

先進的 X 線検査装置によるフィールド試験の検討

田北 雅彦^{*1} 小森 海志^{*2} 佐藤 雅保^{*3} 細谷 昌厚^{*4}
Takita Masahiro *Komori Kaishi* *Sato Masamori* *Hosoya Masaatsu*
 鈴木 良一^{*5} 豊川 弘之^{*6} 平 義隆^{*7} 加藤 英俊^{*8}
Suzuki Ryoichi *Toyokawa Hiroyuki* *Taira Yoshitaka* *Kato Hidetoshi*

将来の放射線検査において普及する可能性のある、従来よりも小型の X-バンドまたは C-バンドライナックや、乾電池で動作する超小型 X 線検査装置が世の中に登場し始めている。研究段階のもので限定的な仕様ではあったが、これら先進的な X 線検査装置を使用させていただく機会を得ることができた。また、インライン検査やラボなどでの照射ボックスによる使用が主流である、マイクロフォーカス X 線装置についても小型軽量な装置があるので、これらを含めて高感度の DR 装置と組み合わせて評価試験を実施した。これら小型で簡便な放射線検査装置がフィールド検査へ適用できれば、検査事業部の業容拡大に資すると考えている。

キーワード:放射線透過試験 (RT)、コンピュータドラジオグラフィ (CR)、デジタルラジオグラフィ (DR)、イメージングプレート (IP)、平板型半導体検出器 (フラットパネルディテクタ: FPD)

1. はじめに

新型 X 線源として国立研究開発法人産業技術総合研究所 (AIST) が保有している乾電池式超小型 X 線源や C-バンドライナックの能力を把握し、有効であることが明らかになれば近い将来、新たなニーズに対応することが可能となる。

また、当社が設備として 2014 年に導入したマイクロフォーカス X 線源は、軽量かつコンパクトな装置でフィールドでの検査が期待できる。

マイクロフォーカス X 線源は現在、ラボあるいはインラインで多くが使われている。これを感じ

度の高いフラットパネルディテクタ (FPD) と組み合わせることで、フィールドでの簡便な装置として使えるようになれば、現地不適合調査などのニーズは多くあると考えている。将来これらの装置を使用することで当社の放射線検査業務における業容拡大に資することを目的として、本試験を実施したので紹介する。

2. 新線源による試験概要

新線源として C-バンドライナック 950keV と超小型 X 線検査装置 100keV およびマイクロフォーカス X 線装置 150keV を使用し、各種像質

*1: 検査事業部 横浜検査部 課長

*2: 検査事業部 横浜検査部

*3: 検査事業部 横浜検査部 部長

*4: 元技師長

*5: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 X 線・陽電子計測研究 Gr. グループ長 主席研究員

*6: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 放射線イメージング計測研究 Gr. グループ長

*7: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 放射線イメージング計測研究 Gr. 研究員

*8: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 X 線・陽電子計測研究 Gr. 研究員

計を撮影し現 JIS 規格等と比較した。また、ワールド試験を考慮して試験条件等、撮影媒体（検出器）別の比較も実施している。C-バンドライナックと超小型 X 線検査装置は AIST 設置の照射 BOX 内にあるため、フォーカス・フィルムディスタンス（FFD）等は制限のある条件で実施している。

3. 使用機材

本試験で使用した機材は、以下のとおりである。

・ X 線発生装置

(a) AIST C-バンドライナック⁽¹⁾

950keV(今回は 100keV)管電流 mA オーダー、
焦点寸法 13mm

(b) AIST 所有 超小型 X 線装置

100keV、管電流数 mA オーダー、焦点寸法 1mm

(c) 浜松ホトニクス株式会社 L12161-07

管電圧 150keV、試験管電流 66 μ A、焦点寸法
5 μ m

・ デジタル RT 装置

(a) GESIT 社製 フラットパネルディテクタ

DXR250C-W ピクセルピッチ 200 μ m

サイズ 8 インチ (200 \times 200mm)

最大露出時間 150s

(b) GESIT 社製 画像処理ソフト Rythem

・ JIS 線形透過度計⁽²⁾

02S、04F⁽³⁾、04A⁽⁴⁾(図 1)

