

# 医用画像のためのコンピュータ支援診断システムの開発の現状と将来

## Current Status and Future on Developments of Computer-aided Diagnosis Systems for Medical Images

藤田 広志\*

Hiroshi FUJITA\*

**要旨** 医用画像の本格的なデジタル化が進む中で、その付加価値として「コンピュータ支援診断 (CAD)」システムの開発が進んでいる。乳房 X 線写真 (マンモグラフィ) と胸部 X 線画像の領域で商品化も始まっており、今後、さらに多くの診断撮像装置や画像診断領域でも、CAD システムの開発・実用化が進むのは間違いない。本稿では、このような CAD システムの開発の背景、現状、技術などの最新の情報を提供し、その将来を展望する。

**Abstract** Developments of “computer-aided diagnosis (CAD)” systems have been conducted, as one of additional values for digital images, under the situation where the utilization of digital images is substantially being in progress in medicine. The CAD systems are now commercially available in the fields of breast (mammography) and chest x-ray images, and it is not hard to say that the CAD systems for many imaging modalities and in the field of many different lesions will be developed and commercialized. In this review, the background of the CAD developments, its current status and the latest information on the techniques are described. In addition, the potential of CAD for the future is discussed and predicted.

**キーワード** : コンピュータ支援診断, コンピュータ支援検出, 医用画像解析, 医用画像処理, 医用画像認識

**Key words:** computer-aided diagnosis, computer-aided detection, medical image analysis, medical image processing, medical image recognition

### 1. はじめに

1839 年にダゲール (J. M. Daguerre) によって発明された写真, そして、本格的には 1895 年にレントゲン (W. C. Roentgen) によって発見された X 線による X 線写真によって、アナログ画像 (乾板, フィルム) による画像診断が始まっている。コンピュータは、核医学画像, X 線 CT 画像, MRI 画像に代表されるように、歴史的に長い間、医用画像の世界に大きな関わりをもっているが、もっとも利用量の多かったフィルムも昨今は CR (computed radiography) や平面 X 線検出器 (flat panel detector, FPD) によって撮像されるデジタル画像に変わりつつある。また、2 次元画像から 3 次元画像に広がり (さらには 4 次元画像へ) 始めた。そして、21 世紀は「仮想化された人体と映像メディア処理」の時代になると言われている<sup>1)</sup>。

医用画像技術と医師の診断との関係を簡単に表すと、Fig. 1 のようになる。100 年以上続いているアナログ画像による診断から、最近のコンピュータによって“生成”・処理 (画像再構成, 画像処理) されたデジタル画像による診断へ、さら

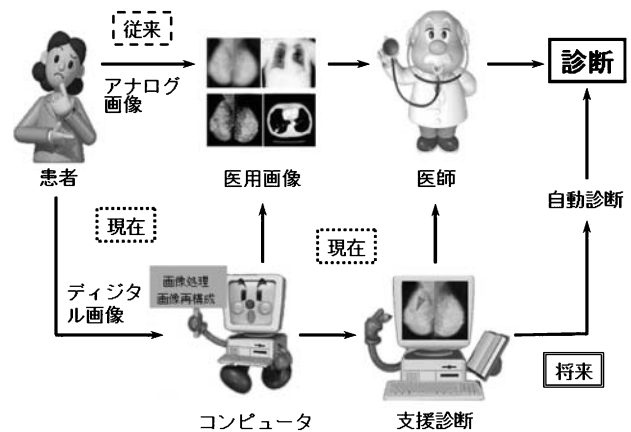


Fig. 1 医用画像技術と画像診断の流れ

にいま新しくコンピュータ支援診断 (computer-aided diagnosis, 以下 CAD) の流れに向かい始めた。これは、医療分野における本格的なパターン認識技術の実用化であるとも言える。ただし、いわゆる自動診断はまだまだ SF 的な将来

平成 15 年 9 月 16 日受付 平成 15 年 9 月 22 日受理 Received 16th, September 2003, Accepted 22nd, September 2003

\*岐阜大学大学院医学研究科再生医科学専攻知能イメージ情報部門 (大学院工学研究科・工学部応用情報学科兼任) 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 Department of Intelligent Image Information, Division of Regeneration and Advanced Medical Science, Graduate School of Medicine and Graduate School of Engineering, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu City 501-1193, Japan

の話であるが、特定の画像の分野では、心電図解析がそうであるように（ただし、これは1次元信号）、それほど時間がかからないかも知れない。

本稿では、医用画像の分野でいまもっとも注目を浴びているCADについて、その開発の歴史、現状、および将来について解説する<sup>2-4)</sup>。

## 2. コンピュータ支援診断 (CAD)

診断領域における画像処理とその展開について、Fig. 2にまとめた。単一画像による処理から複数画像による処理へ、また、画像解析から3次元画像処理へと、高度な処理へと向かっている。コンピュータ支援診断では、これらの画像処理技術が高度に成熟したものを有効に利用していると言える。

