デジタルPCMの基礎的検討
（Digital Phase Contrast Mammography）

聖マリアンナ医科大学病院　画像診断センター

大河原 伸弘

【本日の話題】

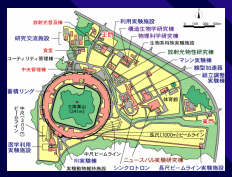
- 位相イメージングの原理
- デジタル画像への応用
- 撮影方法
- 当院での基礎実験
- 実験データに基づいた考察
- 今後への展望

位相イメージングの原理

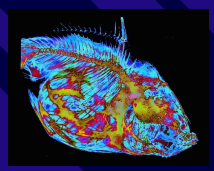
【従来のX線位相イメージング技術】

1991年V.A.Somenkovらにより位相イメージングが成功

1. 放射光X線源
（SPring-8）



2. 微小焦点 X線管
By S.Wilkins (Nature 1996)

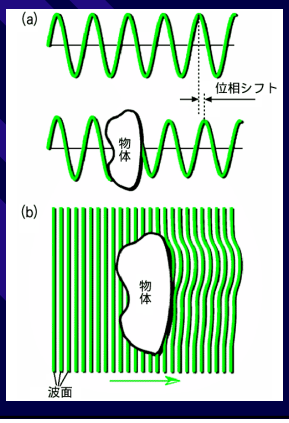


従来は特殊なX線源によってのみ
位相コントラスト画像が得られると考えられていた

位相イメージング

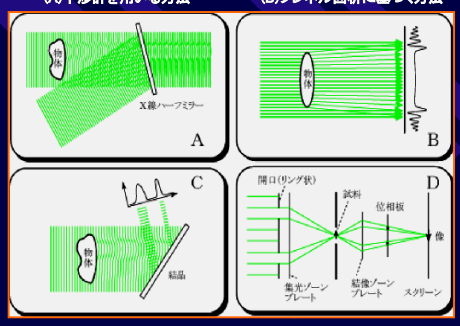
X線は電磁波であり
波としての性質を有す

波の伝わる速さの違い



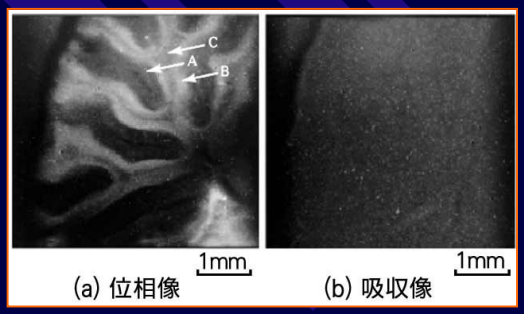
【X線領域で研究されている位相コントラスト法】

(A)干渉計を用いる方法　(B)フレネル回析に基づく方法



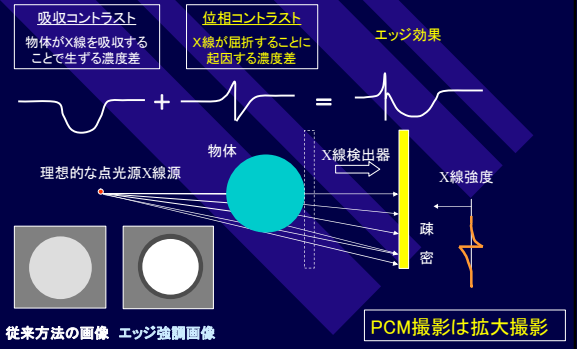
(C)ブラック回析に基づく方法　(D)ゾーンプレートを用いる方法

【干渉計を用いたラットの小脳スライス】



(a) 位相像　　(b) 吸収像

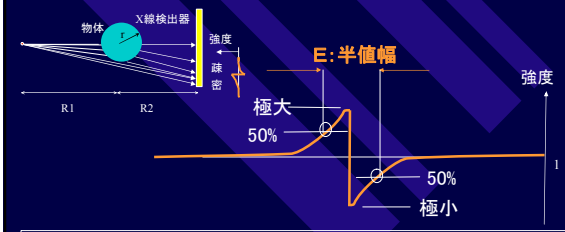
【位相コントラストによるエッジ効果】



PCM撮影は拡大撮影

【位相コントラストの影響因子】

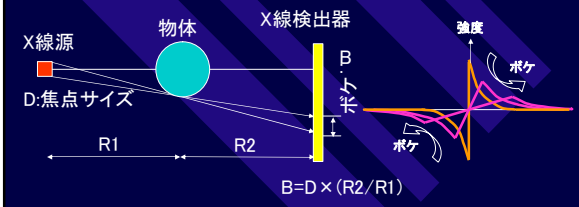
r:被写体の大きさ、 $\delta = a\lambda^2$:管電圧、R1,R2:拡大率



半値幅　$E=2.3(1+R2/R1)^{1/3}\{R2\,\delta(2r)^{1/2}\}^{2/3}$

