

汎用X線装置を用いた電子部品の内部観察法

瀬戸口正和*, 牟禮雄二*

Observation Method for Internal Structure of Electronic Parts Using Multipurpose X-ray Device

Masakazu SETOGUCHI and Yuji MURE

電子部品は、焦点寸法が小さいマイクロフォーカスX線装置を用いることで、内部構造を高倍率で観察できるようになったが、装置価格が非常に高額であることから、普及が進んでいない状況である。このため、溶接部の検査等で普及している焦点寸法が大きい汎用X線装置による拡大撮影を試みた。

焦点寸法が大きい汎用X線装置では、焦点寸法の大きさに起因する焦点ボケが原因で、2倍拡大撮影でも鮮明な画像が得られない。しかし、X線の線束を絞るコリメータを用いることで、X線の照射範囲は絞られるものの、焦点ボケが改善されたX線画像を取得することができた。

また、コリメータを用いて撮影した画像は、幾何学倍率よりも拡大されていることからコリメータが擬似的に焦点位置になっていることがわかった。

Keyword : X線, 電子部品, 内部観察, 拡大撮影

1. 緒 言

電子部品は高機能・小型化の要求から高密度化が進み、光学的な外観検査のみでは品質確認が困難となっているため、X線を用いた内部観察が実施されている。

X線により小型電子部品の微細な内部構造を観察するためには、拡大撮影されたX線画像が必要であるが、汎用X線装置として普及しているミリフォーカスX線発生器を用いた拡大撮影では、焦点寸法と幾何学的配置（拡大撮影）により像の外周部に半映像としてボケ（以下、焦点ボケと記す）が生じ、鮮明な画像が得られない。焦点ボケの大きさは、焦点寸法と焦点-撮影対象物-X線ディテクタの相互距離の大小により変化する¹⁾。

近年は、X線焦点寸法が小さく高精細画像を得ることができるマイクロフォーカスX線装置を用いた内部観察や検査に関する多数の報告^{2)~4)}が行われている。しかし、装置価格が非常に高額であることから、未だ普及していない状況である。このような状況の中で、溶接部の検査等で普及している焦点寸法が大きい汎用のミリフォーカスX線装置を用いて小型電子部品の内部構造が観察可能となれば、装置の利用範囲を大幅に拡大することができる。

X線を用いた各種撮影方法の中に、X線源または被写体を移動させながら撮影する移動撮影方法（インモーション・ラジオグラフィ）⁵⁾がある。これは、放射線の線束を細隙スリットで絞り、X線をほぼ並行ビームにして管の円周部や長尺部品を連続して撮影する方法である。

本研究では、移動撮影方法を参考に、汎用のミリフォー

カスX線発生器に細隙スリットとしてコリメータを取り付け焦点ボケの改善を試み、静止撮影で精細な拡大画像を得るための検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

撮影に使用したミリフォーカスX線発生器（フィリップス製MG226/4.5）は、陽極設置型の直流X線方式（コンスタントポテンシャル型）で、ベリリウム窓メタルX線管を使用し、軟X線と、アルミフィルターを付加することで硬X線を照射できる公称焦点寸法（旧規格IEC336）2.0×2.0mmと0.6×0.6mmの二重点を有する装置である。また、デジタルX線透過画像を取得するため、1画素が水平7.2μm×垂直5.6μmで2,720万画素4,096階調（12bit）のモノクロCCDのX線エリアセンサ（アールエフ製NAOMI/NX-04S）を用いた。X線発生器とX線エリアセンサの外観写真を図1に示す。



図1 X線発生器とX線エリアセンサ

*機械技術部（現 生産技術部）

2. 2 撮影方法

撮影方法の模式図を図2に示す。X線発生器から照射されたX線は、コリメータで絞られ撮影対象物を透過してX線エリアセンサに到達し、画像が表示される。撮影対象物をコリメータとX線エリアセンサ間に配置し、撮影対象物の位置がX線発生器からの距離に応じて拡大率が変化する。ここで、幾何学的拡大率 (M) は、(1)式で表される。