さて、コンピュータ支援診断 (computer-aided diagnosis, CAD) とは、放射線画像をはじめとする医用画像に対して、コンピュータで定量的に解析された結果を「第2の意見」として利用する「医師による診断」である (Fig. 3)。最終診断は医師が行うものであり、いわゆる自動診断とはまったく異なる概念・手法である点に十分な注意が必要である。なぜなら、CADシステムの性能の向上に従い、医師が画像の最終チェックをまったくせずに、開発者の意図しなかった自動診断のような間違った使い方をされ、誤診を導くという危険があるからである（このようなことが起こると、CADの発展に大きなマイナス要因になってしまう）。

CADでは、コンピュータで自動検出された病巣の候補を、CRTや液晶モニタなどの参照画像に矢印などで医師に示すことによって (Fig. 4参照)、医師が気付かない病巣やうっかりミスに対して、これらの見落としを減少させることに期待ができる。これは診断の正確度の向上につながる。特に、集団検診のような大量の画像読影の現場では、効果がより大きいと思われる。また、医師の読影経験の相違による病巣検出の読影結果の医師間のバラツキも減少させ、ある高いレベルに診断を維持できるという期待もある。

さらに、CADでは、病巣の良悪性鑑別のような主観的な判断が難しい場合に、コンピュータによって分析された定量的な数値を医師に提示することによって、医師の客観的な判断を可能にし、診断の正確度を向上させると期待される。

このように、CADには、読影に対する正確度の向上や再現性の向上、さらにはシステムの性能が向上されれば、読影時間の短縮、すなわち生産性の向上も可能になると期待されている。

## 3. CAD技術の開発の歴史

CADシステムの開発の歴史は大変に古く<sup>5)</sup>、1960年代にまで遡る。特に、CADの研究が活発になって来たのは、1985年ごろからである<sup>6-8)</sup>。

乳房X線写真（以下、マンモグラフィ）におけるCAD研究の世界最初と考えられる論文は、1967年のRadiology誌に

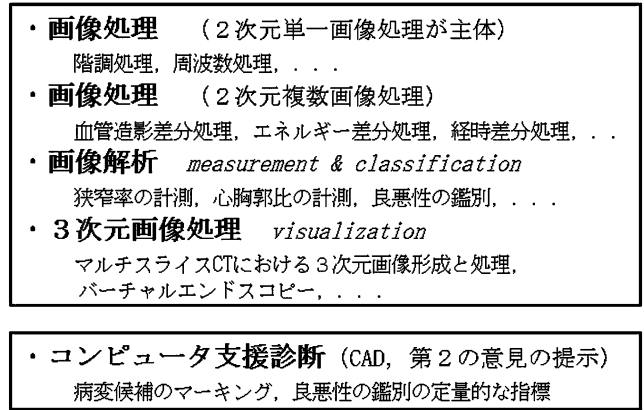


Fig. 2 診断領域における画像処理とその展開

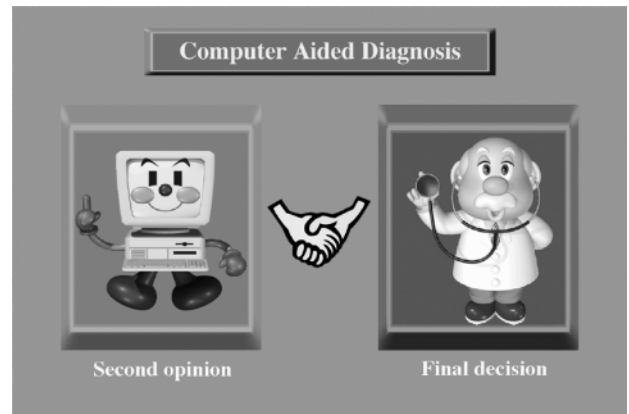


Fig. 3 CADの概念図



Fig. 4 マンモグラフィCADにおける腫瘍陰影の検出結果の表示例 (矢印)

掲載された Winsberg らのものである<sup>9)</sup>。このときの画像の濃度分解能は高々4ビット (16階調) で、腫瘍陰影の検出を左右の乳房X線画像の比較処理で行っている。一方、国内におけるマンモグラフィCADの開発を見ると、1980年後半における木戸らによる研究では、すでにシステムを構成しており<sup>10)</sup>、世界的に見てもすでにI. I. (image intensifier) -TVを用

いたデジタル乳房撮影装置を利用した先進的なマンモグラフィ CAD 開発の研究として、大変に興味深い。その後、東京農工大の小畑らや岐阜大の筆者らが、国内の企業との共同研究のもとで、活発に開発を行っている<sup>11)</sup>。これらのシステムの開発には、わが国の女性に特有なデンスブレストにも十分に対応が可能な新しいシステムとして、大きな期待がかかっている。なお、マンモグラフィ CAD システムは、医療画像における世界最初の実用機として、後述するように 1998 年に米国で実用化された。

