

X 線 CT による鉄鉱石焼結体の通気構造解析

稲角忠弘*・中野正則**・笠間俊次***

INAZUMI Tadahiro, NAKANO Masanori and KASAMA Shunji (1995) Study of pore networks in iron-ore sinter by X-ray CT image analysis. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.46(11), p.573-594, 30 figs, 1 tab.

Abstract : Pore structure in iron ore sinter has been studied using a high energy X-ray CT system, and simulation of gas flow in sinter was made on the basis of pore-networks revealed by X-ray CT. Gas flow in sinter is an important factor controlling the production rate, product yield and quality of iron-ore sinter. Focussing on the above target, we first develop methods to characterize pores and pore-networks by using X-ray CT. We then simulate gas flow in the sinter. The X-ray CT system allows us to visualize the two or three-dimensional inner structure of the sinter, details of which are so far unknown. We characterize the geometry of pores and sinter matrix, and evaluate the bond formation of the iron-ore sinter by processing the X-ray CT image data. We simulate gas flow through pore networks in a sinter and then evaluate the contribution of the pores to sinter permeability. We found that the structure of iron-ore sinter is fractal. Applying these basic findings, we can simulate structural changes in iron ore sinter during the sintering process under high temperature. The changes in size, and in size distribution of the pores and clusters, and the changes in matrix density can be explained by changes in bonding probability among particles and raw materials. It is important to note that this technique is also applicable to the analysis of cracks and micro structure in rocks for characterizing their internal structure and studying their formation process.

要 旨

鉄鉱石焼結体製造プロセスの生産速度を左右する焼結層の通気気孔構造を、高エネルギー型 X 線 CT 解析技術を用いて解析した。焼結体の内部構造を非破壊で可視化し、気孔や焼結体の幾何学的構造の特徴を解析し、気孔構造の通気評価さらに、焼結進行度の評価が行えるシ

テムを開発した。焼結体は気孔を含めフラクタルの性質を持っていることがわかった。鉄鉱石焼結反応の焼結進行過程で同時並行的に起こる塊状化、緻密化、気孔の構造変化は原料粒子間のボンドの形成確率に左右され、パーコレーション理論に則った変化と考えられる。本解析手段は岩石中の間隙構造解析に利用でき、また岩石成因を明らかにするために必要な岩石微細構造の解析にも応用可能である。

* 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

*** 新日本製鐵(株)技術開発本部プロセス技術研究所 (現在: 新日本製鐵(株)大分製鐵所)

Keywords : Iron ore sinter, Sinter structure, Pore network, CT, Fractal, Percolation theory

1. 序

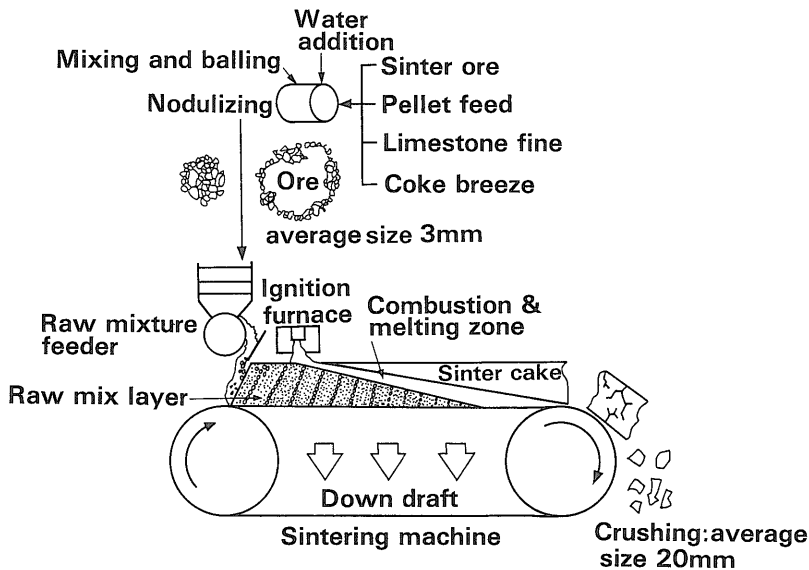
高炉法による鉄鋼生産は大規模な焼物から始まる。ここでは鉄鉱石粉鉱にフラックス剤としての石灰石粉と、燃料としてのコークス粉とを混合し、着火し、通風しながらコークスを燃やし、その燃焼熱で焼き固める自己燃焼方式の焼結法が用いられる(第1図)。焼結体として大きいものでは幅5m、厚さ600mmのベルト状の大焼結体(以下シンターケーキとも称する)を日産最大2万トン規模で焼成し、最終的には平均20mm前後の焼結鉱に塊砕、整粒し高炉に使用する。日本全国で年産約1億トン、全世界で約7億トンにのぼる量産品で、高炉の主原料だけに、その歩留、品質および生産性がコスト、エネルギー消費、環境問題に与える影響は大きい(第2図)。

自己燃焼方式の焼結法であるために焼結反応帯の空気供給、およびガス排出が生産率を左右する。そのため焼結反応で生成する通気気孔(開気孔)の果たす役割は大きい。ところで、焼結鉱の製品品質の観点から気孔を考察すると、強く壊れにくいものにするには気孔を減少させるほうがよく、逆に高炉で還元し易いものにするには気孔を増加させるほうがよい。高品質の焼結鉱を効率的に生産するためには、本来欠陥である気孔を、強度低下を最小限にとどめつつ、いかに通気・高炉内還元の有効な気孔として形成させるかが重要な課題である。このようにプロセス自体に気孔を介したトレードオフの関係が内在しており、気孔の形成状態がプロセスの効率を左

右しているといえる。ところが、気孔の構造はあまりにも複雑なため、最適な焼結鉱の製造に必要な焼結構造の科学的解明が遅れている。良い焼結鉱を効率よく製造するために基本的に必要なのは、気孔構造については焼結構造をキャラクタライズし、上記の相反する要求を満たすための最適条件を探究することである。

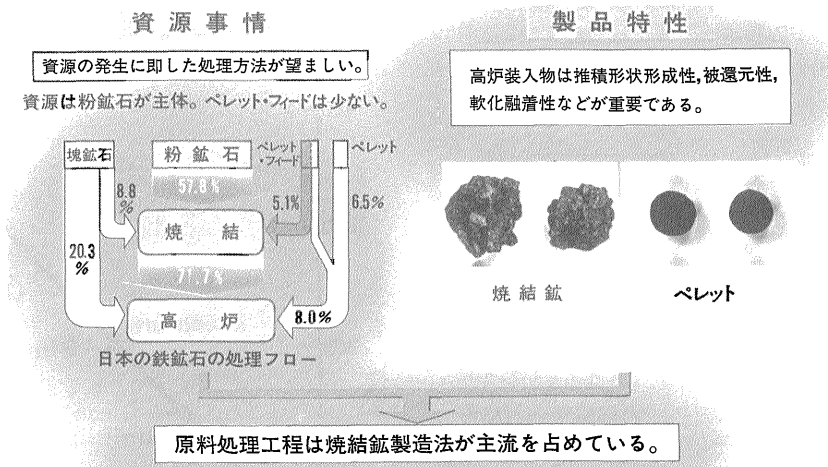
著者らはこのような観点から、鉄鉱石焼結鉱を対象にして焼結体のX線CT(Computerized Tomography)による非破壊構造解析技術を開発し(稲角ほか, 1992)、焼結鉱の内部構造を可視化し、気孔構造・固体部構造のトポロジー、フラクタルなどの幾何学的解析、および焼結反応の進行度合表現としての固体部分の緻密化度の指標となる固体密度分布の測定を進めた。特に幾何学的解析では気孔、固体部分のクラスター(焼結体構成の小単位)の形態と大きさの不揃いに注目した解析を進めた。さらに、複雑な気孔の通気経路を解明し、通気の状態をシミュレートするシステムを開発した。一連の解析により、一見ランダムで不規則に見える気孔構造、焼結体の構造についてもいくつか規則性があることが見いだされた。特に焼結体がフラクタルの性質をもっていることがわかり、フラクタルの観点からの理解が重要なことを認識するにいたった。現在、以上のような観点から、気孔構造、固体部構造の最適化の研究とそれら構造の形成制御の研究を進めているところである。

ところで、上述の研究課題は焼結体のみならず、複雑な多孔質物体一般に共通する基礎的なものである。特に



第1図 鉄鉱石の焼結工程

Fig.1 Sintering process of iron ore.



第2図 鉄鉱石焼結工程の背景

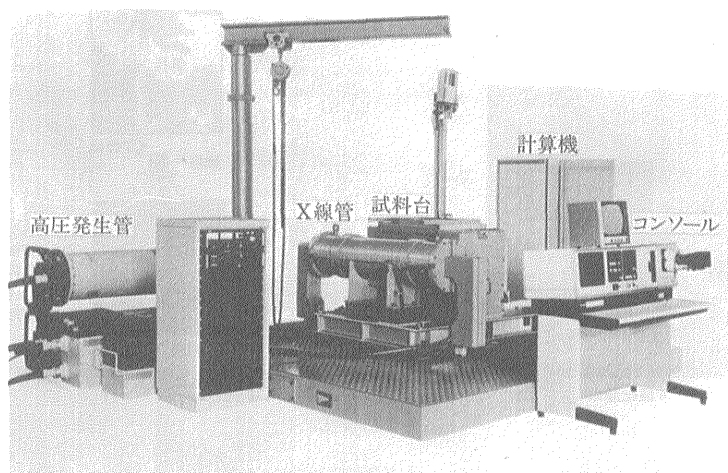
Fig.2 Background of iron ore sintering process.

多孔体の構造のキャラクタライゼーションと多孔体内をどのように流体が流れるかは科学の進歩のめざましい今日においても解明できていない最先端の研究課題と考えられる。以上のような研究を進めてきた新日鐵と、地熱エネルギー開発のため岩石の輸送特性解析で独自の研究を進めてきた地質調査所とが上記課題の基礎的な面での相互啓発、互助協力により研究の効率化を図ることを目的として、1993年より両者の間で共同研究が始められた。ここでは、従来から新日鐵独自に進めてきた研究結果の紹介と併せて、今回共同研究で得られた結果を総合して報告する。

2. 装置の開発

物体の3次元構造情報を非破壊で効率的に収集する手法としてX線CT技術が用いられる。しかし、一般に普及している医療用装置では鉄鉱石焼結鉱のような高密度物質ではX線が透過できず、像分解能2mmは形態構造解析の性能としては不十分である。そこでX線管管電圧を医療用CTの3倍の420kVに高め、γ線に近い硬X線を発生するX線CT(呼称870型)を新日本製鐵(株)と東芝(株)とで共同開発し(田口ほか, 1985)、解析に用いた(第3図)。

870型X線CTで透過可能な試料の最大許容寸法は直径62mm,長さ90mmである。得られたCT画像の画素



第3図 高出力X線CT装置

Fig.3 General view of high energy type X-ray CT scanner developed for analysis of steel and related industrial materials.