$$M = (L1 + L2) / L1 \quad (1)$$

L1 : 焦点から撮影対象物までの距離

L2 : 撮影対象物からX線エリアセンサまでの距離

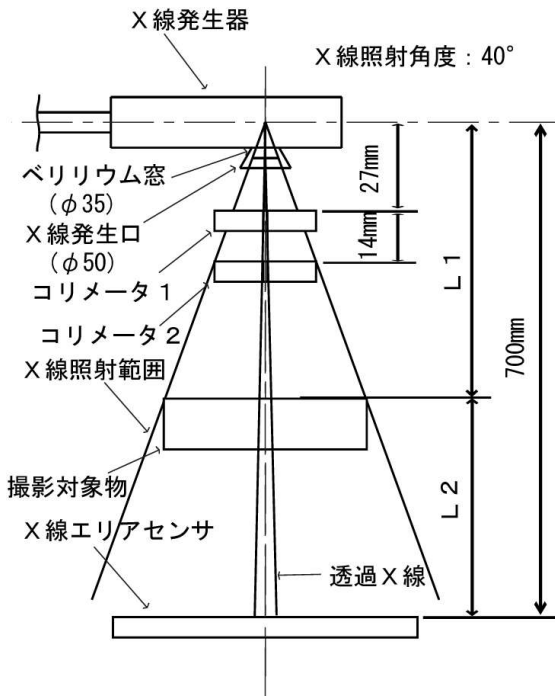


図2 撮影配置

2. 3 撮影条件

撮影条件を表1に示す。X線発生器(線源)からX線エリアセンサまでの距離は一定(700mm)とした。撮影対象物をセンサに近づけた等倍撮影と、線源から350mmの位置に置いた2倍拡大撮影を行った。線質は、アルミフィルタ取付け部(焦点から27mm)にコリメータを取付けるため、軟X線を使用して撮影した。コリメータは、1個ないし2個使用し、コリメータ間の距離は14mmとして、コリメータの穴径を変えて画像に及ぼす影響を調べた。X線照射時間は、1秒で画像を取得し、X線出力については管電圧と管電流を変化させ、画像を確認しながら適正条件を設定した。焦点寸法は、一般的に普及している比較的安価な装置が大焦点の寸法に近いことから、汎用性を考慮して大焦点(旧規格IEC336)2.0×2.0mmによる撮影で行った。

表1 撮影条件

項目	撮影条件
線源(焦点)からセンサまでの距離	700mm
線質	軟X線
コリメータ取付け位置	焦点から27mm
コリメータ間距離	14mm
コリメータ穴径	0.1~1.6mm
X線照射時間(画像取得時間)	1秒
管電圧(kVp)	20~110
管電流(mA)	1~15
公称焦点寸法(大焦点)	2.0×2.0mm

3. 撮影結果

3. 1 放射線透過試験用透過度計の撮影

放射線透過試験で識別限界コントラストを確認するために用いられている放射線透過試験用透過度計(JIS Z 2306-2000)(以下、透過度計と記す)による本装置での等倍撮影と拡大撮影時の空間識別能の把握を行った。その際の評価尺度として透過度計識別度(以下、識別度と記す)を求めた。ここで、識別度は、(2)式で表される。

$$\text{識別度}(\%) = \text{確認可能な最小線径}(\text{mm}) / \text{材厚}(\text{mm}) \quad (2)$$

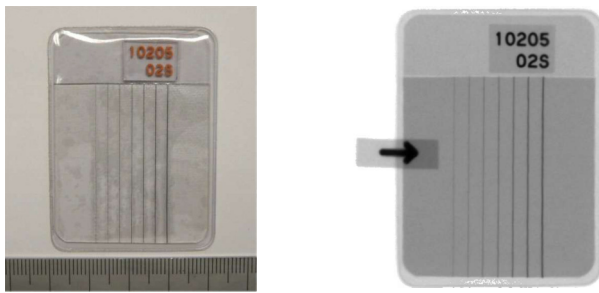
材厚 : 撮影対象物の全厚さ

撮影に使用した透過度計は、針金形透過度計の一般形(図3及び4)で材質がステンレス(SUS304)の呼び番号02S(外観写真を図3(a))とアルミニウム(A1050WS)の呼び番号04A(外観写真を図4(a))の2種類である。なお、これらは、直径の異なる7本の線によって構成され、左側から右側へ順次太くなるように配列されている。透過度計の線径及び線径の配列を表2に示す。

