)

50 (0, +25, 0)

51 (0, +50, 0)

52 (0, -50, 0)

53 (+50, -50, +50)

54 (-50, +50, -50)

55 (0, +50, +50)

56 (0, +50, -50)

57 (0, -50, +50)

58 (0, -50, -50)

59 (-25, 0, -25)

60 (0, -25, 0)

61 (0, +75, 0)

62 (-75, 0, -75)

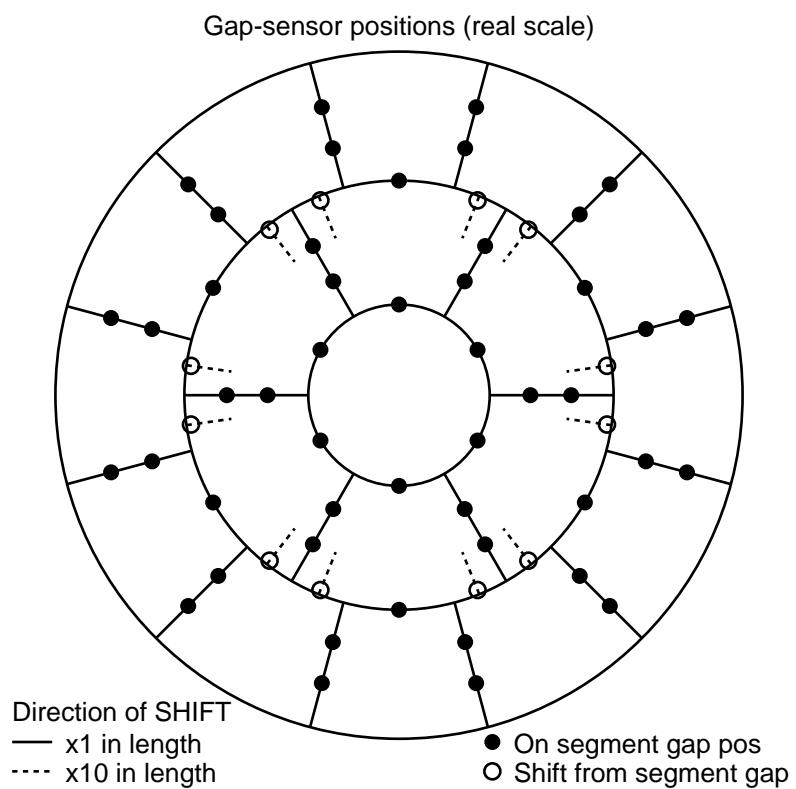


図 99: 試行 47 — ギャップセンサー配置

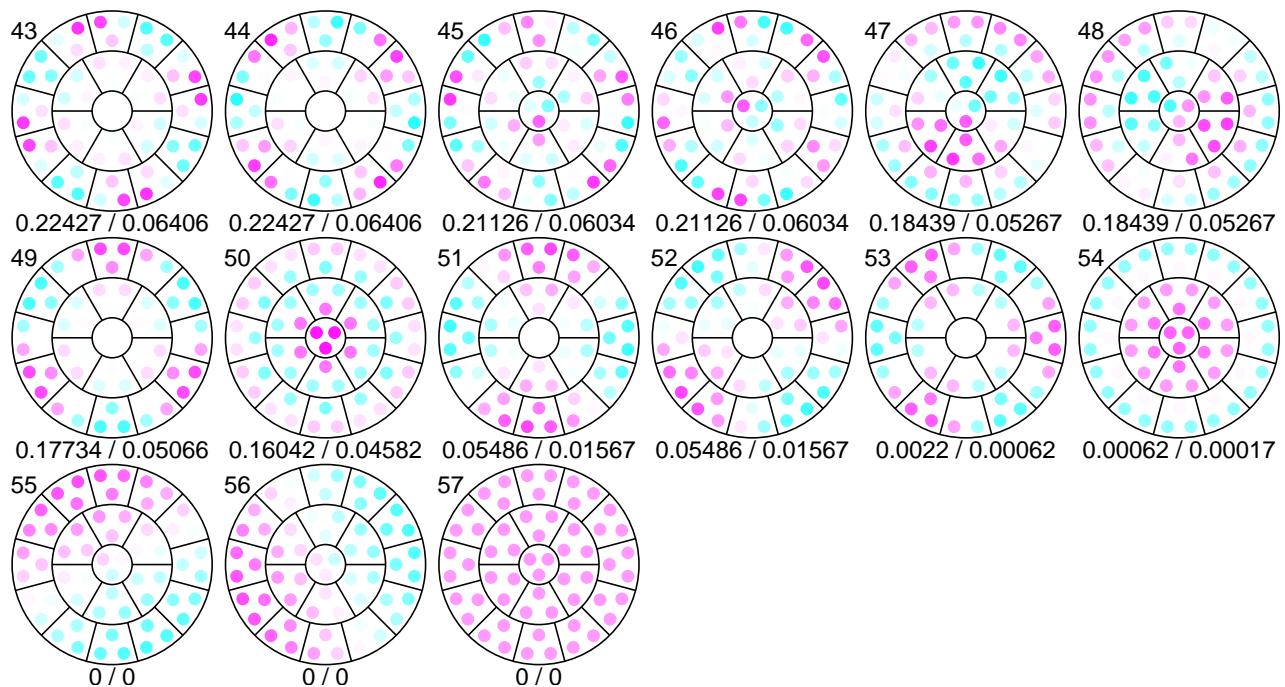


図 100: 試行 47 — 特異ベクトル分布

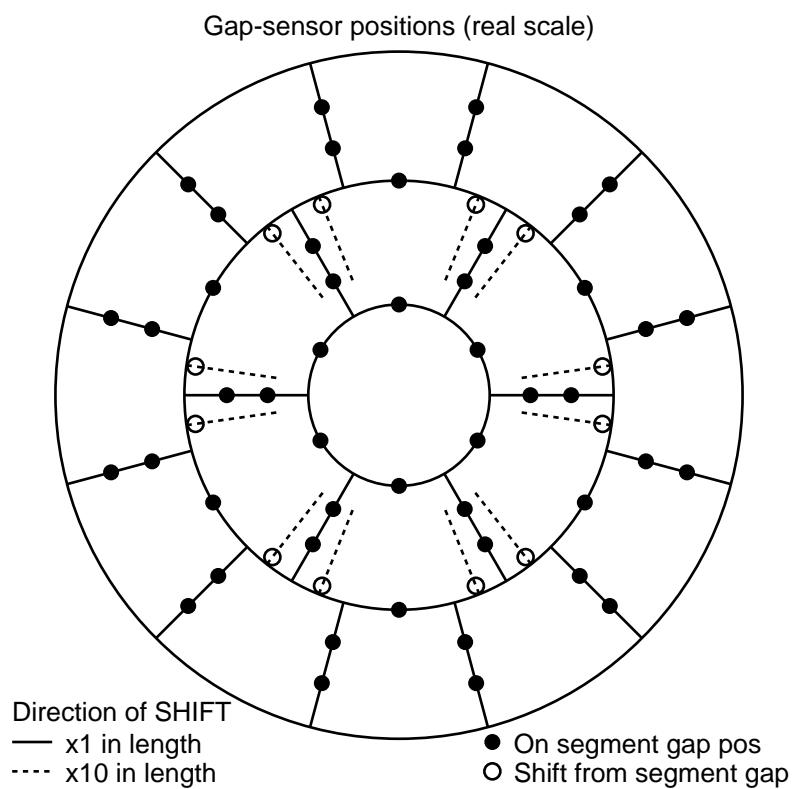


図 101: 試行 48 — ギャップセンサー配置

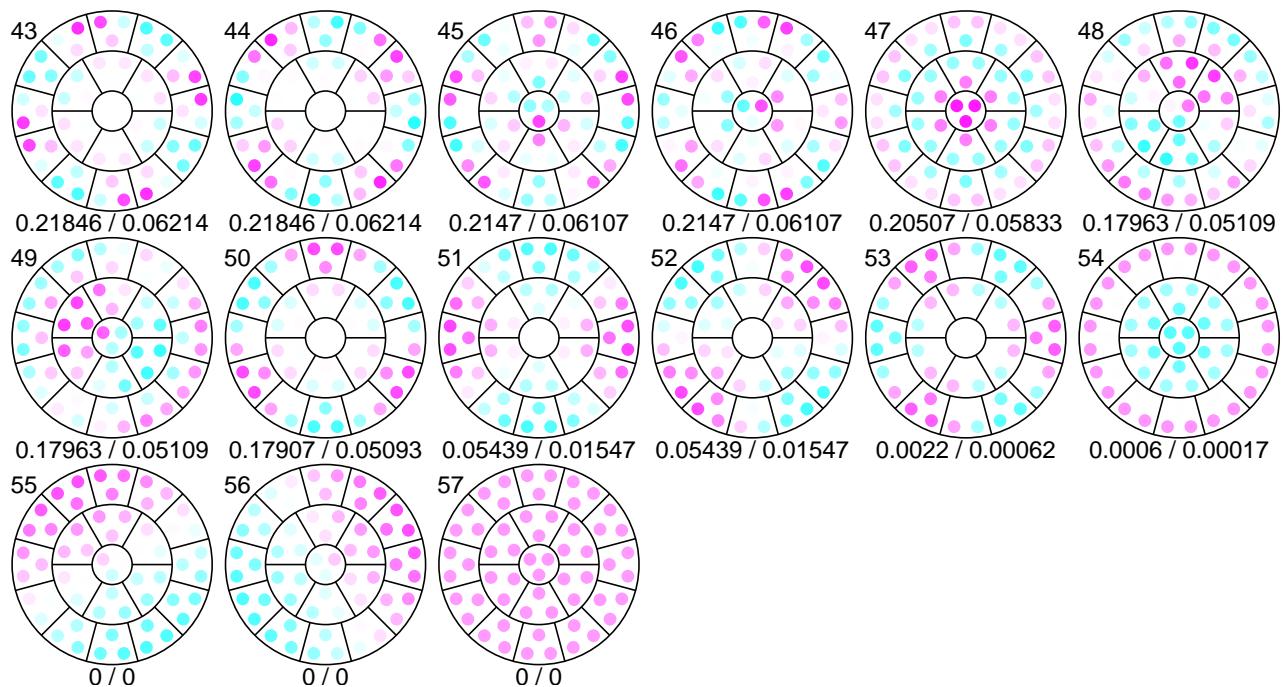


図 102: 試行 48 — 特異ベクトル分布

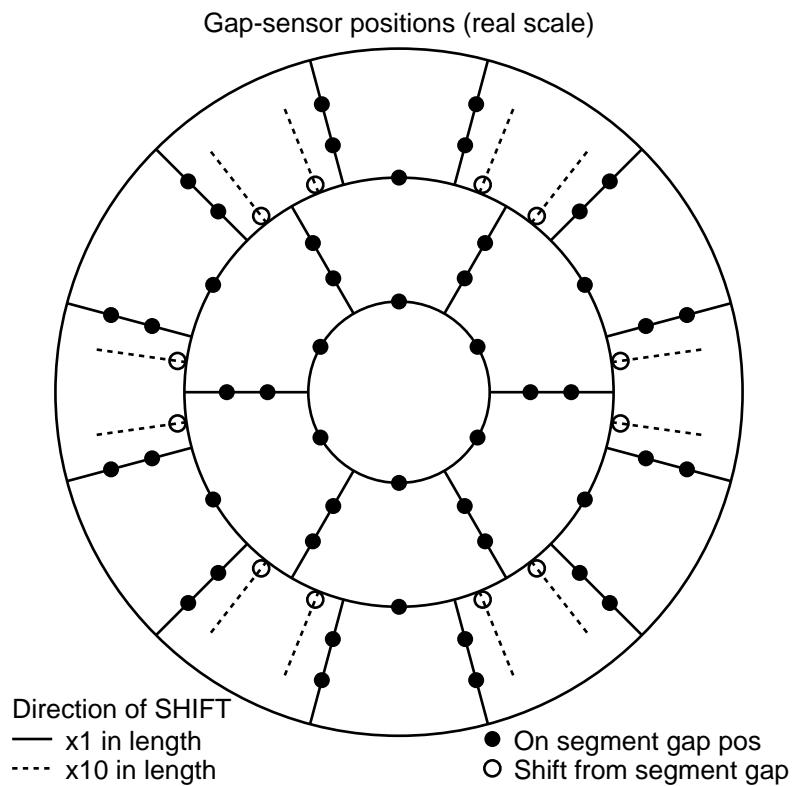


図 103: 試行 49 — ギャップセンサー配置

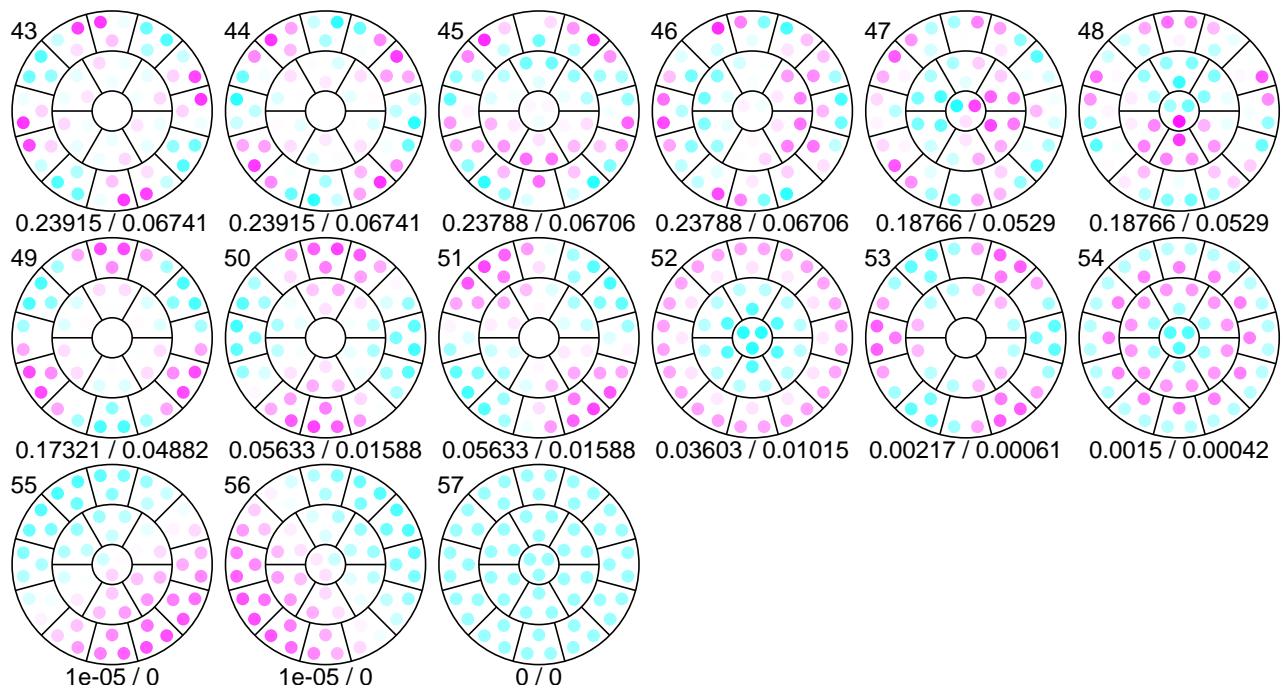


図 104: 試行 49 — 特異ベクトル分布

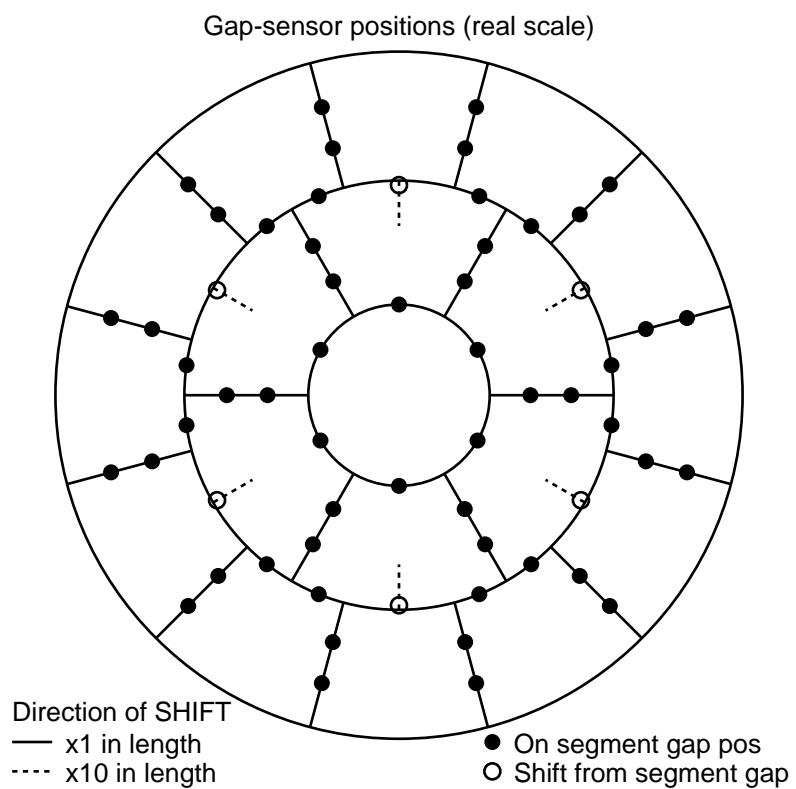


図 105: 試行 50 — ギャップセンサー配置

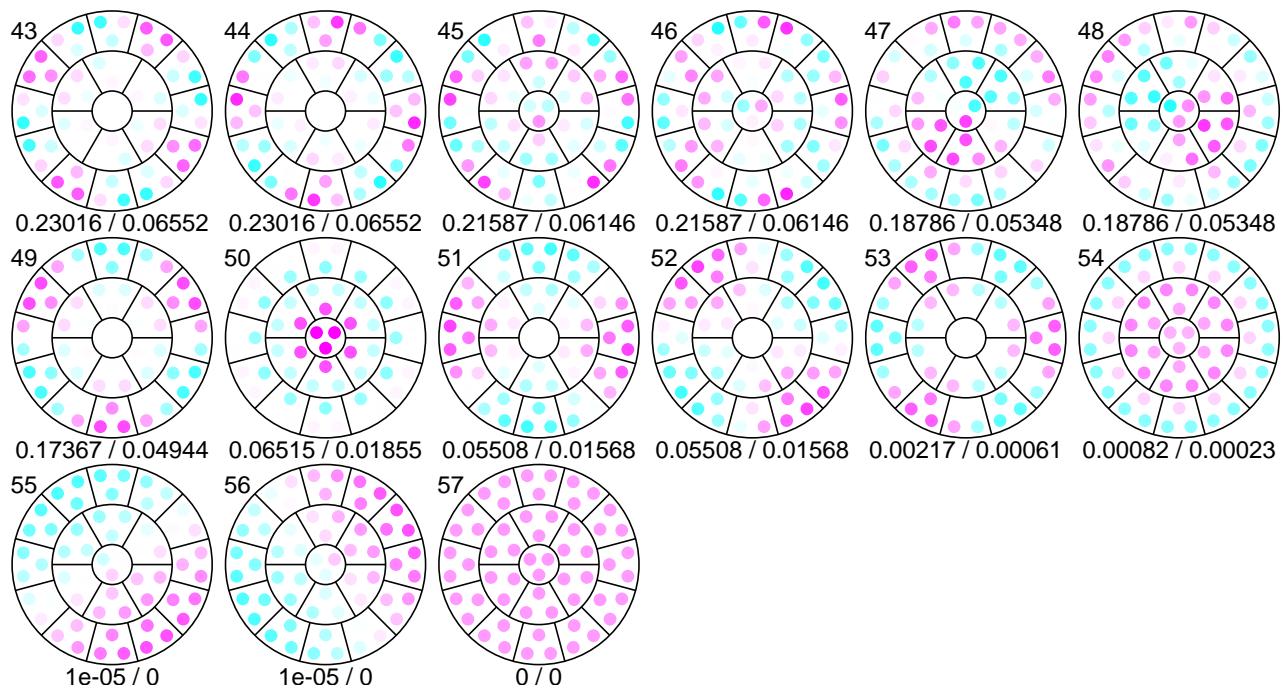


図 106: 試行 50 — 特異ベクトル分布

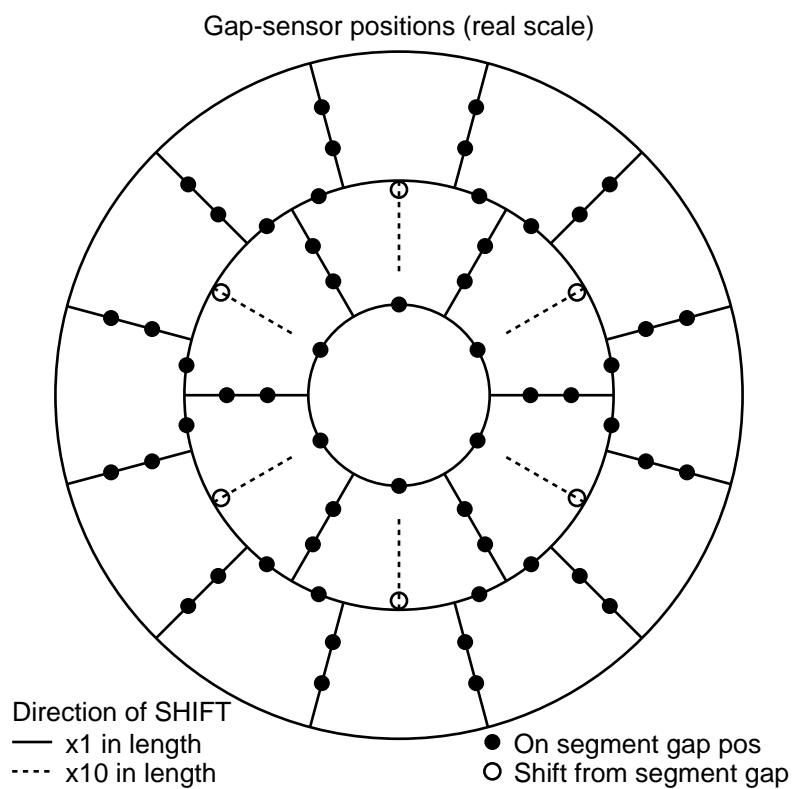


図 107: 試行 51 — ギャップセンサー配置

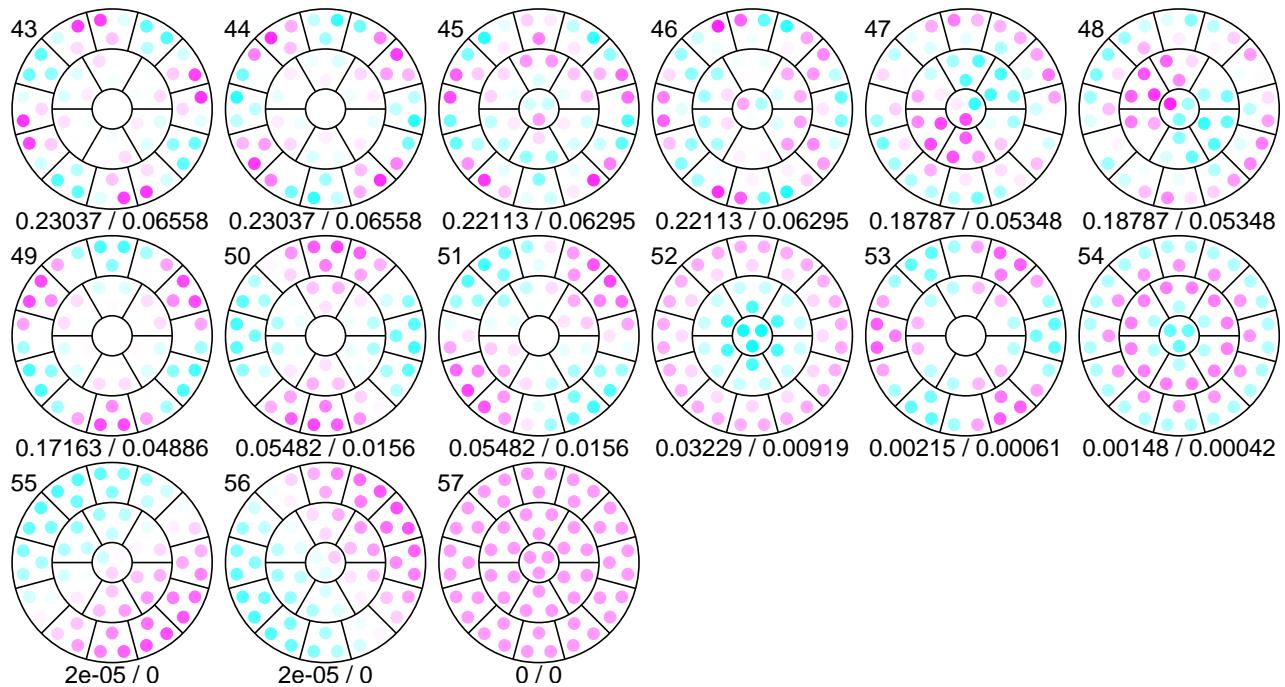


図 108: 試行 51 — 特異ベクトル分布

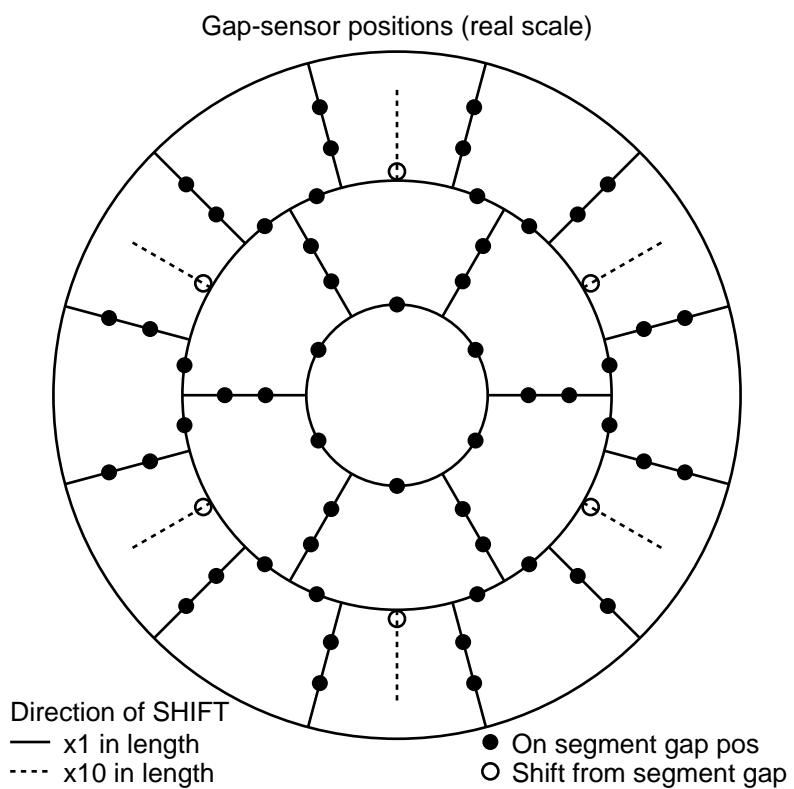


図 109: 試行 52 — ギャップセンサー配置

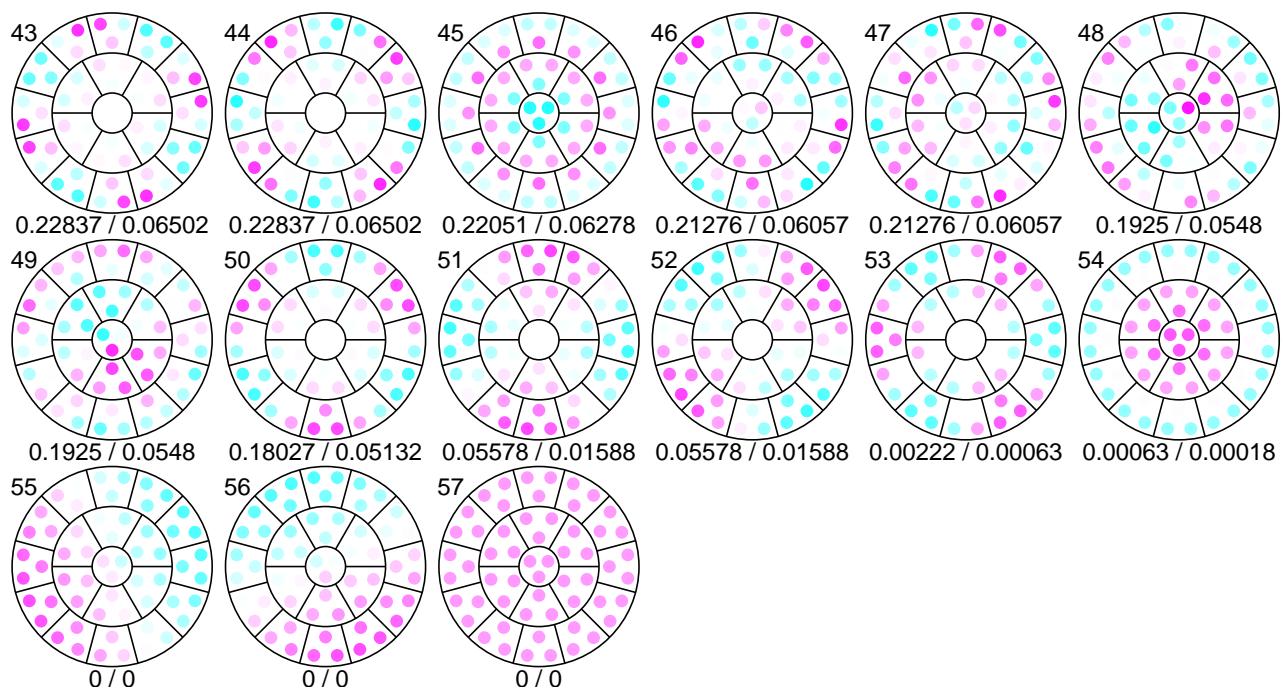


図 110: 試行 52 — 特異ベクトル分布

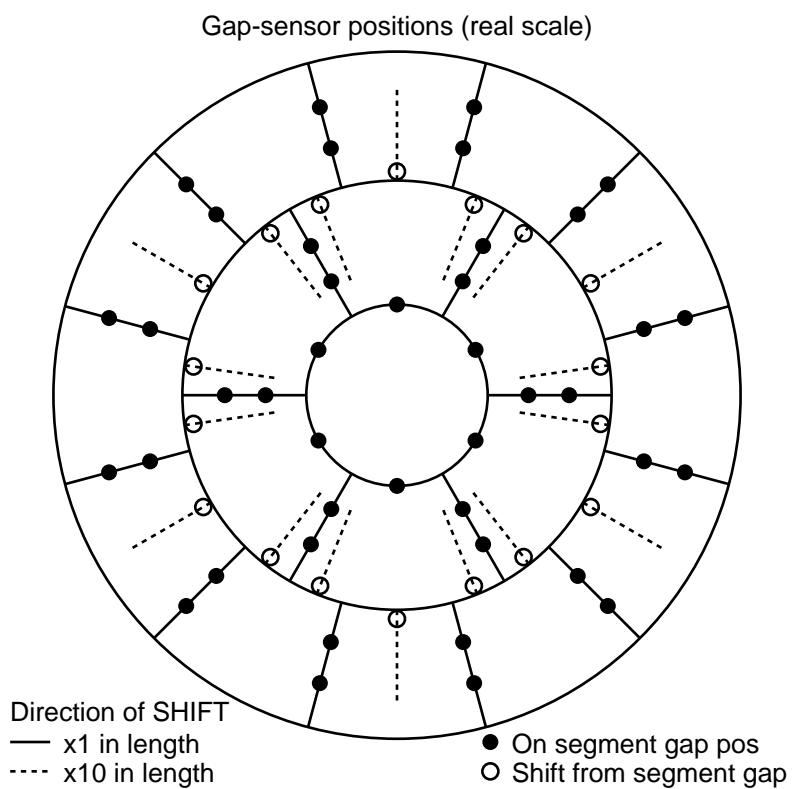


図 111: 試行 53 — ギャップセンサー配置

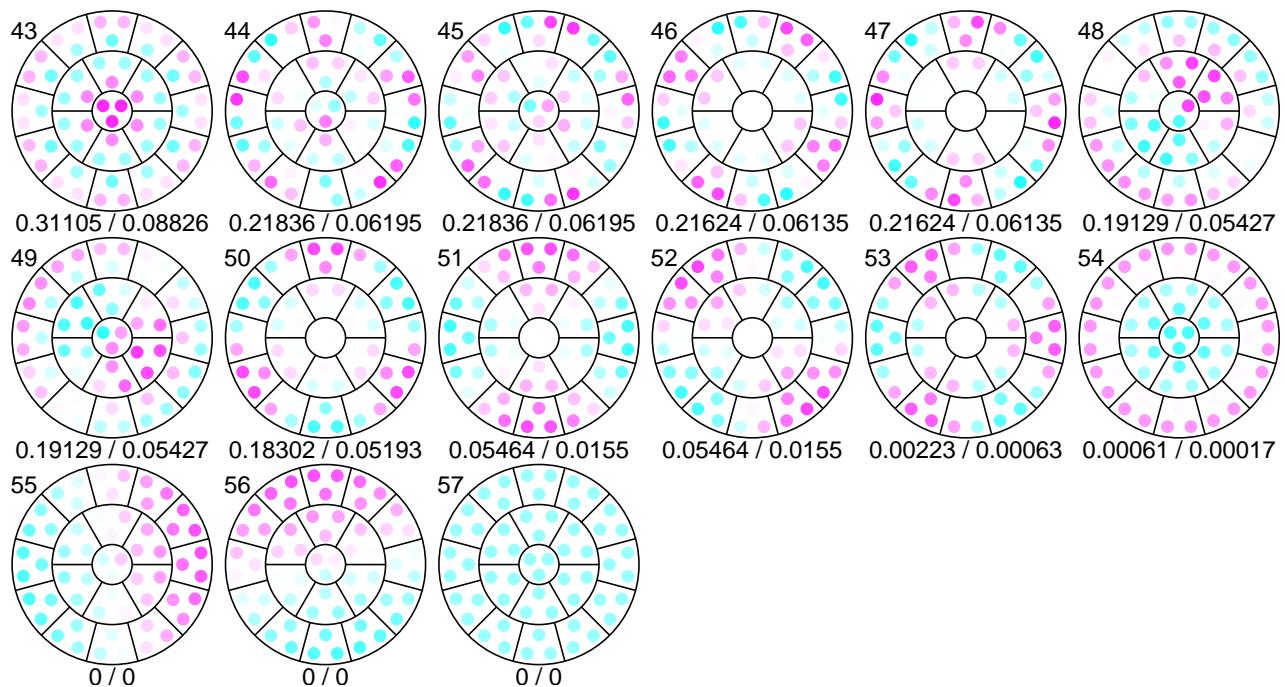


図 112: 試行 53 — 特異ベクトル分布

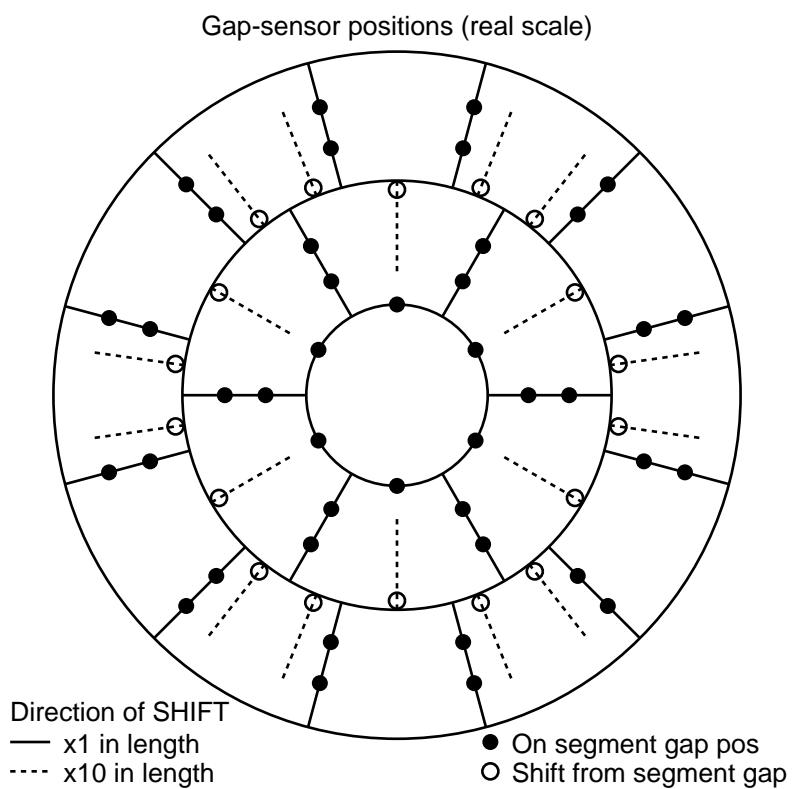


図 113: 試行 54 — ギャップセンサー配置

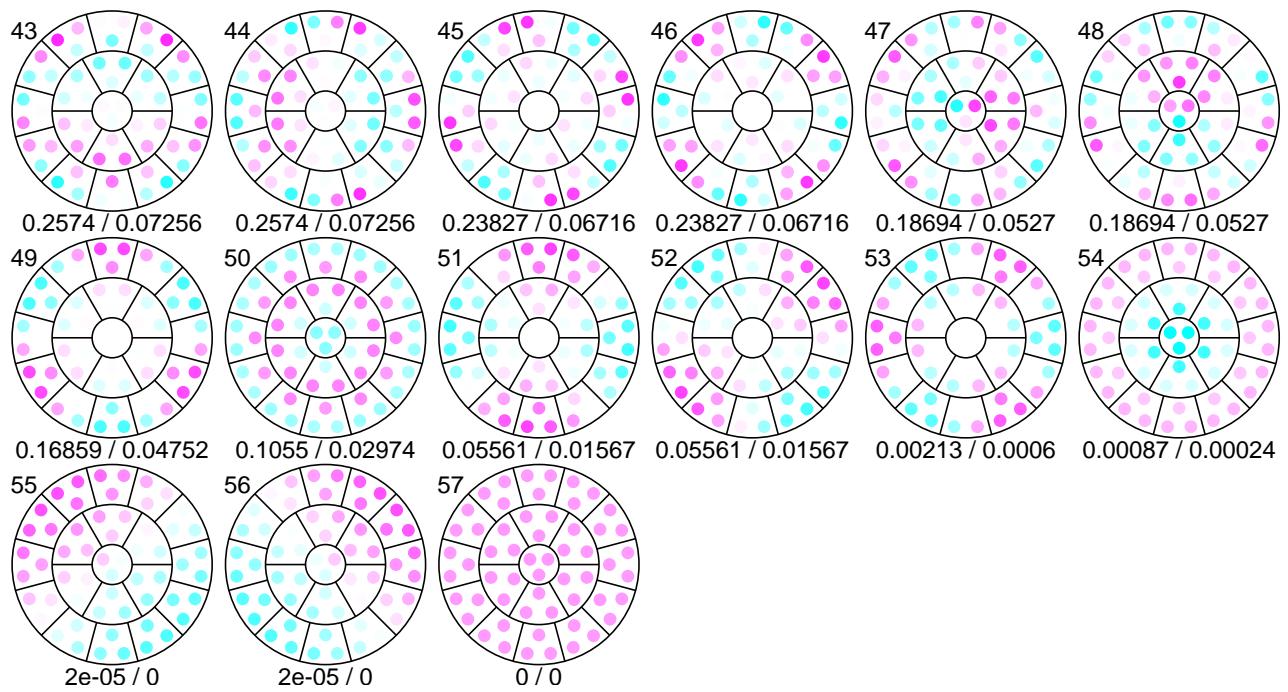


図 114: 試行 54 — 特異ベクトル分布

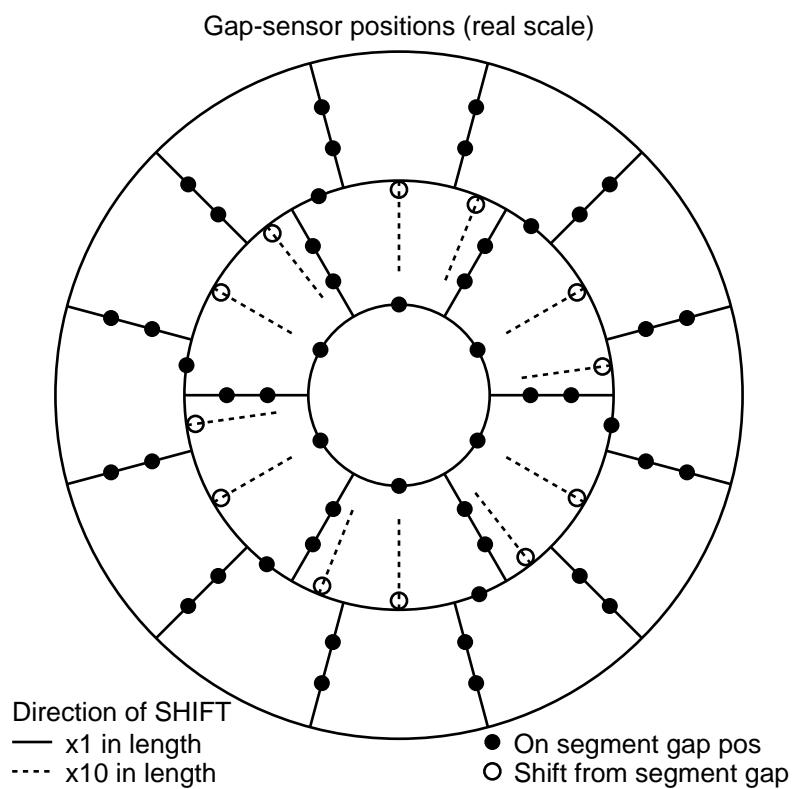


図 115: 試行 55 — ギャップセンサー配置

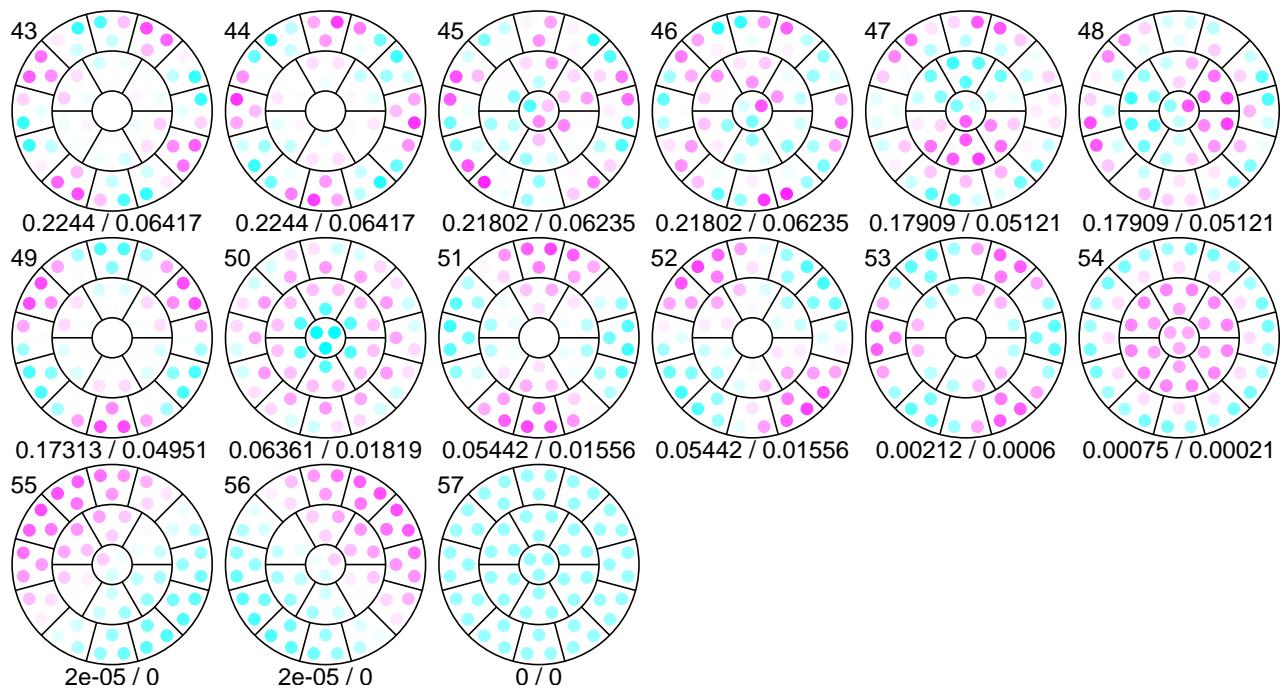


図 116: 試行 55 — 特異ベクトル分布

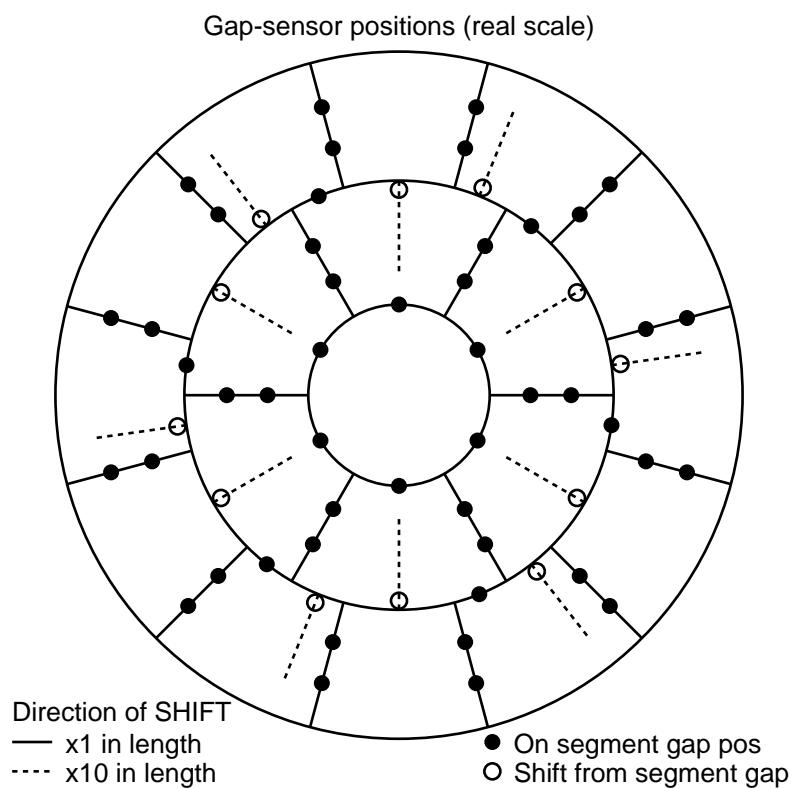


図 117: 試行 56 — ギャップセンサー配置

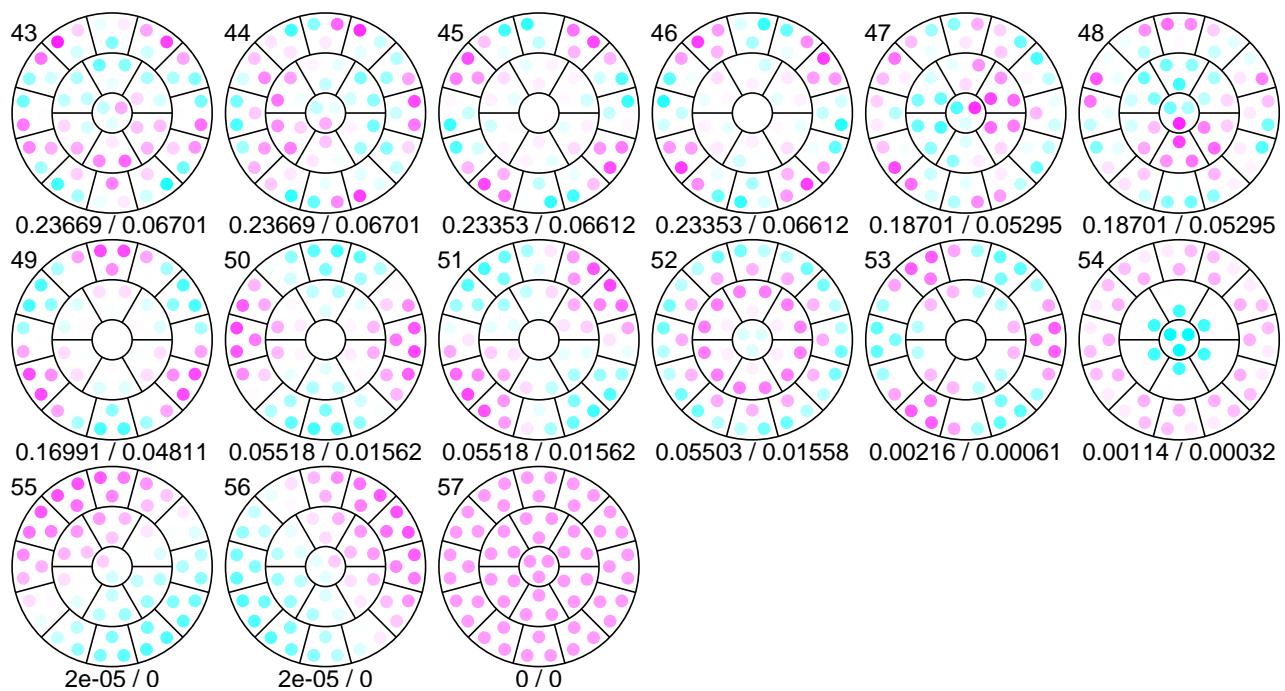


図 118: 試行 56 — 特異ベクトル分布

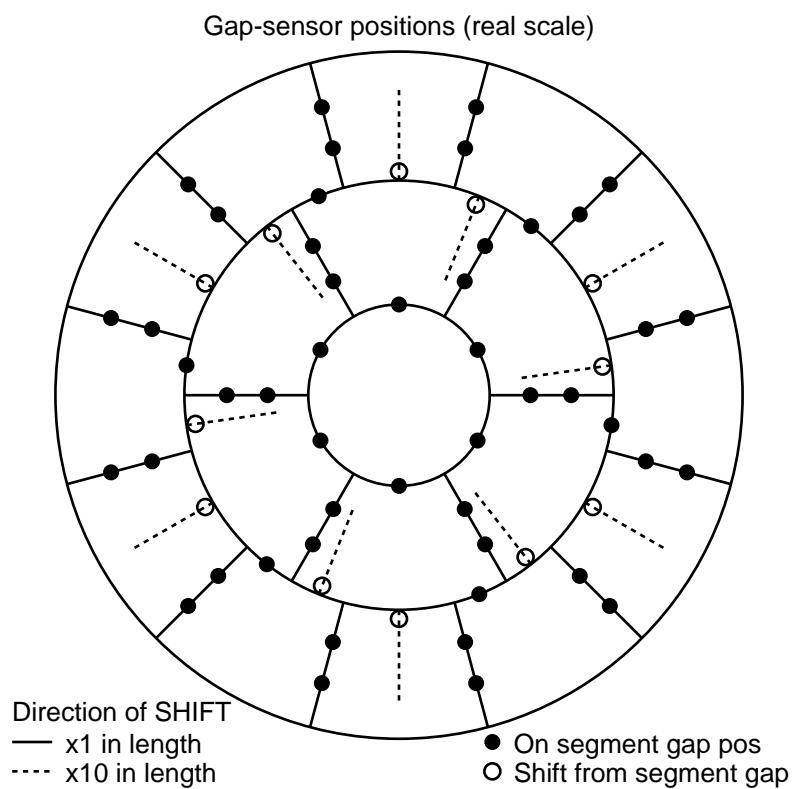


図 119: 試行 57 — ギャップセンサー配置

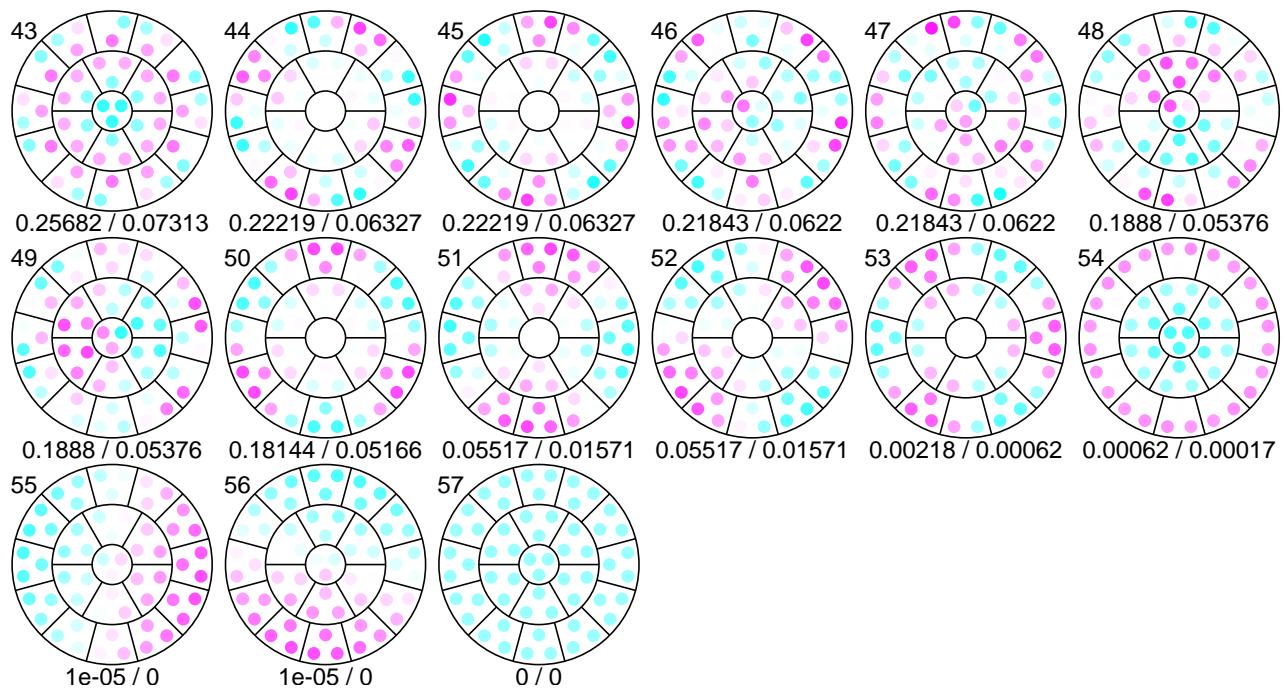


図 120: 試行 57 — 特異ベクトル分布

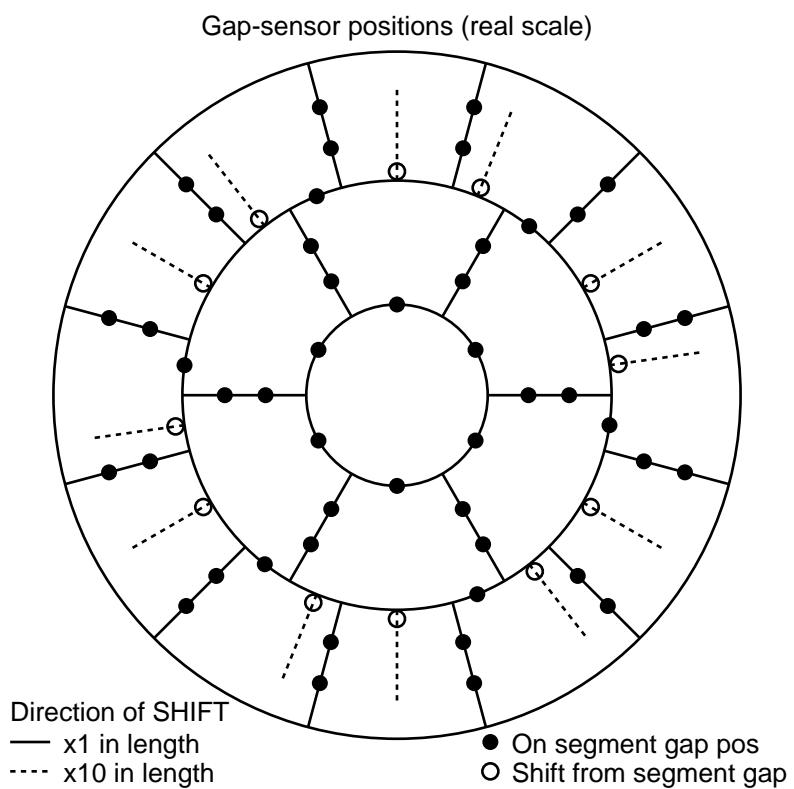


図 121: 試行 58 — ギャップセンサー配置

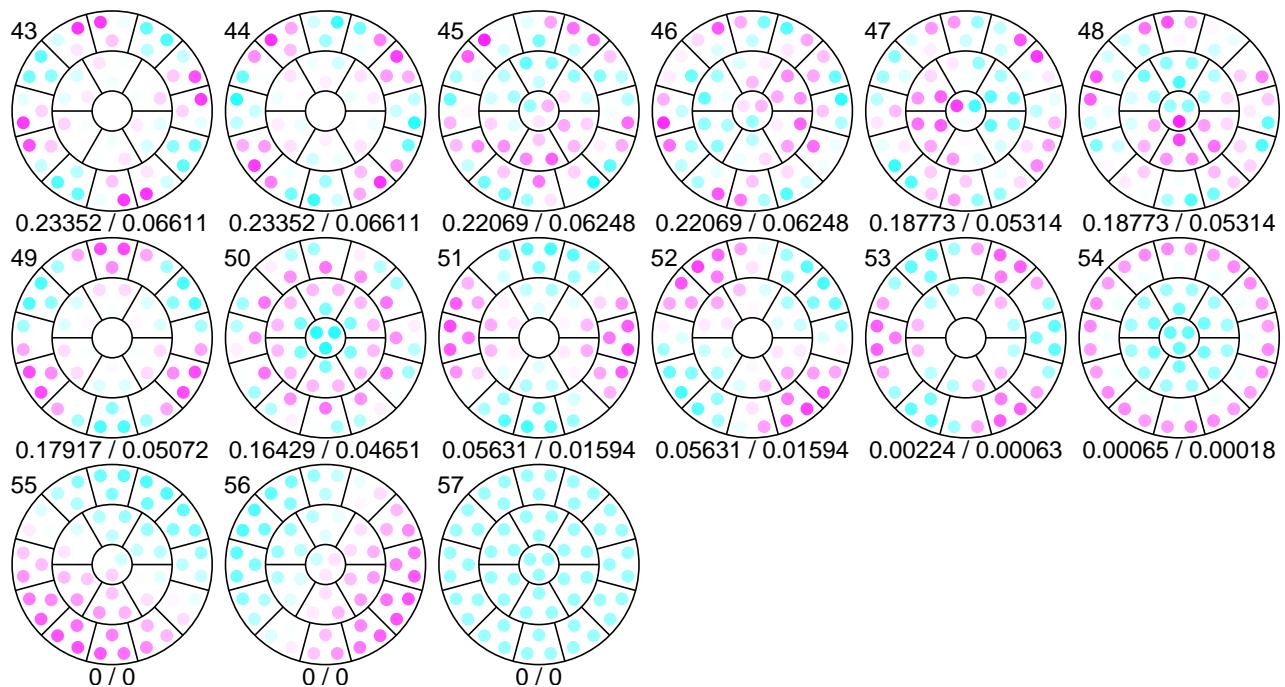


図 122: 試行 58 — 特異ベクトル分布

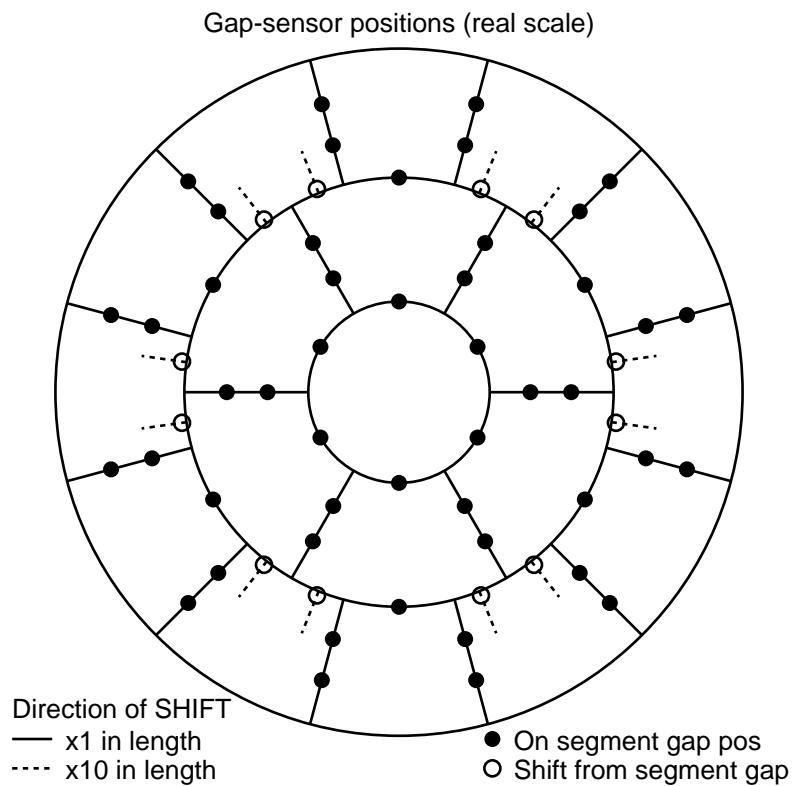


図 123: 試行 59 — ギャップセンサー配置

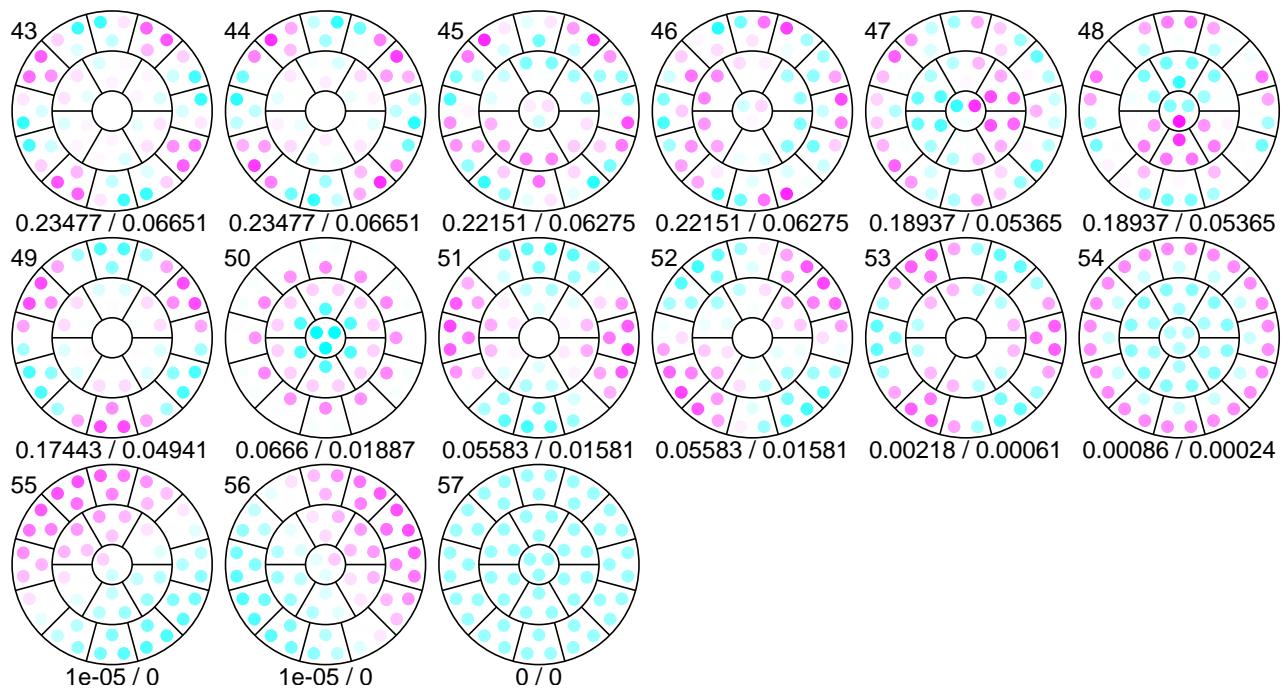


図 124: 試行 59 — 特異ベクトル分布

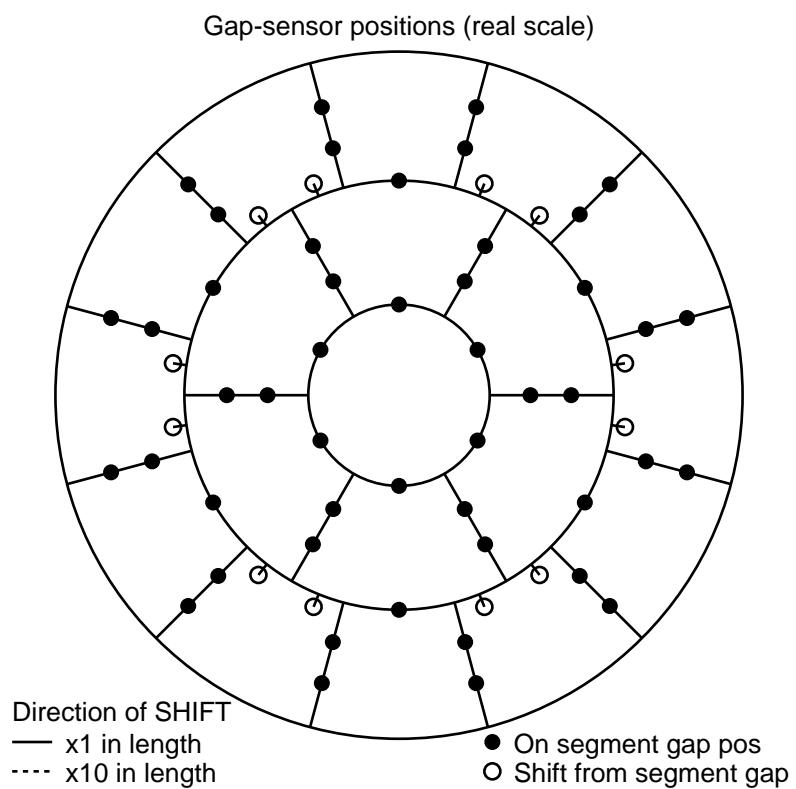


図 125: 試行 60 — ギャップセンサー配置

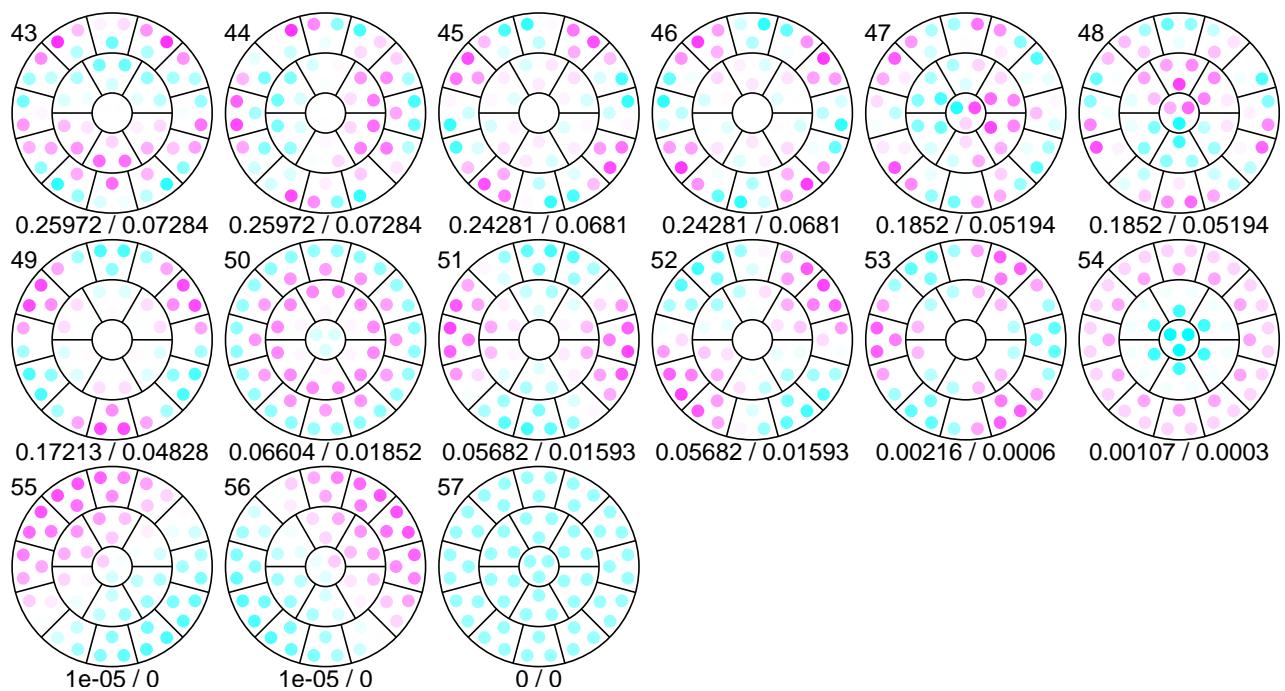


図 126: 試行 60 — 特異ベクトル分布

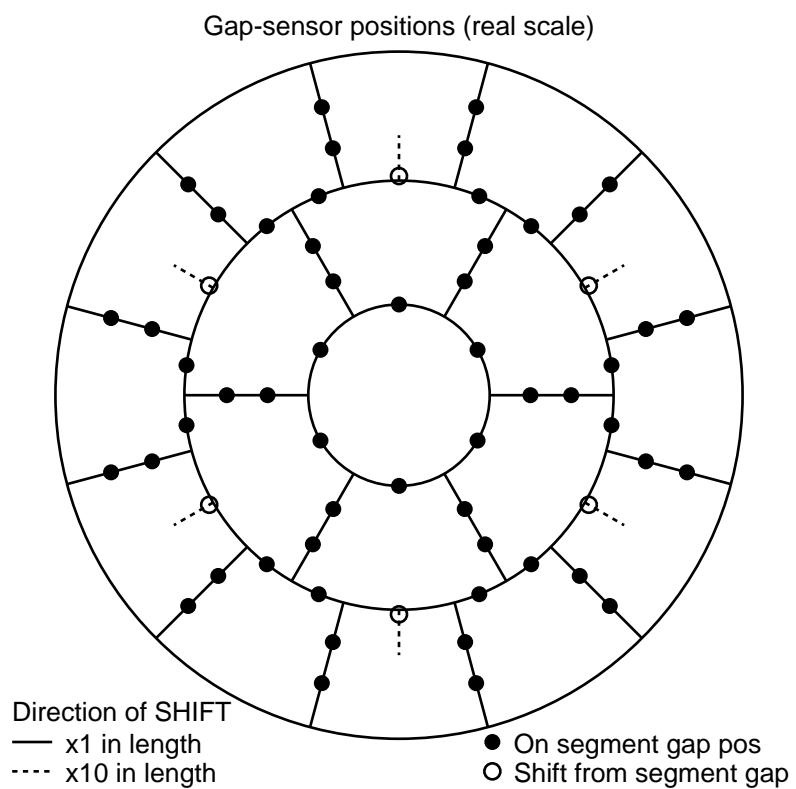


図 127: 試行 61 — ギャップセンサー配置

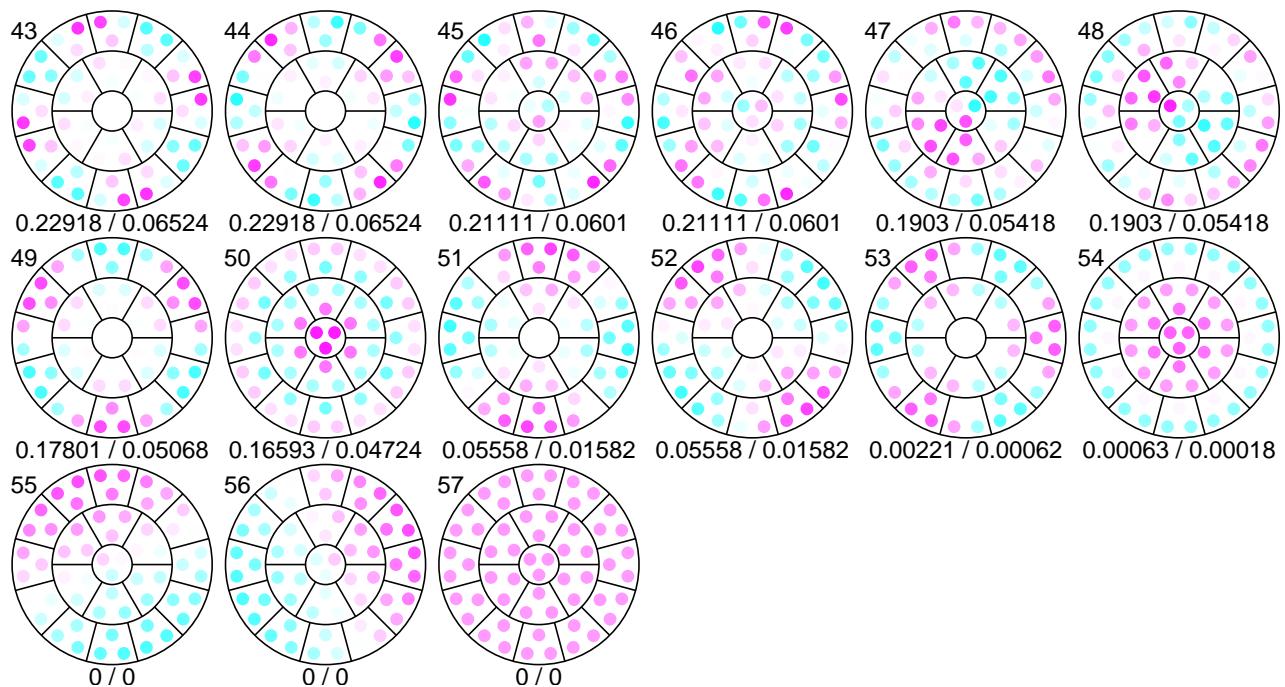


図 128: 試行 61 — 特異ベクトル分布

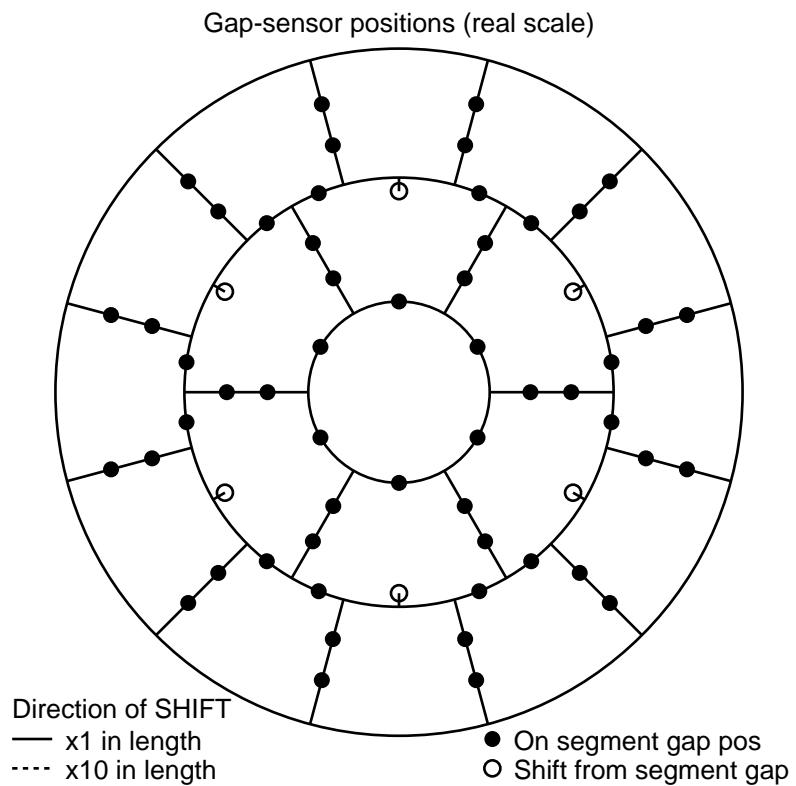


図 129: 試行 62 — ギャップセンサー配置

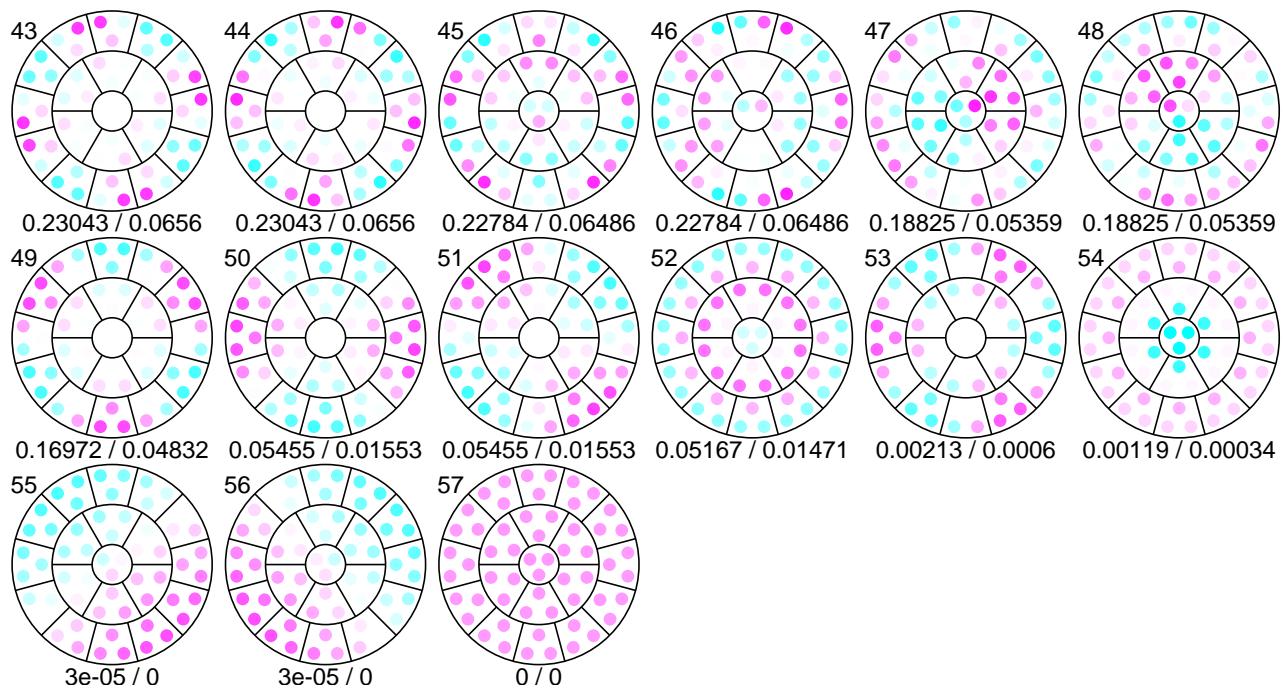


図 130: 試行 62 — 特異ベクトル分布

#### 4.3.10 全体評価

これまでに試したパターンについての Zernike モード (表 1) との対応関係は表 9 となる。

特異値 ID の数字の後ろの記号は、メインのモード (Zernike モード) に対して擾乱として加わっているモードを示す。r は 1/24 もしくは 1/12 回転、v は外周セグメント部分に基準ギャップセンサーの ID 42 のような特異ベクトルが加わっている、c は対応する Zernike モード (たとえば、5(2,2) なら 6(2,-2) などの対応モード) との間でちょうど中間になるように回転している<sup>13</sup>、をそれぞれしめす。

また、特異値の値の色はそれぞれ、10 倍以上増加、5 倍以上増加、1/5 以下に減少をしめす。

<sup>13</sup>この場合、対応するモードとの間でモードの移転が生じているとも言え、基準ギャップセンサー配置での特異値が異なる場合は二つの平均に近い値を示していることが多い。

表9: Zernikeモードとの対応一覧

| ID | 場所  | 4(2,0)  |         | 5(2,2)  |         | 6(2,-2) |         | 7(3,1) |         | 8(3,-1)    |             | 9(4,0) |         | 10(3,3) |         | 11(3,-3) |         |
|----|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|------------|-------------|--------|---------|---------|---------|----------|---------|
|    |     | Defocus | Astig   | Defocus | Astig   | Coma    | Coma    | Sphere | Sphere  | AstigTri 0 | AstigTri 30 |        |         |         |         |          |         |
| 0  | 基準  | 54      | 0.00067 | 52      | 0.05535 | 51      | 0.05535 | 48r    | 0.18862 | 47r        | 0.18862     | 50     | 0.11354 | 49      | 0.17583 | 53       | 0.00223 |
| 1  | 環1  | 54      | 0.00066 | 51      | 0.06014 | 52      | 0.06014 | 47r    | 0.18833 | 48r        | 0.18833     | 50     | 0.11255 | 49      | 0.17812 | 53       | 0.05814 |
| 2  | 環2  | 54      | 0.00066 | 52      | 0.06987 | 53      | 0.06987 | 47r    | 0.18743 | 48r        | 0.18743     | 50     | 0.10943 | 49      | 0.18560 | 51       | 0.09874 |
| 3  | 内間対 | 54      | 0.00066 | 51      | 0.04371 | 52      | 0.04371 | 49v    | 0.12807 | 48v        | 0.12807     | 50     | 0.11353 | 47      | 0.14996 | 53       | 0.00218 |
| 4  |     | 54      | 0.00067 | 51      | 0.06518 | 52      | 0.06518 | 48r    | 0.19607 | 49r        | 0.19607     | 50     | 0.11354 | 47      | 0.20580 | 53       | 0.00220 |
