

シェル鋳型のマイクロ X 線 CT 観察

(株)ツチヨシ産業 黒川豊, 長井壮一, 枝根和也, 天久裕樹

1. はじめに

鋳型強度は鋳型密度に依存することは既に明らかにされている¹⁻²⁾。現用鋳型では充填方法や金型方案により、部位により密度差が生じるために、不具合の原因となることがある。このために、均一で高密度な鋳型作りが望まれる。なお、鋳型の部位毎の密度状態を判定して維持管理することが現場管理で必要であり、非破壊で観察する方法としては超音波探傷、X 線透過、X 線 CT (Computed Tomography)、赤外線サーモグラフィ(表層部に適用)などがある。

本報告ではシェル鋳型試験片の圧縮強度を測定する際には測定値のバラツキが大きく、測定数を 5~10 程度を測定しないと平均値が求まらない現状から、シェル鋳型試験片では均一な成型体となっておらず、鋳型強度に与える充填性のバラツキの影響があるのではないかと考え、シェル鋳型試験片に対して、非破壊観察として X 線 CT の中でも解像度の高いマイクロ X 線 CT を用いて充填性のバラツキを評価した。また、破壊発生箇所における破壊の要因として、砂粒子接点の状態が破壊に大きく係わっているのではないかと考え、この接点状態をマイクロ X 線 CT にて定量化できないか検討した。

2. マイクロ X 線 CT スキャンの仕様

表 1 に用いたマイクロ X 線 CT スキャンの仕様を示す。マイクロ X 線 CT スキャンは被検体に X 線を入射し物質の X 線吸収係数により変化する透過 X 線の強度を検出し、再構築して画像としたものである。X 線吸収係数は、物質の種類と密度などにより変化する。すなわち、鋳型を形成する鋳物砂は鋳型毎に一定であることから、鋳型の密度の影響により透過 X 線強度が変化し、再構築した画像の色調が変化する。この原理を利用し、得られた色差を画像処

理して定量化する。

表1 マイクロX線CTスキャンの仕様

型式と製造所	東芝ITコントロールシステム(株) TOSCANER-30900μC3
仕様・構成	X線発生器：密封型20~90kV 1~200μA 焦点寸法：5μm 最大スキャンエリア：φ100×H150mm 最大搭載重量5kg 空間分解能：5μm以上 イメージング方式：4/2インチ2段階切換え X線透視解像度33Lp/mm以上 透視像幾何倍率：最大36倍 CTスキャンモード：ハーフ/フル/マルチ/オフセット/コンベーム/オフセットコンベーム/ハーフコンベーム 機能：全自動校正（ゲイン校正、幾何歪校正、スキャン位置校正、オフセット校正）オートセンタリング、電動スライスコリメータ、微調テーブル、連続回転スキャン、ステップ角度スキャン

3. 鋳型破壊位置の X 線 CT による確認

3.1 実験方法

図 1 に RCS 特性、RCS 粒度とスライス厚みの模式図を示す。本報告に主に用いた RCS 特性と、CT スキャン時の粒子サイズとスライス厚みの模式図である。RCS は 6 号クラスで、レジン量 2.0%の一般的な配合のものを使用した。粒度分布は 70mesh(0.212mm)ピークである。マイクロ X 線 CT スライス厚みは 0.037mm に設定し、この厚みで砂粒を画像とすることができる。