また、胸部単純 X 線画像における先駆的な研究として、1964 年の Meyers らによる胸部透視像のデジタル画像から心臓郭比の自動計測<sup>12)</sup>や、同年の Becker らによる胸部 X 線正面像からの特徴抽出の試み<sup>13)</sup>、我が国では 1967 年の鳥脇らによる胸部 X 線写真の肋骨境界の自動識別の研究<sup>14)</sup>などがある。さらに、塵肺症重症度を自動分類する研究なども、1970 年代から数多く行われてきた<sup>5)</sup>。後述するように、胸部単純 X 線写真の CAD は 2001 年に実用化され (CAD では世界で 2 番目の実用化で、胸部画像分野では世界初)、さらに胸部 X 線 CT 画像における腫瘍性病変の自動検出型の CAD システムが 2003 年に実用化されている (CT 画像では世界初の商用化 CAD システム)。

CAD の開発は、単にこれらの 2 つの診断領域に限られるものではない。例えば、X 線 CT 画像の大腸領域におけるポリープ検出のための CAD システム、胃 X 線画像の CAD システム、頭部領域の MRI の CAD システム、乳腺超音波画像のための CAD システム、眼底写真における CAD システムなど、CAD の適用領域は広く確実に拡張を続けている。特に、マルチスライスの X 線 CT の実用化に伴い (胸部領域に限らず)、X 線 CT 画像の診断においては大量の画像データが発生するため、CAD なしでは読影診断に支障が出始めている現状である。しかし、これらの例のいずれもまだ実用化には至っていない。

なお、DSA システムにおける血管系や狭窄率の計測は定量的な尺度を与えるという意味では、すでに実用化されている CAD システムであり、また、CT 画像におけるバーチャルエンドスコーピー (仮想内視鏡) のような 3 次元画像を利用したツールも、すでに実用化された CAD システムと解釈されることもある。

#### 4. マンモグラフィ CAD システム

マンモグラフィは乳がんの早期発見にもっとも有効な手段と考えられており、我が国も含めて集団検診にも利用されている。しかし、残念ながら乳がんの見落とし率は約 30%もあるという報告もある。そのため、1980 年代の半ば頃から、欧米を中心に非常に多くの研究グループがマンモグラフィ CAD の開発を始めている。その 10 年後には、300 以上とも想定される研究グループが、マンモグラフィにおける腫瘍陰影と微小石灰化クラスタ検出という 2 大目標に向かって研究を行っていたとも言われ、おそらくこれほど多くの研究者たちが 1 つの目標に向かって集中的に研究を行った例は、パター

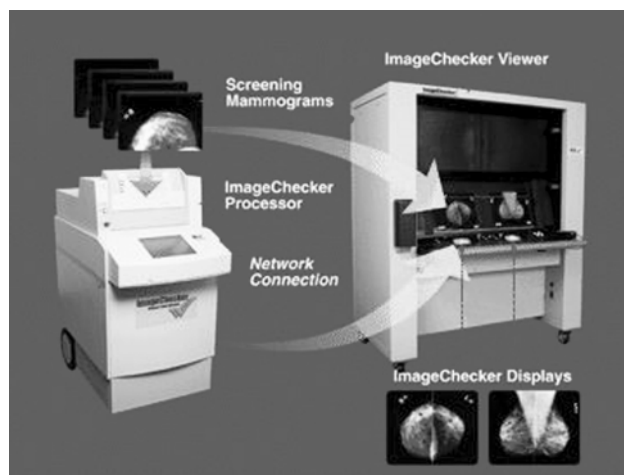


Fig. 5 世界で最初に検診用に実用化された R2 Technology 社のマンモグラフィ CAD システム「ImageChecker System」の概観 (同社のホームページには、最新バージョンのシステムの紹介がある: <http://www.r2tech.com/>)

ン認識の分野でも例がないであろう。

ついに 1998 年に米国のベンチャー企業である R2 Technology 社が開発したマンモグラフィ CAD システムが、米国の FDA (食品医薬品局) の審査を検診用の CAD システムとしてパスし、「ImageChecker System」(Fig. 5) という名の商品として米国内で販売を開始した<sup>15) 16)</sup>。さらに、2001 年 4 月からは、米国における乳がんの集団検診で、CAD の利用に対して特定の保険会社からの医療報酬の請求が承認されるようになっけてきている。同社では、CAD の「D」を、検出 (Detection) の「D」として、コンピュータ支援検出の意味で使用している。ただし、乳がん病変の検出対象が腫瘍陰影と微小石灰化クラスタ陰影の検出に限定されており、本格的なディストーション (構築の乱れ) と呼ばれる病変の検出<sup>17)</sup> はまだできず、良悪性鑑別の処理機能も未対応であり、今後の発展が望まれている。本システムでは、フィルムをデジタル化処理する手法に対応しており (マンモグラフィでは画質の観点から直接方式のデジタル化が遅れているため)、今後のマンモグラフィ専用のデジタル撮像機器の開発と普及が進めば、本格的なマンモグラフィ CAD システムの普及が進展するのは明白である。

R2社に遅れてFDAの審査にパスしたのは、Intelligent Systems Software 社 (後に icad 社に社名変更) の「MammoReader」<sup>18)</sup> と CADx Medical Systems 社の「Second Look」<sup>19)</sup> というマンモグラフィ CAD システムで、2002 年初頭に実用化に成功している。

