

# 博 士 学 位 論 文

積層造形砂型を活用した鑄造技術のための  
積層段差の形状解析と強度評価

2024 年 3 月

金 森 陽 一



# 目次

第 1 章 緒論 .....	1
1.1 本研究の概要 .....	1
1.2 本研究の背景 .....	2
1.2.1 鑄造の概要 .....	2
1.2.2 砂型 .....	3
1.2.3 模型 .....	4
1.3 積層造形砂型を活用した鑄造技術 .....	5
1.3.1 積層造形(付加製造) .....	5
1.3.2 積層造形による砂型の直接造形 .....	6
1.3.3 積層造形砂型を活用した鑄造技術 .....	7
1.4 積層造形砂型を活用した鑄造技術の特長 .....	8
1.4.1 多品種少量生産への対応 .....	8
1.4.2 複雑形状への対応 .....	8
1.4.3 試作開発期間の短縮 .....	9
1.4.4 熟練技術の伝承 .....	10
1.5 積層造形砂型を活用した鑄造技術の問題点 .....	11
1.5.1 積層段差 .....	11
1.5.2 砂型の強度 .....	13
1.5.3 人工砂の混入 .....	14
(1) けい砂と人工砂 .....	14
(2) けい砂生型ラインにおける人工砂混入問題 .....	14
(3) 積層造形砂型の活用によるけい砂生型ラインへの人工砂混入問題	16
(4) 積層造形砂型の活用によるけい砂生型ラインへの人工砂混入問題 の解決方法 .....	16
1.6 本研究の目的および構成 .....	16
参考文献 .....	21

第 2 章 積層造形砂型の積層段差エッジ部の形状と表面粗さ	27
2.1 緒言	27
2.2 実験方法	28
2.2.1 砂型試験片の作製	28
2.2.2 積層造形砂型の積層段差エッジ部の形状の評価	30
2.2.3 積層造形砂型の表面粗さの画像計測	31
2.3 実験結果および考察	32
2.3.1 積層造形砂型の積層段差エッジ部の形状	32
2.3.2 積層造形砂型の表面粗さ	42
2.4 最小二乗法の計測値との比較による，ソフトウェア法により計測 された微視的斜面の角度の精度の検証	46
2.4.1 概要と目的	46
2.4.2 実験方法	47
(1) 供試画像	47
(2) 微視的斜面の角度 $\varphi_{\text{sand}}$ の計測方法	47
2.4.3 $\varphi_{\text{sand,soft}}$ と $\varphi_{\text{sand,LSM}}$ の整合性の検証	49
(1) 「一対の標本による母平均の差の検定」を用いた同一試料に対する $\varphi_{\text{sand,soft}}$ と $\varphi_{\text{sand,LSM}}$ の計測値間の整合性に関する検定	49
(2) 「等分散性の検定」と「等分散性を仮定した 2 標本の母平均の差の 検定」を用いた $\varphi_{\text{sand,soft}}$ と $\varphi_{\text{sand,LSM}}$ の標本間の整合性に関する検定	51
(a) 母分散の比の検定(F 検定)	51
(b) 母平均の差の検定(t 検定)	53
2.5 結言	53
参考文献	55

第 3 章 鋳鉄鋳造品に転写された積層段差エッジ部の形状と 表面粗さ	57
3.1 緒言	57
3.2 実験方法	57

3.2.1 鑄造試験片の作製 .....	57
3.2.2 鑄造試験片の評価 .....	60
3.3 実験結果および考察 .....	61
3.3.1 鑄造品の積層段差エッジ部の形状 .....	61
3.3.2 鑄造品の表面粗さ .....	69
3.3.3 積層段差への対策 .....	74
3.4 結言 .....	75
参考文献 .....	76

第4章 影線間距離計測法を用いた積層造形砂型の積層厚さの 推定 .....	77
4.1 緒言 .....	77
4.2 実験方法 .....	77
4.2.1 砂型試験片の作製 .....	77
4.2.2 影線間距離計測法 .....	78
4.3 実験結果および考察 .....	79
4.3.1 巨視的斜面への光の照射による積層造形砂型の積層段差の 視認性 .....	79
4.3.2 影線間距離計測による積層造形砂型の積層厚さの推定 .....	81
4.4 結言 .....	83
参考文献 .....	84

第5章 積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす充填率とバインダ含有率 の影響 .....	85
5.1 緒言 .....	85
5.2 実験方法 .....	86
5.2.1 砂型試験片の作製 .....	86
5.2.2 砂型試験片の評価 .....	87
5.3 実験結果および考察 .....	87

5.3.1	砂型試験片の曲げ強度と充填率, バインダ含有率の関係	87
5.3.2	乗法モデルによる回帰分析	91
5.4	結言	92
	参考文献	94
第6章	SEM-EDS による再生砂中の人工砂混入率の計測	95
6.1	緒言	95
6.2	EDS 計測法	97
6.2.1	EDS 計測法の概要	97
6.2.2	ステージ1: 人工砂混入率(個数%)の計測	97
6.2.3	人工砂混入率(個数%)の目標計測精度を満たす砂粒の計測個数	97
6.2.4	EDS 計測法ステージ1の現場での適用方法(スクリーニングと本計測)	100
6.2.5	ステージ2: 人工砂混入率 mass%の推定	103
	(1) 球の切断断面積から正射影面積への変換	103
	(2) 砂粒の球および立方体近似による誤差要因	105
6.3	実験方法	107
6.3.1	再生砂を模擬した混合砂	107
6.3.2	EDS 計測法ステージ1における砂粒の計測個数と人工砂混入率の計測精度の関係の検証	109
6.3.3	再生砂を模擬した混合砂の人工砂混入率の計測	110
	(1) EDS 計測法ステージ1	110
	(2) EDS 計測法ステージ2	110
6.4	実験結果および考察	110
6.4.1	EDS 計測法ステージ1における砂粒の計測個数と人工砂混入率の計測精度の関係の検証	110
6.4.2	再生砂を模擬した混合砂の人工砂混入率の計測	114
	(1) EDS 計測法ステージ1	114
	(2) EDS 計測法ステージ2	115

6.5 結言 .....	118
参考文献 .....	120
第7章 結論 .....	123
本論文に関連する研究発表 .....	129
謝辞 .....	131





# 第1章 緒論

## 1.1 本研究の概要

本研究は、積層造形砂型を活用した鑄造技術に関する研究である。Fig. 1-1 に積層造形を活用した鑄造技術の概略図を示す。従来の鑄造技術では、まず、模型を製作する。模型とは砂型を造形するための型のことである。次に、模型を用いて砂型を造形する。その後、砂型に注湯して製品を製造する。これに対し、本研究の積層造形砂型を活用した鑄造技術では、模型を製作せず、積層造形により電子データから直接砂型を造形する。その後は従来と同様にして、砂型に注湯して製品を製造する。このように本技術では模型が不要であることから、試作開発期間の短縮が可能であるなどの特長を有する。一方で、本技術では3つの問題点、(1) 積層段差、(2)砂型の強度、(3)人工砂の混入への対応が必要である。

本研究では、積層造形砂型を活用した鑄造技術について、これらの問題点を解決し、砂のリサイクル性を考慮しつつ、高品質な砂型および鑄造品を安定して製造できる技術として確立することを目的としている。

