

リアルタイムデジタルX線撮影装置の開発とその臨床応用

Development of Realtime Digital Radiography System and Its Clinical Application

X線画像は、広く画像診断に使われている。従来X線画像はフィルムを用いて撮影されていたが、フィルムは現像処理を必要とし、その取り扱いには注意を要する。このようなフィルムを用いなくて撮影後直ちに画像を観察し、またその画像の保管と検索を容易にするためX線画像のデジタル化が要請されていた。X線フィルムを用いた撮影系が持つ高い解像力を達成するため、高精細イメージインテンシファイアーと2,100本走査高精細テレビジョンカメラによって高解像力化を図り、2,048×2,048マトリックス画像の撮影できるリアルタイムデジタルX線撮影装置“DR-2000H”を開発した。本装置を消化管などに適用し、フィルム撮影と同等の診断能を得た。

神谷正己*	Masami Kamiya
林 富夫**	Tomio Hayashi
横内久猛***	Hisatake Yokouchi
高橋睦正****	Mutsumasa Takahashi
増田幸久*****	Yukihisa Masuda

1 はじめに

医用画像のデジタル化は、X線CT(Computed Tomography)、核医学から超音波、さらにDSA(デジタル血管撮影装置)へと急速に進んでおり、時代の大きな流れとなっている^{1),2)}。

この背景には、即時画像表示と即時診断による検査の効率化および治療との一体化、画像処理・機能解析による診断能の向上と定量化、PACS(医用画像管理システム)への展開による画像の保管・検索の容易化などへの期待がある。

一方、一般撮影のX線画像では、X線CTやMRI(Magnetic Resonance Imaging)の画像と異なり画像の情報が膨大なため、デジタル化から取り残されていた。

しかし、最近のX線画像のデジタル化には、次に述べるように、主に二つの方式が使用され始めるようになった。第一の方式は、輝尽性蛍光体を用いたイメージングプレートと呼ばれる感光板にX線の潜像を作り、この像をレーザ光で読み取った後、フィルムに焼き付ける方式で、CR(コンピュートイドラジオグラフィー)と呼ばれている³⁾。この方式は、従来X線装置にそのまま適用でき、実効的に広いダイナミックレンジを持つため、露光オーバーや露光不足による撮影の失敗が防げる。しかし、画像が得られるまでの時間はフィルムを用いた撮影以上にかかるという問題がある。

第二の方式は、X線II(X線イメージインテンシファイアー)

とテレビジョンカメラを用いたもので、即時画像表示が可能で、DSAとして広く使用されている⁴⁾。しかし、X線フィルムを用いた撮影系と比べて解像力が低いという問題があり、一般撮影用としては使用されなかった。そこで今回、超高解像力の12インチ視野の高精細X線IIと2,100本走査の高精細テレビジョンカメラを開発し、解像力を飛躍的に向上させたりアルタイムDR(リアルタイムデジタルX線撮影装置)“DR-2000H”を開発した。消化管などに適用し、フィルム撮影と同等の診断能を得た。

本稿では、DR-2000Hの概要および高画質化、さらに臨床応用について述べる。

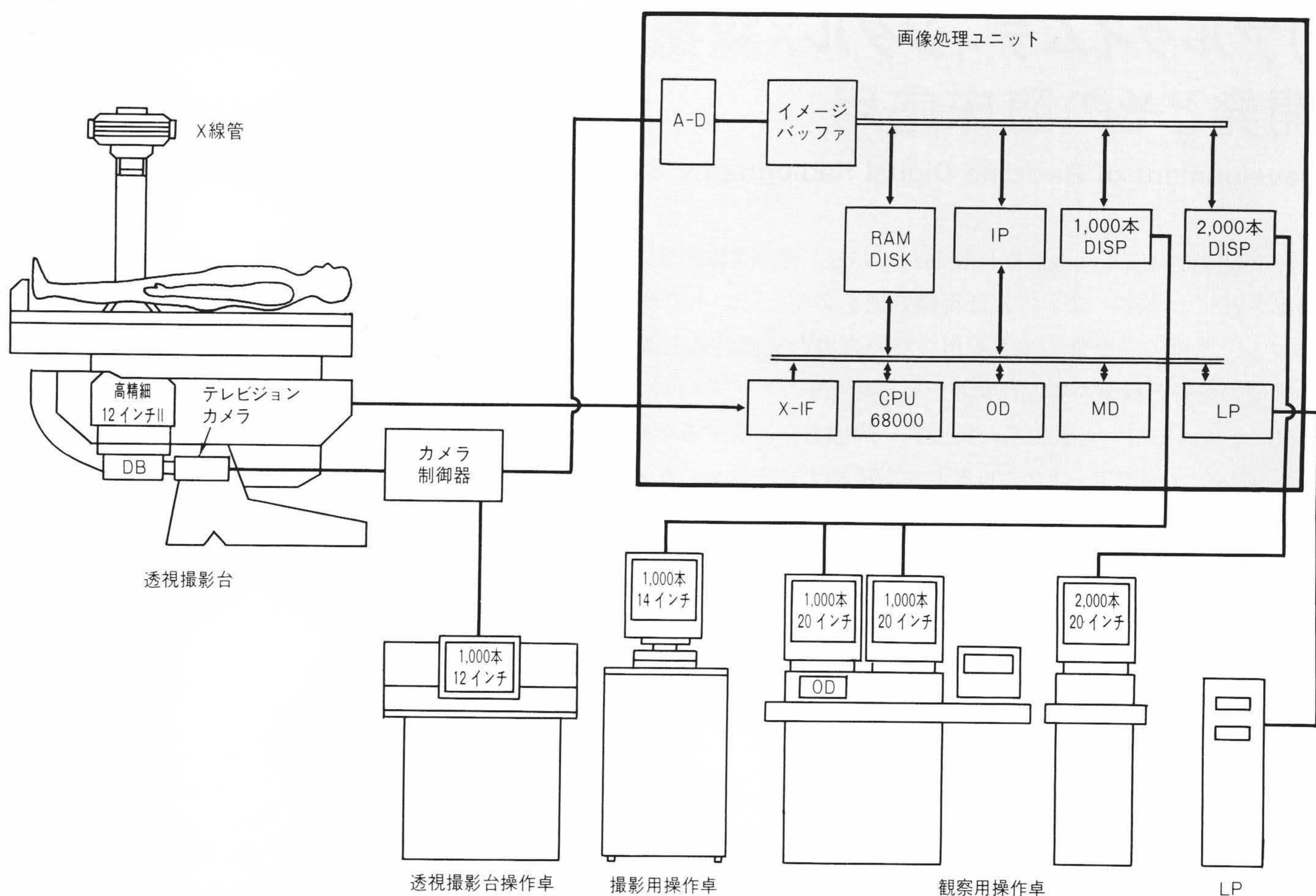
2 DR-2000Hの概要

2.1 構成

リアルタイムデジタルX線撮影装置、DR-2000Hと透視撮影台の組み合わせ構成を図1に示す。

デジタルX線画像が形成される過程は、次のとおりである。X線管から曝(ばく)射されたX線は、透視撮影台上の被検者を透過し、高精細X線IIによって高輝度の縮小された光学像に変換される。この像は光学レンズによってテレビジョンカメラの撮像管面に結像され、ビデオ信号に変換される。このビデ

* 株式会社日立メディコ 技術研究所 理学博士 ** 株式会社日立メディコ 柏工場 *** 株式会社日立製作所 中央研究所
**** 熊本大学 医学部 医学博士 ***** 財団法人癌研究会 附属病院 医学博士



注：略語説明

DB (ディストリビュータ), II (イメージインテンシファイアー), A-D (アナログデジタル変換器), IP (イメージプロセッサ), LP (レーザビームプリンタ), X-IF (X線インタフェース), OD (オプティカルディスク; 光ディスク), MD (マグネチックディスク; 磁気ディスク)

図1 DR-2000Hの構成 DR-2000Hを、オーバーチューブ方式透視撮影台と組み合わせた場合を示す。通信ネットワークによって、PACS(医用画像管理システム)への接続が可能である。

オ信号は、A-D変換器によってデジタル信号に変換され、画像メモリ(RAMディスク)に記憶されるとともにテレビジョンモニタに表示され、撮影直後に画像が見られる。撮影用操作卓から表示階調の調整をすることができる。画像メモリ上のデータは、撮影中自動的に磁気ディスクに記録される。画像の記録・保管は、5インチの光ディスクによって行われる。さらに、オンラインでPACSへの接続も可能である。診断は、画像をテレビジョンモニタに表示して行うことを基本としているが、必要に応じてレーザビームプリンタによってハードコピーを作ることにも可能である。装置の外観を図2に示す。撮影用操作卓は透視撮影台の操作を行うX線制御操作卓と組み合わせ撮影操作室に設置される。診断は、観察用操作卓のテレビジョンモニタの画像によって行う。