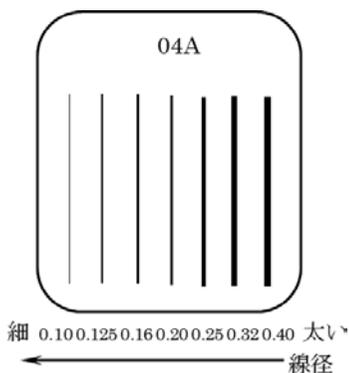


図 1 04A

- ・ Duplex Wire (EN462-5:1996)⁽⁵⁾(図 2)
- ・ マイクロフォーカス X 線用解像度試験片
JIMA 製 RT RC-02B (チャート 0.4 μ m ~ 15 μ m)
(図 3)



Element No. (D=Duplex)	Corresponding unsharpness	Wire \varnothing and spacing, mm
13D	0,10	0,050
12D	0,13	0,063
11D	0,16	0,080
10D	0,20	0,100
9D	0,26	0,130
8D	0,32	0,160
7D	0,40	0,200
6D	0,50	0,250
5D	0,64	0,320
4D	0,80	0,400
3D	1,00	0,500
2D	1,26	0,630
1D	1,60	0,800

図 2 複線形像質計 (DW)

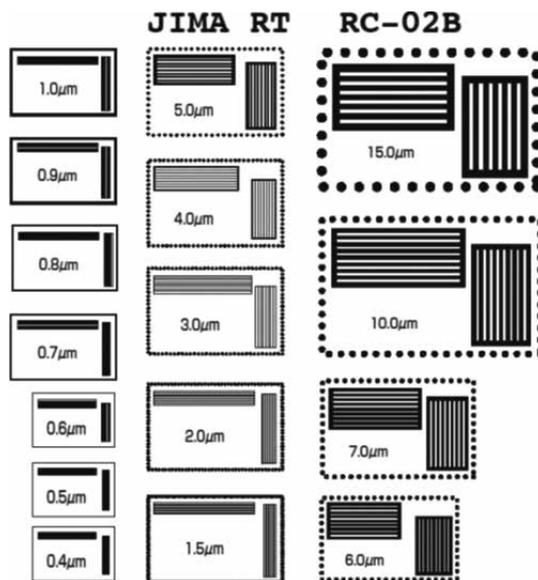


図 3 解像度試験チャート

- ・ タングステンワイヤ (図 4)
(縦横 4 本 : 20 μ m、10 μ m、8 μ m、5 μ m 配置)

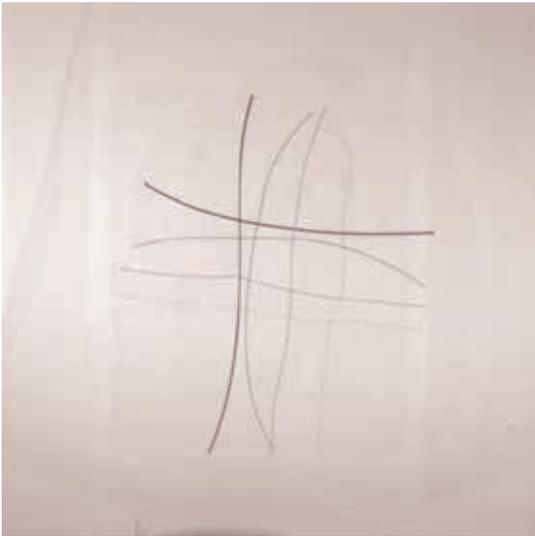


図 4 タングステンワイヤ

- ・ アルミ (AL) 板 5.5mm ~ 25mm
- ・ アルミ (AL) インペラ
- ・ 鋼板 0.1、0.5、1.0、5.0、10mm 各 3 枚

4. C-バンドライナック 950keV による撮影

使用した装置は本試験の段階では 100keV であり、焦点寸法は 13mm となっていた。これから管電圧を上げて、焦点寸法も絞る予定の装置である。

4.1 撮影条件

本試験での撮影条件は、以下のとおりである。

- 管電圧 100keV 管電流数 mA
- パルス周波数 10Hz
- 焦点寸法 13mm
- 焦点 -FPD 間距離 FFD : 410mm
- 等倍撮影

4.2 撮影結果

撮影試験を実施した時は X 線出力が 100keV に制限されており最大出力ではなかった (図 5)。そのため、エネルギー 950keV に対応する 50mm 程度の厚肉な試験片を撮影するには、照射 BOX の大きさから改善しなければ FFD が不足すると考えられる (図 5)。他の装置と共通の試験片で対応できる点は良かったが、本来期待する試験は困難であった。