まず、積層段差エッジ部の形状を画像計測し、砂型に形成された積層段差の視認可否のメカニズムを解明した。また、積層段差を表面粗さにより定量化し、表

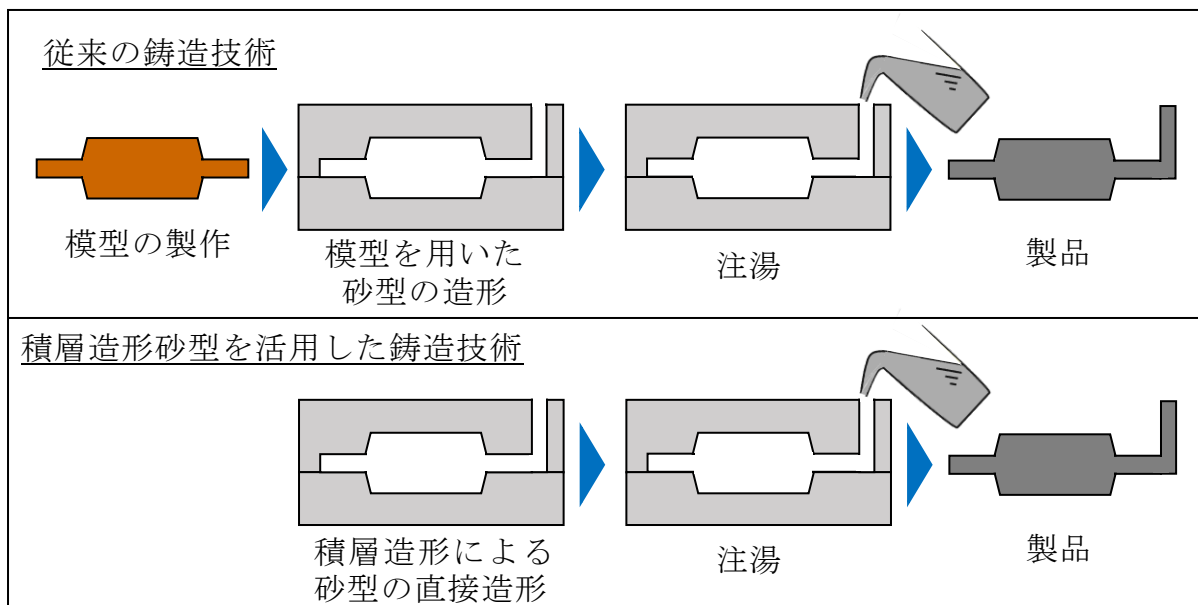


Fig. 1-1 Schematic diagram of casting technology using sand molds made by additive manufacturing.

面粗さと斜面の角度の関係をモデル化した。次に、砂型に形成された積層段差の鑄造品への転写特性を明らかにし、積層段差への対策を提案した。また、影線間距離の画像計測により積層造形砂型の積層厚さを簡易に推定できる方法を検討し、その有効性を評価した。次に、砂型の強度評価として、乗法モデルを適用して回帰分析を行い、充填率およびバインダ含有率から積層造形砂型の曲げ強度を推定できる回帰式を導出した。次に、砂のリサイクルへの対応技術として、再生砂中の人工砂混入率を画像計測する方法を考案し、その計測精度を検証した。

## 1.2 本研究の背景

### 1.2.1 鑄造の概要

鑄造とは、溶けた金属を鑄型に流し込み、凝固させることで形状を付与し製品を得る金属加工法である。令和3年の鑄造品の生産量は素形材産業全体の約6割を占め<sup>1)</sup>、鑄造は素形材産業の主要産業となっている。Table 1-1に令和3年の主要機械工業別鑄造品の需要構造<sup>2)</sup>を示す。銑鉄鑄物の生産量は3,394千トンで、鑄造品全体の約7割を占め、次いでダイカスト925.3千トン、アルミニウム合金鑄物374千トンとなっている。鑄造品全体の機械工業別の需要としては、輸送機械用が全需要の約7割、次いで一般機械用が全需要の約2割を占める。

鑄造品が使われている部位としては、輸送機械用の例を挙げると、自動車のシ

Table 1-1 Demand structure of castings by major industries in 2021<sup>2)</sup>.

(単位：千トン、括弧内は%)

	銑鉄鑄物 (含鑄鉄管)	可鍛 鑄鉄	鑄鋼品	銅合金 鑄物	アルミニウ ム合金鑄物	ダイカ スト	精密鑄 造品	合計
一般機械	870.1 (25.6)	-	79.3 (59.9)	39.9 (67.0)	7.6 (2.0)	31.5 (3.4)	1.7 (36.9)	1,030.1 (20.9)
電気機械	-	-	4.3 (3.3)	-	-	17.6 (1.9)	-	21.9 (0.4)
輸送機械	2156.8 (63.5)	-	31.2 (23.5)	13.6 (22.8)	355.9 (95.1)	829.3 (89.6)	2.7 (56.7)	3,389.5 (68.9)
その他	367.0 (10.8)	-	17.7 (13.4)	6.1 (10.2)	10.6 (2.8)	46.9 (5.1)	0.3 (6.4)	448.6 (9.1)
合計	3,394.0 (69.0)	29.8 (0.6)	132.5 (2.7)	59.6 (1.2)	374.0 (7.6)	925.3 (18.8)	4.7 (0.1)	4,920.0 (100.0)

リンダブロック，マニホールドなどの機関係部品，ブレーキディスクロータ，ブレーキドラムなどの制動系部品，オイルポンプカバーなどの駆動系部品，サスペンションメンバーなどの車体系部品など多岐にわたる<sup>3)</sup>。また，需要の約 2 割を占める一般機械用の例としては，工作機械，パワーシャベルなどの建設機械などがある<sup>3)</sup>。

Fig. 1-1 のとおり，従来の鑄造技術では，まず，模型を製作する．次に，模型を用いて砂型を造形する．その後，砂型に注湯して製品を製造する．なお，従来，砂型の造形における「造形」の用語については，主に「造型」が用いられてきた．しかし，積層造形による造形では「造形」を用いることが多いため，本論文では「造形」を用いる．

### 1.2.2 砂型

鑄型の種類により鑄造を大別すると，金型と砂型に分類される．金型は主に低融点合金を大量生産する際に採用される鑄型であり，高強度で寸法精度や耐摩耗性などに優れ，ダイカストおよびアルミニウム合金鑄物の一部において使用されている．他方，砂型は低コストで形状の自由度が高く，試作から量産，低融点から高融点の金属まで，種々の製品の製造に使用されている．砂型による鑄造品の生産は精密鑄造以外の銑鉄鑄物，可鍛鑄鉄，鑄鋼品，銅合金およびアルミニウム合金鑄物(金型を除く)において広く行われており，その量は鑄造品全体の 7 割以上を占める<sup>2)</sup>。

砂型は種々分類されている<sup>4)・6)</sup>．これらを参考に，主な砂型を分類したものを Fig. 1-2 に示す．砂型は粘結剤の種類により，普通鑄型，すなわち生型と特殊鑄型に分類される．生型はベントナイトなどの粘土を粘結剤とした砂型である．生型は低強度であるものの，安価，再生可能，量産性に優れることから，主に中小型鑄造品の大量生産用砂型として，鑄造品生産の約 6 割以上で使用されている<sup>6)</sup>．他方，特殊鑄型は樹脂や水ガラスのような接着剤を粘結剤とした鑄型で，硬化方式により自硬性，ガス硬化性，熱硬化性に分類され，さらに，各硬化方式には有機系と無機系のものがある．自硬性は粘結剤を化学反応により硬化させる方式である．本研究で取り上げる「積層造形砂型」は 1.3.3 項において定義されるが，

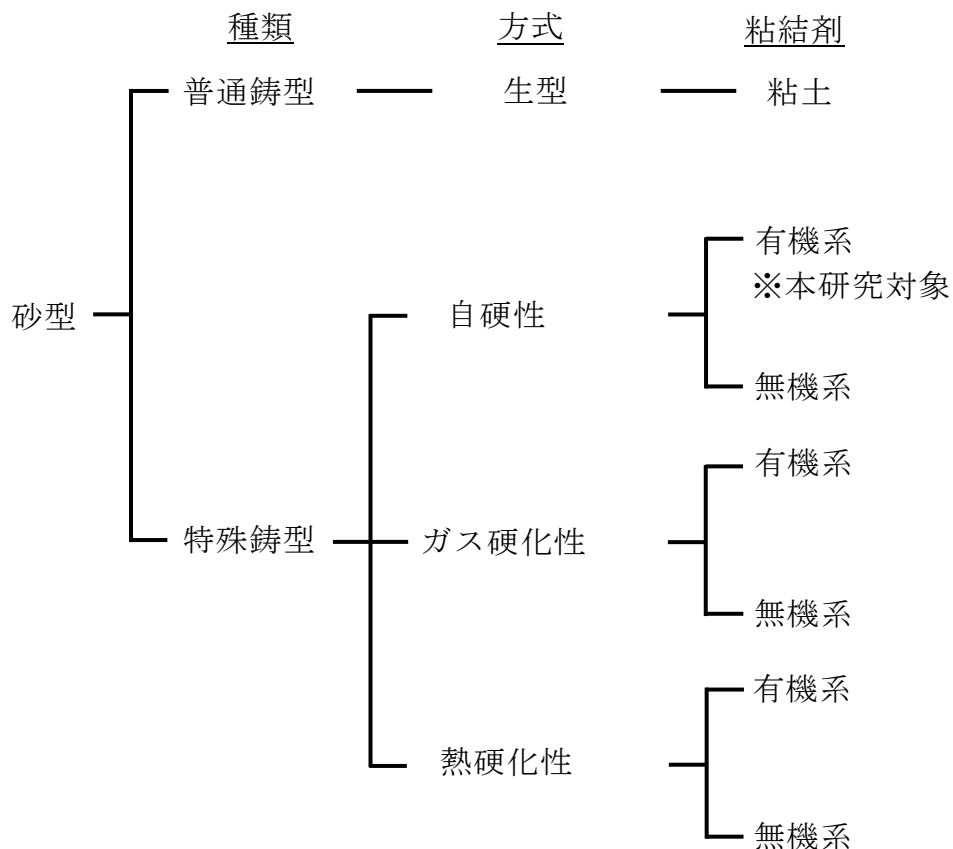


Fig. 1-2 Classification of sand molds.