2.2 仕様と性能

装置の仕様と性能を表1にまとめて示す。主な特長は、次に述べるとおりである。

- (1) 高解像力映像系と高精細画像処理装置による2,048²マト

リックス画像の撮影および表示により、フィルムに匹敵する画像が得られる。

- (2) II-テレビジョン方式の採用により、即時(0.5～1s)画像表示や検査中の診断が可能になる。また、フィルムの現像処理が不要である。

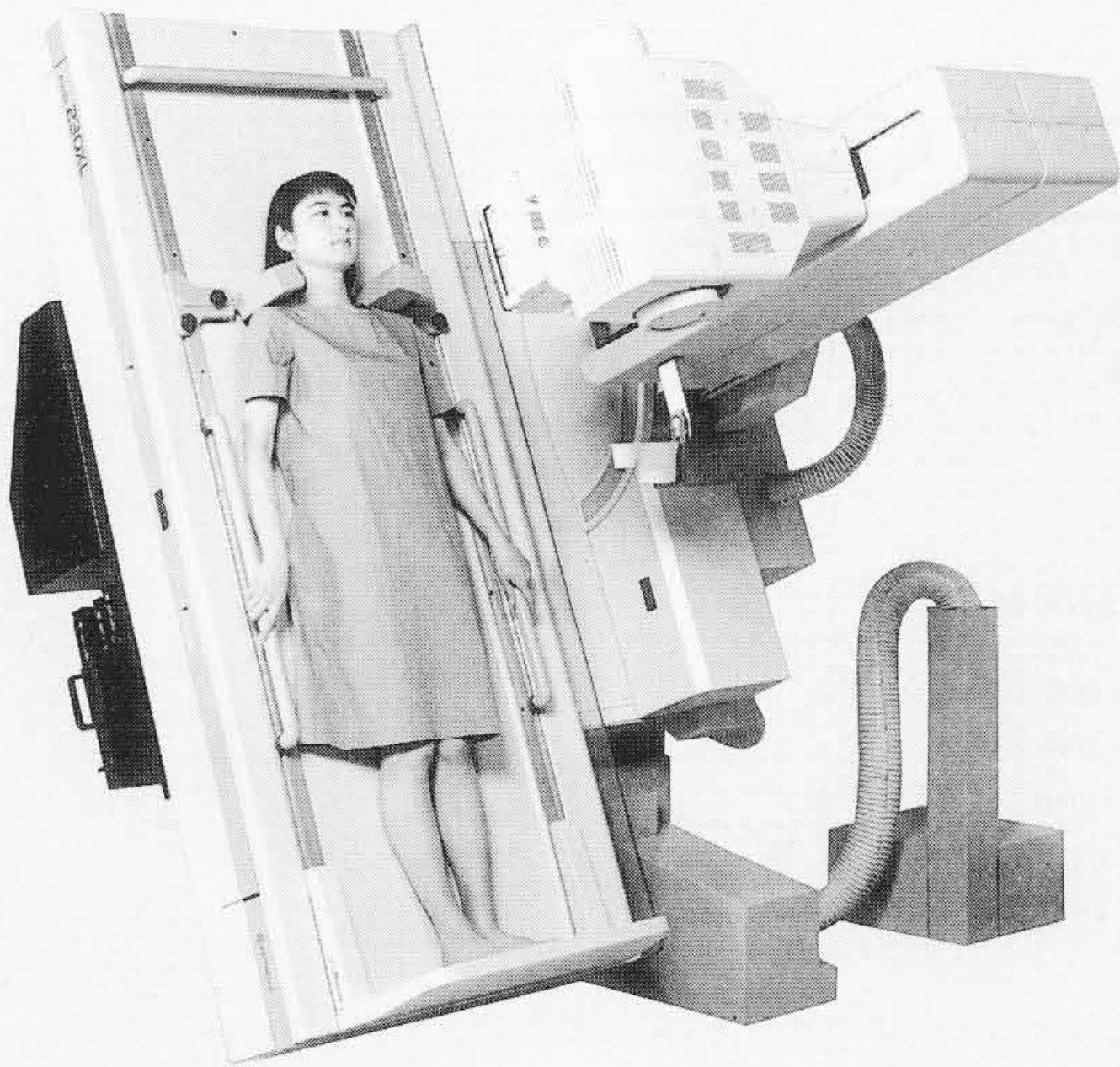
- (3) 1,024²マトリックスでは、4画像/sの高速の連続撮影が行える。

- (4) 階調調整、辺縁強調などの画像処理によって診断しやすい画像が得られ、テレビジョンモニタによる診断が可能になる。

- (5) 大容量の磁気ディスクと光ディスクにより、全画像をデジタルで記録・保管できる。さらに、PACSへ接続が容易にできる。

3 高画質映像系の開発

画質は主に解像力とコントラスト分解能によって決定される。II-テレビジョン方式のDRは、コントラスト分解能が良



(a)



(b)



(c)

図2 DR-2000Hの外観 (a)は透視撮影台を、(b)は撮影用操作卓と透視撮影台操作卓の組み合わせを、(c)は観察用操作卓での診断のようすをそれぞれ示す。

いことが知られており、この方式を応用したDSAでは、低コントラストの血管像を鮮明に描出している⁷⁾。解像力は、映像系の特性によって決まるが、解像力の指標であるMTF(変調度伝達特性)によって空間周波数の関数として定量的に表すことができる。この方式の従来形DRの解像力を図3に示す。システムのMTFは、X線II、光学レンズ、テレビジョンカメラのMTFの積によって決まり、MTFが高いほど解像力が高いことを表している。このうち最も高解像力化の必要なX線IIとテレビジョンカメラについて特性の改善を図った。また、光学レンズも高解像力のX線IIと高精細テレビジョンカメラ用に新規に開発を行った。

3.1 X線IIの高解像力化

X線IIは、X線情報を高輝度の可視光学像に変換する装置である。その動作を図4に示す。入射X線は、入力面のCsI結晶によって吸収され発光する。この光は光電面で光電子に変換され、電極で形成された電界によって加速・収束され、出力蛍光面上に縮小結像され、高輝度像を形成する。

この過程で解像力の悪化を生じる主要因は、出力面上に縮小結像させることである⁸⁾。出力面の直径を従来の25 mmから60 mmに拡大することによって大幅な解像力の向上を達成した。さらに、高電界形電子レンズを採用するとともに、電極数を従来の5極から8極に増やし、12インチ、9インチ、7インチの各視野サイズに対し最適化を図った。これにより、12インチでは、従来4.4 lp/mmであった解像力を6.5 lp/mmに向上した。さらに出力面を光散乱を抑える構造とし、コントラストの向上を図った。

3.2 テレビジョンカメラの高解像力化

テレビジョンカメラの高解像力化のために、高精細用に開発された1インチの含浸形ダイオードガンサチコン^{®4)}を医療画像用に改良した。すなわち、撮像管面上の信号取り出しピンを外し、走査エリアの拡大を行い、2,100本走査をすることにより、図5に示すような高解像力を達成した。

3.3 画像処理装置の開発

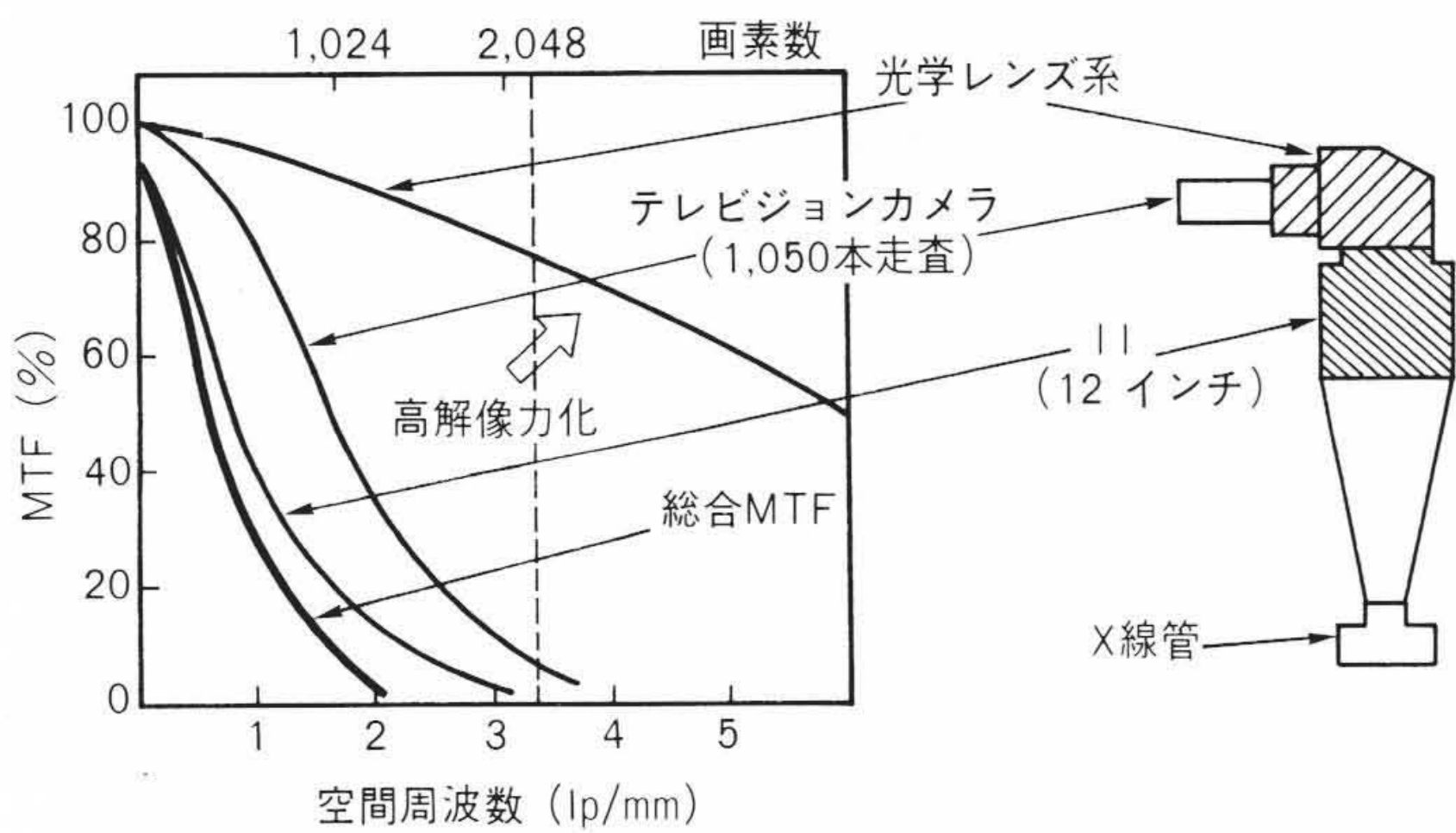
前述のX線IIとテレビジョンカメラの高解像力を生かすために、画像のマトリックスは微細部分を表現できる2,048²が必要である。このため、すでに2,048²マトリックス画像の処理を実現している株式会社日立メディコの医用画像管理システムHIPACS²⁾をベースにした。新たにテレビジョンカメラからのビデオ信号を、10ビット、20 MHzの高速度でデジタル化するA-D変換部と、このデータを一時的に蓄え、画像メモリ(RAMディスク)に送る画像バッファ部およびこれら撮影と画像の取り込みの制御を行うコントロール部を開発した。