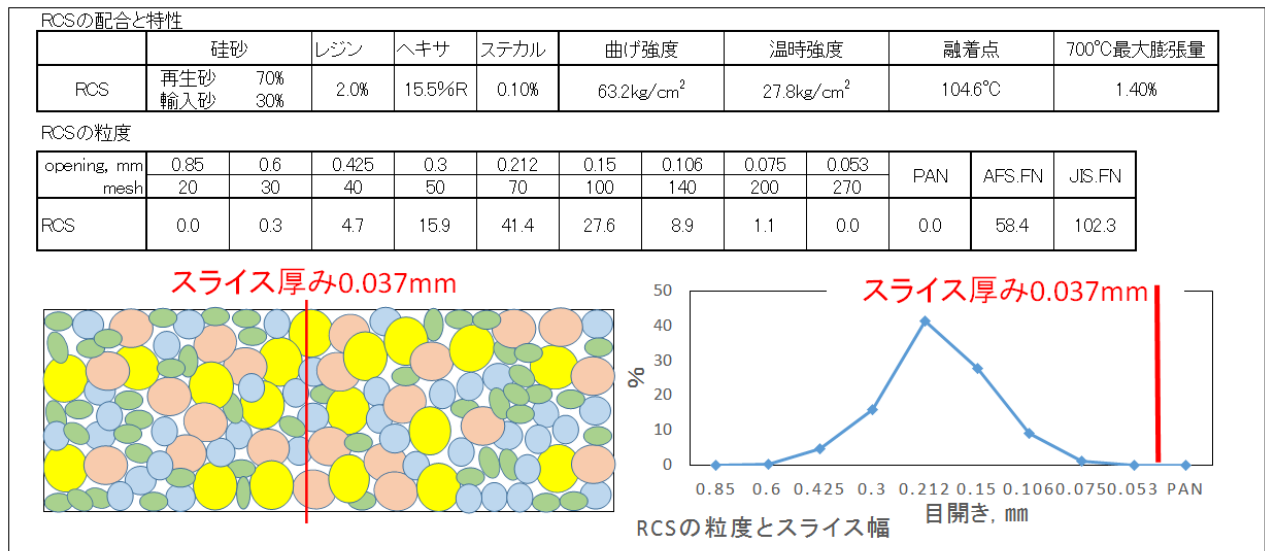


図1 RCS特性、RCS粒度とCTスキャンのスライス厚みの模式図

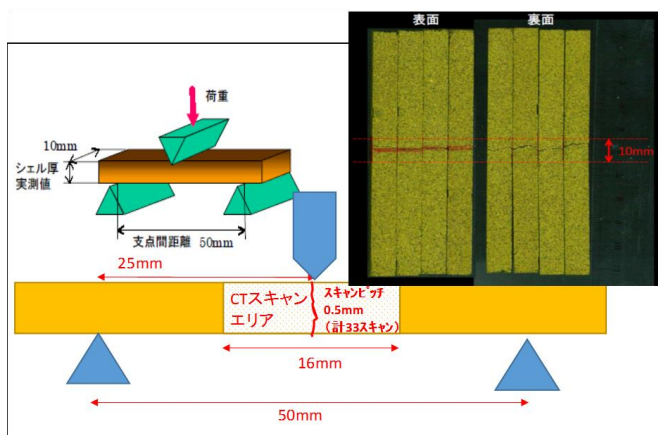


図2 シェル抗折力試験片の形状とCTスキャンエリア

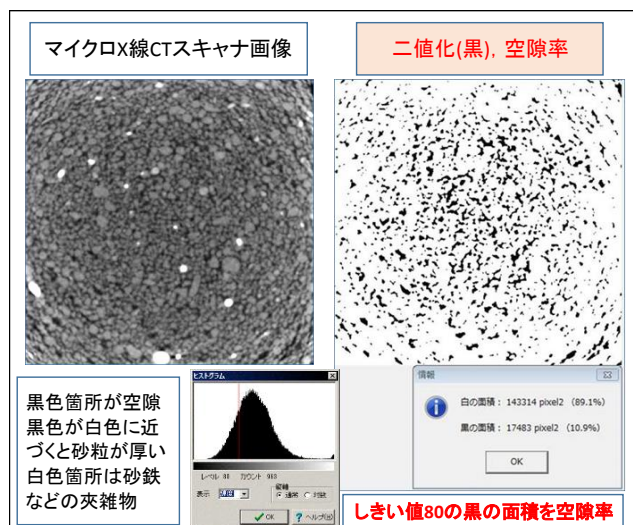


図3 二値化、ヒストグラムから空隙率の算出方法

図2 にシェル抗折力試験片の試験片形状とスキャンエ

リアを示す。シェル抗折試験片の作製は $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 100\text{mm}$ のサイズである。自動抗折力成型機を用いて、ブロー圧を $1 \sim 4\text{kg/cm}^2$ で変化させて 5 個取りで試験片を作製した。抗折力測定は 50mm の支点で試験片を支え、その中央箇所に荷重をかけ、三点曲げ試験を行った。破断した範囲は約 10mm であった。そこで CT スキャンは荷重をかける圧着子を中心にして 0.5mm ピッチで 33 箇所の 16mm をスキャンした。

図3 に二値化、ヒストグラムからの空隙率の算出方法を示す。マイクロ X 線 CT スキャン画像(以下、CT 画像)を画像処理である色差処理(白黒)を行い、しきい値 80 で二値化(黒)を空隙率とし、この空隙率を用いて検討した。CT 画像では黒色が空隙であり、砂粒の厚みのある箇所が白色よりとなる。

(参考、用語の説明)³⁾

- ① 二値化(黒白): 連続な階調(色の濃淡)で表された画像信号をある境(しきい値)で黒色と白色の 2 色に変換すること。
- ② しきい値: 二値化の際に設定する基準値のこと。本報告では、輝度 256 階調中の 80 のしきい値を使用。

3.2 実験結果と考察

図4 に空隙率と抗折力、試験片密度の関係(ピッチ (0.5mm) のスキャンエリアのピッチ No. 15, 16, 17)を示す。空隙率を求めたスキャンエリアは、0.5mm 幅でスキャンした 33 ピッチのエリアである。図4 は No.15, 16, 17 ピッチであるが、これは圧着子と接する No.16 と $\pm 0.5\text{mm}$ の No.15 と No.17 のエリアの空隙率の平均である。抗折力はブロー圧 $1 \sim 4\text{kg/cm}^2$ 、5 個取りで得た試験片 20 個(全データ)とブロー圧毎の平均の 4 個(ブロー圧、平均)の抗折

