

焼結体 X 線 CT 画像解析システムの開発

稲角忠弘*・川口卓也**・晝間信治***
鳥居順次***・金田裕恵***

INAZUMI Tadahiro, KAWAGUCHI Takuya, HIRUMA Shinji, TORII Junji and KANEDA Hiroe
(1995) An X-ray CT image analyzing system for porous sinter cake. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.46, p.595-603, 12 figs, 2 tables.

Abstract : An image analyzing system has been developed to study the internal structure of porous iron-ore sinter cake. The system converts an original data set of X-ray CT images to such two-dimensional structural information as density maps, pore shape indices, fractal parameters of clusters and pores, open-pore networks and gas flow patterns. It also converts the original images to three-dimensional cluster shape indices and three-dimensional rendering images that can be processed by commercially available software. This system has been constructed on an HP 9000 workstation equipped with the UNIX operating system and X-Window, providing a simple, high performance operating environment. Efficient GUIs (Graphical User Interface) were installed in the system for routine work.

要 旨

鉄鉱石シンターケーキの構造解析を主目的とした多孔体画像解析システムを構築した。このシステムは X 線 CT による断層画像を用い、2 次元断面における(1)密度分布解析、(2)気孔形状解析、(3)クラスターのフラクタル解析、(4)気孔網のネットワーク解析とガス流れ解析、および 3 次元での(5)クラスター解析、(6)3 次元表示 (市販ソフトへのデータ加工) 等の機能を有する。システムは、操作性、処理速度の観点から、汎用 UNIX ワークステーション (HP 9000) を用いて、UNIX オペレーティングシステムと X ウィンドウシステム上に構築した。また、ルーチン処理は GUI 化して利用者の便宜を図っている。

1. はじめに

「焼結体画像解析システム」は焼結鉄のような複雑な多孔体を構造解析するために開発したシステムである。このシステムでは多孔体を X 線 CT スキャンにより断層撮影した画像を用い、気孔部壁面の粗さの定量化を目的としたフラクタル次元解析や通気抵抗シミュレーション等を行うことができる。

このシステムの特徴としては、以下の点があげられる。

1. 膨大な画像データを効率よく処理することにより、さまざまな解析結果 (構造指標) を迅速に得ることができる。
2. 画像データや解析結果の可視化が容易である。
3. 汎用ワークステーション上で稼働するため、新しい

* 新日本製鐵(株)技術開発本部プロセス技術研究所 (現在: 海外製鉄原料委員会)

** 新日本製鐵(株)技術開発本部プロセス技術研究所

*** 新日鉄情報通信システム(株)

Keywords: Image analysis, Sinter structure, Pore network, 3-dimensional analysis, CT

解析へのアプローチが容易にできる。

4. サンプルの X 線 CT 画像から得たネットワーク構造に基づき Pore-Channel モデルを構築することによって、トポロジー解析が容易にできる。

ここでは、稲角ほか (1995) により示された原理に基づき構成された多孔体解析専用システム「焼結体画像解析システム」の紹介を行う。

2. システム設計の基本概念

このシステムでは、解析途中の画像データを確認しながら解析を進めることができるよう考慮している。そこで、処理速度が速く、マルチタスク、マルチウィンドウのシステムであることが前提となり、汎用ワークステーションをベースに UNIX をオペレーティングシステムとするウィンドウ上で開発を行うこととした。