画像マトリックスは、2,048²のほか1,024²があり、1,024²マトリックスでは4画像/sの高速連続撮影ができる。画像の表示は、1,024²マトリックス画像をノンインタレスで表示する20インチモニタを2台装備し、画像の比較や処理が容易に行える

表1 DR-2000Hの仕様と性能 2,048²マトリックス画像の撮影および表示により、フィルムに匹敵する画像が得られるなどの特長を持つ。

項 目		仕 様 ・ 性 能	
撮 影	マトリックス	2,048 ²	1,024 ²
	撮影レート	1 画像/s	4 画像/s
	最大連続撮影	32画像	128画像
	システム解像力	2.6	1.9 (12インチ)
		3.5	2.3 (9インチ)
		4.4	3.2 lp/mm (7インチ)
撮影X線条件		自動X線照射制御	
画像入力系	X線II	6.5 lp/mm(12インチ)	
		7.0 lp/mm(9インチ)	
		8.0 lp/mm(7インチ)	
		20:1 (10mm)	
	テレビジョンカメラ	撮像管	
		走査	
	A-D変換		10ビット 20 Mサンプル/s
画像表示	1,024 ² 画像モニタ	20インチ 2台	
	2,048 ² 画像モニタ	20インチ 増設可能	
画像記録	RAMディスク	256 Mバイト	
	磁気ディスク	1 Gバイト	
	光ディスク	600 Mバイト	
後 処 理	画像処理	表示階調処理, 白黒反転, ガンマ変換	
	画像解析	シャープニング, スムージング, 拡大 プロファイル, ROI, 距離計測	

注：略語説明 ROI(Region of Interest：関心領域), lp(ラインペアと読み、白黒一組みを意味し、lp/mmで1mm当たり何組みの白黒があるかを示す。)



注：略語説明 MTF (変調伝達特性)

図3 従来形II-テレビジョン方式DRの解像力 II-テレビジョン方式DRの解像力はMTFによって定量的に表すことができる。総合MTFはX線II, テレビジョンカメラ, 光学レンズのMTFの積によって決まり、高いほど解像力が良いことを示す。本図に示す従来形DRでは、テレビジョンカメラとX線IIの解像力の向上が特に必要であることがわかる。

ようにした。この画像モニタでは、2,048²マトリックス画像の全体像を表示することと、画像の $\frac{1}{4}$ の領域を拡大し完全に表示することができる。さらに、2,048²マトリックス画像を完全に表示する表示装置も増設できる。

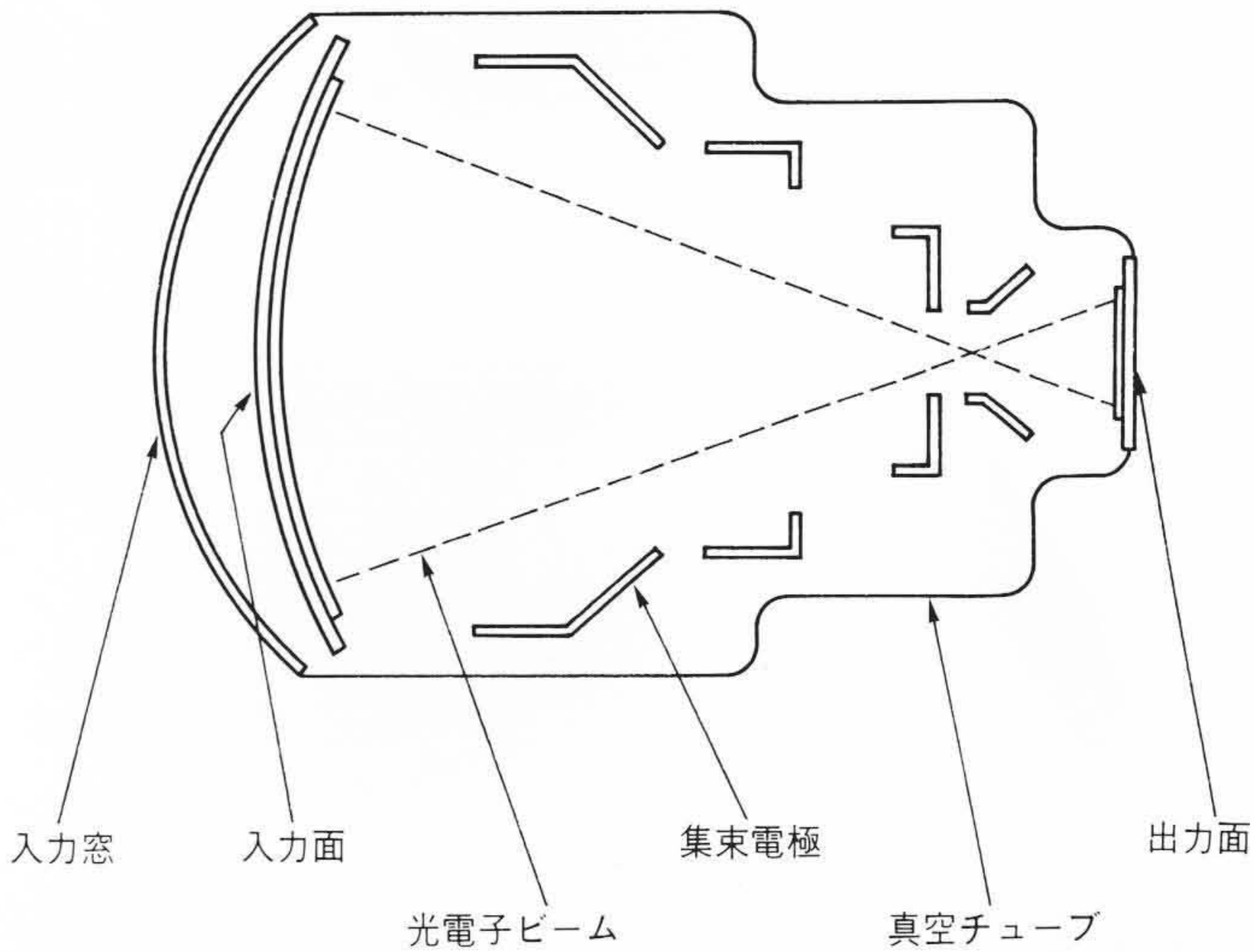


図4 X線IIの構造 入射X線は、CsI入力窓入力面光電子ビームの入力面で吸収され、発光する。この光は光電面で光電子に変換され、加速収束されて出力蛍光面上に結像し光学像が形成される。

3.4 DR-2000Hの画質

DR-2000Hは、X線IIとテレビジョンカメラの高解像力化によって、図6に示すように従来II-テレビジョン方式DRと比べて、解像力の飛躍的な向上を実現した。映像系だけではフ

フィルムの解像力には及ばないが、被検者に応じたX線量を確保するためのX線管の焦点サイズや、幾何学的な拡大を考慮した臨床撮影条件の下では、増感紙・フィルムに匹敵する解像力が得られる。臨床条件を想定した実験系と得られた解像力を図7に示す。高精細X線IIは、入力視野の大きさを12インチ、9インチ、7インチに切り換えることができ、7インチでは増感紙・フィルムと同等の解像力である。

さらに、識別能の評価をバーガーファントムによって行った。DRでは、増感紙・フィルムと比べ小X線量でもほぼ同等の識別能が得られることが図8からわかる。これは、DRのX線検出効率が増感紙・フィルムに比べ約3倍高いことと、階調処理によって関心領域を見やすく表示できるためである。