この分類では自硬性(有機系)のカテゴリーに含まれる。ガス硬化性は粘結剤をガスと反応させて硬化させる方式の砂型で、主に中大型鋳造品用の砂型として使用される<sup>6)</sup>。熱硬化性は熱硬化性の粘結剤を加熱することにより硬化させる方式の砂型である。この方式では金型が必要となることから、主に大量生産用(生型用)の中子として使用される。中子とは鋳造品の中空部を作るための砂型のことである。これに対し、鋳造品の外側を作るための砂型は主型（おもがた）と呼ばれる。Fig. 1-3に砂型における中子と主型の模式図を示す。一方、自硬性やガス硬化性方式においても中子は製造されるが、これらの方式で製造された中子は主に中～少量生産用として使用される。

### 1.2.3 模型

鋳造で使用する模型とは、砂型に製品と同形の空洞を作るための型のことで

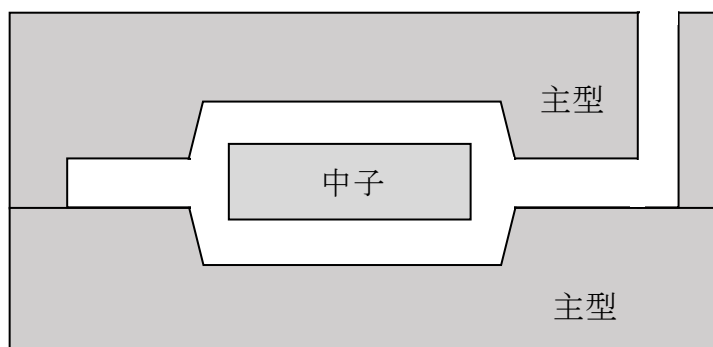


Fig. 1-3 Schematic diagram of master mold and core.

ある．模型は材質により木型，樹脂型，金型に大別され，作製する砂型の数により最適な材質の模型を選択する．木型(金型で部分的に補強)で造形できる砂型の数は 500～1000 型，樹脂型では 3,000～5,000 型，金型(鋳鉄)では 200,000～300,000 型とされ，例えば，月産 1,000 個を 5 年以上生産する場合は金型を選択し，1 年の限定生産では金型製作費の数分の 1 の費用の樹脂型を選択する<sup>7)</sup>．一方，試作開発のように必要な砂型の数が少ない場合，製作費が安価な木型を選択する．

模型に関する課題としては，木型メーカ，技能者の減少により木型の調達が難しくなっていること<sup>8,9)</sup>，模型の保管の問題が挙げられる<sup>10)</sup>．このため，模型を使用せずに砂型を造形する技術が望まれている．

## 1.3 積層造形砂型を活用した鋳造技術

### 1.3.1 積層造形(付加製造)

日本産業規格において，付加製造は 3D モデルデータを基に，材料を結合して造形物を実体化する加工法と定義される<sup>11)</sup>．そのうち，積層造形は造形層を積み重ねることによって，3D の造形物を実体化する加工法と定義される<sup>11)</sup>．したがって，本来，積層造形は付加製造の範疇に含まれるものである．しかし，国内では積層造形は付加製造の意味で広く一般的に用いられている<sup>11)</sup>．

付加製造の名称の歴史を見てみると，光造形から始まり，迅速試作を意味する Rapid Prototyping (RP), 積層造形, 米国の大統領が使った用語である 3D プリンタ，さらには ASTM で規定された Additive Manufacturing (付加製造) と変わってきている<sup>12)</sup>．鋳造分野においては，付加製造の意味で用語「積層造形」が広く用いられていることから，本論文では積層造形を用いる．

積層造形は、1980 年に小玉秀男氏により特許出願された光造形装置に関する発明「立体図形作成装置」<sup>13)</sup>に端を発し、種々のプロセスが開発されてきた。日本産業規格では JIS B 9441 2020 において、**Table 1-2** に示すように積層造形を 7 種類のプロセスに分類している<sup>11)</sup>

Table 1-2 Process categories of additive manufacturing<sup>11)</sup>.

プロセス	定義
結合剤噴射法 (バインダジェット法)	液状の結合剤を選択的に供給して、粉体材料を結合する付加製造プロセス
指向性エネルギー堆積法	集束された熱エネルギーを利用して材料を溶解し、結合し、堆積させる付加製造プロセス
材料押出法	ノズルまたはオリフィスから材料を押し出し、選択的に供給する付加製造プロセス
材料噴射法 (マテリアルジェット法)	造形材料の液滴を選択的に堆積する付加製造プロセス
粉末床熔融結合法 (パウダーベッドフュージョン法)	熱エネルギーを使用して粉末床を選択的に熔融凝固する付加製造プロセス
シート積層法	シート状の材料を積層し、層間を結合して造形物を形成する付加製造プロセス
液槽光重合法	容器内の液体光硬化性樹脂を光重合によって選択的に固化する付加製造プロセス

### 1.3.2 積層造形による砂型の直接造形

積層造形により砂型を直接造形する方法としては、Table 1-2 の粉末床熔融結合法と結合剤噴射法(バインダジェット法)が実用化されている。粉末床熔融結合法は熱エネルギーを使用して粉末床を選択的に熔融凝固する積層造形(付加製造)プロセスである<sup>11)</sup>。このプロセスでは、フェノール樹脂を表面にコートした砂(RCS)をレーザにより加熱固化させて砂型を造形する<sup>14) - 16)</sup>。通常、このプロセスでは、

造形後に強度向上のための二次焼成が必要となるが、二次焼成後の砂型は高精細で、高強度である特長を有する<sup>17)</sup>。なお、このプロセスで造形された砂型は Fig. 1-2 の熱硬化性(有機系)のカテゴリーに含まれる。

他方、バインダジェット法は液状の結合剤を選択的に供給して、粉体材料を結合する積層造形(付加製造)プロセスである<sup>11)</sup>。このプロセスは 1989 年にマサチューセッツ工科大学の Sachs らにより開発され、でん粉に続き、石膏を用いた装置が開発された<sup>18)</sup>。このプロセスでは造形速度が速いことから、液槽光重合<sup>11)</sup>や粉末床熔融結合法<sup>11)</sup>に比べ造形時間を 1/10~1/20 に短縮することが可能である<sup>18)</sup>。このプロセスで鋳型を造形する方式としては、Ca 系無機粉末に水を反応させる方式<sup>19)</sup>、珪酸ナトリウムを混練/コートした砂とエステル水溶液を反応させる方式<sup>20)</sup>、硬化剤を混練/コートした砂とフラン樹脂を反応させる方式<sup>21)</sup>などが開発されてきた。

特に、硬化剤を混練/コートした砂とフラン樹脂を反応させる方式では、造形面の大面積化・装置の大型化が容易であることから効率的な造形が可能<sup>22)</sup>である。また、既存技術で広く使われているフラン樹脂を使用していることから既存技術との親和性が高く、鋳肌がきれい<sup>17)</sup>、二次焼成が不要であるなど、本方式には、さまざまな利点がある。このため、米国の ExOne 社<sup>23)</sup>、独国の Voxeljet 社<sup>24)</sup>などにおいて、本方式を用いた装置が開発、販売されてきた<sup>23-27)</sup>。日本では 2013 年 7 月に、次世代の鋳造用鋳型を造形するための積層造形装置等の開発を目指して、国家プロジェクト「超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト」が開始された<sup>28)</sup>。2017 年末には、本事業の最終目標である 10 万 cm<sup>3</sup>/h の造形速度を有する高速砂型積層造形装置が開発され<sup>28,29)</sup>、市場投入されている<sup>30)</sup>。

なお、本論文では、砂型を造形するバインダジェット式積層造形装置の用語には「積層造形装置」を用いている。同義として参考文献で用いられている用語「砂型積層造形装置」については、参考文献のとおり用いる。

