

© 1986 ISIJ

X線断層撮影装置による鉄鋼原料分析

論文

田口 勇*・田中 幸基*²Analysis of Raw Materials for Iron and Steel with
X-ray Computed Tomographic Scanner

Isamu TAGUCHI and Kohki TANAKA

Synopsis :

X-ray computed tomographic scanner (CTS) recently reported for iron and steel analysis by one of the present authors, has been applied in this paper to raw materials for iron and steel, especially iron ore sinter, in a series of study on application of computed tomographic scanner to non-medical purposes.

High-voltage X-ray tube (max 420 kV, 3 mA) with an iron filter of 7 mm thickness was studied and used for high quality of tomographic images. Raw materials showed higher X-ray transmission than iron and steel and the total measuring time was shortened to 6 min. (data acquisition: 5 min, data processing: 1 min, total measuring time of iron and steel: 11 min)

The images of iron ore sinter, taken by CTS were found to be well agreed with those observed by an optical microscope after cutting and polishing the sinter.

Using the mini-computer and the displayer of CMA (Computer aided Micro Analyzer), CTS data of the sinter were furthermore processed in order to obtain the quantitative information of pores and residual iron ores.

It is concluded that CTS is a new apparatus suitable to analyze raw materials for iron and steel.

1. 緒 言

X線断層撮影装置は現在医療分野で広く普及している¹⁾。

この装置を鉄鋼分野へ応用する試み²⁾の一つとして著者らは、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) を開発した。その装置の内容および適用については、すでに第1報で詳細に述べた²⁾。CTSの特徴は、鉄鋼試料のようにX線透過率の低い試料についても高精度の断面像が、非破壊、非接触で得られ、内部についての詳細なデータを採取し、解析できることである。

一方、焼結鉱をはじめとする鉄鋼原料の観察方法としては、現在、試料を切断研磨しその断面を観察する方法がとられている。とくに焼結鉱については、内部の気孔や組成が強度や還元性に対して重要な因子となつているため、品質検査方法の一つとして、断面を光学顕微鏡で観察し、画像解析する方法を用いているが、試料の埋込み、切断研磨、観察と、相当な手間と時間 (約2日間)

を要している。そこで、この過程をCTSによる方法に置き換えることができれば、原料の品質検査の迅速化をはかることができ、さらには省力化およびオンライン化が可能になるものと期待される。

本報では、CTSの鉄鋼原料分析への適用について分析条件等を詳細に検討した結果を述べる。

2. 装 置

2.1 CTSの概要

CTSの機能については第1報で述べたとおりである²⁾。CTSの主な仕様をTable 1に示す。CTSの特

Table 1. Specification of CTS 821.

Item	Specification
1. CT type	2nd generation CT, 8 channel, S-R-S type
2. X-ray tube	420 kV (max), 3 mA (max)
3. X-ray detector	BGO-PMT
4. Scanning method	6° revolution and traversing, 30 times
5. Collimator slit	0.5 mm square
6. Image matrix	240×240 pixel
7. Data collection time	9.5 or 5 min
8. Image reconstruction time	1 min
9. Sample size	62 mm (max) in dia.
10. Spatial resolving capacity	0.25×0.25 mm

昭和59年10月本会講演大会にて発表 昭和60年10月18日受付 (Received Oct. 18, 1985)

* 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 新日本製鉄(株)分析研究センター (Analysis Research Lab., Nippon Steel Corp.)

長は、第 2 世代の CT 方式を採用していること、また、X線源として 420 kV の高圧 X線管を利用していることと、高分解能の画像を得るために、精度の高いコリメーターを用いていることである。X線管 (ターゲット: タングステン, 焦点サイズ 1.5 mm×1.5 mm) から放出された X線は管球側のコリメーターによつて、それぞれ 0.5 mm×0.5 mm, 0.75° ずつの角度をもつた 8 本の放射状ビームに分けられ試料を照射する。試料を透過した X線は検出器側のコリメーターを通過し検出器に到達する。検出器は 8 チャンネルで、BGO シンチレーターと光電子増倍管からなっている。CTS では X線管と検出器とは固定されており、試料が X線ビーム中を、直線運動と回転運動とを繰り返す。その間に試料に対して多方向から (180° 区間で 240 方向) の透過 X線のデータが得られる。このデータは計算機で速度補正, リファレンス補正, 対数変換の前処理を行い, フィルター処理をしたのち逆投影法によつて画像を再構成する。得られた画像はコンソールの CRT (240×240 ドット) に表示される。

2.2 画像解析装置

GTS 内蔵の計算機を使つても測定データについて種々の解析を行うことができるが、本報では、さらに詳細な分析情報を得るために、CMA (Computer Aided X-ray Micro Analyser)³⁾ の画像解析装置を用いて解析した。