機種を選択は、以下の事項を考慮して行った。

1. 計算速度が速い

2. 描画速度が速い

3. 表示色数が多い

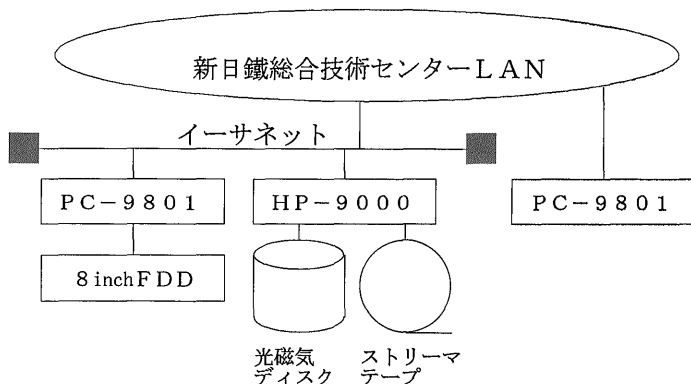
これらを検討した結果、3.5 MFLOPS, 27 万 3 D ベクタ/秒のパフォーマンスを持ち、4096 色同時発色 (疑似フルカラー) することができる HP 900 425 t がもっとも適していると判断した。一般的な画像処理システムでは、入力すべきパラメタが多く、オペレータに煩雑な操作を要求している場合が多い。「焼結体画像解析システム」では X-Window 上の Motif をベースにした GUI (Graphical User Interface) を採用し、容易に解析が行えるように工夫している。

3. システムの概要

「焼結体画像解析システム」は、下記の三つのサブシステムから成り立っている。

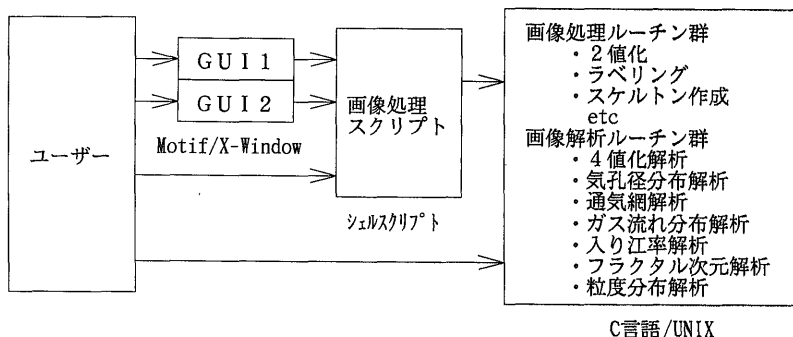
① 画像読みとりサブシステム

8 インチのフロッピーディスクに入っている X 線 CT



第 1 図 ハードウェア構成

Fig.1 A system hardware.



第 2 図 ソフトウェア構成

Fig.2 A process of the software.

のデータを読みとり、画像処理用のフォーマットに変換する。

② 画像解析サブシステム

画像データに対して必要な画像処理、統計処理を行い、解析結果や画像を得る。

③ データ処理サブシステム

解析結果をデータベースに登録し、グラフ化等の処理を行う。

3.1 ハードウェア構成

システムのハードウェア構成は第1図のようになっている。

- ・ PC 9801 および 8 インチフロッピーディスク-画像読みとりサブシステム
 - ・ HP-9000-画像解析サブシステム
 - ・ 光磁気ディスクおよびストリーマテープ-解析画像格納用
 - ・ PC-9801-データ処理サブシステム
- 個々のサブシステムはそれぞれ独立しており、LAN およびイーサネットで接続されている。

3.2 ソフトウェア構成

画像処理の各ルーチンは UNIX 上の C 言語で開発している。画像表示および GUI はそれぞれ X-Window, Motif で開発しており、容易に他のワークステーションにも移植できるようになっている。

「焼結体画像解析システム」のソフトウェアは第2図

のような構成になっている。通常ユーザーは GUI を通じて解析を行うが、必要に応じて画像処理スクリプト、仮想処理ルーチン群をコマンド入力することによって利用することができるようになっている。