4 臨床応用

熊本大学医学部および財団法人癌研究会 附属病院検診セン

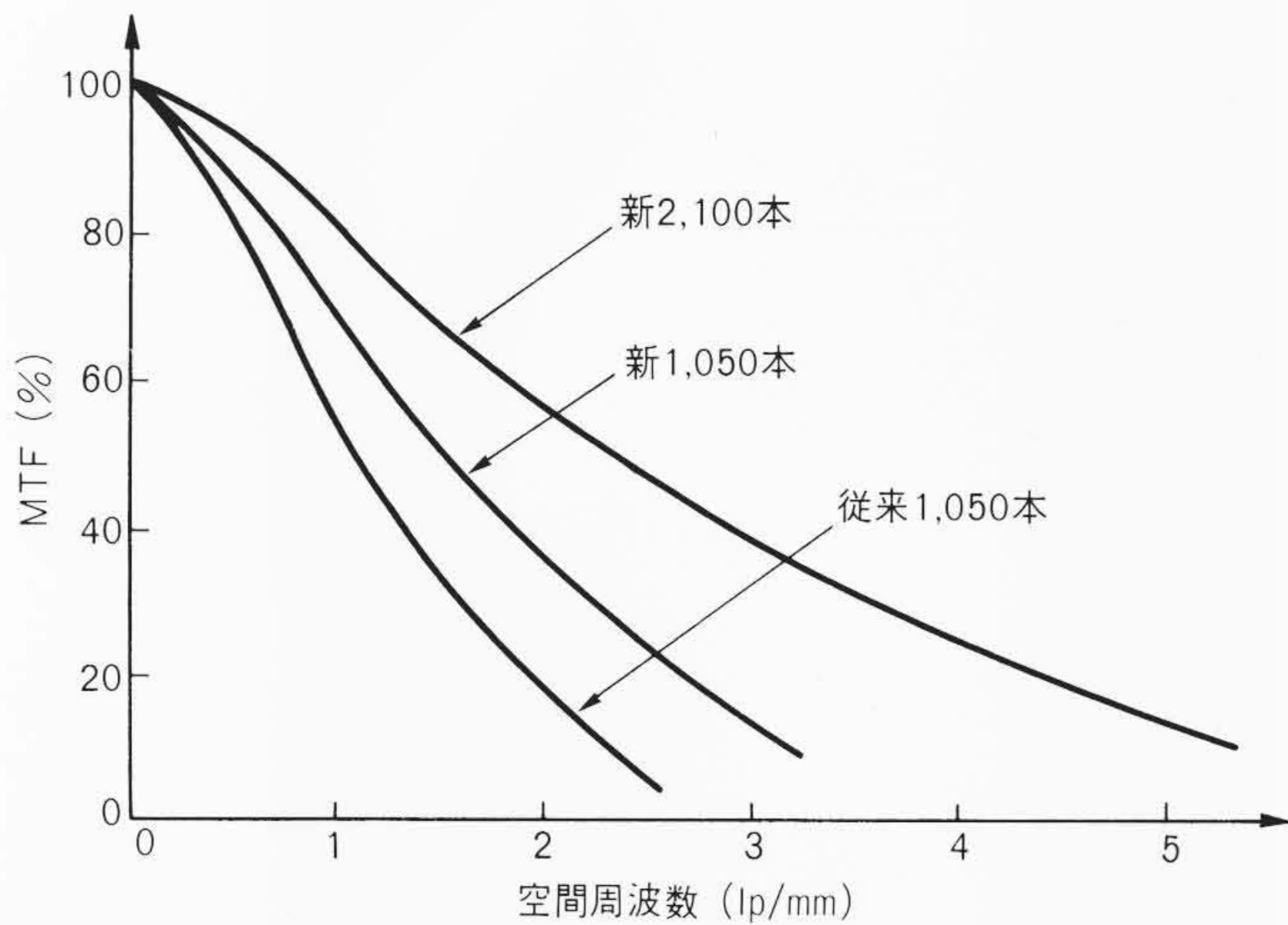


図5 高精細テレビジョンカメラの解像力 高精細テレビジョンカメラの12インチ視野換算のMTFを示す。1,050本走査でも従来のテレビジョンカメラよりも優れた特性を示す。

ターで、一般撮影システムおよび胃集団検診システムと組み合わせたDRの臨床評価を実施した。

4.1 一般撮影システムへの応用

オーバーチューブ方式の汎(はん)用透視台TU-230XLとの組み合わせにより、消化管造影撮影、胸部撮影への適用を行った。TU-230XLは速写機構付きであり、フィルム撮影との比較評価を容易にするため、フィルム撮影とDR撮影の切り換えが簡単に行えるようにした。

同一部位をDRとフィルムの両方で撮影し、胃の二重造影撮影、胸部単純撮影の画質比較を実施した。DR撮影による臨床例を図9に、結果を表2に示す。同表からわかるように、胸部ではわずかではあるがDRのほうがフィルムよりも良い評価を得た。さらに、画像の辺縁強調を行うことにより、より診