すでに、これらの CAD システムの臨床的な有用性はたくさん報告されているが、特に良く引用される論文がある。それは、R2 社の CAD システムを利用して 1 万を超える大量な症例で臨床試験を行ったもので、乳がんの検出率が約 20%向上したと報告している<sup>20)</sup>。



Fig. 6 Deus Technologies 社の結節状陰影の検出のための CAD システムの概観 (同社のホームページ <http://www.deustech.com/> より)

## 5. 胸部 X 線画像の CAD システム

胸部単純 X 線写真における CAD の研究では、結節状陰影の検出、間質性肺疾患の検出、気胸の検出、心胸郭比の計測、間質性肺疾患の鑑別診断などがあるが、結節状陰影の検出のための胸部 CAD システムが、2001 年に米国の FDA の承認を得て実用化された。これは、米国のベンチャー企業 Deus Technologies 社によるものであり (Fig. 6)<sup>21)</sup>、このシステムでは 6 mm から 30 mm の大きさの孤立性の肺がんを検出の対象としており、特に、9 mm から 14 mm のサイズの範囲の検出では、検出能力 (感度) が最大で 24% 改善されたと報告されている。2003 年 4 月には、本邦において三菱スペース・ソフトウェア社が同様な CAD システムの商品化に成功している<sup>22)</sup>。

また、胸部 X 線写真における経時差分処理についても触れておく必要がある<sup>23)</sup>。この処理法は、過去画像と現在画像の差分処理を行うことにより、この期間に発生した病変をサブトラクション画像として「強調処理」する技術であり、CAD の一種である。同一患者の過去と現在画像の位置合わせには、非線形ワーピング技術が開発されている。経時差分処理の例を Fig. 7 に示す。このようなシステムは、三菱スペース・ソフトウェア社がシカゴ大学から技術ライセンスを受け、2001 年から胸部 X 線診断支援ソフトウェアとして、本邦で販売を開始している。

胸部画像診断においては、複雑な解剖学的な構造を有する人体の 3 次元情報が 2 次元情報に“圧縮”投影された単純 X 線写真よりも、CT 画像による診断が有用であり、CT 画像を用いた集団検診も行われるケースもあり、CAD への期待が大きい<sup>24) 25)</sup>。胸部 CT 画像において世界で最初に商品化された肺がん検診用 CAD システムは、本邦における限定された商品化ではあるが、2003 年 4 月に日立メディコ社から発表されている。

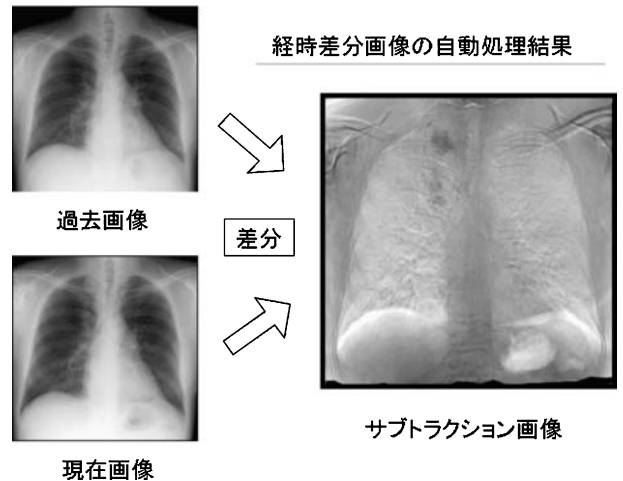


Fig. 7 三菱スペース・ソフトウェア社の胸部 X 線診断支援ソフトウェアによる経時差分処理の例 (同社提供)

## 6. CAD で使われている開発技術

CAD システムは、ハードウェアとソフトウェアで構成されている。ソフトウェアの開発が重要で、大学の研究者や企業の技術者は、いかに新しく有用な CAD のためのソフトウェアを開発するかに日夜しのぎを削っている。

CAD のソフトウェアの開発における技術として重要なのは、画像処理の技術である。画像処理の目的は、人間 (ここでは医師) が見やすくなるような (診断に役立つ) 処理をすることであり、あるいは利用しやすい形に画像を加工することであるが、CAD では後者に該当し、後述する認識過程の画像の前処理に相当するものである。基礎的な画像処理として、階調処理、鮮鋭化処理、ノイズ除去処理などはもちろん、フーリエ解析やウェーブレット解析の手法もしばしば応用される。ただし、単にこれらの教科書的な手法の組み合わせのみでは十分ではないのが常であり、適用対象に応じて新しい独自の画像処理手法の開発が求められる。

次に、画像認識 (パターン認識) のいろいろな技術も重要である。一般に、画像認識の過程は、上述の前処理、特徴抽出、特徴空間における識別処理の手順で行われることが多い。医師は、これまでに学習してきた医学的な知識や様々な経験に基づき病変をパターンマッチングと類推 (推論) を働かせて頭の中で認識処理をしていると考えられる。技術的には、いわゆるテンプレートマッチングのような手法が利用される。また、ソフトコンピューティングと称せられるニューラルネットワークやファジィの技術も有用である。