4. 画像解析

このシステムでは、以下の7種類の解析を行うことができる。

1) 4値化解析

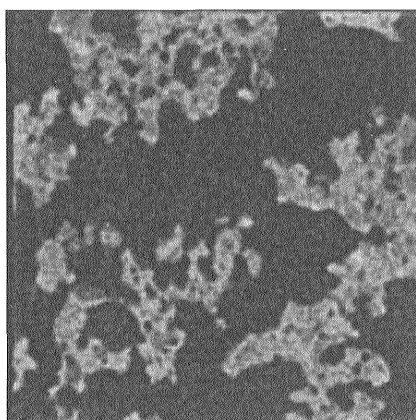
各ピクセルごとに得られた CT 値に対し、三つのしきい値 T_a , T_b , T_c を与えて、気孔部、低密度固体部 (未焼結部)、中間密度固体部 (適正焼結部)、高密度固体部 (過剰焼結部) に分類 (4 値化) する。それを黒、青、緑、赤に色分けした画像データを作成し (第3図)、それぞれの面積を求める。

- 気孔部: $V \ 0 \leq CT \text{ 値} \leq T_a$
- 未焼結部: $H \ T_a \leq CT \text{ 値} \leq T_b$
- 適正焼結部: $M \ T_b \leq CT \text{ 値} \leq T_c$
- 過剰焼結部: $L \ T_c \leq CT \text{ 値}$

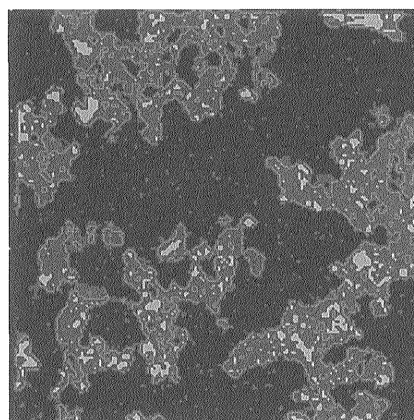
さらにハロー現象による境界ボケ (気孔と適正焼結部との境界誤差) を測定する。

境界ボケ: E 未焼結部で、周囲 8 画素に気孔と適正焼結部がそれぞれひとつ以上あるものの数

この境界ぼけを用いて面積の補正を行い、それぞれの面積率を求める。



元画像



4 値化画像

第3図 4 値化解析

Fig.3 An example of four value image analysis.

第1表 気孔径分布解析

Table.1 Distribution of pore radius.

項目	粒形範囲 (mm)		項目	粒形範囲 (mm)	
	R1	R2		R1	R2
TOTAL	0	∞	-5	0	5
+40	40	∞	-3	0	3
+20	20	∞	-2	0	2
+10	10	∞	-1	0	1
+5	5	∞			

面積率：気孔率 = $100(V + 0.5E)/A_t$
 未焼結部 = $100(L + 0.5E)/S$
 適正焼結部比率 = $100M/S$
 過剰焼結部比率 = $100H/S$

$A_t = V + H + M + L$ (画像面積)
 $S = L + M + H - 0.5E$ (補正後固体部面積)

気孔径 (粒径) 分布： $P = 100 \Sigma A / S$
 ΣA ：面積が S_1 以上 S_2 未満の気孔 (または固体) の面積の合計

$S_1 = \pi(R_1/2)^2$, $S_2 = \pi(R_2/2)^2$
 S ：気孔 (または固体) の面積の合計

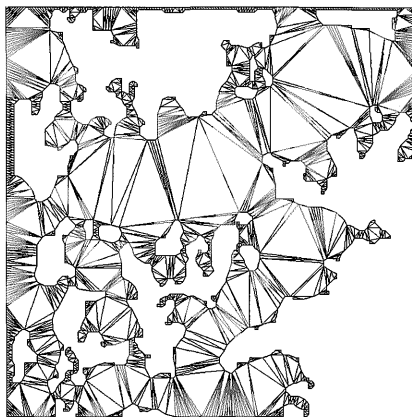
さらに各気孔 (または固体) の周囲長さを、輪郭線を追跡することによって計測し、その結果から最小2乗法によって下式の a , b を求める。

$Y = aX + b$
 $Y = \log_{10}(S)$, $X = \log_{10}(L)$
 S ：気孔 (または固体) の面積の合計
 L ：気孔 (または固体) の周囲長の合計