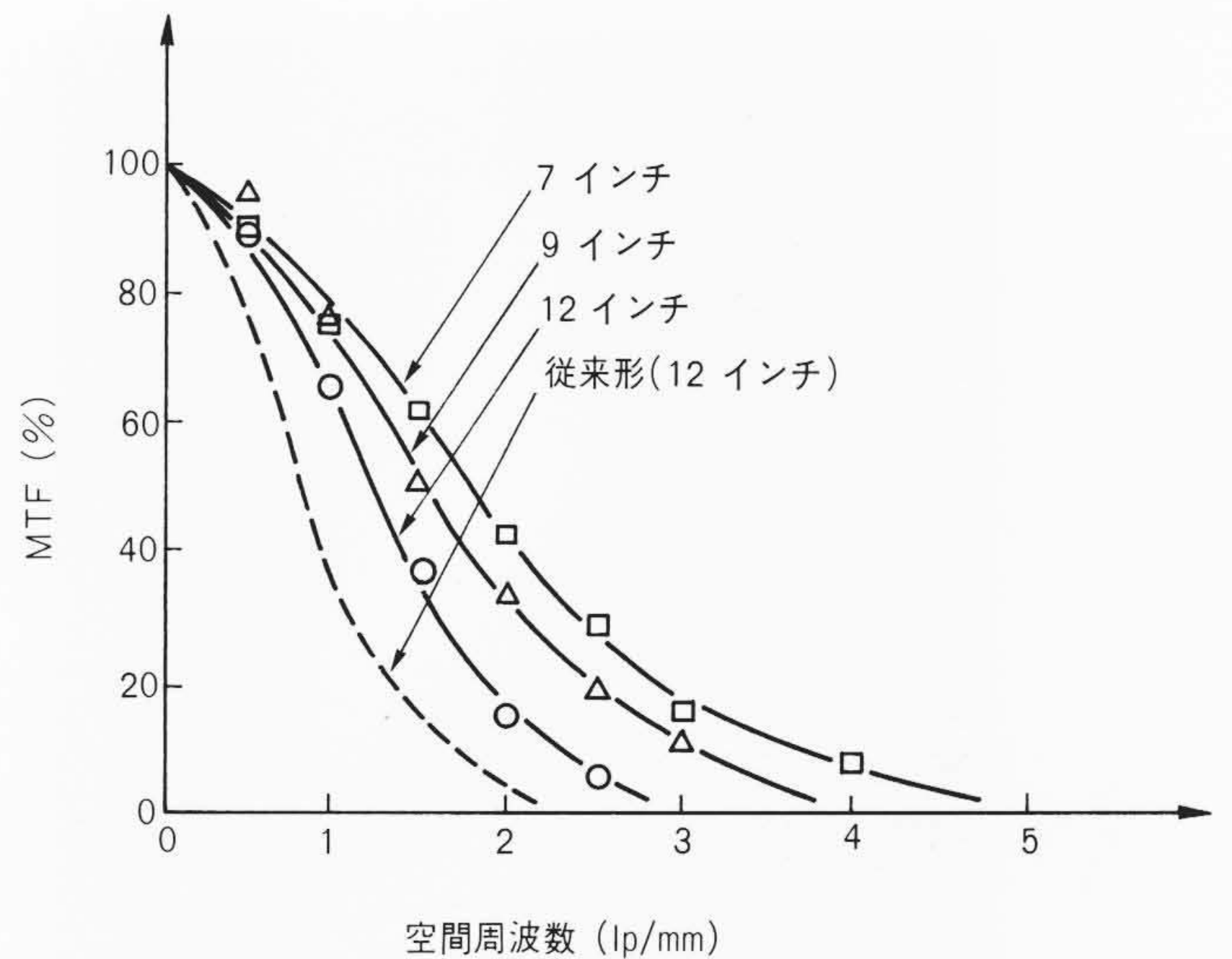
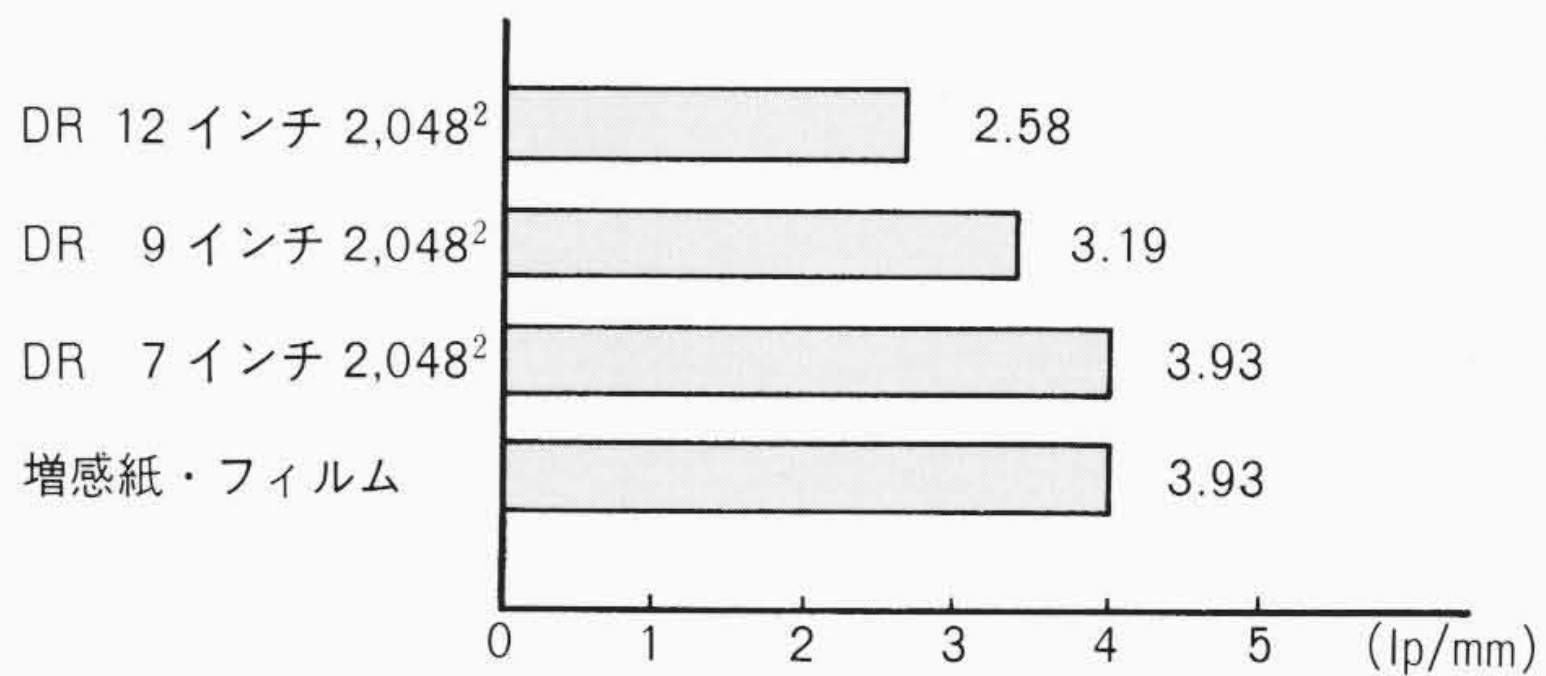
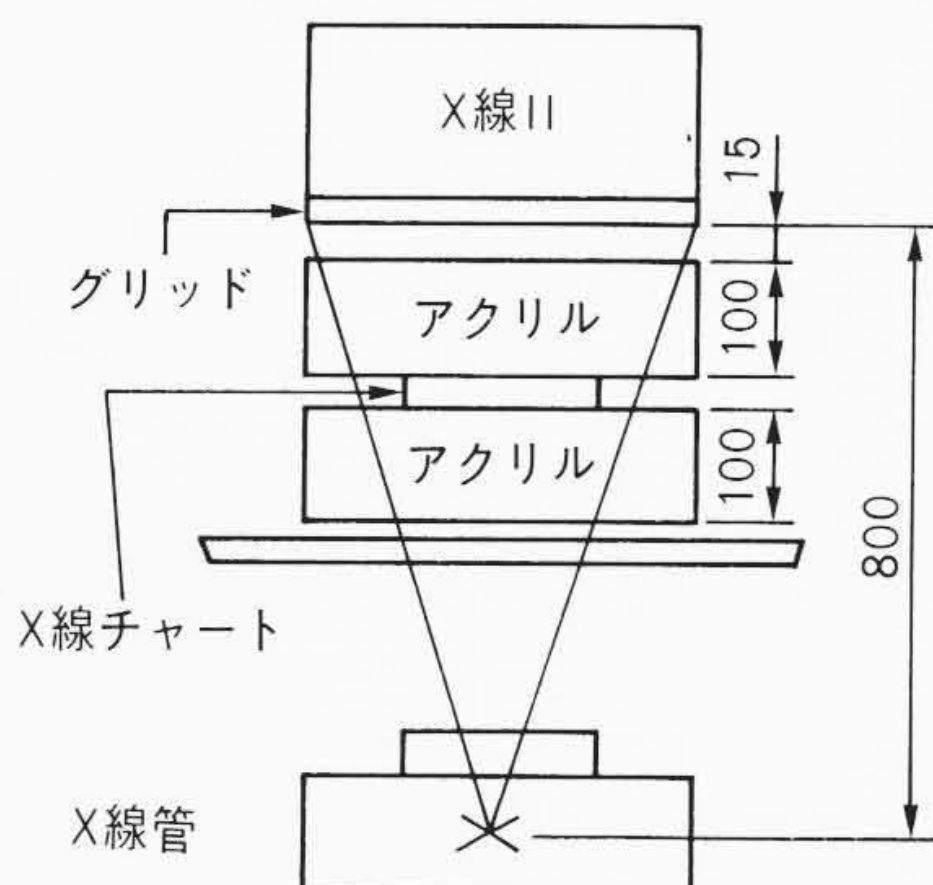
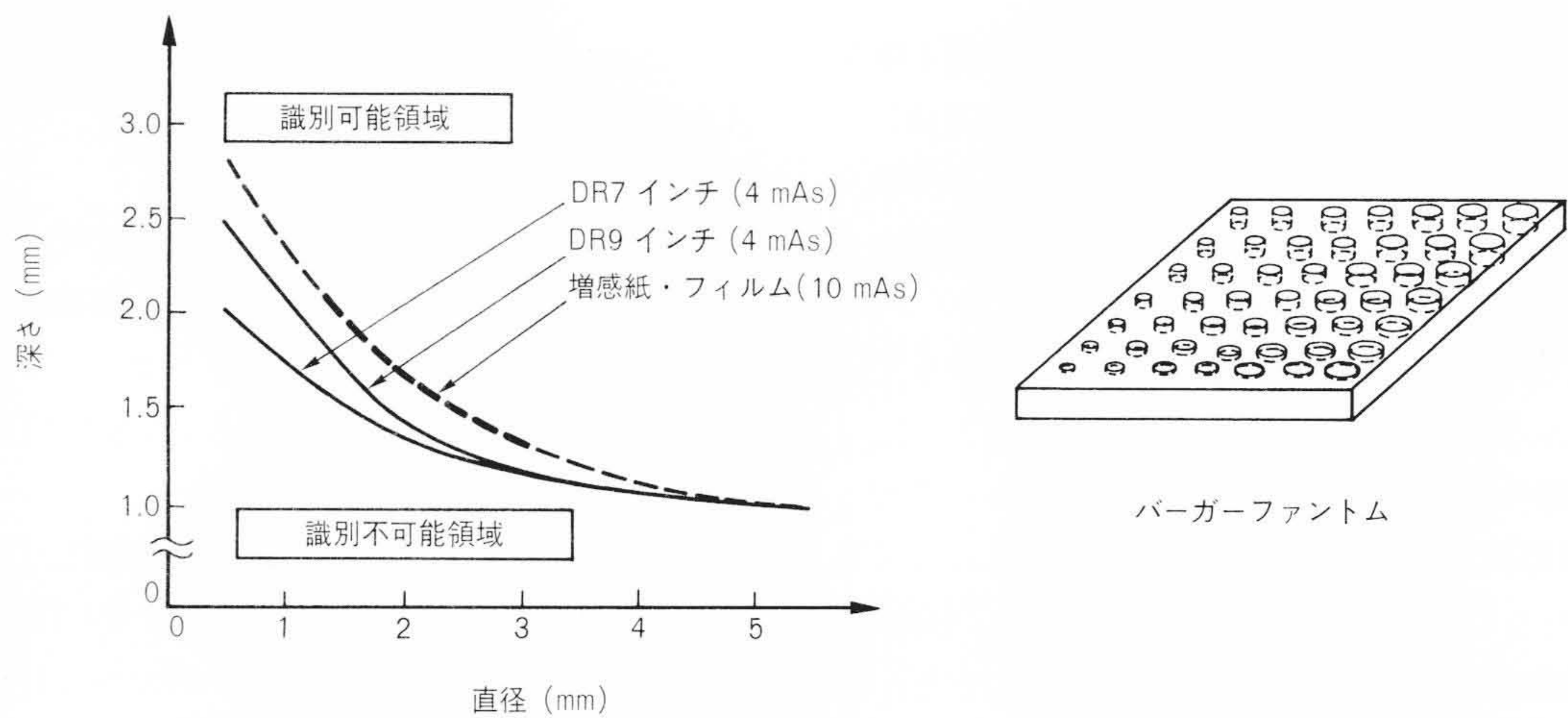


図6 DR-2000Hの解像力 X線IIとテレビジョンカメラのMTFを大幅に向上したことにより、DR(デジタルX線撮影装置)の固有解像力の大幅な向上を達成した。



注：X線焦点サイズ 0.2 mm角 DR
0.8 mm角 増感紙・フィルム, CR

図7 臨床条件下でのDRとフィルムの解像力 臨床での使用条件を想定し、200 mmアクリル板の間に鉛の矩(く)形チャートを配置した。DRでは、小X線量でも十分な撮影ができるため0.2 mm焦点を、フィルムでは0.8 mm焦点を使用した。

