

© 1985 ISIJ

鉄鋼用 X 線断層撮影装置の開発

技術報告

Development of X-ray Computed Tomographic Scanner for Iron and Steel

田口 勇*・中村 滋男*²

Isamu TAGUCHI and Shigeo NAKAMURA

Synopsis :

X-ray computed tomography is extensively used in medicine, but has rarely been applied to non-medical purposes. Steel specimens pose particularly difficult problems-very poor transmission of X-rays and the need for high resolving capability. There has thus been no effective tomographic method of examining steel specimens.

Due to the growing need for non-destructive, non-contact methods for observing and analyzing the internal conditions of steel microscopically, however, we have developed an X-ray Computed Tomographic Scanner for Steel (CTS) system, specifically for examination of steel specimens.

Its major specifications and functions are as follows. Type: the second-generation CT, 8-channels, Scanning method: 6° revolution, 30-times traversing, Slice width: 0.5 mm, Resolving capability: 0.25 × 0.25 mm, X-ray source: 420 kV, 3 mA, X-ray detector: BGO scintillator, Standard specimen shape: 50 mm dia., 100 mm high, Measuring time: 10.5 min.

Porosity of a stainless steel (SUS 304) bloom was examined three-dimensionally by the CTS system. Corrosion procedure of a steel slab was also examined.

1. 緒 言

X線断層撮影装置は英国 EMI 社の G. N. HOUNSFIELD¹⁾によつて発明されて以来、わずか 10 年ほどしか経過していないにもかかわらず、人体内部を克明に撮影できる装置であるところから、現在の医療において必須の設備として広く普及し、実用されている²⁾³⁾。この装置は対象物に多方向から X 線を透過させ、吸収された X 線量を測定し、結果を電算機で解析し、対象物の断面像を得る装置である。非破壊、非接触で、高精度の内部断面像が得られ、さらに画像解析や記録保存などのできるため、この装置を工業分野の試料にも適用しようとする試みは比較的早くから行われたが、結果的には大きな進展はなかつた。しかし、ごく最近、この装置を工業分野に应用することがさかんになり、石炭の燃焼過程の調査、高炉劣化カーボンレングの調査、自動車用アルミ部品欠陥調査などが試みられた。これらの应用のうち、とくに注目されているのは立ち木の欠陥、年輪などの測定⁴⁾である。しかし、上記の应用例からわかるように、比較的 X 線が透過しやすく、分解能も低くてよい試料への应用であつて、X 線が透過しにくく、高分解能を必要とする鉄鋼試料への应用は行われなかつた。

以上から、著者らは、鉄鋼試料専用の X 線断層撮影装置 (X-ray Computed Tomographic Scanner for Steel, 以下、CTS と略す) の開発に着手した。CTS は鉄鋼試料の欠陥調査、形状寸法測定、組成分析、介在物分析などを、非破壊、非接触、オンライン、熱間で実施できる可能性をもつが、本報告ではその鉄鋼への応用の第 1 報として、開発した装置と基本的な測定例を述べる。

2. 装置および測定

2.1 装置

開発した CTS の外観を Photo. 1 に、その主要部である X 線検査室の内部を Photo. 2 に示す。CTS はつぎの四つからなる。すなわち、高圧発生器 (Photo. 1 の a)、X 線検査室 (同 b)、コンソール (同 c) と電算機 (同 d) である。この装置は人体頭部用 X 線断層撮影装置 (東芝製 TCT-30) を基礎としたが、X 線透過性が悪く、かつ高分解能を必要とする鉄鋼試料の専用とするために、新設計して製作した。新設計した主なところはつぎのとおりである。

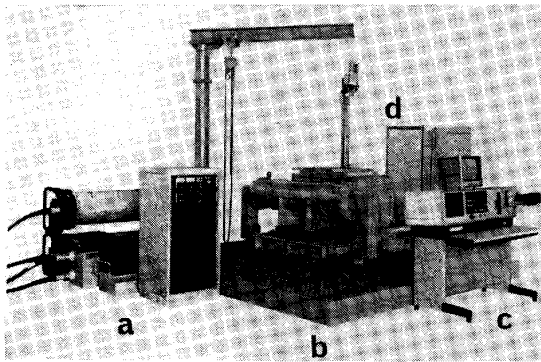
(1) X 線源の高圧化

市販されている X 線管を調査し、管電圧最高 420 kV、管電流最大 3 mA、タングステンターゲットの X 線管を

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 8 月 28 日受付 (Received Aug. 28, 1984)

* 新日本製鉄(株)分析研究センター 工博 (Analysis Research Lab., Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

*2 (株)東芝 府中工場 (Fuchu Works, Toshiba Corp.)



a : high-voltage power source, b : X-ray examination box, c : console, d : computer

Photo. 1. General view of the developed X-ray computed tomographic scanner for steel (CTS).