### 1.3.3 積層造形砂型を活用した鋳造技術

本研究では、前項のとおり、多くの利点を有する硬化剤を混練/コートした砂とフラン樹脂を反応させる方式のバインダジェット法を取り上げ、この方式のバイ

ンダジェット法により造形(作製)された砂型を「積層造形砂型」と定義する。Fig. 1-1 のとおり，本研究対象の積層造形砂型を活用して鑄造品を製造する技術では，模型を使用せず，積層造形により電子データから直接砂型を造形する。このため，従来の鑄造に比して多くのメリットが得られる。次に，積層造形砂型を活用した鑄造技術の特長について整理する。

## 1.4 積層造形砂型を活用した鑄造技術の特長

### 1.4.1 多品種少量生産への対応

1.2.1 項のとおり，鑄造品の機械工業別の需要については，自動車を中心とした輸送機械用が約 7 割，一般機械用が約 2 割となっている。輸送機械用鑄造品の生産は，大量生産により行われている<sup>31)</sup>。しかし，近年，鑄造部材の試作に対するニーズの高まり<sup>32,33)</sup>や，小ロットへの対応が求められている<sup>34)</sup>。他方，一般機械用鑄造品の生産は多品種少量生産であるため，生産品目が変わるたびに，数量，形状などに対応した鑄物づくりが求められている<sup>31, 34, 35)</sup>。

積層造形砂型は模型を使用せず電子データから直接造形されることから，多品種少量生産に対し非常に有効である。例えば，試作，補修部品のような必要な砂型数が極端に少ない生産においては，模型製作の費用と時間が問題となる。しかし，積層造形砂型では，このような生産において，その特長がよく発揮される。また，積層造形砂型では模型が不要であることから，近年，鑄造メーカーの課題となっている型保管の解決にも繋がる<sup>10)</sup>。

### 1.4.2 複雑形状への対応

輸送機械用鑄造品において，例えば，自動車産業では車体の軽量化を目的として，鑄造技術改善による薄肉化，構造見直しによる部品の一体化など<sup>36)</sup>が進められている。また，航空機産業では，航空機エンジン関連部品の高品質化のみならず，極限まで軽量化・高効率化が求められている<sup>37)</sup>。これらの要求にマッチした鑄造品を製造するためには，砂型の寸法精度向上，高強度化などによる複雑形状への対応が必要不可欠となっている。

中子による複雑形状への対応を例にとると，既存の砂型造形では，多数の中子



を接着して一体化し、主型と組み合わせることで複雑形状の砂型を実現しているため、中子の一体化に伴う精度低下を防ぐことができなかった<sup>22)</sup>。それに対して、積層造形砂型では、中子の一体構造、さらには主型と中子の一体構造が可能であるため、砂型の寸法精度が向上する<sup>22,38)</sup>。自動車、航空機などのエンジン部品には、本体の複雑構造に加え、各種配管が張り巡らされている。積層造形砂型では、これらの配管についても一体化が可能であり、これまでは嵌め合せしていた部材を一体化した鋳造品の実現も期待される<sup>22)</sup>。また、積層造形砂型では模型を使用しないことから模型反転が不要となるばかりか、抜型による寸法精度の低下も生じず<sup>39)</sup>、既存技術に比して寸法精度が向上する。

積層造形砂型については、形状の複雑さの定量化が検討されてきた。B. P. Connerらは製造コストと製品の複雑さの関係について、従来法と積層造形砂型で比較した概念図を報告している<sup>40)</sup>。この概念図によれば、従来法では形状が複雑になると、製造コストが急激に上昇する。他方、積層造形砂型では製造コストは複雑さによらず一定であるとしている。概念図において、複雑さがある値を超えるとコストが無限大になっている。これはいくらコストをかけても、そもそも製造することが不可能な形状であることを意図したものと推測される。また、E. S. Almagharizらは、積層造形砂型について、複雑度の低い形状では鋳造品の個数が45個程度、複雑度の高い形状では鋳造品の個数が1000個でも非常に高い費用対効果が得られると報告している<sup>41)</sup>。

### 1.4.3 試作開発期間の短縮

多様化する市場ニーズに対応するとともに、迅速に商品開発を行うためには、開発の高速化による大幅な開発期間の短縮が求められている。輸送機械の自動車産業においても、試作開発期間の短縮が必須となっており<sup>42-44)</sup>、1年以内に開発された車種も見られるようになっている<sup>44)</sup>。

これに対し、積層造形砂型では模型を使用しないことから、模型を作製する時間が削減できる。さらに、積層造形砂型は電子データから直接造形されることから、設計変更が容易であり、試作開発に限らず期間短縮の効果が大きい<sup>45,46)</sup>。例えば、ある木型メーカーは鋳造メーカーと共同で砂型積層造形装置を購入し、鋳造品

の試作ビジネスに取り組んだ結果、リードタイムが半減したと報告している<sup>47)</sup>。また、鋳造品試作メーカーは、木型工法から 3D 方案設計・解析と積層造形砂型を組み合わせた工法に変更した結果、60～90%の工期短縮が図れたと報告している<sup>33)</sup>。さらに建設機械メーカーは、1 年に 12 個以内の小ロット生産について発泡模型の製作を取り止め、積層造形砂型を活用した鋳造技術による生産に切り替えることで短納期生産を実現したと報告している<sup>48)</sup>。

このように、積層造形砂型を活用した鋳造技術では、試作開発期間の短縮、前項の複雑形状への対応における中子および砂型の一体化などによる工程の削減、さらには省エネなどのメリットがある。これらのメリットはカーボンニュートラルに貢献することから、積層造形砂型を活用した鋳造技術は SDGs の目標 9 の「産業と技術革新の基盤をつくろう」に該当する技術である。この事例として、環境負荷低減と脱炭素を目指した鋳造技術に関する技術講習会において、大型ポンプメーカーが積層造形砂型を活用することによる省力化を報告している<sup>49)</sup>。

#### 1.4.4 熟練技術の伝承

鋳造は、複数の工程で構成される加工プロセスである。また、熟練技術者の勘・コツ・経験のような無意識のうちに認識、判断している暗黙知が多い。このため鋳造では、技術の伝承が難しく、技術習得に時間と労力がかかる<sup>50)</sup>。砂型の工程においても、砂の管理項目は多岐にわたり、さらに、これらの管理項目が複雑に関係している。このため、多くの鋳造工場では、熟練技術者の勘・コツ・経験に基づいた判断により操業されているのが実情である<sup>51)</sup>。鋳造技術を伝承するためには、熟練技術者の勘・コツ・経験を次世代に引き継ぐことが必要不可欠である。これを解決する手段として、暗黙知を形式知化することが望まれている<sup>52), 53)</sup>。

これに対し、積層造形砂型は電子データを用いて造形されることから、造形条件の数値化が容易である。そのため例えば、積層造形砂型を活用した鋳造技術を導入した企業では、匠の技や熟練の技術を数値に置き換えて伝承することが可能になったと報告している<sup>33)</sup>。

ここで、鋳造シミュレーションについて述べる。鋳造シミュレーションは湯流れ、凝固現象を可視化できる。近年、これを活用し、砂型の設計段階でのバーチ

ャルな鑄造方案の検討が積極的に行われている<sup>54)</sup>。さらに、鑄造シミュレーションの解析精度の向上を目的としたデータの収集およびデータベースの構築<sup>55, 56)</sup>、エキスパートシステムの援用<sup>56)</sup>も進展している。したがって、積層造形砂型の設計に際して、データベース、エキスパートシステムを含めた鑄造シミュレーションを適用することにより、砂型の設計から造形までの形式知化が期待される。このような積層造形砂型を活用した鑄造における技術の伝承事例として、これまで1名の担当者の経験により行ってきた砂型(鑄造方案)の設計を、3Dデータを活用したチームミーティングによる設計に置き換えたことが報告されている<sup>48)</sup>。

以上のとおり、積層造形砂型を活用した鑄造技術は、4つの特長を有する。しかしながら、積層造形砂型を鑄造技術に活用することによる問題も生じており、解決策を講じる必要がある。次節ではその問題点について整理する。

## 1.5 積層造形砂型を活用した鑄造技術の問題点

### 1.5.1 積層段差

積層造形では、その原理上、造形物の表面、特に設計上の造形物の外形であり、複数の層によって構成される巨視的な斜面(以下、「巨視的斜面」と記す)において、積層される各層の端部に段差(以下、「積層段差」と記す)が形成される<sup>57-59)</sup>。積層段差を平滑にする方法としては、手作業でのやすりがけによる仕上げ<sup>60)</sup>に加え、研磨、研削加工などによる方法<sup>61, 62)</sup>、表面をコーティングする方法<sup>63, 64)</sup>、レーザーによる方法<sup>65)</sup>などが検討されてきた。しかし、これらの方法は、いずれも造形後に行われる後処理であり、積層段差の形成は積層造形における課題の1つとなっている<sup>58, 66)</sup>。