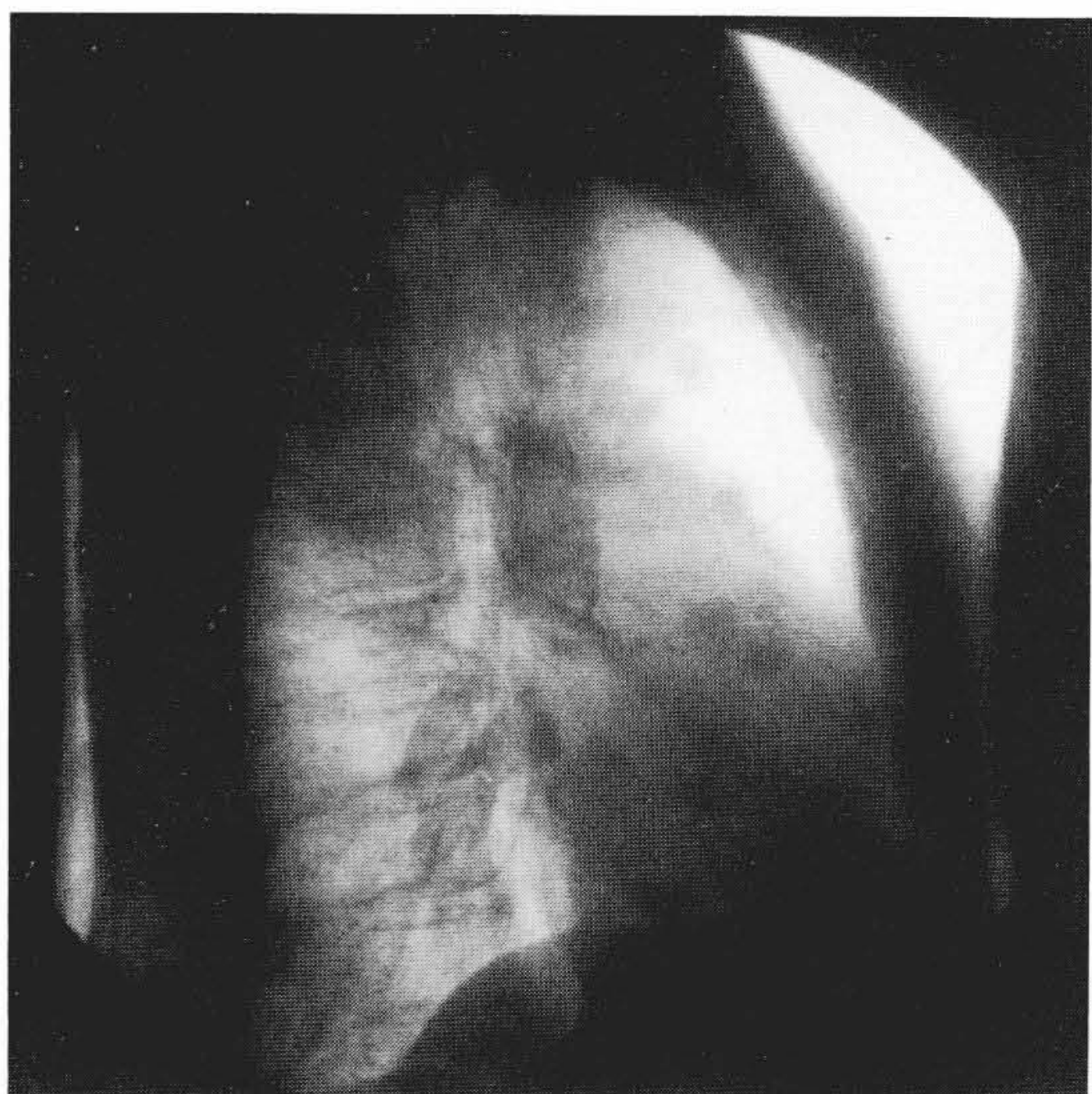


注：mAs [X線管電流と曝(ばく)射時間の積]

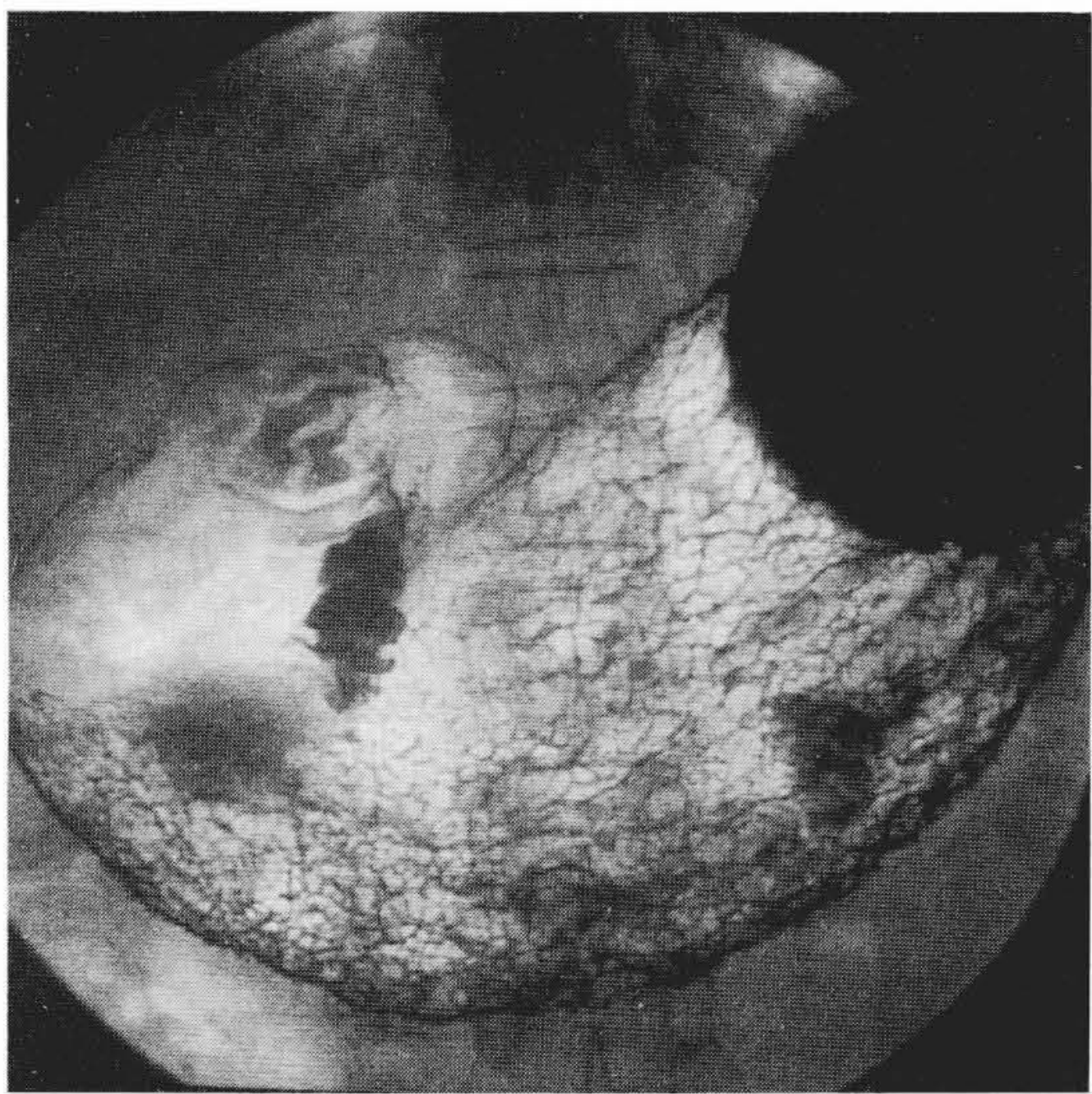
図8 DRとフィルムの識別能 バーガーファントムを用いて識別能を評価した。DRでは、フィルムの4割のX線量で同等の識別能が得られた。