| 5  |     | 54      | 0.00071 | 51      | 0.07324 | 52      | 0.07324 | 48r    | 0.19686 | 49r        | 0.19686     | 50     | 0.11356 | 47      | 0.24301 | 53       | 0.00221 |
| 6  |     | 54      | 0.00073 | 51      | 0.07566 | 52      | 0.07566 | 48r    | 0.19698 | 49r        | 0.19698     | 50     | 0.11358 | 47      | 0.25783 | 53       | 0.00221 |
| 7  | 内間内 | 54      | 0.00066 | 51      | 0.05474 | 52      | 0.05474 | 43v    | 0.19772 | 44v        | 0.19772     | 50     | 0.11354 | 49      | 0.13281 | 53       | 0.00221 |
| 8  | 内間外 | 54      | 0.00066 | 52r     | 0.04302 | 51r     | 0.04302 | 48c    | 0.16027 | 49c        | 0.16027     | 50     | 0.11353 | 47      | 0.19289 | 53       | 0.00208 |
| 9  | 内間非 | 54      | 0.00067 | 51      | 0.06267 | 52      | 0.06267 | 47r    | 0.19559 | 48r        | 0.19559     | 50     | 0.11354 | 49      | 0.18372 | 53       | 0.00221 |
| 10 | 内間入 | 54      | 0.00284 | 51r     | 0.05534 | 52r     | 0.05534 | 47r    | 0.18894 | 48r        | 0.18894     | 50     | 0.11824 | 49      | 0.17655 | 53       | 0.01518 |
| 11 |     | 54      | 0.00509 | 51r     | 0.05529 | 52r     | 0.05529 | 47c    | 0.18982 | 48c        | 0.18982     | 50     | 0.13143 | 49      | 0.17842 | 53       | 0.02846 |
| 12 |     | 54      | 0.00379 | 51r     | 0.05579 | 52r     | 0.05579 | 47c    | 0.18896 | 48c        | 0.18896     | 50     | 0.12251 | 49      | 0.17581 | 53       | 0.02327 |
| 13 |     | 54      | 0.00623 | 51      | 0.05703 | 52      | 0.05703 | 47c    | 0.18987 | 48c        | 0.18987     | 50     | 0.14491 | 49      | 0.17590 | 53       | 0.04467 |
| 14 |     | 54      | 0.00201 | 51r     | 0.05646 | 52r     | 0.05646 | 47c    | 0.18796 | 48c        | 0.18796     | 50v    | 0.11451 | 49      | 0.17730 | 53       | 0.03398 |
| 15 |     | 54      | 0.00808 | 52r     | 0.05726 | 53r     | 0.05726 | 48c    | 0.19253 | 49c        | 0.19253     | 47     | 0.19279 | 50r     | 0.17992 | 51r      | 0.06076 |
| 16 | 外間対 | 54      | 0.00041 | 52      | 0.05008 | 51      | 0.05008 | 49     | 0.11933 | 48         | 0.11933     | 50     | 0.08160 | 47      | 0.15526 | 53       | 0.00190 |
| 17 |     | 54      | 0.00099 | 51r     | 0.05816 | 52r     | 0.05816 | 43c    | 0.28731 | 44c        | 0.28731     | 50     | 0.13427 | 49      | 0.19258 | 53       | 0.00234 |
| 18 |     | 54      | 0.00156 | 52c     | 0.06004 | 51c     | 0.06004 | 43v    | 0.41155 | 42v        | 0.41155     | 50     | 0.14977 | 47      | 0.20634 | 53       | 0.00244 |
| 19 |     | 54      | 0.00193 | 52c     | 0.06054 | 51c     | 0.06054 | 48cv   | 0.20615 | 49cv       | 0.20615     | 50     | 0.15416 | 47      | 0.21045 | 53       | 0.00247 |
| 20 | 外間内 | 54      | 0.00053 | 51r     | 0.05398 | 52r     | 0.05398 | 48c    | 0.15598 | 49c        | 0.15598     | 50     | 0.11491 | 47      | 0.16195 | 53       | 0.00221 |
| 21 | 外間外 | 54      | 0.00048 | 52c     | 0.05156 | 51c     | 0.05156 | 49     | 0.13917 | 48         | 0.13917     | 50     | 0.08046 | 47      | 0.16613 | 53       | 0.00188 |
| 22 | 外間非 | 54      | 0.00083 | 51c     | 0.05735 | 52c     | 0.05735 | 48v    | 0.20089 | 47v        | 0.20089     | 50     | 0.13016 | 49      | 0.18575 | 53       | 0.00232 |
| 23 | 外間入 | 53      | 0.01523 | 51r     | 0.05527 | 52r     | 0.05527 | 48v    | 0.18894 | 47v        | 0.18894     | 50     | 0.11446 | 49      | 0.17540 | 54       | 0.00737 |
| 24 |     | 53      | 0.02959 | 51c     | 0.05508 | 52c     | 0.05508 | 47v    | 0.19019 | 48v        | 0.19019     | 50     | 0.11811 | 49      | 0.17427 | 54       | 0.01630 |
| 25 |     | 54      | 0.01909 | 51c     | 0.05556 | 52c     | 0.05556 | 48r    | 0.18936 | 47r        | 0.18936     | 50     | 0.11229 | 49      | 0.17598 | 53       | 0.02206 |
| 26 |     | 54      | 0.03547 | 52c     | 0.05614 | 51c     | 0.05614 | 48r    | 0.19167 | 47r        | 0.19167     | 50     | 0.11072 | 49      | 0.17646 | 53       | 0.04192 |
| 27 |     | 54      | 0.00594 | 52c     | 0.05576 | 51c     | 0.05576 | 47v    | 0.18903 | 48v        | 0.18903     | 50     | 0.10757 | 49      | 0.17582 | 53       | 0.02386 |
| 28 |     | 54      | 0.04850 | 52r     | 0.05581 | 51r     | 0.05581 | 47v    | 0.19976 | 48v        | 0.19976     | 50     | 0.13148 | 48r     | 0.19976 | 53r      | 0.05522 |
| 29 | 面間対 | 54      | 0.00040 | 51      | 0.03871 | 52      | 0.03871 | 49     | 0.11468 | 48         | 0.11468     | 50     | 0.08159 | 47      | 0.13175 | 53       | 0.00185 |