**Fig. 1-4** に、積層造形砂型を造形する工程の概略図を示す。**Fig. 1-4** の a) は砂のリコート工程、b) は印刷工程である。積層造形砂型の造形では、まず、a) 砂のリコート工程において、リコータにより造形ステージに1層分の砂を薄く敷き詰める。引き続き、b) 印刷工程において、必要な箇所にプリントヘッドからバイндаを噴射し、造形物を固化させる。さらに、造形ステージが砂1層分下降した後、a) 砂のリコート工程と b) 印刷工程とが繰り返し行われ、積層造形砂型が造形される。このため、**Fig. 1-4** の a), b) の造形物の右側の巨視的斜面に見られるように、積層段

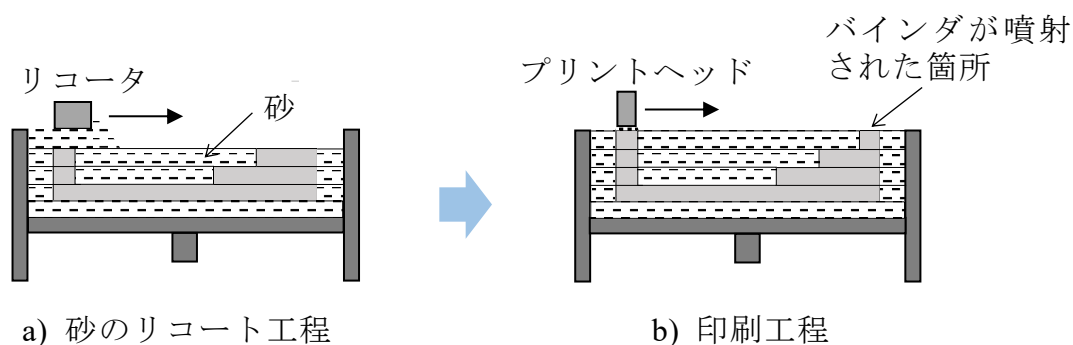


Fig. 1-4 Schematic illustration of the printing procedure for sand mold made by additive manufacturing.

差が形成される．さらに，積層造形砂型を活用した鋳造では，積層造形砂型に形成された積層段差は鋳造品にも転写される．**Fig. 1-5** に積層段差の形成例として，積層造形砂型に注湯して作製された鋳鉄鋳造品の外観写真を示す．Fig. 1-5 のとおり，鋳造品にも砂型から転写された積層段差が視認される．このように，鋳造品に転写された積層段差は製品品質を劣化させる．排ガスなどの流路への積層段差の形成は，その一例である．このため，積層段差形成の抑制，後処理による除去などが必要となる．このように積層段差は，積層造形砂型による鋳造特有の重要な課題である．

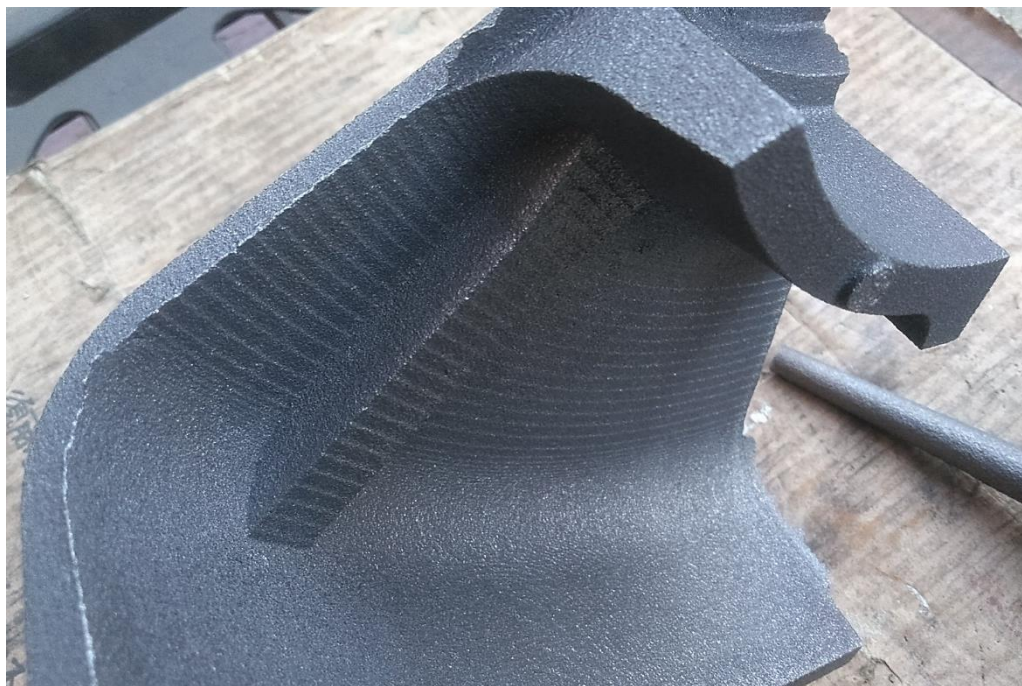


Fig. 1-5 Stair-steps formed on the surface of iron casting.

A. Triantaphyllou らは積層段差に影響を与える主な要因として、積層厚さ、局所的な表面勾配、材料などを挙げている<sup>67)</sup>。積層造形砂型の積層厚さは他の積層造形に比べて厚いため、積層造形砂型の積層段差は視認されやすいと考えられる。その一方で積層造形砂型では、使用される砂のサイズが大きく粒状であるため、特に段差のエッジ部において砂の欠損が生じやすく、積層段差を視認されにくくする面もある。このような相反する特徴を有する積層造形砂型では、条件によって積層段差が視認されないこともある。このため、積層造形砂型を活用した casting 技術により高品質な casting 品を製造するためには、積層造形砂型における積層段差の視認条件、casting 品への転写特性などを明らかにし、積層段差への対策を講じる必要がある。

### 1.5.2 砂型の強度

砂型の強度は、溶湯圧に耐えられるかどうかを決定付ける砂型(主型および中子)の重要な指標である<sup>68)</sup>。前述のとおり、積層造形砂型では複雑形状への対応が必須である。その複雑形状に適用する上では、主型以上に中子の強度が重要となる。その強度については、一般に、主型は圧縮強度で、中子は曲げ強度で評価される。そこで、本論文では、中子としての使用を前提として、曲げ強度について検討する。

砂型の曲げ強度に及ぼす要因として、砂とバインダの両面から検討されてきた。砂型の曲げ強度に及ぼす砂の影響としては、かさ密度(充填率)が高くなるとともに曲げ強度が向上すると報告されている<sup>69)</sup>。また、バインダの影響についても、かさ密度と同様に、バインダ含有率が高くなるとともに曲げ強度が向上すると報告されている<sup>70, 71)</sup>。

積層造形砂型は既存の造形法とは異なり、Fig. 1-4 のとおり、a)砂のリコート工程において砂を薄く敷き詰め、b)印刷工程において砂とバインダを攪拌せず、砂の上からバインダを噴射することで造形される。また、造形時に圧力や振動が加えられないことから、既存の造形法に比してかさ密度が低くなる。さらに、積層造形砂型では、造形位置によるかさ密度の不均一性が報告されている<sup>72-74)</sup>。このようにかさ密度(充填率)の曲げ強度への影響を定量的に把握することは実用上重

要である。他方、バインダ含有率については、バインダ含有率の増大に伴って、曲げ強度は向上する反面、ガス欠陥が増加するトレードオフの関係<sup>75)</sup>にある。このため、鑄造品や積層造形砂型の仕様により最適なバインダ含有率を選択する必要がある。以上のように、積層造形砂型を活用した鑄造技術により、砂型および鑄造品を安定して製造するためには、かさ密度(充填率)およびバインダ含有率から積層造形砂型の曲げ強度を推定する方法の開発が望まれている。