表2 透過度計の線径及び線径の配列

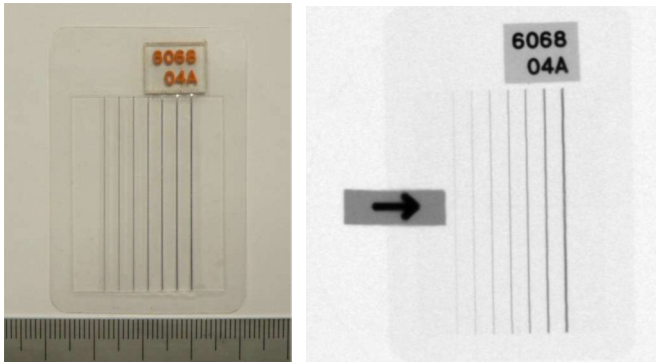
呼び番号	線径及び線径の配列 (μm)						
02S	50	63	80	100	125	160	200
04A	100	125	160	200	250	320	400

透過度計単体での撮影の場合、02Sが等倍撮影(図3(b)), 2倍拡大撮影ともに最小線径の50μm, 04Aが等倍撮影(図4(b))で最小線径の100μmの線を確認することができた。



(a) 外観写真 (b) 等倍撮影

図 3 針金形透過度計の一般形 (O2S)



(a) 外観写真 (b) 等倍撮影

図 4 針金形透過度計の一般形 (O4A)

そこで、厚さ及び材種の影響に対する空間識別能を確認するために、ステンレス板（厚さ 1 mm の SUS304 板）とアルミニウム板（厚さ 2～15 mm の A1100 板）に O2S を、アルミニウム板（厚さ 5 mm の A1100 板）に O4A を重ねて同時撮影した。

撮影の結果、ステンレスにおける厚さの影響は、O2S に板厚 1 mm の SUS304 板を同時撮影した場合、管電圧 70 kVp、管電流 2 mA の等倍撮影（図 5 (a)）で $63\mu\text{m}$ （識別度 6.3%）の空間識別能が、2 倍拡大撮影（図 5 (b)）を行うと $100\mu\text{m}$ （識別度 10%）の空間識別能となり、線もボケて不鮮明となった。そこで、2 個のコリメータ（線源側の穴径 0.8 mm、2 個目の穴径 1.6 mm）を用いて管電圧 65 kVp、管電流 8 mA の 2 倍拡大撮影（図 6）を行った場合、 $63\mu\text{m}$ （識別度 6.3%）の線径が確認でき、空間識別能が向上した。また、アルミニウムの場合、O4A に板厚 5 mm の A1100 板を同時撮影した場合、管電圧 42 kVp、管電流 3 mA の等倍撮影（図 7）で $100\mu\text{m}$ （識別度 2%）の空間識別能であった。

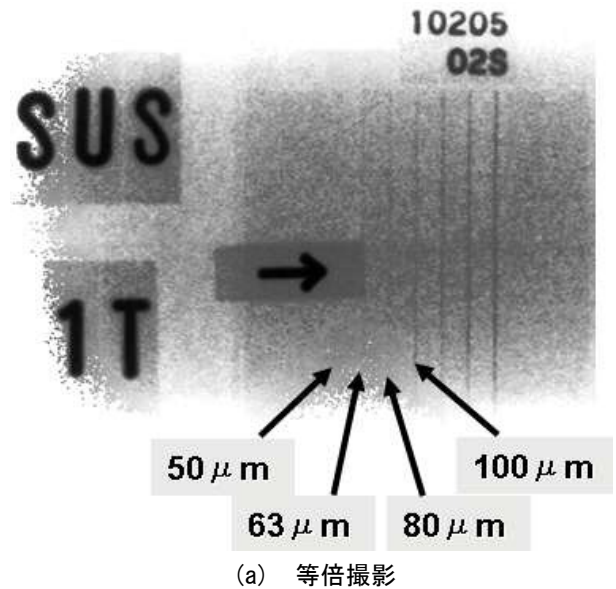
比較参考のために、マイクロフォーカス X 線装置（ソフテックス製 3DV-901-S）でのステンレス板（厚さ 1 mm の SUS 304 板）に O2S を重ねた等倍及び拡大撮影も行った。撮影条件は、焦点寸法 $10\mu\text{m}$ で、線源から X 線 I. I.（イメージンシファイア）までの距離を 400 mm、管電圧 100 kVp、管電流 0.1 mA とした。