CMA はコンピューターと連係した X線マイクロアナライザーで、測定点を試料表面全体にわたつて移動させ、元素含有量を求める装置である⁴⁾。その結果は画像として表示され、さらにその画像を解析し、試料中元素偏析アップや介在物、析出物の量などの分析情報が入手できる。CMA の画像解析装置は、計算機 (FACOM S-3300), カラーイメージディスプレイ (Ikegami-Ramtech: 1024×1280 ドット), ラインプリンター, X-Y プロッターおよびコンソールから構成されている。

画像処理ソフトウェアの機能は以下のようになっている。

(1) 計測値計算処理 計測から得たデータを含有率に変換したり、元素間のデータの比の計算や線形結合処理を行う。

(2) 画像解析処理 ディスプレー画面に画像として表示されたデータに対して、2 値化処理, ラベリング処理, 2 値化画像の膨脹, 縮小, 微小値の棄却を行う。

(3) 特徴パラメーター値計算処理 ラベル部分ごとに統計計算を行う。2 値化部分の面積, 濃度, 平均値の計算, ラベル部分のピクセル数と円相当径の計算, ピー

ク値と平均値の計算などを行う。

3. 測定条件の検討

第 1 報では鉄鋼試料の測定を目的として条件を検討した。本研究では、対象を X線がより透過しやすい鉄鋼原料としたので、測定条件を再検討した。鋼の密度が約 7.9 g/cm³ に対し、原料の密度は鉄鉱石が約 5 g/cm³, 石灰石が約 4 g/cm³, コークスが約 1 g/cm³ と鋼よりも小さいため、一般に、鉄鋼原料に対する X線の透過率は、鋼よりも大きい。検討した結果はつぎのとおりである。

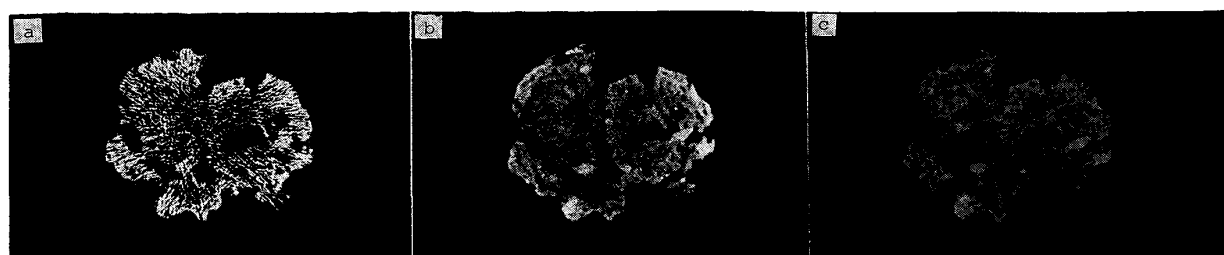
3.1 ウェッジ

まず、第 1 報で述べたように、鋼試料を測定する場合、1 回のトラバースの間に、X線は鉄鋼試料がない部分、ある部分、ない部分と交互に照射していく。この間の X線透過量の差は著しいので X線検出器の感度調整幅を越えており、その結果画質が悪くなる。その影響を補償するために鉄製ウェッジを設置し、X線透過量に著しい差が生じないようにしている。鉄鋼原料の場合、試料のある部分とない部分との X線透過量の差は鉄鋼試料ほど著しくないので、検出器の感度調整だけで補正できることがわかった。したがって、鉄製ウェッジは取りはずした。

3.2 X線管電圧

焼結鉱は、主にカルシウムフェライトやマグネタイト、ヘマタイト等からなる焼成された部分と、未熔融鉱石および気孔からなっている。鉄鉱原料としては多く使用され、また、一般的な組成と構造になつているので、焼結鉱によつて測定条件を定めることにした。CTS の再構成画像では、白黒の濃淡によつて、X線の吸収率を表す。CTS で焼結鉱を測定する場合、密度が高く X線吸収率が大きい未熔融鉄鉱石は白く表され、気孔は黒、焼成部分はグレーとなる。一方、試料に対する X線透過率は、X線のエネルギーによつて異なる。低エネルギー X線を用いれば、試料密度の差に対応する白黒のコントラストがはつきりするが、透過線量そのものが少なくなるので S-N は低下する。高エネルギー X線を用いれば、試料密度の差によるコントラストはつきにくい透過力が強いので S-N は高くなる。

焼結鉱に対して最良の画像が得られる管電圧を設定する目的で、管電圧 120 kV, 140 kV, 420 kV で測定を行った。管電圧 120 kV と 140 kV での測定は TOSCANER 3200 (管電流 300 mA, 測定時間 10 s) を用い、420 kV での測定は CTS 821 を用いて行った。測定試料は実機から採取した焼結鉱 (最大径 30 mm) で、樹脂



a : 120 kV, 300 mA b : 140 kV, 300 mA c : 420 kV, 3 mA

Photo. 1. X-ray irradiation conditions and tomographic images.