$\delta = a\lambda^2\ (n=1-\delta)$

実用的な小焦点X線管の場合

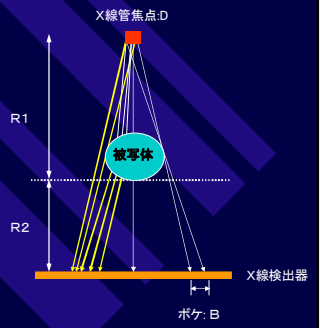


$B=D\times(R2/R1)$

・X線の干渉性が無く、X線の屈折による位相コントラスト。

・幾何学的不鋭によってエッジ効果が減衰する。

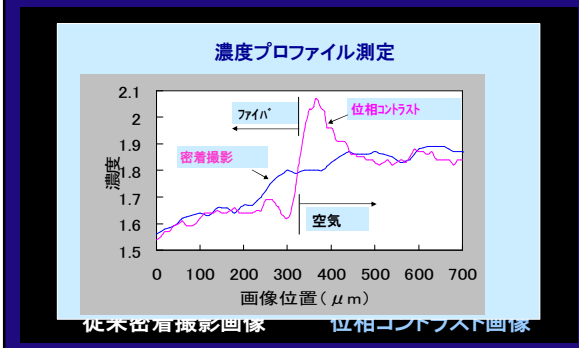
医療用X線装置でのエッジ効果



100μm焦点Mo管の場合
R1≧0.5m　R2 ≧0.25m
エッジ効果が確認される

通常の拡大撮影は
R1+R2≦0.65m

位相コントラスト効果測定データ



従来密着撮影画像　　位相コントラスト画像

位相コントラスト法

- X線が物体を透過する時に生ずる屈折の偏移
- 被写体とX線検出器が離れている
- 医療用のX線管では幾何学的不鋭を考慮
- 被写体とX線管球、検出器との距離を最適化
- X線の波長、焦点サイズ、撮影距離、被写体の大きさ、に依存

乳房撮影装置への応用

- 乳房撮影用のモリブデン管
  17keV程度の特性X線
  →位相コントラストが得られやすい
- 焦点サイズ
  小焦点100μm
- 被写体コントラストが低い
  写真では高コントラストが求められる

デジタル画像への応用

【SFシステムでのPCM】

被ばく線量の増加

得られる画像が実寸よりも大きくなる

【デジタルシステムでのPCM】

被ばく線量の増加

→広いダイナミックレンジ

→グリットを使用せず、直接X線を有効利用

得られる画像が実寸よりも大きくなる

→実寸サイズへの縮小プリント

PCMにおけるデジタル画像

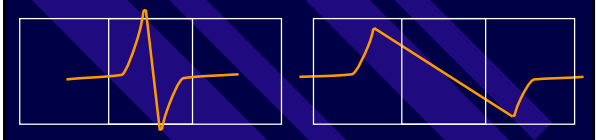
画質の要素

- 階調性
- 鮮鋭性
- 粒状性

階調性は階調処理に依存するので

位相イメージングや拡大撮影に依存しない

【デジタル検出器によるエッジ強調の検出】



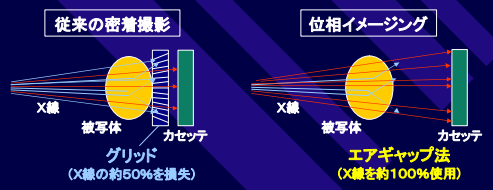
幾何学的不鋭によるボケが無い場合　　B＝D＊(R2/R1)