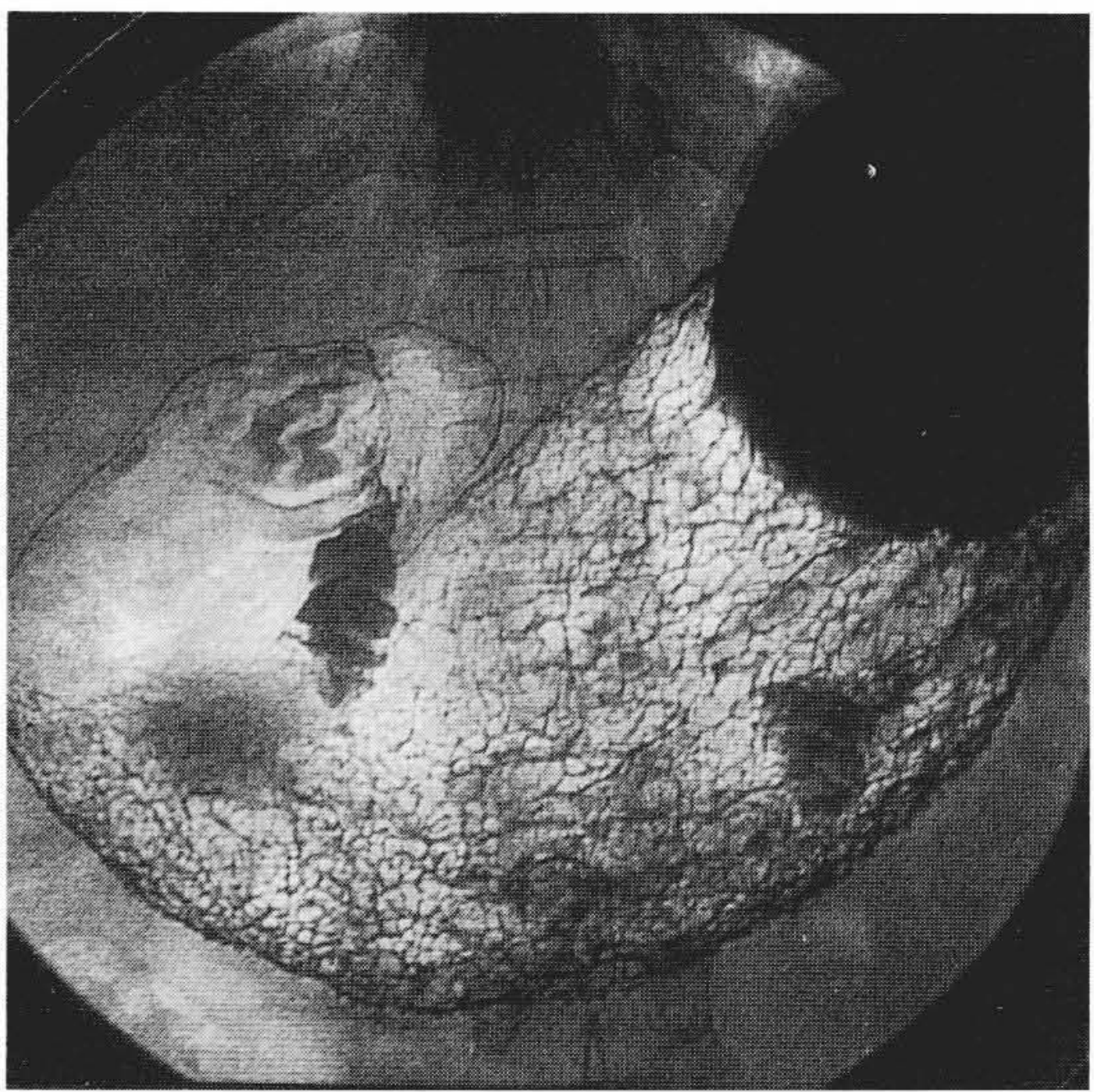
(a) 胸部正面像(左肺)



(b) 胸部側面像



(c) 胃背臥(が)位正面像



(d) (c)に辺縁強調を施した画像

図9 熊本大学における臨床例 辺縁強調によって診断能が向上した。胸部は視野が不足しているが、肺野と縦隔それぞれ最適の表示階調にできるため診断がしやすい。

断しやすい画像にできることがわかった。胃の画像でも、辺縁強調によってフィルムよりも診断しやすい画像となった。このようすを同図に示す。

表2 熊本大学における臨床評価の結果 DRと増感紙・フィルムによる撮影画像の比較評価を、同一部位撮影を行って実施した。DRがフィルムと同等の場合を3点、DRが非常に良い場合を5点、フィルムが非常に良い場合を1点とした。なお、DR画像はレーザビームプリンタによるハードコピーによって評価した。

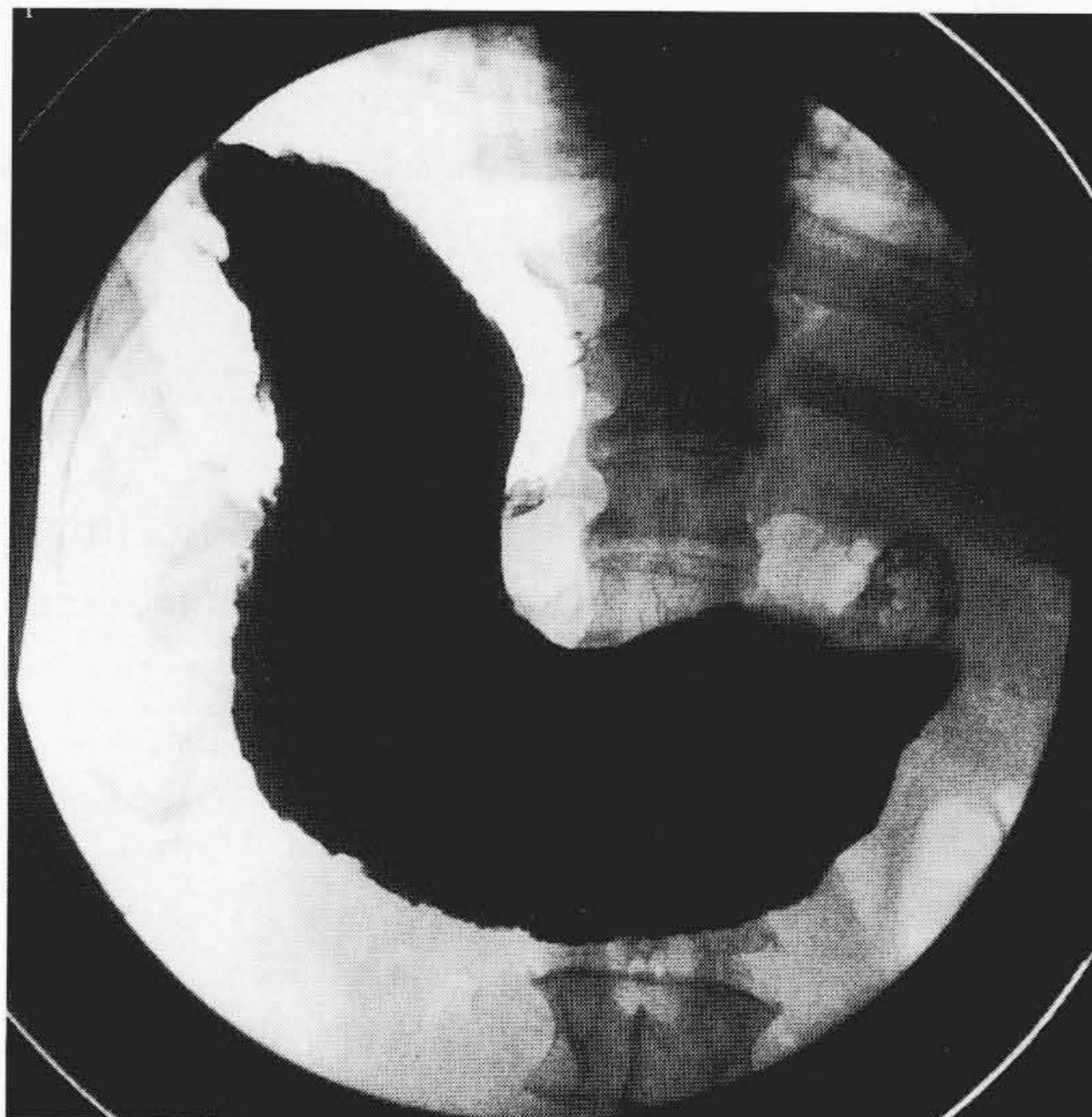
撮影部位		2048 ²		1024 ²	
		オリジナル	辺縁強調	オリジナル	辺縁強調
胸部	縦隔	3.26	3.46	2.95	3.13
	肺部	3.13	3.36	2.84	3.22
胃		2.61	3.42	2.38	3.14