サイズは0.25 mm角で、各画素のX線透過能は512階調の定量値として得られる。これをCT値と呼び次式で定義する。

$$A = k_1 + k_2(\mu_1 - \mu_{st}) / \mu_{st} \dots\dots\dots(1)$$

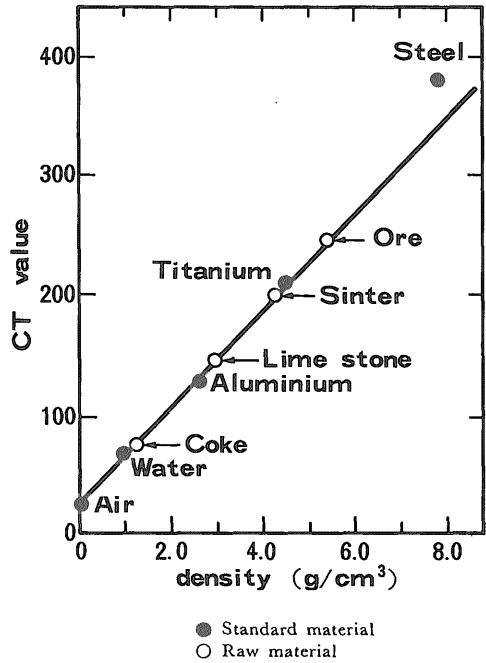
- A : CT値
- k_1, k_2 : 装置定数
- μ_1 : 測定画素のX線吸収係数
- μ_{st} : 基準物質 (870型CTでは空気)

CT情報をもとに焼結体構造を解析する画像解析システムを新日本製鐵(株)とENICOM(株)とで共同開発した(稲角ほか, 1992)。この内容は本号で別途詳細が報告される(稲角ほか, 1995)。ここでは結論として今回開発された画像解析システムの各処理項目を第4図に示す。

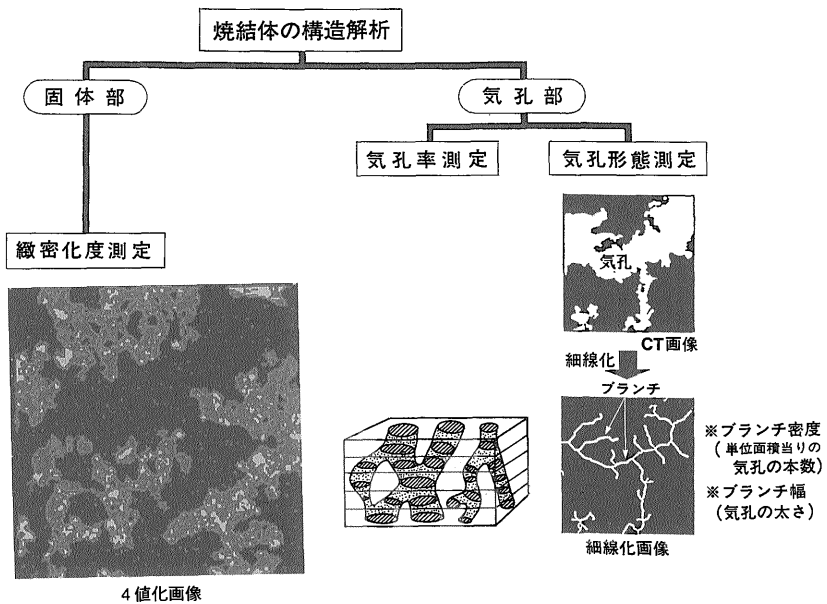
3. 気孔構造の解析

3.1 気孔と固体の識別

今回研究対象の鉄鉱石焼結鉱に関連した物質のCT値の測定結果を第5図に示す。酸化鉄のCT値が一番高く、次に焼結鉱マトリックス鉱物(カルシウムフェライト、ライムオリビンなどの含鉄スラグの総称)、鉄鉱石脈石および副原料(石英、蛇紋岩、粘土、石灰石)、コークス、



第5図 CT値と密度の関係
Fig.5 Relationship between CT value and density.



第4図 X線CTによる焼結体解析法
Fig.4 Items of CT image analysis.

気孔(空気)の順になっている。固体とその他の物質のCT値は空気より高く、それらの差は十分に大きいので閾値を50にとって、2値化することにより気孔部と固体部の識別ができる。(パラフィンで固化した場合は90となる。)

実際の焼結体は気孔を含有した複合物質なので、画素内にCT値の異なる複数の物質が共存したり、気孔が含まれていたりするので、同一物質だけで画素が構成されるとはかぎらない。したがって、実際のCT値の意味を解釈するにあたっては、これらの影響を考慮した画像解析法が必要である。以下に気孔を例として画素中に気孔の境界が存在する場合のCT値への影響について検討した。

3.2 気孔面積測定精度の検討

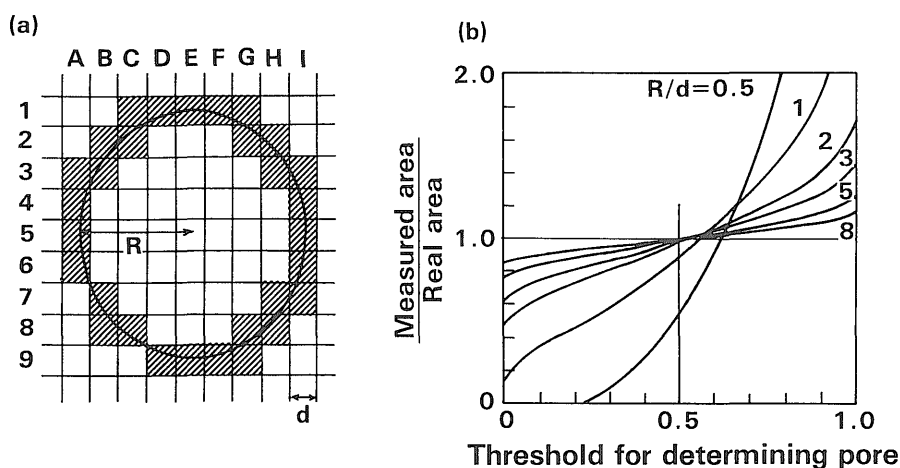
気孔と固体間の境界が画素中に含まれる場合のCT値は気孔と固体の中間値を示し、通称周辺ボケと言われるみかけのCT値となる。この境界に沿って帯状に現れる画素列を以下ではグレイゾーンと呼ぶ(第6a図)。870型CTでは画素が一辺250 μm の大きさであり、気孔径が画素の大きさに近づくほど周辺ボケの影響が大きくなる。気孔と判定するCT値を任意に設定した時に、グレイゾーンを気孔としてカウントする割合を確率計算した結果を第6b図に示す。ここでは固体のCT値を100、気孔のCT値を0と仮定し、グレイゾーンを気孔として計数するために採択したCT値を横軸で示し、またその時のCT値で検出される気孔面積と実気孔面積との比を縦軸に示した。実際の気孔半径(R)とグリッド間隔(d)との比($R^*=R/d$)をパラメータとして、 $R=0.5, 1, 2, 3, 5,$

8の場合が示されている。今CT値を仮に固体と気孔の中間値の50とすると、画素の倍の大きさの気孔($R^*=2$)では誤差が約3%内、気孔径が1.25mm($R^*\geq 5$)以上ではほとんど誤差がなくなる。画素中の異種固体間の境界についても原理的には同様の扱いで測定誤差の検討が可能である。

3.2 焼結体内部の気孔および焼結鉄構造の観察

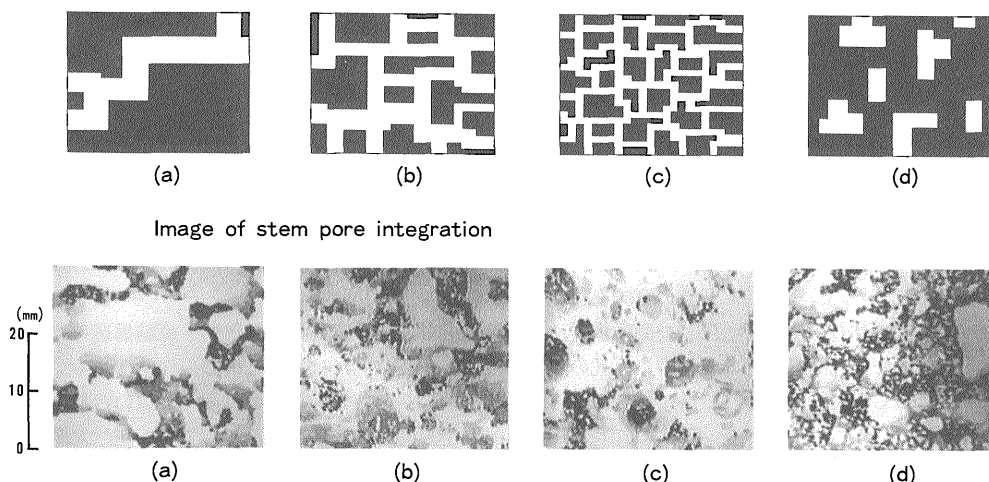
3.2.1 立体可視化

焼結体内部の複雑な気孔構造・焼結構造を直接観察することは実務的には案外と難しい作業である。従来から光学的観察に基づく多数の断面像を重ね合わせて3次元像を組み立てる方法が試みられているが、大変な労力が必要とする上、断面を削り代なしに得ることが難しいので、焼結鉄のような複雑で細かい構造では分解能の低い近似像しか得られない。これでは焼結鉄の品質評価に不十分である。一方CTでは試料台の移動制御の精度の範囲内で連続して撮像することが可能なため、データをコンピュータ処理することにより非破壊で3次元像を自動的に作ることできる。第7図はその一例であるが、気孔を不透明にして固体部を透視した立体像を示し、シェイディングをかけて奥行きを示している。閉気孔と開気孔(貫通気孔)の識別のみならず気孔の連結状態、気孔の形態、表面の凹凸等の詳細が観察できる。さらにソフトウェアを工夫することにより3次元透視像の回転、視野の変更、任意面切断の操作を加えた観察も可能である。また、特定の構造を取り出して立体像を可視化する方法としてワイアリング手法があり、実際の鉄鉱石焼結



第6図 気孔面積測定値のおよぼす境界誤差の影響

Fig.6 Effect of boundary between solid and pore on measurement correctness of pore area.



第 7 図 開気孔の 3 次元透視イメージとその模式図

Fig.7 Schematic figures of stem pores inner sinter cake by Pile-up of two-dimensional CT images.