マイクロフォーカス X 線装置で O2S に板厚 1 mm の SUS304 板を同時撮影した場合、等倍撮影で $125\mu\text{m}$ （識別度 12.5%）及び 2 倍拡大撮影で $80\mu\text{m}$ （識別度 8%）の空間識別能で

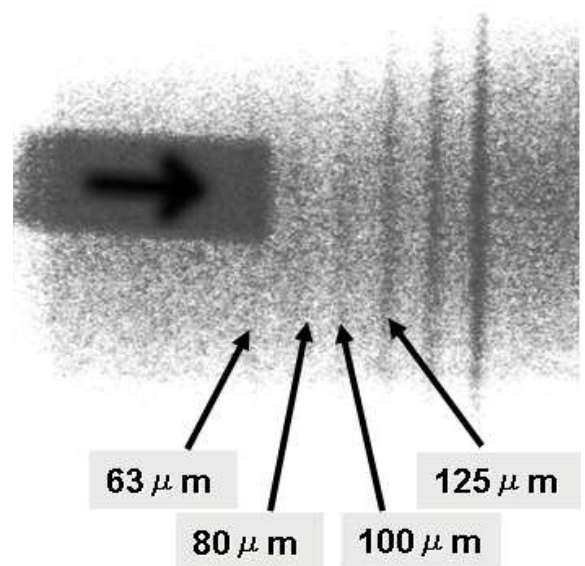
あったが、4 倍拡大撮影（図 8）を行うことで $50\mu\text{m}$ （識別度 5%）の線を識別できた。これは、X 線 I. I. の中心解像度が 4.8 LP/mm（約 $104\mu\text{m}$ ）で拡大率に応じて、解像限界に近い寸法までが識別できたと考えられる。

材種の影響についてはアルミニウム板上にステンレスの線を確認するために、O2S に A1100 板の板厚を変えて同時撮影した結果、10 mm までの等倍撮影で $50\mu\text{m}$ （識別度 0.5%）、15 mm の等倍撮影（図 9）で $80\mu\text{m}$ （識別度 0.53%）の空間識別能があり、軽金属板に対して透過しにくい金属の検出は空間識別能が高いことがわかった。

以上のことから、等倍撮影ではミリフォーカス X 線装置もマイクロフォーカス X 線装置も X 線ディテクタの性能に応じた識別度であったが、拡大撮影することでマイクロフォーカス X 線装置では識別度が向上し、汎用 X 線装置では低下した。しかし、汎用 X 線装置でも 2 個のコリメータを用いることで 2 倍拡大撮影において識別度が向上した。