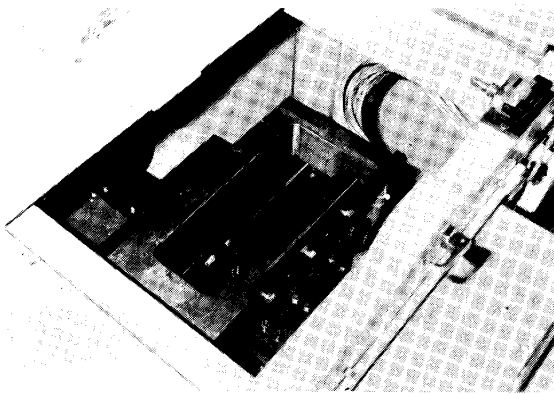


Photo. 2. Inside of the X-ray examination box of CTS.

使用した。このX線管を使用することにより、X線データ収集 9 min 間で、径 50 mm までの鉄鋼試料が撮影できるようになった。

(2) X線スキャニング方式の変更

医療用X線断層撮影装置では人体は動かず、X線源と検出器が回転などの運動をする。しかし、鉄鋼試料の場合には、人体とは異なり、試料を回転することも可能であり、高精度に回転などを行わせるには、大きくて重いX線管を回転させるよりは試料回転の方が有利なので、この方式を採用した。

(3) 微細コリメーターの採用

医療用 X 線断層撮影装置の分解能は、平面で 1×1 mm、厚さ方向で 2 mm が最小である。鉄鋼試料について要求される分解能はさらに小な場合が多いので、分解能向上を目的として、微細なスリット (断面: 0.5×0.5 mm) をもつコリメーターを新たに製作して取り付けた。すなわち、タングステン高密度合金 (ヘビーアロイ、タングステンに少量の銅とニッケルを添加) の板に所定の

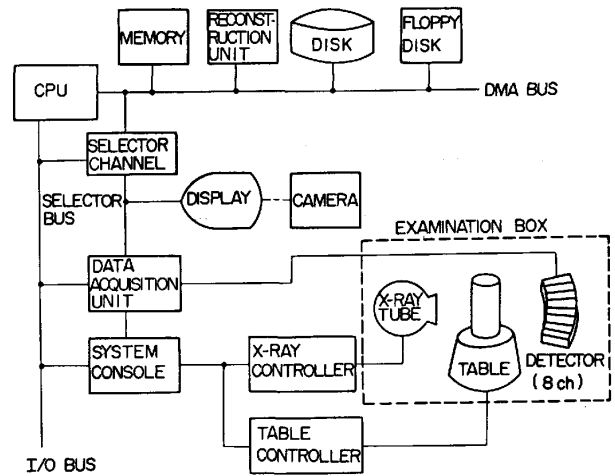


Fig. 1. Diagram of CTS.

深さおよび方向の溝を 8 本作製し、同合金の別の板でカバーして組み合わせた。2 個 1 組 (いずれも $44 \times 59 \times 98$ mm) で、一つは X 線源と試料間に、他は試料と検出器間に、鉄棒 (Photo. 2, 長方形の棒) で懸吊した。この二つのコリメーターは、懸吊前に、鉄棒へ溶接して一体化した。以上により、実測値で、平面分解能 0.25×0.25 mm を得ることができた。

CTS についての他の主な仕様、機能などはつぎのとおりである。X線検出器としては、BGO (Beryllium-Germanium Oxide) シンチレーターをつけた光電子増倍管を使用した。CRT (コンソール) は 240×240 の画素で、得られた画像につき、CTS 自体でも基本的な解析を行うことができる (電算機: Photo. 1 の d, TOSBAC 7/10, 4 倍拡大, 9 倍拡大, プロフィール作成, ヒストグラム作成, 断面交換など)。CRT 上の画像をフロッピーなどを介し、外部の画像解析装置、例えば CMA⁵⁾ の画像解析装置で、さらに高度の解析を実施することもできる。なお、Fig. 1 に CTS のシステムの構成図を示す。本システムにおいて、測定操作は、すべて X 線管理区域外にあるシステムコンソールから指令される。また、ITV によつて X 線検査室内の試料の運動などを監視できる。