また、焦点寸法が照射口の寸法と同等で 13mm 程度と非常に大きく、一般の非破壊検査用 X 線装置の仕様とは違う状態であった。焦点寸法の対応は、今後実施されるようである。これらのことが影響していたのか、今回の撮影画像を見ると全体的に散乱線の影響が大きく、コントラストが小さくなった。そのため、内部の様子はほぼわからないが、条件が合えばシルエットは見えるという程度の画像 (図 6) となった。

図 7 の高濃度の円形の輪郭は、照射口に対応する像である。図 8 は FPD 表面に貼り付けた複線線像質計 (DW) の空間分解能を示すもので、参考ではあるが D5 (0.32mm の線) の線対が確認された。

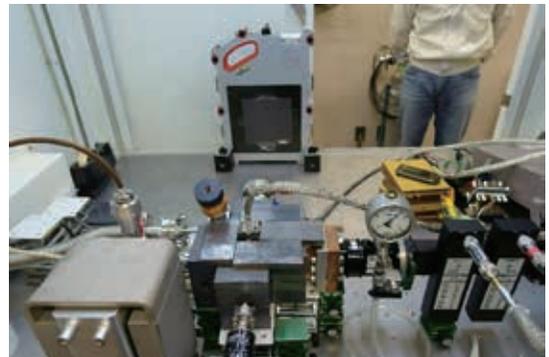


図 5 C-バンドライナック照射 BOX 内

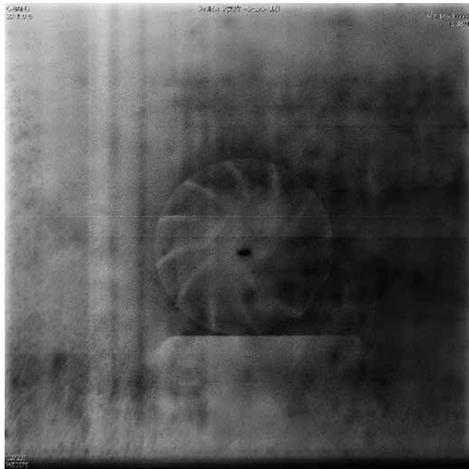


図 6 AL インペラ 60s × 10f

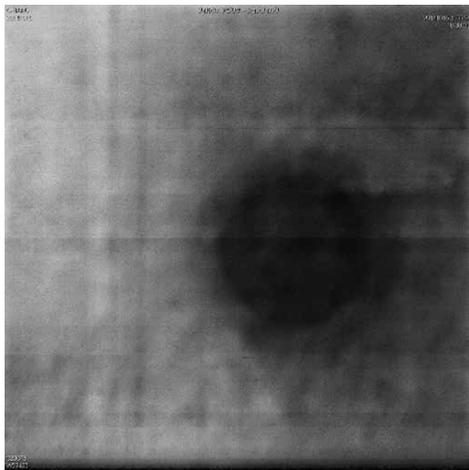


図 7 撮影対象なし 60s × 1f

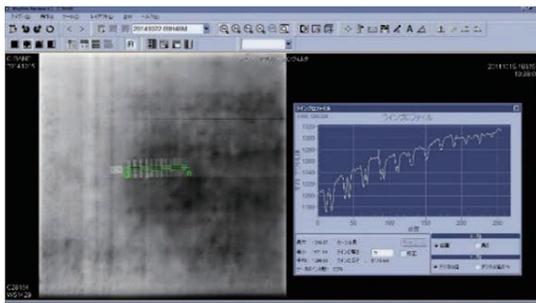


図 8 DW ラインプロファイル⁽⁶⁾ D5

5. 超小型 X 線装置による撮影

超小型ということでは本体の大きさは、CD ケースを 5 枚重ねた程度で電池駆動が可能となる。

現在 120keV 前後の出力が可能な X 線装置である。今回は試験用に電源は乾電池でなく、連続照射が可能になる電源回路を使用した (図 9)。



図 9 超小型 X 線装置 (青色)