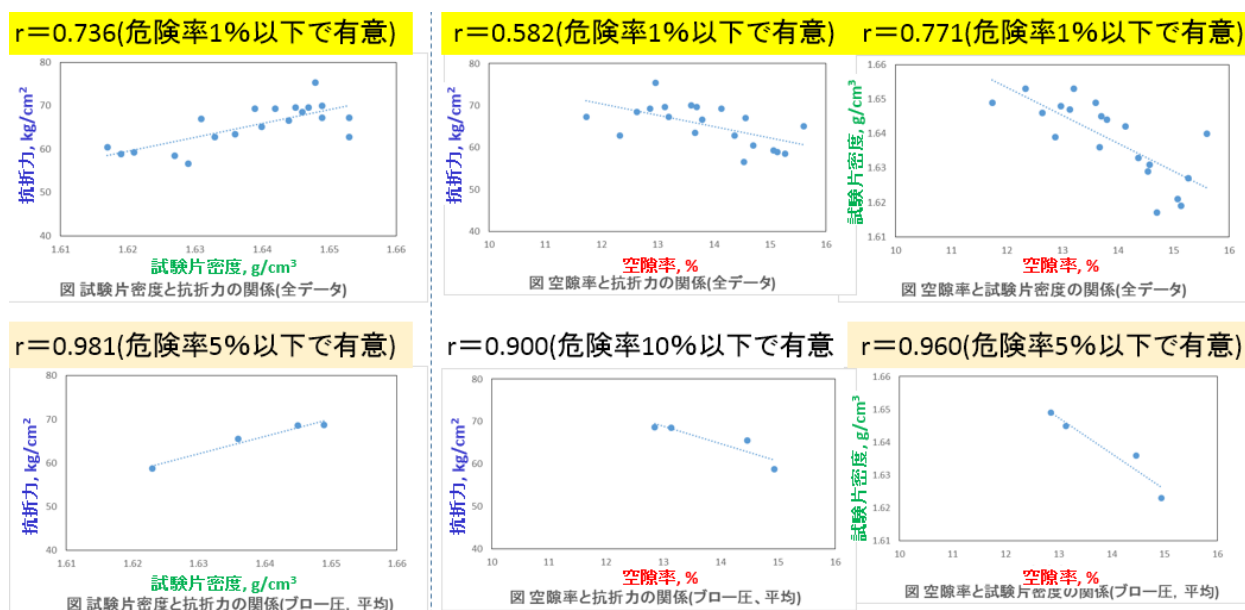


図4 空隙率と抗折力、試験片密度の関係(ピッチ(0.5mm)のスキャンエリアのピッチNo. 15, 16, 17)

表2 各スキャンエリア毎の空隙率と抗折力、試験片密度の相関係数

スキャンピッチ, 0.5mm	抗折力		試験片密度	
	全データ (N=20)	ブロー圧, 平均 (N=4)	全データ (N=20)	ブロー圧, 平均 (N=4)
1-33	0.533 **	0.889	0.735 ***	0.940 *
16	0.542 **	0.881	0.706 ***	0.934 *
17	0.568 ***	0.779	0.690 ***	0.883
10-20(最大値)	0.594 ***	0.892	0.759 ***	0.960 **
16, 17	0.592 ***	0.856	0.745 ***	0.932 *
16, 17, 18	0.609 ***	0.899	0.781 ***	0.959 **
15, 16, 17	0.582 ***	0.900 *	0.771 ***	0.960 **

*:危険率10%以下で有意 ** :危険率5%以下で有意 *** :危険率1%以下で有意

力と空隙率の相関を検討した。また、試験片の重量から算出した試験片密度も併せて検討した。その結果、図 4 では(全データ)において、空隙率、抗折力、試験片密度に1%以下の危険率で有意である相関が認められた。

表 2 にスキャンエリアの空隙率と抗折力、試験片密度の相関係数を示す。スキャンエリアを様々に変更して平均空隙率を求め、抗折力や試験片密度との相関を検討した。圧着子の先端は、ピッチナンバー16 に接し、そこより試験片に荷重がかかり破壊試験となる。そこで、ピッチナンバー16 を基準にしていくつかの範囲で平均空隙率を求めて、抗折力と試験片密度と単相関分析を行い、相関係数を表 2 にまとめた。最も相関が高いのはピッチナンバー15、16、17 の 3 点より算出した平均空隙率であった。従って、圧着子を中心に1.5mm の範囲の鋳型の空隙率が抗折力や試験片密度に密接に関与していると言える。また、破壊は弱い箇所、つまり空隙率の高い箇所より発生すると考えてピッチナンバー10~20 の最大空隙率との相関を算出した。抗折力と試験片密度の相関は高い傾向となり、ピッチナンバー15、16、17 の 3 点平均に次ぐ相関であった。このことから、圧着子近傍の空隙率と周辺の最大空隙率の影響を抗折力や試験片密度は受けていると言える。つまり、シェル鋳型試験片は均一な成型体ではなく、空隙率の高い脆弱な箇所が存在しており、これが抗折力試験において測定数を増加させないと平均値が算出できない原因となっていると考えられる。