1つの画素内にとらえるとエッジ効果を検知できない

幾何学的不鋭によってエッジ幅が広がり
結果としてエッジ強調の山と谷を検知する

粒状性の向上

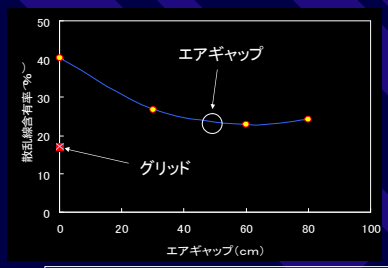
エアギャップ法によって散乱X線を除去
（グリッド使用によるX線量子の減少がない）



グリッドを使用する従来の密着撮影と比較し、
一次X線をロス無く有効活用することが可能

散乱線除去効果（ｴｱｷﾞｬｯﾌﾟ法）

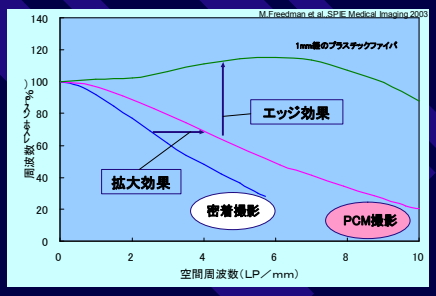
M.Freedman et al.,SPIE Medical Imaging 2003