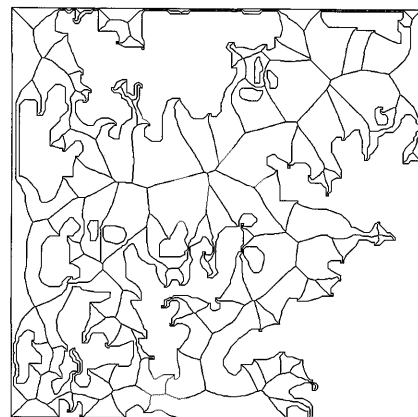
この a , b より、気孔と固体の境界線のフラクタル次元、Lacunarity (空隙性) を求める (高安 1986, Mandelbrot)

2) 気孔径分布解析

しきい値を与えて、気孔部、固体部に分類 (2値化) し、各気孔 (または固体) の面積を測定して、大きい順にラベリングする (中野・藤井 1991 a, b)。測定された面積と同等な円の面積を与える円の直径を求め、これを気孔径とする。そして、気孔径 (粒径) 分布 (第1表)、つまり円相当径で直径 R_1 以上 R_2 以下の気孔 (または固体) の面積率を求める (中野・藤井 1991 b)。



三角形分割



スケルトン

第4図 通気網解析

Fig.4 Open pore network analysis.

1983).

フラクタル次元: $f=2/a$
 Lacunarity: $k=10(b/2)$

3) 通気網解析

気孔径分布解析と同様の方法で、2 値化、ラベリングを行う。その際に、焼結反応に寄与しない 5 mm 以下の気孔と 1 mm 以下の固体は除去して処理を行う。これによって、計算処理の時間を短縮することができる。その後、気孔(または固体)の輪郭線を抽出して、ポロノイ三角形に分割し、その外心を節点としてそれらを結んだスケルトンを求める(第4図)。短いヒゲ(1.0 mm 以下)を除去したあと Pore-Channel モデルを構築する。その情報をもとに、ブランチの本数、面積、長さを測定し、ブランチ密度および面積、長さ、幅の分布(比率)を求める。

ブランチ密度: $P = \text{ブランチ本数} / A_t$
 面積比率: $P_s = 100 \Sigma S / S_s$
 長さ比率: $P_l = 100 \Sigma L / S_l$
 幅比率: $P_w = 100 \Sigma W / S_w$

- ΣS : 面積が S_1 以上 S_2 (表 2) 未満のブランチの面積の合計
- S_s : ブランチの面積の合計
- ΣL : 長さが L_1 以上 L_2 未満のブランチの長さの合計
- S_l : ブランチの長さの合計
- ΣW : 面積が W_1 以上 W_2 未満のブランチの幅の合計
- S_w : ブランチ幅の合計

4) ガス流れ分布解析

3) と同様にスケルトンを求める。ガスの流路の入り

口と出口を決め、それ以外の行き止まりの枝を除去して Pore-Channel モデルを構築する。このモデルに電気もしくは粘性流体が流れたと仮定し、Pore(溜まり)の面積、Channel(流路)の長さ、面積をもとに、各 Channel の抵抗値、伝導度を求める。さらに、入り口と出口に適当なポテンシャル差(本システムでは 1)を与え、キルヒホッフの法則を用いて各 Pore のポテンシャルおよび各 Channel を伝った流量を求める(中野・藤井 1992, 中野 1995)。さらに、求めたポテンシャルの等高線図を描くこともできる(第5図)。

5) 入り江率解析

2 値化で気孔と固体を分類し、固体を大きい順にラベリングする。固体の周囲に包絡線を引き(第6図)、入り江率、開気孔率、閉気孔率を求める。

入り江率: $P_1 = \frac{P+I}{S+P+I}$
 開気孔率: $P_o = \frac{I}{S+P+I}$
 閉気孔率: $P_c = \frac{P}{S+P+I}$