CTS では高圧 X 線を使用しているが、X 線照射時でも X 線検査室表面で、漏洩 X 線検出量が法規制値以下になるようにした。すなわち、X 線検査室は鉄板 (12 mm 厚) と鉛板との二重構造で、鉛の厚さは X 線が直接的にあたる検出管側の壁で 3.5 mm、他で 2~3 mm とした。なお、X 線照射の向きは窓側へとした。また、以上から X 線検査室 ($56 \times 105 \times 70$ cm) の重量が 2 t ちかくなり、床耐荷重の規制から、鉄骨製プラットフォーム (3×3 m) 上に設定した。

2.2 データ収集

CTS におけるデータ収集はつぎのとおりである。試料（標準：円柱形，径 50 mm，高さ 100 mm）を，X線検査室内の鉄製ウェッジにある穴（Photo. 2 参照，径 51 mm）に入れ，ウェッジ下部にあるターンテーブルに載せる。テーブルの高さを調節して，試料をX線でスライスする面を定める。試料に対して，X線照射を開始する。試料を透過したX線を，8個のX線検出器を用い，それぞれ異なる方向から測定して，結果を電算機に送る。

以上を Fig. 2, 3 でさらに詳細に説明する。CTS は第2世代に属するX線断層撮影装置で，X線（1.5×1.5 mm にフォーカス）は，Fig. 2 のように 6° のファンビームとして，まず第一のコリメーターを通り，8本（それぞれ，断面 0.5×0.5 mm 角）に分けられ，試料に

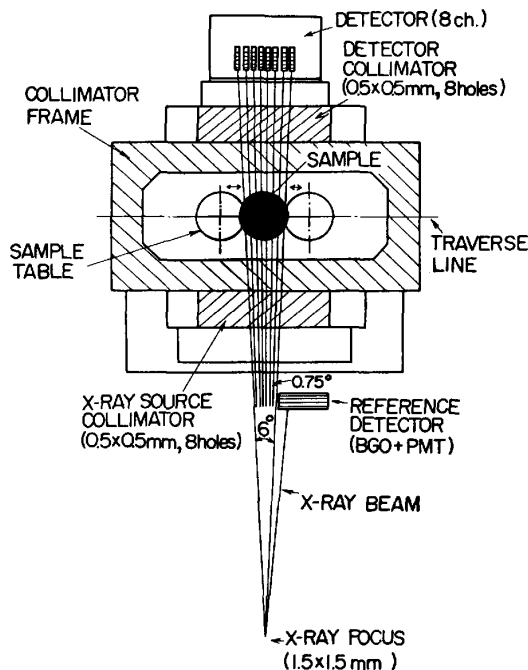


Fig. 2. Explanation of data acquisition. (No. 1, plane view of the X-ray examination box.)

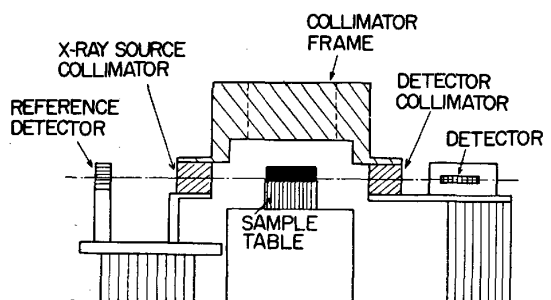


Fig. 3. Explanation of data acquisition. (No. 2, side view of the X-ray examination box.)

照射される。試料を透過したX線はふたたび第二のコリメーターを通り，8個のX線検出器で検出される。一方，試料は直線運動（トラバース，同範囲：62 mm）と回転運動（ローテーション）をする。トラバース，ローテーションの順に30回繰り返す。1回のトラバースで，異なる8方向からのデータの収集を同時に行うことができる。さらに，それぞれ1方向について，0.125 mm ピッチで496個所のデータ収集をする。トラバース後のローテーションの角度は6°であるから，30回の繰り返して，180°（6°×30）区間に対して，240方向（8方向×30）について，透過したX線量のデータが得られる。すなわち，180°区間について，0.75°ずつ方向が異なつた，トラバースのデータが得られる。以上を Fig. 4 に図解して示した。データ収集終了後はターンテーブルは停止し，X線の照射も止まる。