体内の気孔の一部をとりだして画像化した結果を第 8 図に示す。

3.2.2 気孔, 固体の 3 次元的つながり

焼結体中の通気は自己燃焼方式の焼結では重要で、特に燃焼熱が過剰になると溶融が進みすぎて通気が阻害され、それより以下の焼結層に空気が十分に供給されないため焼結が進まなくなる。この場合空気がクロスフロー（溶融が進みすぎた部分を避けてガスが迂回して流れる現象をいう）して焼結層内を通過することが推測される。実際にそのような構造を示したのが第 9 図であり、水平方向への気孔の発達がかがえ、実際にクロスフローの生じることが予想される。気孔のみならず固体結合の連結状態も固体の強度の面から重要で、3 次元透視像の回転、視野の変更、任意面の切断などのソフトウェアによる観察も可能となった。このように、構造のキャラクタライゼーションの原点は観察にあり、これが本技術の出発点である。

なお、本共同研究においても本号に別途報告されている岩石構造の内部構造の立体観察に必要な技術を共同で開発した(中野ほか, 1992)。岩石中の空隙構造が初めて可視化され、従来の想像の域を越えた構造であったとの指摘がある(中野ほか, 1992)。以上の技術は岩石強度、流体の浸透率など岩石の基礎的物性の解析に有効な手段になると考えられる。今後他分野への活用が期待される。

3.2.3 閉気孔と開気孔

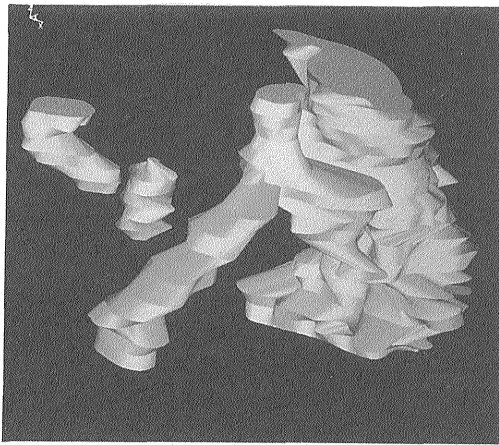
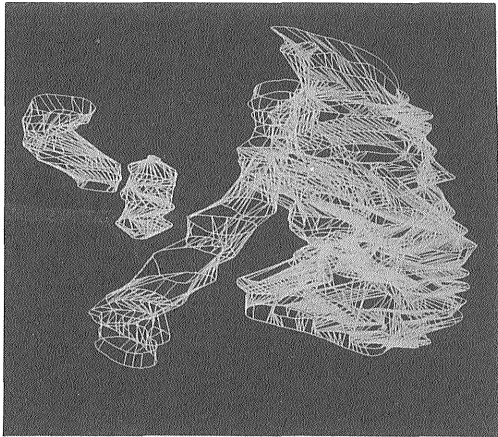
上記手法による気孔の立体像観察により、鉄鉱石焼結鉱では気孔径と気孔形態との間に相関があることが見

だされた。閉気孔のほとんどが直径 5 mm 以下の小気孔（以下に、- 5 mm と記す）で、5 mm 以上の大気孔（以下に、+ 5 mm と記す）は大部分貫通気孔である。ここで気孔径は 2 次元の断面での気孔を構成する画素数を円相当径に換算する方法で測定した。気孔率と気孔形態との間にも相関があり、気孔率が高い試料には + 5 mm の貫通気孔が多く、気孔が少ない試料には貫通気孔は少なく - 5 mm の閉気孔が多い(第 10 図)。これは焼結反応が進行するほど気孔の排出が進み、最終的には気孔のつながりが途絶えて閉気孔化していく変化を示唆したもので、類似の現象は南極の水について報告されており表層から深部へゆくほど氷の焼結が進み閉気孔が多くなる (Maeno and Ebinuma, 1983)。

なお、本解析技術は分解能が 250 μm で、大気孔の測定技術である。従来の顕微鏡法、水銀圧入法が大気孔測定、立体測定が難しいだけに、従来データが乏しかった領域の解析を可能としたことになる。上記結果はそのような解析により、従来明確でなかった構造について得られた知見である。比較的マクロな間隙を対象とする岩石とは対象サイズが合致しており、岩石中の地熱流体の浸透性や EOR (Enhanced Oil Recovery: 2, 3 次回収) における石油貯留層の特性把握など地質工学的応用面の他に、ポーラス煉瓦をはじめ、発泡体材料、建材、断熱材など材料科学分野においても今後の応用が期待される。

3.3 気孔構造のトポロジー解析

3.3.1 連結構造 (つながり方) のキャラクタライゼーション

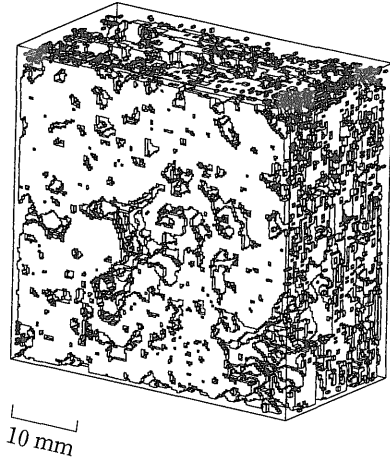


10 mm

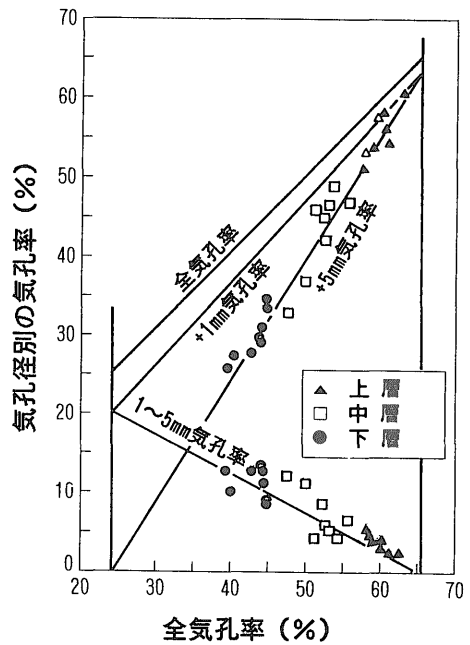
第8図 ワイリング法による開気孔・閉気孔の3次元表示
Fig.8 Three-dimensional CT images of stem pores and closed pores by wiring method.

(1) ネットワーク解析

多孔体内で、互いにつながりあっている気孔（あるいは固体部のクラスター）の集合構造の構造的特徴をトポロジーのブランチの概念を導入して解析した (Inazumi *et al.*, 1995) (第11図)。元のCT画像中の気孔の中心線を見だし、気孔を多くの線分（ブランチ）の集合体としてスケルトン（線）で表示することにより、互いにつながり合っている気孔の幹線と枝線を識別し、またそれらの通路の偏在状態など焼結層内の気孔網の構成が一目瞭然となる (中野, 1991 a, b)。ここでブランチの平均的な長さは視野面積当たりのブランチの本数で把握でき“ブランチ密度”と定義し、ブランチの平均的な太さはプラ

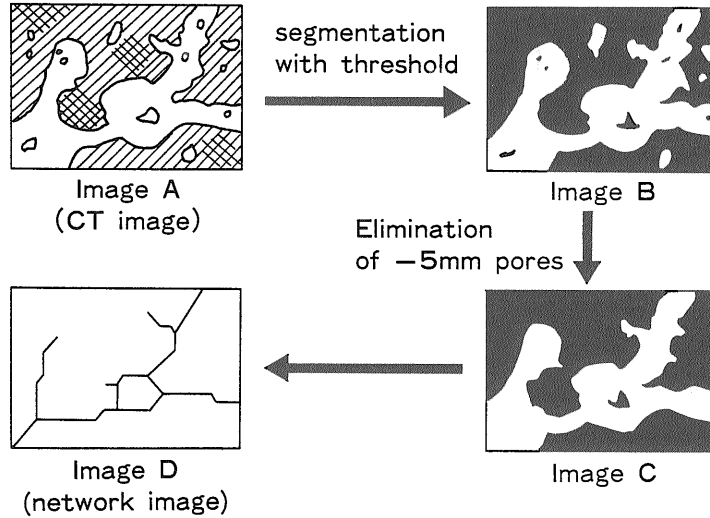


第9図 一番大きな開気孔の影付けによる3次元立体像
Fig.9 Stereograph of the biggest pore (sample width 40 mm).



第10図 シンターケーキ気孔率と気孔径別気孔率との関係
Fig.10 Relationship between total porosity and porosity classified according to diameter.

ンチの総面積をブランチの総延長距離で除すことによって算出でき“ブランチ幅”と定義する。



第11図 ネットワーク抽出のための画像処理の手順
 Fig.11 The image processing sequence of network analysis.

ブランチ密度 $D_b = A_p / N_b$ (1/cm²)(2)

ブランチ幅 $W_b = A_f / L_{bt}$ (cm)(3)

- N_b : CT 画像の視野面積 (cm²)
- A_f : + 5 mm 気孔の占める面積 (cm²)
- A_p : ブランチの本数 (-)
- L_{bt} : ブランチの総延長距離 (cm)

焼結過程では、粉の塊状化、気孔の統合成長が進むにしたがいブランチ密度は減少し、ブランチ幅は拡大する方向に変化する。すなわち焼結初期には粉の結合があまり進まず、枝の多い構造(凹凸の多い構造)になりブランチ密度は高いが、焼結が進み大塊になると丸みが出てきてブランチ密度は低下する。気孔本数も同様の变化をする。またブランチ幅は固体部では塊の短径の大きさで、気孔では気孔の太さの指標となり、これらは焼結進行とともに大きくなる。このようにブランチ密度、ブランチ幅は焼結の進行に伴う気孔、固体部の連結状態、形態変化を表す指標となる。これについての詳細は後述する。

(2) 気孔の大きさの分布

多孔体の気孔(および固体部分)の形態の複雑さのひとつは気孔の大きさの不揃いにある。ここでは焼結体内部の気孔(および固体部分のクラスター)の大きさの分布を評価する技術を検討した。焼結体の気孔は固体部へ複雑に入り込んでいるのでフェレー径、球相当径で気孔

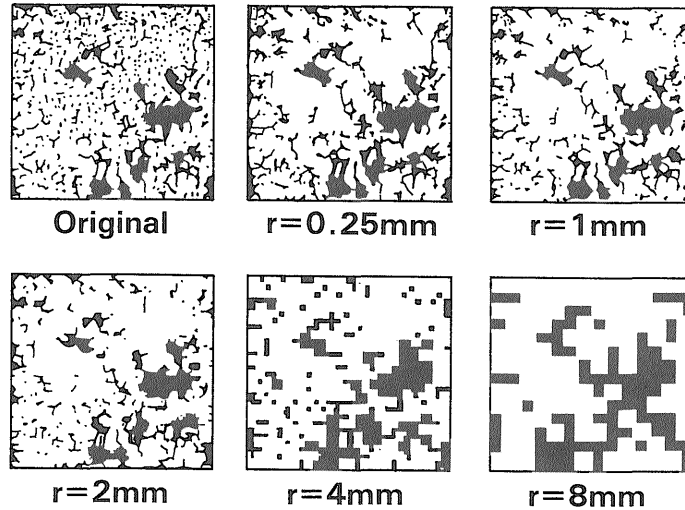
の大きさを表すと実際の面積とはかけ離れた数値になる。そこで凹凸の大きい形状の面積測定に一般に適用されるメッシュ法で気孔の大きさを測定した。気孔に 250 μm のメッシュをかぶせ、覆われたメッシュの数で面積を測定した(第12図)。データの整理方法としてフラクタルでよく使われている粗視化の方法を用いた(高安, 1987)。気孔のサイズとそれに対応した気孔の個数を両対数グラフで表示して直線になれば、構造はフラクタルとみなせる。焼結体構造は後述のように焼結状態に依存してグラフは直線になったり上下に凸の曲線になったりするの、グラフのパターンから分布の特性が評価できる(高安, 1987)。

(3) 3次元的大小分布

固体部分のクラスターもしくは気孔は3次元のつながりをもっており、実際の焼結体構造の把握は3次元で行う必要がある。ただ3次元のデータ処理は膨大になり、2次元で行うことが実際的である。したがって、まず3次元解析で本質的で基本的な解析を行い、ついで2次元解析との関係を把握し、通常の解析は2次元で行うほうが効率的である。本研究では3次元での固体部分のクラスター、気孔の大きさの解析技術を開発することができた。

固体部分(もしくは気孔)のクラスターに背番号をつけて、その大きさを画素数で表示するソフトを開発した。このデータを用いれば比表面積、表面形状も計算できる。

3次元クラスターの数の実測例を第13図に示す。現在測定しているサンプルサイズに比して固体部分のクラス



第12図 メッシュ法による気孔サイズの計算方法
 Fig.12 Effect of mesh size on CT image (pore : black, solid : white, r : mesh size).