### 1.5.3 人工砂の混入

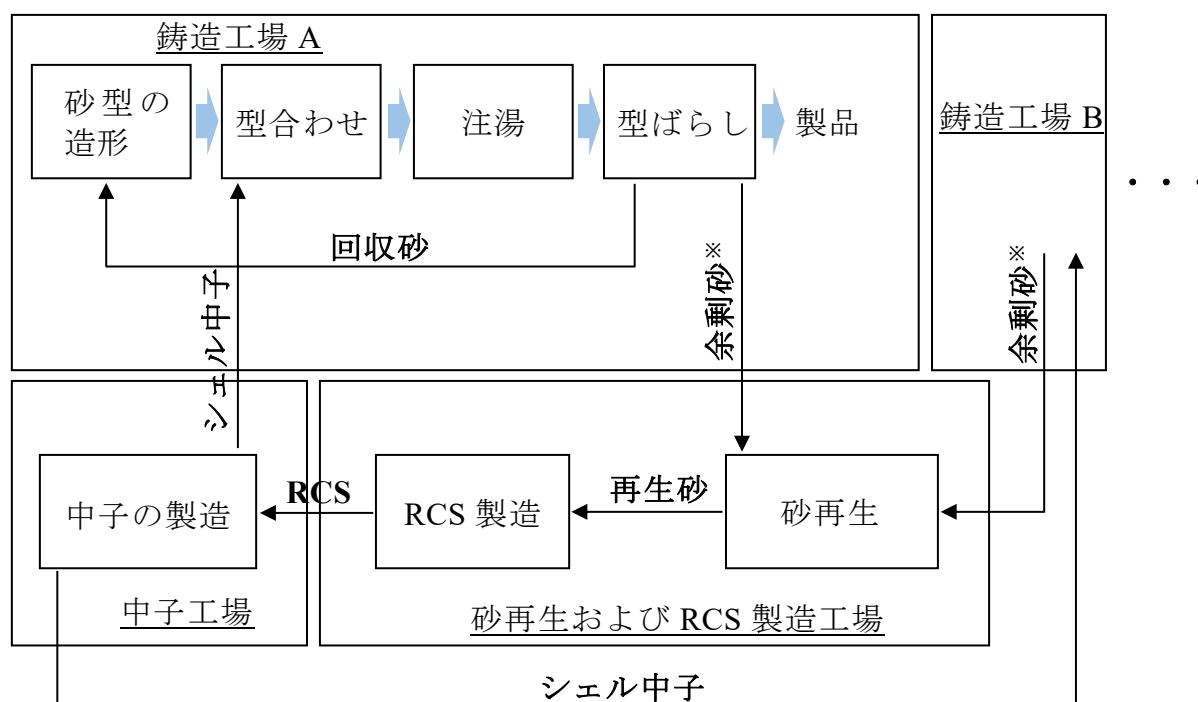
#### (1) けい砂と人工砂

砂型に使用される砂は、けい砂と人工砂に大別される。けい砂は二酸化ケイ素( $\text{SiO}_2$ )を主成分とする砂で、地球の地殻の約 6 割を占める鉱物である<sup>76)</sup>。安価であることから、有史以来広く使用されている<sup>76)</sup>。しかし、東南アジア諸国を中心とした採掘規制、遊離ケイ酸規制の問題から、近い将来使用できなくなる可能性も指摘されている<sup>77)</sup>。他方、人工砂は焼結法、熔融風砕法、火炎内熔融法により人工的に作られた砂で、それに含まれる鉱物成分によりムライト系、ムライト・アルミナ系などに分類される<sup>78)</sup>。人工砂はけい砂に比して高価であるものの、球状で、低熱膨張、耐火度や耐破碎性に優れる。このため、人工砂は産業廃棄物の抑制、粉じん対策に加え、焼付き欠陥、ガス欠陥などの各種欠陥対策を目的として多方面で使用されている<sup>78)</sup>。

#### (2) けい砂生型ラインにおける人工砂混入問題

シェル中子(熱硬化方式の代表的な製造法であるシェルモールド法により製造された中子)は、生型用として広く使用されている中子である<sup>79, 80)</sup>。**Fig. 1-6**に生型ラインにおける鑄物砂の流れを示す。生型ラインで使用されたシェル中子は余剰砂として回収、再生、さらにはシェル中子に加工され、再び生型ラインで使用する<sup>80, 81)</sup>。

一般的に、シェル中子には主にけい砂が使用されている。しかし、シェル中子においても欠陥対策として人工砂の使用が増加している<sup>79, 82)</sup>。欠陥対策で使用された人工砂は再生されたシェル中子等を介して、けい砂生型ラインに混入されて



※ 生型ラインで使用された中子等

Fig. 1-6 Flow of casting sand on green sand mold line.

いる<sup>83,84)</sup>。生型ラインに人工砂が混入すると、オーリックス量の測定に問題が生じやすくなる<sup>84-86)</sup>。オーリックスとは、溶湯によりガラス状になったベントナイト(生型で使用する粘土)等がけい砂を被覆したものである<sup>87)</sup>。オーリックスはポーラスであることから、生型の保水性を向上させて生型の乾燥を防ぐ<sup>87,88)</sup>。さらに注湯時に軟化溶融して、けい砂の熱膨張を緩和し、砂型の表面欠陥の発生を抑制するメリットがある<sup>87)</sup>。一方、オーリックスの耐火度は低いことから、その量が多すぎると焼付き欠陥を生じさせる<sup>87,89)</sup>。したがって、オーリックス量を正確に測定し、適切な値に管理する必要がある。

さらに人工砂の混入量が多くなると、外引け欠陥<sup>78,90)</sup>などの問題を生じる。けい砂生型ラインで使用する生型の形状は、けい砂の熱膨張を考慮して設計されている。けい砂に比して人工砂の熱膨張率は低いため、けい砂生型ラインへの人工砂の混入量が多くなると外引け欠陥の発生など、設計どおり铸造品の製造ができなくなる。

### (3) 積層造形砂型の活用によるけい砂生型ラインへの人工砂混入問題

積層造形砂型については、砂の仕様をけい砂、または人工砂とした 2 種類の装置が販売されている<sup>23-27)</sup>。積層造形砂型においても、理想的には、装置の仕様の砂を再生して繰り返し使用するワンサンド化(単一の種類の砂を用いること)が望ましい。しかし、現状では、流通を含め積層造形砂型の再生システムは構築されていない。さらに例えば、主型を生型、中子を積層造形砂型のように異なる砂型と組み合わせて使用すると、ワンサンドでのリサイクルが難しくなる。このため、現在のところ多くの鑄造工場において、積層造形砂型の廃砂は廃棄あるいは、シェル中子等と一緒に回収、再生されている。このような回収、再生では、前述のとおり、ラインと異なる砂の混入が生じる。特に、人工砂で作られた積層造形砂型の廃砂の回収、再生では、けい砂の生型ラインへの人工砂混入の問題を生じさせる可能性がある。

### (4) 積層造形砂型の活用によるけい砂生型ラインへの人工砂混入問題の解決方法

積層造形砂型を活用した鑄造技術をリサイクル性も考慮した技術にするためには、人工砂混入に対応した技術の開発が必須となる。抜本的な対応としては、けい砂と人工砂を分別する技術がある。その他、再生砂中の人工砂混入率を計測する技術も、受け身ではあるが現実的な方法として重要である。本研究では後者を対象として、再生砂中の人工砂混入率の計測技術を開発する。再生砂中の人工砂混入率が計測できれば、再生砂を管理する上で有効であり、人工砂混入率が高い場合、けい砂を投入するなどの対策も可能となる。

## 1.6 本研究の目的および構成

本研究の目的は、積層造形砂型を活用した鑄造技術について、砂のリサイクル性を考慮しつつ、高品質な砂型および鑄造品を安定して製造できる技術として確立することである。具体的には、1.5.1~1.5.3 項の積層造形砂型を活用した鑄造技術の問題点を解決することである。