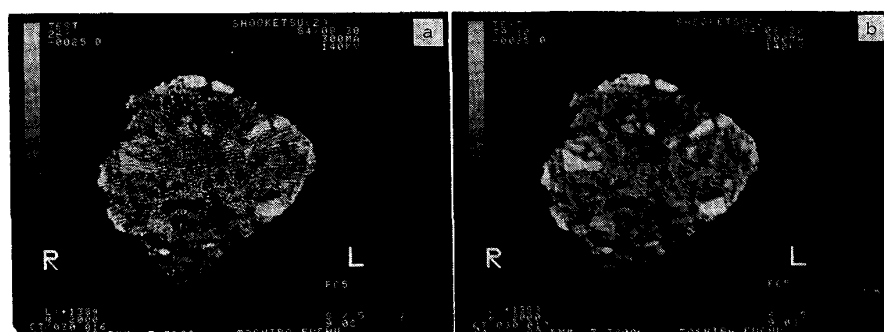
a : Before the accumulation
b : 10 time accumulation

Photo. 2. Elimination of virtual effect by the image accumulation method.

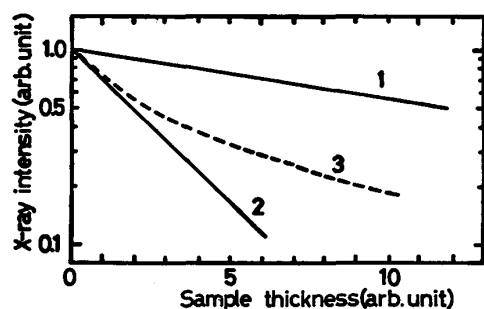


Fig. 1. X-ray intensity with sample thickness when high energy (1), low energy (2) and continuous X-ray (3) are used.

に埋め込んで試料とした。測定結果を Photo. 1 に示す。いずれも同一断面を測定したものである。管電圧 120 kV での測定結果は、透過線量が少ないために画像が構成されなかつた。管電圧 140 kV では画像は構成されたが線量が少ないため $S-N$ が低く、偽像が多い。管電圧 420 kV では、 $S-N$ の高い、最良の画像が得られた。また、密度差によるコントラストは良好で、未熔融鉄鉱石や気孔、焼成部分が充分区別できることがわかった。

ここで、管電圧 140 kV で測定したデータで、線量不足に伴う偽像を除去するために、同じ断面を繰り返し測定し、そのデータを積算することを試みた。Photo. 2a は焼結鉍を管電圧 140 kV、管電流 300 mA、測定時間 10 s で測定した結果である。Photo. 2b は同一の条件で

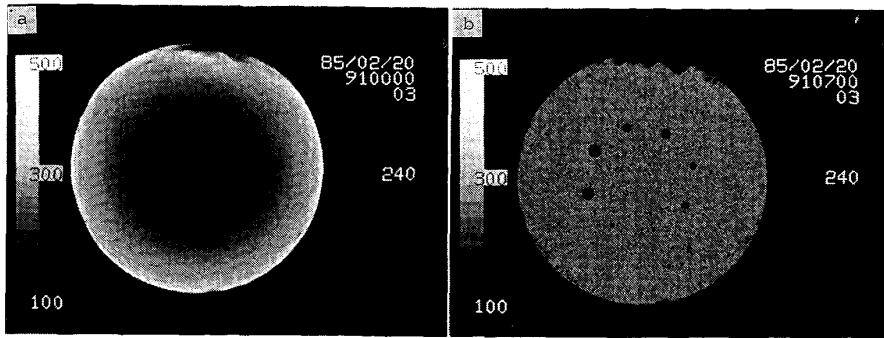
同じ断面を 10 回繰り返し測定して、それらの投影データを積算し、画像再構成をした結果である。データの積算によつて線量不足による偽像は除去されているが画質は管電圧 420 kV で測定したほうが良好であると判断された。