類推および識別 (そして検出) をするには、それに固有な特徴を引き出すことが必要である (特徴抽出、特徴量解析)。特徴量には、画素値の平均や標準偏差などの統計的な特徴量、陰影の形状を見る面積、長さ、周囲長、円形度などの幾何学的な特徴量などが代表的である。濃度共起行列や情報理論のエントロピーなども使われる。これらの特徴量を組み合わせ、病変部を絞り込み、ある決められた規則に従って最終的な候補を決める (ルールベース法)。また、ニューラルネット

ワークにこれらの特徴量を入力し、良悪性の分類を行ったり、これら 2 つの手法を組み合わせて用いたりもする。最初は、できるだけ候補陰影を見落とさないように過剰に拾い上げるので、後段の処理として偽陽性候補の削除処理が必要になるが、特徴量解析はここでも重要である。

画像工学的には、画像処理や画像認識の知識以外には、「画質」に関する技術も役立つことが多い。また、3次元処理が多くなってきているが、いわゆる仮想現実(virtual reality, VR)で利用されている技術も重要である。

医師に役立つシステムの開発であるので、さらに重要なのは、医師との共同開発の作業であり、できるだけ名医のレベルの医師の読影プロセスをアルゴリズム化できれば、これほどおもしろいことはない。医師の読影過程は、決して分かりやすく論理的であるとは限らない。そこには、経験と“勘”(主観的な知識)のような要素もあると考えられる。なお、開発者もある程度の(時にはかなり専門的な)医学的な知識が必要であり、逆に共同研究者の医師も CAD に関する基礎的な技術の知識の修得が望まれる。

CAD 研究の成功は、画像データベースの質と量にも影響される。公開されているデータベースも利用できるようになってきているが<sup>\*1</sup>、その規模は、例えば「文字認識」などの分野に比べて小さく、内容もまだ未熟な状態である。CAD システムの開発にとって、データベースの充実は大きなテーマであり、初期のレベルでは少数の画像データでもよいが、実用化を目指すレベルになると、データベース量と質の充実が重要になってくる。

CAD の開発の重要な点の一つに、常に有効性の評価を行いながら研究を進める点をあげることができる。病変の検出(真陽性: true positive, TP)の割合と偽陽性(false positive, FP)候補の数でまず性能評価を行う。CAD システムにおけるこれらの値は、実験に用いたデータベースに依存するので単純な比較はできない。しかし、マンモグラフィ CAD システムにおける目安としての数値をあげると、腫瘍陰影という病変では、TP = 90%, FP 数 = 0.8 個/画像で、微小石灰化クラスターでは、TP = 95%, FP 数 = 0.4 個/画像であり、概して後者の病変の検出性能が高い傾向である。ここで注意したい点は、検出率は 100%ではなく(よって、すべての画像データの医師による最終確認が必要)、また、正常箇所も誤って指摘する(これらの例では、画像 1 枚あたり 1.2 個の FP 数になる)ことである。これらの関係を、CAD の検出や識別に関するパラメータを変化されることにより、それぞれ縦軸と横軸にプロットした曲線を描くことができ、これは FROC (free-response receiver operating characteristic) 曲線と呼ばれる。横軸を偽陽性率でプロットした場合は、単に ROC 曲線と呼ばれ、これ

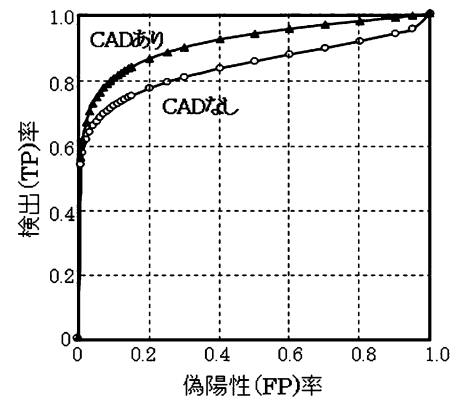


Fig. 8 乳がん検出における CAD の効果<sup>27)</sup>。医師が CAD を用いることにより、ROC 下の面積が 0.84 から 0.91 に上昇している。

らは ROC 解析として、CAD の評価実験に良く利用されている<sup>26)</sup>。実際に、医師との比較において CAD システムの有効性を ROC 解析で示した例はそんなに多くはないが、ここではマンモグラフィ CAD の例として、Fig. 8 に ROC 解析の結果を示す<sup>27)</sup>(曲線が左上方に存在するほど、あるいは曲線下の面積が大きいくほど、検出性能が良いと解釈できる)。この結果は、CAD システムの乳がんの検出率が 100%ではなく、偽陽性候補の提示があっても、CAD を用いると乳がん病変の検出率が改善されることを示している。臨床段階の評価では、単にこのような解析のみではなく、例えば、検診で CAD を利用した結果、精密検査数や読影時間数はどうであったかなど、評価項目が増えてくる。