本研究は以下の 7 章により構成される。本論文の構成を **Fig. 1-7** に示す。



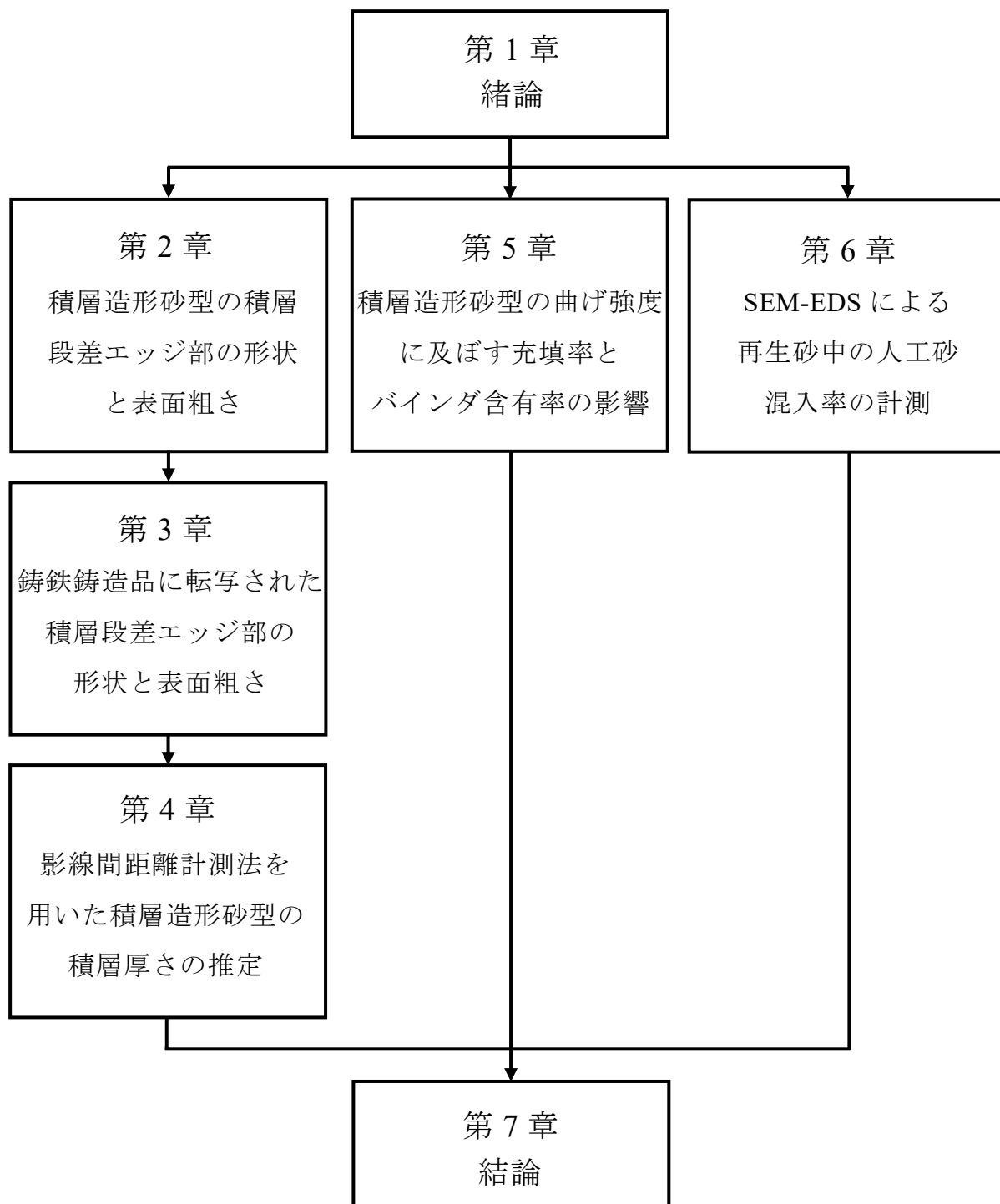


Fig. 1-7 Structure of this thesis.

## 第 1 章 緒論

本章では、模型を用いた砂型鑄造を俯瞰し、積層造形を用いて砂型を直接造形する技術を概観した。さらに、積層造形砂型を活用した鑄造技術の特長および問題点を整理し、本研究の目的を述べた。

## 第 2 章 積層造形砂型の積層段差エッジ部の形状と表面粗さ

本章は積層造形砂型を活用した鑄造技術の問題点、「1.5.1 積層段差」に対応する章である。本章では、積層段差エッジ部の形状を画像計測し、積層段差の視認可否のメカニズムとして、巨視的斜面の角度が大きくなると積層段差が視認されにくくなる現象を考察する。また、積層段差を定量化するため、積層段差側面の画像から巨視的斜面の表面粗さを求める方法を検討し、その方法を用いて、その斜面の角度と表面粗さの関係を調査する。さらには積層段差エッジ部の形状および巨視的斜面の表面粗さに及ぼす造形条件の影響を明らかにする。

## 第 3 章 鑄鉄鑄造品に転写された積層段差エッジ部の形状と表面粗さ

本章も第 2 章と同じく、積層造形砂型における問題点、「1.5.1 積層段差」に対応する章である。第 2 章が砂型に対するものである一方で、本章では、1.2.1 項で述べたとおり、鑄造品の中で最も生産量の多い鋳鉄鑄物、すなわち鑄鉄鑄造品を研究対象として、積層造形砂型を用いて作製した鑄造品への積層段差の転写特性を検討する。具体的には、鑄造品の積層段差側面を画像計測し、積層段差エッジ部の形状および巨視的斜面の表面粗さに及ぼす製造条件の影響を明らかにし、積層段差の対策を提案する。

## 第 4 章 影線間距離計測法を用いた積層造形砂型の積層厚さの推定

本章も第 2 章、第 3 章と同じく、問題点、「1.5.1 積層段差」に対応する章である。第 2 章、第 3 章では、砂型および鑄造品における「単層」の積層段差エッジ部を画像計測し、砂型における積層段差の視認可否のメカニズムの解明、さらには積層段差の鑄造品への転写特性を考察する。それらに対して、本章では砂型における「複数」の層(段差)により構成される影線間の距離を画像計測し、その距離

から積層厚さを推定する方法を検討し、その有効性を評価する。

## 第 5 章 積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす充填率とバインダ含有率の影響

本章は問題点、「1.5.2 砂型の強度」に対応する章である。本章では、バインダに液体、硬化剤に固体を用いる一液式積層造形装置で作製された積層造形砂型に対して、富田らの研究<sup>72,91,92)</sup>の適用可能性を検討する。さらに、乗法モデルを適用し、砂型の曲げ強度と充填率(かさ密度)、バインダ含有率について回帰分析を行い、充填率とバインダ含有率を説明変数として、目的変数の曲げ強度を説明することができる回帰式を導出する。これにより、重要な砂型造形条件である充填率とバインダ含有率との対応で曲げ強度を予測することができ、注湯に際して、中子折れなどの砂型の破損を未然に防ぐ手立てを提供することが可能となる。

## 第 6 章 SEM-EDS による再生砂中の人工砂混入率の計測

本章は問題点、「1.5.3 人工砂の混入」に対応する章である。本章では、SEM (Scanning Electron Microscopy：走査型電子顕微鏡)-EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy：エネルギー分散型 X 線分析)を用いた、再生砂中の人工砂混入率の新たな計測法の確立を目的としている。そのために、画像計測を用いて EDS マッピング像(EDS で検出された元素分布の 2 次元画像)から人工砂混入率を求める際の、砂粒の計測個数と人工砂混入率の計測精度の関係について、統計的な手法を用いて検討する。また、砂粒を球に近似し、EDS マッピング像から切断円直径を求め、研磨深さとの対応で砂粒の正射影直径ひいては砂粒の体積を推定する方法を検討する。さらに、再生砂を模擬した砂として、けい砂と人工砂を組み合わせた種々の混合砂を作製し、これら混合砂の人工砂混入率を個数%および mass%で求め、上記方法の計測精度を検証する。