以上のことから、焼結鉍を測定する場合には 420 kV の高エネルギー X 線を使用する CTS が望ましいことがわかった。

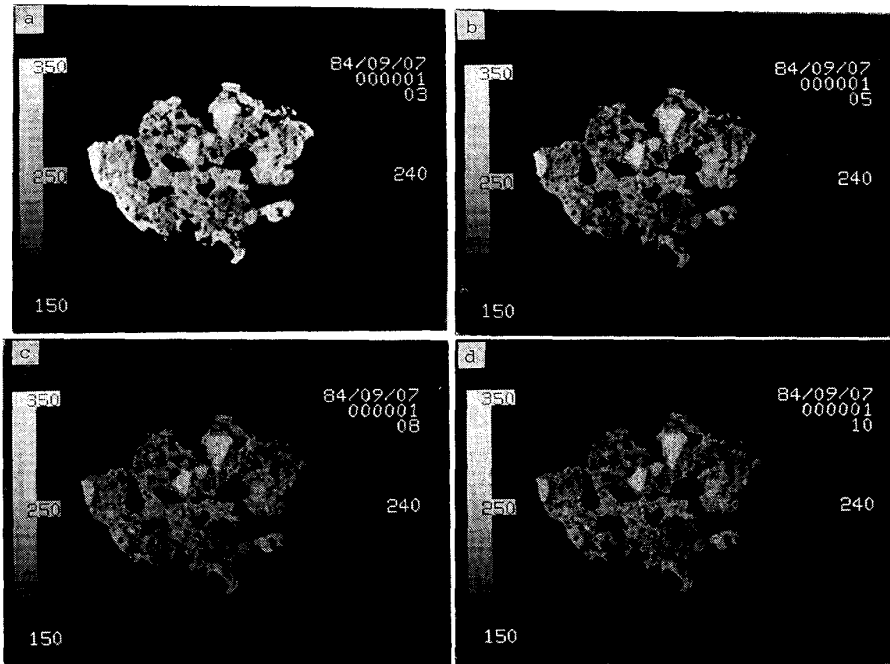
3.3 X線フィルター

一般に、X線が物体を通過するとき、吸収のされかたは X 線のエネルギーによつて異なる。Fig. 1 に示すように、低エネルギー X 線のほうが、単位長さあたりに吸収される量が多いため、連続 X 線が物体を通過するとき、表面から内部にいくにつれて X 線のエネルギー成分は高いほうへシフトする。これが線質硬化で、試料内部での単位長さあたりの X 線吸収率は、表面よりも小さくなる。そのため線質硬化がおこると、密度が均一な試料を測定しても、結果的に試料表面部分での CT 値が高くなる。線質硬化の影響を除去するためには、検出器で X 線のエネルギー分析を行う方法や、画像再構成の過程で補正をくわえる方法があるが、本研究では、最も簡便で実用的な、X線フィルターを用いる方法によつた。

X線管の窓あるいは検出器の前にフィルターを設置し、あらかじめ X 線の低エネルギー成分を除去した。フィルターとしては縦 20 mm、横 100 mm の鉄板を用い



Hole diameter : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm
 a : Without filter
 b : With 7 mm iron filter
 Photo. 3. Observation of iron ore sinter phantom by CTS.



a : Without filter
 b : With 4 mm filter
 c : With 7 mm filter
 d : With 12 mm filter
 Photo. 4. Elimination of beam hardening effect by using iron filter.

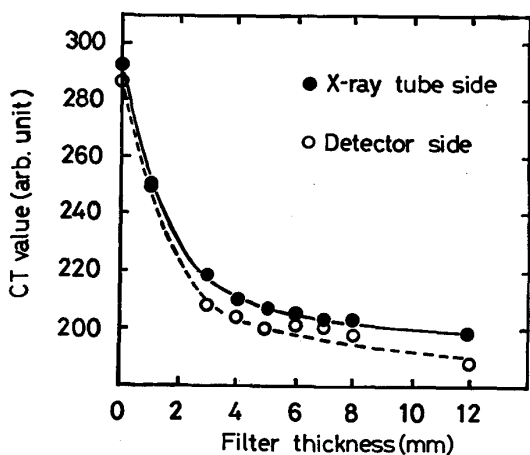
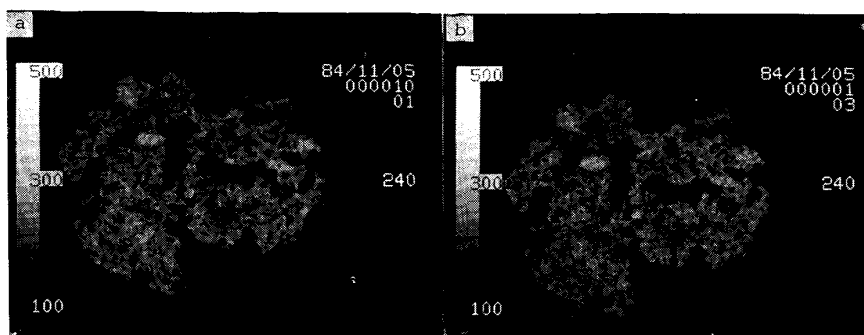


Fig. 2. Elimination of beam hardening effect using iron filter.