- S: 固体の面積
- P: 気孔の面積
- I: 入り江の面積

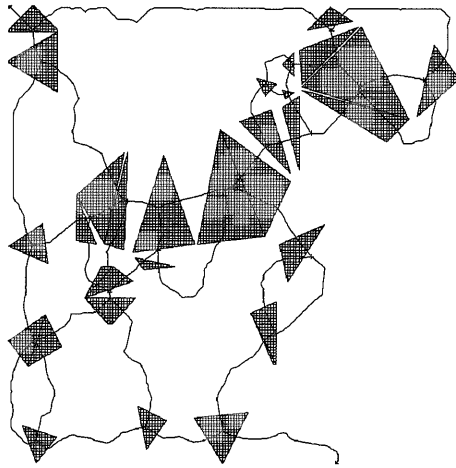
6) フラクタル次元解析 (情報量次元)

2 値化で気孔と固体を分類し、気孔(または固体)の分布の度合いを、フラクタル次元の中でも確率的な点の分布に対して有効である情報量次元であらわす。領域を一边が r の正方形に分割し、 i 番目の正方形に気孔(または固体)が入る確率を $P_i(r)$ とすると全情報量 $I(r)$ は

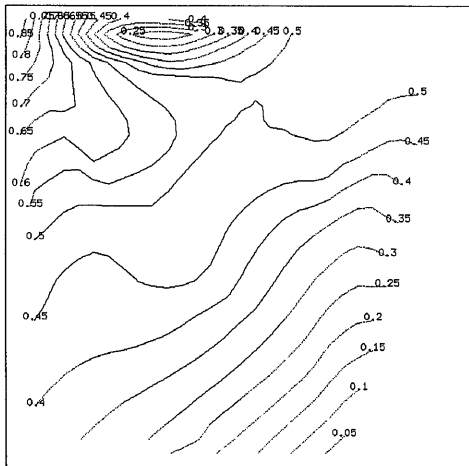
第 2 表 通気網解析

Table.2 Open pore network analysis.

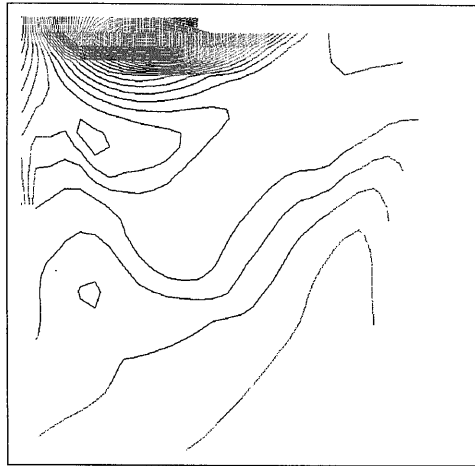
項目	範囲 (cm)		項目	範囲 (cm)		項目	範囲 (cm)	
	S1	S2		長さ	L1		L2	幅
+4	4	∞	+4	4	∞	+2	2	∞
+2	2	∞	+2	2	∞	+1	1	∞
+1	1	∞	+1	1	∞	+0.5	0.5	∞
+0.5	0.5	∞	+0.5	0.5	∞	+0.25	0.25	∞
+0.25	0.25	∞	+0.25	0.25	∞	+0.125	0.125	∞
+0.125	0.125	∞	+0.125	0.125	∞	+0.0625	0.0625	∞
-0.125	0	-0.125	-0.125	0	-0.125	-0.0625	-0.0625	-0.0625



Pore-Channelモデル



ポテンシャル分布(電気)



ポテンシャル分布(粘性流体)

第5図 ガス流れ分布解析

Fig.5 A gas flow distribution analysis. Pore-channel model, electric potential distribution and flow potential distribution are shown.