しかしながら、表 2 において圧着子と接する 1.5mm 幅のエリアの空隙率と抗折力が、相関が最も高いことが分かった。そこで、更に詳細に破壊が発生する箇所を特定するために、圧着子と接する試験片の 10mm×10mm の断面の中ではどこかの空隙率と抗折力に相関があるのかを調査した。ピッチナンバー15、16、17 の断面 CT 画像を 9 分割し、それぞれの平均空隙率を求め、抗折力との相関係数を計算した。

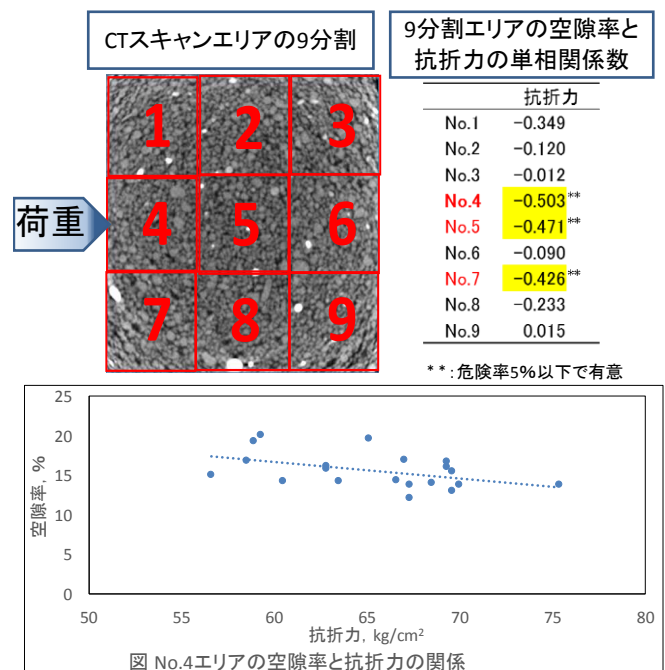


図5 試験片断面の9分割エリアと抗圧力の関係

図 5 に試験片断面の 9 分割エリアと抗圧力の関係を示す。断面の 9 分割したエリアナンバーは図中に示した。各エリアの空隙率と抗圧力の単相関係数及び No. 4 エリアでの散布図を示した。散布図のデータは全ての試験片のデータを使用した。圧着子と接するエリアである No.4 と相関が高く、次いでその下の No.5 が高い傾向が認められ、次いで No.4 の左右の No.7 と No.1 であった。このことは破壊が圧着子と接した箇所から始まることから、これは当然である結果と言える。しかしながら、図中の散布図ではバラツキも認められ、均一な鋳型が得られていない可能性も示唆される。

4. 破壊位置における砂粒子接点状態の X 線 CT による確認

前章で特定した破壊箇所において、更に、破壊を律するのは砂粒子間接点の状態と考え、X 線 CT を用いて接点状態を定量化して抗折力との関係を検討する。鑄型の強度に与える要因は下記の A～Z などの様に多々あるが、本項では砂粒子接点のバインダーの体積の要因を検討する。

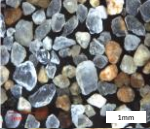
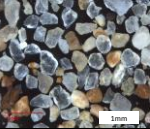
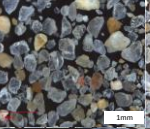
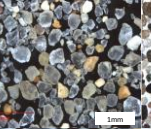
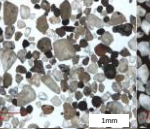
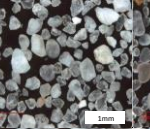
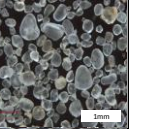
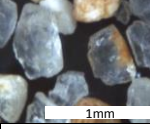
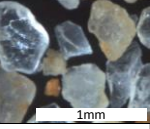
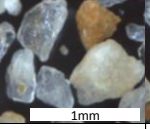
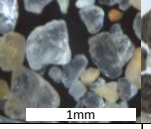
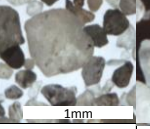
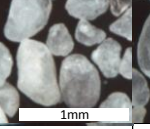
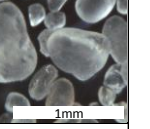
- A) バインダーの種類
- B) バインダーの添加量 バインダーの単位体積当たりの量(重量比で添加すると、鑄物砂の比重の影響も受ける)
- C) バインダーのコーティング状態(混練状態)
- D) バインダーの硬化状態(反応時間、温度・湿度、吸湿などによる劣化、可使時間、など)
- E) 鑄物砂の粒度指数、粒度構成
- F) 鑄物砂の比表面積
- G) 鑄物砂とバインダーの濡れ性
- H) 鑄物砂の表面状態(アンカー効果)
- I) 鑄物砂の内部摩擦応力
- J) 鑄物砂の pH や酸消費量などがバインダーに与える影響
- K) 鑄物砂中の微粉(全粘土分)のバインダーの吸着
- L) 鑄物砂中の微粉(全粘土分)のバインダーへの分散