表9: Zernikeモードとの対応一覧

| ID | 場所  | 4 (2,0) |                | 5 (2,2) |         | 6 (2,-2) |         | 7 (3,1) |         | 8 (3,-1) |         | 9 (4,0)    |                | 10 (3,3) |         | 11 (3,-3) |                |
|----|-----|---------|----------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|------------|----------------|----------|---------|-----------|----------------|
|    |     | Defocus | Astig          | Defocus | Astig   | Coma     | Coma    | Coma    | Coma    | Sphere   | Sphere  | AstigTri 0 | AstigTri 30    |          |         |           |                |
| 30 |     | 54      | 0.00099        | 52c     | 0.06828 | 51c      | 0.06828 | 48v     | 0.27651 | 50       | 0.13428 | 49         | 0.22658        | 53       | 0.00235 |           |                |
| 31 |     | 54      | 0.00158        | 52r     | 0.07900 | 51r      | 0.07900 | 43      | 0.43219 | 42       | 0.43219 | 50         | 0.14979        | 49       | 0.29515 | 53        | 0.00244        |
| 32 |     | 54      | 0.00195        | 52r     | 0.08230 | 51r      | 0.08230 | 43      | 0.52139 | 42       | 0.52139 | 50         | 0.15419        | 49       | 0.32600 | 53        | 0.00247        |
| 33 | 両間内 | 54      | 0.00053        | 51r     | 0.05339 | 52r      | 0.05339 | 45,46c  | 0.16448 | 47,48c   | 0.14369 | 50         | 0.11492        | 49       | 0.12502 | 53        | 0.00223        |
| 34 | 両間外 | 54      | 0.00047        | 52r     | 0.04002 | 51r      | 0.04002 | 49c     | 0.13514 | 48c      | 0.13514 | 50         | 0.08046        | 45       | 0.18418 | 53        | 0.00172        |
| 35 | 両間非 | 54      | 0.00084        | 51c     | 0.06484 | 52c      | 0.06484 | 48v     | 0.23427 | 47v      | 0.23427 | 50         | 0.13016        | 49       | 0.19418 | 53        | 0.00233        |
| 36 | 両間入 | 53      | <b>0.01561</b> | 51r     | 0.05505 | 52r      | 0.05505 | 47c     | 0.18902 | 48c      | 0.18902 | 50         | 0.11691        | 49       | 0.17552 | 54        | 0.00857        |
| 37 |     | 53      | <b>0.03128</b> | 51c     | 0.05417 | 52c      | 0.05417 | 47c     | 0.19069 | 48c      | 0.19069 | 50v        | 0.12751        | 49r      | 0.17455 | 54r       | <b>0.01699</b> |
| 38 |     | 54      | <b>0.01976</b> | 51c     | 0.05589 | 52c      | 0.05589 | 48r     | 0.19000 | 47r      | 0.19000 | 50         | 0.12475        | 49       | 0.17567 | 53        | <b>0.03077</b> |
| 39 |     | 54      | <b>0.03881</b> | 52r     | 0.05730 | 53r      | 0.05730 | 48r     | 0.19339 | 47r      | 0.19339 | 50         | 0.15226        | 49r      | 0.17547 | 51r       | <b>0.05900</b> |
| 40 |     | 54      | <b>0.00614</b> | 52c     | 0.05767 | 51c      | 0.05767 | 47c     | 0.18975 | 48c      | 0.18975 | 50v        | 0.12739        | 49       | 0.17888 | 53        | <b>0.04997</b> |
| 41 |     | 51      | <b>0.06770</b> | 54c     | 0.05474 | 53c      | 0.05474 | 47c     | 0.20368 | 48c      | 0.20368 | 49v        | 0.19382        | 50c      | 0.17282 | 52c       | <b>0.06218</b> |
| 42 | 内外上 | 54      | 0.00071        | 51r     | 0.05956 | 52r      | 0.05956 | 42r     | 0.19994 | 43r      | 0.19994 | 48         | 0.15127        | 47       | 0.16581 | 53        | 0.00194        |
| 43 |     | 54      | 0.00061        | 51      | 0.05472 | 52       | 0.05472 | 48r     | 0.18538 | 49r      | 0.18538 | 50         | 0.09348        | 47       | 0.20246 | 53        | 0.00219        |
| 44 |     | 54      | 0.00074        | 51r     | 0.05712 | 52r      | 0.05712 | 43v     | 0.22013 | 44v      | 0.22013 | 50v        | 0.10037        | 47r      | 0.16295 | 53r       | <b>0.01786</b> |
| 45 |     | 54      | 0.00070        | 51r     | 0.05486 | 52r      | 0.05486 | 48c     | 0.18811 | 47c      | 0.18811 | 50         | 0.08781        | 49       | 0.17329 | 53        | <b>0.02298</b> |
| 46 |     | 54      | 0.00062        | 51r     | 0.05509 | 52r      | 0.05509 | 49c     | 0.19193 | 48c      | 0.19193 | 50         | 0.07023        | 47       | 0.20123 | 53        | <b>0.01613</b> |
| 47 | 内外入 | 54      | 0.00062        | 51r     | 0.05486 | 52r      | 0.05486 | 47r     | 0.18439 | 48v      | 0.18439 | 50         | 0.16042        | 49       | 0.17734 | 53        | 0.00220        |
| 48 |     | 54      | 0.00060        | 51      | 0.05439 | 52       | 0.05439 | 48c     | 0.17963 | 49c      | 0.17963 | 47         | 0.20507        | 50       | 0.17907 | 53        | 0.00220        |
| 49 |     | 52      | <b>0.03603</b> | 50      | 0.05633 | 51       | 0.05633 | 48v     | 0.18766 | 48v      | 0.18766 | 54         | <b>0.00150</b> | 49       | 0.17321 | 53        | 0.00217        |
| 50 |     | 54      | 0.00082        | 51r     | 0.05508 | 52r      | 0.05508 | 47c     | 0.18786 | 48c      | 0.18786 | 50         | 0.06515        | 49       | 0.17367 | 53        | 0.00217        |
| 51 |     | 52      | <b>0.03229</b> | 50r     | 0.05482 | 51r      | 0.05482 | 47cv    | 0.18787 | 48cv     | 0.18787 | 54         | <b>0.00148</b> | 49       | 0.17163 | 53        | 0.00215        |
| 52 |     | 54      | 0.00063        | 51r     | 0.05578 | 52r      | 0.05578 | 48cv    | 0.19250 | 49cv     | 0.19250 | 45         | 0.22051        | 50       | 0.18027 | 53        | 0.00222        |
| 53 |     | 54      | 0.00061        | 51      | 0.05464 | 52       | 0.05464 | 48c     | 0.19129 | 49c      | 0.19129 | 43         | 0.31105        | 50       | 0.18302 | 53        | 0.00223        |
| 54 |     | 54      | 0.00087        | 51r     | 0.05561 | 52r      | 0.05561 | 48v     | 0.18694 | 47v      | 0.18694 | 50         | 0.10550        | 49       | 0.16859 | 53        | 0.00213        |
| 55 |     | 54      | 0.00075        | 51r     | 0.05442 | 52r      | 0.05442 | 47v     | 0.17909 | 48v      | 0.17909 | 50v        | 0.06361        | 49       | 0.17313 | 53        | 0.00212        |
| 56 |     | 54v     | 0.00114        | 50r     | 0.05518 | 51r      | 0.05518 | 48v     | 0.18701 | 47v      | 0.18701 | 52v        | 0.05503        | 49       | 0.16991 | 53        | 0.00216        |
| 57 |     | 54      | 0.00062        | 51r     | 0.05517 | 52r      | 0.05517 | 48v     | 0.18880 | 49v      | 0.18880 | 43v        | 0.25682        | 50       | 0.18144 | 53        | 0.00218        |
| 58 |     | 54      | 0.00065        | 51r     | 0.05631 | 52r      | 0.05631 | 48v     | 0.18773 | 47v      | 0.18773 | 50v        | 0.16429        | 49       | 0.17917 | 53        | 0.00224        |

表9: Zernikeモードとの対応一覧

| ID | 場所 | 4 (2,0) |         | 5 (2,2) |         | 6 (2,-2) |         | 7 (3,1) |         | 8 (3,-1) |         | 9 (4,0)    |             | 10 (3,3)   |             | 11 (3,-3) |         |
|----|----|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|------------|-------------|------------|-------------|-----------|---------|
|    |    | Defocus | Astig   | Defocus | Astig   | Coma     | Coma    | Coma    | Coma    | Sphere   | Sphere  | AstigTri 0 | AstigTri 30 | AstigTri 0 | AstigTri 30 |           |         |
| 59 |    | 54      | 0.00086 | 51r     | 0.05583 | 52r      | 0.05583 | 48v     | 0.18937 | 47v      | 0.18937 | 50         | 0.06660     | 49         | 0.17443     | 53        | 0.00218 |
| 60 |    | 54      | 0.00107 | 51r     | 0.05682 | 52r      | 0.05682 | 48v     | 0.18520 | 47v      | 0.18520 | 50         | 0.06604     | 49         | 0.17213     | 53        | 0.00216 |
| 61 |    | 54      | 0.00063 | 51r     | 0.05558 | 52r      | 0.05558 | 48cv    | 0.19030 | 47cv     | 0.19030 | 50         | 0.16593     | 49         | 0.17801     | 53        | 0.00221 |
| 62 |    | 54      | 0.00119 | 50      | 0.05455 | 51       | 0.05455 | 48rv    | 0.18825 | 47rv     | 0.18825 | 52         | 0.05167     | 49         | 0.16972     | 53        | 0.00213 |

この表 9 から判明する、ギャップセンサー配置をずらしたときの各 Zernike モードへの影響は次のようにまとめられる。

- 全セグメントで(内周・外周各同士)同一配置なら、Astig, Coma などはペアとなる特異値は同一値(33 を除く)—2,4 次などの対称形ペアは維持される; 33 はモードが他とマージ
- 内環を中心からずらすのは AstigTri 30 に効果がある—6 次への非対称効果
- 内周セグメント間・外周セグメント間: 辺上
  - 内周間を辺上で移動させても曲率に効果ない
  - 外周間の辺上移動は 2 点間の距離の長さと配置が内側に行くほど効果が出る
  - 内環・内外間のペアと内周間のペアは曲率には同一効果だが、外環が無いので外周では効果が出た? (but: 20 > 21 になっている)
  - 辺の両端、もしくは 2 つを同時に端に動かすと外周アクチュエータに細かい振動モードが加わって基本モードからずれる(混じる)
- 内周セグメント間・外周セグメント間: セグメント内
  - セグメント内にずらすと曲率・AstigTri 30 に効果があり他はほぼ変化なしか微妙に改善
  - 内周はどちらかというと AstigTri 30 に効果、外周では Defocus に効果が見られ、両方行った場合は効果の積算状態になっている
  - 14,27,40: ギャップセンサーが半径方向に並ぶ配置は効果が出ない
  - 0 ~ 50 の範囲なら 2 つのギャップが広がるほど効果的(15,28,41 が最大)
  - 内側と外側だと内側のを動かすほうが効果的
- 内・外セグメント間: 辺上
  - 両脇を対称( $\pm 3/8$ )からずらすと、内側へで AstigTri (0) に、外側へでそれ以外の全てに若干の効果がある
  - 中央を対称(0)からずらすと、AstigTri 30 に効果があるが、曲率(Defocus, Sphere)に微妙な減少
- 内・外セグメント間: 辺上
  - セグメント内に配置すると曲率 2 つ(Defocus, Sphere)に少し効果があるが、外周アクチュエータに細かい振動モードが加わって基本モードからずれる—Defocus/Sphere は片方が改善するともう一方は悪化し、Defocus への効果は小さい
  - Coma, Astig, AstigTri は影響をほとんど受けない(特異値変化で 1 割以下とか)
  - セグメント内配置では Defocus/Sphere が交代する配置(49,51)あり—内周セグメント上で中央のものが両端に比べ 50mm 内側に入った配置のみ影響があり、25,75mm では影響が見られない(59,60;50,62)ので、局所的な線形性の影響と考えられる。

まとめると、単体での効果は以下のように結論付けられる。

- 最大値の 1%以上の 52 のモード以上は考慮しないとする(53,54 のみ考慮)
- 54:Defocus は内周間・外周間のセグメント内へ
- 53:AstigTri 30 は内周間・外周間のセグメント内へ、内環の非対称配置
- 内外周間ギャップセンサーをセグメント内に入れるときは局所的な線形性にはまらないように注意すべき

#### 4.4 ギャップセンサー配置による特異値への影響 — セグメント間同一・辺毎複合

前節ではギャップセンサー配置場所グループ毎に、辺上で動かすパターンと辺からセグメント内に入ったパターンを組み合わせた場合にどうなるかを試験する。なお、ここでは、ギャップセンサーがあるセグメントの一つの角に集まってしまう配置を避け、比較しやすくするために辺毎に組み合わせを試験する。

前節より、4 種類のギャップセンサーについて効果的であった以下のようないくつかの組み合わせを、それぞれのギャップセンサーグループごとに検証する。なお、動かさないグループについては基準配置にする。

- 
- 内環：辺上でしか動かさないので本節では (0, 0) に固定
  - 内周間：辺上は (1/4,3/4) (1/10,9/10) (0,1)、セグメント内は (0, +50) (+50, 0) (-50, +50)
  - 外周間：辺上は (1/4,3/4) (1/10,9/10) (0,1)、セグメント内は (0, +50) (+50, 0) (-50, +50)
  - 内外間：辺上は (-7/16,0,-7/16) (-7/16,2/16,-7/16) (-6/16,2/16,6/16) セグメント内は (+50, -50, +50) (0, -50, +50)

#### 4.4.1 内周間ギャップセンサー配置による影響

内周間ギャップセンサー配置と ID は以下のような対応になる。

b01 ( 1/4 0, 3/4 +50) page [96](#)  
b02 ( 1/10 0, 9/10 +50) page [97](#)  
b03 ( 0 0, 1 +50) page [98](#)  
b04 ( 1/4 +50, 3/4 0) page [99](#)  
b05 (1/10 +50, 9/10 0) page [100](#)  
b06 ( 0 +50, 1 0) page [101](#)  
b07 ( 1/4 -50, 3/4 +50) page [102](#)  
b08 (1/10 -50, 9/10 +50) page [103](#)  
b09 ( 0 -50, 1 +50) page [104](#)