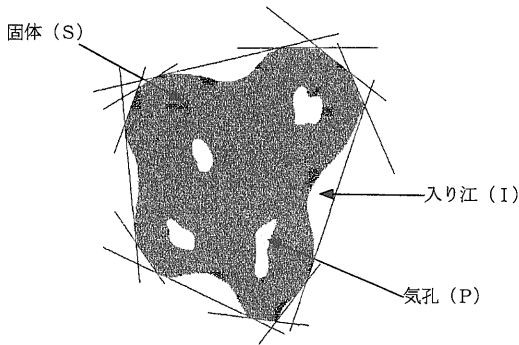
$$I(r) = -\sum P_1(r) \cdot \log P_1(r)$$

$$\sum P_1(r) = 1$$

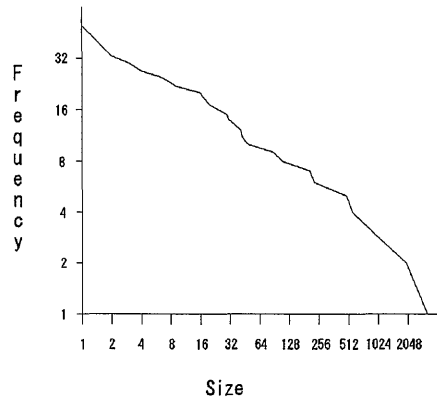
で得られる。 r を1, 2, 4, 8, ..., $2n$ と変えてゆき,
 r と全情報量の両対数をとったときの傾きが情報量次元に
なる(第7図)。

7) 粒度分布解析

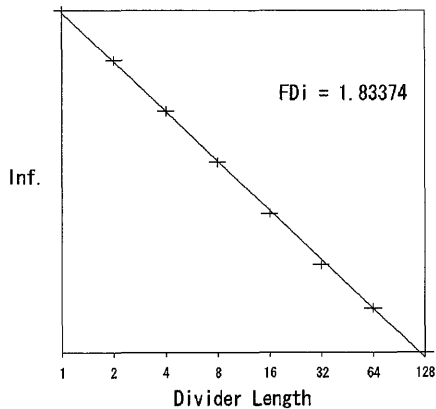
2値化を行って固体の面積を測定し, 固体の面積とそ
の存在数の両対数グラフを描画する。グラフの横軸に面
積, 縦軸に対数をとる, その面積より大きい固体の数を
プロットする(第8図)。このグラフが直線に近いほどこ
の粒度がフラクタルであるといえる。



第6図 入り江率解析
Fig.6 Lacunarity analysis.



第8図 粒度分布解析
Fig.8 An exampl of grain distribution analysis.



第7図 フラクタル次元解析
Fig.7 An example of fractal dimension analysis.

タだけ変更しながら解析を行える GUI 2 (Sinter) を開発した。

5.1 「Op」ウィンドウの操作方法

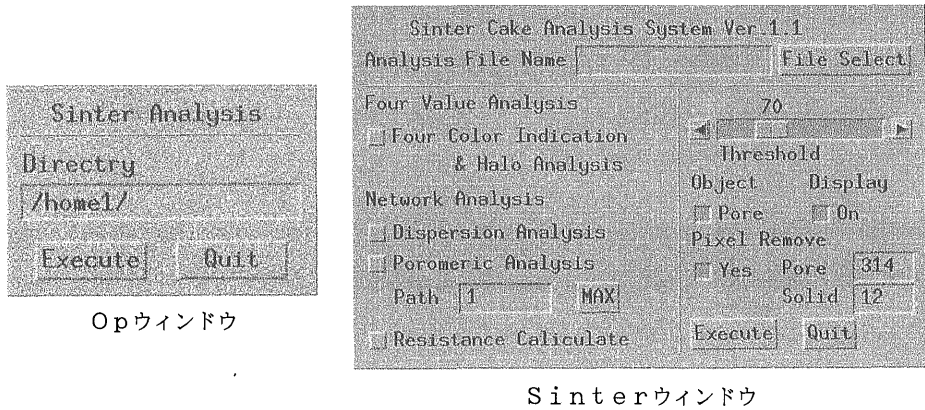
Op はウィンドウを起動したときのカレントディレクトリにあるすべての CT データに対して、4 値化解析, 気孔径分布解析, 通気網解析, 入り江率解析, フラクタル次元解析を行う。その際に, 解析途中の画像データ (輪郭線, スケルトン等) は表示されない。メニューウィンドウにはディレクトリ入力エリアと Execute (実行開始) ボタンだけがあり, 解析を終了した画像データはここで指定したディレクトリに保存される。指定したディレクトリが存在しない場合は, 自動的に作成される。Execute ボタンを押すと, 解析対象のデータ一覧表が表示され, 実行確認ウィンドウが表示される。実行確認ウィンドウの OK ボタンを押すと解析が開始される。