- M) 鑄物砂の空隙(ポーラスなど)
- N) 鑄物砂の鉱物組成
- O) 添加剤の影響(ex.ベンガラ、クッション剤、など)
- P) 鑄物砂の充填性(鑄型の密度)
- Q) 鑄物砂の粒形
- R) スプリングバック
- S) 鑄型の局所的な脆弱部(ex.充填不足箇所から破壊発生)
- T) 鑄型の硬化状態(内部硬化性、脱水、温度、乾燥、など)
- U) 塗型、離型剤、表面安定剤などの影響
- V) 鑄型の経時変化
- W) 有枠、無枠。ウェイトの状態
- X) 注湯時の高温強度(バインダーの分解・変化、鑄物砂の表面溶融、鑄物砂の膨張、など)
- Y) 注湯時の鑄型変形、ガス発生、溶湯の浸透などによる鑄型の状態
- Z) 鑄型の残留強度(バインダーの残留強度、鑄物砂の収縮、鑄型の崩壊性、など)

4.1 実験方法

表3に供試試料の粒子特徴量、シェル鑄型抗折力を示す。X 線 CT 測定時の透過 X 線強度は、検体密度や鉱物組成の影響を受けることから、嵩比重 1.5g/cm³ 前後の硅

表3 供試試料の粒子特徴量、シェル鑄型抗折力などの特性

	天然硅砂-1	天然硅砂-2	天然硅砂-3	天然硅砂研磨砂	再生砂	輸入硅砂-1	輸入硅砂-2
顕微鏡写真							
							
アスペクト比 短径/長径	0.660	0.658	0.659	0.685	0.709	0.683	0.722
平均短径	0.309	0.274	0.275	0.273	0.260	0.246	0.309
平均長径	0.476	0.422	0.428	0.402	0.371	0.365	0.432
真円度(最大内接 円中心法)	0.677	0.672	0.674	0.697	0.722	0.700	0.744
凹凸の度合い	1.349	1.359	1.367	1.294	1.301	1.296	1.252
丸さの度合い	1.513	1.550	1.522	1.465	1.411	1.455	1.369
円らしさ	0.873	0.877	0.871	0.891	0.885	0.887	0.897
長方形の度合い	1.241	1.246	1.242	1.250	1.250	1.243	1.233
嵩比重 g/cm ³	1.426	1.386	1.367	1.508	1.447	1.445	1.579
安息角 °	31.2	32.2	33.0	32.0	32.0	31.2	30.8
流下時間 sec	38.9	37.5	37.4	35.0	37.0	35.2	37.2
AFS F.N	49.3	53.8	61.0	63.2	64.9	60.5	62.1
JIS F.N	83.6	93.5	107.2	111.0	113.8	107.1	108.6
抗折力 kg/cm ²	45.1	34.9	53.5	71.6	57.6	108.2	131.2

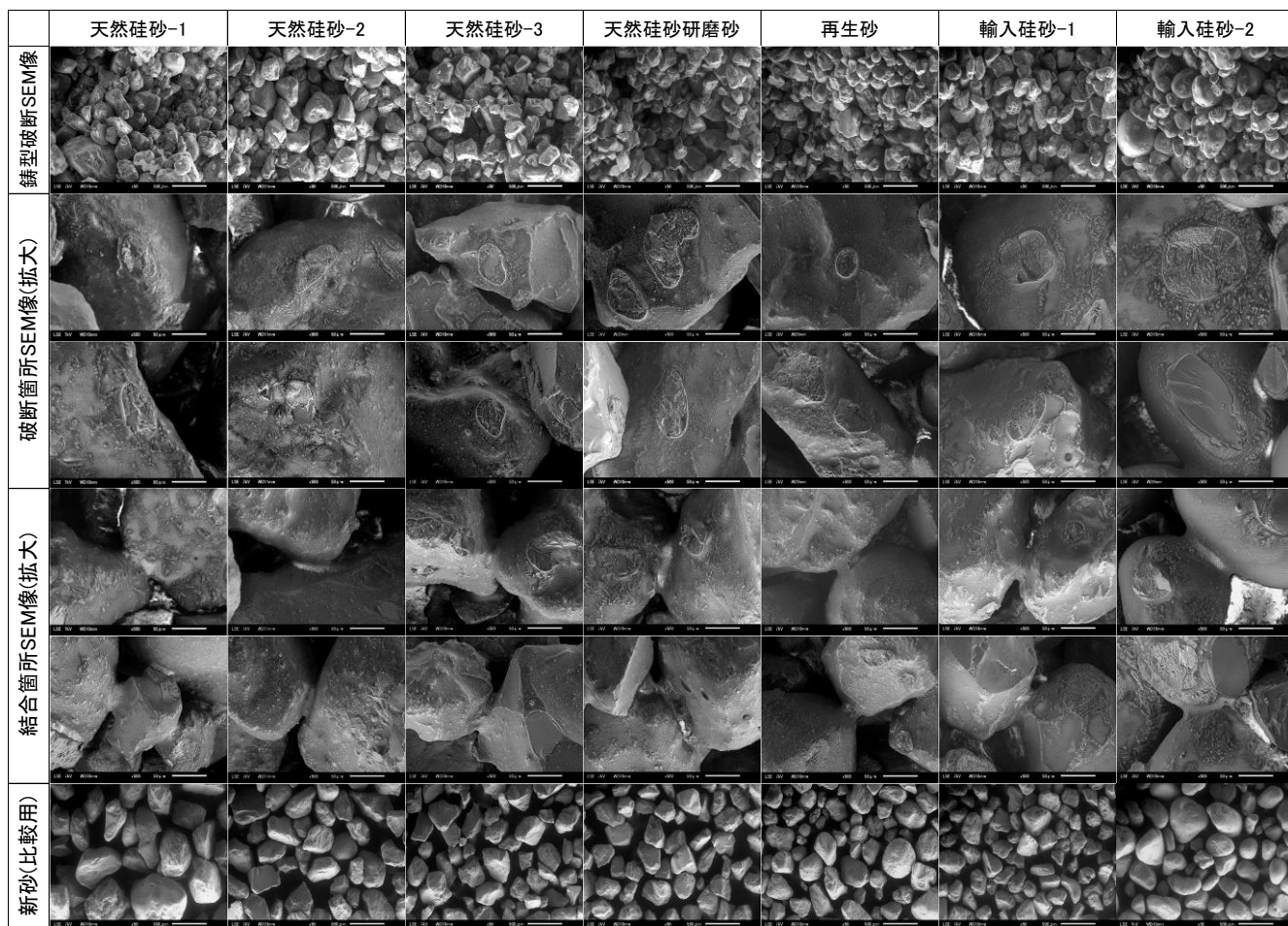
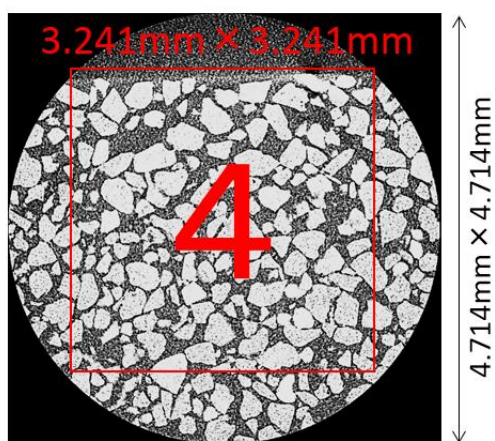