(a) 等倍撮影



(b) 2 倍拡大撮影

図 5 ステンレス板に O2S を重ねたときの撮影画像

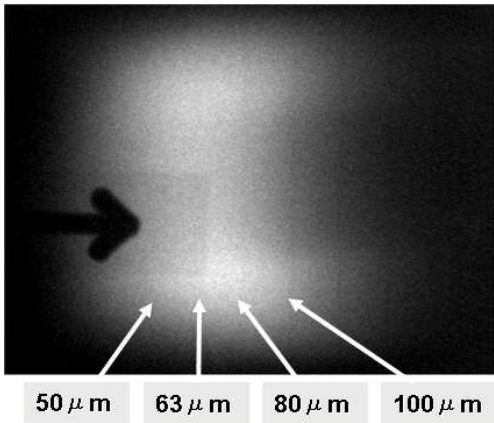


図6 コリメータを用いた透過度計の2倍拡大撮影
線源側コリメータの穴径0.8mm,
2個目のコリメータの穴径1.6mm

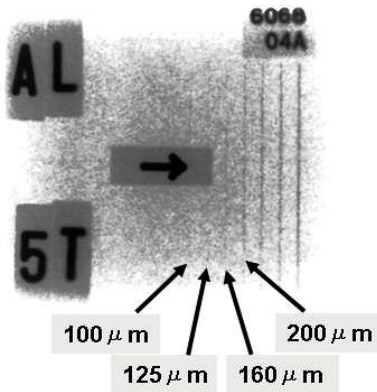


図7 アルミニウム板に04Aを重ねたときの等倍撮影

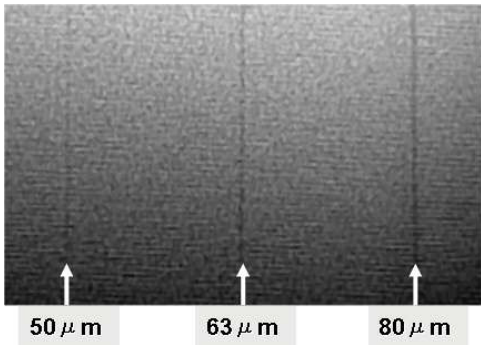


図8 マイクロフォーカスX線による
透過度計の4倍拡大撮影

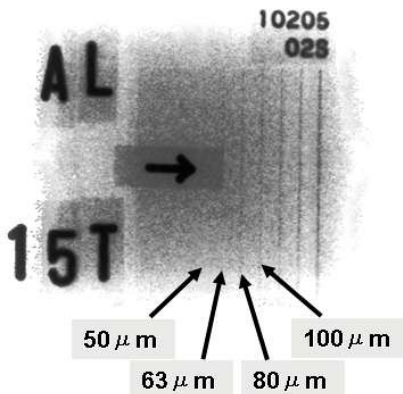


図9 アルミニウム板に02Sを重ねたときの等倍撮影

3. 2 X線用解像力テストチャートの撮影

本装置での画像分解能を把握するために、X線用解像力テストチャート（JIS Z 4916-1997）（以下、テストチャートと記す）を用いて等倍撮影と2倍拡大撮影を行った。使用したテストチャートはX線装置及びX線映像装置の解像力を測定するときに用いられる高解像力用のR-2Pb50に準拠したType11（図10）である。

その結果、管電圧25kVp、管電流3mAの等倍撮影で3.2LP/mm（約156μm）の画像分解能であったが、管電圧25kVp、管電流3mAの2倍拡大撮影で画像分解能が1.0LP/mm（500μm）（図11）となり、焦点ボケが大きく不鮮明な画像になることがわかった。

管電圧60kVp、管電流10mAの2倍拡大撮影で2個のコリメータ（線源側の穴径0.4mm、2個目の穴径0.8mm）を用いて撮影した場合、4.0LP/mm（125μm）と画像分解能が向上した（図12）。