ターが大きすぎるものが含まれるため、試料の切断面の影響が無視できない。現状の2次元のフラクタル解析では大きい側で折れ線になるが、この3次元解析との対比により、その理由が理解でき、データの処理法が確立してきた。

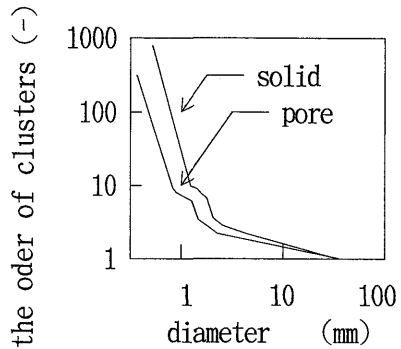
また、鉄鉱石焼結体の最大サイズの固体および最大径の気孔の形状を球相当径と形状係数として定量化した例を第14図に示す。一辺40mmという試料サイズの制約があるものの、焼結充填層の下層に位置する部分ほど形状係数が低減し、固体部の球相当径の増大と気孔部のその低減が進んで、焼結が進行していく様子がうかがえる。

4. 焼結体構造と通気分布の関係

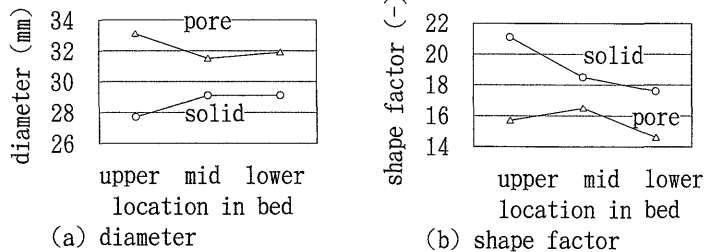
4.1 ブランチ構造と通気性

鉄鉱石焼結層の通気抵抗は原料層、燃焼溶融層、焼結完了層(シンターケーキ)の各層における通気抵抗を総合したもので決まる。中でも燃焼溶融層と焼結完了層の

通気抵抗は焼結反応で形成される気孔構造に左右される。ここでは後者の気孔率、気孔ブランチ構造と通気抵抗との関係を解析した。第15図にブランチ指標で表した気孔



第13図 シンターケーキ中の3次元クラスターのサイズ分布
 Fig.13 Distribution of cluster number in a sinter cake.



第14図 層厚位置の3次元クラスター形状への影響
 Fig.14 Influence of location in sintering bed on shape of cluster.

構造と通気抵抗との関係を示す。通気抵抗は煉瓦の通気試験方法に準じて、焼結体に 0.5 m/s の一定流速で通風したときの圧力損失値で評価した。図の各点の数字は圧力損失を示し小さいほど通気が良好なことを意味する。ブランチ密度が小さく、ブランチ幅が大きくなるほど通気は良好になる。この傾向は平均的に気孔の統合成長が進む方向であり、多数の細くて高通気抵抗の気孔が減少し、太くて通りの良い通気幹線が発達したことによると考えられる。本解析で得られたもうひとつの知見は、気孔率 (図中に等気孔率線を示す) よりもブランチ構造のような気孔構造の変化のほうが通気抵抗への影響が大きい点である。気孔率を上げなくても通気性を改善できるという意味の応用シーズとして使えるデータである。

4.2 気孔構造とガス流れ分布

ブランチ指標は焼結体全体の通気を平均的に評価できるが、実際にはガスは焼結層内を一様に流れない。このような複雑な焼結層内の流れをシミュレートできる方法を検討した。本研究では中野・藤井 (1992) が開発した岩石中のマグマの流れをシミュレートする方法をヒントにして、鉄鉱石焼結への応用を進めたものである。手法を第16図に沿って説明する。最初にCT原画像中の通気に関係のない 5 mm 閉気孔は削除し、次に気孔と固体部の境界を抽出し、気孔部のみを対象としてポロノイの三角形分割法に則って三角形に分割する。さらに全ての三角形の外心を取り、隣接の三角形の外心を連ねた一

連の連結線が得られる。この連結線は気孔の中心を通った骸骨状の線図 (スケルトン図) となり、通気網全体の通気の流路を示す。末端が行き止まりの気孔とそうでないものとは枝刈り操作により除去すると、通気に有効なガスの通路のみとなる。さらに通気に有効なブランチのみを対象にして、各ブランチごとにブランチの長さ、気孔面積を算出し、面積を長さで割って各ブランチの幅を計算する。ブランチの長さ、幅とそのつながりが通気網全体に明らかになると、キルヒホッフの法則を適用して通気網全体の流れが次式により計算できる (Dullien, 1979)。

$$q_{12} = -a \cdot b \cdot C_{12} \cdot \Delta P_{12} \dots \dots \dots (4)$$

q_{12} : 流量

$$a = l / \mu \text{ (粘性流体の場合),}$$

μ : 粘度

$$b = l / 12 \text{ (粘性流体の場合),}$$

$$C_{12} = W_3 / l \text{ (粘性流体の場合),}$$

W : ブランチの幅, l : ブランチの長さ

通気流れの分布は等圧線で示し、全圧 1.0 に対し 0.05 刻みで表示した。第16図(c)は圧損が流量に比例すると仮定した計算結果で、右端の図(d)は圧損が流量の2乗に比例すると仮定した場合の計算結果である。前者はガスの流れが層流と仮定した場合で、後者は粘性流体に等しい乱流とした場合のシミュレーション結果である。

本技術によると画像の視覚的観察だけでは識別評価が難しい焼結体内部の通気不良、偏流箇所が明確にできる。典型的な DL 焼結機の焼結体のガス流れの解析例は後に示す。

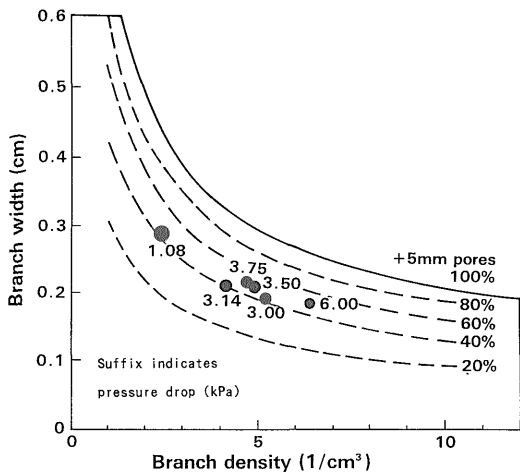
5. 焼結体の固体部の解析

5.1 固体部 CT 値と構成物質の粒度変化、鉱物変化との関係

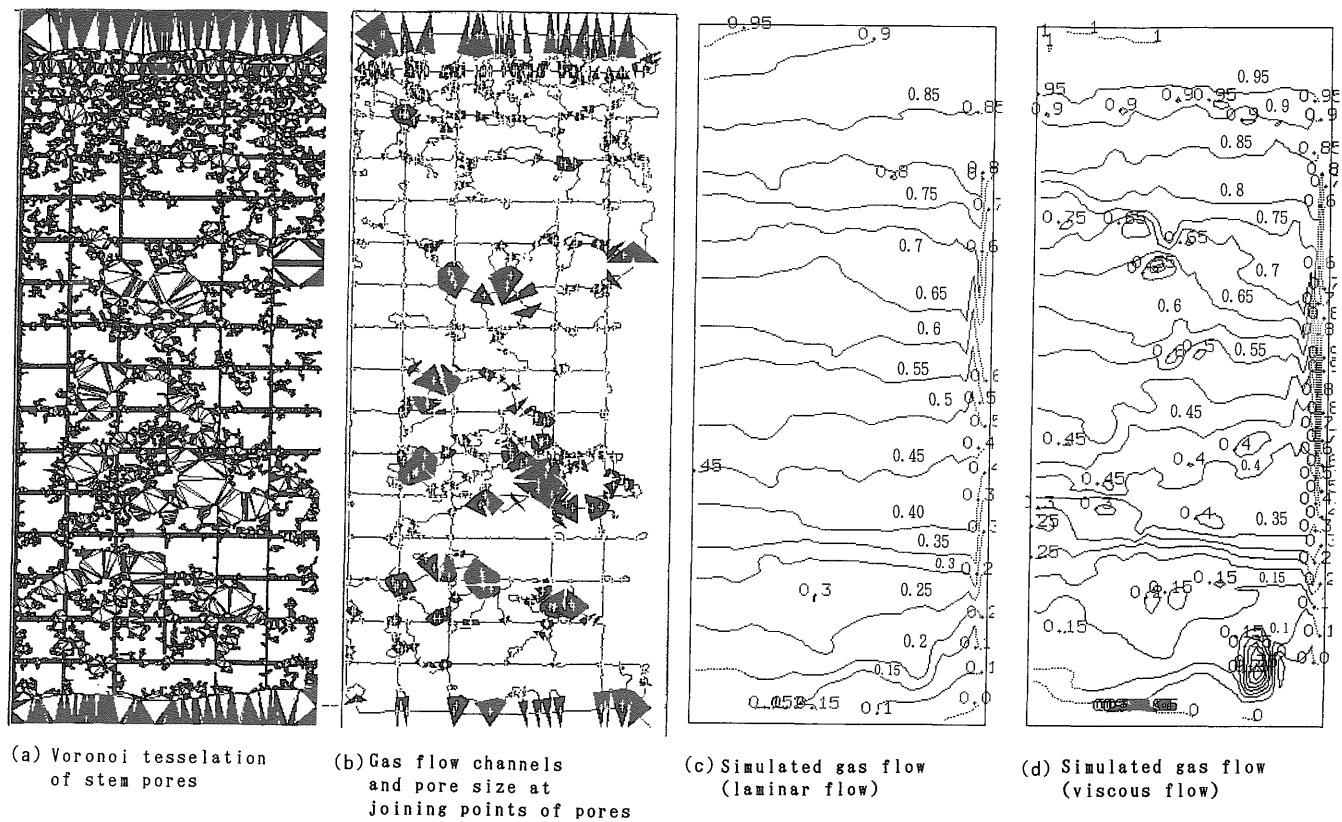
焼結反応では反応の進行とともに気孔構造が変化すると同時に、粒子が結合して塊となり、同時に塊の内部から気孔が排出され固体部の緻密化が進む。並行してさまざまな鉱物反応が起こる。

これら焼結進行に伴う変化がCTでどのように解析できるか以下に検討した。

画素に比較して充分に大きい物質は鉱物の種類の変化がCT値に反映される(第5図)。一方、粒度が画素(250 μm)ないし画素サイズ以下になると、3.2節の気孔の面積測定誤差で検討したように、境界が画素中に含まれるのでCT値は構成物質のCT値を荷重平均したみかけの



第15図 ブランチ指数で整理した焼結体の通気抵抗
Fig. 15 Relationship between ventilation resistance indicated by pressure drops and pore branch parameters.