図 6 シェル鑄型抗折力試験片のSEM像(低真空モード, 加速電圧7kV)

砂のみを選んだ。硅砂は石英と長石からなる。抗折力は、高強度レジン 2.0%, ヘキサ 15.0%R, ステカル 0.1%で供試硅砂を RCS とし、ブロー圧は $5.0\text{kg}/\text{cm}^2$ で成型して測定した。



スライス厚0.008mm
スキャン長さ2mm(0.008mmピッチ×250枚)

図7 マイクロX線CT測定位置と画像

図 6 にシェル鑄型抗折力試験片の SEM 像を示す。前項で抗折力と最も相関の高い箇所である図 5 中の No.4 箇所を測定した。SEM 像の撮影条件は非導電物質測定用低真空モードで、加速電圧は 7kV とした。抗折力測定後の破断面を観察しており、レジン膜の剥離面が認められる。また、砂粒がレジン膜で結合している様子がうかがえる。レジン膜の結合は数ミクロンから十数ミクロンである。

図 7 にマイクロ X 線 CT 測定位置と画像を示す。図 5 中の No.4 を試料とした。試料を前項よりも限定したことで、スライス厚みを小さくして分析することが可能となる。すなわち、スライス厚み 0.008mm、ピッチ 0.005mm で、図中に示す 3.241mm×3.241mm を幅 2mm の範囲でスキャンし、250 枚の CT 画像を得た。これを画像解析してレジンの結合箇所を検討することとした。

図 8 に判別分析法による二値化の模式図を示す。マイクロ X 線 CT 画像に対して、しきい値を設定して白黒の二値化した模式図である。前章ではしきい値を固定としたが、本項では輝度のヒストグラムが一つのクラスであったことから、鑄型の一般的な空隙率に近似する値が得られるよう

に固定したしきい値を設定した。本章では輝度のヒストグラムが二つのクラスとなったので、二つの輝度ヒストグラムにおいて、最もクラス分離の良いしきい値を求める判別分析法を適用してしきい値を設定した。

図9に粒子接点体積算出の模式図を示す。砂粒子にはバインダーがコーティングされている。砂粒子接点の鋳型強度に影響を与えると考えられるバインダーの体積を求められないか試みた。マイクロX線CTスキャン画像中

の砂粒子は0.007mmのスライス厚みでスキャンしているために鮮明である。しかし、測定時のノイズがあるので、判別分析法二値化によりノイズを除去した。粒子接点体積は、領域成長法(Watershed 法)を用いて計算した。使用したソフトは株式会社JSOLのScanIPである。図9①では2DのマイクロX線CT画像(3.241mm×3.241mm)である。図9②は判別分析二値化でノイズを除き、粒子接点をWatershed法で求めて赤線で示している2D画像である。図9③では