5.1 撮影条件

本装置の撮影条件は、以下のとおりである。

管電圧 95keV 管電流数 mA

焦点寸法 1mm

焦点 -FPD 間距離 FFD : 390mm

等倍撮影

5.2 撮影画像と露出条件

図 10 と図 11 は、アルミ板の上に JIS の透過度計 04A を配置し露出時間 1.2s で撮影し、フレーム数 10 枚で平均化した画像である。

図 12 は、アルミ製インペラで複雑形状でも人工工がフィルムと同様な撮影ができることを確認した画像である。

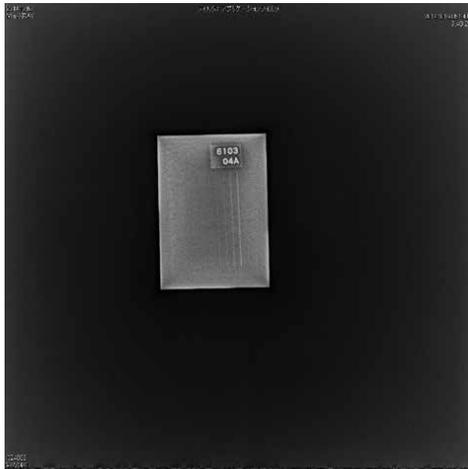


図 10 AL5.5mm 04A5 本 1.2s × 10f



図 11 AL25.0mm 04A2 本 1.2s × 10f

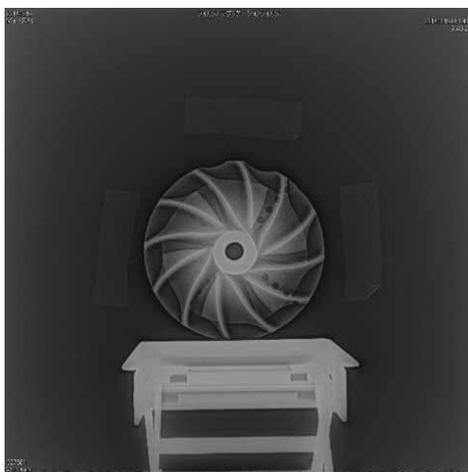


図 12 AL インペラ 1.2s × 10f

5.3 撮影結果

本装置では焦点寸法 1mm、数 mA の管電流を持つ通常の非破壊検査用 X 線装置と変わらない性能を有しており、100keV の装置とはほぼ同等の画像を得ることができた。照射 BOX は C-バンドライナックと同じものを使用しているため、FFD は 390mm と短い。ブローホールなどの体積欠陥では、メッキ割れ試験片で意図していなかった腐食と思われる欠陥像が観察された。当初は付着物に見えたが、濃度分布からもわかるとおり欠陥部の濃度が高く部分的に密度が低いことを示している (図 13、図 14)。

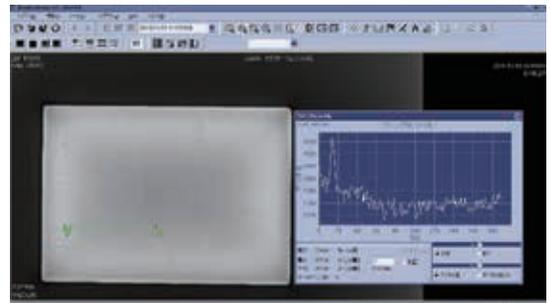


図 13 メッキ割れ試験片の欠陥部ラインプロファイル



図 14 欠陥部の顕微鏡写真

図 15 は、線径が、AL 板の材厚に対する JIS 透過計の規格要求である材厚の 2% 付近以下（現規格は 2% 前後の線径を指定）を満足しているかを示している。5.5mm の材厚では若干上回っているが、概ね規格を満足する結果であった（JIS Z 3105：2003 では t6.3mm 以下で B 級は $\phi 0.1\text{mm}$ が確認できなければならない）。今回の撮影では、材厚に関わらず管電圧を一律 95keV で撮影した。材厚の薄い方では、管電圧を下げることでコントラストを向上させる余地がある。さらに撮影条件の最適化（FFD など）により、5.5mm 付近の撮影における像質の改善を図ることができる可能性があると思われる。