第16図 通気網解析とガス流れ解析

Fig.16 Pore network analysis and simulation of gas flow in sinter cake.

値になる。焼結が充分に進んでいない原料ないし未焼結状態を画素オーダーの寸法で観察すると、一般には微細粒子同士が架橋構造を形成し、各粒子のまわりには空隙が多く観察される。したがって CT 値は空隙率に比例して低下する (第 17 図)。

以上のように固体部の CT 値には焼結反応に伴う鉱物の種類の変化と粒度の変化が同時に反映されるので CT 値の動きだけから構造変化の原因を判定することは一般には難しい。しかし研究対象物質が限定される場合には CT 値の変化が実質的な意味を持っている場合がある。鉄鉱石焼結反応の検討例を以下に示す。

5.2 焼結状態と固体部 CT 値

焼結原料中では鉄鉱石類および返鉱以外の脈石、フラックス剤、コークス粉の固有の CT 値は全て粒度に関係なく 150 以下である (第 5 図)。一方、CT 値が 150 以上の鉄鉱石類、返鉱は粒径が画素より充分大きい場合は本来の CT 値を示すが、画素以下の細粒では本来の CT 値より低いみかけの値を示す (第 17 図)。

図から気孔が画素中に 50% 含まれた場合 (粒径が画素の約半分の大きさの鉄鉱石類、返鉱) は CT 値は 150 以下になる。このように本来 CT 値が高い原料も微粉で焼結以前の状態では CT 値はみかけ上低く、低 CT 値物質として計数される。焼結反応は CT 値 150 以下の細粒の鉄鉱石類が塊になり、また同じく 150 以下の脈石、フラックス剤が反応して消滅し、本来の CT 値が 150 以上を示す固体部分の鉱物 (カルシウムフェライトや鉄ライムオリビン) と 2 次生成の酸化鉄とになる反応である。したがって CT 値 150 以下の画像上の面積比率 (以下 CTL と定義する) を

集計すると未焼結反応物質の残留状態を示す指標となる。

焼結が充分進むと CT 値は 150 以上に上昇するが、ここでは CT 値の細分類によりさらに焼結状態の判別が可能である。酸化鉄と焼結鉱マトリックス鉱物の中間 CT 値 220 を判別基準とすると 220 以下はマトリックス鉱物そのものを計数すると同時に画素以下の細粒酸化鉄が計数される。細粒酸化鉄は焼結反応で過剰な加熱を受けると巨大に成長し CT 値は 220 以上になる。したがって CT 値 150 から 220 の中間値 (以下 CTM と定義) の計数の実質的な意味は標準的な焼結鉱組織の生成率の指標となる。CT 値が 220 以上を示す画像上の面積比率 (以下 CTH と定義) は元の粗大な鉱物の残留物が過剰に成長した酸化鉄になるが、前者を予め測定しておき溶融係数をかけて差し引けば過剰に焼結が進んだ部分の生成率の指標となる。

以上の検討結果をベースとして、さらに画像処理上に生じる境界ボケの修正は計算速度を考慮して実際に影響の大きい CTL 部だけをとり入れ、他の境界の影響は簡略化することにより CTL, CTM, CTH の比率と気孔率 P を算出する次の実用式を用いることができる (Inazumi *et al.*, 1985)。

$$CTH = 100 \times H / S \quad \dots\dots\dots (5-a)$$

$$CTM = 100 \times M / S \quad \dots\dots\dots (5-b)$$

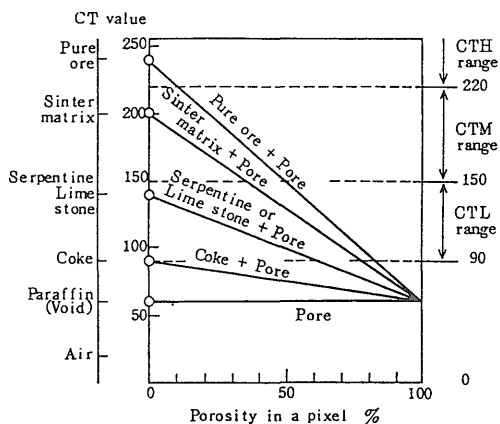
$$CTL = 100 \times (L + 0.5 E) / S \quad \dots\dots\dots (5-c)$$

$$P = 100 \times (V + 0.5 E) / (S + V + 0.5 E) \quad (6)$$

$$S = H + M + L + 0.5 E \quad \dots\dots\dots (7)$$

- H : CT 値が 220 以上の画素数
- M : CT 値が 219 以下 150 以上の画素数
- L : CT 値が 149 以下 90 以上の画素数
- V : CT 値が 90 以下の画素数
- E : 固体と気孔の境界の画素数

以上のように鉄鉱石焼結反応で緻密化と塊成化および鉱物生成の進行が同時反応的に起こり CT 値に反映されるものの、適当な CT 値を選び分類すると実質的な焼結反応の進行の程度を判定する指標として便宜的に利用できることが判明した。非破壊で焼結体内部の焼結進行の分布も評価でき、いわゆる不均一焼結 (現場用語で焼けむら) の構造の詳細かつ定量的な検討が可能である。



第17図 画素中の気孔量の CT 値への影響
Fig.17 Effect of porosity in pixel on CT value.

5.3 CT 値の分類による焼結体構造の評価解析例

— 焼結不良箇所の検出と定量化 —

CT によれば、上記のように CT 値から焼結体内の焼結反応の進行状態の情報が非破壊で得られる。この解析方法を利用して、できあがった成品が全体に均一に焼成されているかどうかのムラ焼け状態が把握できる。例を示すと第 18 図の右図(b)はムラ焼けした、歩留の低い焼結体であり、左図(a)は良好な焼結体の例である。(b)は高さ方向の中間部の溶融が進みすぎた結果気孔が閉塞し、通風が阻害されてその下部の焼成が進まず、一部未焼成構造になり歩留が低下した例である。本焼結体は原料を上下 2 層に 2 段に装入し、操業実験条件として溶融し易い微粒が 2 層の境界付近に集まったため過溶融が起きた例である。同じく表層部にも両試料とも未焼結部が観察される。これは表層近くでは冷い空気のために中心部より低い温度でコークスが燃焼するため、熱不足のために焼結が不足している所で、プロセス特有の共通した問題箇所である。本評価技術の特徴は、このような問題が既知の箇所においても未焼結箇所の広がり定量化できる所にある。

6. 焼結体構造の形成機構

6.1 焼結反応進行による焼結構造、気孔構造の変化

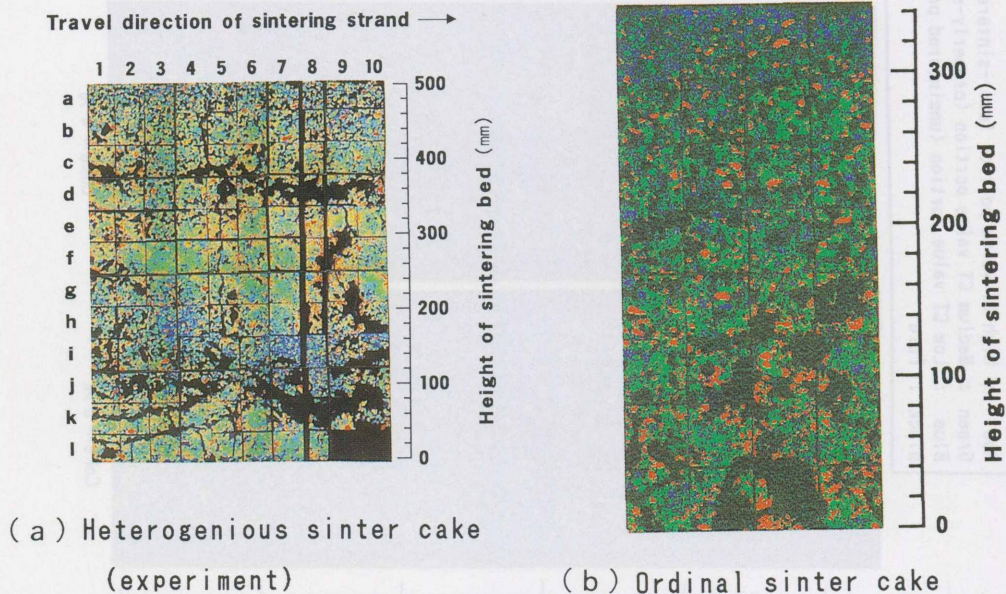
6.1.1 コークス量の焼結体構造、気孔構造に及ぼす影響

(1) CT 画像に見られる構造変化

自己燃焼方式の鉄鉱石焼結ではコークス使用量は加熱量を意味し、コークス量の増加とともに焼結反応は促進されると考えられる。粉コークス量を変えた焼結試験をし、焼結反応の進行に伴う焼結構造の変化を CT 解析の観点から解析した。撮像した焼結体内部の CT 像を第 19 図に示す。使用コークス量に対応した内部構造の差は顕著である。コークスが少ない試料では焼結構造は均一だが塊状化緻密化が全体に進んでいない。気孔径も小さく全体に分散している。コークス量が 5% まで増加するにつれ全体に塊状化、気孔の成長、緻密化が進み、気孔は太く成長し統合し本数が減る。コークス量 5% 以上では過剰焼結部と未焼結部が共存する不均一な焼結構造になる。気孔も粗大化し、偏在するとともに、コークス 3% 試料で観察されたものと同様の未焼結構造が局所的に形成される。