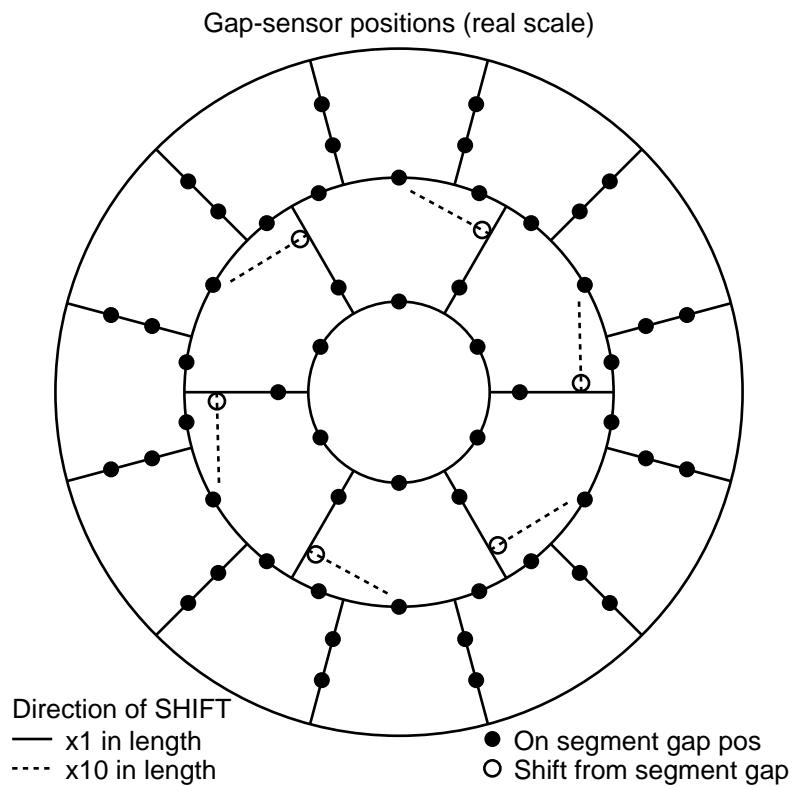


図 131: 試行 b01 — ギャップセンサー配置

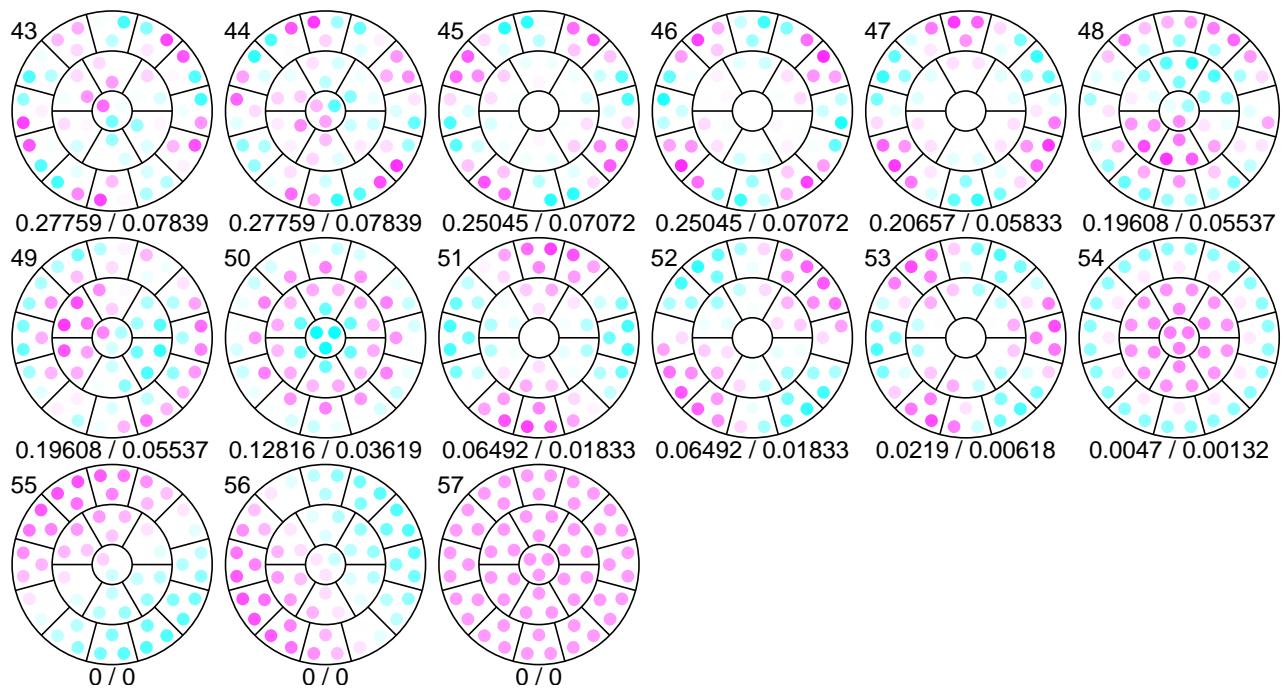


図 132: 試行 b01 — 特異ベクトル分布

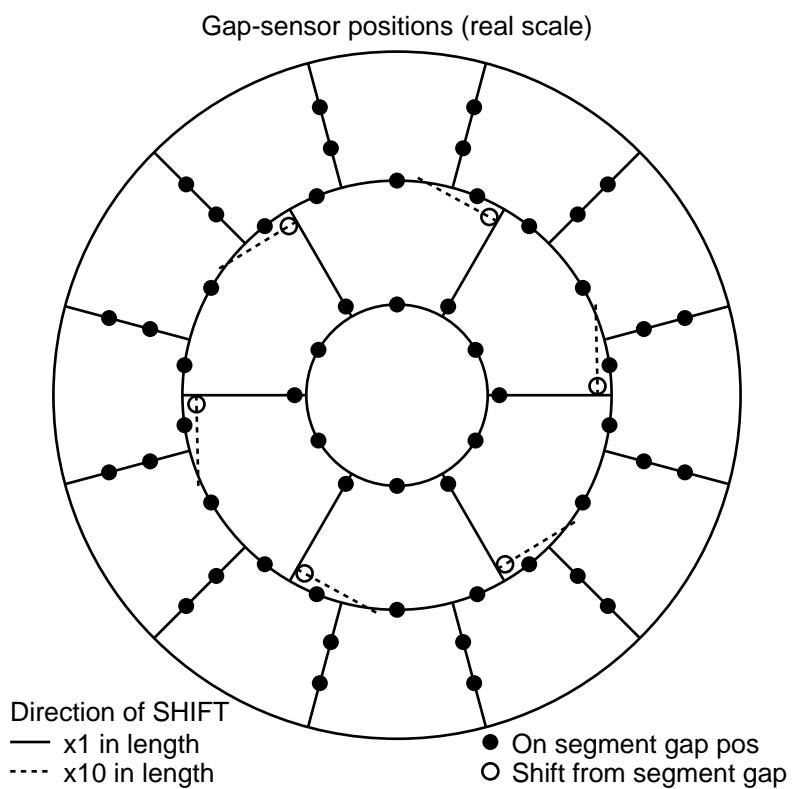


図 133: 試行 b02 — ギャップセンサー配置

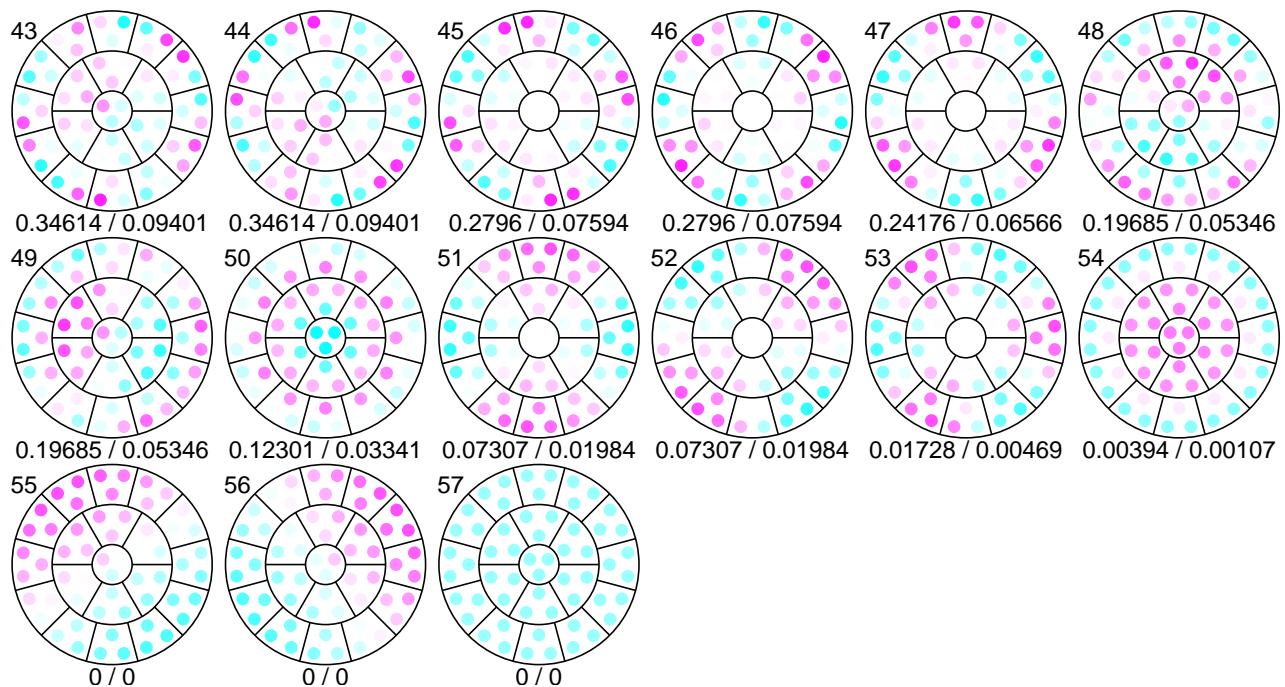


図 134: 試行 b02 — 特異ベクトル分布

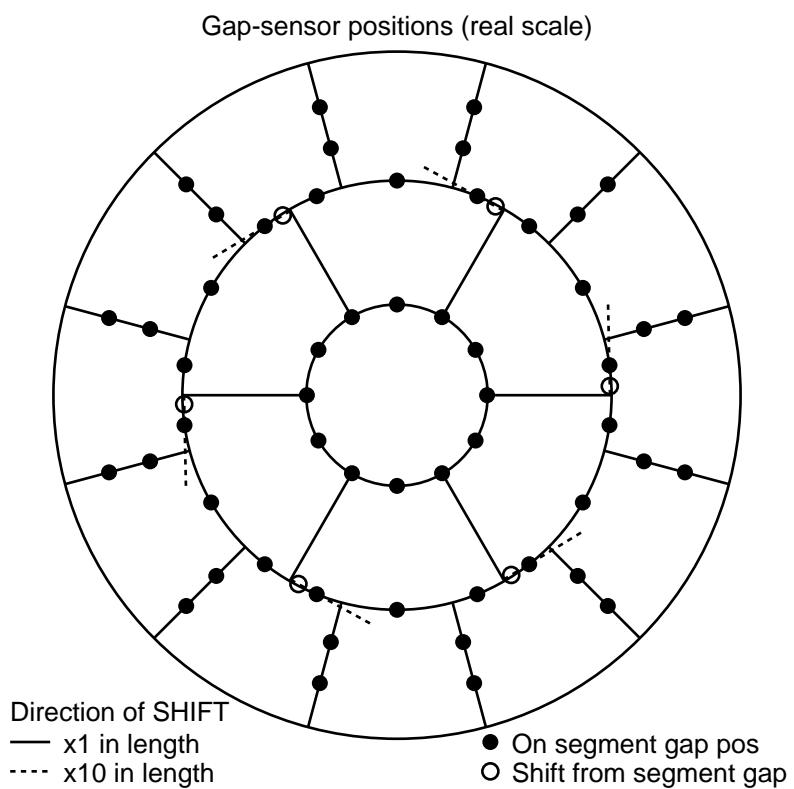


図 135: 試行 b03 — ギャップセンサー配置

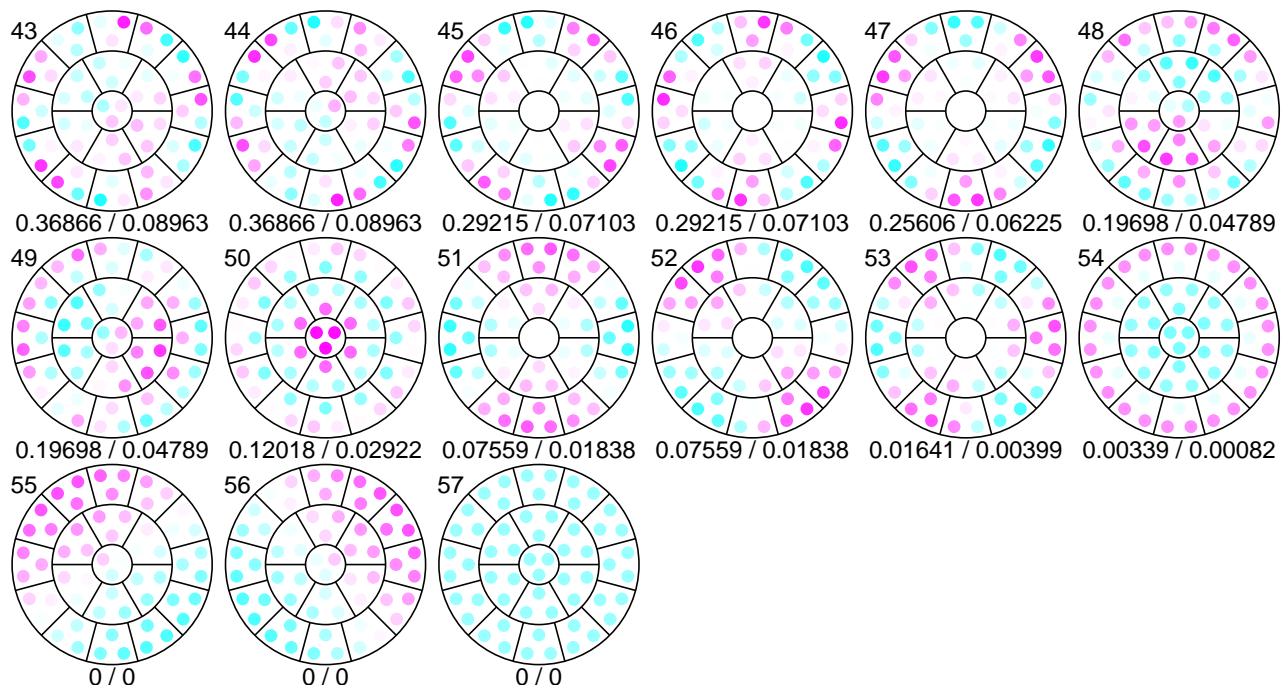


図 136: 試行 b03 — 特異ベクトル分布

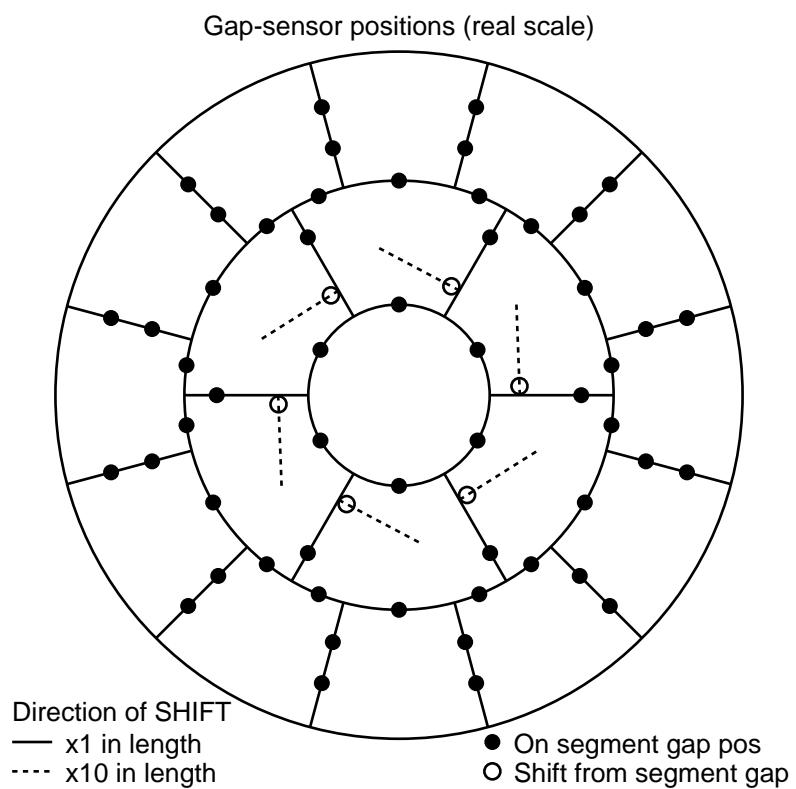


図 137: 試行 b04 — ギャップセンサー配置

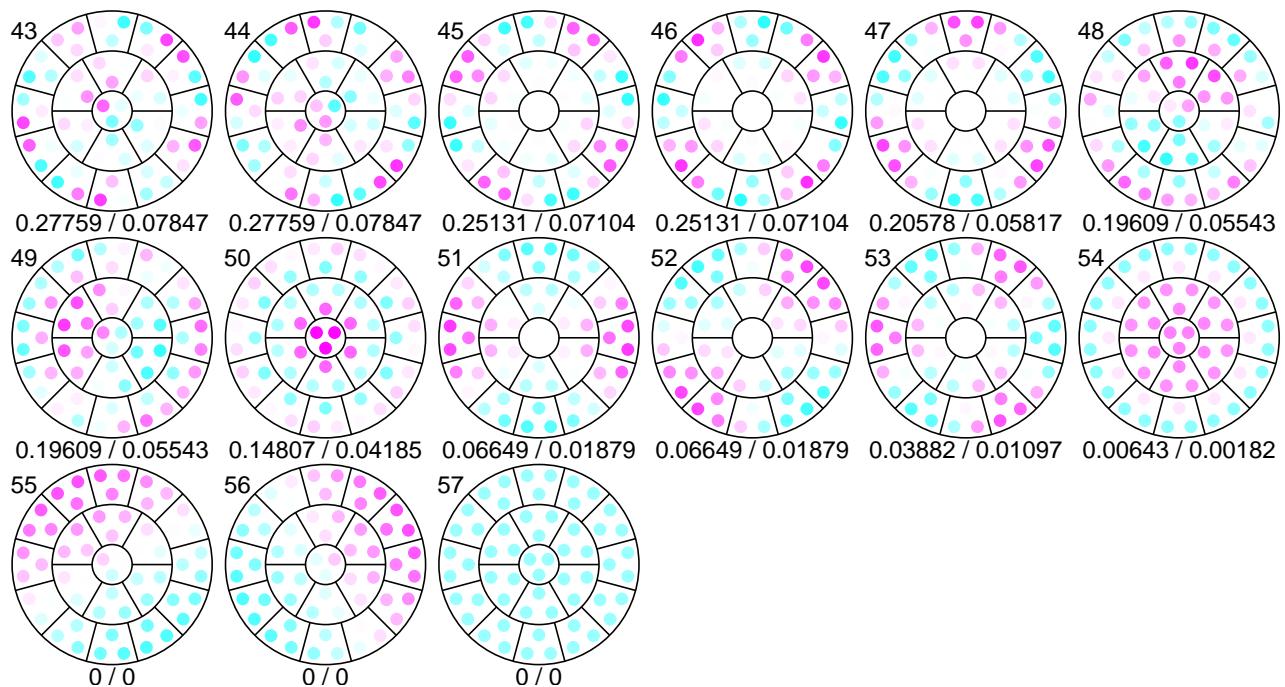


図 138: 試行 b04 — 特異ベクトル分布

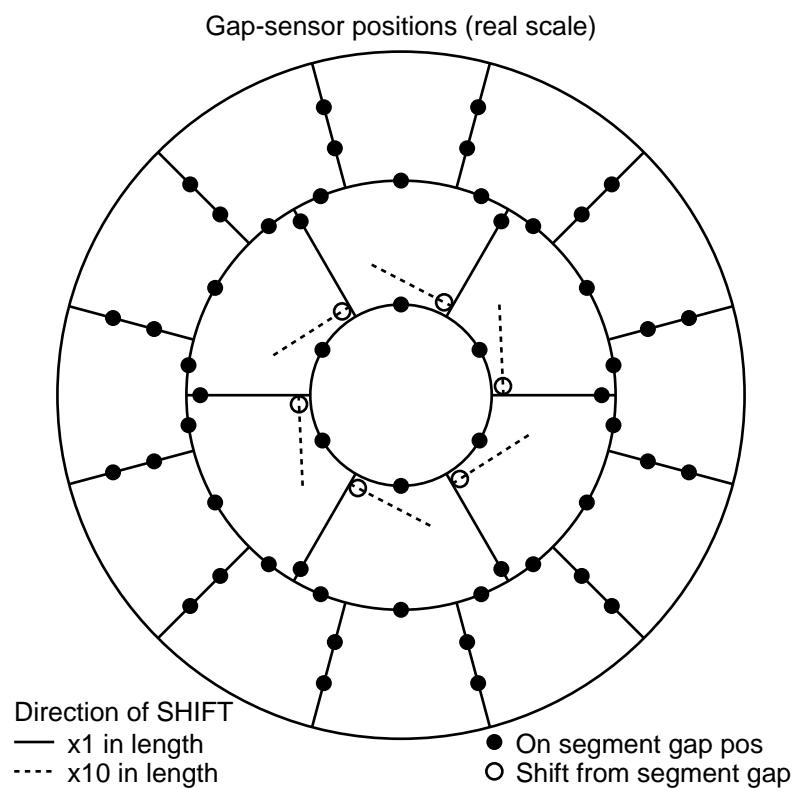


図 139: 試行 b05 — ギャップセンサー配置

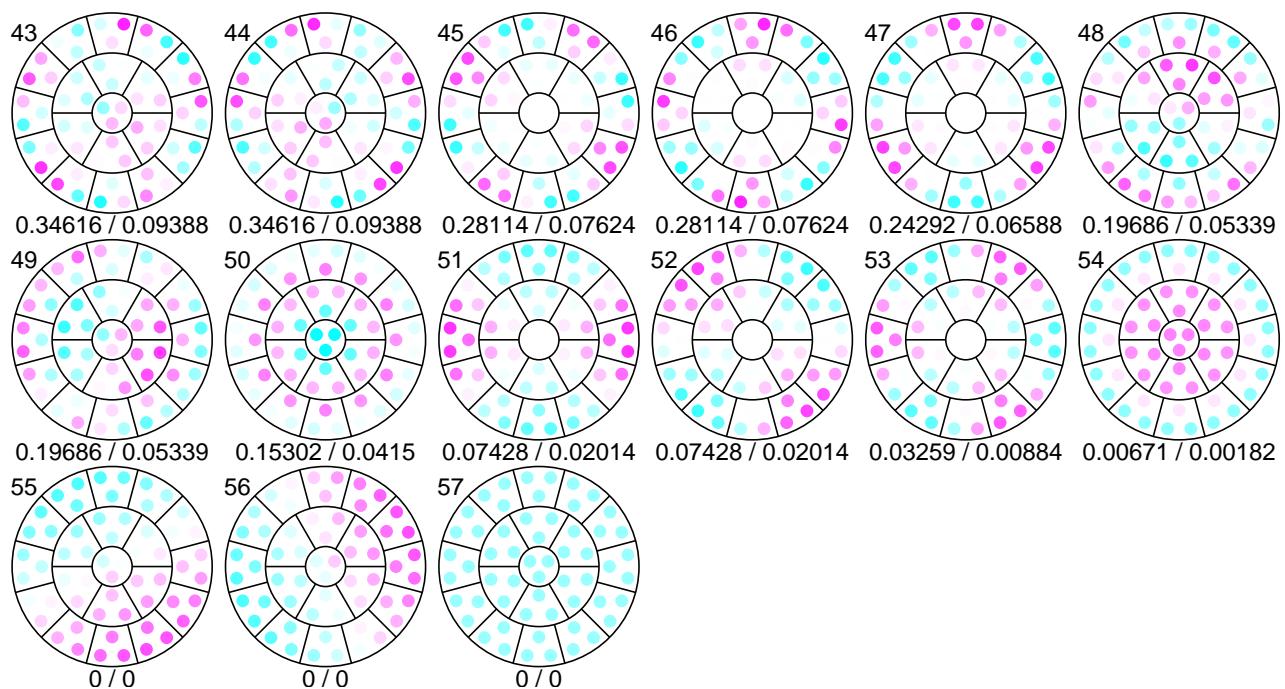


図 140: 試行 b05 — 特異ベクトル分布

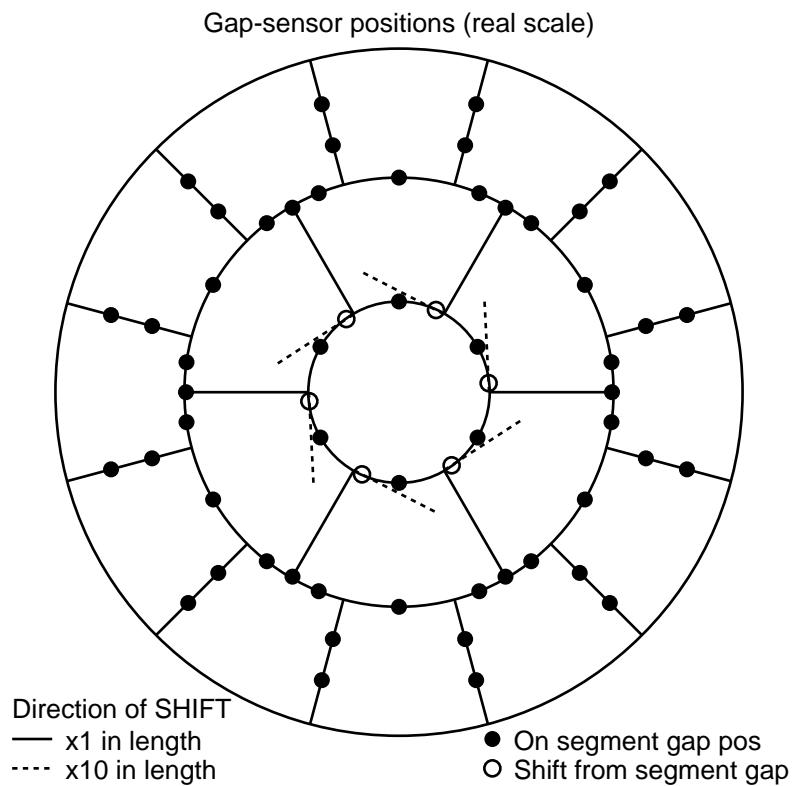


図 141: 試行 b06 — ギャップセンサー配置

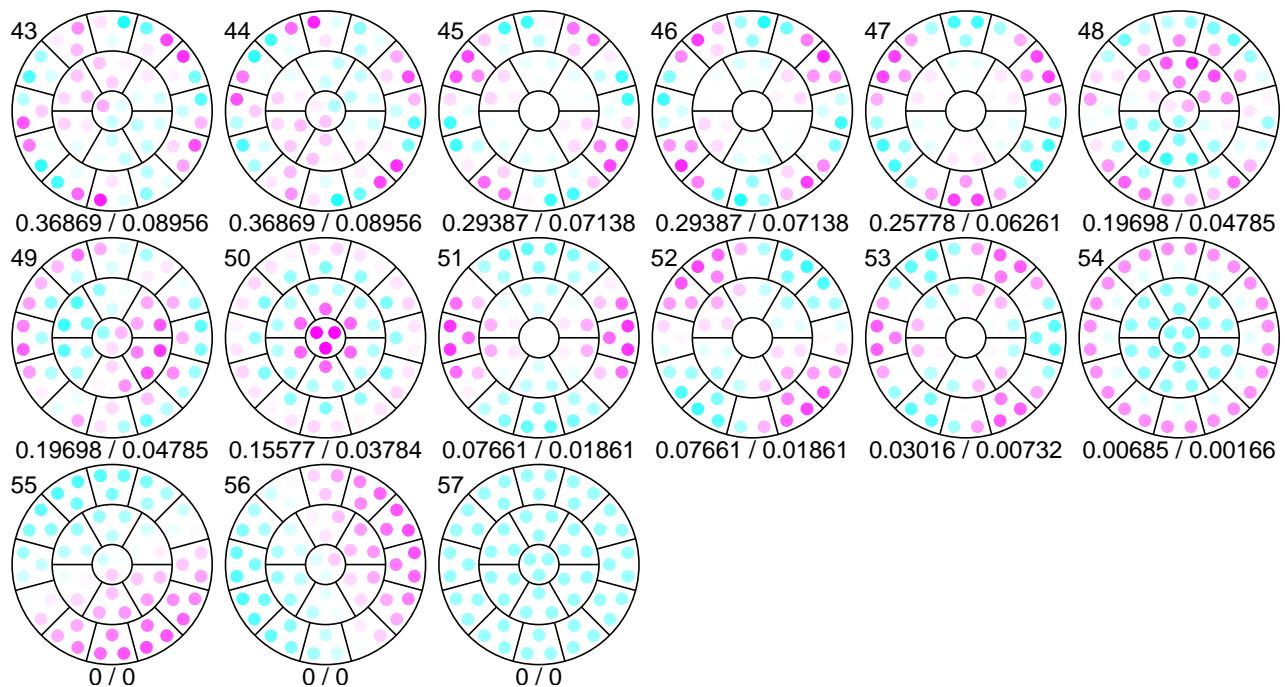


図 142: 試行 b06 — 特異ベクトル分布

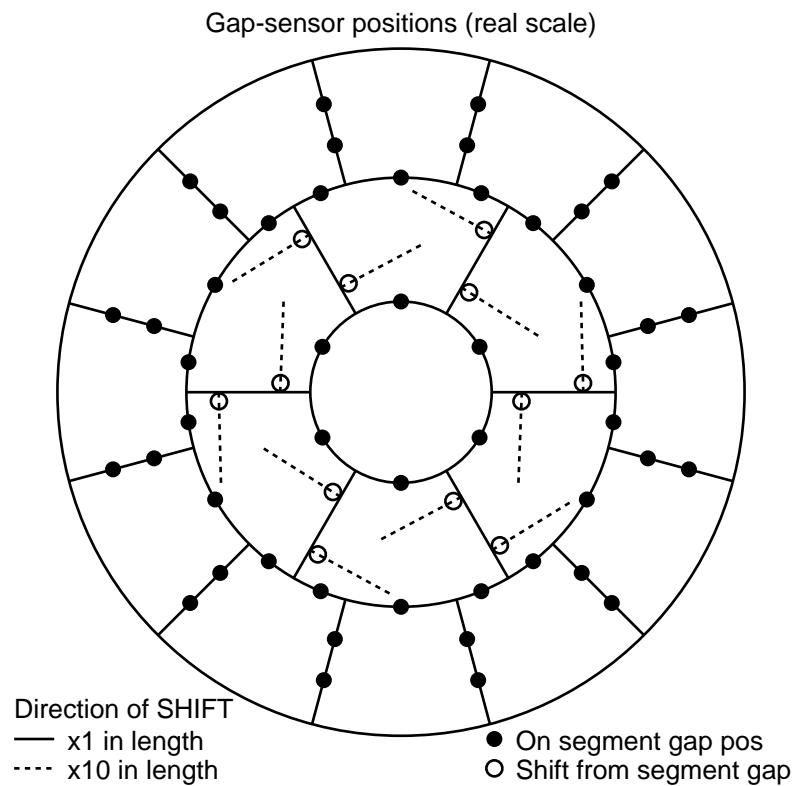


図 143: 試行 b07 — ギャップセンサー配置

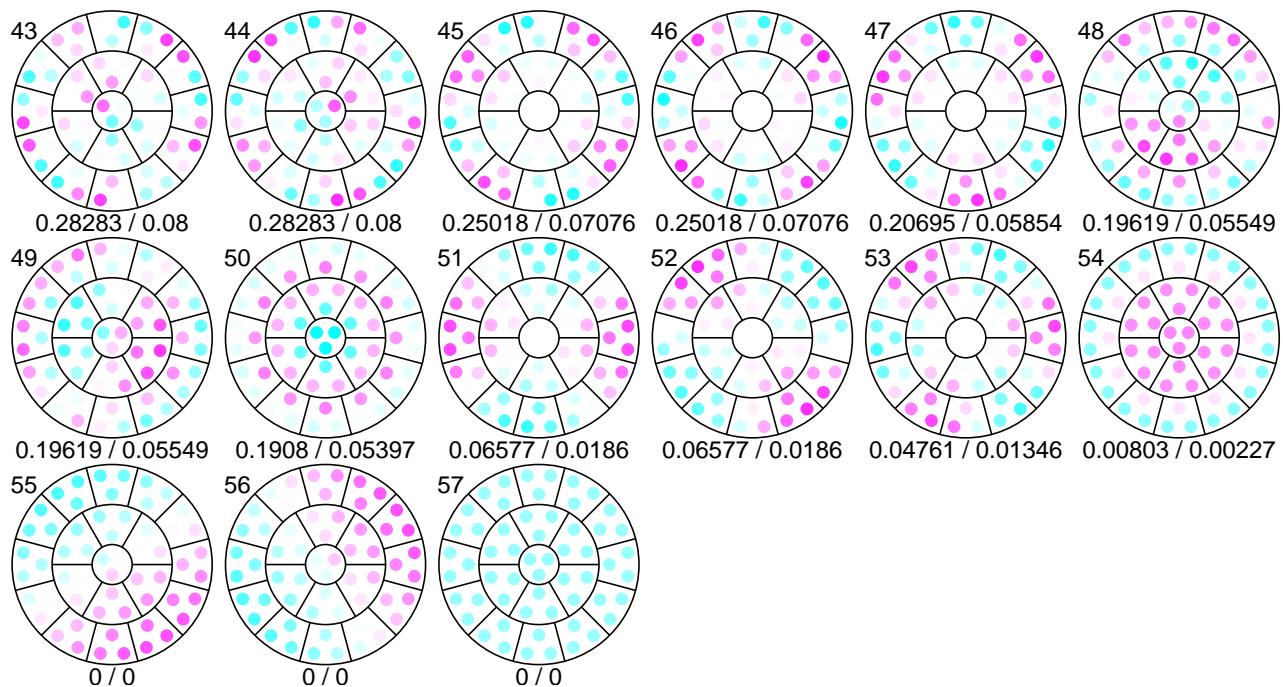


図 144: 試行 b07 — 特異ベクトル分布

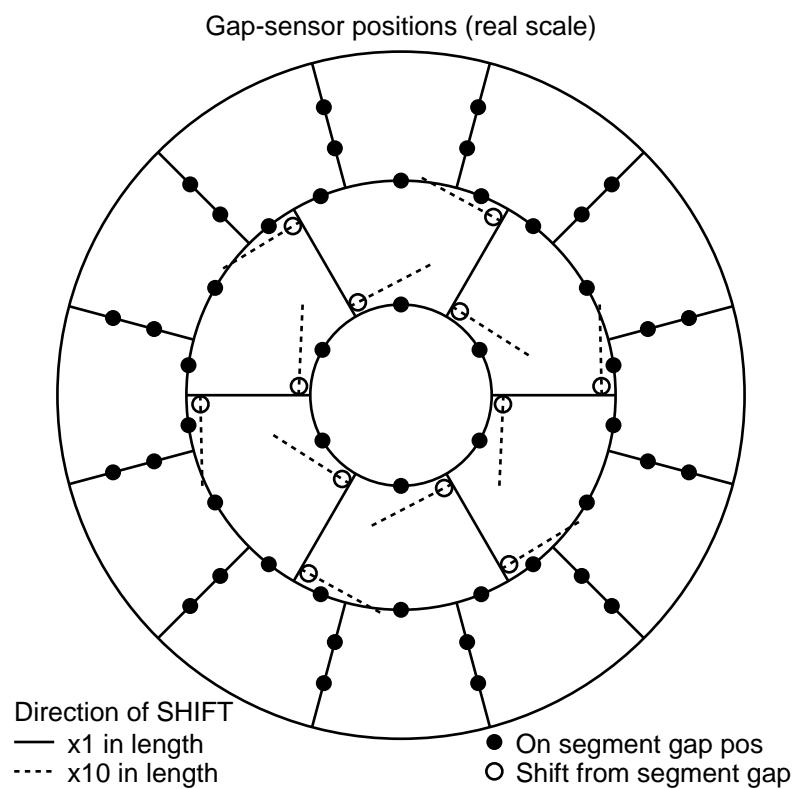


図 145: 試行 b08 — ギャップセンサー配置

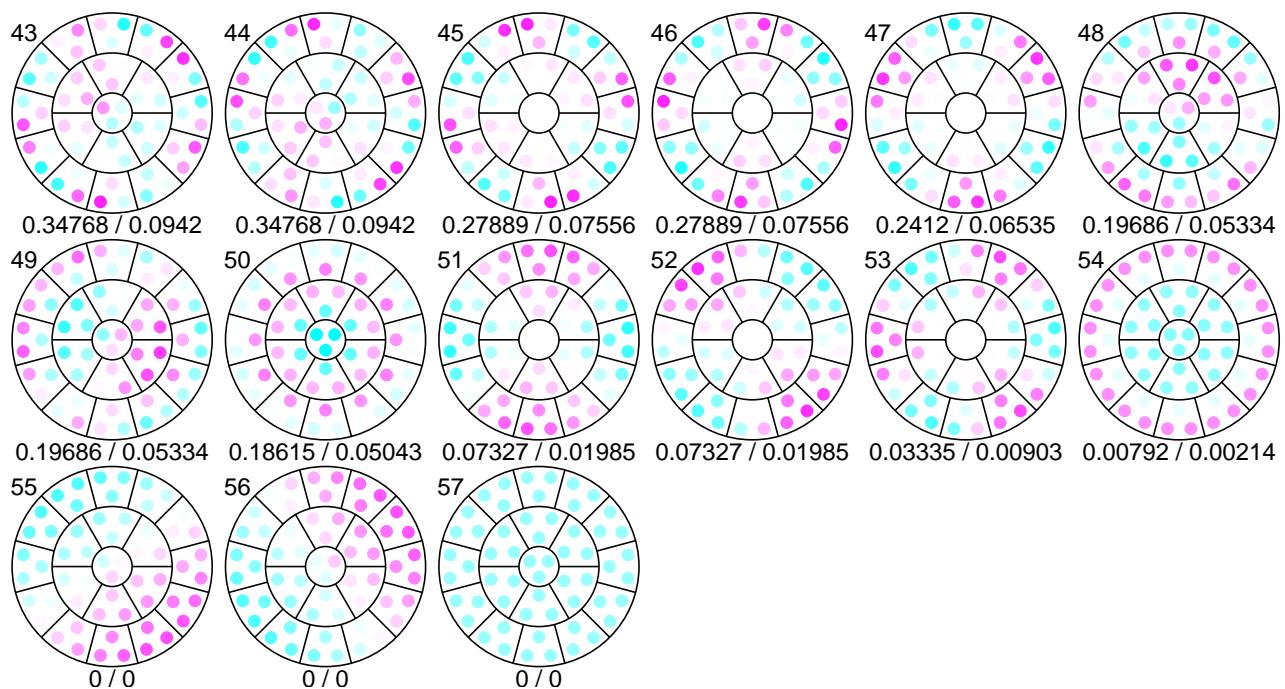


図 146: 試行 b08 — 特異ベクトル分布

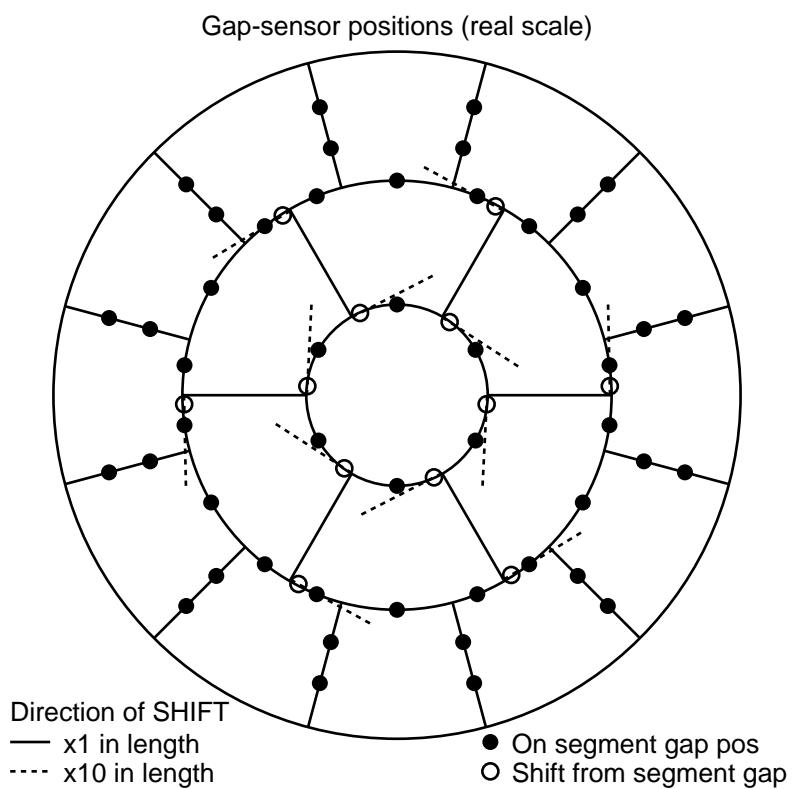


図 147: 試行 b09 — ギャップセンサー配置

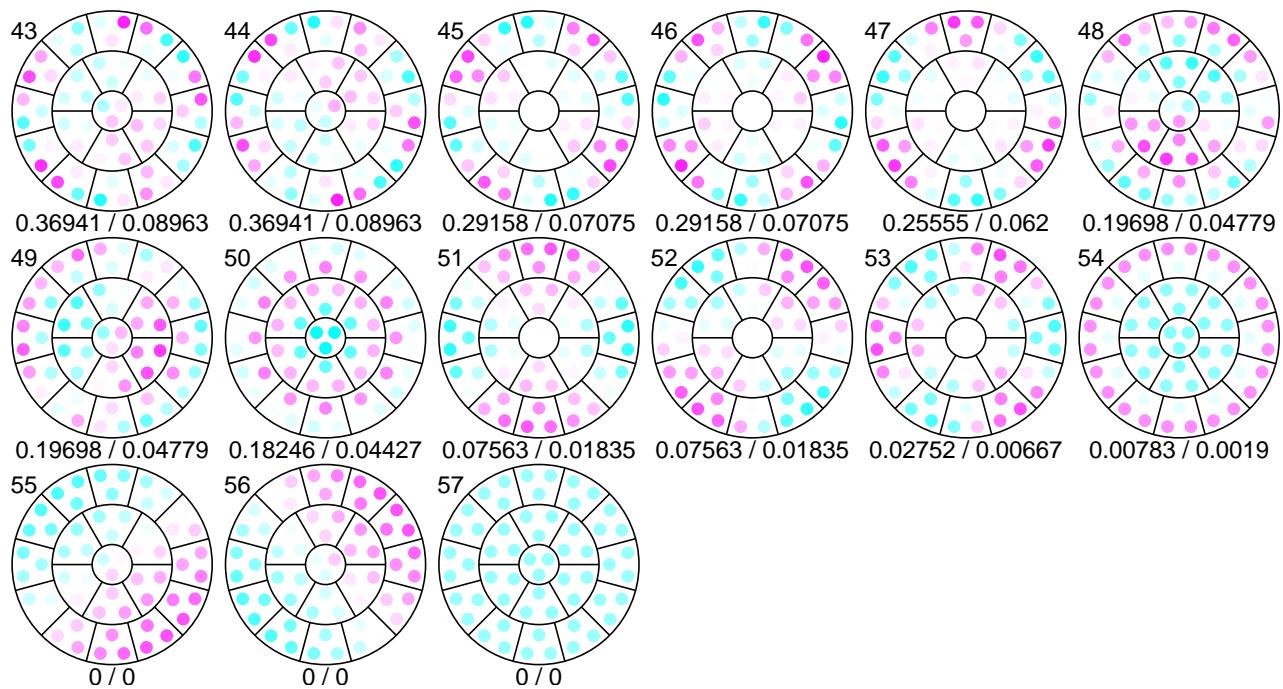


図 148: 試行 b09 — 特異ベクトル分布

#### 4.4.2 外周間ギャップセンサー配置による影響

外周間ギャップセンサー配置と ID は以下のような対応になる。組み合わせパターンは内周と同じ。

b10 ( 1/4 0, 3/4 +50) page [106](#)

b11 ( 1/10 0, 9/10 +50) page [107](#)

b12 ( 0 0, 1 +50) page [108](#)

b13 ( 1/4 +50, 3/4 0) page [109](#)

b14 (1/10 +50, 9/10 0) page [110](#)

b15 ( 0 +50, 1 0) page [111](#)

b16 ( 1/4 -50, 3/4 +50) page [112](#)

b17 (1/10 -50, 9/10 +50) page [113](#)

b18 ( 0 -50, 1 +50) page [114](#)