CAD で開発された技術が、さらに広がりを見せ、逆に新しいシステムを誕生させようとしている。例えば、CAD の検出技術を応用して、電子カルテにおける自動スケッチ作画法に応用された研究例は興味深い<sup>28)</sup>。また、パーチャルエンドスコピーの教育システムへの応用例や<sup>29)</sup>、CT 画像からの仮想切除標本の作成する<sup>30)</sup>ような技術も報告されている。

## 7. CAD の課題

すでに世界初の CAD 実用機が乳房 X 線画像と胸部 X 線画像・CT 画像の両分野で登場したのであるが、これらの CAD 開発状況を全般的に見ても、まだ多くの解決されるべき共通した問題点がある。特に、1) 検出率のさらなる向上、2) 偽陽性候補数のさらなる減少、3) 総合的な CAD システムへの発展(現在は、画像情報のみを利用するものがほとんどであるが、他の医学的な情報の活用や統合)、4) 自己学習機能、5) 高速処理化、6) 安価なシステムの実現などである。CAD は単体で使用される場合もあるが、CAD サーバーとその周辺

\*1 代表的な医用画像データベースとして、胸部単純 X 線写真として、日本放射線技術学会が発行している「標準デジタル画像データベース(胸部腫瘍陰影像)」(<http://www.macnet.or.jp/jsrt2/syutsupan.html>)がある。乳房 X 線写真として、英国のマンモグラフィ画像解析学会が出している MIAS デジタルマンモグラフィデータベース (<http://www.wiau.man.ac.uk/services/MIAS/MIAScom.html>) や南フロリダ大学の研究者らが作成した DDSM (Digital Database for Screening Mammography) と呼ばれているデジタルマンモグラフィデータベース (<http://marathon.csee.usf.edu/Mammography/Database.html>)がある。また、コンピュータ支援画像診断学会 (<http://www.toriwaki.nuie.nagoya-u.ac.jp/~cadml/>) は、CR (Computed Radiography) による乳房 X 線画像、胃 X 線二重造影像、間接撮影胸部 X 線像の各種の画像データベースを刊行している。

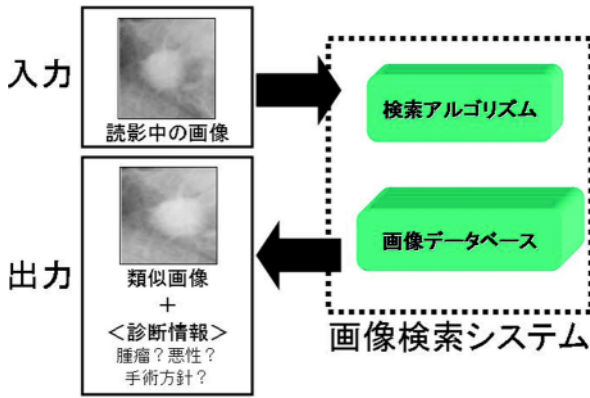


Fig. 9 マンモグラフィ腫瘍陰影を例にした検索型 CAD

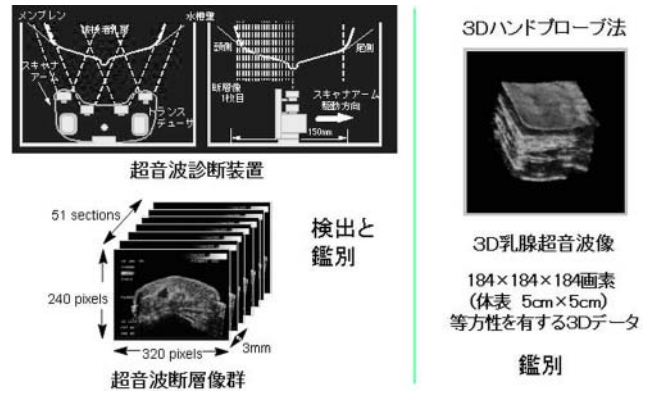


Fig. 10 乳腺超音波 3次元画像における CAD システムの開発<sup>35) 36)</sup>

のクライアントという形態で、病院内のネットワークの中や、関連施設内のネットワーク内で、あるいは地球規模で使用される可能性も高い。

また、大量のデータベースの作成も関連した重要テーマであり、そのようなデータベースを使った検索型の CAD システム開発、正常構造の解析からの CAD へのアプローチ、CAD の有効性を示す臨床的な CAD 評価の実績のさらなる集積・検討、医師と CAD との連携・強調作業の関わりの検討（医師と CAD の信頼関係）なども望まれる。検索型の CAD は、最近の北米放射線学会（RSNA）において、MD OnLine 社という企業が興味ある展示（ImageMatch というソフトウェア）を行っている<sup>31) 32)</sup>。このような検索型の CAD の手法は（Fig. 9）、今後の重要な CAD 技術となることは間違いない<sup>33) 34)</sup>。