X線−被写体：60cmで固定
撮影条件　：28kVp
移動ｸﾞﾘｯﾄﾞ：5:1、31本/cm
散乱体　　：4cmｱｸﾘﾙﾌｧﾝﾄﾑ

・49cmのｴｱｷﾞｬｯﾌﾟでｸﾞﾘｯﾄﾞに近い散乱線除去効果が得られるので、ｸﾞﾘｯﾄﾞを使用する必要がない

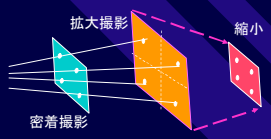
鮮鋭度（周波数ﾚｽﾎﾟﾝｽ）の向上

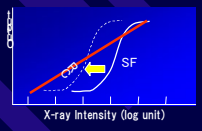


・PCM画像は拡大効果に加えｴｯｼﾞ効果により鮮鋭度が大きく向上
・実質的な空間分解能（ｶｯﾄｵﾌ周波数）が向上

【CRでのPCM】

拡大撮影の場合、単位面積あたりの入射光子数が減少
→　X線量子ノイズの増加、撮影感度の不足





等倍出力により、量子モトルは密着撮影同等に回復

広いダイナミックレンジで感度不足補償

密着撮影と同じ撮影条件で鮮鋭性と空間分解能が向上

撮影方法

PCM撮影システム

PCM撮影システム

SF

大焦点
焦点−被写体間距離：65cm
密着撮影
グリッド（＋）

PCM

小焦点
焦点−被写体間距離：65cm
被写体−プレート間距離:49cm
1.75倍　拡大撮影
グリッド（−）

PCM撮影システム

通常の密着撮影も可能

密着撮影位置、PCM撮影位置の双方でAEC機能搭載

数段階の拡大撮影

デジタルPCMシステム

REGIUS画像読取装置

半切サイズ（14x17）
PCM専用カセッテ
43.75μmピッチ読取

DryProプリント装置

実寸表示
25μmプリント
Dmax：4.0

PCM撮影 → 画像読取 → **実寸縮小処理** → フィルム出力

当院での基礎実験

【検討項目】

デジタルPCMについて

- 基本性能の把握
- 管電圧特性
- 線量特性
- 出力コントラスト特性

【使用機器】

撮影装置：東芝メディカル製造社製　PCM乳房撮影装置

ファントム：ACR RMI社 156型乳房ファントム
京都科学社 ステップファントム

画像読取：KONICA　MINOLTA社製 REGIUS
PCM用試作プレート

画像出力：KONICA　MINOLTA社製 DRYPRO
DRYフィルム

フィルム：Kodak社製　Min-R2000システム

自動現像機：Kodak社製　X-OMAT　5000RA

試料～管電圧特性及び基本性能～

SF	管電圧（kV）	拡大率	焦点	平均乳腺線量（mGy）
	24	1.0	大	2.1
	28	1.0	大	1.3
	32	1.0	大	1.0

PCM	管電圧（kV）	拡大率	焦点	線量
	24	1.75	小	SF同線量
	28	1.75	小	SF同線量
	32	1.75	小	SF同線量

RMI156ファントム中心濃度　１．５

試料～線量特性～

PCM	管電圧（kV）	拡大率	焦点	線量
	24	1.75	小	SF×０．６ SF同線量 2mGy 3mGy
	28	1.75	小	SF×０．６ SF同線量 2mGy 3mGy
	32	1.75	小	SF×０．６ SF同線量 2mGy 3mGy