た。Photo. 3 にフィルターの効果を示す。測定した試料は密度の均一な焼結鉍試料で、各種径の穴を穿孔してある。焼結粉 (-60 mesh) を MgO るつばに入れてタ

ンマン炉、アルゴン雰囲気中で 1400°C に加熱し、1 h 溶融後、徐冷したのち直径 47 mm の円柱状に成形し、きりで直径 2 mm, 1.5 mm, 1 mm, 0.5 mm の穴を二つずつ穿孔した。Photo. 3 からわかるようにフィルターを設置しないで測定すると、試料表面の CT 値が高くなり、穿孔した穴も観察できない。厚さ 7 mm のフィルターを X 線管の窓に設置して測定した結果、Photo. 3 b に示すように、鮮明な画像が得られた。

フィルターの厚さによつて X 線のエネルギーが異なるので、画像に対する線質硬化の影響が異なる。フィルターの厚さを変えて画像の変化を観察した。試料は実機から採取した直径 30 mm の焼結鉍で、同一断面フィルターの厚さを変えて測定した。いずれも管電圧 420 kV で測定した。結果を Photo. 4 に示す。フィルターの厚さを増すにつれて、未溶融鉄鉍石、焼成部分、気孔の CT 値のコントラストがより鮮明になるのがわかる。このデータから試料周縁部分の CT 値がフィルターの厚さに



a : Measuring time ; 10 min
b : Measuring time ; 5 min
Photo. 5. Measuring time and tomographic images.

対してどのように変化するかを調べた。Fig. 2 に結果を示す。フィルターの厚さを増すにつれて CT 値は小さくなり、5 mm 以上で一定になる。このフィルターの効果はフィルターを X 線管の窓に設置した場合と、検出器の前に設置した場合とで大差はなかった。Fig. 2 からフィルターは、厚さ 7 mm を選定し、以後使用することにした。フィルターを厚くすると線量が低下し、S-N の低下をまねくので、厚すぎるフィルターは好ましくない。

3.4 測定時間

鉄鋼原料は X 線透過率が大きいので、鉄鋼試料を測定する場合よりも短時間で画像再構成に必要な線量が得られ、測定には有利である。

試料台のトラバースとローテーションの速度をそれぞれ 2 倍にし、測定時間を 10 min から 5 min へ短縮した。Photo. 5 に結果を示す。5 min の測定でも 10 min で測定した場合と同様の鮮明な画像が得られた。

4. 測定と解析

4.1 試料の密度と CT 値

一般に X 線の吸収率は吸収体の密度にほぼ比例するので、CT 値は測定対象物の密度にほぼ比例すると考えられる。実際、CTS で、空気、水、アルミニウム、チタン、鉄の CT 値を測定し、それぞれの密度に対してプロットすると Fig. 3 のようになった。測定条件は、前節で述べたように管電圧 420 kV、管電流 3 mA で、厚さ 7 mm の鉄フィルターを装着し、測定時間は 5 min とした。鉄の CT 値が直線からはずれているのは、線吸収係数が密度と完全な比例関係ではなく、鉄の質量吸収係数が比較的大きいためである。

つぎに、鉄鉱石、焼結鉱（焼成部分）、石灰石、コークスの CT 値を測定すると、Fig. 3 で、矢印で示したような値となった。コークスでは標準的な密度が 1.0~1.1 g/cm³ であるのに対し、CT 値に対応する密度は 1.1 g/cm³、以下同様に、石灰石では 3~4 g/cm³ に対し