CAD の利用にとって大きな要因に、米国のように CAD の利用により保険が適用されるかがある。コスト面からさらに考えると（特に小さな施設では）、各施設で各種の CAD システムを購入することには限界があり、“CAD 利用センター”のような方式が導入されるかもしれない。

## 8. おわりに

CAD の実用化はまだ始まったばかりであり、その応用分野が急速に広がりつつある現状である。本邦では、これまで CAD 研究の大型の予算は皆無であったが、文部科学省の科学研究費補助金の特定領域研究に、2003 年度から 4 年の計画で「多次元医用画像の知的診断支援」（代表者：東京農工大学・小畑秀文教授）が認められている。CAD に対するその期待の大きさが伺える。

CAD 夜明けが、21 世紀の幕開けとともに始まったと言っても過言ではない。これまでのベンチャー企業のための CAD への取り組みから、ついに大企業も CAD に名乗りを挙げるようになってきた。今後、フラットパネルディテクタのような新しい検出器による撮像装置が普及しようとしており、画像のデジタル化がますます進み、医療施設の IT 化はより高度になり、またコンピュータ関連装置の高速化・大容量化とともに、さらに情報通信の高速化によって、CAD の必要性和その有効利用性は今後急速な勢いで高まっていくものと予想され

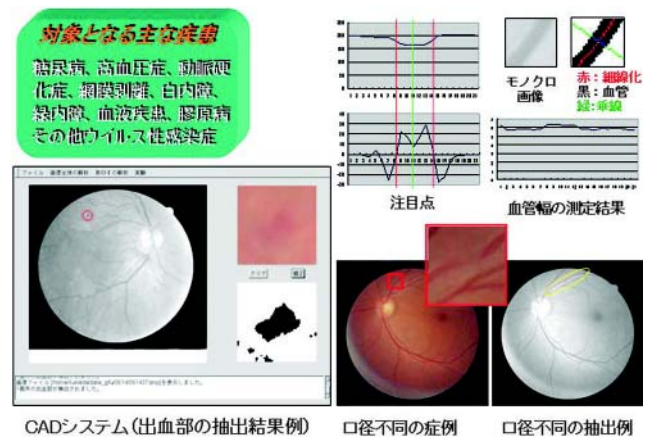


Fig. 11 眼底写真における CAD システムの開発<sup>37)</sup>

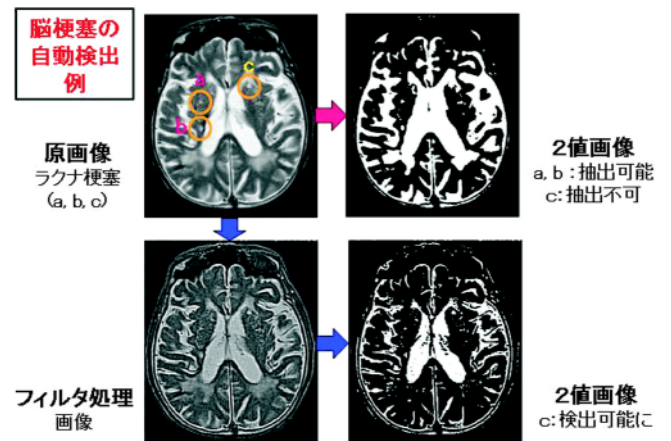


Fig. 12 頭部 MR 画像におけるラクナ梗塞の自動検出の CAD システムの開発<sup>38)</sup>

る。

CAD はまだまだ臨床応用が始まったばかりの 21 世紀に本格的に開花する技術である。CAD が、今後、ますます多くの診断領域、また、多くのモダリティに適用されていくのは、疑う余地もない。

最後に、参考までに、われわれが現在開発中で、人間ドックや検診で多くの画像が発生するため、近い将来の実用化が



期待される CAD のシステムの 3 つの開発例を示す (Fig. 10 - Fig. 12) <sup>35-38)</sup>.