2.3 画像再構成

目的とする断面の画像を得るには，透過したX線量についての測定データを電算機でさらに処理することが必要である。画像を再構成する方法としては，試料の細分化された分析点のそれぞれを未知数とし，多元連立方程式の解を求める方法が考えられるが，電算機演算に長時間を要し，採用できない。一般にX線断層撮影装置における再構成法はフィルター補正逆投影法なので，CTSでもこの方法によることにした。この方法は，収集データの前処理，フィルター補正，逆投影法の三つから成る。前処理はさらに速度補正とリファレンス補正に分けられる。速度補正とは，透過X線量はトラバース速度に依存するので，同時に測定してあるトラバース速度で補正することである。またリファレンス補正は，リファレンス検出器での測定結果で，X線量の経時変化を補正することである。なお，前処理されたデータは対数変換し，つ

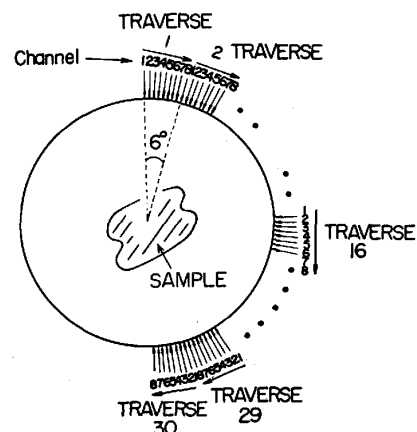


Fig. 4. Explanation of data acquisition. (No. 3, X-ray scanning method around the sample.)

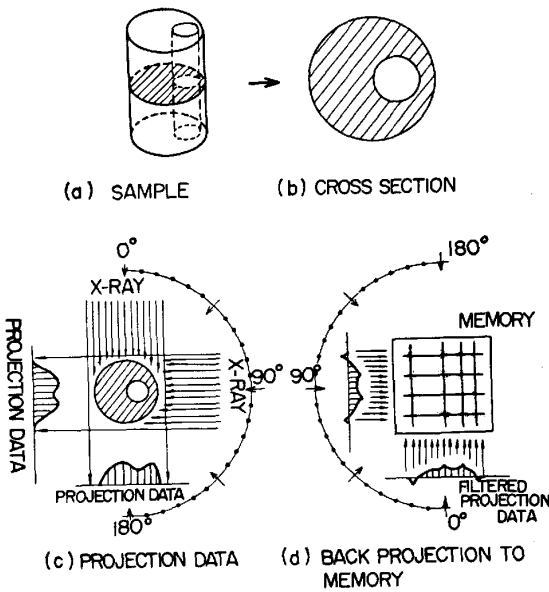


Fig. 5. Explanation of filtered back projection of CTS.

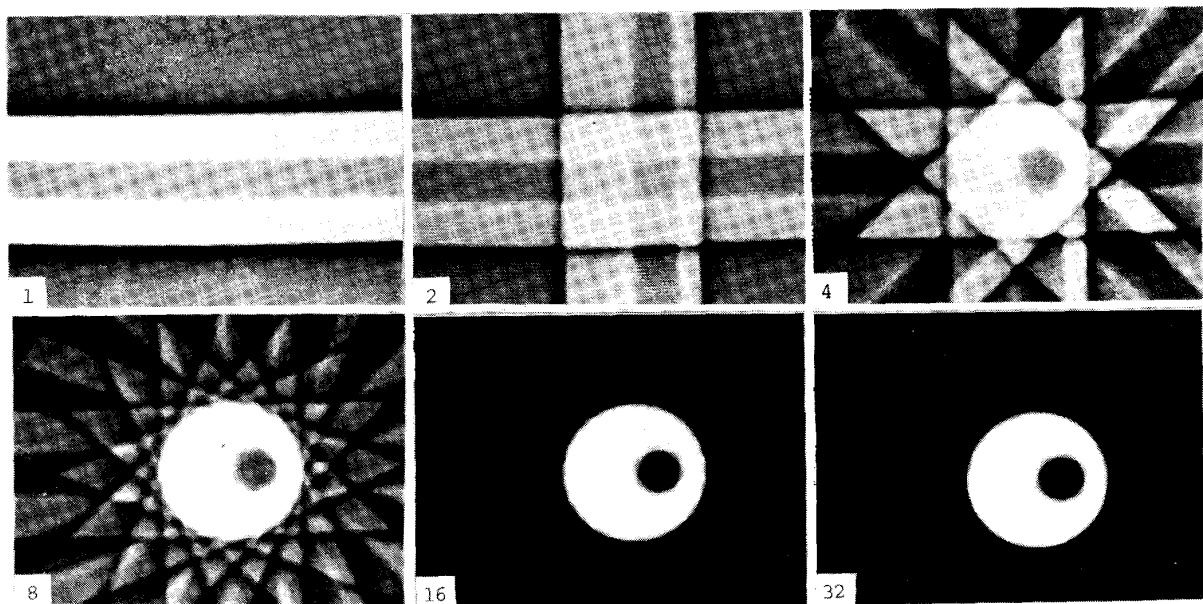
ぎに移される。フィルター補正は、画像から、画像再構成法が原因で生じる偽像を極力除くために考えられた補正で、上記から移された数値と、特定されたフィルター関数との積和をとって補正を行うことである。以上を Fig. 5 に図解した。すなわち、試料 (a, 断面 b) について、収集される透過 X 線量のデータは c のようである。この c に示されるデータを、単純に電算機のメモリー上に逆投影すると、放射線状の偽像が数多くあらわれ、画像が著しく悪くなる²⁾。これは、単純な逆投影に