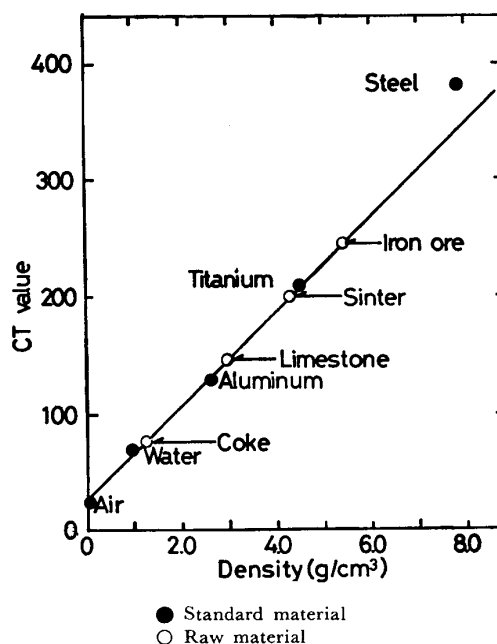
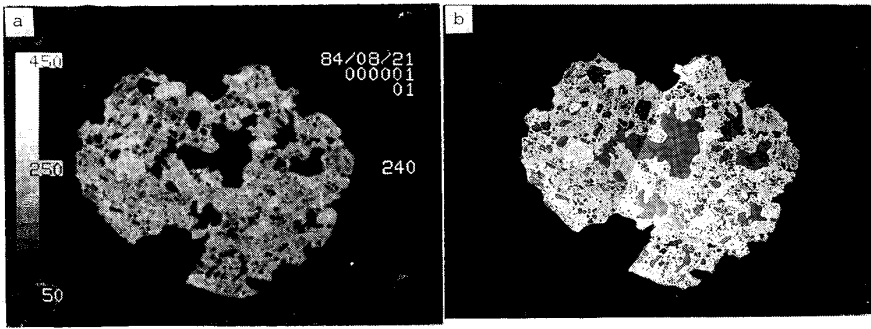


Fig. 3. CT value and density of samples.
(CT value : Not standardized)

て 2.6 g/cm³、焼結鉱は約 4 g/cm³ に対して 4.3 g/cm³、鉄鉱石は約 5 g/cm³ に対して 5.2 g/cm³ となり、各原料の標準的な密度と、CT 値に対応する密度とはほぼ一致した。

4.2 CT 画像と実断面との対応

CTS で焼結鉱を測定し、その結果と実断面との比較を行った。用いた試料は実機から採取した焼結鉱で、大きさは約 50 mm、主な組成は、FeO 5.96%、Fe₂O₃ 74.5%、SiO₂ 5.82%、CaO 9.57%、Al₂O₃ 2.14%、MgO 1.50% となっている。樹脂に埋め込み、直径 55 mm、高さ 45 mm の円柱状に成形した。試料の下面から 25.0 mm の位置を CTS で測定した。測定は前節で設定した条件で行った。結果を Photo. 6a に示す。CTS では、スライス幅が 0.5 mm であるから、実際には、この断面は試料下面から 24.5 mm から 25.0 mm の間の断面を平均した画像である。つぎに、試料を下面から 25.0 mm の位置で切断、研磨した。表面に現れた面



a : CTS observation
b : OM observation
Photo. 6. CTS and optical microscope observations of iron ore sinter.

を写真撮影すると、Photo. 6b のようになった。CTS の測定結果 Photo. 6a と比較すると、気孔の形状は非常によく一致しているのがわかる。

さらに詳細に比較するために、切断、研磨した面を、CMA によつて分析し、主な成分である、鉄、カルシウム、けい素の 3 元素について分布状態を調べた。結果を Photo. 7 に示す。鉄を赤、カルシウムを緑、けい素を青で表し、含有量に応じて輝度を変えて示した。赤の最も濃いところは未溶融鉄鉱石で、焼成部分のカルシウムフェライトの多いところは黄色で示され、スラグ部分は青で表されている。

つぎに、CTS で測定して得られた Photo. 6a のデータを CMA の画像解析装置を用いて解析した。主な手順はつぎのとおりである。

- (1) CTS のデータをフロッピーディスクに収納する。このフロッピーディスクから CMA 画像解析装置の計算機へデータを入力する。
- (2) データをディスプレイに転送し、表示する。
- (3) 焼結鉱の輪かくに沿つて解析対象領域を指定する。
- (4) 領域内のデータについて、気孔および未溶融鉄

鉱石の CT 値を指定し、それぞれについて 2 値化画像をつくる。指定した CT 値は Fig. 3 に基づき、気孔を 20、未溶融鉄鉱石を 230 とした。

(5) 2 値化画像をラベリング処理し、気孔および未溶融鉄鉱石を 1 個 1 個区別する。

(6) ラベルした気孔や未溶融鉄鉱石について面積、円相当径を求める。

(7) 気孔および未溶融鉄鉱石の粒度分布を求める。

解析結果はつぎのとおりである。まず、CTS のデータをカラーディスプレイで表示すると、Photo. 8 のようになった。CT 値の高い順に赤、黄、青、黒で表示した。Photo. 7 と比較すると、未溶融鉄鉱石および気孔の形状がよく一致していることがわかる。つぎに、気孔および未溶融鉄鉱石の粒度分布は Fig. 4 のようになった。また、測定断面における気孔と未溶融鉄鉱石の占有面積率を求め、CMA で分析したデータ (Photo. 7) についても同様の解析を行つて比較した。結果を Table 2 に示す。CTS と CMA の測定結果は、実用的な観点からは一致しているといえる。