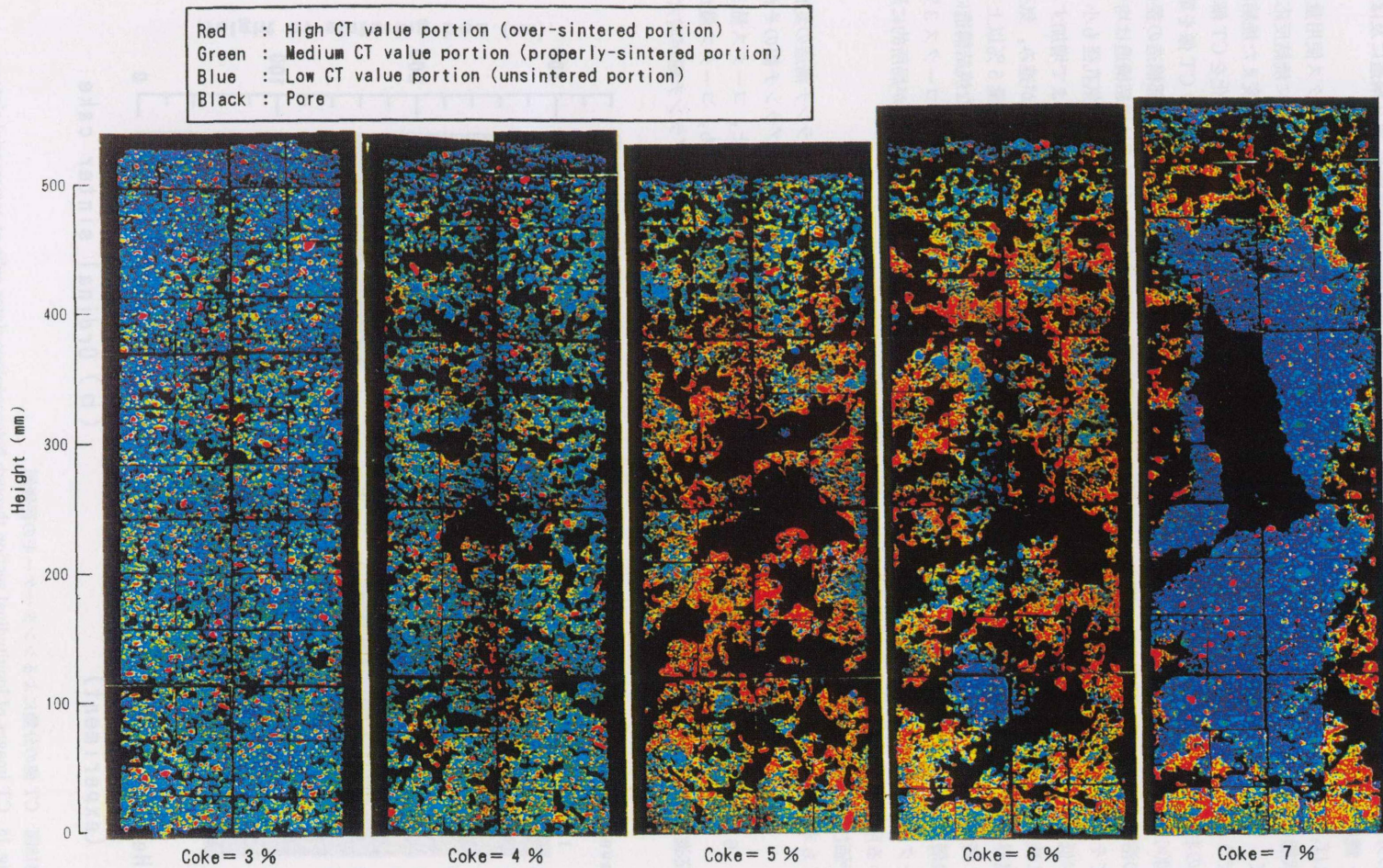
(2) ブランチ構造の変化

第 20 図にコークス量に対するブランチ構造の変化を示す。横軸はブランチ密度、縦軸をブランチ幅のそれぞれ平均値であるブランチ指標で見ると、コークス量 5% までは気孔も固体部分のクラスターも、コークス量が多くなるほどブランチ密度が減少し、ブランチ幅が増大する。



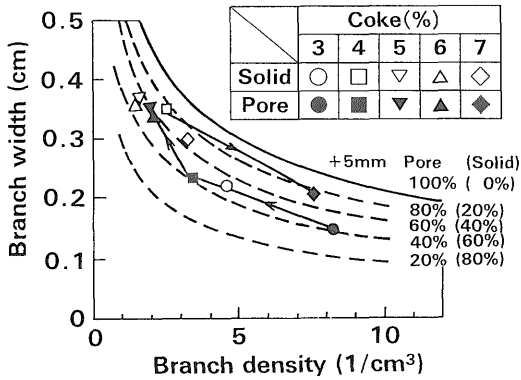
第18図 CT 値の分類によるシンターケーキの評価例

Fig.18 CT images of longitudinal section through heterogeneous sinter cake at commercial sintering plant experiment comparing with ordinal one.



第19図 コークス量を変えた種々のシンターケーキのCT像

Fig.19 CT images of sinter cake produced with different coke ratio of raw mixture.



第20図 コークス量によるブランチ構造の変化
Fig.20 Change of branch structure with coke consumption.

ところが、コークス量が5%を極限にしてさらに多くなると逆の方向に変化し、ブランチ密度は増加し、ブランチ幅は減少して、コークスが少ない3%、4%の場合と同じ領域に戻る。コークスが過剰な場合、気孔、クラスターともに一部は巨大に成長しているにもかかわらず同時に未焼結部が増加したため、平均値でみるとこのような変化が生じたものと考えられる。

コークス量による構造変化の(1)で述べた観察結果は、このようにブランチ指標によって定量化できた。

(3) 固体部クラスター及び気孔のサイズ分布の変化

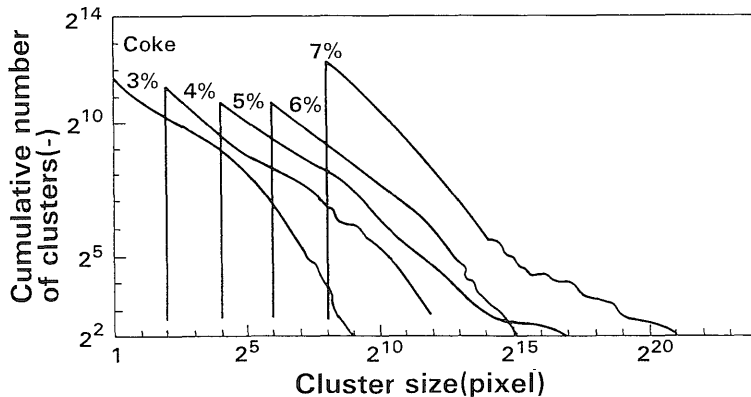
コークス配合率の異なる焼結体試料を対象に、固体部クラスターあるいは気孔の大きさ分布を上述の粗視化の方法によって評価した。第21図の縦軸はサイズ別のクラスター数の度数を最大クラスターからの順で算出したものであり、横軸は画素数で示したクラスターの面積(ク

ラスターの大きさ)を示す。また図ではグラフの重なりを避けるため、座標の横軸はコークスの配合率が1%増すごとに目盛りを2(2²)ずつ右へずらして表示してある。コークス使用量の変化とともにグラフのパターンが規則的に変化しているのがわかる。すなわちコークス使用量が少ない場合は上に凸状の曲線になり、コークス使用量が増加するにつれて直線になり、さらにコークスが多くなると下に凸の曲線に変化する。コークスが少ないうちは塊状化の単位は小さい側に片寄っており、コークスが多くなるにつれクラスターの大小が全体に万遍なく存在するようになり、コークスがさらに多くなると大きいものと小さいものが同時に増加し中間程度の塊は相対的に減少している。このグラフのパターン変化も上述の緻密化度、ブランチ指標の変化とよく符合し、コークス5%を境にして変化している。気孔の大きさの変化もクラスターと裏腹の関係にあり、同傾向の変化がみられた。

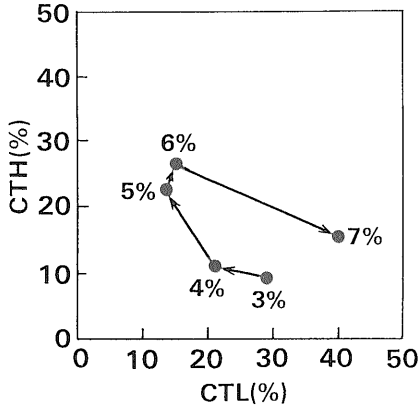
(4) 固体部の緻密化度の変化

固体部の緻密化度の測定方法は上述したが、ここではコークス量と緻密化度の関係について述べる。第22図の各軸にCTLとCTHの全体に対する割合を示し、双方の量がコークス量に対してどのように変化したかを示す。コークス量5%まではコークス量の増加とともに低緻密化焼結部面積比率CTLは減少するが、CTHは変化せず、適正緻密化焼結部面積比率CTMは増加する。コークス量5%でCTLが極小化する。コークスが5%以上では過剰焼結部面積比率CTHは高いレベルのままにあり、CTLも再び増加する。したがって、コークス量4~5%が最適値となる。

6.2 焼結体の構造形成法則についての考察



第21図 コークス量によるクラスターサイズ分布の変化
Fig.21 Relationship between cluster size distribution of sinter cake and coke consumption.

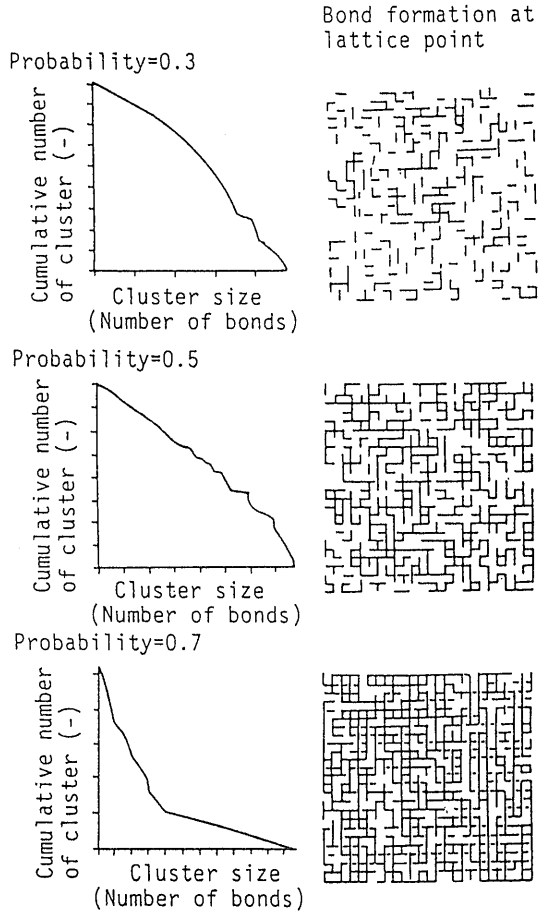


第22図 コークス量による CTH, CTL の変化
 Fig.22 Change of solid density represented by CTH and CTL due to coke consumption.

上記のような構造指標の変化は、構造形成に何らかの法則性があることを示唆しているように考えられる。上記のクラスターのサイズ分布のパターンの変化は物理学で扱われるパーコレーション問題 (小田垣, 1993) でサイト間のボンド (結合) の確率を変化させた場合に形成するクラスターのサイズ分布の変化と一致する (第 23 図) (稲角ほか, 1992)。パーコレーション理論によれば、クラスターの大きさの分布が両対数グラフで直線になるのはパーコレーション現象の臨界点に相当する。臨界点ではボンドで繋がったクラスター、すなわち焼結体が端から端までひと繋がりのものになった固体部分のクラスターが少なくとも 1 個生成する状態である。この時クラスター群の大きさの分布は次式で表される。

$$N \propto S^{-d} \dots\dots\dots(8)$$

式中の d は図の直線の傾きで、クラスターの構造のフラクタル次元となる。このフラクタル次元によって形状の複雑さの程度が定量化でき、焼結体の性質が評価できる (高安, 1987)。臨界点以下では全体に繋がるクラスターはできず、大きなクラスターができ難いので、クラスターサイズの小さい部分での分布は直線となるが、大きい部分の分布は直線から外れて急激に落ちるパターンを示す。臨界点以上になると、クラスターはさらに肥大化し、大きなクラスターほど加速度的に大きく成長するので極めて大きいクラスターと小さいクラスター群に 2 極化する。そのために中間的な大きさのクラスターが少なくなってクラスターサイズの大きな側に直線から外れたゆるい傾斜ができるパターンとなる。第 20 図に示したブランジ指標では見掛上同じ値をとっていても、サイズの



第23図 ボンド確率を変えたボンド構造体形成シミュレーション
 Fig.23 Simulation of bond structure formation with the change of bonding probability.