### 参 考 文 献

- 1) 鳥脇純一郎, 新しい医用画像環境—仮想化された人体と映像メディア処理の時代へ—, 新医療, 4月号, 40-45, 1997.
- 2) 藤田広志, コンピュータ支援診断 (CAD) システム (1) 基礎, INNERVISION, **16** (4), 83-90 (2001).
- 3) 藤田広志, ラジオグラフィにおける画像読影 CAD システムの現状, 新医療, **28**, 9月号, 46-49 (2001).
- 4) 藤田広志, コンピュータ支援診断 (CAD: Computer-aided diagnosis), 特集: ここまで来た医用画像, 映像情報 (インダストリアル), **34** (5), 29-35 (2002).
- 5) 鳥脇純一郎, 館野之男, 飯沼 武 編著, 医用 X 線像のコンピュータ診断, シュプリンガー・フェアラーク東京, 東京, 1994.
- 6) 土井邦雄 他, CAD 元年 (1998 in USA) —コンピュータ支援診断システム, 21 世紀への始動—, INNERVISION, **14** (10), 1-82 (1999).
- 7) 鳥脇純一郎, X 線像のコンピュータ支援診断—研究動向と課題, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), **J83-D-II** (1), 3-26 (2000).
- 8) 藤田広志, 真田 茂, 石田隆行 (編集), CAD 技術論文特集号, 日本放射線技術学会雑誌, **56**, 317-509 (2000).
- 9) F. Winsberg, M. Elkin, J. Marcy, JR, et al., Detection of radiographic abnormalities in mammograms by means of optical scanning and computer analysis, Radiology, **89**, 211-215 (1967).
- 10) 木戸長一郎, 遠藤登喜子, 堀田勝平, 乳癌検診に対する DMR (Digital Mammo-Radiography) の意義, 癌と化学療法, **15**, 1665-1670 (1988).
- 11) 藤田広志, マンモグラフィにおけるコンピュータ支援診断 (CAD) システムの現状と問題点, 乳癌の臨床, **15**, 635-646 (2000).
- 12) P. H. Meyers, C. M. Nice, H. C. Becker, et al., Automated computer analysis of radiographic images, Radiology, **83**, 1029-1034 (1964).
- 13) H. C. Becker, W. J. Nettleton, P. H. Meyers, et al., Digital computer determination of a medical diagnostic index directly from chest X-ray images, IEEE Trans, BME, **11** (3), 67-72 (1964).
- 14) 鳥脇純一郎, 福村晃夫, 小池和夫 他, 胸部 X 線写真の濃度分布の性質と肋骨境界の自動識別, 医用電子と生体工学, **5**, 182-191 (1967).
- 15) 長谷川 玲, 世界で初めて商品化されたマンモグラフィ用 CAD —ImageChecker—, 日本放射線技術学会雑誌, **56**, 355-358 (2000).
- 16) <http://www.r2tech.com/>
- 17) T. Matsubara, T. Ichikawa, T. Hara, et al., Automated detection methods for architectural distortions around skinline and within mammary gland on mammograms, Proc. of CARS 2003, International Congress Series **1256**, 950-955 (2003).
- 18) <http://www.issicad.com/home.lasso>
- 19) <http://www.cadxmed.com/>
- 20) T. W. Freer, M. J. Ullissey, Screening mammography with computer-aided detection: Prospective study of 12,860 patients in a community breast center, Radiology, **220**, 781-786 (2001).
- 21) <http://www.deustech.com/>
- 22) <http://www.kansai.mss.co.jp/CADProj/index.html>
- 23) 内田 勝 (監修), 藤田広志・小寺吉衛 (編集), デジタル放射線画像, p. 161-164, オーム社, 東京 (1998).
- 24) 仁木 登, 肺癌 CT 検診支援システム, 日本放射線技術学会雑誌, **56**, 337-340 (2000).
- 25) 山本真司, 肺がん CT 検診における CAD, Med. Imag. Tech., **21**, 21-26 (2003).
- 26) 桂川茂彦 (編集), 医用画像情報学, 南山堂, 東京, 2002.
- 27) 福岡大輔, 原 武史, 遠藤登喜子他, 乳房 X 線写真における医師の読影と CAD システムの検討結果との比較, 日本放射線技術学会雑誌, **56**, 436-442 (2000).
- 28) 中川俊明, 原 武史, 藤田広志他, 乳房 X 線写真のスケッチ画作成支援システムの開発, 医用電子と生体工学, **39**, 297-304 (2001).
- 29) 森 健策, 鳥脇純一郎, バーチャルエンドスコーピー, 日本放射線技術学会雑誌, **56**, 349-354 (2000).
- 30) 森 健策, 榊田晃弘, 長谷川純一他, 3 次元医用画像の変形に基づく管腔臓器の仮想展開像の作成と胃 X 線 CT 像への応用, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), **J83-D-II** (1), 351-361 (2000).
- 31) <http://www.mdol.com>
- 32) 藤田広志, エキスパートによる RSNA 最新レポート: CAD (コンピュータ支援診断) の動向, INNERVISION, **18**, 30-31 (2003).
- 33) 中川俊明, 原 武史, 藤田広志, 局所的なパターンマッチングによる画像検索法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), **J85-D-II** (1), 149-152 (2002).
- 34) 土井邦雄, コンピュータ支援診断 (CAD): 基礎概念, 現状, および将来の可能性, 日独医報, **48** (1), 8-20 (2003).
- 35) 福岡大輔, 藤田広志, 三次元乳腺超音波画像のための CAD システムの開発 (技術の立場から). INNERVISION, **14** (10), 70-73 (1999).
- 36) T. Hara, D. Fukuoka, H. Fujita, et al., Development of automated detection and classification methods of masses on 3D breast ultrasound images. Proc. of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2002), Springer, 794-799 (2002).
- 37) J. Hayashi, T. Kunieda, J. Cole, et al., A development of computer-aided diagnosis system using fundus images. Proc. of the 7th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM 2001), 429-438 (2001).
- 38) 横山龍二郎, 李 鎔範, 原 武史他, 脳 MR 画像におけるラクナ梗塞領域の自動検出, 日本放射線技術学会雑誌, **58**, 399-405 (2002).