おいては、逆投影像が互いに重なり、その重なった部分が放射線状の偽像になることが知られている。そこで CTS では一般の X 線断層撮影装置のように、フィルター補正逆投影法を採用することにし、SHEPP と LOGAN⁶⁾ によつて提案されたフィルター関数を採用した。

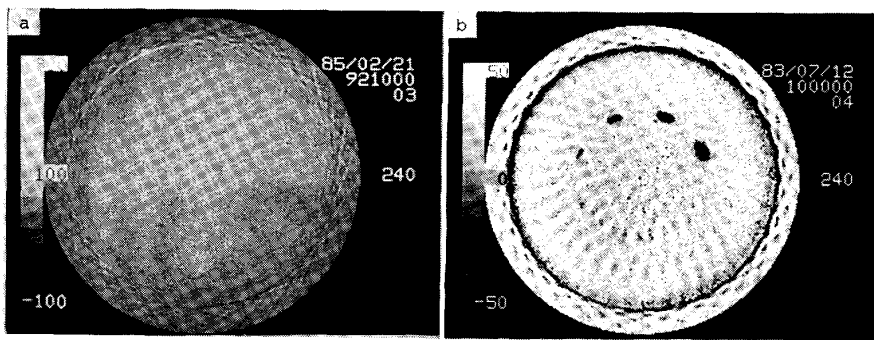
画像を再構成する最終段階である逆投影法を Fig. 5 の d と Photo. 3 に説明した。すなわち、最終段階においては、240 方向 (Fig. 4, 参照) からの透過 X 線量のデータを上記の処理後、電算機のメモリー上に、透過してきた方向に逆投影する。Fig. 5 の d では例として 2 方向からだけの逆投影を示したが、Photo. 3 では、電算機シミュレーションによつて、32 方向からの逆投影の結果が、画像を再構成する様子を示した。Photo. 3 では、Fig. 5 の試料の単純な円形の穴を、再構成しているので、16 回以上で、ほぼ原形となつていくが、複雑な形状を高精度で再構成するにはさらに多くの回数が必要であることは当然である。以上の画像再構成は、CTS では Fig. 1 の再構成ユニットで実施され、再構成された画像はコンソールの CRT (240×240 画素) にディスプレイされる。なお、画像再構成の所要時間は 90 s 間であつた。

2.4 測定

CTS による鉄鋼試料の標準測定操作はつぎのとおりである。鉄鋼試料 (標準: 径 50 mm, 高さ: 100 mm) を、X 線検査室の鉛ガラス戸 (厚さ 9 mm) をあけて、鉄製ウェッジの穴を通し、その下部のターンテーブル上に設定する。コンソールから、試料を上下させて、X 線

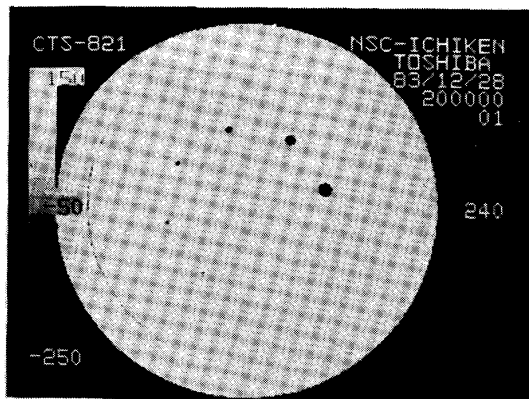


(1, 2, 4, ... : Runs of back projection)
Photo. 3. Explanation of back projection method by computer simulation.