試料～出力コントラスト特性～

PCM	管電圧（kV）	拡大率	焦点	線量
	24	1.75	小	SF同線量
	28	1.75	小	SF同線量
	32	1.75	小	SF同線量

コントラスト：γ３．９　４．７

評価方法

- SF：　３画像×３（N数）　計　９画像
- PCM：１５画像×２（N数）　計３０画像
- 乳房撮影有資格技師５名で、３９画像をランダムに視覚評価をおこなった

ファントム画像の視覚評価基準

・撮影

中央付近の濃度：1.5±0.15で撮影または焼付
デジタルでは、階調カーブの形状および周波数処理の設定は、臨床と同一条件で撮影

・評価

156ファントム	S/F	デジタル
繊維組織試料	４点以上	5点以上
石灰化試料	３点以上	4点以上
腫瘤試料	３点以上	4点以上

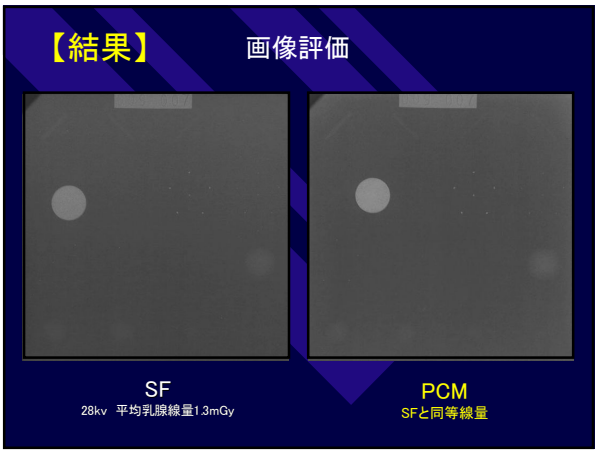
・アクリル円盤部とその周辺の濃度差：　0.4以上

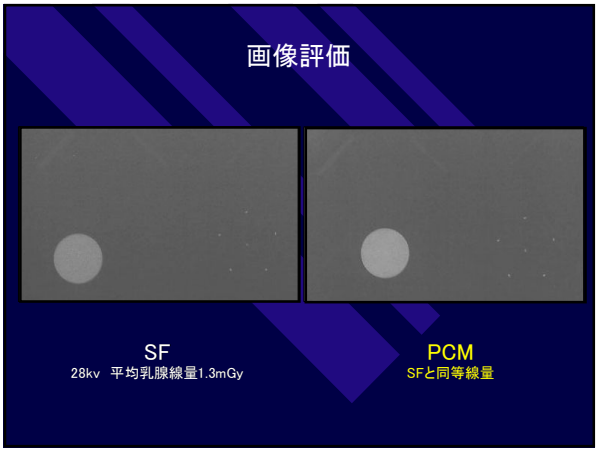
ステップファントム

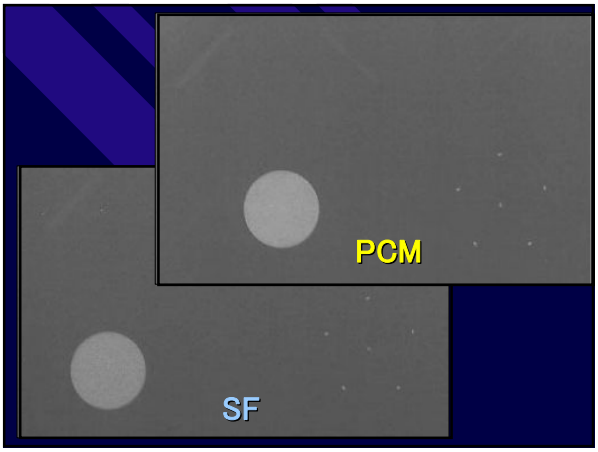