4.2 胃集団検診システムへの応用

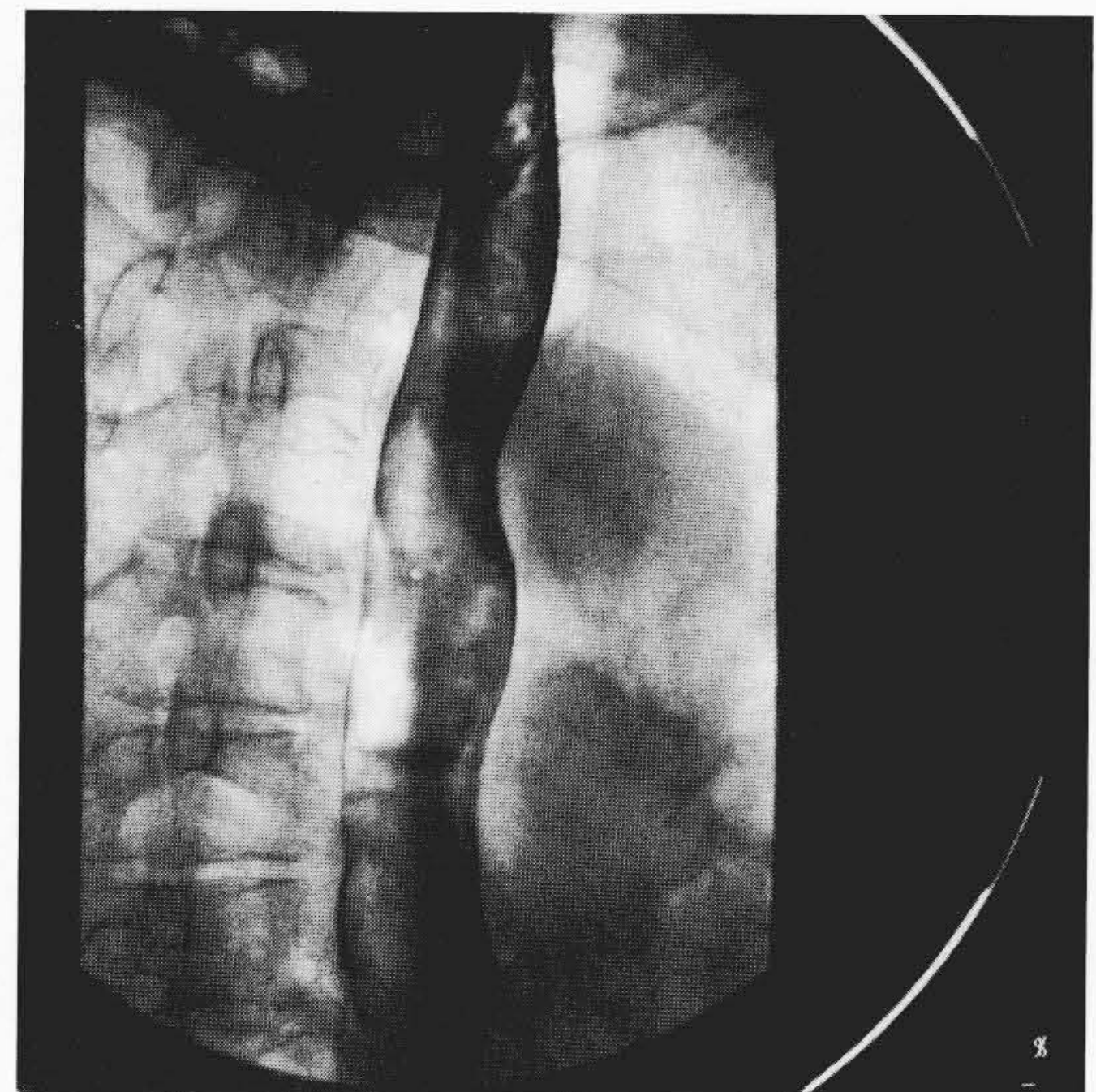
アンダーチューブ方式の胃集団検診用透視台TD-MA 5との組み合わせにより、胃の集団検診および2次検診を行った。TD-MA 5は、間接撮影用の100 mmスポットカメラを備え、検査は通常スポットカメラを用いて行い、必要に応じてDRによる撮影を行った。

DR撮影は、胃の二重造影撮影を主として行い、上部消化管の全部位についての臨床的な有用性の評価を実施した。臨床例を図10に、フィルム撮影との比較評価結果を表3に示す。これにより、精密検査に十分適用できる画質であることが確認された。特に、解像力が問題となる胃小区の描出で、DRがフィルム撮影よりも良い結果となり、十分な解像力であると判断された。

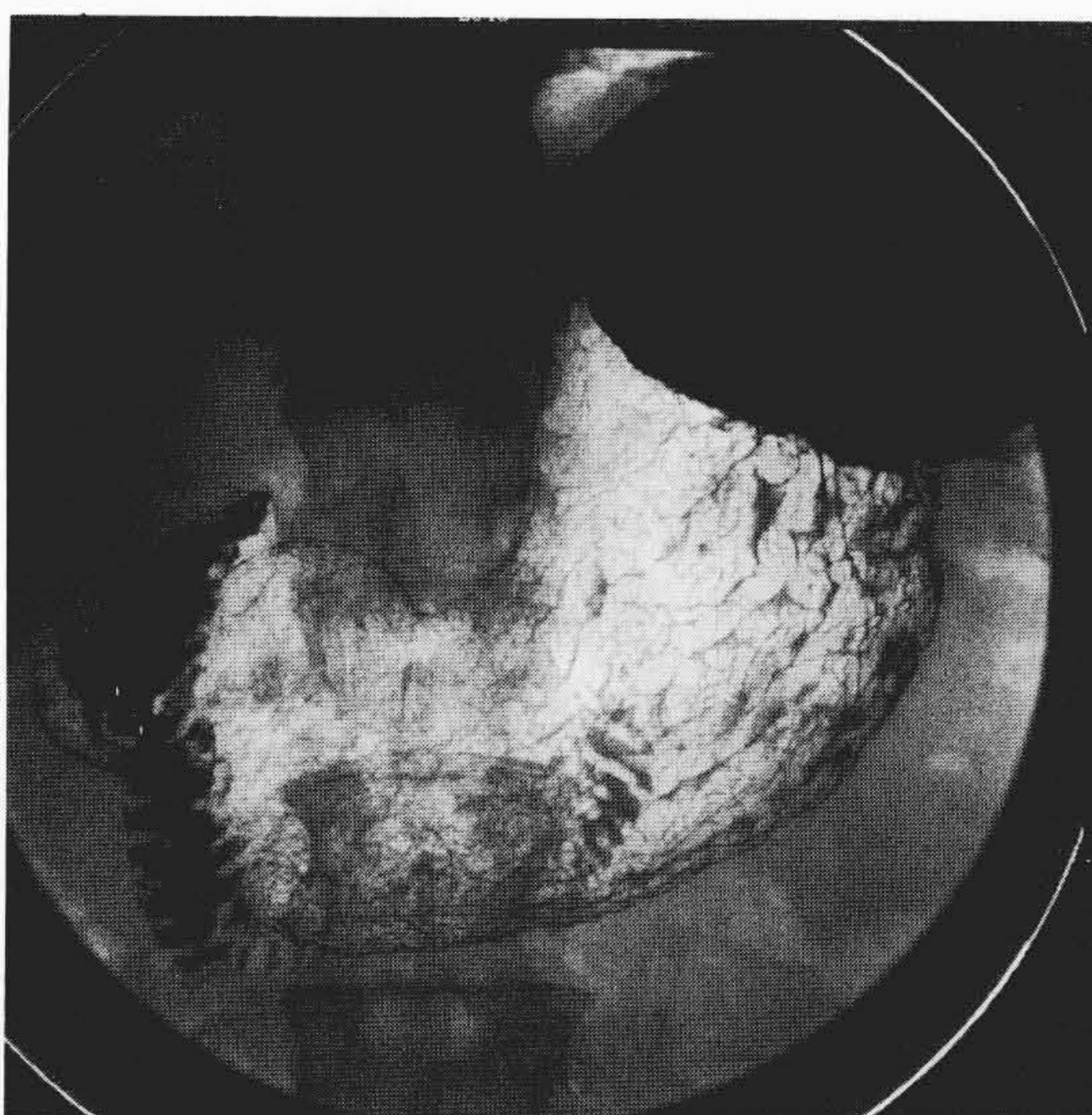
なお、X線量は画質評価によって小線量でも増感紙・フィルムと同等の識別能が得られることから、増感紙・フィルムの



(a) 胃腹臥位充盈(えい)像



(b) 食道画像



(c) 胃背臥位面像



(d) 胃背臥位第二斜位像

図10 癌研究会における臨床例 上部消化管の検査では、すべての部位で良好な画像が得られた。

表 3 財団法人癌研究会 附属病院検診センターでの臨床評価の結果 DRと増感紙・フィルムによる胃の二重造影撮影の診断能の絶対評価を行った。非常に診断しやすいものを5点，診断可能を3点，診断できないものを1点とした。DRとフィルム撮影は，異なった装置によって撮影された。なおDR画像は，テレビジョンモニタ上で診断および評価を行った。

撮 影 部 位	DR	フィルム
背臥(が)位正面	4.68	4.68
第一斜位	4.50	4.52
第二斜位	4.66	4.60
右側臥位	4.74	4.58
左側臥位	4.00	4.30
腹 臥 位	4.30	4.38
再立位正面	3.94	3.90
第一斜位	4.40	3.84
関心部位総合	4.40	4.38
胃 小 区	4.60	4.34
粘膜ひだ	4.82	4.84

場合の $\frac{1}{3}$ から $\frac{1}{5}$ の線量で撮影を行った。
さらにDRの特長の一つに即時画像表示がある。撮影直後に画像が確認できるので，正しく撮影されたことを確認しながらの検査が可能となった。

5 おわりに

X線IIとテレビジョンカメラの高解像力化を行い，2,048²マトリックス画像が撮影可能なII-テレビジョン方式DR装置，DR-2000Hを開発した。

本装置を消化管造影撮影や一般撮影に適用し，フィルム撮影と同等の診断能を得た。DRは撮影画像の即時表示ができ，検査，診断および治療を有機的に結び付けることが可能となる。

DR-2000Hは，最新の技術を駆使し世界最高水準の画質を達成したが，今後も画質の向上を推進していく予定である。さらに，デジタル画像の特長を生かした画像処理による診断能の向上，PACSへの接続による保管・検索の容易化など，操作性の良いシステムの実現を図る考えである。

終わりに，DR-2000Hの映像系の開発について，ご協力いただいた浜松ホトニクス株式会社の関係各位に対し，深謝する次第である。

参考文献

- 1) W. R. Brody : Digital Radiography, PAVAN PRESS (1984)
- 2) 木村：最近の医用画像診断装置，朝倉書店(1988)
- 3) 高野：新しいComputed Radiography，画像診断 2，202～207(1982)
- 4) 倉重：放送・HDTVにおける画像入力技術，テレビジョン学会誌，44，1496～1505(1990)
- 5) Garrett, et al. : Real-time-radiologic Imaging : Medical and Industrial applications, American Society for Testing and Materials(1980)