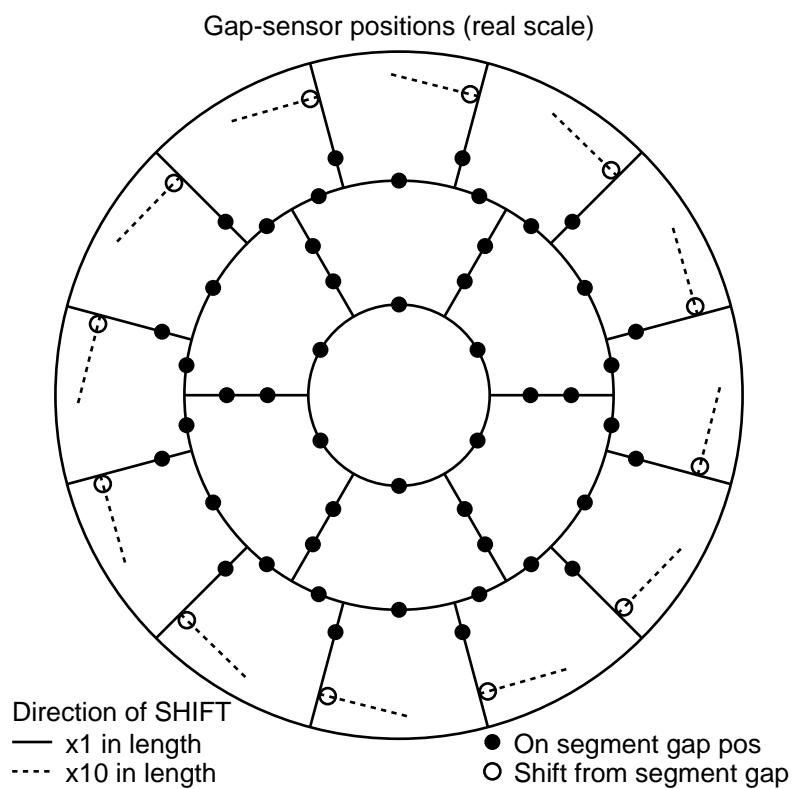


図 149: 試行 b10 — ギャップセンサー配置

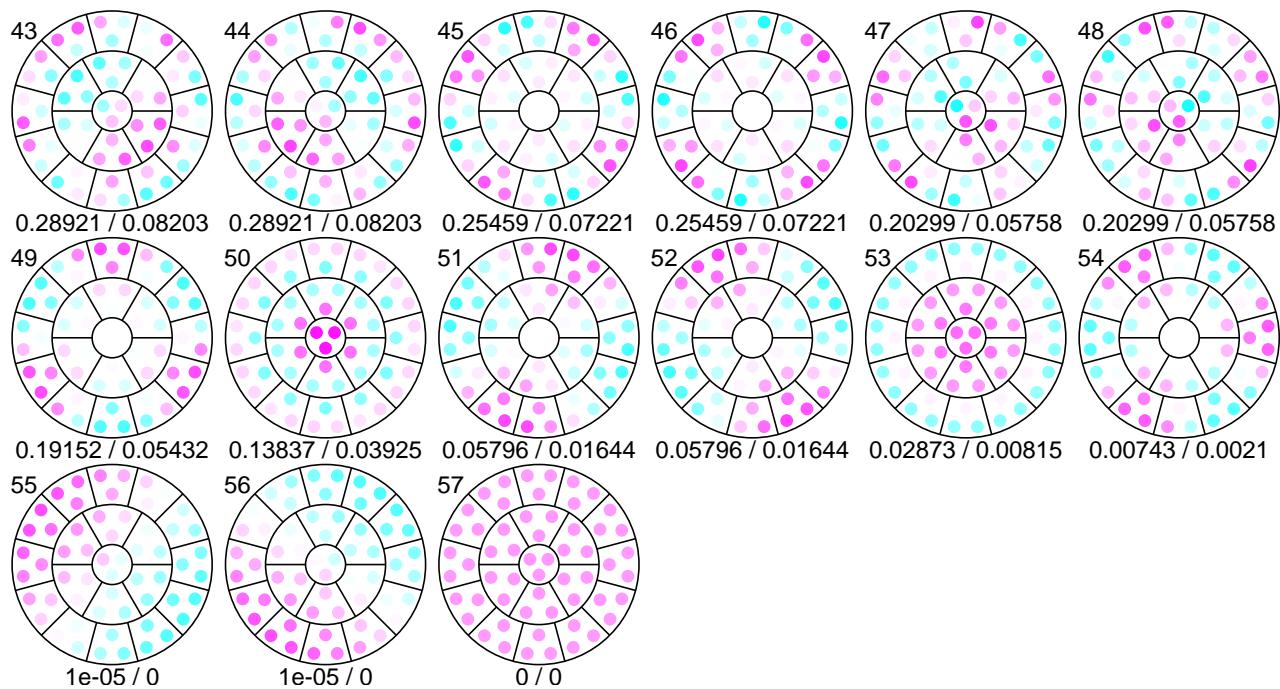


図 150: 試行 b10 — 特異ベクトル分布

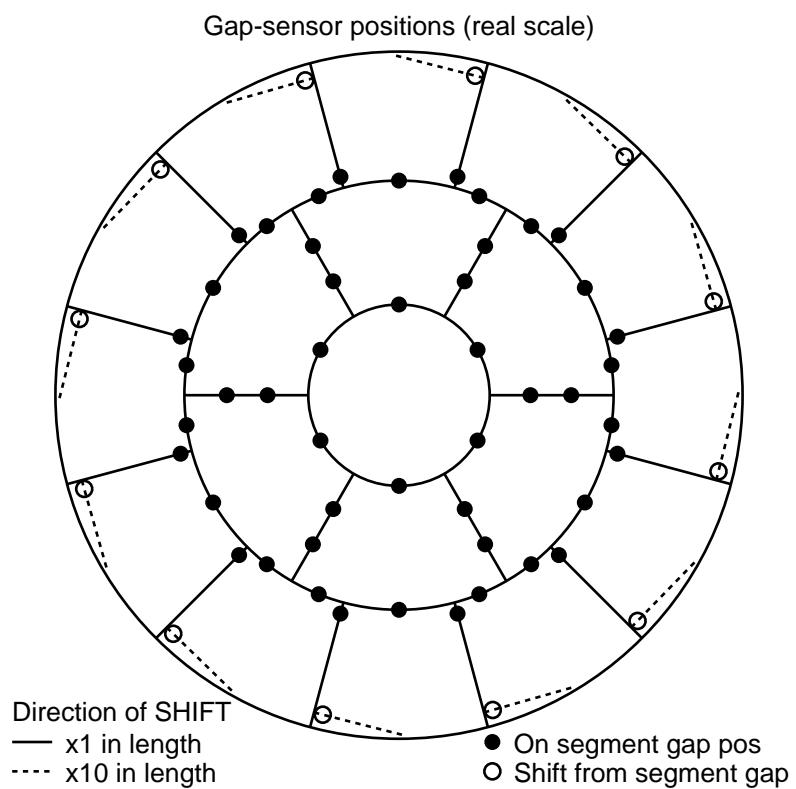


図 151: 試行 b11 — ギャップセンサー配置

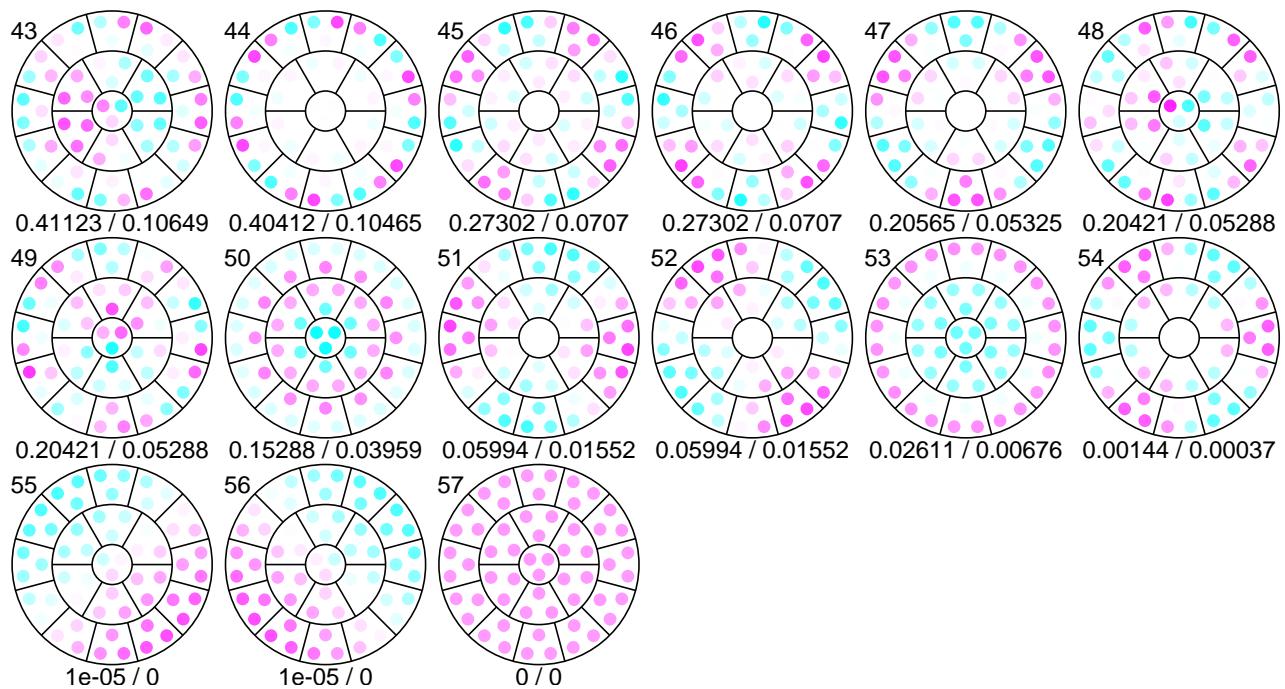


図 152: 試行 b11 — 特異ベクトル分布

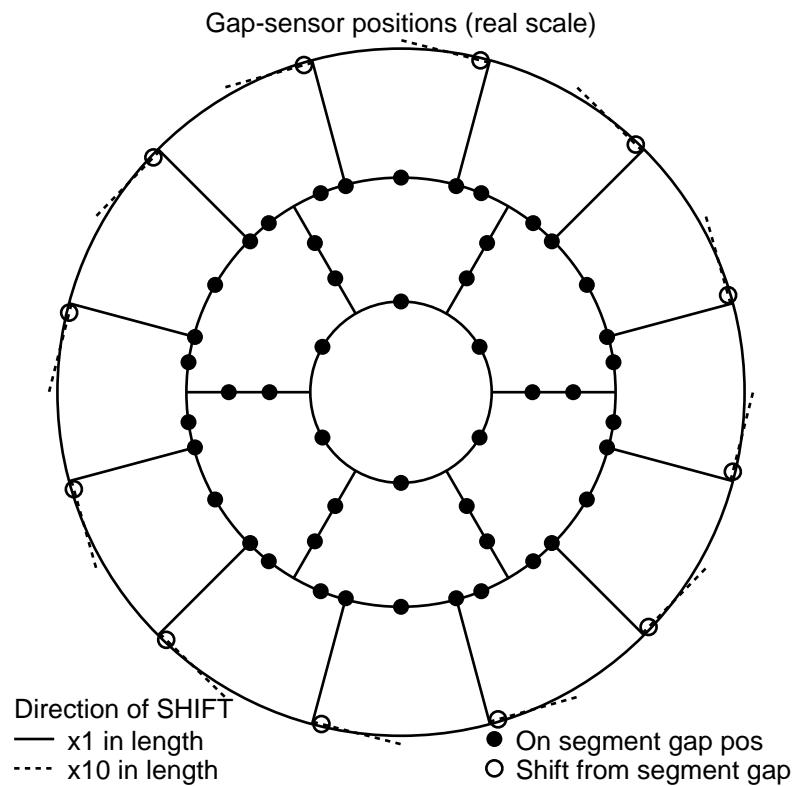


図 153: 試行 b12 — ギャップセンサー配置

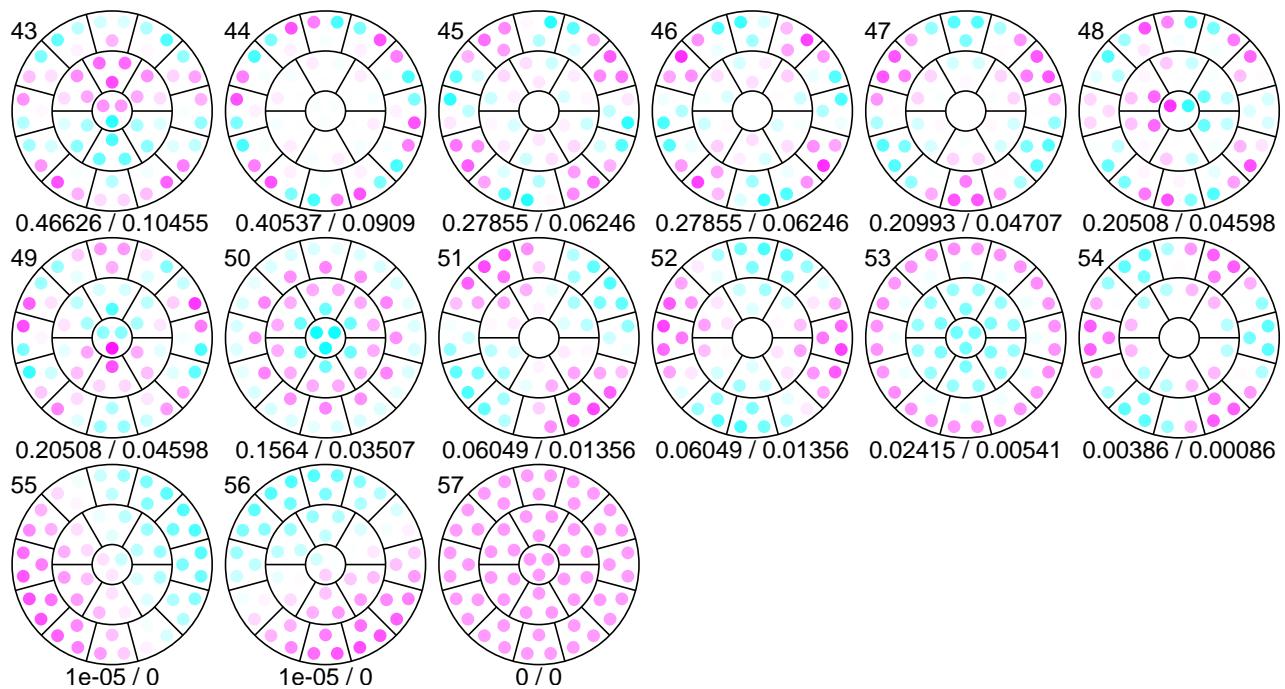


図 154: 試行 b12 — 特異ベクトル分布

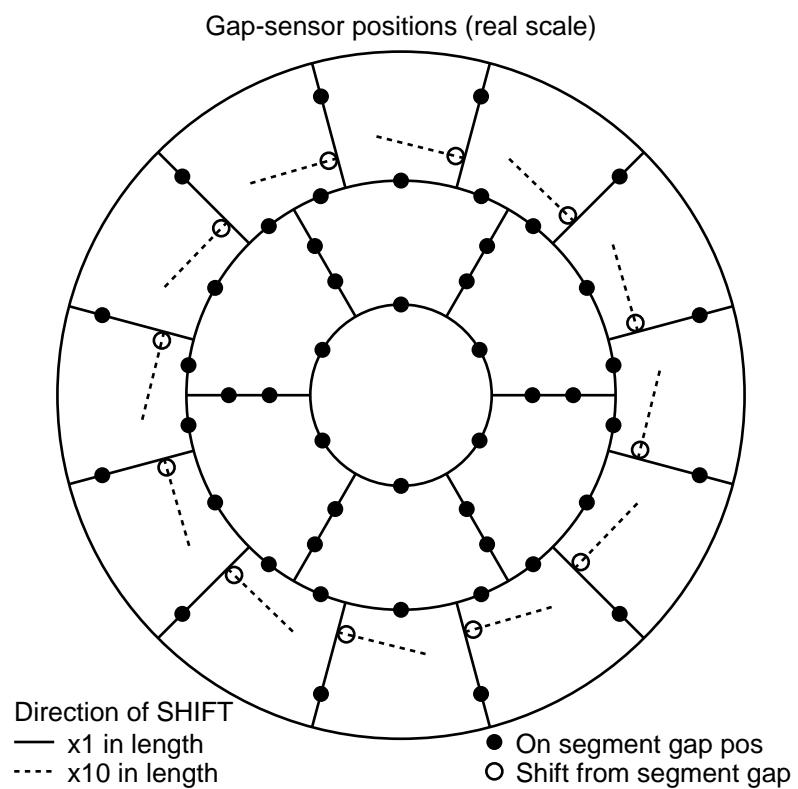


図 155: 試行 b13 — ギャップセンサー配置

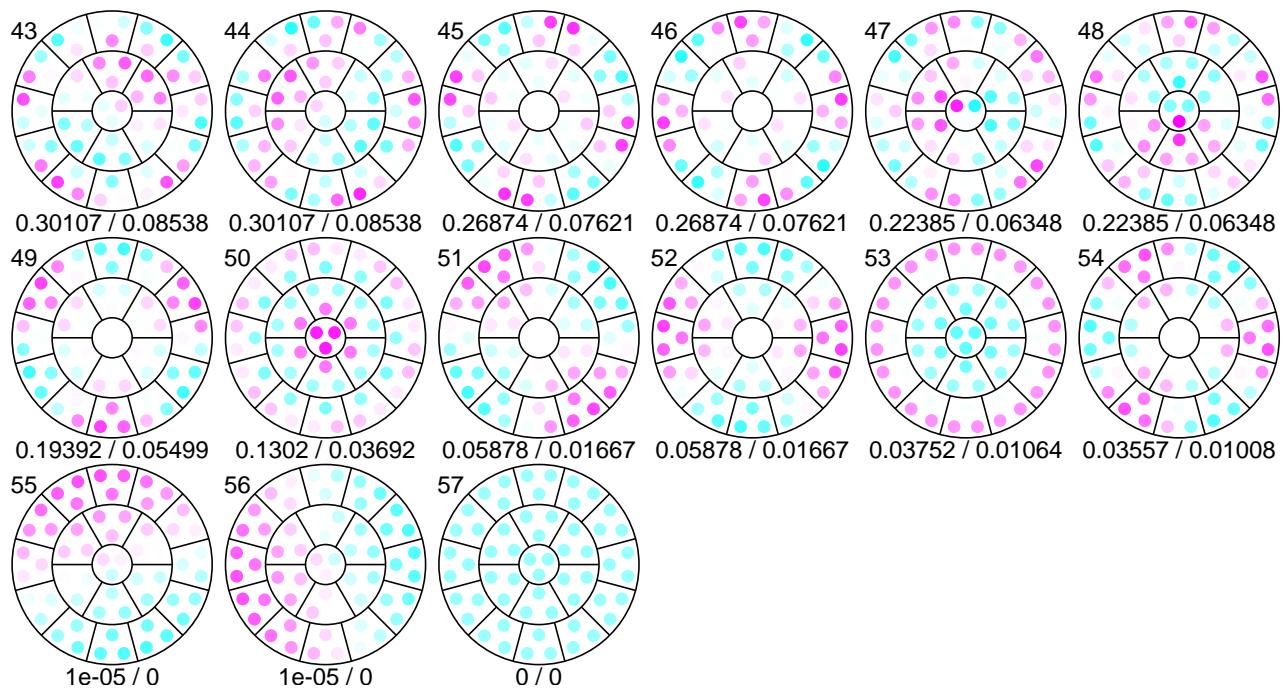


図 156: 試行 b13 — 特異ベクトル分布

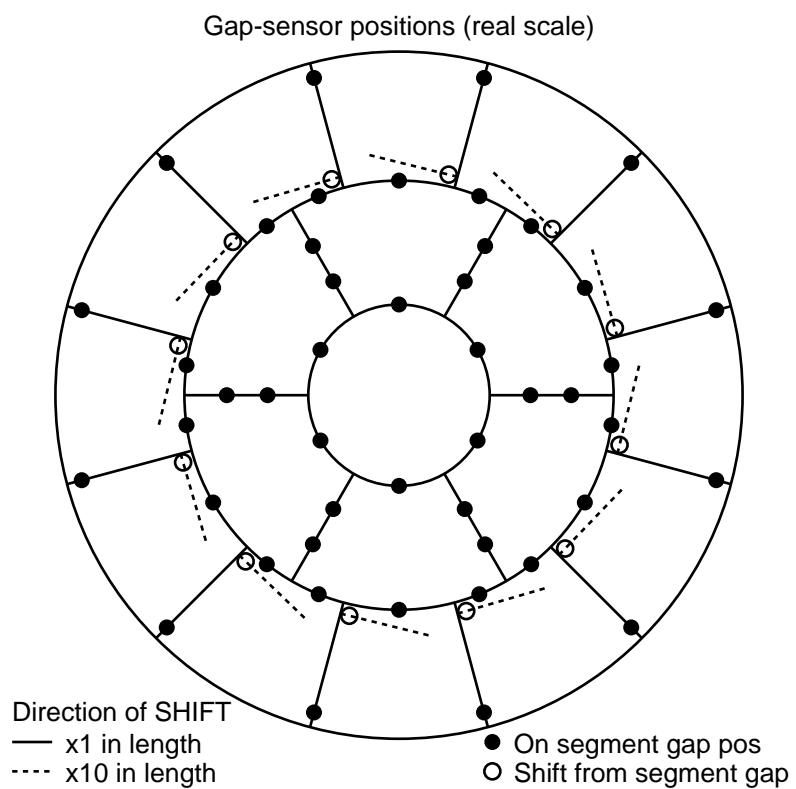


図 157: 試行 b14 — ギャップセンサー配置

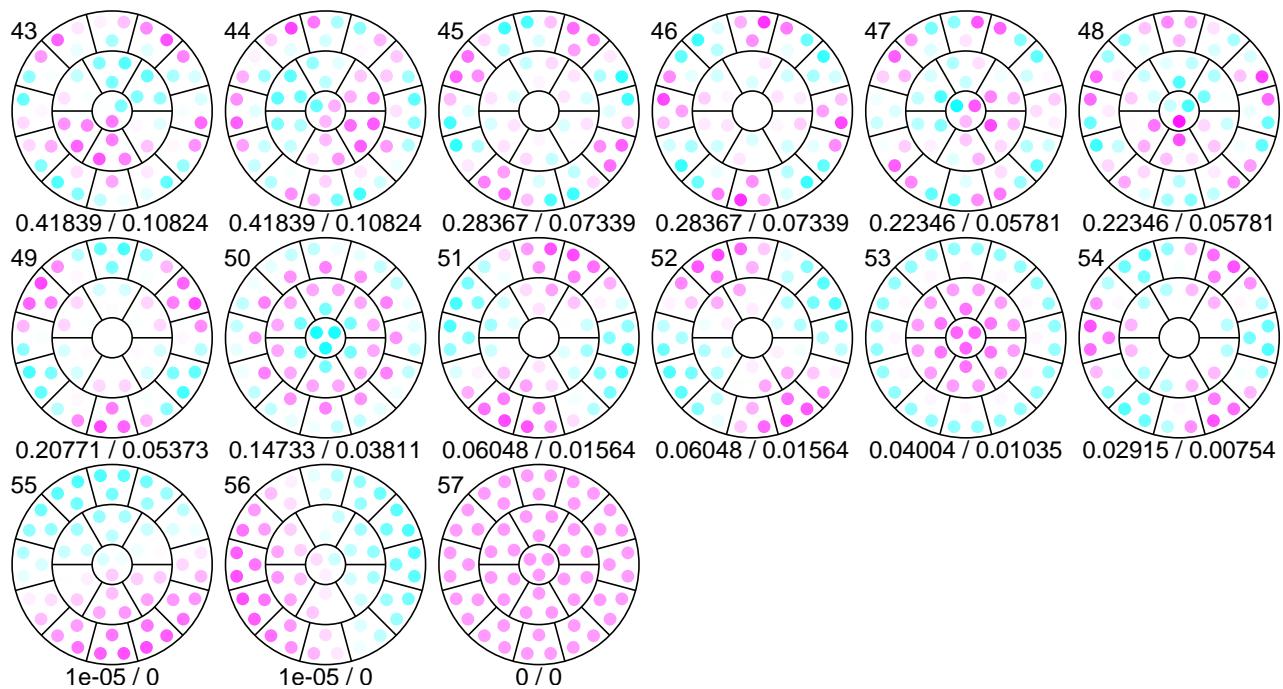


図 158: 試行 b14 — 特異ベクトル分布

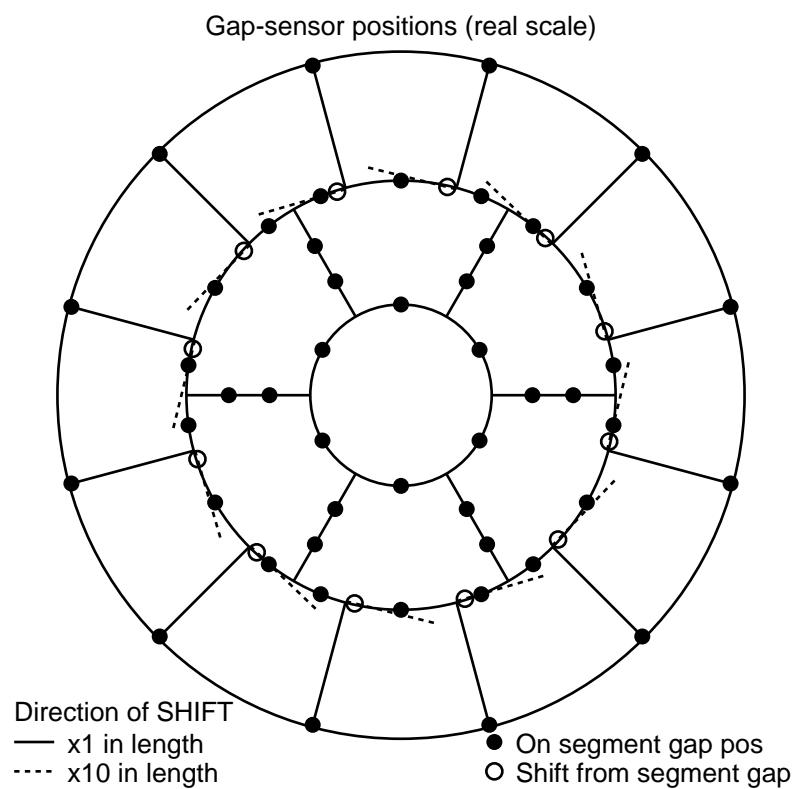


図 159: 試行 b15 — ギャップセンサー配置

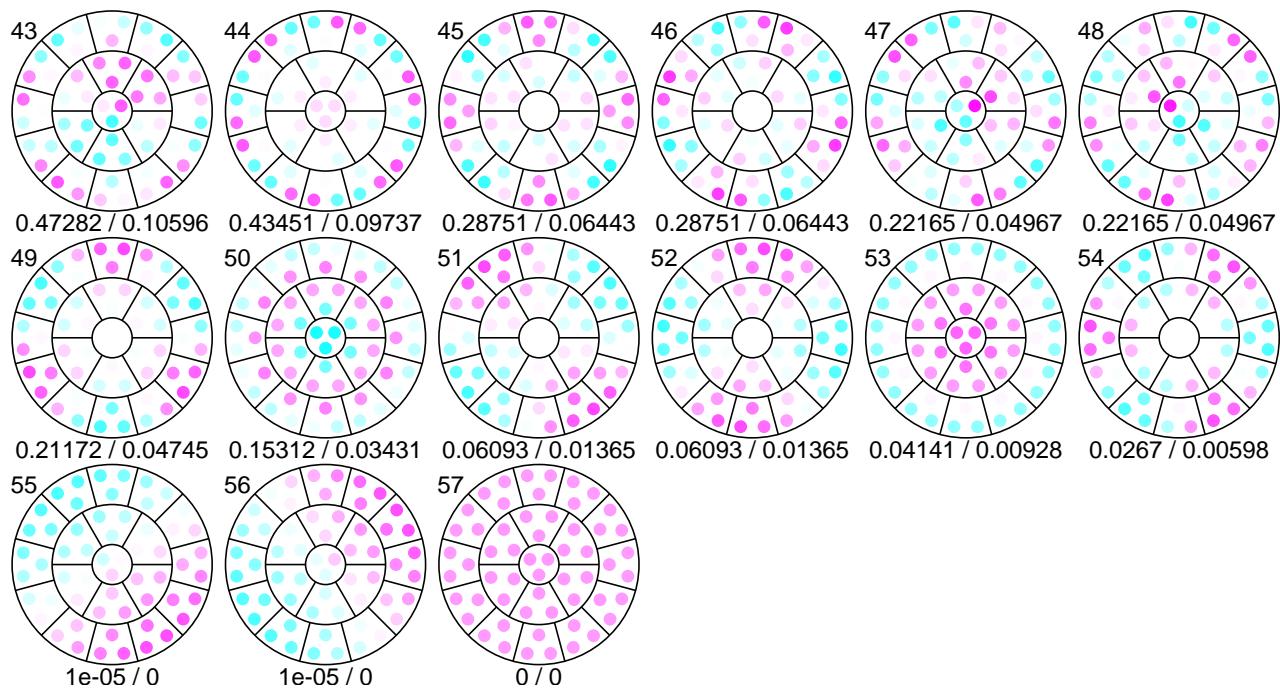


図 160: 試行 b15 — 特異ベクトル分布

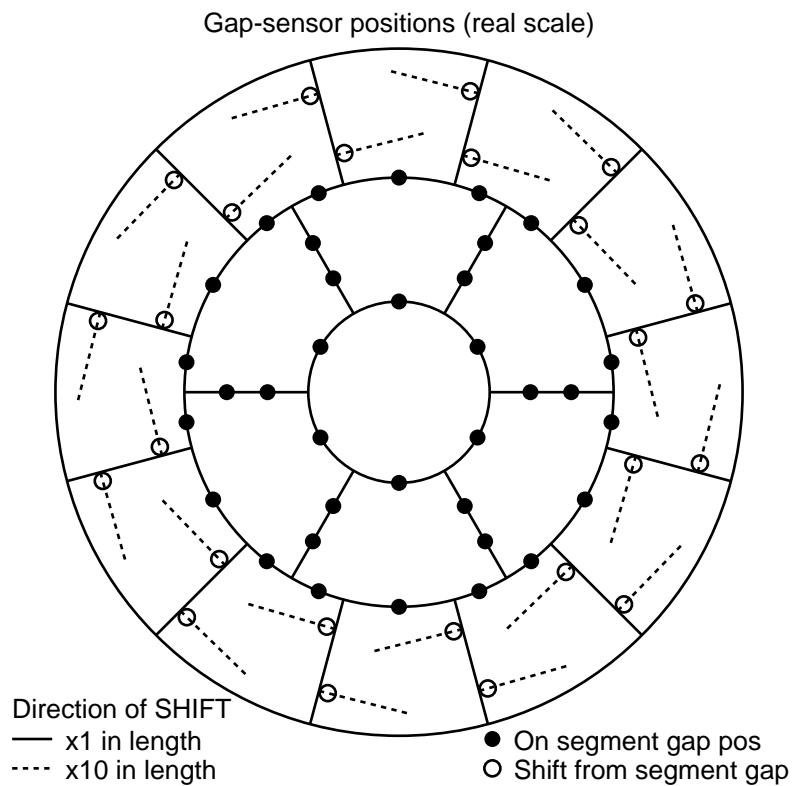


図 161: 試行 b16 — ギャップセンサー配置

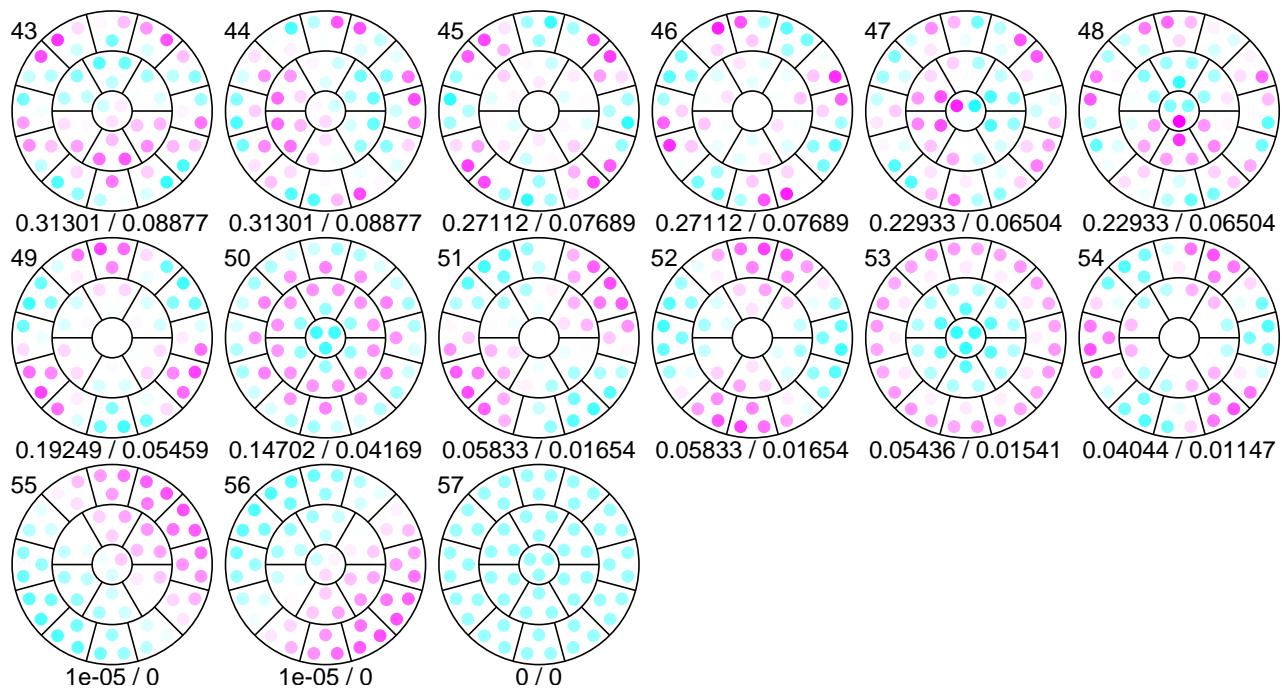


図 162: 試行 b16 — 特異ベクトル分布

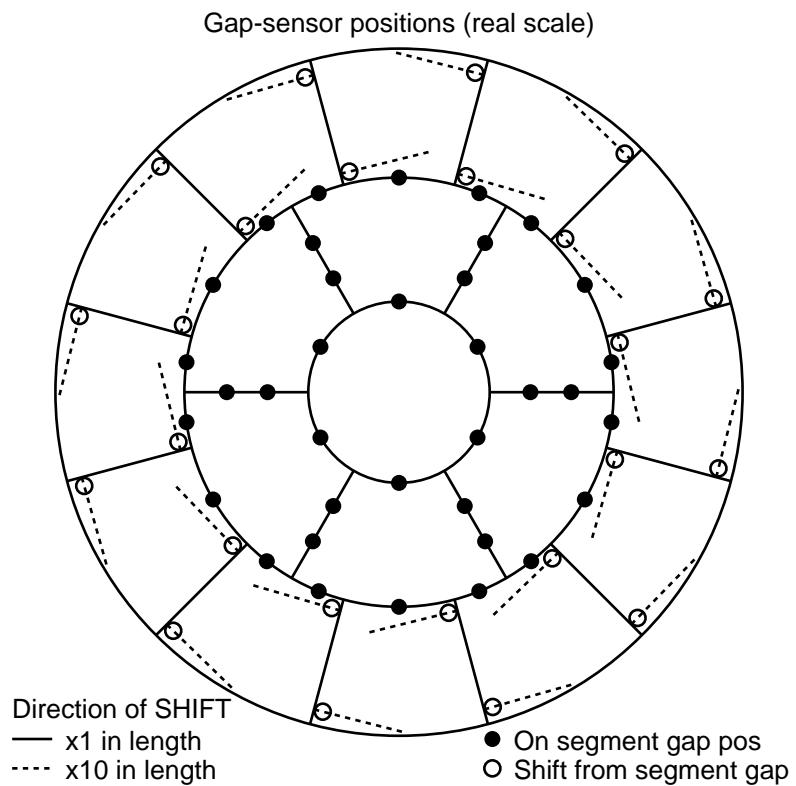


図 163: 試行 b17 — ギャップセンサー配置

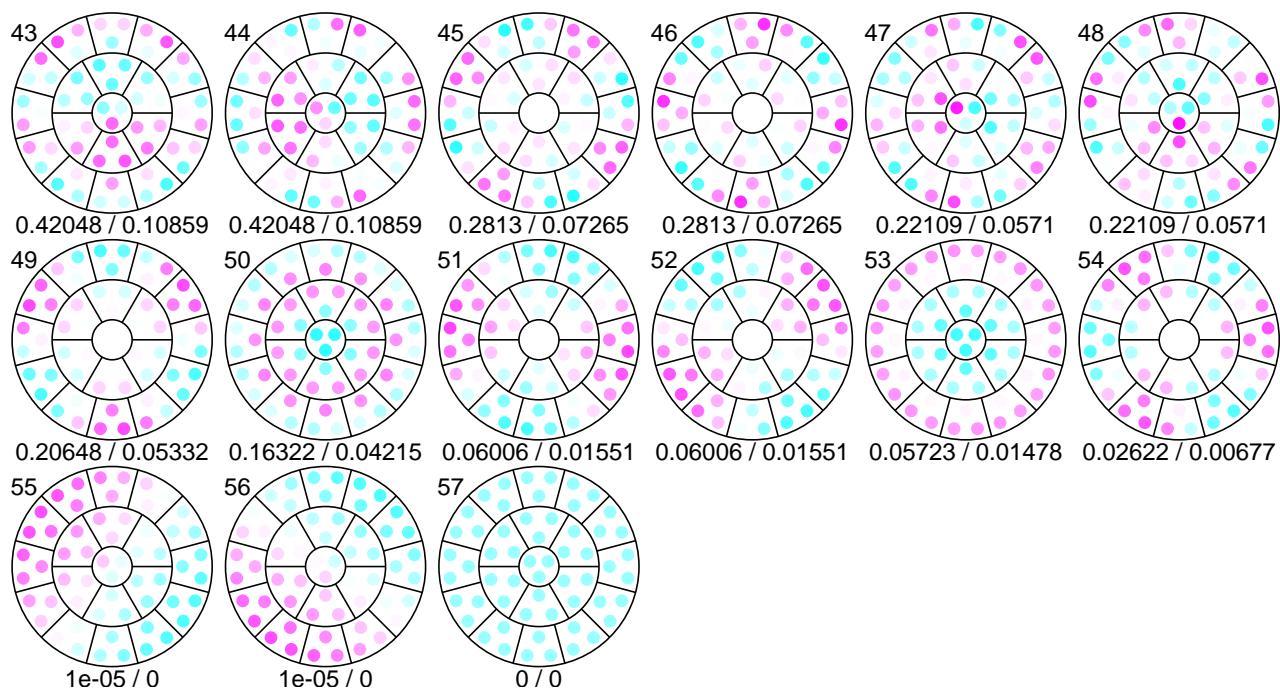


図 164: 試行 b17 — 特異ベクトル分布

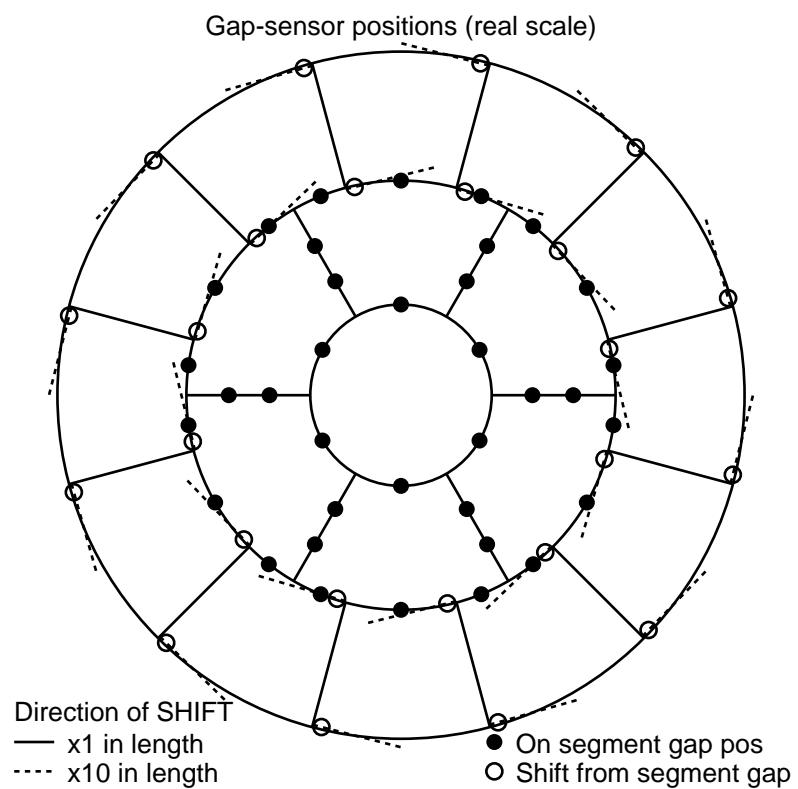


図 165: 試行 b18 — ギャップセンサー配置

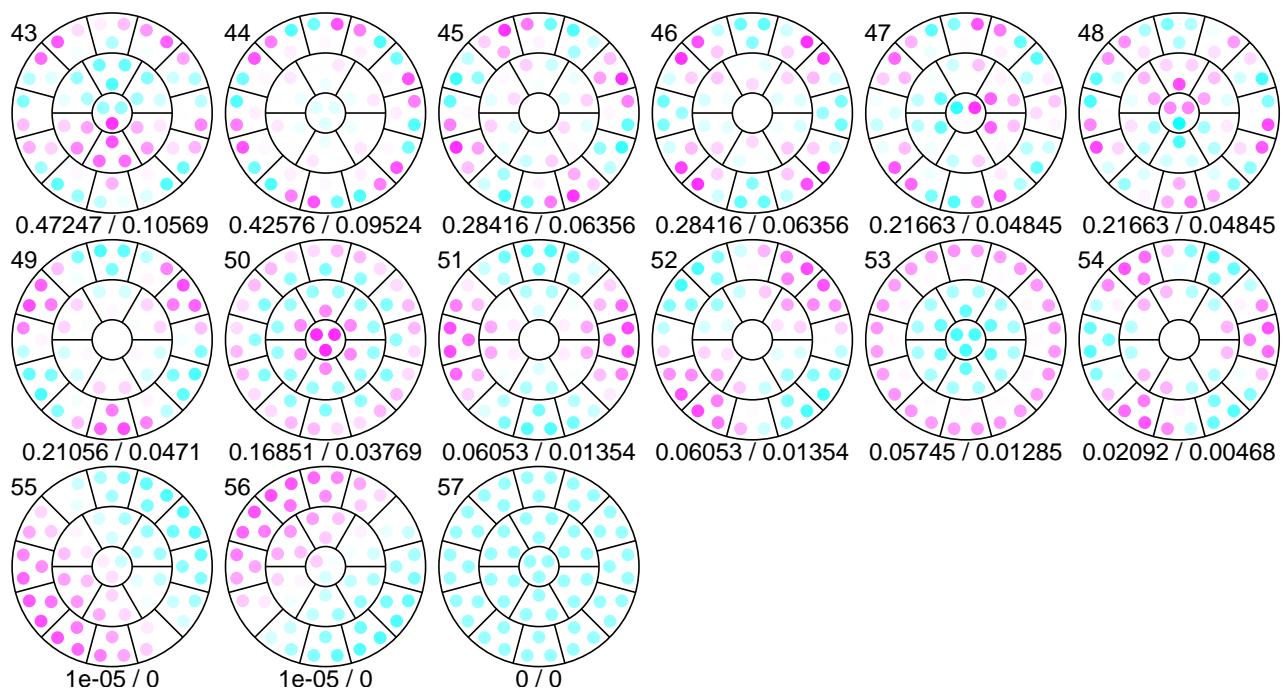


図 166: 試行 b18 — 特異ベクトル分布

#### 4.4.3 内周間・外周間ギャップセンサー配置による影響

ここで、内周間・外周間の双方を同じような配置にしたパターンも検証しておく。内周間・外周間ギャップセンサー配置と ID は以下のような対応になる。

- b19 ( 1/4 0, 3/4 +50) page [116](#)
- b20 ( 1/10 0, 9/10 +50) page [117](#)
- b21 ( 0 0, 1 +50) page [118](#)
- b22 ( 1/4 +50, 3/4 0) page [119](#)
- b23 (1/10 +50, 9/10 0) page [120](#)
- b24 ( 0 +50, 1 0) page [121](#)
- b25 ( 1/4 -50, 3/4 +50) page [122](#)
- b26 (1/10 -50, 9/10 +50) page [123](#)
- b27 ( 0 -50, 1 +50) page [124](#)