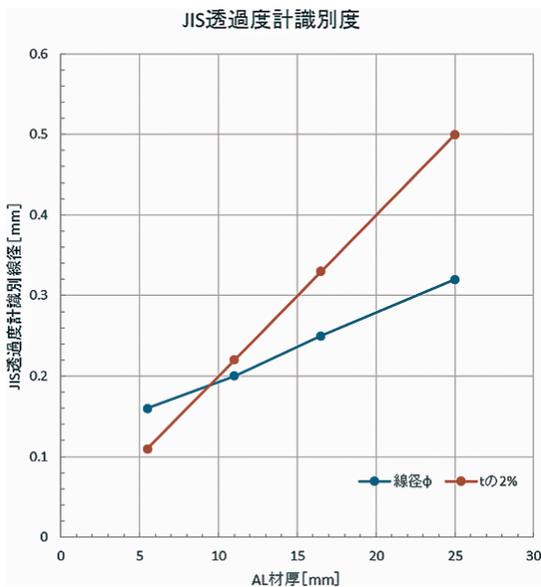


図 15 透過計識別度との関係

6. マイクロフォーカス X 線検査装置

6.1 像質と拡大率の比較

高精細フィルムによる等倍撮影の画像を基本として、高感度ではあるが $200\mu\text{m}$ とフィルムに対して分解能の劣る FPD 撮影画像をマイクロフォーカス X 線で拡大撮影することにより、像質（分解能）を改善することを検討する。

フィルムと FPD の最適撮影条件はフィルム濃度を濃度計で 2.0 とした。FPD におけるグレイバリュウ (GV) は、GV 値を 4000 以上 5000 以下として簡易的に同等の最適濃度となるよう撮影条件を統一した。

6.2 拡大率と距離の関係

マイクロフォーカス X 線装置は管電流値が小さいため、距離を長くとると距離の 2 乗に反比例してエネルギーが低下するので効率が落ち、露出時間がかかることになる。今回の試験では 600mm 程度の距離であれば、フィルムおよび FPD での評価に問題が生じない実用的な距離として適当と判断し、試験の際の条件として採用した（図 16）。

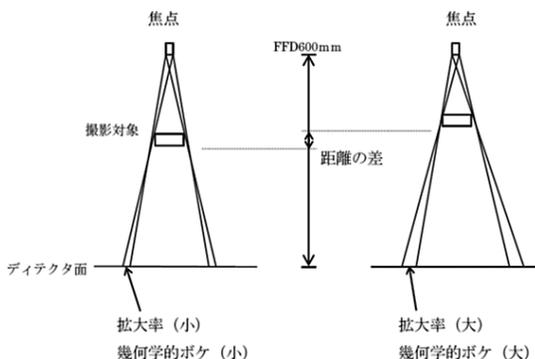


図 16 距離による拡大率変化と幾何学的ボケの関係

マイクロフォーカス X 線装置では、撮影対象の位置関係を変化させることで撮影倍率を変化させることができる（線源に近づけるほど拡大率が大きくなる）。

(1) タングステンワイヤの倍率比較撮影

タングステンワイヤ径に対し、ポータブル X 線のフィルム撮影結果と FPD 撮影結果の画像の拡大率変化により同等の分解能になるよう過去の IP の結果も含め、表 1 のとおり比較した。

確認の結果、IP と FPD の拡大率を 3 倍程度に上げるとポータブル X 線のフィルム画像と同等の画質が得られることが確認できた。したがって、フィールド検査では 3 倍以上の拡大率で検査することで、フィルム以上の空間分解能で検査が可能になることがわかった（図 17、図 18）。