(Hole diameter : 2, 1.5, 1, 0.75, 0.5, 0.25mm)

Photo. 4. Observation of test steel phantom by CTS without the wedge (a) and without the collimator (b).



(Hole diameter : 2, 1.5, 1, 0.75, 0.5, 0.25mm)

Photo. 5. Observation of test steel phantom by CTS with the wedge and the collimator.

スライス位置を決定し、X線の照射を開始する。CTSの測定において、良質な画像を得る見地から特記されることは、上記のウェッジとコリメーターの使用である。ウェッジは幅 60 mm、長さ 460 mm、厚さ 20 mm の鉄板の中央に貫通穴 (径 51 mm) をあけたものである。1回のトラバースにおいて、X線は鉄鋼試料がない部分、ある部分、ない部分の順に照射していく。この間のX線透過量の差は著しく、X線検出器の感度調整幅を越えており、結果としての画質を極端に悪くし、ある場合には画像が得られない。鉄製ウェッジは、鉄鋼試料がない部分を補うようにし、X線透過量に著しい差が生じないようにするために、採用した。

Photo. 4 および 5 に、ステンレス鋼テストファントム (径 50 mm、厚さ 10 mm、径 2, 1.5, 1, 0.75, 0.5, 0.25 mm の貫通穴) を CTS で測定した結果を示した。Photo. 4(a) はウェッジだけをつけずに、Photo. 4(b) はコリメーターだけをつけずに測定した結果である。鉄製ウェッジをつけずに測定した結果を示す Photo. 4(a) では、画像はまったく得られていない。画質向上に対するコリメーターの寄与は大である。上記で詳述した微細コリメーター (2個1組、いずれも $44 \times 59 \times 98$ mm、スリット断面 0.5×0.5 mm) は使用せずに、同

じ寸法、材質で、スリット断面 1×1 mm の1個のコリメーターを、X線検出器の前に設置して、測定した結果を、Photo. 4(b) に示す。Photo. 4(b) の結果では、穴の形状は、実物より大で、ゆがんでおり、かつ放射線状の偽像が多く見られる。以上に対して、このテストファントムを、鉄製ウェッジおよび微細コリメーターを同時に使用して測定した結果を Photo. 5 に示す。この結果によれば、貫通穴の測定結果は良好で、穴径もほぼ正確に観察されており、最小のもの (径 0.25 mm) まで識別されていることがわかった。なお、CTS による測定においては、放射線状の偽像を除去する目的で、試料の断面が円となるように試料調製をしている。角張った形状の試料は一般に放射線状の偽像がやすい。また、小型の試料 (径 50 mm 以下) は、鉄製のビーカーなどに入れ、100 メッシュ程度の鉄粉に埋めて測定することにした。