分布はパーコレーション臨界点を越えた場合とそれ以下では焼結体の内部構造が本質的に異なることを示している (第 22 図)。

パーコレーション理論によると上記固体部分のクラスターの変化は気孔サイズの分布についても同じ結論が得られる (高安, 1987)。さらにクラスターサイズとクラスターの見掛密度とが理論的に比例関係にあることも証明されており、緻密化の分布さらに表面積の変化についても密接な関連があると言われている (高安, 1987)。本理論に拠れば鉄鉱石焼結における上記のブランジ指標、緻密化度の変化、固体部分クラスターおよび気孔の大きさ分布の変化がいずれもコークス量約 5% を臨界点とした変化としてともに統一的な解釈ができる。本理論が鉄鉱石焼結に適用できるかどうかは今後詳細に検討を要するが、この種の研究の発展を期待したい。

6.3 焼結体構造の形成のシミュレーション

6.3.1 焼結体構造形成モデル

ボンド・パーコレーションの理論では、隣合った格子点同士の結合が確率にしたがってランダムに結合するとした時に焼結構造に類似のクラスターサイズ分布、気孔サイズ分布が得られる。実際の焼結反応ではコークスの燃焼熱の大小に応じて、溶け易い鉱石と溶けにくい鉱石、さらに気孔の多い場所と少ない場所とランダムに分布しており、これらが総合して隣接した固体同士が結合するかどうか決定される。まさに結合の有無が、ある確率で焼結層内にランダムに分布して、パーコレーションモデルと類似の状態にあると言える。そこで以下の焼結体構造形成モデルを開発した。

このモデルでは、従来のヒートパターンモデルにおけるガス流れ、伝熱や粉コークス燃焼条件を各格子点に割り振り、融液流れを組み合わせることにより構成した(第24図)。すなわち正方形の格子からなるシンターケーキの垂直方向2次元断面を考え、各格子点に以下の5つの変数を定義する。格子構成要素は、鉱石(S)、コークス(C)および気孔(P)の3要素とし、それらの体積分布の和を1とした。

$$\phi_{\text{coke}} + \phi_{\text{pore}} + \phi_{\text{ore}} = 1 \quad \dots\dots\dots(9)$$

ϕ_{coke} , ϕ_{pore} , ϕ_{ore} : 鉱石, コークス, 気孔の各体積比率
各格子への空気(A)の流れは有り(=1), 無し(=0)の2値で表現する。また各格子点の温度(T)を融点で規格

化して定義した(第24図)。この格子上で、コークスの燃焼, 伝熱, 融液の移動を行わせるが、その際以下の仮定を導入する。

- 1) 当該格子の空気の値は、当該格子の直上の3つの最近接格子の内の少なくとも1つが1で、かつ当該格子の気孔率がある閾値以上であり、かつ当該格子でコークスが燃焼していない場合に1とし、それ以外は0とする(第25図)
- 2) コークスの燃焼は当該格子の直上の3つの最近接格子の内の少なくともひとつが1で、かつ温度が発火点以上である格子が進行し、その速度は一定値とする。コークスの燃焼熱は当該格子が空でない限り当該格子のみに与えた。

$$\Delta T[x, y, t] = \delta * \Delta T_c * R_c / \phi_{\text{ore}}[x, y] \quad \dots\dots\dots(10)$$

x, y, t : 垂直, 水平および時間の変数

T : 当該格子の温度

ΔT : コークスの燃焼による当該格子の温度上昇値

ΔT_c : 単位量鉱石の単位量コークス燃焼による温度上昇

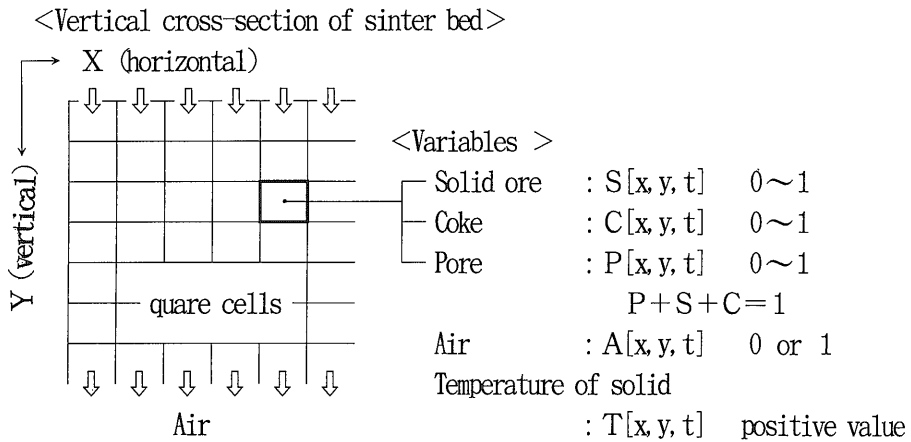
R_c : コークス燃焼速度 (一定値)

$\phi_{\text{ore}}[x, y]$: 当該格子の鉱石の占有率

ここにコークス燃焼の有無を表す δ は

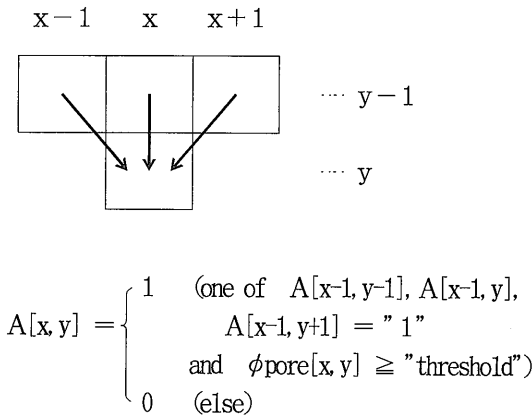
第1表 シンターケーキ形成数学モデルの主要変数
Table 1 Parameters of the sintering model with typical values.

parameter	notation	actual value	value in model
cell number	$x \times y$		250×250
cell volume	V_{cell}		1
iteration interval	t		1
initial porosity	ϕ_{pore}	0.5	0.5
initial coke content	ϕ_{coke}	0.06	0.06
room temp.	T_{rm}	15 °C	0
coke ignition temp.	T_{ig}	600 °C	0.5
ignition furnace temp.	T_{fn}	1000 °C	0.8
melting point	T_{mp}	1200 °C	1
heat diffusivity coeff.	D_h	fitted by flame front speed at 1	
coke combustion rate	R_c	30~60sec/particle	0.003
ore temp. increase by unit coke combustion	ΔT_c	~600 °C	2.44
melt fluidity	C/F_d		fitted at 0.5



第24図 シンターケーキ形成数学モデルの変数等の定義
Fig. 24 Definition of matrix and variable in mathematical model of sintering.

1) AIR FLOW



第25図 ガス流れのモデル化
Fig. 25 Model of air flow.

$\delta = 1$ ($T \geq T_{ig}$ & $A = 1$)
 $\delta = 0$ (その他の場合)

3) 温度変化は熱拡散の一般式で記述した(第26図)。

$$T[x, y, t+1] = T[x, y, t] + D_h * (T[x+1, y, t] + T[x-1, y, t] + T[x, y-1, t] - 4 T[x, y, t]) + \Delta T[x, y, t] \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 D_h は熱拡散係数に相当する定数。

4) 鉱石は融点以上で潜熱なく液化し、直下の3つの最近接格子に移動する(第27図)。その移動速度はHagen-Poiseuilleの法則に従うとした。

$$d\phi_{\text{ore}}[x, y]/dt = C * ((\phi_{\text{ore}}[x, y] + \phi_{\text{ore}}[x+e, y+1])/2) / L_{\text{path}} / \eta_{\text{td}} \dots\dots\dots(12)$$

L_{path} : 格子 $[x, y]$ と $[x+e, y+1]$ 間の距離
 η_{td} : 粘性定数

$[x+e, y+1]$: 直下の3つの最近接格子

5) 境界は水平方向を周期的とし上面、下面の境界値

$$T[i, 0] = T[i, 250] = 0$$

$$A[i, 0] = 1$$

計算に際して使用したパラメーターの値を第1表にまとめた。層厚500mm焼結時間40分の焼結操作を想定し、数値計算は単位格子長さ2mm時間キザミを10秒とした。

6.3.2 モデルによる焼結構造形成シミュレーション結果

本モデルを用い、上記のコークス配合量変更の実験をシミュレートし、コークス配合量を変えた時の焼結温度変化(第28図)とシンターケーキ構造変化を計算した(第29図)。コークス配合量の増加とともにCTLに逆比例する指標としての溶融量が増すが、コークス量5%まで増加すると溶融量は飽和し、さらにコークス量を増すと逆に溶融量は低下し、実験結果とよく一致している。さらにクラスターのサイズ分布の変化も実験結果とよく一致

2) COKE COMBUSTION

$$-dC/dt = \begin{cases} Rc (A=1 \text{ and } T \geq T_{ig}) \\ 0 (\text{else}) \end{cases}$$

3) HEAT TRANSFER ⇔ Diffusion type

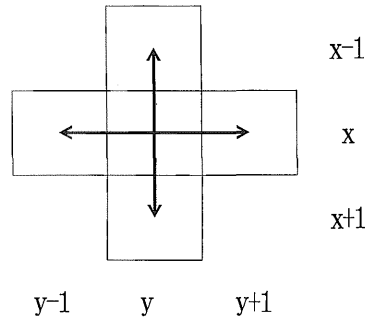
$$\phi_{ore} * (dT/dt) = Dh \nabla T + Q_c * Rc$$

Rc : coke combustion rate (=const.)

Qc : heat of combustion

(temp. increase of unit solid
by unit coke combustion)

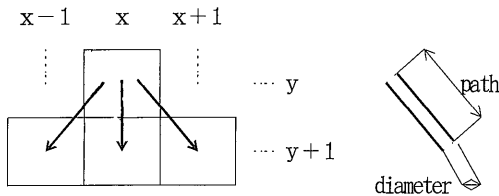
Dh : heat diffusivity coeff.



第26図 熱移動のモデル化

Fig. 26 Heat generation and heat transfer equations.

4) MELT FLOW



Hagen-Poiseuille's law

$$\text{flow rate} = C * (\text{diameter})^2 / \text{path} / \text{fd}$$

$$(\text{diameter})^2 \propto (\phi_s[x, y] + \phi_s[x \pm \epsilon, y \pm 1]) / 2$$

第27図 融液流れのモデル化

Fig. 27 Model of melt flow.