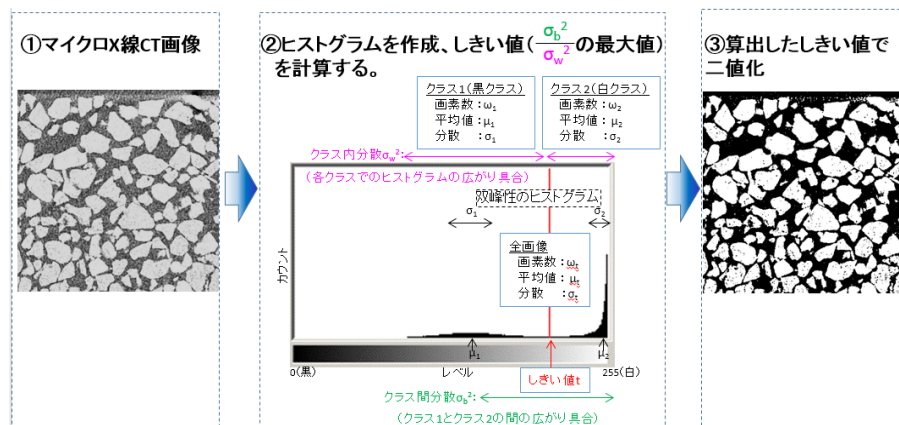
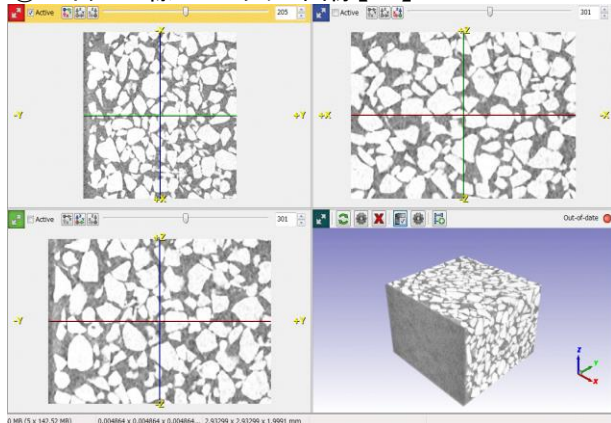
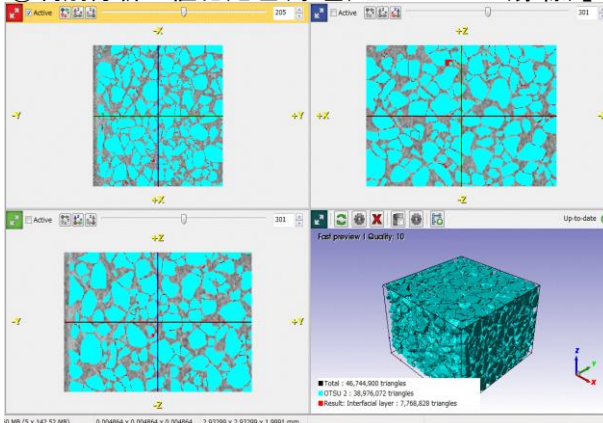


図8 判別分析法による二値化の模式図

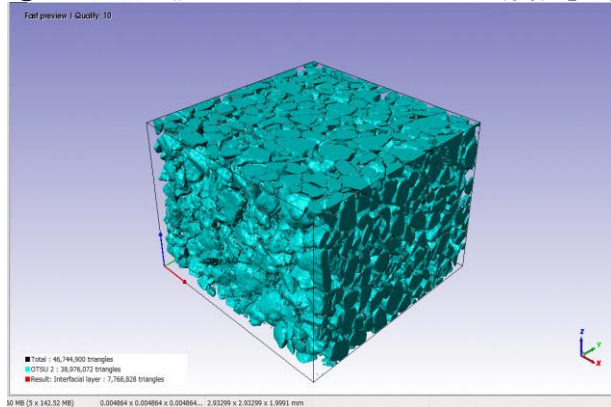
①マイクロX線CTスキャン画像【2D】



②判別分析二値化処理(水色)とWatershed(赤線)【2D】



③判別分析二値化処理(水色)とWatershed(赤線)【3D】



④Watershed(赤線)【3D】

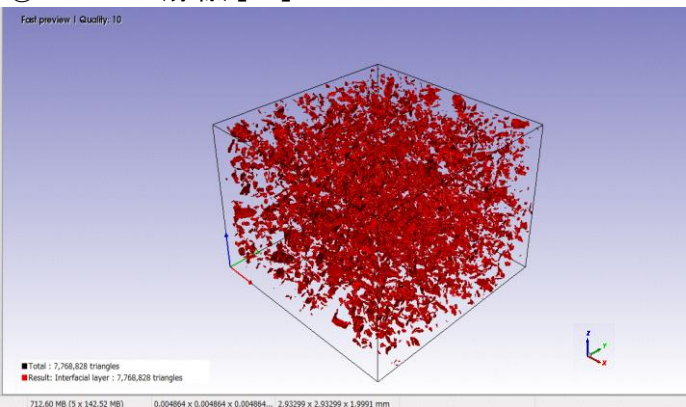


図9 粒子接点体積算出の模式図

3D 画像 3.241mm×3.241mm, 幅 2mm)としている。図 9④では 3D 画像の粒子接点体積を表示している。3D 画像はボクセル(voxel: 正規格子単位で体積 (volume)とピクセル(pixel)を組み合わせた用語)からなり、接点のボクセル数から粒子接点体積をカウントして求める。