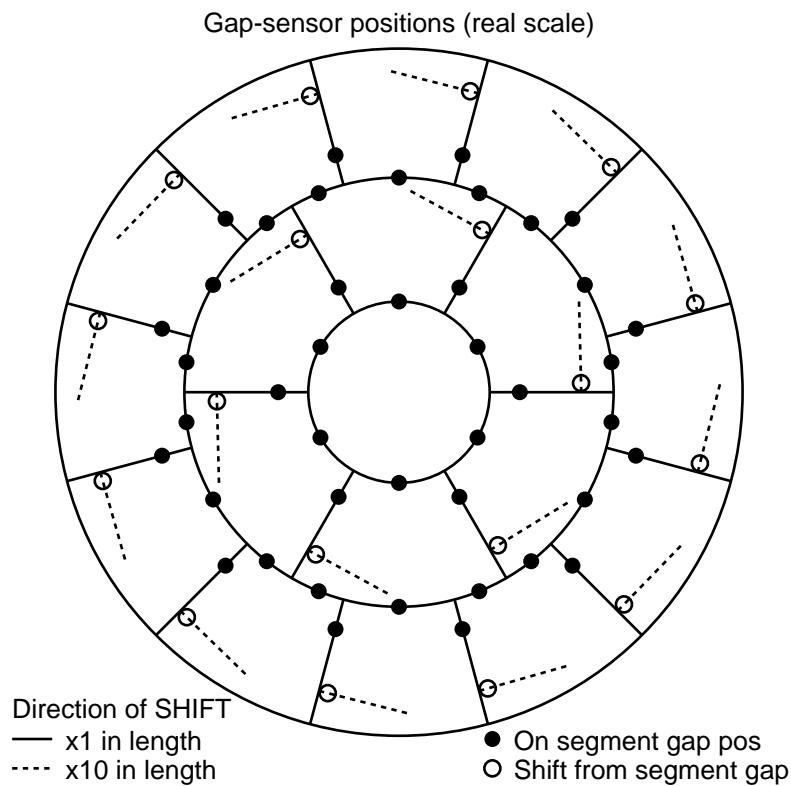


図 167: 試行 b19 — ギャップセンサー配置

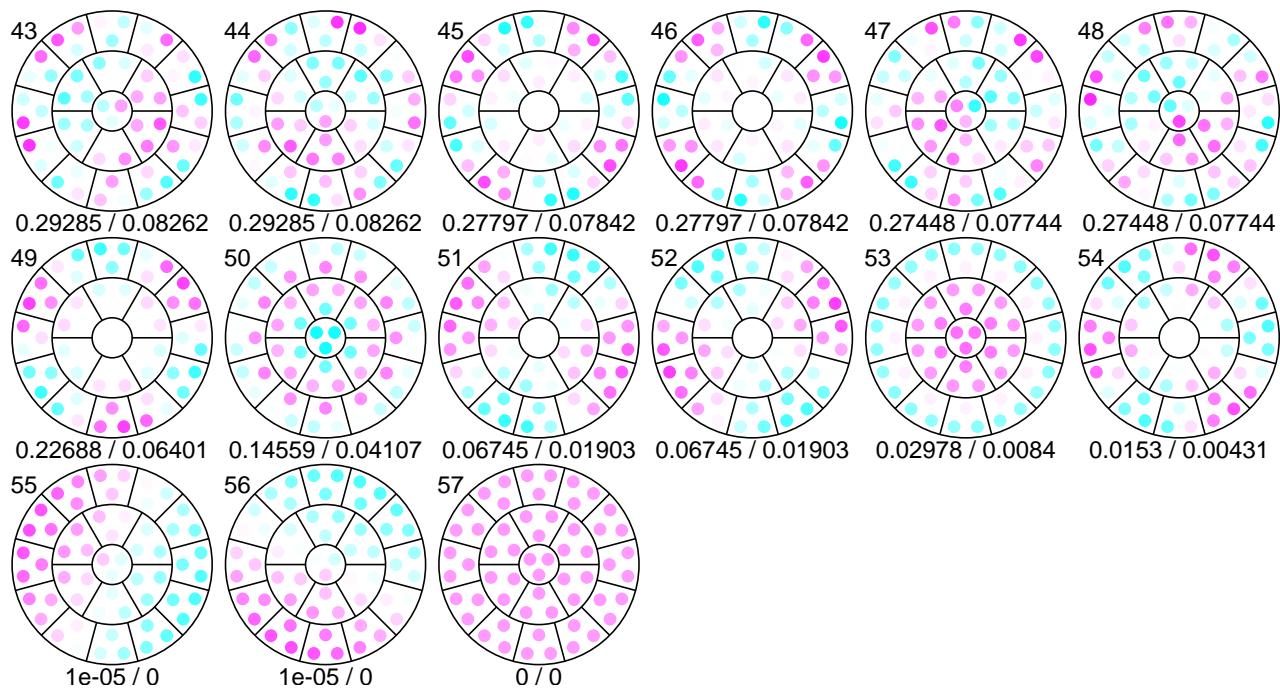


図 168: 試行 b19 — 特異ベクトル分布

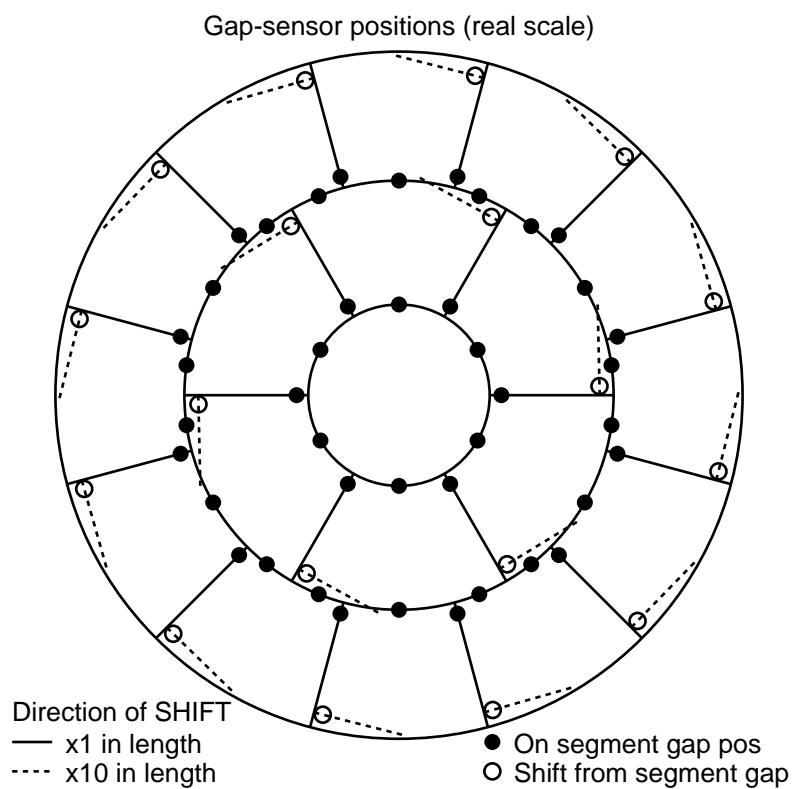


図 169: 試行 b20 — ギャップセンサー配置

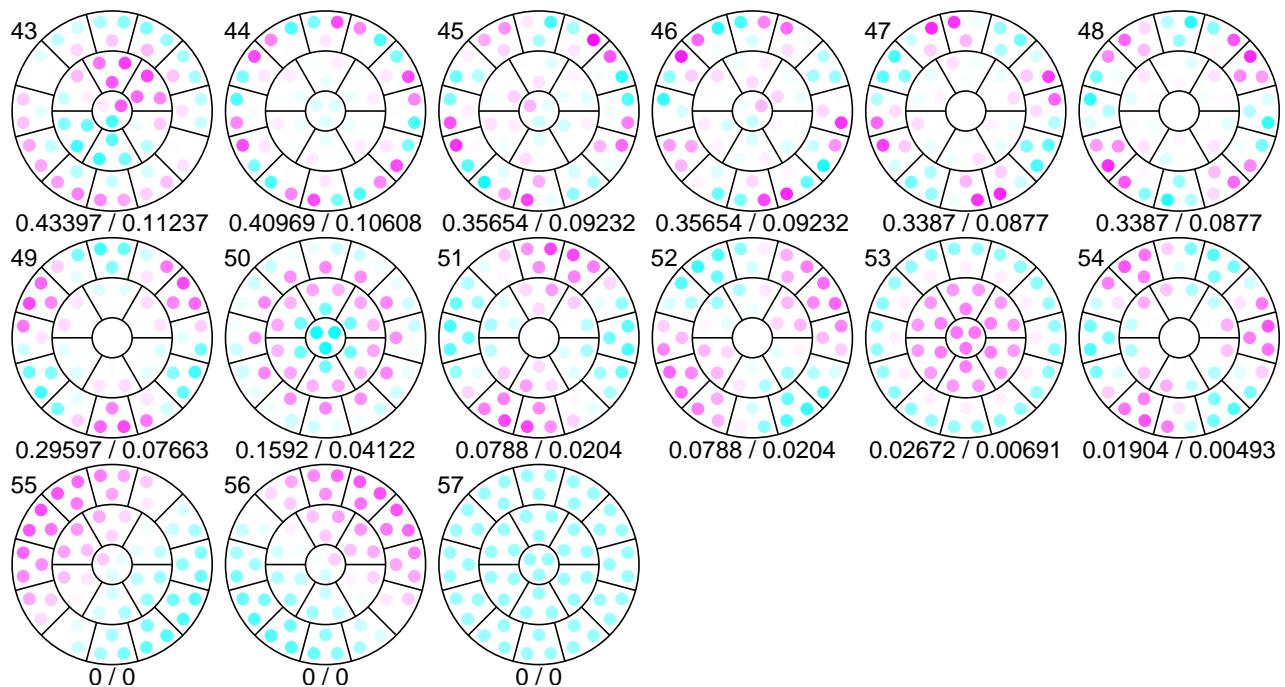


図 170: 試行 b20 — 特異ベクトル分布

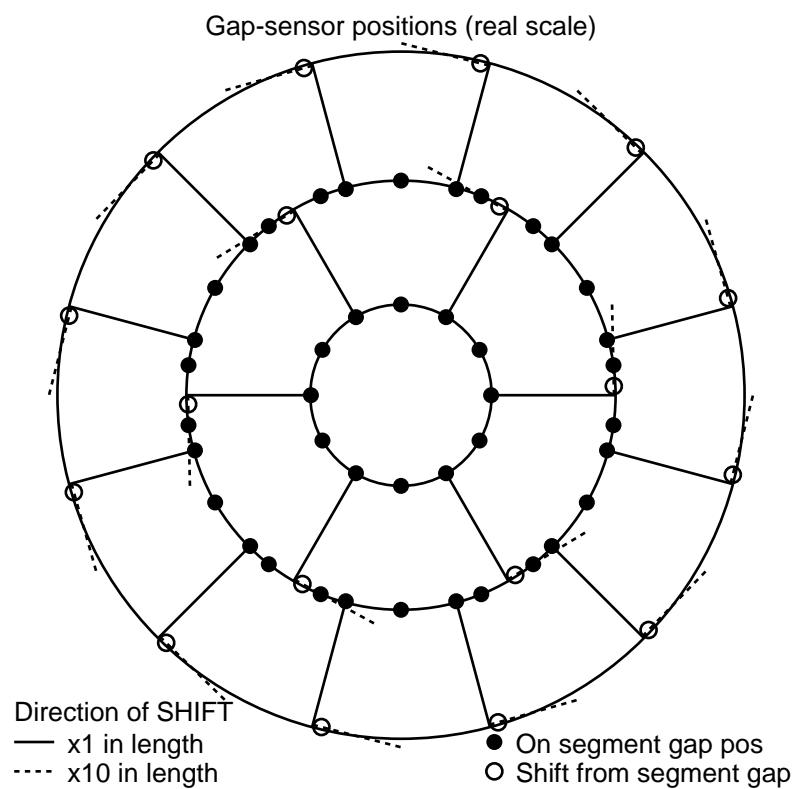


図 171: 試行 b21 — ギャップセンサー配置

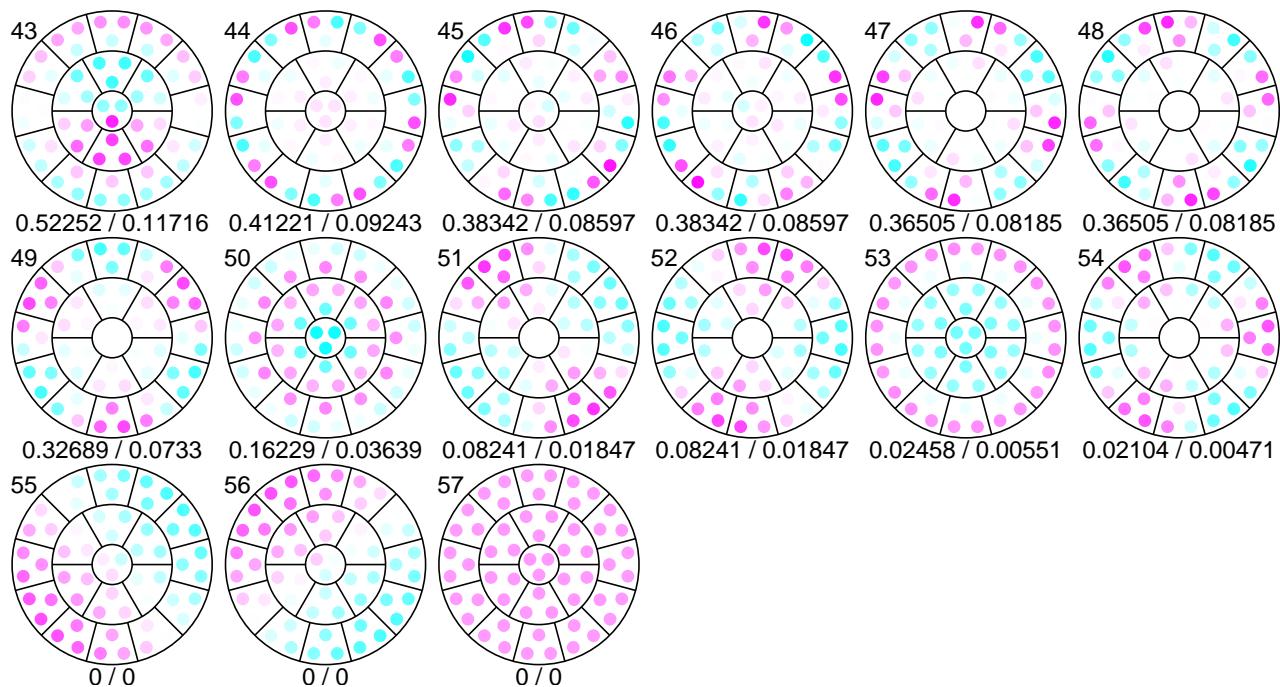


図 172: 試行 b21 — 特異ベクトル分布

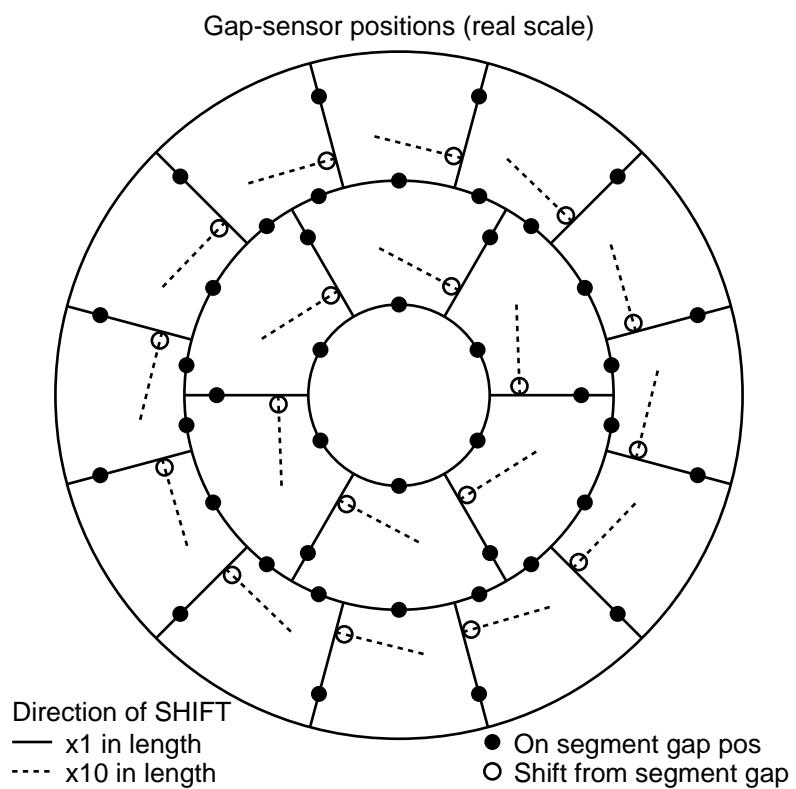


図 173: 試行 b22 — ギャップセンサー配置

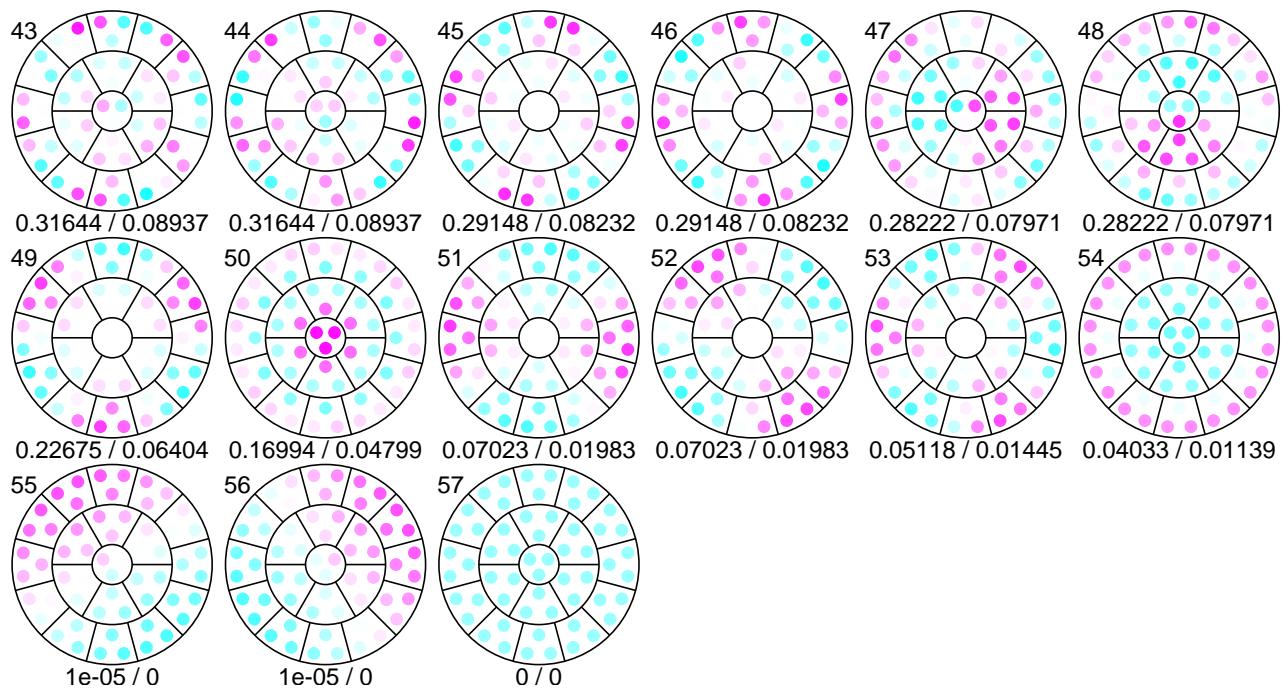


図 174: 試行 b22 — 特異ベクトル分布

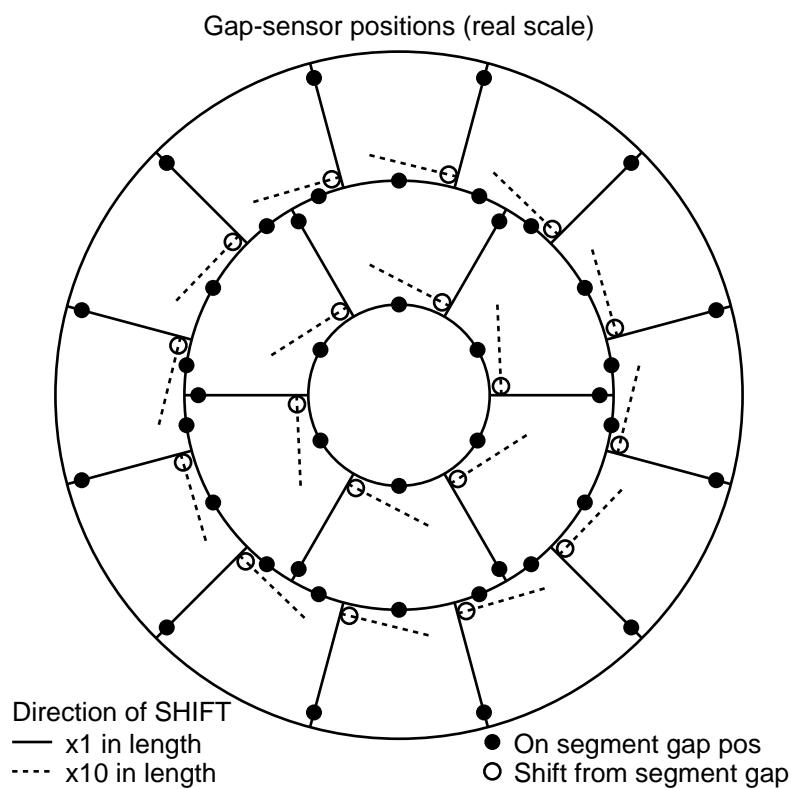


図 175: 試行 b23 — ギャップセンサー配置

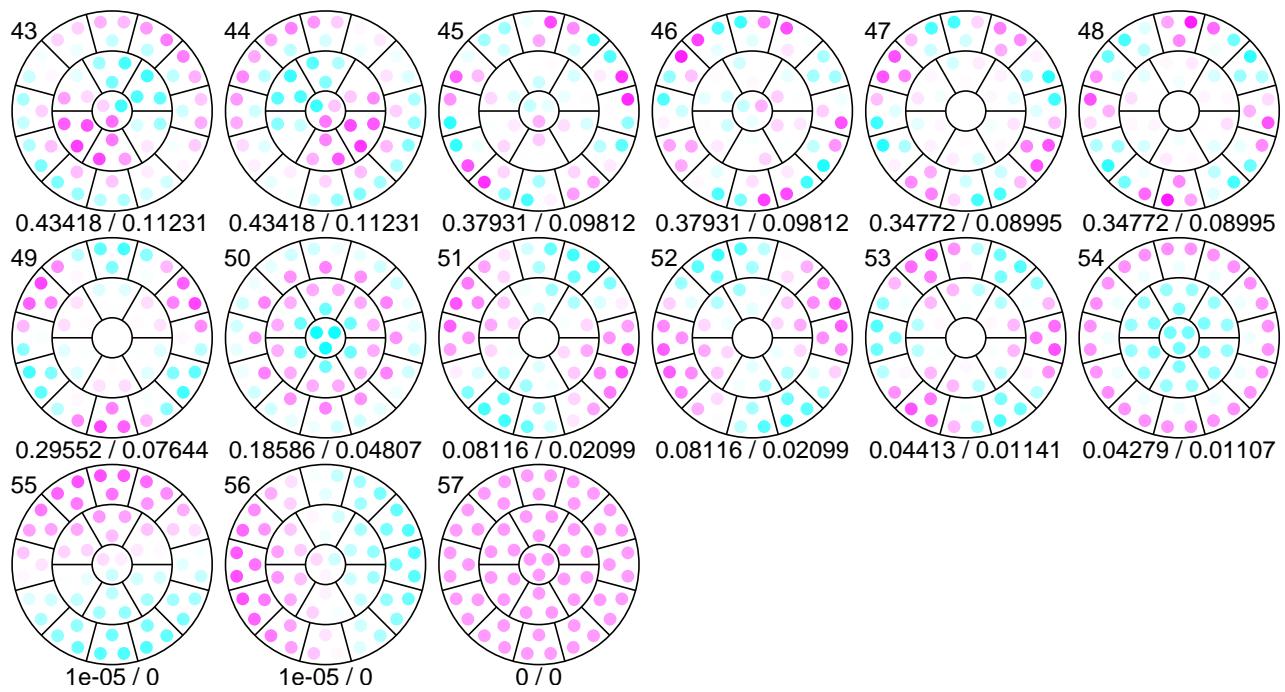


図 176: 試行 b23 — 特異ベクトル分布

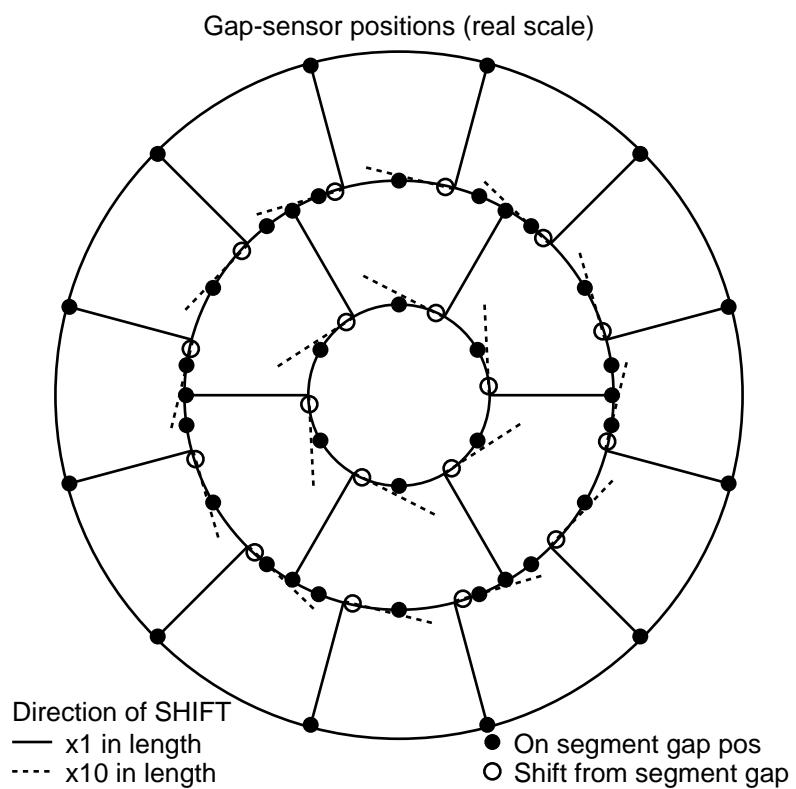


図 177: 試行 b24 — ギャップセンサー配置

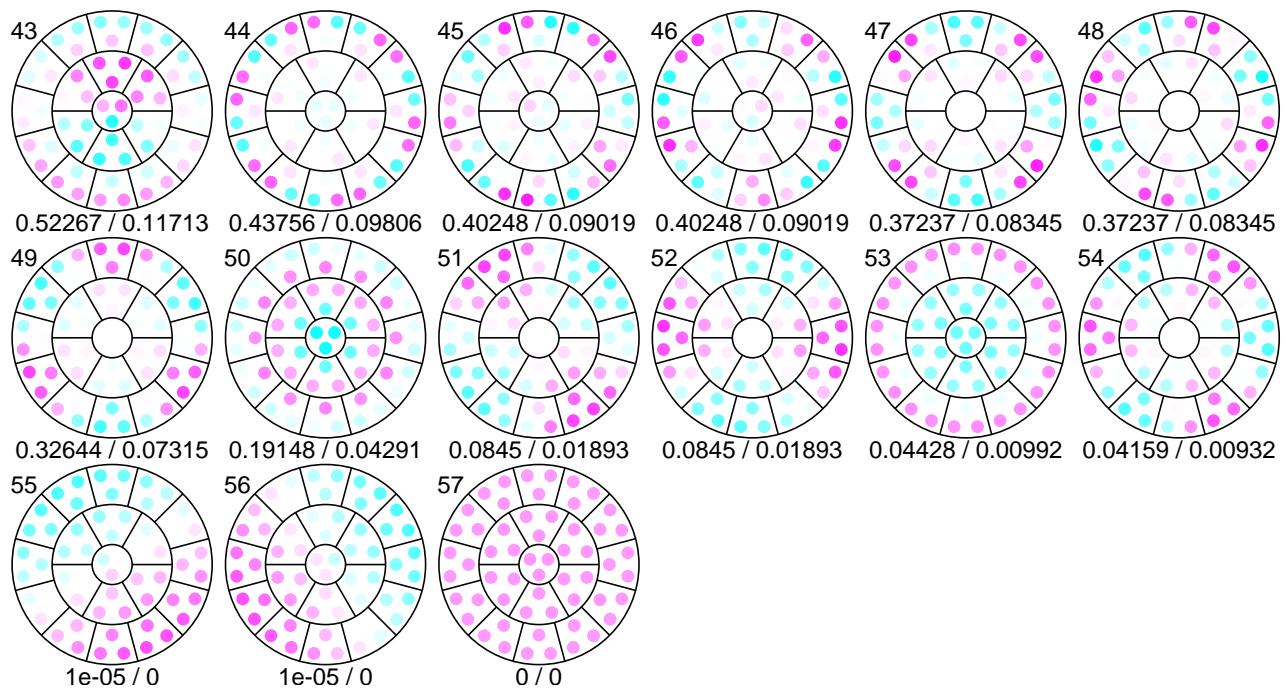


図 178: 試行 b24 — 特異ベクトル分布

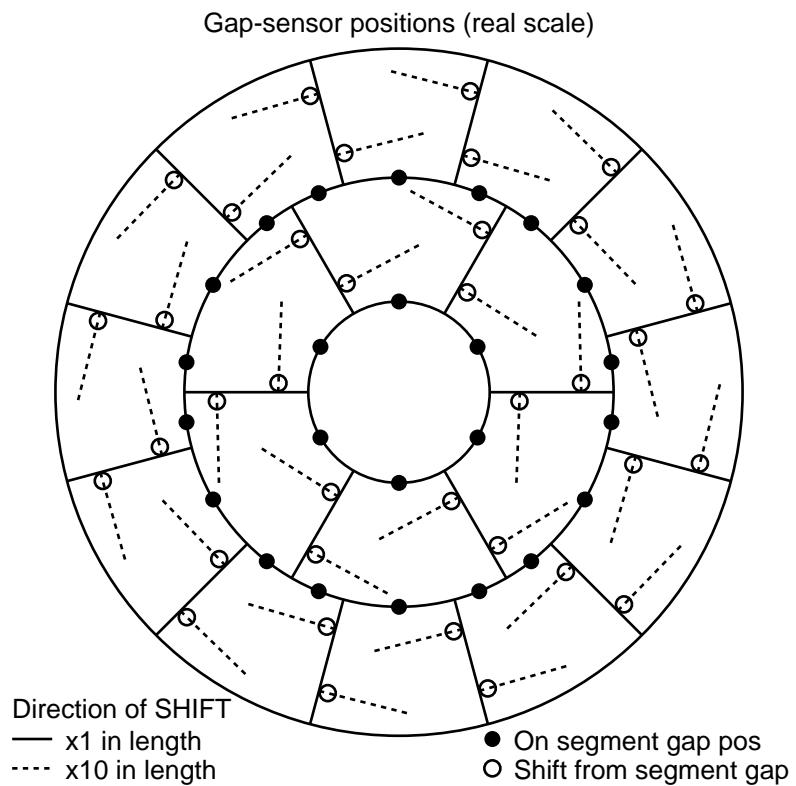


図 179: 試行 b25 — ギャップセンサー配置

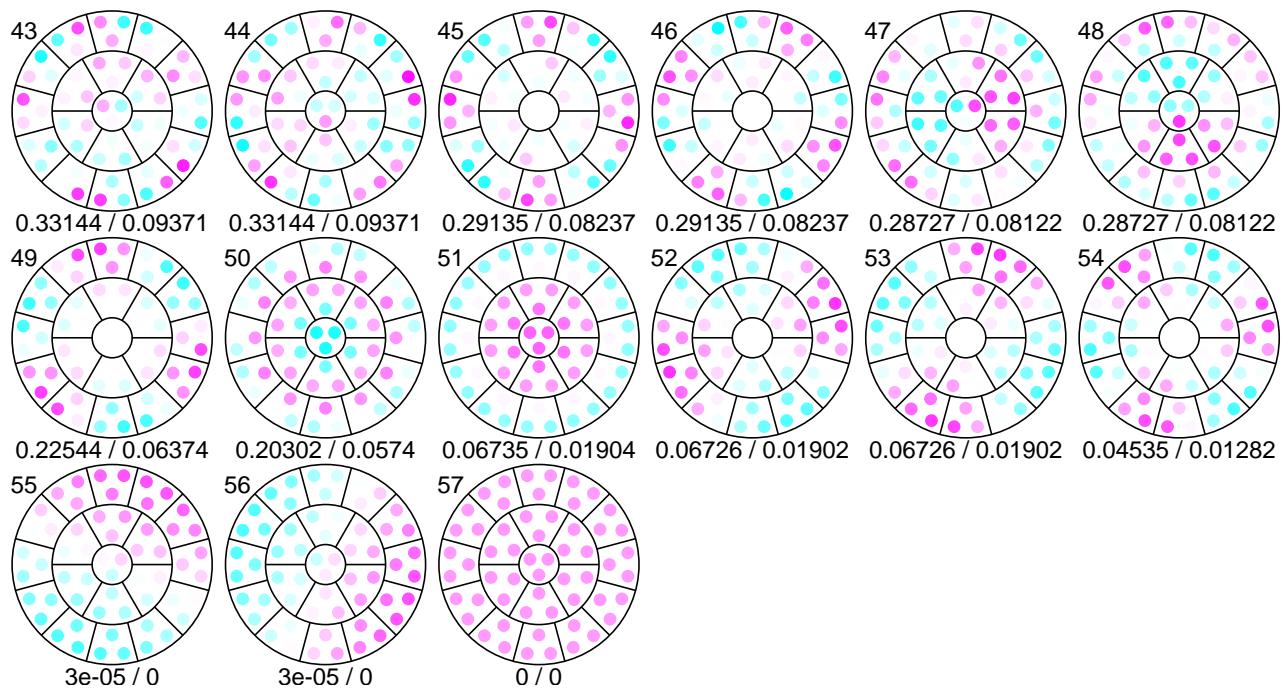


図 180: 試行 b25 — 特異ベクトル分布

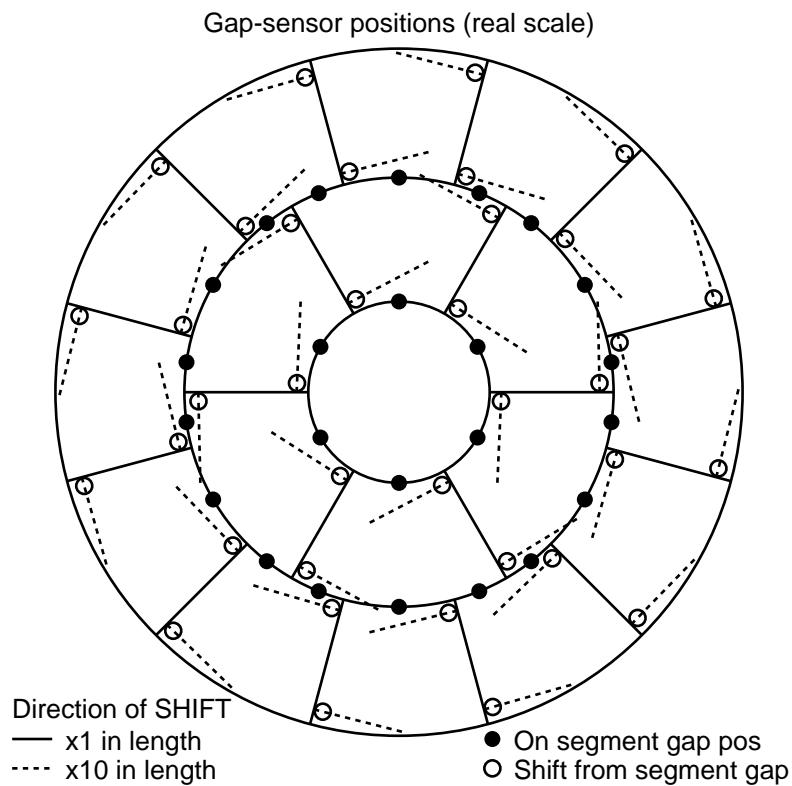


図 181: 試行 b26 — ギャップセンサー配置

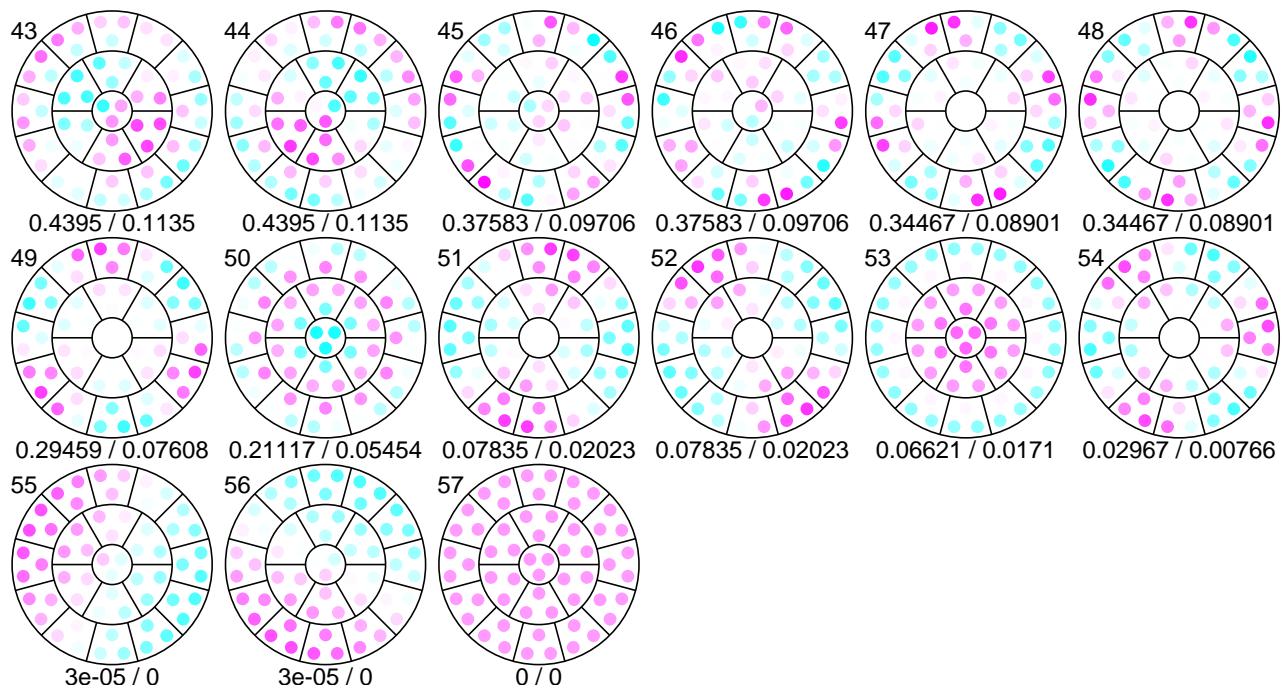


図 182: 試行 b26 — 特異ベクトル分布

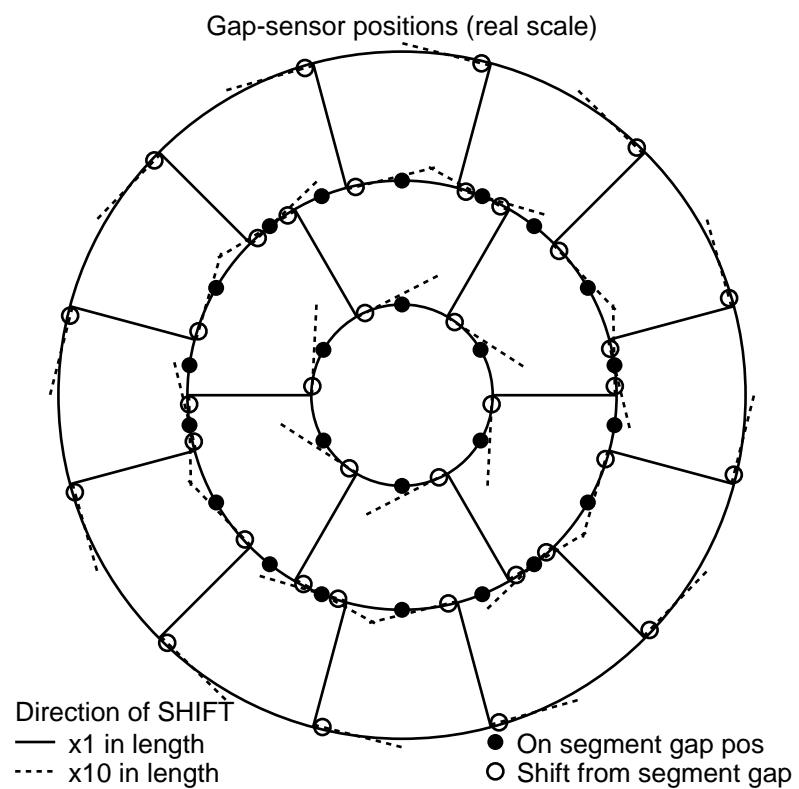


図 183: 試行 b27 — ギャップセンサー配置

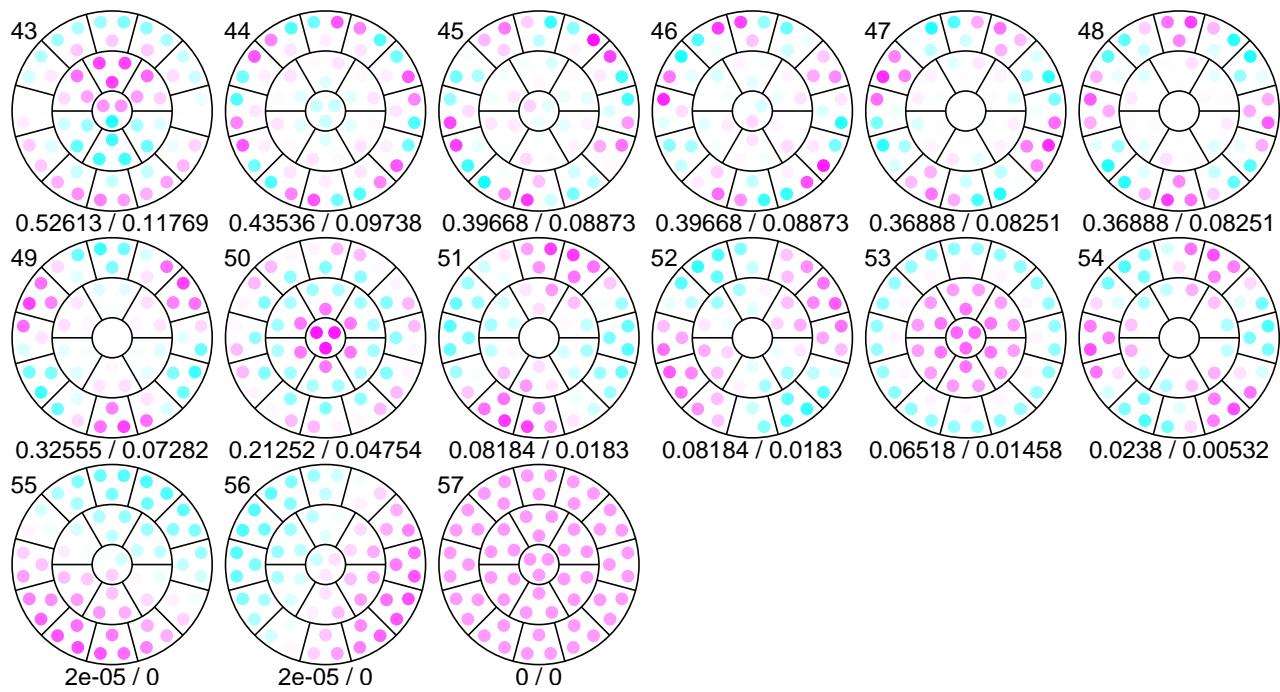


図 184: 試行 b27 — 特異ベクトル分布

#### 4.4.4 内外間ギャップセンサー配置による影響

内外間ギャップセンサー配置と ID は以下のような対応になる。

b28 (-7/16 +50, 0 -50, 7/16 +50) page [126](#)

b29 (-7/16 0, 0 -50, 7/16 +50) page [127](#)

b30 (-7/16 +50, 2/16 -50, 7/16 +50) page [128](#)

b31 (-7/16 0, 2/16 -50, 7/16 +50) page [129](#)

b32 (-6/16 +50, 2/16 -50, 6/16 +50) page [130](#)

b33 (-6/16 0, 2/16 -50, 6/16 +50) page [131](#)