・10段が識別可能・濃度が順次上昇（下降）

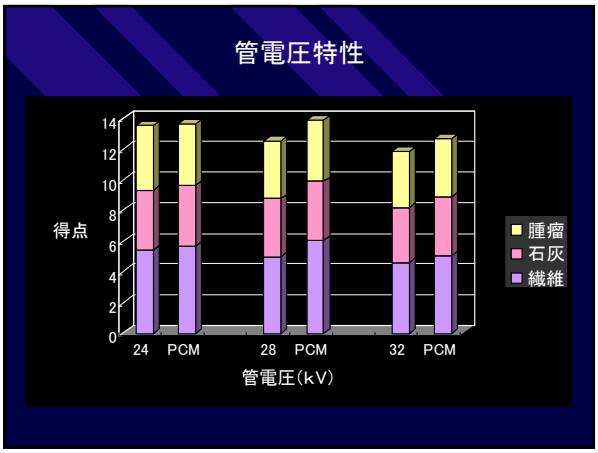
・石灰化試料は４段以上視認できること
・腫瘤試料は５段以上視認できること

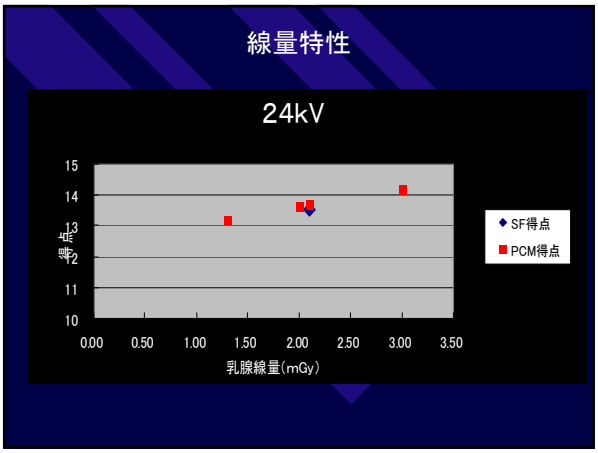
ファントム画像
No.A01


【結果】
画像評価
SF
28kv 平均乳腺線量1.3mGy
PCM
SFと同等線量

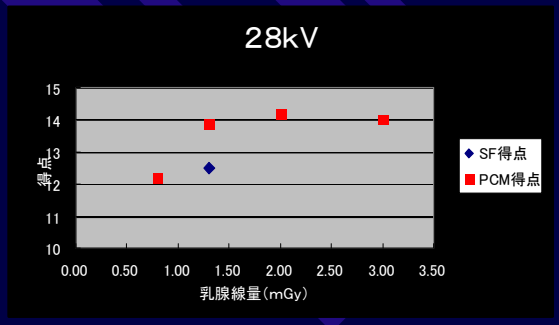

画像評価
SF
28kv 平均乳腺線量1.3mGy
PCM
SFと同等線量


PCM
SF

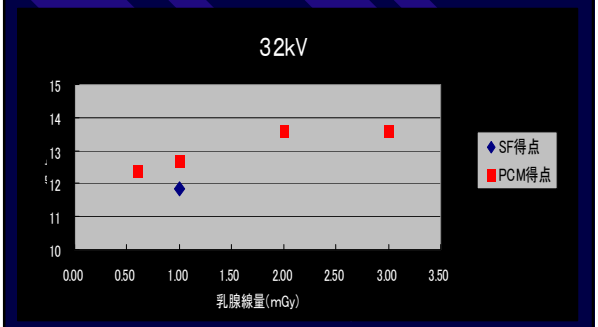

管電圧特性
得点
14
12
10
8
6
4
2
0
24 PCM
28 PCM
32 PCM
管電圧(kV)
腫瘤
石灰
繊維


線量特性
24kV
15
14
13
12
11
10
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
2.50
3.00
3.50
乳腺線量(mGy)
SF得点
PCM得点