4.3 各種鉄鋼原料の測定

CTS で種々の鉄鋼原料を測定した。測定は、3 で設

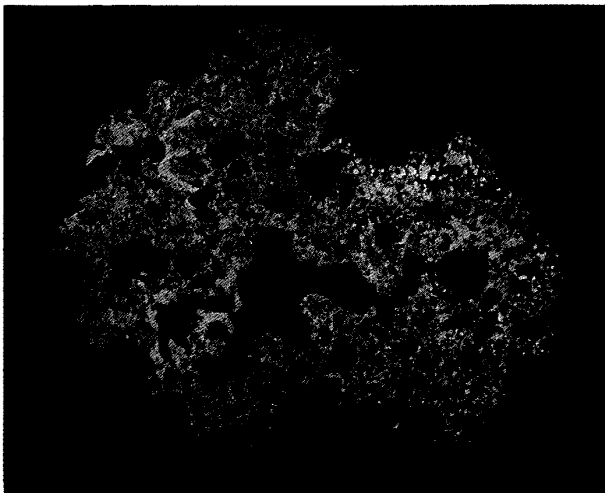


Photo. 7. CMA observation of iron ore sinter.

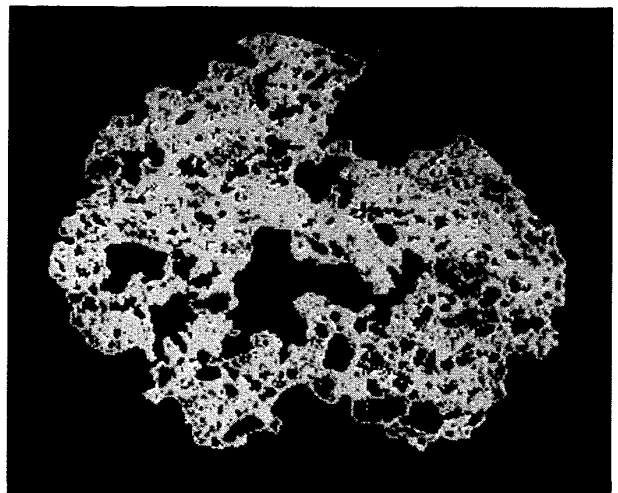


Photo. 8. CTS observation of iron ore sinter.

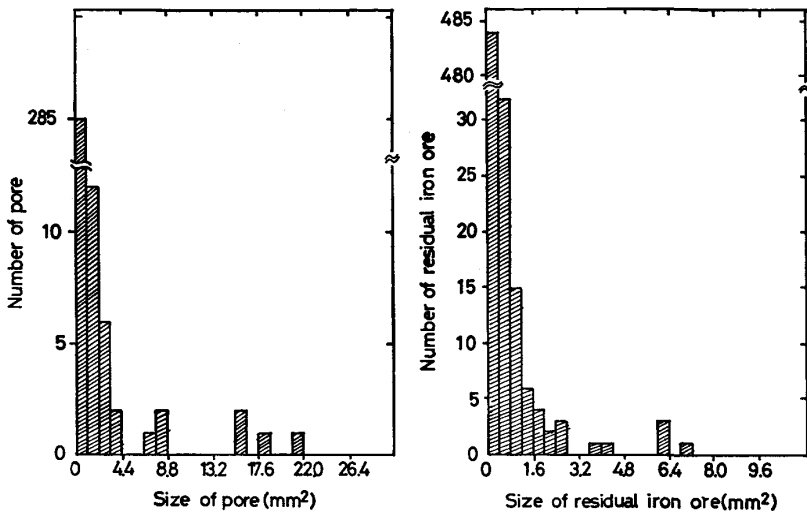
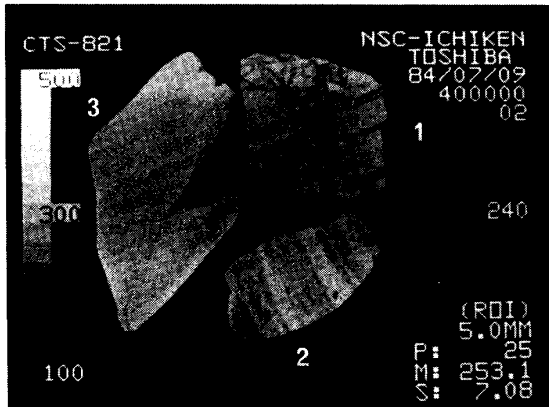


Fig. 4. Size distributions of pore and residual iron ore of iron ore sinter.