3. CTS による測定例

3.1 ステンレス鋼中のポロシティー測定

ステンレス鋼 (SUS 304) の試験溶解ブルームから円

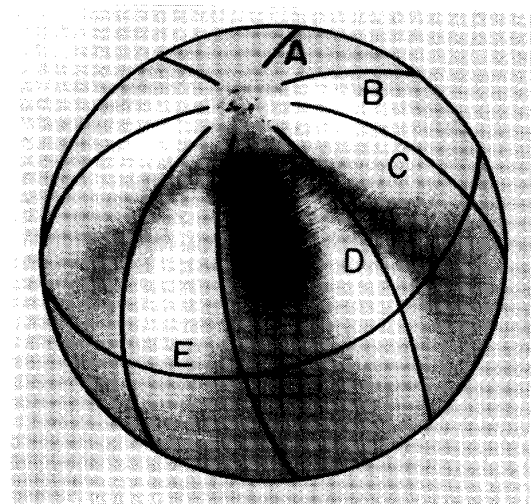
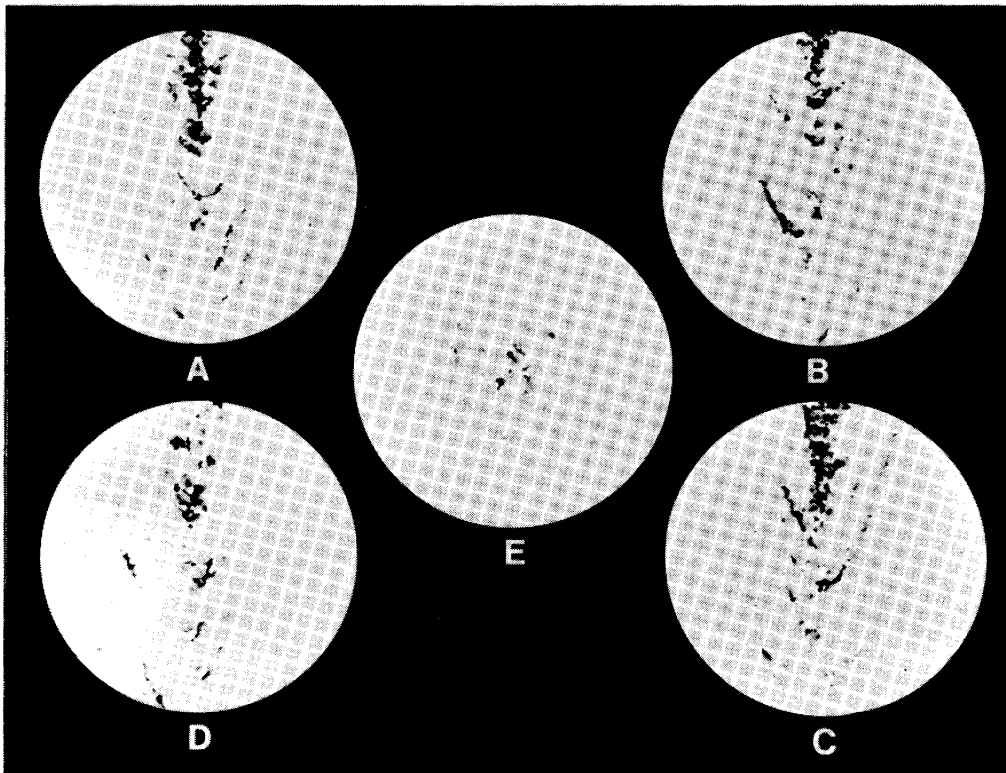


Photo. 6. Stainless steel bloom specimen of spherical shape with micrograph planes (A to E).



(A, B, C, ... : see Photo. 6)

Photo. 7. Micrographs from three-dimensional CTS observations of stainless steel bloom specimen.

柱状試料 (径 50 mm, 長さ 100 mm) を採取し, その長手方向の中央部から球状試料 (径 46 mm) を調製して試料とした. 試料採取にあたっては, ブルームの中心線が円柱状試料, さらに球状試料の中心線になるようにした. この球状試料中のポロシティの存在状態を CTS によつて三次元測定した. 球状試料とその X 線スライス断面 (A~E) を Photo. 6 に説明した. スライス断面 A~D は互いに順次に 45° ずつ異なる縦断面であり, スライス断面 E は横断面である. この試料を, 簡単な架台にのせ, X 線スライス位置を合わせたのち, 五つの断面の測定を行い, 結果を Photo. 7 にまとめた. Photo. 7 は, CTS によつて得た画像をフロッピーに移し, 前述のように CMA の画像解析部で解析し, ディスプレーしたものである. すなわち, 各画素についての透過 X 線量演算値から, 最大値と最小値間を 16 等分して 16 段階とし, 透過 X 線量が大きい方を黒で, 小の方を白で示した. 従つて, 球状試料中のポロシティは黒で示され, A~D ではポロシティの全体像は V 字状に観察される. V 字方向 (Photo. 7 では下方向) が, ブルームの引抜方向である. Photo. 7 から球状試料の上端にポロシティが多いことがわかるが, この部分は Photo. 6

の球状試料の上端と対応している. 上記の CMA の画像解析部により, ポロシティの各スライス面内の面積率 (%) を求め, つぎの結果を得た. 縦断面 A では 1.0, 同 B では 0.8, 同 C では 1.1, 同 D では 2.2, 横断面 E では 0.5 であつた. 縦断面間で比較すると A~C では大差がないが, D では約 2 倍であり, ポロシティが偏在していることがわかる. なお, ポロシティとして