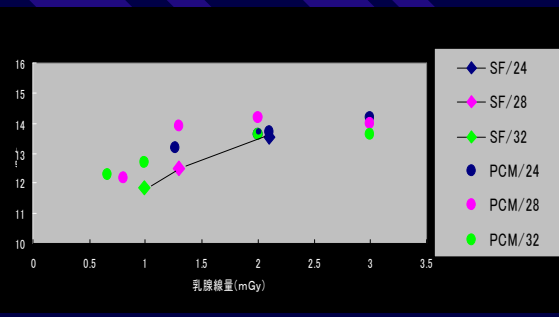
線量特性



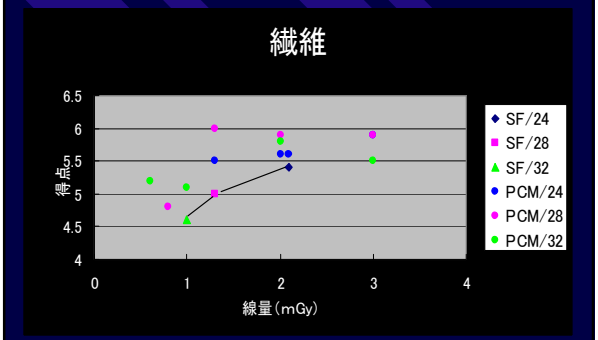
線量特性



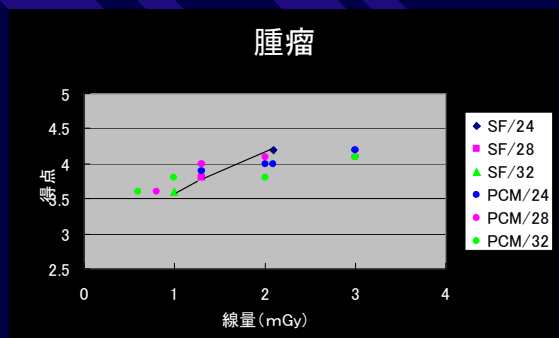
乳腺線量と管電圧



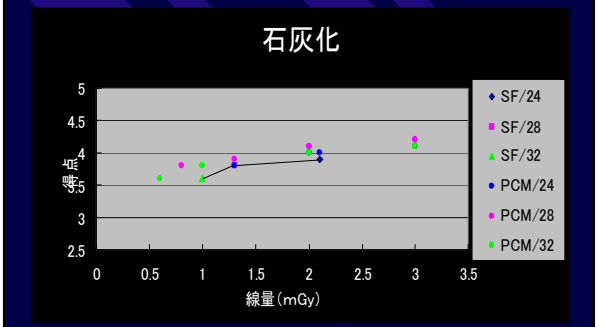
模擬試料別線量



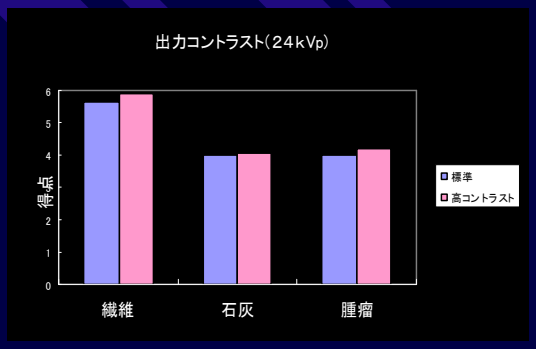
模擬試料別線量



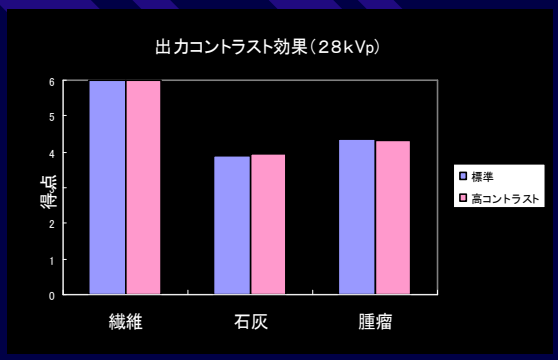
模擬試料別線量



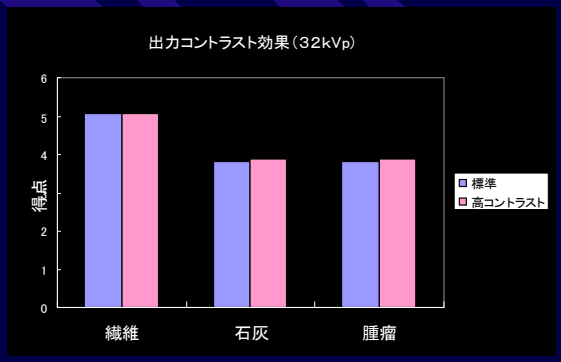
出力コントラスト特性



出力コントラスト特性



出力コントラスト特性



実験データに基づいた考察

【考察】　基本性能

PCMとデジタル画像の応用により画質を向上

鮮鋭度

拡大効果に加えエッジ効果により鮮鋭度が向上

エアギャップ相当の距離おくことにより、散乱線を除去

粒状度

縮小出力することで同程度の粒状度に戻る

粒状度はグリットを使用する密着撮影より良い

（一次X線のロスがない）

画質評価

管電圧依存性について、SFシステムは管電圧の上昇とともにスコアが大きく低下したがデジタルPCMはゆるやかな低下であった。

デジタルPCMは高管電圧の必要な乳房に対しての画質向上が期待される。

画質評価

線量依存性は、ほぼ2mGyより飽和状態となり、むやみに線量をあげても画質向上は望めない。

乳房厚に対して決めていた、SFの管電圧とmAsの条件の見直しが必要と思われた。

出力コントラストではγの上昇とともにスコアは上がらず、適度な処理が必要であった。

模擬腫瘤について

SFと比較してPCM画像は、繊維のスコアは上がったが、腫瘤の評価はほぼ同等であった。これは、ACR156ファントムの擬似腫瘤の形が楕円形であるので、位相コントラストによるエッジ効果が小さいためだと考えられる。

【実験について】

位相コントラストによる効果とデジタル画像を組み合わせることにより、画質の向上が図れる。

PCMのファントム評価は、デジタルの施設画像評価基準をクリアしているが、さらに特徴を把握し、良い画像を求めたい。

今後への展望

マンモグラフィによる画像診断

- 乳房の被写体コントラストは低い
  ←写真では高コントラストが要求
- 微小な診断
  ←認識は容易　形態判定が要求される

マンモグラフィによる画像診断

- 濃度
  SFマンモグラフィ用フィルム
  最高濃度4.0以上　最近では5.0も
  PCMシステムは最高濃度4.0
- 画素の大きさ（空間分解能）
  銀粒子：3～5μm
  アウトプットが25μm

今後の課題

- X線管球の改良
- 検出器の性能
- 画像処理
- イメージャ用フィルムの性能
- モニター診断の基準

結語

位相コントラストによるエッジ効果
+
デジタルシステム

PCMシステムは
乳房X線画像の
画質向上が期待できる

今回の報告に際しご協力賜りました
コニカミノルタエムジー株式会社の
皆様に、感謝致します。

最後に・・・