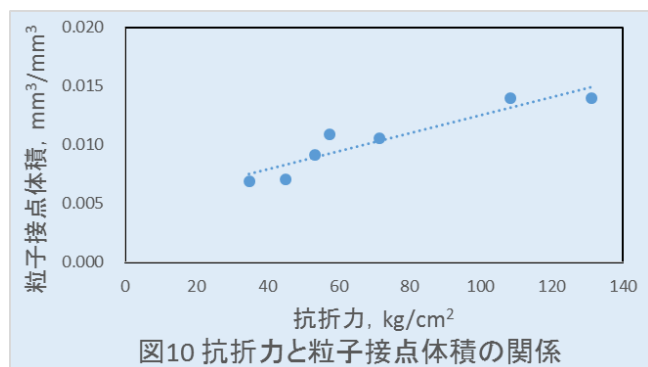


図 10 に抗折力と粒子接点体積の関係を示す。抗折力と粒子接点体積は一次曲線で表され、高い相関が認められる。マイクロ X 線 CT スキャン画像とその Watershed 法によって算出した粒子接点体積は、粒子間で結合に寄与しているレジンの量や接着面積を示していると考えられる。従って、当然、砂粒結合箇所のレジンの多い方抗折力が高くなると言え、図 10 の結果と整合性がある。粒子接点体積は 1.0vol% 前後であり、RCS のレジンは溶融して接点に集まることからおおむね妥当な値と思われる。

表4 抗折力、粒子接点体積と珪砂特性との相関

	抗折力	粒子接点体積
抗折力	---	0.936 **
粒子接点体積	0.936 **	---
アスペクト比	0.726	0.778
平均短径	0.066	-0.238
平均長径	-0.281	-0.576
真円度(内接円法)	0.772 *	0.794 *
凹凸の度合い	-0.861 *	-0.859 *
丸さの度合い	-0.790 *	-0.834 *
円らしさ	0.808 *	0.808 *
長方形の度合い	-0.584	-0.325
嵩比重	0.784 *	0.678
安息角	-0.640	-0.480
流下時間	-0.450	-0.608
AFS F.N	0.479	0.694
JIS F.N	0.486	0.705

** : 1%以下の危険率で有意

* : 5%以下の危険率で有意

表 4 に抗折力、粒子接点体積と珪砂特性の関係を示す。粒子接点体積と抗折力が高い相関が認められるが、粒子間接点の測定は長時間を要することから、製造現場で用

いるには不向きである。そこで、最近は製造ライン中において画像センサーで読み取ることの可能な 2D の粒子特徴量と抗折力、粒子接点体積の関係を求めた。その結果、一般によく測定されるアスペクト比よりも、凹凸の度合いが比較的相関が高い結果であった。従って、現場管理に適用できる特性と言える。

表 5 に凹凸の度合いなどの粒子の特徴量の概念説明を参考用として示す。

表5 粒子の特徴量の概念説明

アスペクト比	$\frac{(\text{長径})}{(\text{短径})}$	
真円度 (最大内接円 中心法)	$\frac{(\text{面積})}{(\text{最大内接円面積})}$	
凹凸の度合い	$\frac{(\text{周囲長})^2}{4\pi(\text{面積})}$	
丸さの度合い	$\frac{\pi(\text{長径})^2}{4(\text{面積})}$	
円らしさ	$\frac{\pi(\text{長径}+\text{短径})}{2(\text{周囲長})}$	
長方形の 度合い	$\frac{(\text{長径})(\text{短径})}{(\text{面積})}$	

4. 結言

(1)非破壊試験であるマイクロ X 線 CT スキャンで、鋳型をスキャンして画像を得た。この画像を二値化処理することで空隙率とした。この空隙率は鋳型密度(試験片密度)と高い相関があり、鋳型強度(抗折力)とも相関が認められた。特に荷重圧着子と接するエリアの空隙率と抗折力に相関が認められた。

(2)マイクロ X 線 CT スキャン画像を 3D 画像とし、ノイズを除去した後に二値化し、Watershed 分割法を原理とした ScanIP (株JSOL)を用いて粒子接点体積(バインダーの接点での体積)を計算した。この粒子接点体積は抗折力と高い相関を示すことを明らかにした。

(3)なお、粒子接点体積は、測定の容易な実体顕微鏡画像から得られる凹凸の度合いと相関が高い。

(4)鋳型強度の要因は多岐に渡るが、今回は主要因と考えられる粒子接点体積の影響を検討した。今後は他の要因についても検討して行く必要がある。

文献

- 1) 鹿島次郎: 鋳物 55(1983)572
- 2) 鹿島次郎: 鋳物 56(1984)770
- 3) 長井壮一, 枝根和也, 天久裕樹, 上林仁司, 黒川豊: 鋳造工学講演概要集 163(2013)11