5. GUI について

「焼結体画像解析システム」では, ユーザーインターフェイスとして 2 種類のメニューウィンドウを用意している (第 9 図)。先にも述べたように, 画像処理システムを利用する場合, 入力すべきパラメータが多くなってしまい, 操作が複雑になりがちで使い勝手が悪くなる。しかし, パラメータを固定してしまうと解析の自由度がなくなり, さまざまな条件での解析を行うことができなくなる。そこで, パラメータをすべて固定にし, 大量の画像データを自動的に処理する GUI 1 (Op) と, 変更の必要のないパラメータは固定し, その他の必要なパラメー

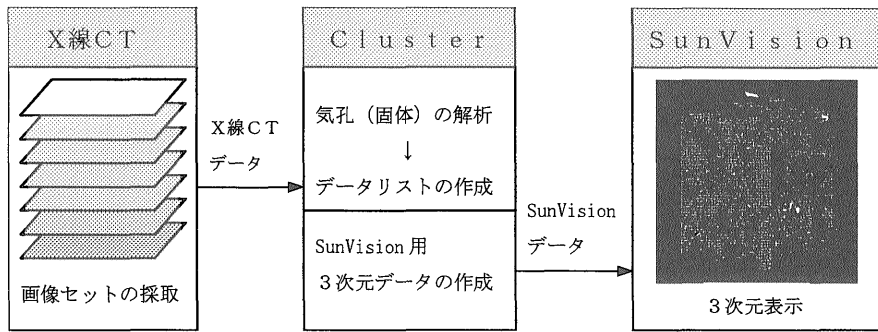
5.2 「Sinter」ウィンドウの操作方法

Sinter は, 指定した CT データに対して 4 値化解析, 気孔径分布解析, ガス流れ分布解析を行うことができる。解析途中のデータを見たい場合, Display を ON にしておくことにより表示される。パラメータはすべてデフォルトにセットされており, 必要に応じて変更することができる。解析データはファイルセレクトボタンを押すことによって出てくるファイルセレクトウィンドウ, またはファイル名エリアへの入力によって指定する。行いたい解析のボタンを押して ON 状態にし, Execute ボタンを押すと実行確認ウィンドウが表示され, OK ボタンを押すと



第9図 GUIメニュー

Fig.9 Illustrations of GUI menu : "Op" window in the left and "Sinter" window in the right.



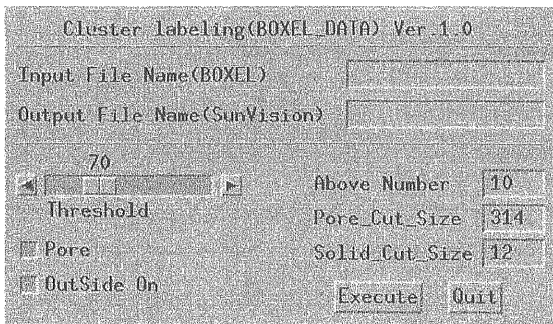
第10図 3次元解析の流れ

Fig.10 Flow of 3-D analysis. porosity classified according to diameter.