Table 2. Iron ore sinter analysis by CTS and CMA (Areal percentage, %).

Item	CTS	CMA
Pore	19.2	23.5
Residual iron ore	12.9	16.2



1: Hamersley 2: Iscor 3: Rio Doce

Photo. 9. CTS observation of iron ores.

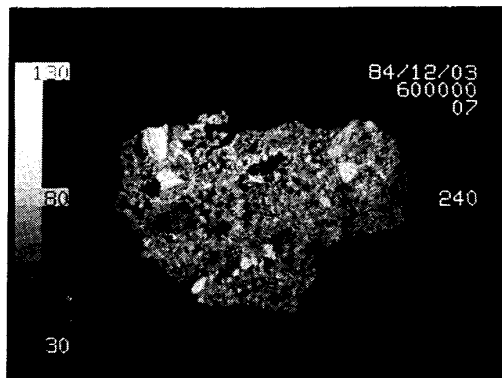


Photo. 10. CTS observation of coke.

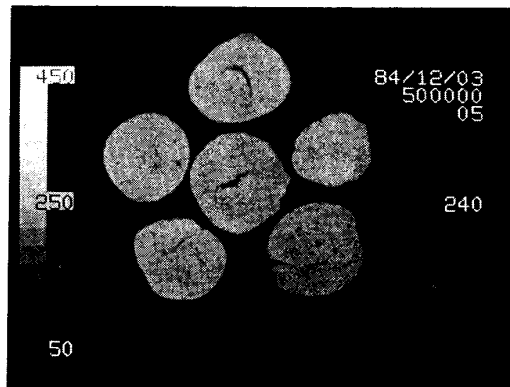


Photo. 11. CTS observation of iron ore pelets.

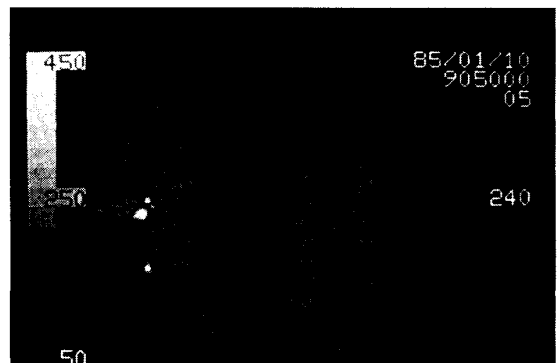


Photo. 12. CTS observation of iron slag.

定した条件で行った。

鉄鉱石：直径約 20 mm の鉄鉱石を試料台にのせ、試料の中心付近をスライスした。測定した鉄鉱石は、ハマスレー、イスコール、リオドセの3種類の銘柄で、鉄含有量はそれぞれ、65.4、66.5、68.6%である。結果をPhoto. 9に示す。鉱石中に黒く写っている部分は脈石と考えられる。

コークス：直径約 50 mm のコークスを試料台にのせ

スライスした。結果を Photo. 10 に示す。

ペレット：ペレットの内部状態を観察した。直径約 10 mm のペレット（銘柄：リオドセ）を 6 個，試料台上に並べ，中心付近をスライスした。結果を Photo. 11 に示す。内部のクラックが鮮明に観察できた。

スラグ：転炉スラグの内部状態を観察するため，粒径約 20 mm のスラグの中心付近をスライスした (Photo. 12)。白く写っている部分は，スラグ中に取り込まれた粒鉄である。

5. 結 言

鉄鋼原料分析を目的として，鉄鋼用 X 線断層撮影装置 CTS を適用する基礎的研究を実施し，測定条件を定め，種々の鉄鋼原料に適用した。

鉄鋼原料の品質検査に CTS を応用すれば，測定および解析を短時間で完了することができ，迅速で非破壊の

分析が可能である。この特徴から製造工程管理用検出端としての利用が考えられる。また，非破壊，非接触，熱間で内部構造，組成を調べられることから鉄鋼原料，とくに焼結鉱などの生成メカニズムなどの新しい基礎研究手段として使用できる。

本研究の実施にあたって，技術面でのご支援をいただいた新日本製鉄(株)第一技術研究所浜田広樹氏，(株)東芝 CAT 部中村滋男氏 および 同社府中工場辻井修氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 田口 勇：日本金属学会誌，22 (1983)，p. 1017
- 2) 田口 勇，中村滋男：鉄と鋼，71 (1985)，p. 1685
- 3) 相庭吉郎，沖 和男，中村滋男，藤井正司：鉄と鋼，71 (1985)，p. 1692
- 4) I. TAGUCHI and H. HAMADA: Anal. Sci., 1 (1985)，p. 119