した(第30図). 焼結の進行程度に最適なコークス配合量が存在し, 臨界点に相当する.

7. 今後の課題と他分野への応用

7.1 プロセス制御への焼結体構造形成理論の応用

パーコレーションモデルによると臨界点ではクラスターの大きさ分布はフラクタルとなり, いわば焼結構造として焼結不十分と焼結過剰との中間の適正な焼結構造となり, 返鉱率最低(最高歩留)で, かつ最も均一で有効な通気ができる(最高生産率)条件が達成される. この原理に基づき強度, 生産率を最適にする焼結条件の決定

やDLプロセスに内在する不均一焼結解消による高歩留高生産率の開発への応用を進めている.

7.2 焼結体構造研究へのフラクタル応用の今後の課題

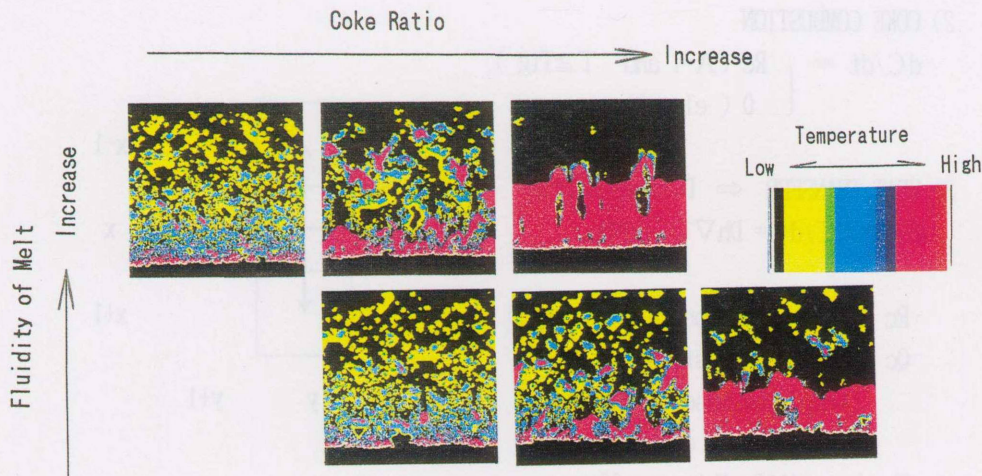
7.2.1 残された課題

フラクタル研究では焼結体をはじめ岩石の破碎後の粒度構成がフラクタルであることも明らかにされている(高安, 1987). 焼結体の塊砕, 破壊現象解析への応用は今後に残された大きな課題である. 特に上記に検討してきた塊成化(結合)と破壊(解離)の関連性の有無はフラクタルに基づいた変化の可逆性が成り立つかどうかであり, フラクタルの原点にかかわる基本的課題である.

ここに法則がみいだせれば成品粒度制御, 破壊コントロールにつながり, 工業的価値は大きい. また, 粉体充填層構造もフラクタルの観点からの構造解析が進められている. 焼結構造につながる影響が解明できるのではないかと考えられる. 岩石力学, 破壊力学と提携して研究が進められれば研究の効率化が進むと考えられる.

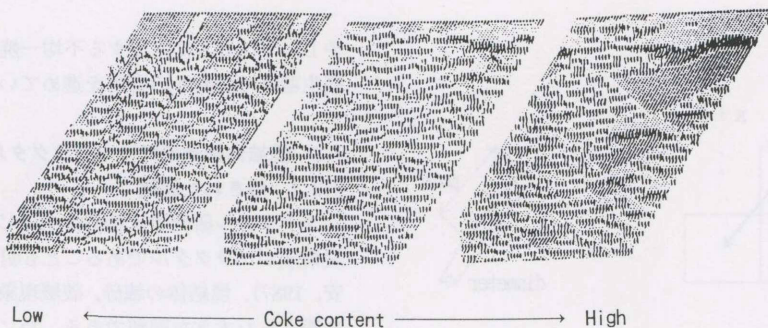
7.2.2 焼き物等材料科学分野への本研究の適用

本技術は分解能が250 μmと, 形状としては比較的大きい焼結体を対象とした技術で, 同種の非鉄金属焼結体, セメントクリンカー, 断熱煉瓦等の焼結体にはそのまま適用できる. しかし一般に工業材料では μm オーダーの気孔が問題になり CTS 870 では解析ができない. しかし最近小角 X 線を用いた超高分解能の X 線 CT も市販され検討が可能になってきている.



第28図 温度分布の計算例

Fig.28 A simulation result of cross-sectional temperature distribution.



第29図 固体密度分布の計算例

Fig.29 A simulation result of cross-sectional solid density distribution.

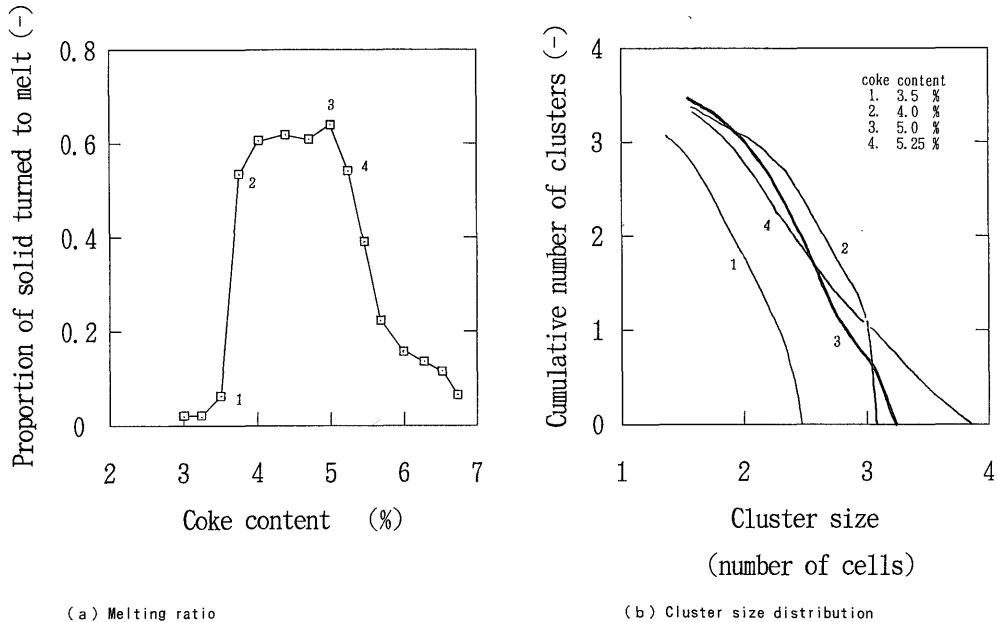
7.3 岩石の輸送特性解明への応用

著者らがここで述べたCT技術および画像の解析法は岩石の電気伝導度や流体の浸透率など、岩石の輸送特性を把握するための研究に役立てることができる。地熱開発においては地下の熱水貯留層の実態を把握することが重要であるが、地表調査から貯留層の細かい構造を把握することは困難であり、ボーリングコア試料を用いた物性試験が必要となる。コア試料の物性試験結果を解釈するためには、熱水の流路となっている岩石の割れ目や空隙の形態と結合状態など幾何学的要素を把握することが必要である。第2, 3節で述べた高分解能のX線CT装置とCT値の2値化に関する処理技術および気孔と固体部分クラスターの形態を把握するための解析技術は、岩石の流動特性を支配する割れ目や空隙の形態の把握に適用することができる。第4節で述べた通気構造に関する解

析技術は岩石の輸送特性を明らかにするのに役立つ。

7.4 岩石の微細構造の研究への応用

ガスを放出して固結したマグマは多くの気孔を含んでおり、気孔の形態と通気構造はマグマが固結する際の物理条件についての情報を含んでいる。これらの気孔形態と通気構造の解析には、第3, 4節で述べた空隙の形態と通気構造に関する解析技術を利用することができる。岩石中の鉱物形態は岩石の成因を知るための重要な因子であるが、鉱物の形態を三次元的に把握するのは容易ではない。通常の薄片による顕微鏡観察は鉱物形態についての二次元情報しか得られず、これを三次元に変換するのは困難である。固体内部の密度差を三次元的に把握するためにはCT値の三次元解析が有効である。とくに火山岩は高温の火山灰や火山砕屑物が焼結と類似のプロ



第30図 コークス量のかえて計算した、溶融率(a)とクラスターサイズ分布(b)の変化

Fig.30 Variation of (a) melting ratio and (b) cluster size distribution on the simulation.

セスで結合したものであり、第5節で示したと同等の解析技術を適用して火山岩の成因解明に必要な情報を得ることが可能である。また、この技術は鉱物配列などに見られる流理構造の解析にも利用できる。一方、堆積岩や変成岩では層理構造や変形構造がみとめられ、著しい構造的特徴を持つ岩石が多い。これらの成因に関しても第5節で述べたような技術の適用が可能であろう。

8. まとめ

- (1) 鉄鉱石焼結体等の高密度物質をも透過可能な高エネルギー高分解能型の鉄鋼材料用CTを用い、焼結体内部の3次元構造の可視化、焼結体の緻密化度を指標とした焼結進行度の評価および通気構造評価が行えるシステムを開発した。
- (2) 一見でためめで不規則に見える焼結体の形状はフラクタルの特徴をもっている。
- (3) 鉄鉱石焼結反応の進行過程では塊状化、緻密化、気孔の統合成長の変化が同時並行的に起こる。この構造形成変化は原料粒子間のボンドの形成確率に左右されるパーコレーション理論に則った変化と考えられる。
- (4) 本解析手段は岩石中の空隙構造解析に利用でき、また岩石の成因を明らかにするために必要な岩石微

細構造の3次元解析にも応用が可能と考えられる。

- (5) 岩石で開発された多孔体内の通液モデルは焼結の通気シミュレーションに応用することができる。

文 献

- Dullien, F. A. L. (1979) *Porous Media*, Academic Press, 90 p.
- 稲角忠弘・笠間俊次・伊東敬祐・中野 司・水島裕恵 (1992) 多孔焼結体の画像解析システムの開発. 日本金属学会会報, vol.31, p.440-442.
- Inazumi, T., Kasama, S., Sato, K., Sasaki, M. and Tanaka, T. (1989) Analysis of sinter cake structures by computerized tomography. *Proc. 5th Int. Symp. Agglomeration*, Brighton, p.559-610.
- Maeno, N. and Ebinuma, T. (1983) Pressure sintering of ice and its implication to the densification of snow at polar glaciers and ice sheets. *J. Phys. Chem.*, vol.87, p.4103-4110.
- 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

エア:(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上の流れ解析. 情報地質, Vol.2, No.3, p.275-295.

—————・西沢 修・増田幸治・稲角忠弘・笠間俊次 (1992) X線CTによる岩石内部構造の3次元

解析. 月刊地球, vol.16, p.616-620.

小田垣孝(1993) パーコレイションの科学. 裳華房, 156 p.

高安秀樹(1987) フラクタル. 朝倉書店, 186 p,

(受付:1995年10月4日;受理:1995年10月26日)