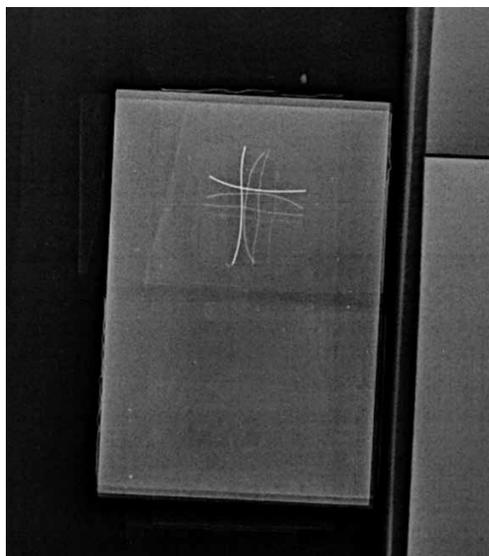


図 18 マイクロフォーカス X 線 FPD
4 本：5 μ m 倍率 3 倍

表 1 ポータブル X 線フィルム撮影と拡大撮影の空間分解能の比較

タンガステンワイヤ径 ϕ [μ m]	マイクロフォーカス X 線:フィルム $\times 1$ 倍	ポータブル X 線:フィルム $\times 1$ 倍	マイクロフォーカス X 線:IP $\times 1$ 倍	マイクロフォーカス X 線:IP $\times 2$ 倍	マイクロフォーカス X 線:IP $\times 3$ 倍	マイクロフォーカス X 線:FPD $\times 3$ 倍
5	○	×	×	×	○	○
8	○	○	×	×	○	○
10	○	○	×	○	○	○
20	○	○	×	○	○	○

○：確認可， ×：確認不可

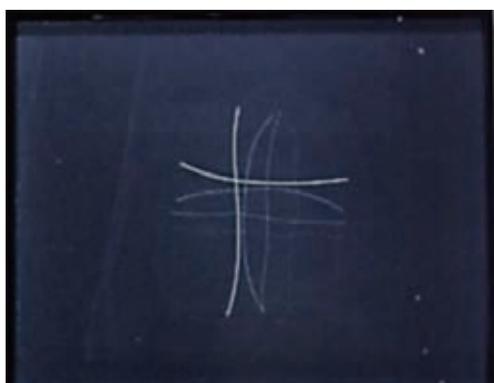


図 17 ポータブル X 線フィルム画像 等倍

(2) マイクロフォーカス X 線装置の露出条件

表 2、図 19 より高感度 FPD を使用することで、150keV のマイクロフォーカス X 線源でも材厚が 20mm 程度までの鋼材の検査が可能になることが確認できた。図 19 からマイクロフォーカス X 線の露出時間が算定できる。これらのことから、FPD であれば 30 分程度で撮影可能となるが、フィルム撮影の実施は装置能力とコストの点で現実的でないことがわかる。