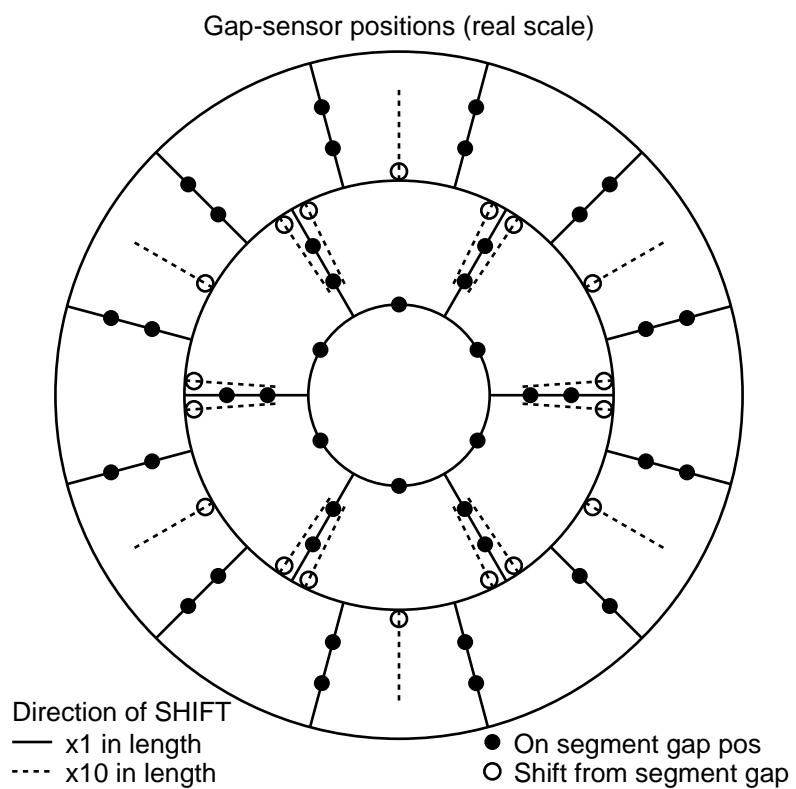


図 185: 試行 b28 — ギャップセンサー配置

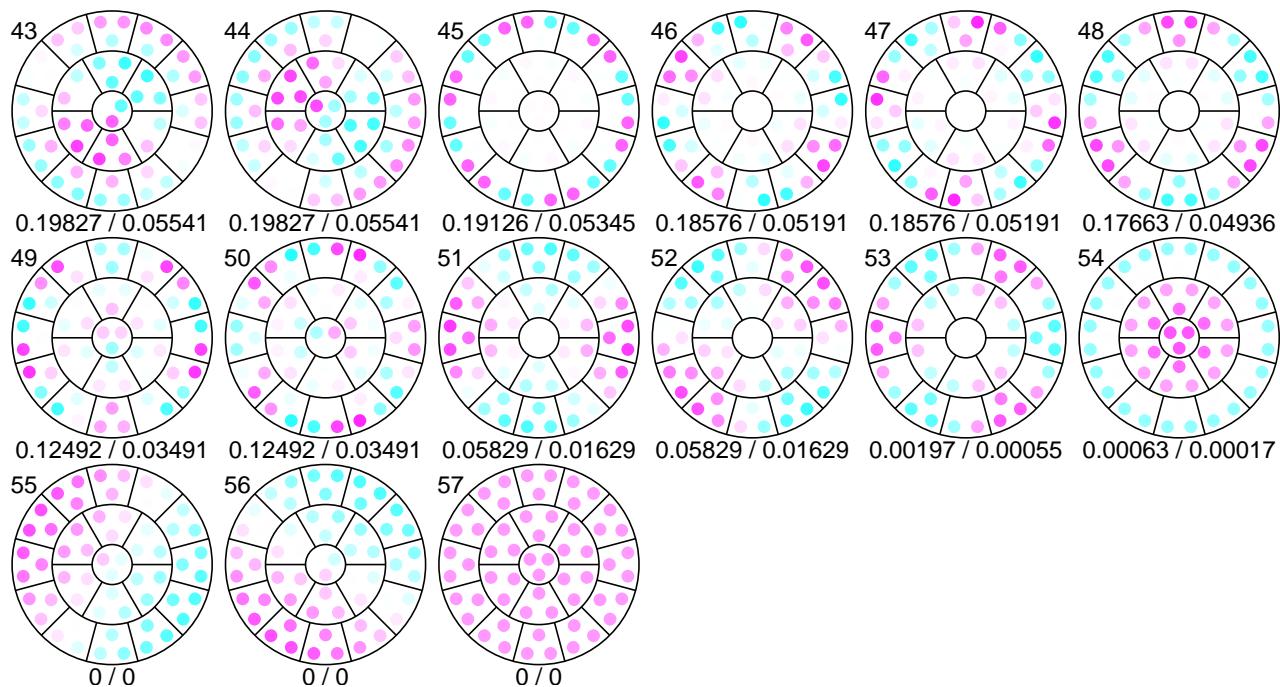


図 186: 試行 b28 — 特異ベクトル分布

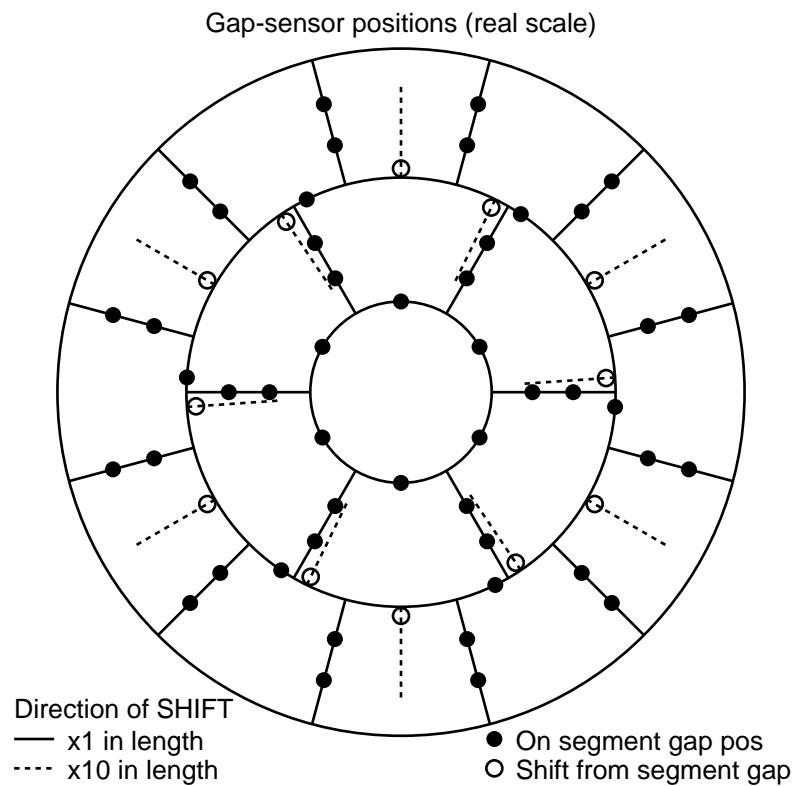


図 187: 試行 b29 — ギャップセンサー配置

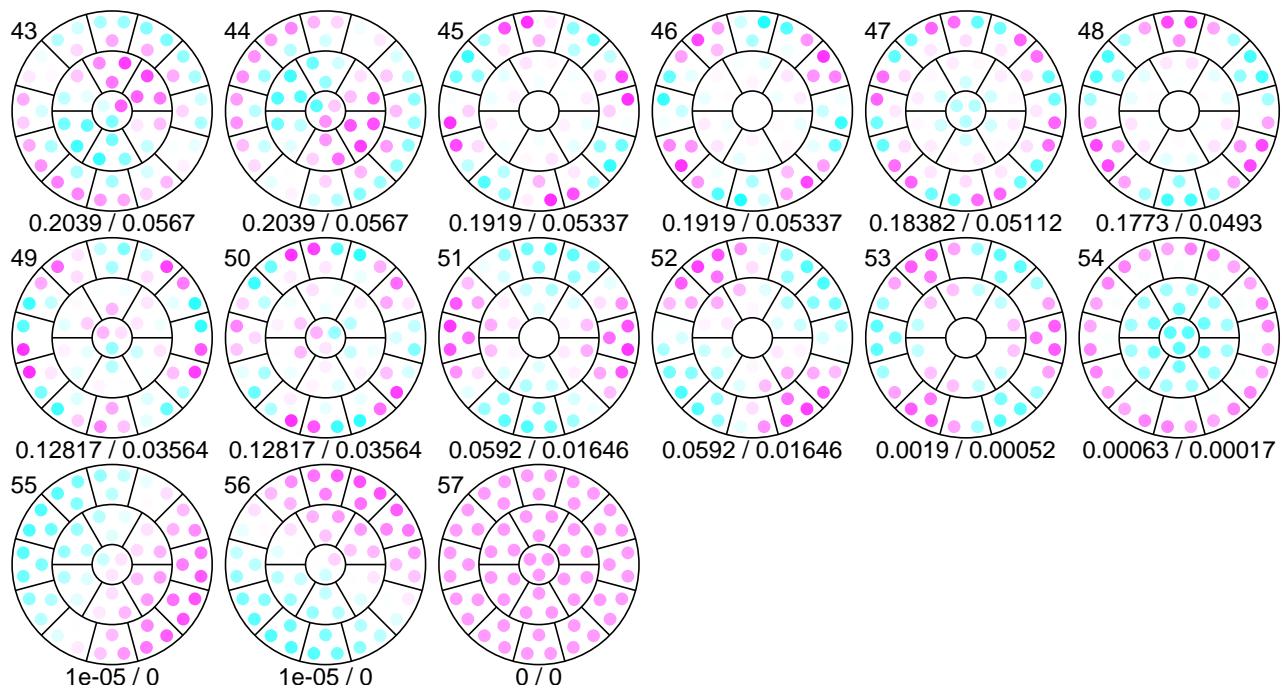


図 188: 試行 b29 — 特異ベクトル分布

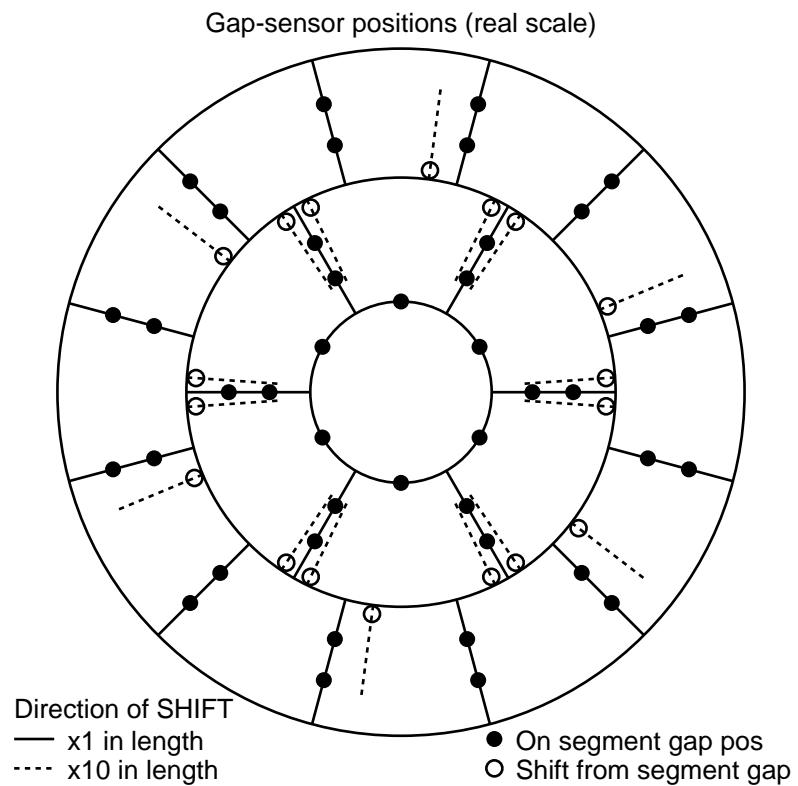


図 189: 試行 b30 — ギャップセンサー配置

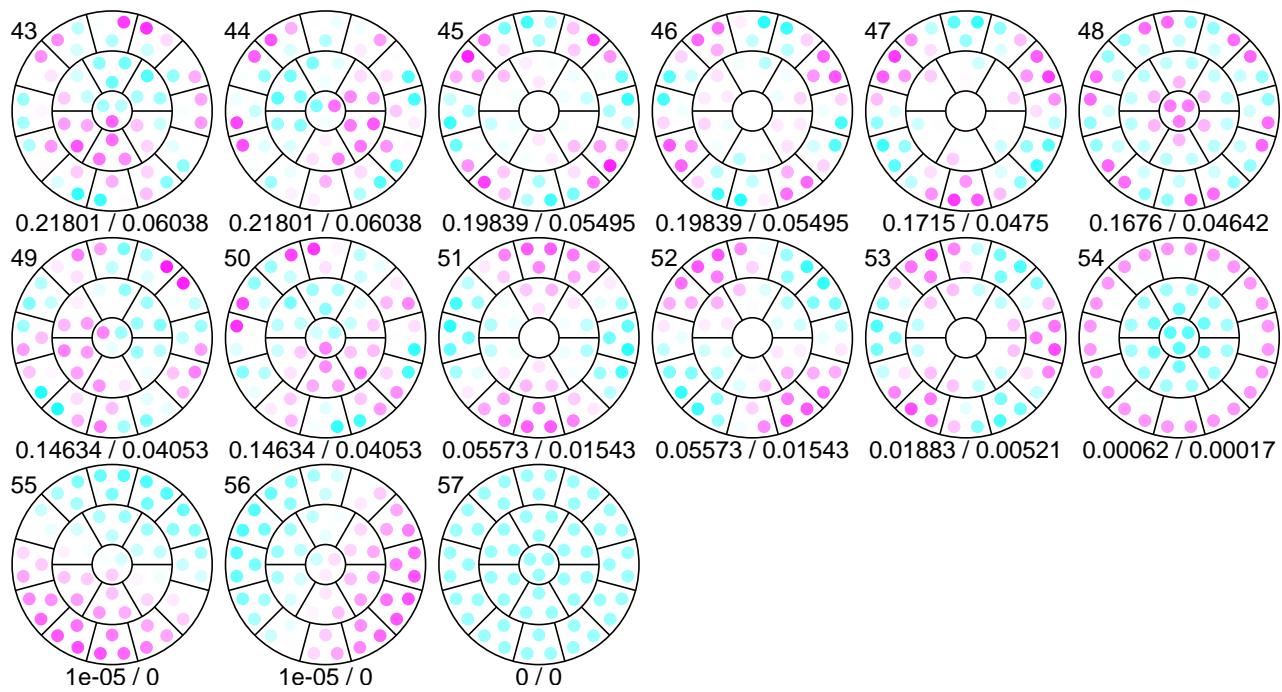


図 190: 試行 b30 — 特異ベクトル分布

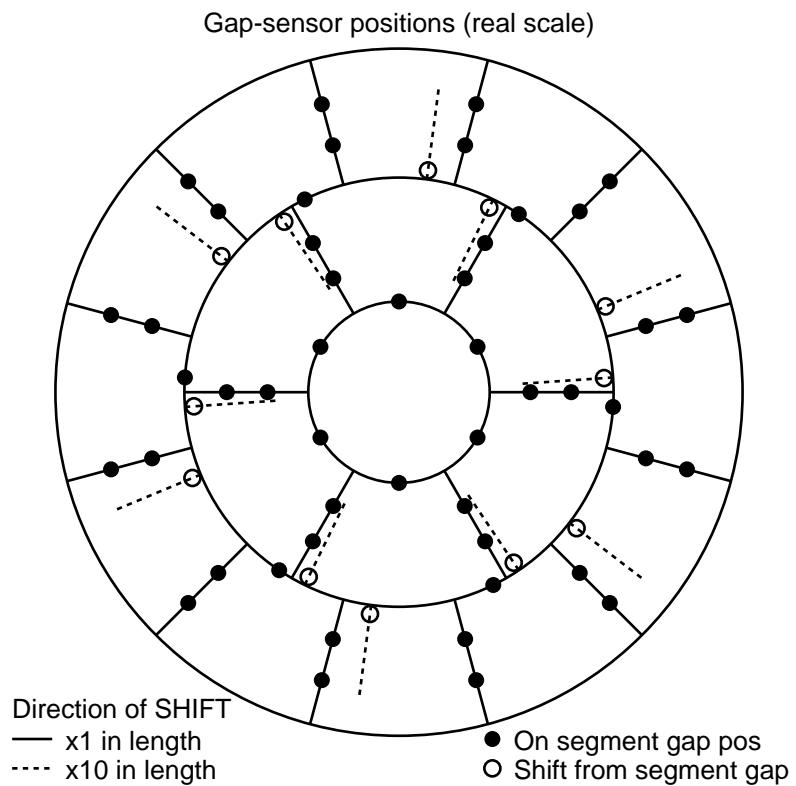


図 191: 試行 b31 — ギャップセンサー配置

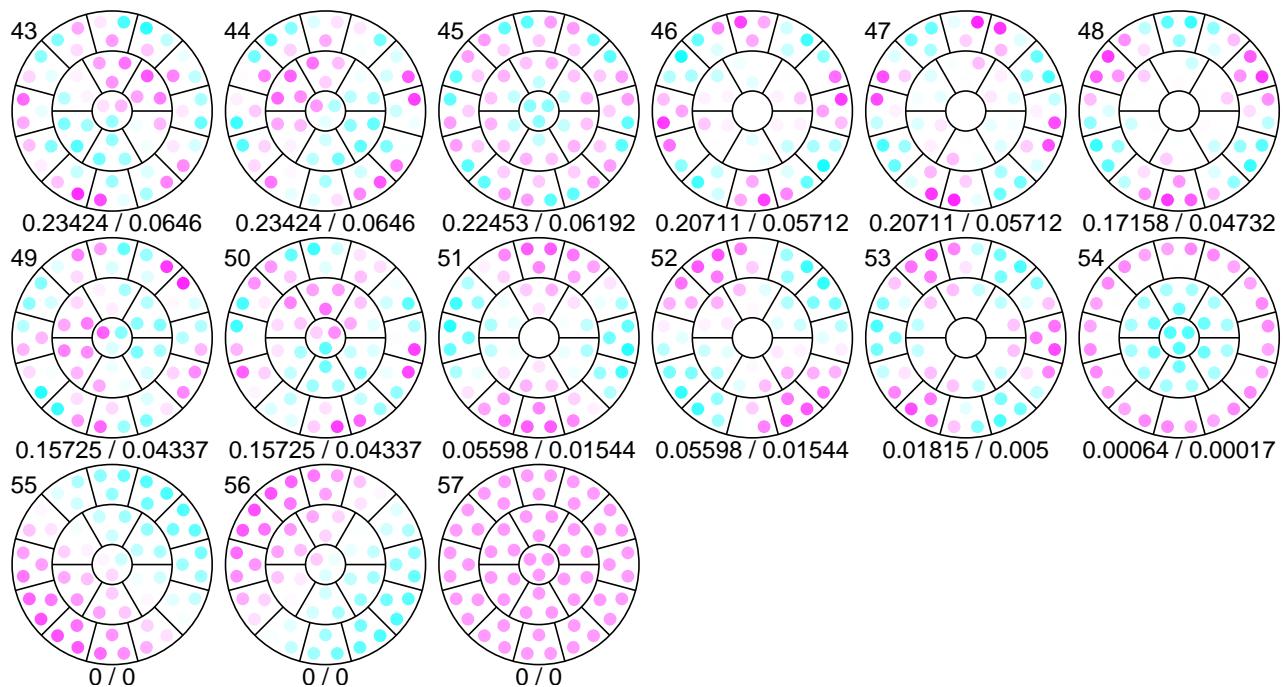


図 192: 試行 b31 — 特異ベクトル分布

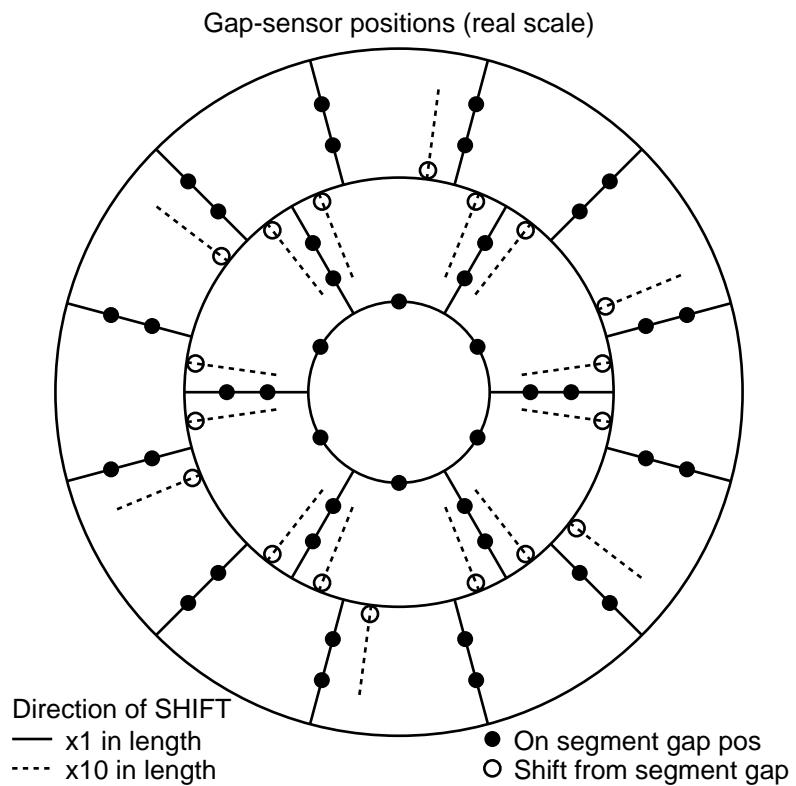


図 193: 試行 b32 — ギャップセンサー配置

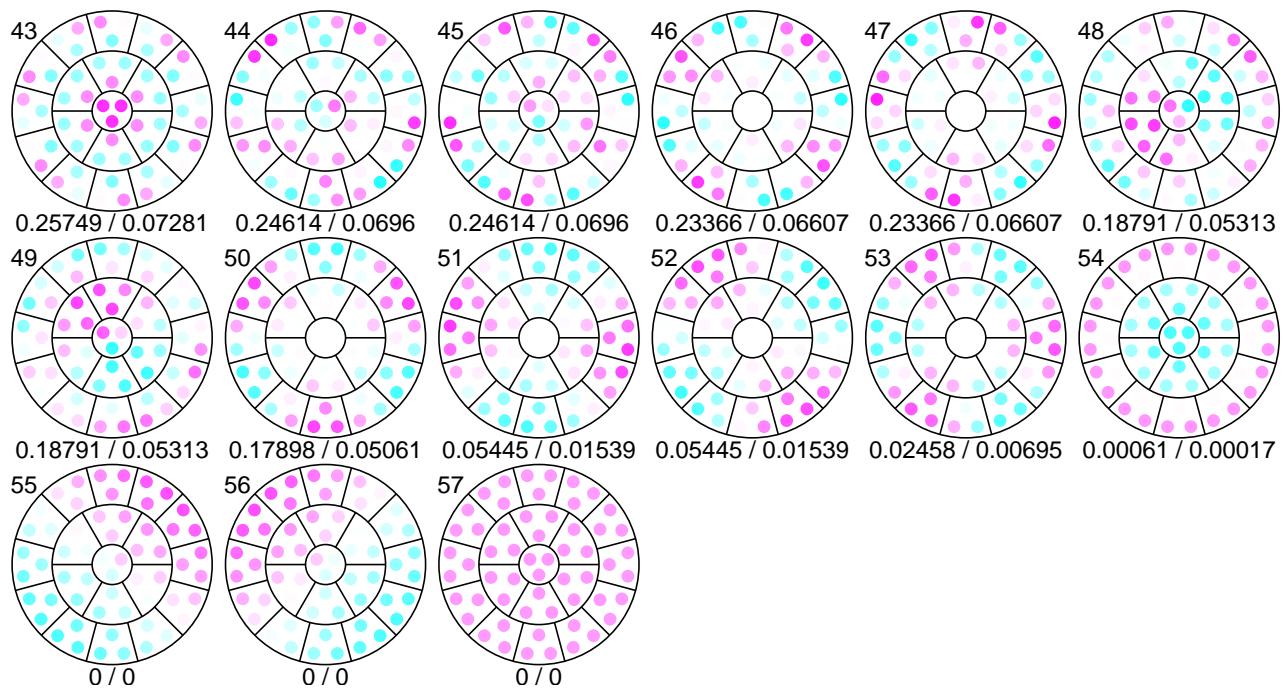


図 194: 試行 b32 — 特異ベクトル分布

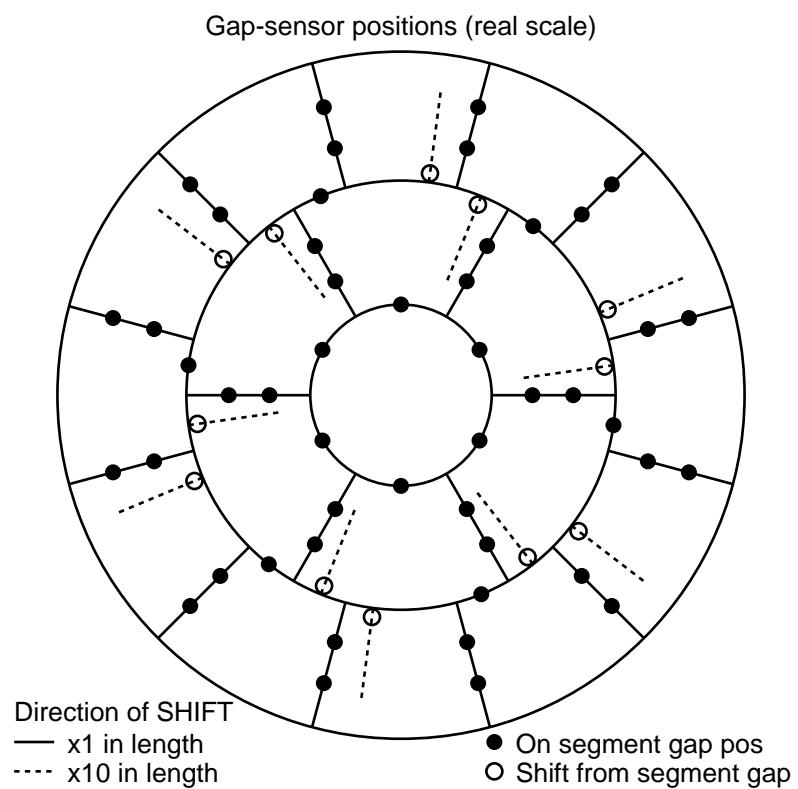


図 195: 試行 b33 — ギャップセンサー配置

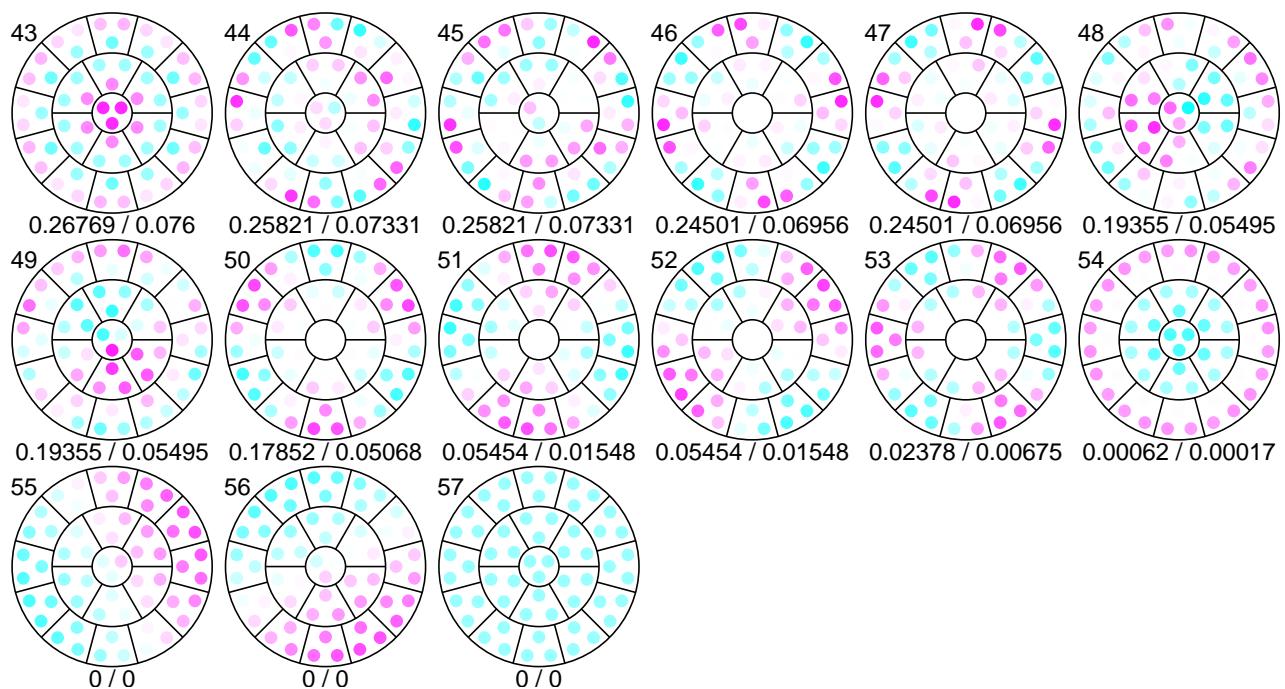


図 196: 試行 b33 — 特異ベクトル分布

#### 4.4.5 全体評価

この節で試したパターンについての Zernike モード (表 1) との対応関係は表 10 となる。

対応 ID の記号は表 9 と同じ。ただし、特異値の表示については色分けにあまり意味がない表のため行っていない。

表 10: Zernike モードとの対応一覧

| ID  | 場所 | 4 (2,0) |         | 5 (2,2) |         | 6 (2,-2) |         | 7 (3,1) |         | 8 (3,-1) |         | 9 (4,0)    |             | 10 (3,3)   |             | 11 (3,-3)  |             |
|-----|----|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
|     |    | Defocus | Astig   | Defocus | Astig   | Coma     | Coma    | Coma    | Coma    | Sphere   | Sphere  | AstigTri 0 | AstigTri 30 | AstigTri 0 | AstigTri 30 | AstigTri 0 | AstigTri 30 |
| 0   | 基準 | 54      | 0.00067 | 52      | 0.05535 | 51       | 0.05535 | 48r     | 0.18862 | 47r      | 0.18862 | 50         | 0.11354     | 49         | 0.17583     | 53         | 0.00223     |
| b01 |    | 54      | 0.00470 | 51r     | 0.06492 | 52r      | 0.06492 | 48r     | 0.19608 | 49r      | 0.19608 | 50         | 0.12816     | 47         | 0.20657     | 53         | 0.02190     |
| b02 |    | 54      | 0.00394 | 51r     | 0.07307 | 52r      | 0.07307 | 48r     | 0.19685 | 49r      | 0.19685 | 50         | 0.12301     | 47         | 0.24176     | 53         | 0.01728     |
| b03 |    | 54      | 0.00339 | 51r     | 0.07559 | 52r      | 0.07559 | 48r     | 0.19698 | 49r      | 0.19698 | 50         | 0.12018     | 47         | 0.25606     | 53         | 0.01641     |
| b04 |    | 54      | 0.00643 | 51r     | 0.06649 | 52r      | 0.06649 | 48r     | 0.19609 | 49r      | 0.19609 | 50         | 0.14807     | 47         | 0.20578     | 53         | 0.03882     |
| b05 |    | 54      | 0.00671 | 51      | 0.07428 | 52       | 0.07428 | 48r     | 0.19686 | 49r      | 0.19686 | 50         | 0.15302     | 47         | 0.24292     | 53         | 0.03259     |
| b06 |    | 54      | 0.00685 | 51      | 0.07661 | 52       | 0.07661 | 48r     | 0.19698 | 49r      | 0.19698 | 50         | 0.15577     | 47         | 0.25778     | 53         | 0.03016     |
| b07 |    | 54      | 0.00803 | 51r     | 0.06577 | 52r      | 0.06577 | 48r     | 0.19619 | 49r      | 0.19619 | 50         | 0.19080     | 47r        | 0.20695     | 53r        | 0.04761     |
| b08 |    | 54      | 0.00792 | 51      | 0.07327 | 52       | 0.07327 | 48r     | 0.19686 | 49r      | 0.19686 | 50         | 0.18615     | 47r        | 0.24120     | 53r        | 0.03335     |
| b09 |    | 54      | 0.00783 | 51      | 0.07563 | 52       | 0.07563 | 48r     | 0.19698 | 49r      | 0.19698 | 50         | 0.18246     | 47         | 0.25555     | 53         | 0.02752     |
| b10 |    | 53      | 0.02873 | 51r     | 0.05796 | 52r      | 0.05796 | 48rv    | 0.20299 | 47rv     | 0.20299 | 50         | 0.13837     | 49         | 0.19152     | 54         | 0.00743     |
| b11 |    | 53      | 0.02611 | 51r     | 0.05994 | 52r      | 0.05994 | 49rv    | 0.20421 | 48rv     | 0.20421 | 50         | 0.15288     | 47         | 0.20565     | 54         | 0.00144     |
| b12 |    | 53      | 0.02415 | 52r     | 0.06049 | 51r      | 0.06049 | 49rv    | 0.20508 | 48rv     | 0.20508 | 50         | 0.15640     | 47         | 0.20993     | 54         | 0.00386     |
| b13 |    | 53      | 0.03752 | 52r     | 0.05878 | 51r      | 0.05878 | 48rv    | 0.22385 | 47rv     | 0.22385 | 50         | 0.13020     | 49         | 0.19392     | 54         | 0.03557     |
| b14 |    | 53      | 0.04004 | 51r     | 0.06048 | 52r      | 0.06048 | 48rv    | 0.22346 | 47rv     | 0.22346 | 50         | 0.14733     | 49         | 0.20771     | 54         | 0.02915     |
| b15 |    | 53      | 0.04141 | 52r     | 0.06093 | 51r      | 0.06093 | 48cv    | 0.22165 | 47cv     | 0.22165 | 50         | 0.15312     | 49         | 0.21172     | 54         | 0.02670     |
| b16 |    | 53      | 0.05436 | 52r     | 0.05833 | 51r      | 0.05833 | 48v     | 0.22933 | 47v      | 0.22933 | 50         | 0.14702     | 49         | 0.19249     | 54         | 0.04044     |
| b17 |    | 53      | 0.05723 | 51r     | 0.06006 | 52r      | 0.06006 | 48cv    | 0.22109 | 47cv     | 0.22109 | 50         | 0.16322     | 49r        | 0.20648     | 54r        | 0.02622     |
| b18 |    | 53      | 0.05745 | 51      | 0.06053 | 52       | 0.06053 | 48rv    | 0.21663 | 47rv     | 0.21663 | 50         | 0.16851     | 49         | 0.21056     | 54         | 0.02092     |
| b19 |    | 53      | 0.02978 | 51c     | 0.06745 | 52c      | 0.06745 | 48cv    | 0.27448 | 47cv     | 0.27448 | 50         | 0.14559     | 49r        | 0.22688     | 54r        | 0.0153      |
| b20 |    | 53      | 0.02672 | 51r     | 0.07880 | 52r      | 0.07880 | 43r     | 0.43397 | 42r      | 0.43397 | 50         | 0.15920     | 49r        | 0.29597     | 54r        | 0.01904     |
| b21 |    | 53      | 0.02458 | 51c     | 0.08241 | 52c      | 0.08241 | 43      | 0.52252 | 42       | 0.52252 | 50         | 0.16229     | 49r        | 0.32689     | 54r        | 0.02104     |
| b22 |    | 54      | 0.04033 | 51r     | 0.07023 | 52r      | 0.07023 | 48r     | 0.28222 | 47r      | 0.28222 | 50         | 0.16994     | 49r        | 0.22675     | 53r        | 0.05118     |
| b23 |    | 54      | 0.04279 | 51r     | 0.08116 | 52r      | 0.08116 | 43c     | 0.43418 | 44c      | 0.43418 | 50         | 0.18586     | 49         | 0.29552     | 53         | 0.04413     |
| b24 |    | 53      | 0.04428 | 52r     | 0.08450 | 51r      | 0.08450 | 43r     | 0.52267 | 42r      | 0.52267 | 50         | 0.19148     | 49         | 0.32644     | 54         | 0.04159     |
| b25 |    | 51      | 0.06735 | 52r     | 0.06726 | 53r      | 0.06726 | 48v     | 0.28727 | 47v      | 0.28727 | 50         | 0.20302     | 49r        | 0.22544     | 54r        | 0.04535     |
| b26 |    | 53      | 0.06621 | 51r     | 0.07835 | 52r      | 0.07835 | 44c     | 0.43950 | 43c      | 0.43950 | 50v        | 0.21117     | 49r        | 0.29459     | 54r        | 0.02967     |
| b27 |    | 53      | 0.06518 | 51c     | 0.08184 | 52c      | 0.08184 | 43      | 0.52613 | 42       | 0.52613 | 50v        | 0.21252     | 49r        | 0.32555     | 54r        | 0.02380     |
| b28 |    | 54      | 0.00663 | 51r     | 0.05829 | 52r      | 0.05829 | 43c     | 0.19827 | 44c      | 0.19827 | 42v        | 0.34319     | 48         | 0.17663     | 53         | 0.00197     |
| b29 |    | 54      | 0.00663 | 51r     | 0.05920 | 52r      | 0.05920 | 43c     | 0.20390 | 44c      | 0.20390 | 42v        | 0.32334     | 48         | 0.17730     | 53         | 0.00190     |

表 10: Zernike モードとの対応一覧

| ID  | 場所 | 4 (2,0) |       | 5 (2,2) |       | 6 (2,-2) |      | 7 (3,1) |      | 8 (3,-1) |        | 9 (4,0) |       | 10 (3,3) |       | 11 (3,-3) |        |
|-----|----|---------|-------|---------|-------|----------|------|---------|------|----------|--------|---------|-------|----------|-------|-----------|--------|
|     |    | Defocus | Astig | Defocus | Astig | Coma     | Coma | Coma    | Coma | Sphere   | Sphere | Astig   | Tri 0 | Astig    | Tri 0 | Astig     | Tri 30 |
| b30 | 54 | 0.00062 | 51r   | 0.05573 | 52r   | 0.05573  | 49cv | 0.14634 | 50cv | 0.14634  | 48v    | 0.16760 | 47    | 0.17150  | 53    | 0.01883   |        |
| b31 | 54 | 0.00064 | 51r   | 0.05598 | 52r   | 0.05598  | 43rv | 0.23424 | 44rv | 0.23424  | 45v    | 0.22453 | 48    | 0.17158  | 53    | 0.01815   |        |
| b32 | 54 | 0.00061 | 51r   | 0.05445 | 52r   | 0.05445  | 49cv | 0.18791 | 48cv | 0.18791  | 43v    | 0.25749 | 50    | 0.17898  | 53    | 0.02458   |        |
| b33 | 54 | 0.00062 | 51r   | 0.05454 | 52r   | 0.05454  | 49cv | 0.19355 | 48cv | 0.19355  | 43     | 0.26769 | 50    | 0.17852  | 53    | 0.02378   |        |

---

この表から以下のことが言える。

- 単独に動かしていた場合の効果を合わせた影響が現れている
- 内周間・外周間のセンサーが辺端にくると全体がばたつくモードが特異値順で小さいほうにくる(ただし値としては大きい)

## 4.5 ギャップセンサー配置による特異値への影響 — 1/3 対称形・辺毎

これまで全セグメントに対して同じ配置、つまり内周については 1/6 対称、外周については 1/12 対称を維持していたが、ここでは対称性を少し崩し、隣り合う 2 つをペアとした配置を検証する。なお、単純化のため、これまでの結果と比較する形で検証し、内外周間については b28 – b33 の結果で効果が薄かったので除外する。

### 4.5.1 内環

試行 1,2 に対して内環のみを一つ毎に逆側に配置したもの同士を比較する。

図 197, 198 の両方とも Astig の二つと AstigTri 30 のモードが逆配置のほうで大きく悪化している。これは、この二つのモードに関しては中心軸による回転対称性でなく、中心軸を通る線に対する対称(120 度ごとの 3 本の対称軸、なども含む)性をギャップセンサーの配置で崩すことが重要であることを意味すると考えられる。

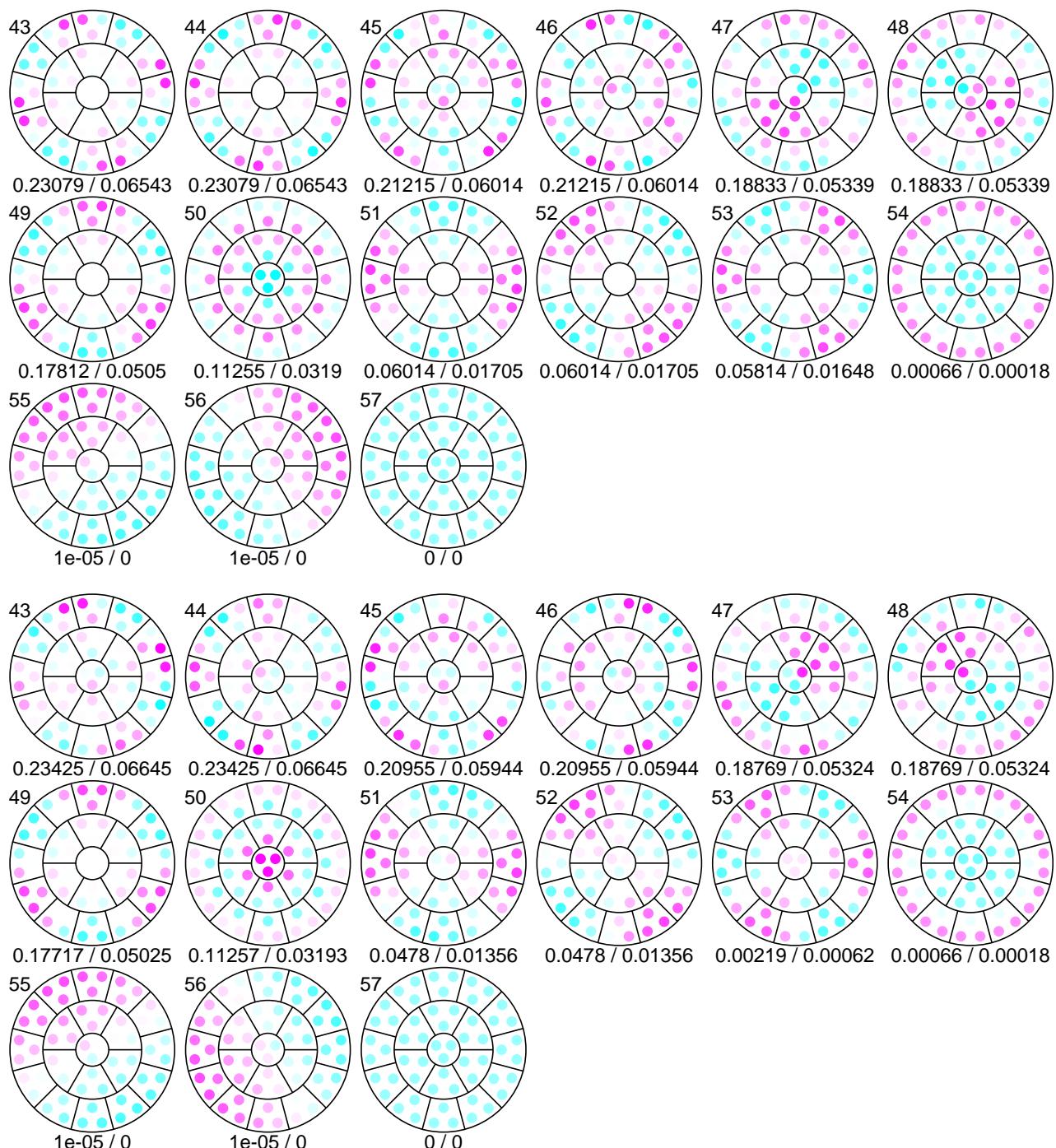


図 197: 試行 1(上) に対する逆配置 (下; 1a)

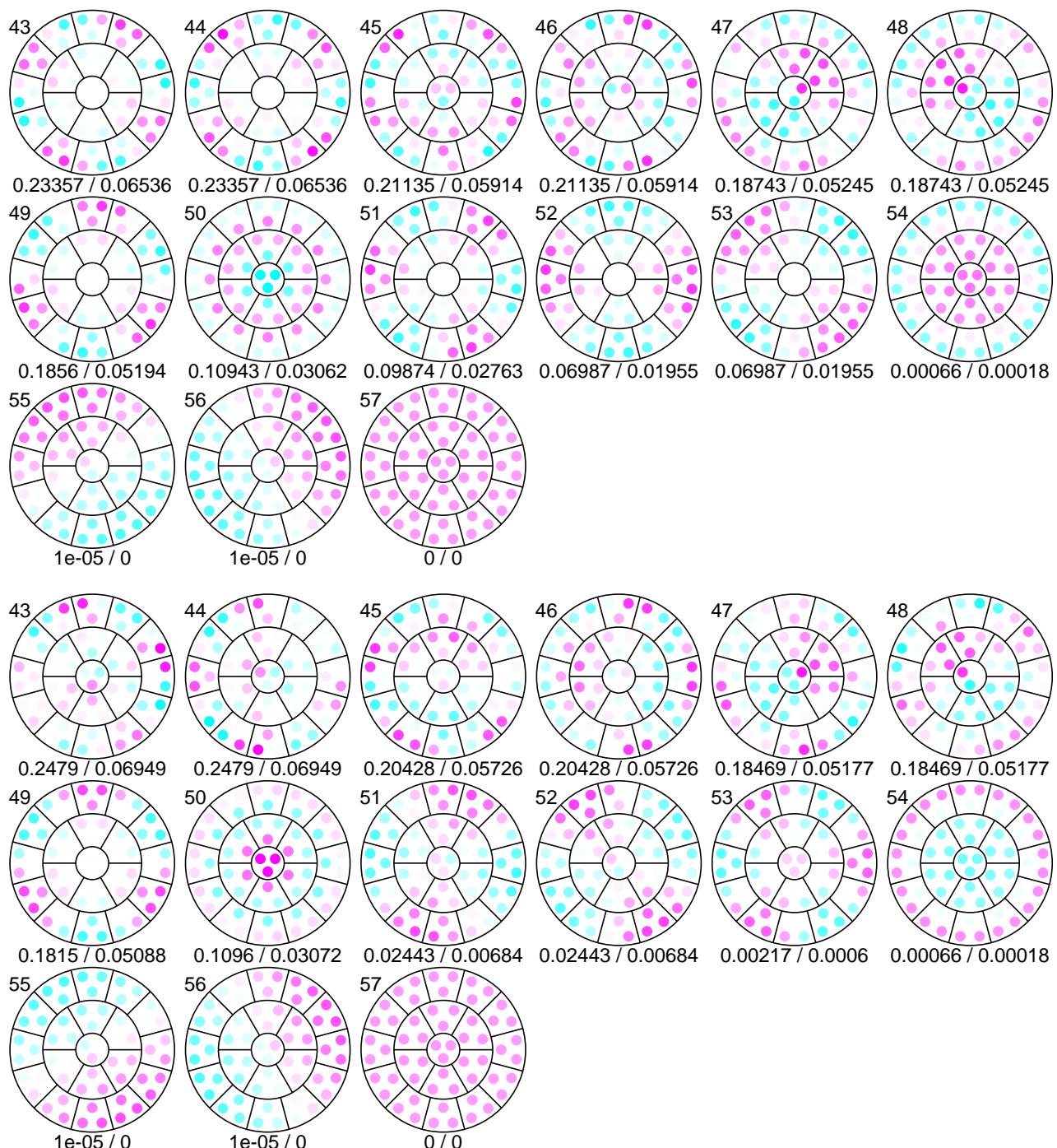


図 198: 試行 2(上) に対する逆配置 (下; 2a)

#### 4.5.2 内周間・外周間

試行 41 に対して、内周間・外周間ごとに隣り合う辺のセグメント内への配置状況を入れ替えた各モードを試験する。組み合わせは、試行 41 や回転対称を除いて 11 モードになる。