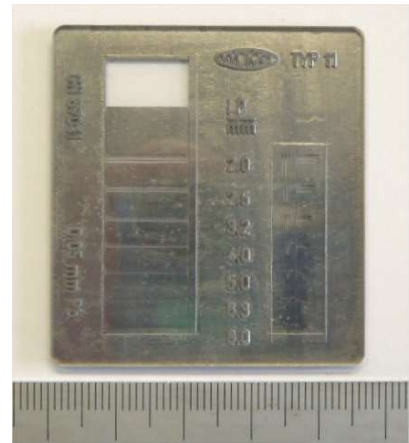


図10 テストチャートの外観写真



図11 テストチャートの2倍拡大撮影

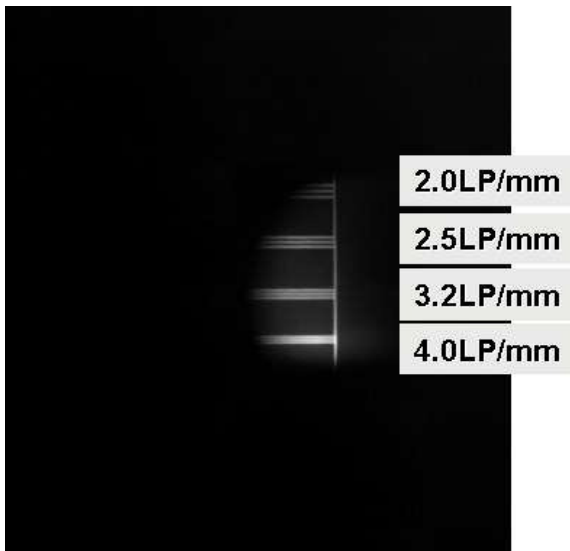


図12 コリメータを用いたテストチャートの
2倍拡大撮影

線源側コリメータの穴径0.4mm,
2個目のコリメータの穴径0.8mm

3. 3 電子部品の撮影

IC (図13) の等倍撮影と2倍拡大撮影を行った。管電圧30kVp, 管電流3mAの等倍撮影 (図14) では、画像は鮮明に確認できるものの、小型で微細なため、内部構造まで確認することは困難であった。画像処理で拡大することは可能であるが、拡大撮影と違い、微細部を鮮明に拡大することはできない (図15)。

管電圧30kVp, 管電流5mAの2倍拡大撮影では、焦点ボケが大きくリード線も確認できない画像 (図16) となった。同条件の小焦点 (公称焦点寸法0.4mm×0.4mm) で撮影した画像 (図17) では、鮮明な画像が得られることから焦点寸法が拡大撮影に及ぼす影響が大きいことが確認できた。

管電圧70kVp, 管電流5mAの2倍拡大撮影で2個のコリメータ (線源側の穴径0.4mm, 2個目の穴径0.8mm) を用いて撮影した場合、チップ内のボンディングワイヤは確認できなかったが、リード線は確認できる画像 (図18) が得られ、小焦点の画像と遜色ない鮮明さであることからコリメータによる焦点ボケの改善が図られた。

また、コリメータを用いて撮影した画像は映像寸法が輪郭周辺で幾何学倍率の2倍よりも拡大された2.13倍になっており、コリメータからの幾何学倍率と一致することから擬似的にコリメータが焦点位置になっていることがわかった。