表 2 Fe 材厚と FPD 露出時間

Fe 材厚	露出時間 (秒)
0.5	2
1.5	3.5
2.5	5.5
4	10
6	18.5
10.5	47
20	1400

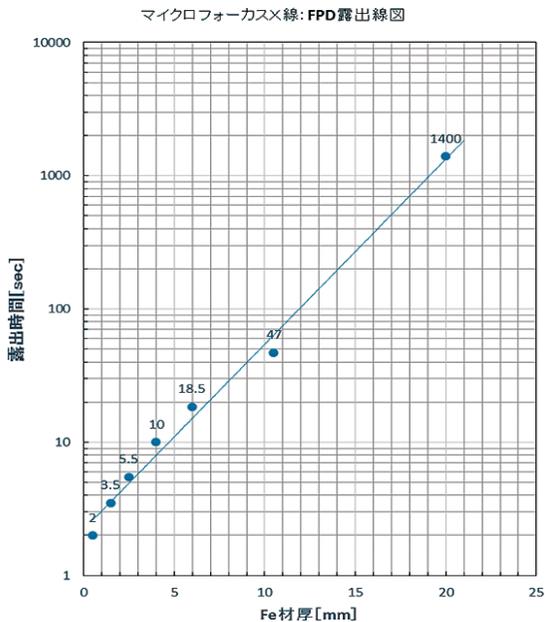


図 19 Fe 材厚と露出時間の関係

(3) マイクロフォーカス X 線装置と IP による
材厚に対する透過度計識別度

JIS Z 3104 等のフィルム撮影における具備すべき条件として、透過度計の識別度がある。材厚の 2% 前後の決められた線径が識別できれば条件を満足しているとされるが (表 3、図 20)、材厚の薄い 5mm 以下の等倍撮影では条件を満足しない傾向があることがわかった。図 21 に示すような

表 3 材厚に対する透過度計識別線径

Fe材厚	線径φ	tの2%
0.5	0.063	0.01
1.5	0.063	0.03
2.5	0.08	0.05
4	0.1	0.08
6	0.1	0.12
10.5	0.125	0.21
20	0.25	0.4

撮影条件: 管電圧 150keV、最大材厚 20.0mm、
管電流 66μA、倍率×1

FPD を使用した放射線検査では、マイクロフォーカス X 線を使用したとしても拡大撮影する必要があることが確認できた。また、露出線図を作成するために材厚に関係なく一律 150keV で試験したことも薄板側でのコントラスト低下の原因として考えられる。

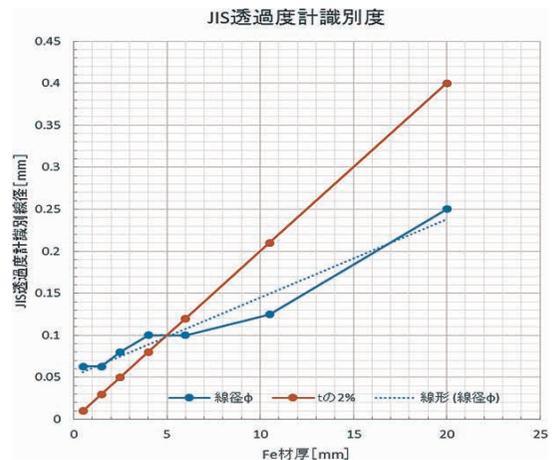


図 20 FPD における Fe 材厚と透過度計識別度の関係



図 21 マイクロフォーカス X 線装置と FPD

(4) 本試験における最大倍率による解像度

FPD を 600mm として試験したため、線源に最も近づけられる距離から最大倍率が得られる (35.2 倍)。この倍率で解像度テストチャートの撮影を実施し、その結果は 4 ~ 5μm であった (図 22)。

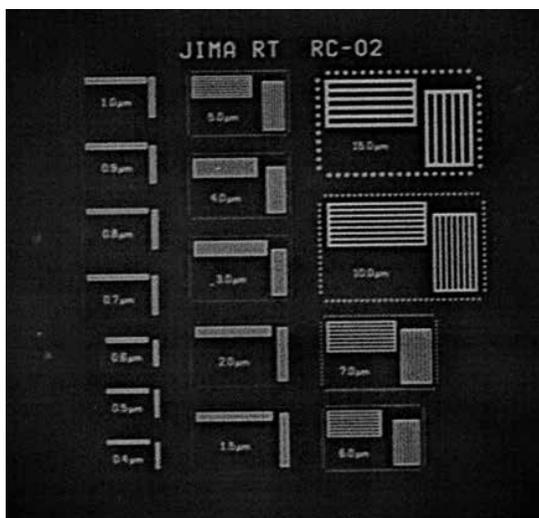


図 22 解像度チャート縦方向 $4.0\mu\text{m}$ 倍率 35.2 倍

7. 考察とまとめ

近い将来、X-バンドやC-バンドのマイクロ波増幅器を用いた小型加速器が実用化され、可搬型の高エネルギーX線源が販売されれば、照射室の天井クレーンに設置されている現在のライナックとは違った使用方法が考えられる。出張検査が可能になるため、今まで不可能であった厚板の現地放射線透過試験が可能となる。国内法では出張に持ち出せるX線装置は、1MeV未満（橋梁検査に限っては4MeV以下）である。そのため、0.95MeVのライナックへの期待は非常に大きい。