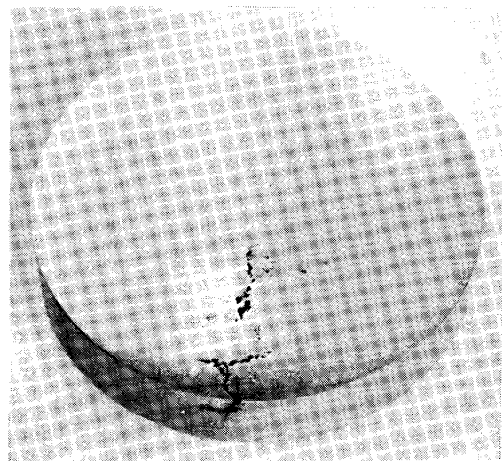
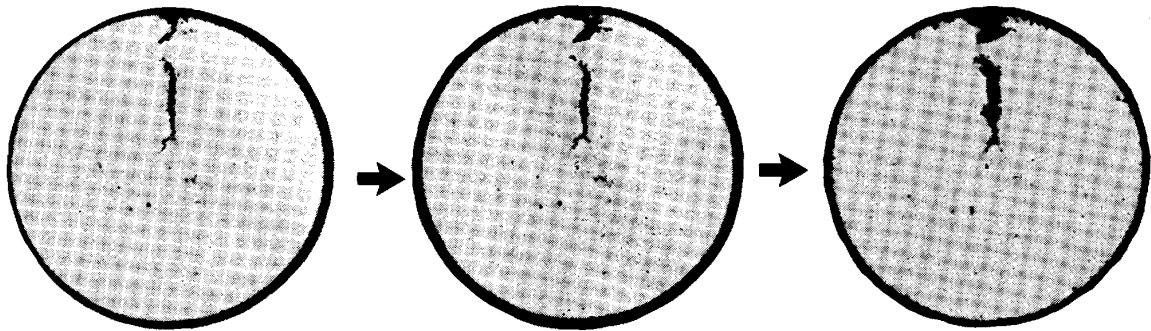


Photo. 8. Carbon steel slab specimen with cracks.



(a : before the immersion, b : after 5 days, c : after 17 days)

Photo. 9. CTS observations of carbon steel slab specimen in 6N hydrochloric acid.

は、上記の 16 段階のグレイレベルのうち、第 1 から第 9 段階までをとつた。

3.2 鋼の腐食状況測定

炭素鋼 連铸スラブからクラックを含む円盤試料 (径 46 mm, 厚さ 8 mm) を採取して、試料とした。採取した試料を Photo. 8 に示す。この試料中のクラックを CTS で測定したのち、ガラス製ビーカー (外径 50 mm) に入れ、6N 塩酸 50 ml を加え、1 日間、室温で放置したのち、再び CTS で、試料をビーカーに入れたまま、ターンテーブル上に設定し、そのクラックの状態を測定した。以上を、17 日間続けて得られた結果から、6N 塩酸に浸漬する前、5 日後、17 日後の結果を選び、Photo. 9 に示した。Photo. 9 から、クラックの腐食の進行速度はこの条件下では予想したより遅く、クラックが試料内側に延びるように進行するのではなく、クラックの幅を広げるように進行することがわかった。この測定は CTS 測定が、非破壊、非接触で行われる特徴を生かした一例で、今後、こうした測定が多く試みられると期待される。

4. 結 言

鉄鋼試料を非破壊、非接触で分析・解析することは担当している我々にとっては長年の夢であり、その効果は大で、新規な分野を開くであろう。本研究はその第 1 報

であり、さらに断層撮影装置についての広汎な研究を現在、実施中である。この装置の応用は種々考えられるが、その一つに鋼中の介在物・析出物の研究がある。これらの高温域での挙動解明には、高温域での直接分析・観察が必要であるが、現時点では、直接分析・観察はできない。この装置がさらに高度化すれば、高温域での直接分析・観察に大きく貢献するものと期待され、研究を続行している。

本研究の実施にあたり、ご指導、ご支援いただいた新日本製鉄株式会社中央研究本部副本部長岡田秀彌博士、同社第一技術研究所所長川村和郎博士に深く感謝の意を表します。また、本研究の実施において、技術面でのご支援をいただいた新日本製鉄株式会社第一技術研究所浜田広樹、田中幸基両氏、株式会社東芝府中工場辻井修氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) G. N. HOUNSFIELD: British Patent, No. 1283915 (1972)
- 2) 田口 勇: 日本金属学会会報, 22 (1983), p. 1017
- 3) 井上多門: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 537
- 4) 尾上守夫: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1000
- 5) 田口 勇, 浜田広樹, 谷誠一郎: 製鉄研究(1984) 313, p. 93
- 6) L. A. SHEPP and B. F. LOGAN: IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-21 (1974), p. 21