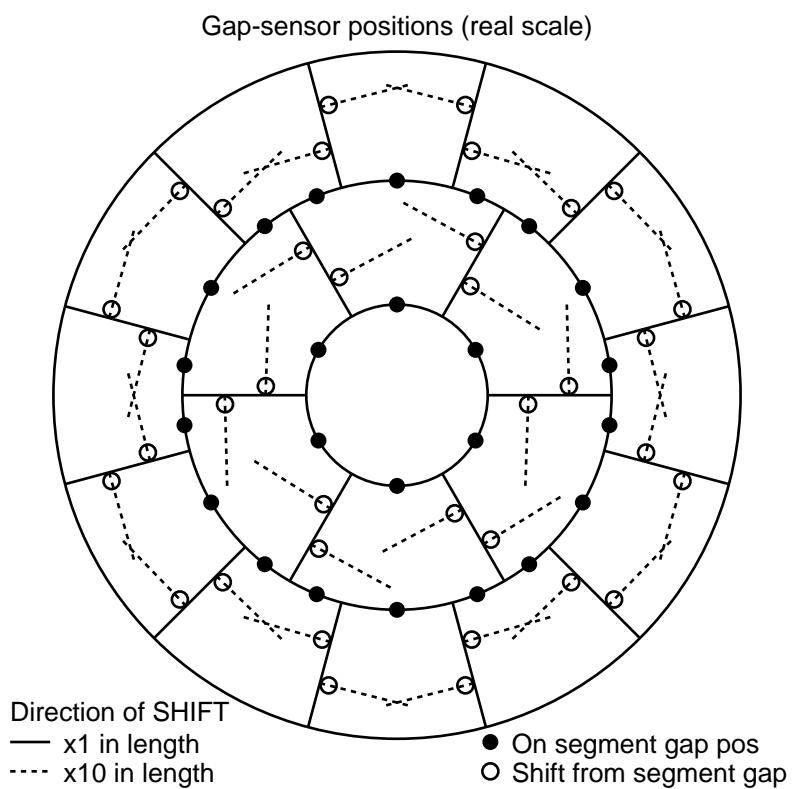


図 199: 試行 c2 — ギャップセンサー配置

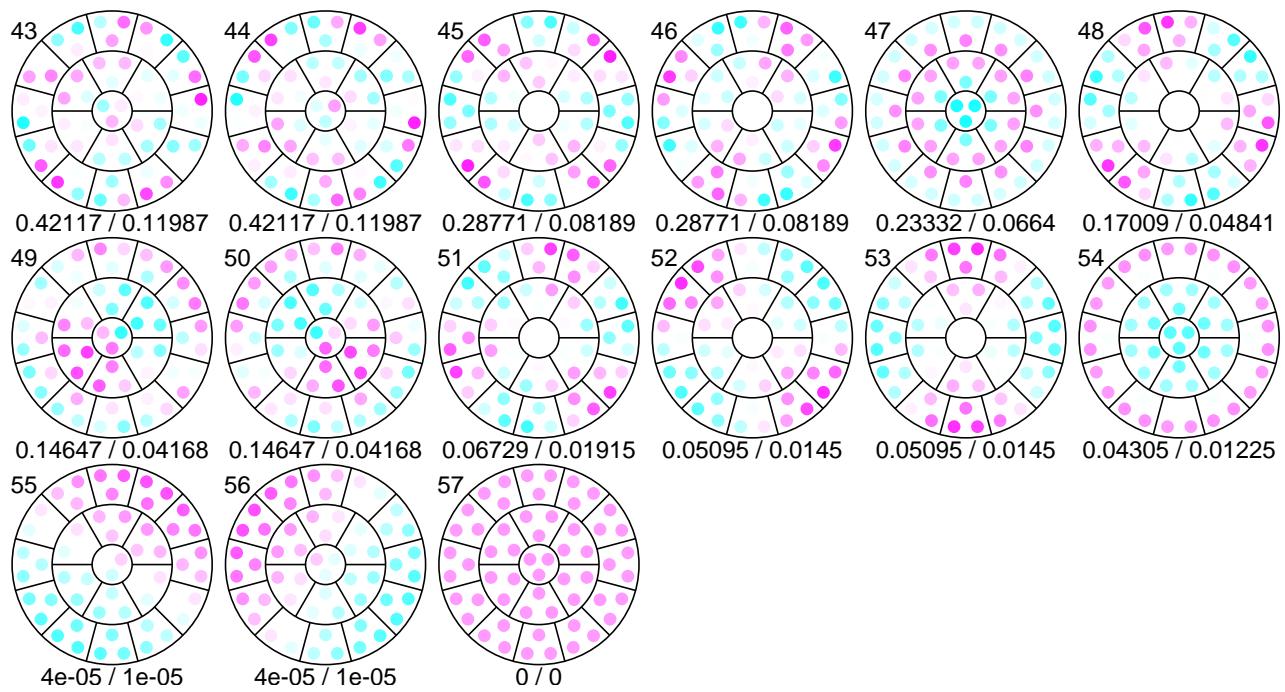


図 200: 試行 c2 — 特異ベクトル分布

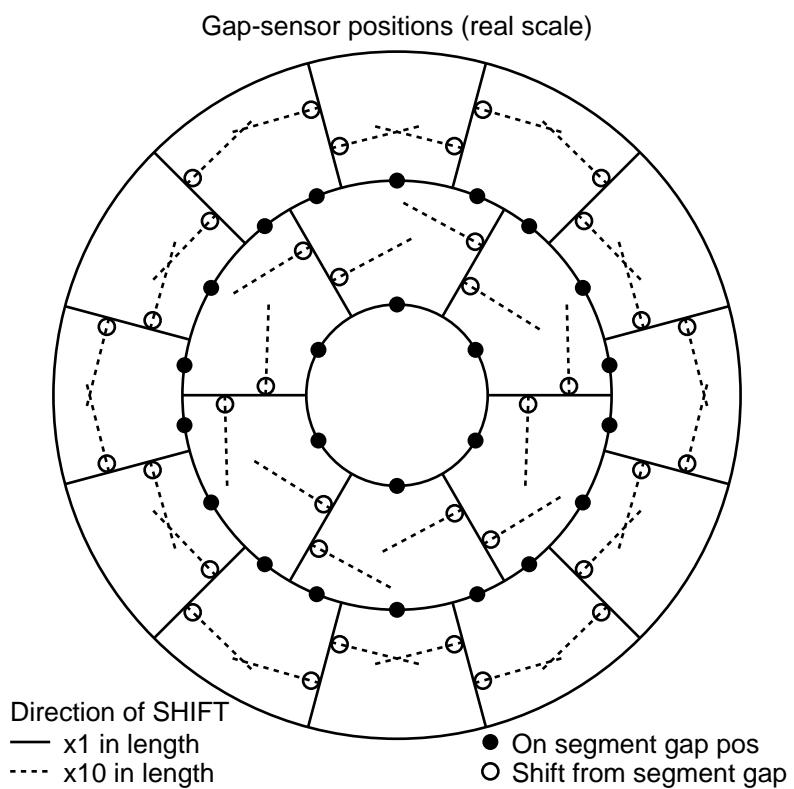


図 201: 試行 c3 — ギャップセンサー配置

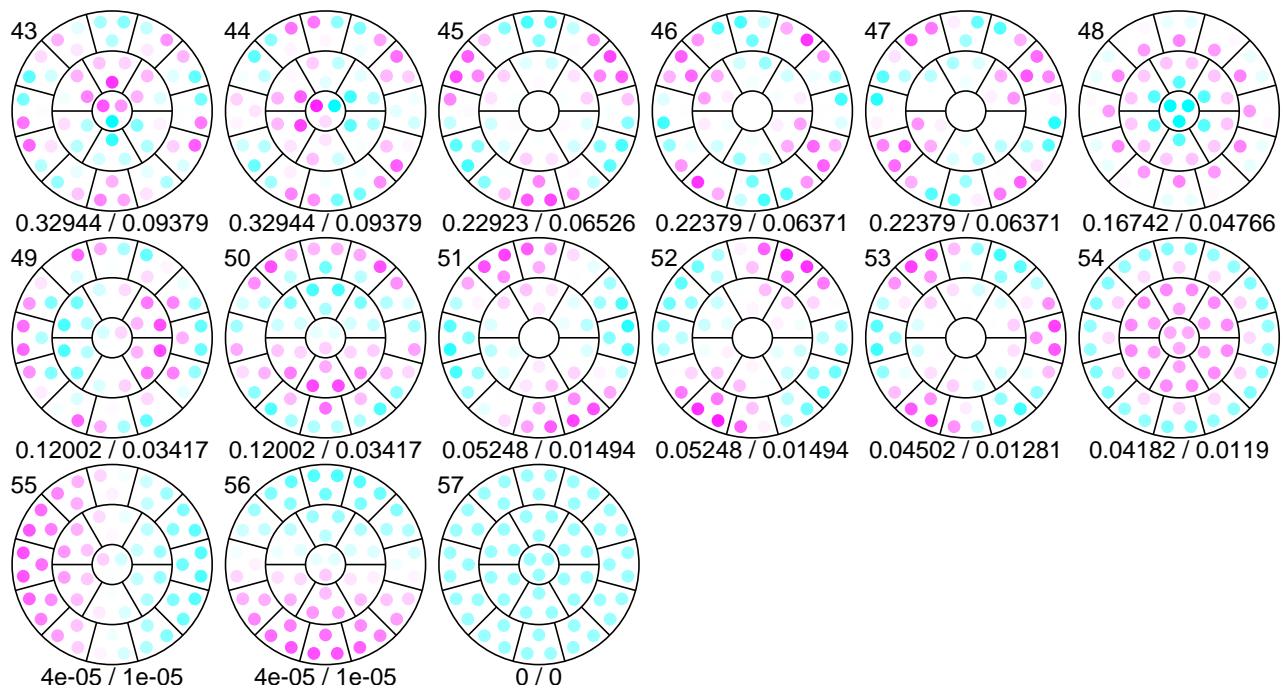


図 202: 試行 c3 — 特異ベクトル分布

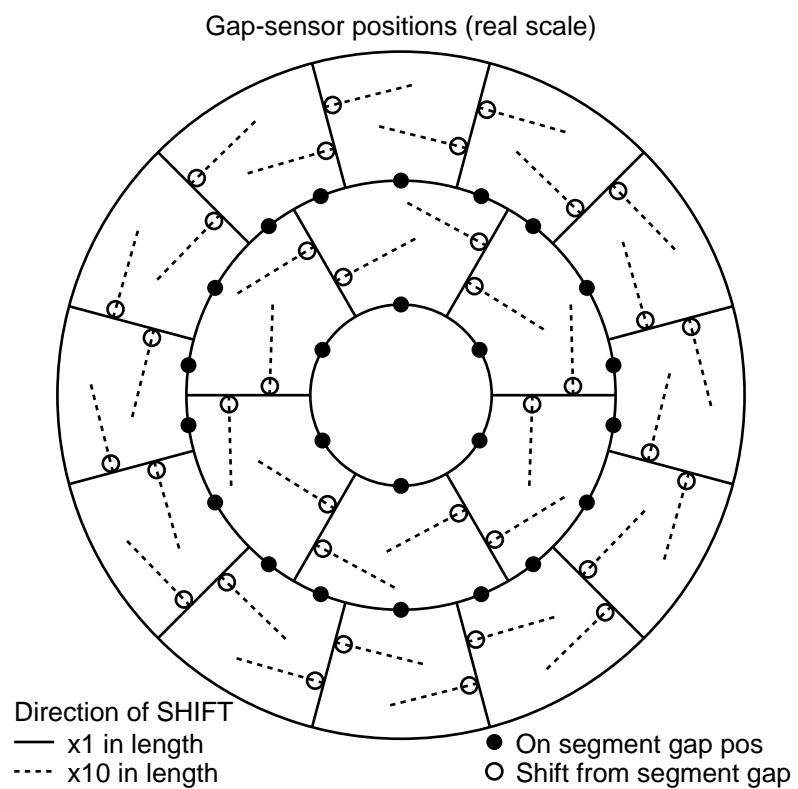


図 203: 試行 c4 — ギャップセンサー配置

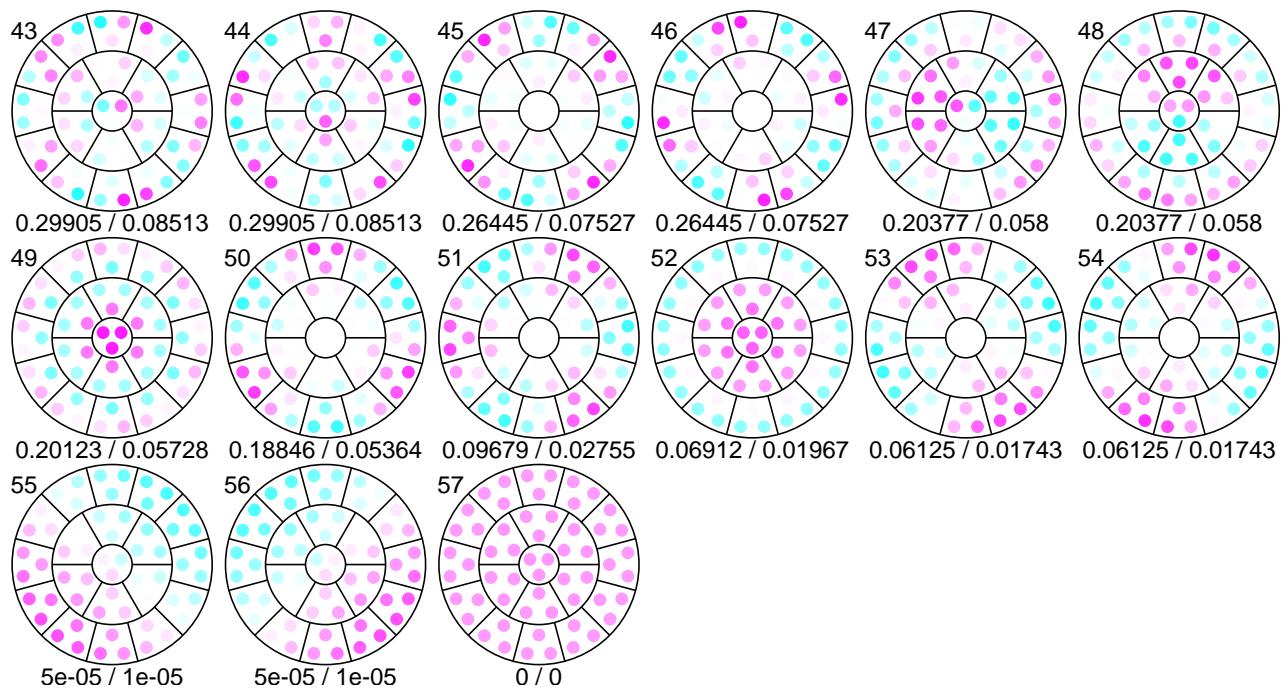


図 204: 試行 c4 — 特異ベクトル分布

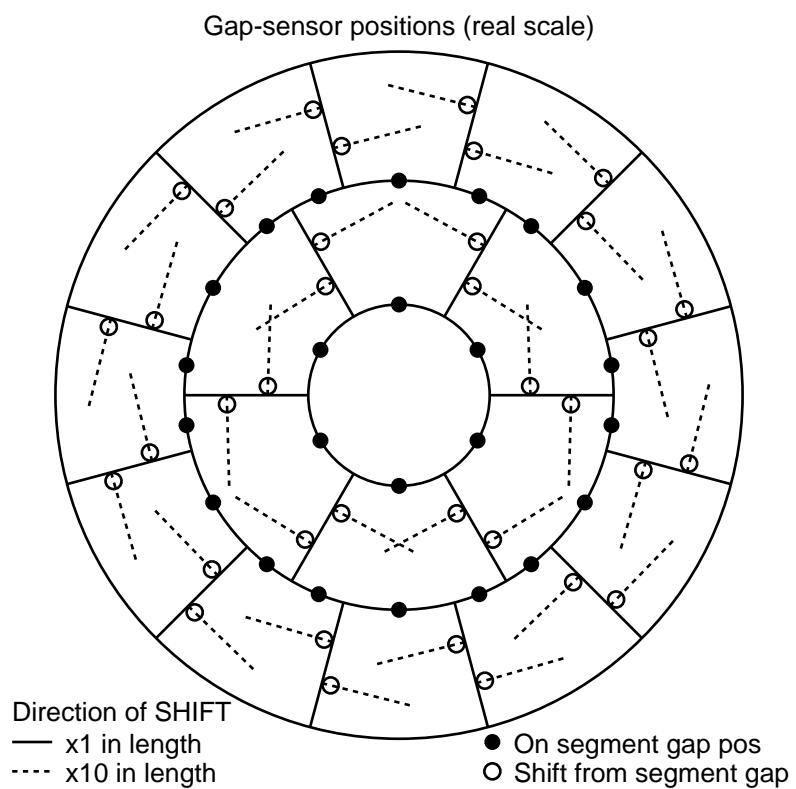


図 205: 試行 c5 — ギャップセンサー配置

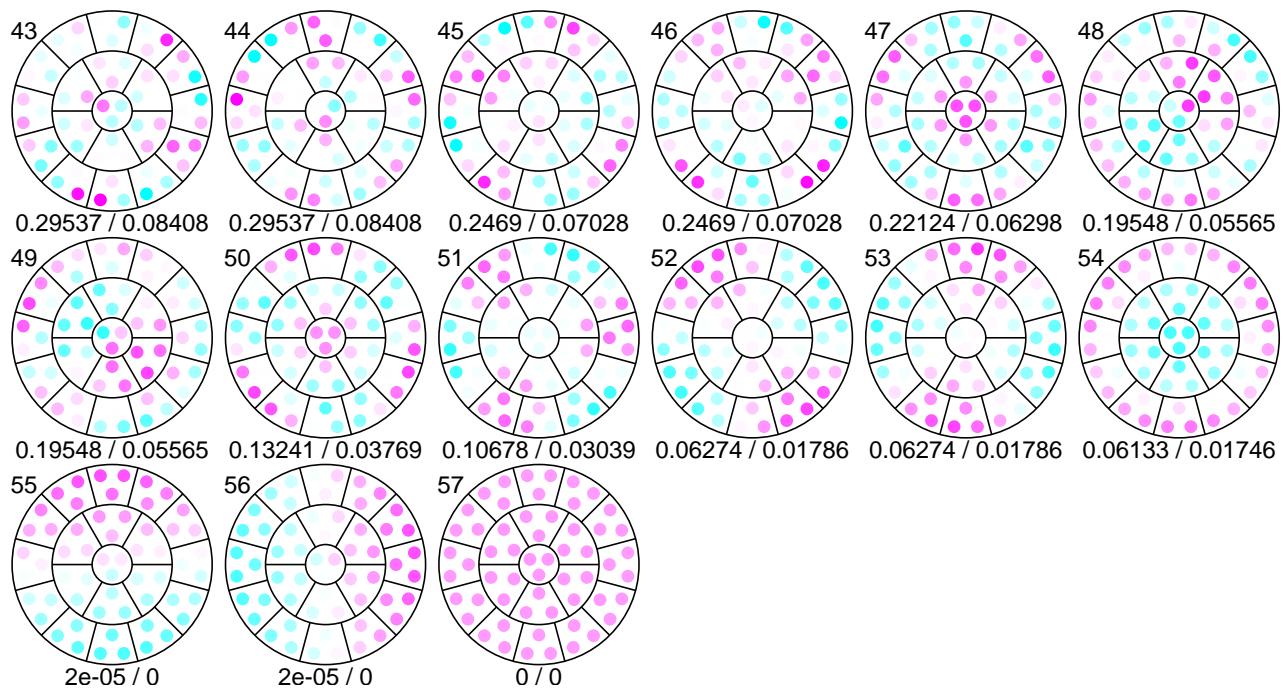


図 206: 試行 c5 — 特異ベクトル分布

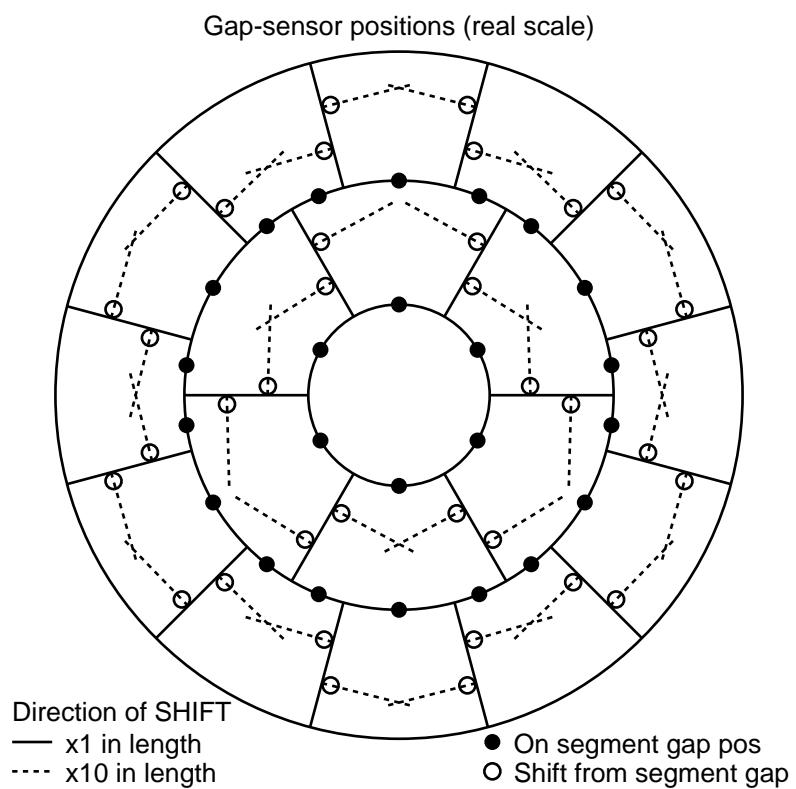


図 207: 試行 c6 — ギャップセンサー配置

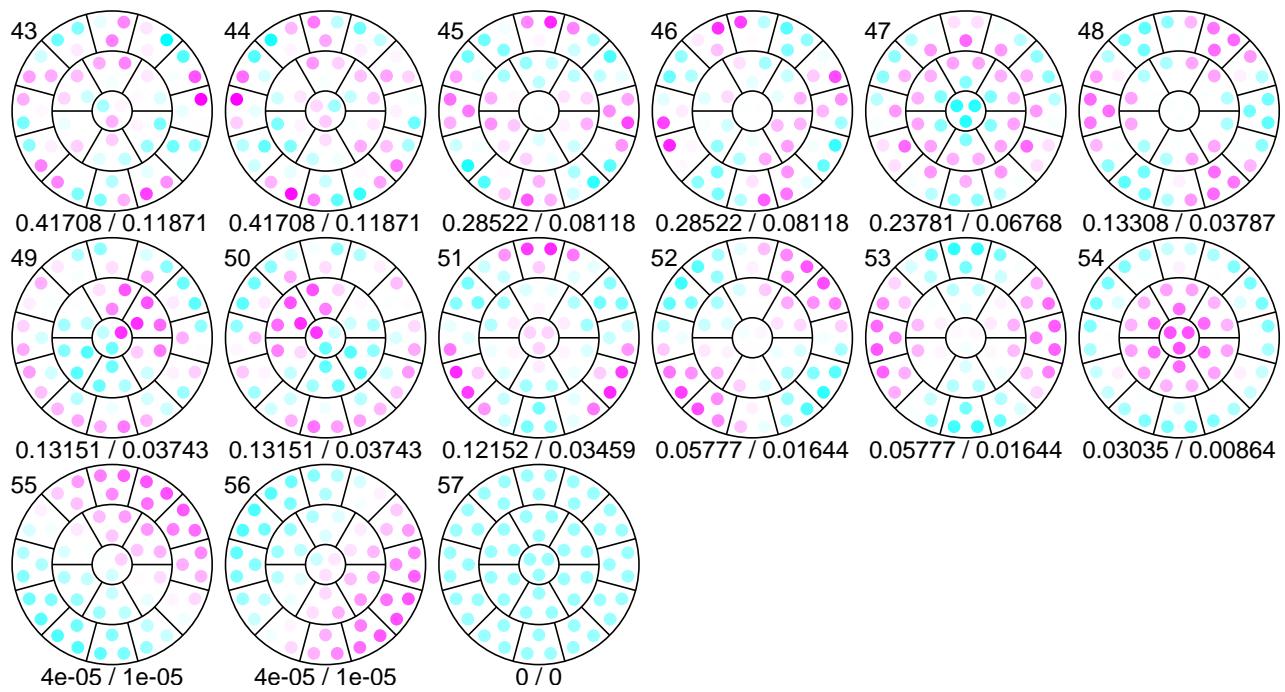


図 208: 試行 c6 — 特異ベクトル分布

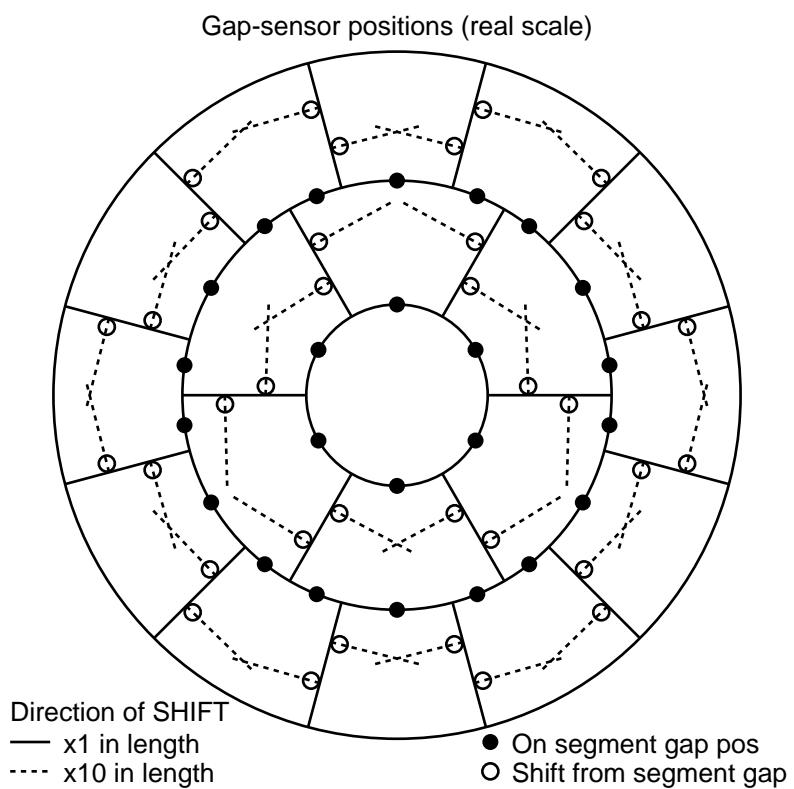


図 209: 試行 c7 — ギャップセンサー配置

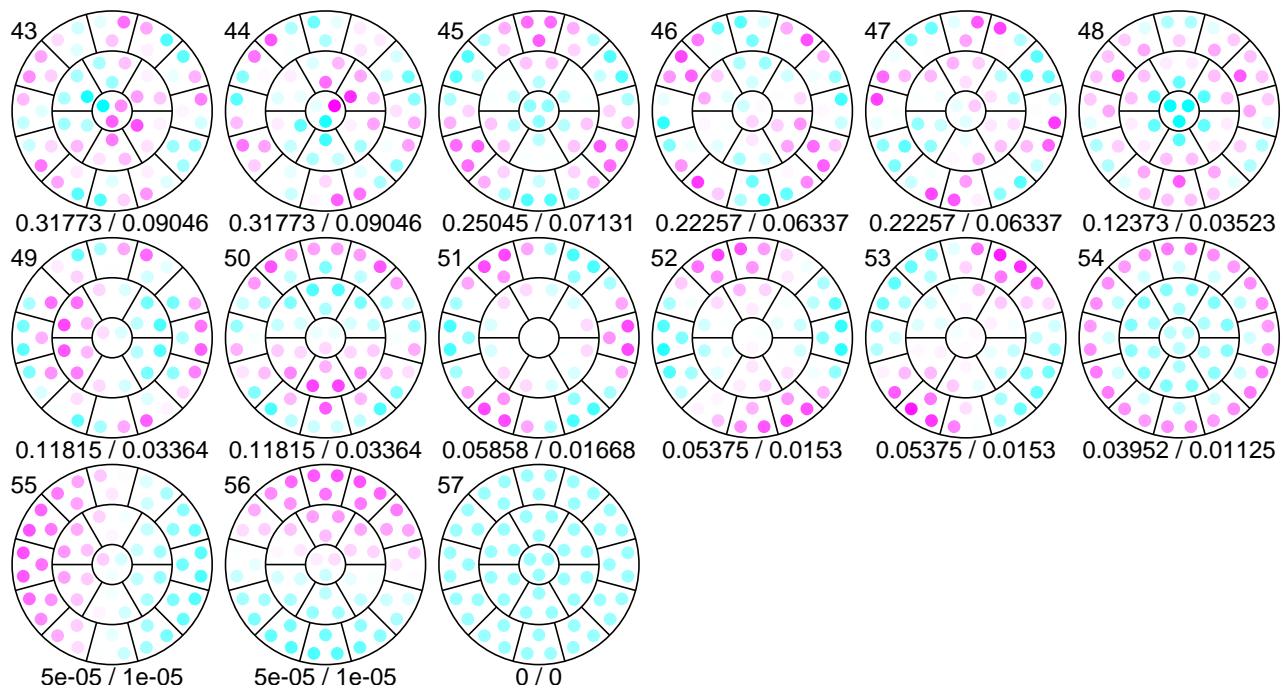


図 210: 試行 c7 — 特異ベクトル分布

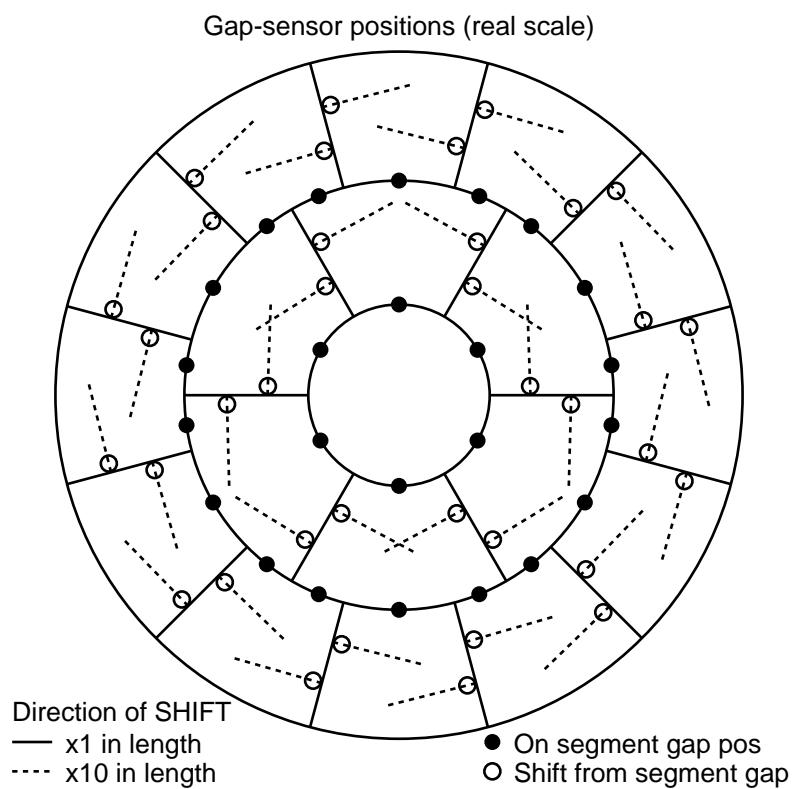


図 211: 試行 c8 — ギャップセンサー配置

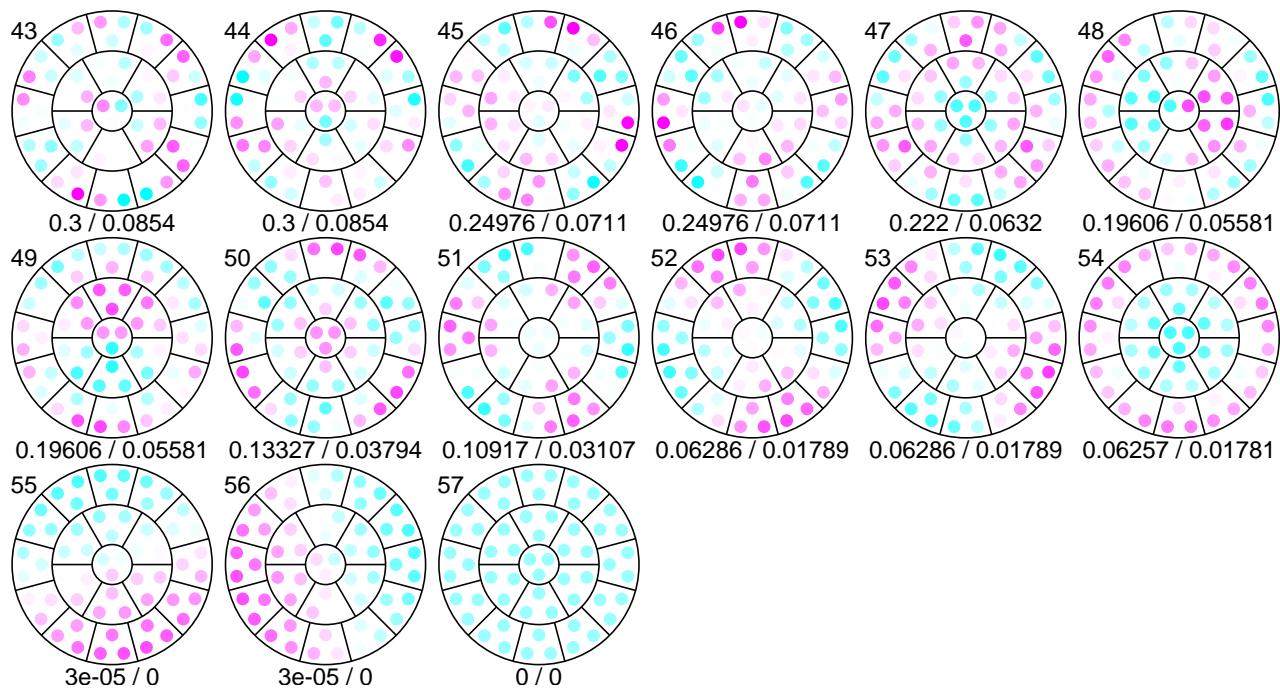


図 212: 試行 c8 — 特異ベクトル分布

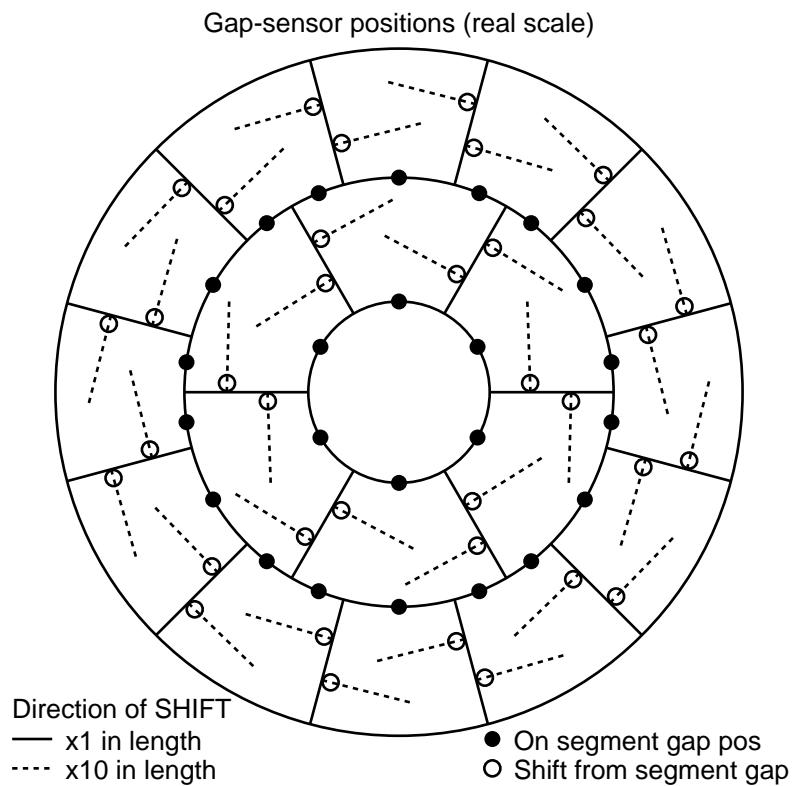


図 213: 試行 c9 — ギャップセンサー配置

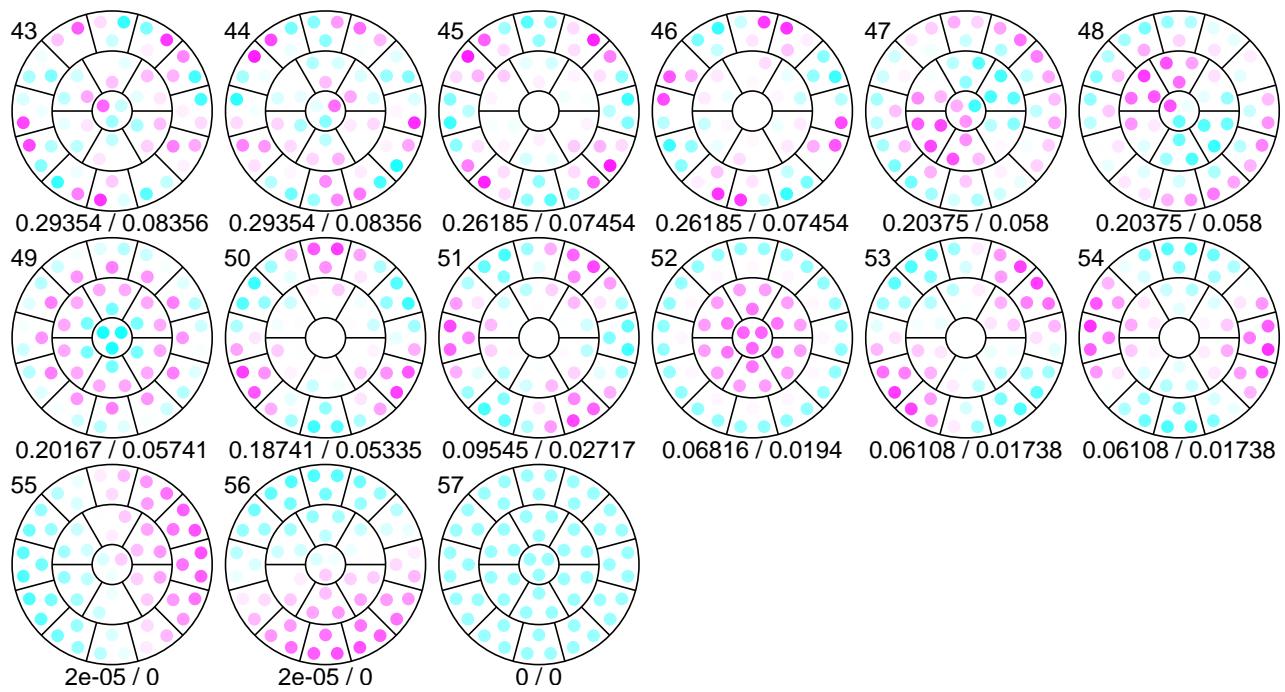


図 214: 試行 c9 — 特異ベクトル分布

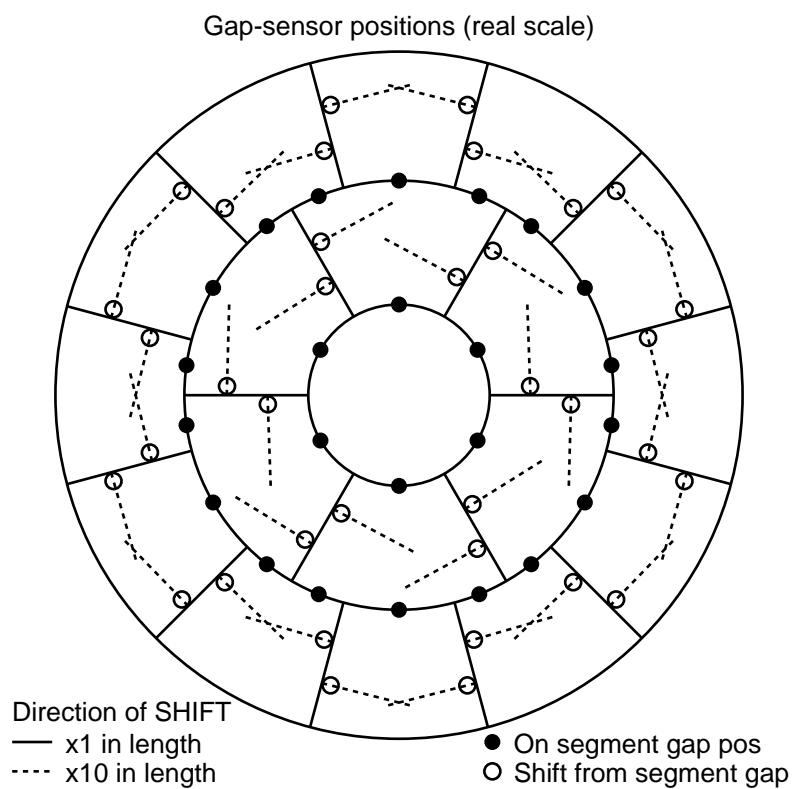


図 215: 試行 c10 — ギャップセンサー配置

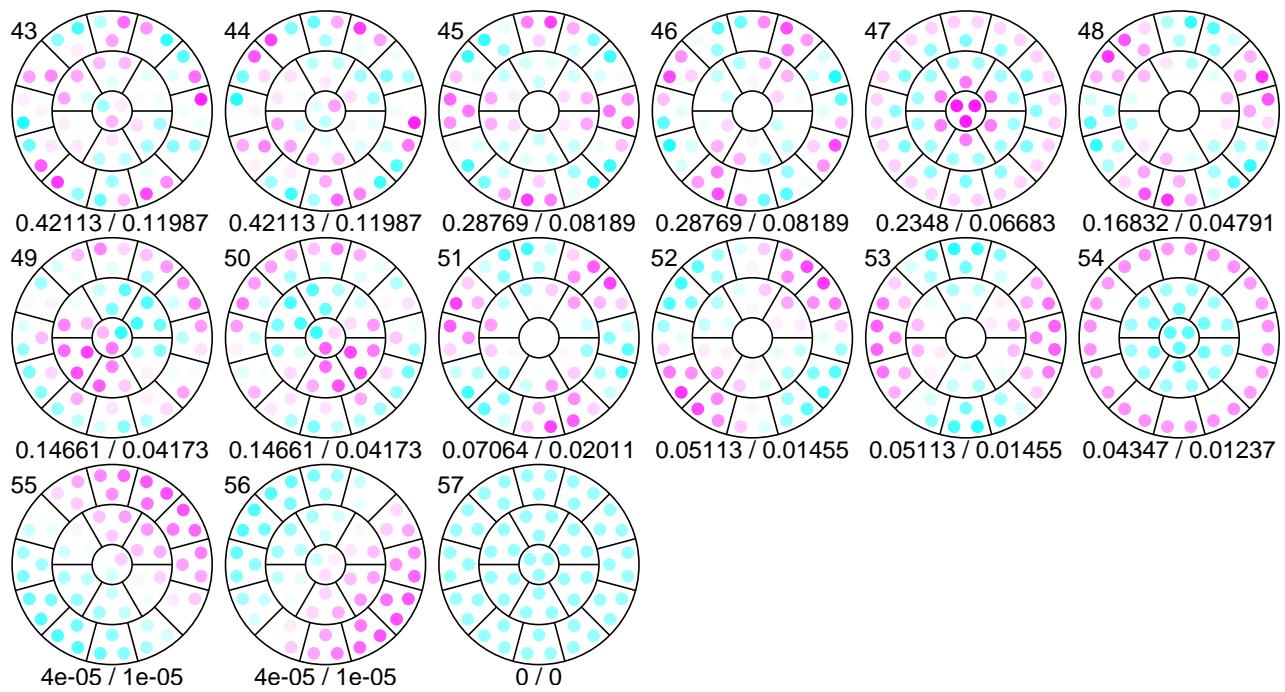


図 216: 試行 c10 — 特異ベクトル分布

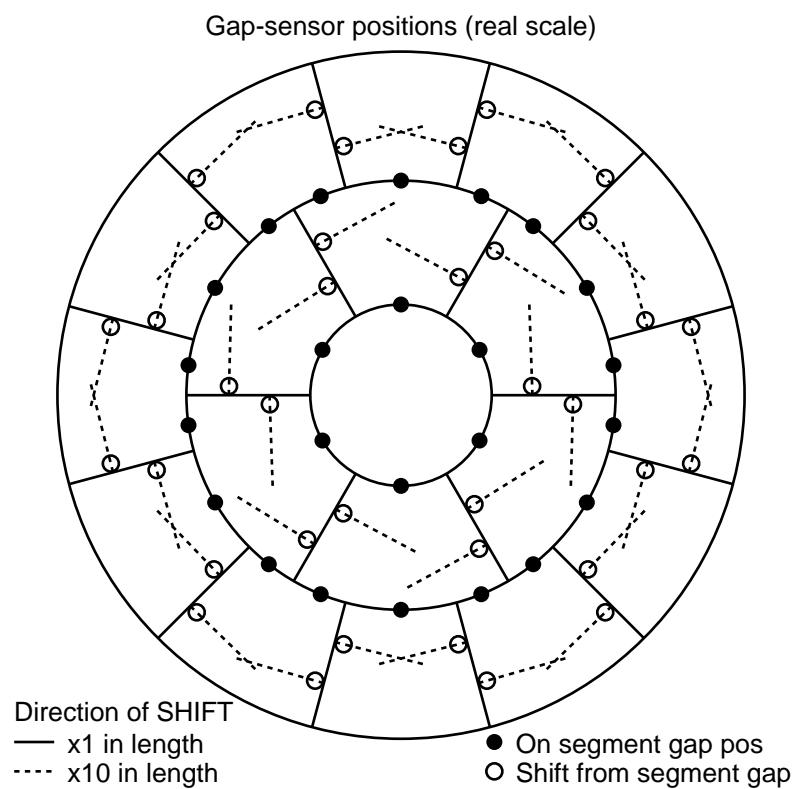


図 217: 試行 c11 — ギャップセンサー配置

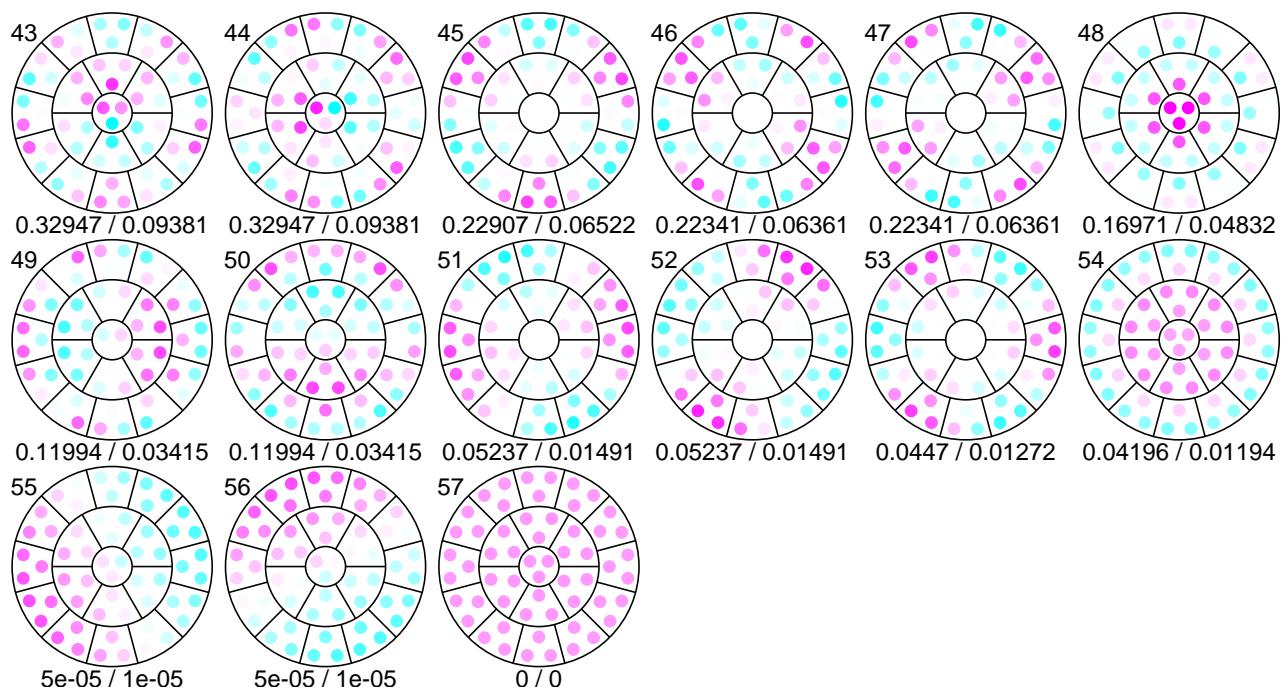


図 218: 試行 c11 — 特異ベクトル分布

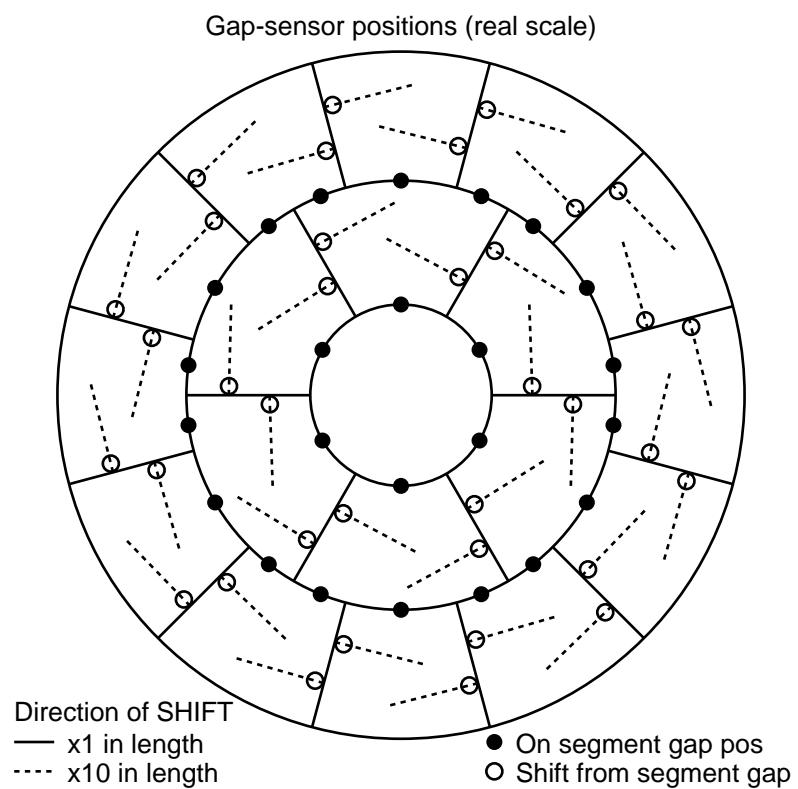


図 219: 試行 c12 — ギャップセンサー配置

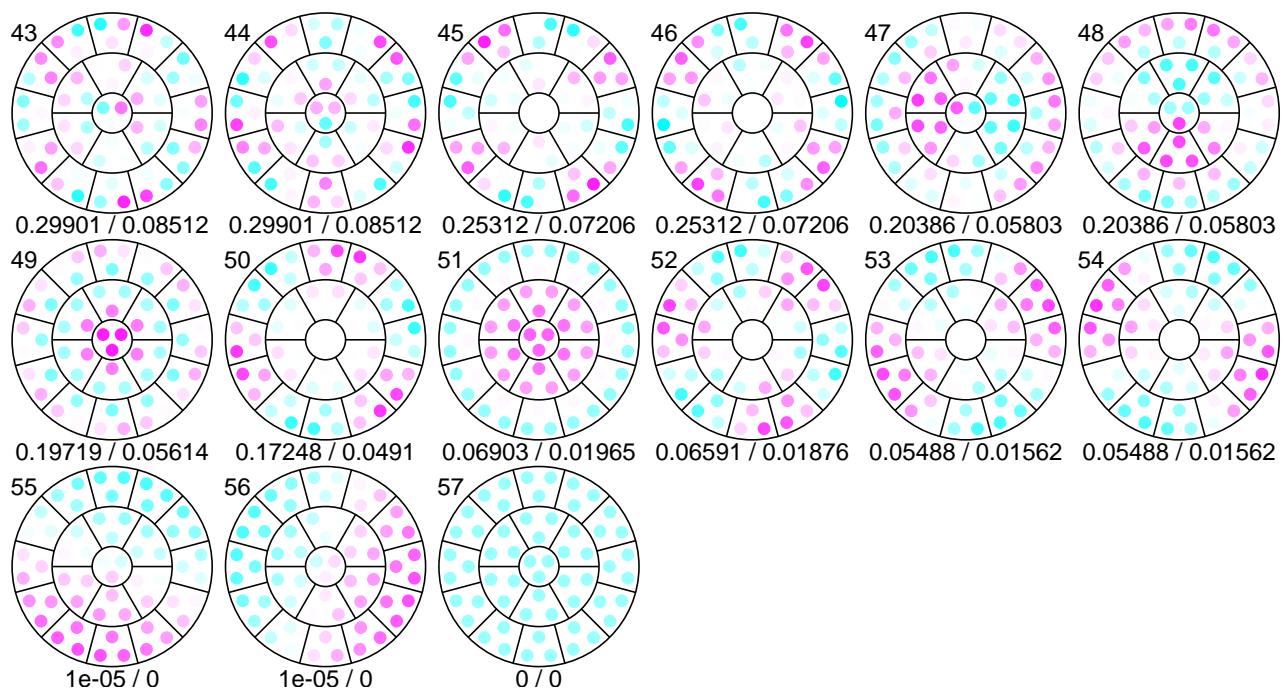


図 220: 試行 c12 — 特異ベクトル分布

#### 4.5.3 全体評価

この節で試したパターンについての Zernike モード (表 1) との対応関係は表 11 となる。

対応 ID の記号は表 9 と同じ。ただし、特異値の表示については色分けにあまり意味がない表のため行っていない。  
この結果をまとめると次のようになる。

- 内環は中心軸に対する回転対称より  $120^\circ$  ごとの直径に対する対象性が重要
- 内周間・外周間は、c1,c4,c9,c12 のように全てのセグメントに対して同じ配置とするほうが全体的によい
- 内周間・外周間で同じ半径のギャップセンサーを同じセグメント内にくる方向に配置すると外周にばたつくモードが載ってきやすくなる

表 11: Zernike モードとの対応一覧

| ID  | 場所  | 4 (2,0) |         | 5 (2,2) |         | 6 (2,-2) |         | 7 (3,1) |         | 8 (3,-1) |         | 9 (4,0)    |             | 10 (3,3)   |             | 11 (3,-3) |         |
|-----|-----|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|------------|-------------|------------|-------------|-----------|---------|
|     |     | Defocus | Astig   | Defocus | Astig   | Coma     | Coma    | Coma    | Coma    | Sphere   | Sphere  | AstigTri 0 | AstigTri 30 | AstigTri 0 | AstigTri 30 |           |         |
| 0   | 基準  | 54      | 0.00067 | 52      | 0.05535 | 51       | 0.05535 | 48r     | 0.18862 | 47r      | 0.18862 | 50         | 0.11354     | 49         | 0.17583     | 53        | 0.00223 |
| 1   | 環 1 | 54      | 0.00066 | 51      | 0.06014 | 52       | 0.06014 | 47r     | 0.18833 | 48r      | 0.18833 | 50         | 0.11255     | 49         | 0.17812     | 53        | 0.05814 |
| 1a  |     | 54      | 0.00066 | 51      | 0.04780 | 52       | 0.04780 | 47r     | 0.18769 | 48r      | 0.18769 | 50         | 0.11257     | 49         | 0.17717     | 53        | 0.00219 |
| 2   | 環 2 | 54      | 0.00066 | 52      | 0.06987 | 53       | 0.06987 | 47r     | 0.18743 | 48r      | 0.18743 | 50         | 0.10943     | 49         | 0.18560     | 51        | 0.09874 |
| 2a  |     | 54      | 0.00066 | 51r     | 0.02443 | 52r      | 0.02443 | 47cv    | 0.18469 | 48cv     | 0.18469 | 50         | 0.10960     | 49         | 0.18150     | 53        | 0.00217 |
| 41  |     | 51      | 0.06770 | 54c     | 0.05474 | 53c      | 0.05474 | 47c     | 0.20368 | 48c      | 0.20368 | 49v        | 0.19382     | 50c        | 0.17282     | 52c       | 0.06218 |
| c2  |     | 54      | 0.04305 | 53      | 0.05095 | 52       | 0.05095 | 49c     | 0.14647 | 50c      | 0.14647 | 47         | 0.23332     | 48r        | 0.17009     | 51r       | 0.06729 |
| c3  |     | 54      | 0.04182 | 51c     | 0.05248 | 52c      | 0.05248 | 50v     | 0.12002 | 49v      | 0.12002 | 48         | 0.16742     | 45         | 0.22923     | 53        | 0.04502 |
| c4  |     | 52      | 0.06912 | 53c     | 0.06125 | 54c      | 0.06125 | 48      | 0.20377 | 47       | 0.20377 | 49         | 0.20123     | 50         | 0.18846     | 51        | 0.09679 |
| c5  |     | 54v     | 0.06133 | 52c     | 0.06274 | 53c      | 0.06274 | 48cv    | 0.19548 | 49cv     | 0.19548 | 50v        | 0.13241     | 47         | 0.22124     | 51        | 0.10678 |
| c6  |     | 54v     | 0.03035 | 53      | 0.05777 | 52       | 0.05777 | 49cv    | 0.13151 | 50cv     | 0.13151 | 47v        | 0.23781     | 51         | 0.12152     | 48        | 0.13308 |
| c7  |     | 54      | 0.03952 | 52c     | 0.05375 | 53c      | 0.05375 | 50v     | 0.11815 | 49v      | 0.11815 | 48v        | 0.12373     | 45         | 0.25045     | 51        | 0.05858 |
| c8  |     | 54v     | 0.06257 | 52c     | 0.06286 | 53c      | 0.06286 | 49v     | 0.19606 | 48v      | 0.19606 | 47v        | 0.22200     | 50v        | 0.13327     | 51r       | 0.10917 |
| c9  |     | 52      | 0.06816 | 54r     | 0.06108 | 53r      | 0.06108 | 47c     | 0.20375 | 48c      | 0.20375 | 49v        | 0.20167     | 50r        | 0.18741     | 51r       | 0.09545 |
| c10 |     | 54      | 0.04347 | 53      | 0.05113 | 52       | 0.05113 | 49cv    | 0.14661 | 50cv     | 0.14661 | 47         | 0.23480     | 48c        | 0.16832     | 51c       | 0.07064 |
| c11 |     | 54      | 0.04196 | 51c     | 0.05237 | 52c      | 0.05237 | 50v     | 0.11994 | 49v      | 0.11994 | 48v        | 0.16971     | 45         | 0.22907     | 53        | 0.04470 |
| c12 |     | 51      | 0.06903 | 53c     | 0.05488 | 54c      | 0.05488 | 48      | 0.20386 | 47       | 0.20386 | 49v        | 0.19719     | 50c        | 0.17248     | 52c       | 0.06591 |

## 5 まとめ

ここまで結果から、大きな方針としては

- 内環は  $60^\circ$  ごとに配置してセグメントに対して中心に来ないように回転
- 内周間・外周間の辺上の位置は離すほうがいいが、端過ぎると外周アクチュエータに高次モードがのる
- 内周間・外周間は同じ辺上のものは互いに逆側のセグメントの中へシフトさせ、かつ内周もしくは外周の中では全てのセグメントで同じ配置に
- 内外周間は、内周から見て両脇を外側に、真ん中を中央からずらす
- 内外周間をセグメント内側に入れるときは直線状にならないように注意する

という 5 点にまとめられる。

よりいっそう対称形を崩すと多少特異値が改善するものの、対称形から崩せば崩すほど低次の Astig, Coma などのモードを制御する特異ベクトルのうち外周のアクチュエータの部分に高次のモードが載ってくるため、制御残差という面で見るとある低次モードが残ってしまったときに外周のばたつきという形で影響が見られる可能性が高くなる。