解析を開始する。

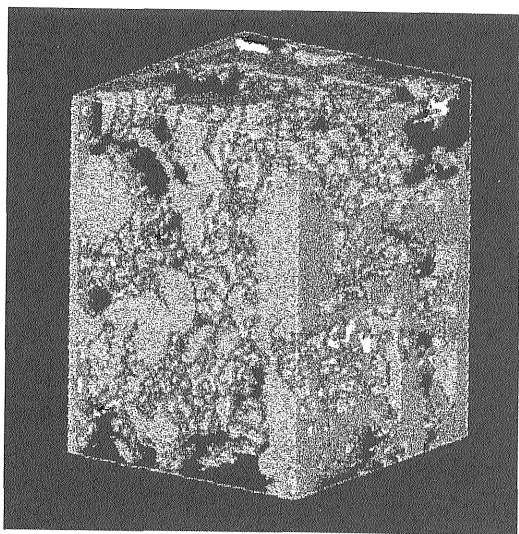
5.3 3次元解析システム「Cluster」ウィンドウ

「焼結体画像解析システム」は、多孔体をX線CTスキャンにより断層撮影した画像を用いて解析を行う。つまり、もともとの解析対象は2次元データである。しかし、実際の多孔体は3次元のネットワーク構造を持っているため、より正確な解析結果を得るためには多孔体の3次元データの構造解析を行う必要がある。そこで、3次元解析の第一歩として、気孔(または固体)の体積、表面積、形状係数を求めるシステムClusterを開発した(第10図)。形状係数とは、その気孔(または固体)と同じ体積の球の表面積と実際の表面積との比率である。これが1に近いほど凹凸が少なく、球に近い形状であることを意味する。



第11図 Cluster ウィンドウ

Fig.11 "Cluster" window. analysis.



第12図 3次元画像
Fig.12 An example of 3-D image of sinter.

Clusuter は「焼結体画像解析システム」と同様に UNIX 上の C 言語で開発されており, Motif 上で開発されたメニューウィンドウより起動することができる(第11図)。X線CTスキャンで採取したデータセットを用い, 各気孔(または固体)の体積, 表面積, 形状係数のリストと市販の3次元画像表示ソフトである SunVision 用の画像データを出力する。第12図は SunVision による出力例である。その際に, 下記の条件を設定することができる。

- ① 切断面を有する気孔(または固体)を除去して, 試料内部に存在するものだけを対象とする。
- ② 一定値より小さな気孔や固体は除去する。

- ③ 上位 N 個分のデータのみ出力する。

6. おわりに

今後, 焼結体のような複雑な多孔体の構造解析は, 2次元から3次元に展開してゆくものと思われる。それに伴い, メモリーの使用量及び計算時間の増加が予想される。3次元解析の実現のためには, 解析プログラムの並列処理もしくはスーパーコンピュータ環境の利用等, 今以上の計算機環境の改善が必要である。

文 献

- 稲角忠弘・中野正則・笠間俊次 (1995) X線CTによる鉄鉱石焼結体の通気構造解析. 地調月報, vol.46, p.573-594.
- 中野 司・藤井直之 (1991 a) 画像処理のためのソフトウェア: (3) 粒子像の識別と輪郭線の抽出. 情報地質, vol.2, p.23-44.
- ・——— (1991 b) 画像処理のためのソフトウェア: (4) 画像データからのネットワーク構造の抽出. 情報地質, vol.2, p.45-64.
- ・——— (1992) 画像処理のためのソフトウェア: (5) 画像中のネットワーク構造の流れ解析. 情報地質, vol.3, p.139-148.
- 高安秀樹 (1986) フラクタル. 朝倉書店, 186 p.
- Mandelbrot, B. (1983) The fractal geometry of nature. W. H. Freeman and Company, NY.
(日本語版 フラクタル幾何学 広中平祐訳, 日経サイエンス 1985 467 p).

(受付: 1995年10月4日; 受理: 1995年10月26日)