また、超小型X線装置は弁当箱程度の大きさしかなく、驚くばかりである。現在120keV程度のX線出力が可能であるが、今後200keV程度にエネルギーが上がれば、鋼材溶接部などに適用範囲が広がると考えられる。今回は100keVのX線装置を使用させていただいたが、ALの撮影では実用域に達していた。小型軽量ゆえに狭あい部の現地検査等に重宝すると考えられる。

一方、検査事業部所有のマイクロフォーカスX線装置と高感度FPDの組み合わせは非常に良好

であった。フィルムでは時間の掛かりすぎで装置冷却能力とコスト面で実現しなかった検査でも比較的短時間で完了できるため、有用性の高い検査手法となる。検出器のピクセルピッチが $200\mu\text{m}$ と粗い印象を受けていたが、拡大率を3倍程度に設定すると高精細フィルムと同等の像質が得られることもわかった。また、 $200\mu\text{m}$ のピクセルピッチで等倍撮影において $20\mu\text{m}$ のタングステンワイヤが検出できたのが不思議な感じではあった。しかし、 $200\mu\text{m}$ 以下のワイヤでも十分な露出時間を掛けることで、画素全体が反応するため拡大して表示されることになり、検出が可能になるということが理解できた。

8. 今後の課題

今後は、実工事にDRとマイクロフォーカスX線装置を適用して行くことが課題となる。現在、想定される検査としては、現場据え付けの小径配管の溶接部検査や組立品の内部検査等がある。IHIグループ内での認知度を高めることや、営業部門と協力しデモンストレーション等を積極的に実施して適用範囲を拡大していく必要がある。

9. おわりに

本試験では、現場で今後使用できるようになる可能性のある先進的なX線装置をAISTのご厚意により使用させていただいた。また、新人放射線業務従事者の育成も含め、これらの先端技術に触れる機会が得られたことは、非常に貴重な経験であった。今後もこれら装置開発の成功を期待しつつ動向に注視したい。

参考文献

- (1) Y.Taira, R.Kuroda, M.Tanaka, H.Kato, R.Suzuki, H.Toyokawa : Fabrication and low-power RF test of C-band RF gun, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, 331, 2014, pp.27-30
- (2) JIS Z 2306 : 2009 : 放射線透過試験用透過度計、一般財団法人日本規格協会
- (3) JIS Z 3105 : 2003 : アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法、一般財団法人日本規格協会
- (4) JIS Z 3104 : 1995 : 鋼溶接継手の放射線透過試験方法、一般財団法人日本規格協会
- (5) BS EN 465-2:1996 : Non-destructive testing- Image quality of radiographs Part 5. Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value, BSI, 1996
- (6) ISO 17636-2:2013 : Non-destructive testing of welds-Radiographic testing- Part2:X- and gamma-ray techniques with digital detectors, International Organization for Standardization, 2013

検査事業部
横浜検査部
課長
田北 雅彦
TEL. 045-759-2280
FAX. 045-759-2146

検査事業部
横浜検査部
部長
佐藤 雅保
TEL. 045-759-2280
FAX. 045-759-2146

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
分析計測標準研究部門
X線・陽電子計測研究 Gr. グループ長
主席研究員
鈴木 良一
TEL. 029-861-5300
FAX. 029-861-5881

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
分析計測標準研究部門
放射線イメージング計測研究 Gr. 研究員
平 義隆
TEL. 029-861-5300
FAX. 029-861-5881

検査事業部
横浜検査部
小森 海志
TEL. 045-759-2280
FAX. 045-759-2146

元技師長
細谷 昌厚

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
分析計測標準研究部門
放射線イメージング計測研究 Gr. グループ長
豊川 弘之
TEL. 029-861-5300
FAX. 029-861-5881

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
分析計測標準研究部門
X線・陽電子計測研究 Gr. 研究員
加藤 英俊
TEL. 029-861-5300
FAX. 029-861-5881