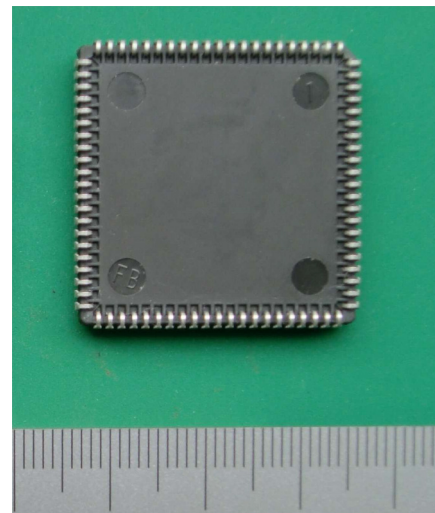


図13 ICの外観写真

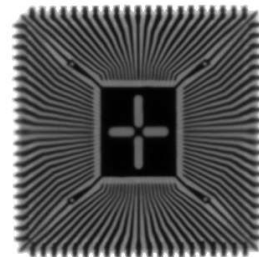


図14 ICの等倍撮影

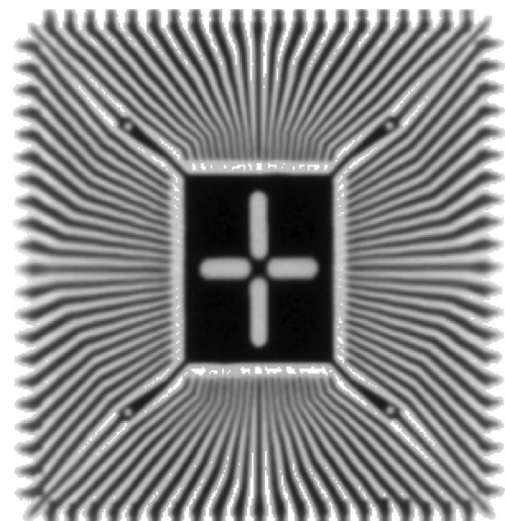


図15 等倍撮影の画像処理による拡大

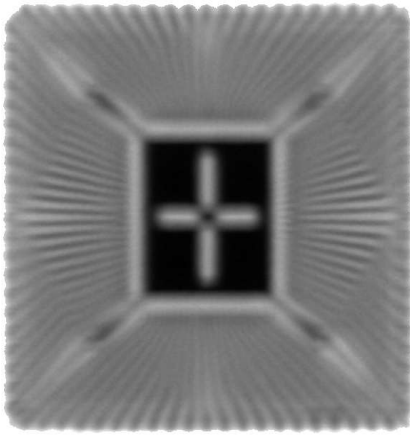


図16 ICの2倍拡大撮影

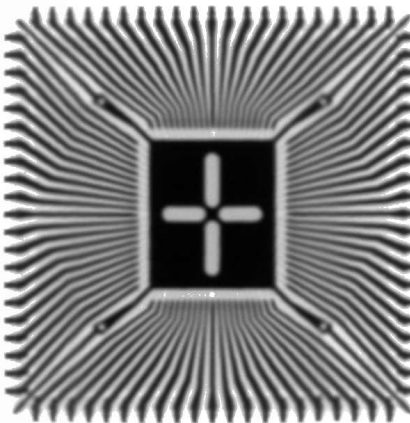


図17 ICの小焦点による2倍拡大撮影

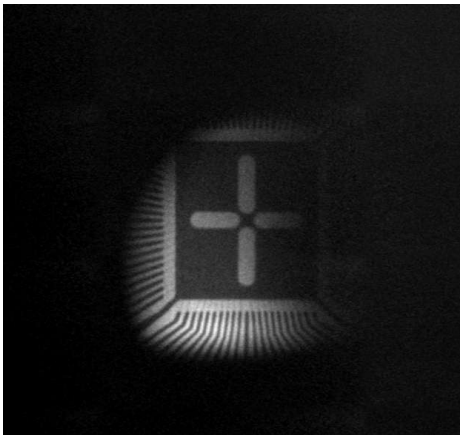


図18 コリメーターを用いたICの2倍拡大撮影
線源側コリメーターの穴径0.4mm,
2個目のコリメーターの穴径0.8mm

4. 結 言

焦点寸法が大きいX線装置では、拡大撮影に及ぼす影響が大きく、2倍拡大撮影でも焦点ボケが著しいことが確認できた。

コリメーターを用いて2倍拡大撮影を行うことで、X線の照射範囲は絞られるものの、焦点ボケが改善したX線画像を取得することができた。

また、コリメーターを用いて撮影した画像は幾何学倍率よりも拡大されていることからコリメーターが擬似的に焦点位置になっていた。

板厚の影響については、1mm厚のステンレス板の2倍拡大撮影で $100\mu\text{m}$ （識別度10%）の空間識別能であったが、2個のコリメーターを用いて2倍拡大撮影を行うことで $63\mu\text{m}$ （識別度6.3%）と空間識別能が向上した。

材種の影響については、10mm厚までのアルミ板の等倍撮影で $50\mu\text{m}$ （識別度0.5%）のステンレス線を、15mm厚のアルミ板の等倍撮影では $80\mu\text{m}$ （識別度0.53%）のステンレス線を確認でき、軽金属板に対して透過しにくい金属の検出は空間識別能が高いことがわかった。

以上のことから、マイクロフォーカスX線装置ほど拡大撮影時での鮮明な画像は得られないものの汎用のミリフォーカスX線装置でも2個のコリメーターを用いることで、 $0.6\times 0.6\text{mm}$ 程度の公称焦点寸法（旧規格IEC336）の撮影と同程度のX線透過画像が取得できる手法であり、ミニフォーカスX線装置の代用として有効活用が期待できる。

謝 辞

本研究でX線エリアセンサにより取得したデジタル画像は、平成21年度に導入したJKA補助によるX線画像表示装置を使用した。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) (社)日本非破壊検査協会：放射線透過試験A, (社)日本非破壊検査協会 (1981) p36-40
- 2) 伊東秀高, 増田信次, 小森谷廣子：神奈川県産業技術センター研究報告, 14, 34-35 (2008)
- 3) 藤井正司：非破壊検査, 58, 6, 214-218 (2009)
- 4) 横野泰和：溶接学会誌, 79, 8, 9-24 (2010)
- 5) 石井勇五郎編：新版 非破壊検査工学, 産報出版(株) (1993) p205-207