## 第 7 章 結論

本論文を総括し、各章で得られた知見をまとめる。

本論文での「計測」と「測定」の使い分けについて

本論文では，以下のように「計測」と「測定」の用語を使い分ける．

計測：画像計測を用いて，角度，表面粗さ，距離，個数，面積などを求める場合

測定：画像計測以外，例えば，かさ密度，曲げ強度などを求める場合

## 参考文献

- 1) 一般財団法人素形材センター，“令和 3 年度版素形材年鑑”，(2022) 20
- 2) 一般財団法人素形材センター，“令和 3 年度版素形材年鑑”，(2022) 35-36
- 3) 中小企業庁，“我が国重要産業の国際競争力強化に向けた鑄造技術の高度化の方向性等に係る基礎調査”，(2006) 5
- 4) 佐藤和則，“砂型”，鑄造工学，**86** (2014) 248
- 5) 永井康弘，“特殊鑄型造型”，鑄造工学，**92** (2020) 668
- 6) 太田英明，“鑄型の生産技術 第 2 版”，(2002) 3
- 7) 田口順，“砂型鑄型用主型及び中子取り製作”，鑄造工学，**86** (2014) 241
- 8) 星野和義，大谷利勝，坂井卓爾，金澤光雄，中川一人，“光造形法で製作した模型を用いた石こう鑄造”，鑄造工学，**77** (2005) 18
- 9) 小西英理子，小西信夫，飯村崇，池浩之，“5 軸マシニングセンタを用いた自硬性砂ブロックからの切削加工による砂型の製作”，鑄造工学，**92** (2020) 589
- 10) 齋藤侑里子，“砂型積層造形装置の鑄鉄鑄物への適用に向けた塗型評価法及び鑄型形状の検討”，鑄造工学，**90** (2018) 314
- 11) JIS B 9441 2020 付加製造
- 12) 中川威雄，“3D プリンタと素形材づくり（その 1）”，素形材，**59** (2018) 10, 34
- 13) 小玉秀男，“立体図形作成装置”，特願昭和 55-48210 (1980)
- 14) P.R. Carey, Sr., K.J. Kerns and T. Sorovetz, “European Direct Shell Sand Core and Moldmaking Rapid Prototyping Process”, AFS Trans., **105** (1997) 769
- 15) 前田寿彦，“レーザ焼結型 RP の型・模型への利用”，鑄造工学，**75** (2003) 846
- 16) 篠塚拓，曾根孝明，水谷啓吾，“レーザ式砂型 3D プリンターによるシェル中子試作検討”，日本鑄造工学会第 181 回全国講演大会概要集，**181** (2023) 35
- 17) 岡根利光，“Additive Manufacturing の鑄造技術への応用と砂型用高速積層造形装置の開発”，精密工学会誌，**82** (2016) 629
- 18) 萩原恒夫，“3D プリンタ材料の最新動向と今度の展望”，日本画像学会誌，**54** (2015) 293
- 19) 扇嘉史，小川洋二，谷村充，中崎豪士，内田俊一郎，戸羽篤也，鈴木逸人，“積

- 層型三次元造形法による鋳型作製に最適な高耐熱無機粉末材料の開発”，日本  
鋳造工学会第 168 回全国講演大会概要集， **168** (2016) 140
- 20) 永井康弘，羽鳥祐樹，岡根利光，“無機バインダーコートした球状人工砂の積  
層性と鋳型特性”，鋳造工学， **90** (2018) 286
- 21) Y. Nagai, K. Takeshita and T. Okane, “Additive Manufacturing Technology by Furan  
Sand Mold Using Sintered Artificial Sand Coated with Solid Catalyst”, Mater. Trans.,  
**61** (2020) 734
- 22) 岡根利光，吉田誠，神戸洋史，大場好一，永井康弘，小岩井修二，戸羽篤也，  
兼吉高宏，“3D プリンターの砂型造形への適用による鋳造品と鋳造技術の高度  
化”，鋳造工学， **90** (2018) 266
- 23) <https://www.exone.com/> 2023.5.1
- 24) <https://www.voxeljet.com/> 2023.5.1
- 25) <https://www.cmet.co.jp/> 2023.5.1
- 26) <https://www.fhzi-3dp.com/> 2023.5.1
- 27) <https://www.kocel.com/> 2023.5.1
- 28) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構，“超精密三次元造形シス  
テム”，第 4 回シンポジウム講演集，(2018) 80
- 29) 大場好一，鈴木幸吉，諏訪光範，宮野英昭，加藤陽介，江端幹夫，岡根利光，  
“量産適用を目指した高速砂型積層造形装置の開発”，鋳造工学， **90** (2018) 274
- 30) <https://www.tsurumipump.co.jp/corporate/technology/3D-technology.php> 2023.5.1
- 31) 中小企業庁，“我が国重要産業の国際競争力強化に向けた鋳造技術の高度化の  
方向性等に係る基礎調査”，(2006) 6
- 32) 木村寿利，福田葉椰，大川洋幸，漆畑雄亮，富田祐輔，高木宏哲，“砂型用 3D  
プリンタを用いた鋳鉄鋳鋼品の超短納期製造プロセスの開発”，素形材， **59**  
(2018) 12, 17
- 33) 小岩井修二，“(株) コイワイにおける 3D プリンターの活用”，日本鋳造工学  
会第 169 回全国講演大会技術講習会テキスト，(2017) 7
- 34) 大亀右問，吉田千里，今村信人，松尾吉高，“小ロット鋳鉄鋳物の高品質・高  
効率砂型造形システムの開発と実用化”，鋳造工学， **85** (2013) 504

- 35) 中小企業庁, “我が国重要産業の国際競争力強化に向けた鋳造技術の高度化の方向性等に係る基礎調査”, (2006) 23
- 36) 中小企業庁, “我が国重要産業の国際競争力強化に向けた鋳造技術の高度化の方向性等に係る基礎調査”, (2006) 20
- 37) 砂山昇, 駒井公一, 谷内大世, 藤井要, 舟木克之, 岡根利光, “3D 積層造形砂型の航空機部材への適用”, 鋳造工学, **90** (2018) 322
- 38) 駒井公一, 砂山昇, “砂型差圧鋳造法による高品質中空複雑形状鋳物の開発”, 素形材, **58** (2017) 8, 8
- 39) 今村正人, “模型を使用しない鋳型の直接造形”, 鋳造工学, **75** (2003) 864
- 40) B. P. Conner, G. P. Manogharan, A. N. Martof, L. M. Rodomsky, C. M. Rodomsky, D. C. Jordan and J. W. Limperos, “Making Sense of 3-D Printing: Creating a Map of Additive Manufacturing Products and Services”, Additive Manufacturing, **1-4** (2014) 64
- 41) E. S. Almaghariz, B. P. Conner, L. Lenner, R. Gullapalli, G. P. Manogharan, B. Lamoncha and M. Fang, “Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores”, International Journal of Metalcasting, **10** (2016) 240
- 42) 水野慎也, 岡田裕二, “トヨタ自動車における鋳物, ダイカストのグローバル展開”, 鋳造工学, **80** (2008) 658
- 43) 岩田靖, 岩堀弘昭, 内藤国雄, 大庫和孝, “NC 切削加工による高速鋳型作製技術”, 鋳造工学, **75** (2003) 870
- 44) 吉沢亮, 原雅徳, 伊藤賢児, “鋳造製品の短納期開発・試作システムの実用化”, 鋳造工学, **79** (2007) 391
- 45) M. Upadhyay, T. Sivarupan and M. El Mansori, “3D Printing for Rapid Sand Casting - A Review”, Journal of Manufacturing Processes, **29** (2017) 211
- 46) P. M. Hackney and R. Wooldridge, “Characterisation of Direct 3D Sand Printing Process for the Production of Sand Cast Mould Tools”, Rapid Prototyping Journal, **23** (2017) 7
- 47) 田口順, “鋳造模型専業会社の事業多角化の道程”, 素形材, **59** (2018) 2, 25

- 48) 高橋啓二, “建設機械メーカーにおける 3D プリンターの活用と展望”, 日本鑄造工学会第 169 回全国講演大会技術講習会テキスト, (2017) 101
- 49) 小川学, “鑄造用砂型 3D プリンタを活用した省力化”, 日本鑄造工学会第 181 回全国講演大会技術講習会テキスト, (2023) 47
- 50) 一般社団法人日本鑄造協会, “鑄造産業ビジョン 2017”, (2017) 7
- 51) 中本育彦, 佐藤道太, 朝岡康明, 松岡宏樹, “鑄物づくりに向けた鑄造工場での IoT の取り組み”, 鑄造工学, **93** (2021) 791
- 52) 川合悦蔵, 平田実, 牧野泰育, “自動車産業における砂型鑄物の鑄造設備最新動向”, 鑄造工学, **76** (2004) 1031
- 53) 太田信義, “鑄造産業にみる「ものづくり」熟練技能と IT 活用の諸相”, 名古屋学院大学論集 社会科学編, **54** (2018) 3, 223
- 54) 高橋勇, “鑄造シミュレーション”, 鑄造工学, **92** (2020) 705
- 55) 村上俊彦, 岡正徳, 金井保博, “鑄造 CAE システム「JSCAST」の概要と適用事例”, 日本機械学会計算力学部門ニューズレター, **31** (2003) 8
- 56) 前田安郭, “鑄造シミュレーション技術の現状と今後の課題”, 精密工学会誌, **76** (2010) 395
- 57) 安齋正博, “よくわかる RP (積層造形) の活用法ー積層造形の基礎ー”, 素形材, **52** (2011) 8, 29
- 58) 中川威雄, “積層造形法の応用分野”, レーザー研究, **24** (1996) 443
- 59) K. Woods and S. Ravi, “Design Considerations for Three Dimensional Printed Cores and Molds”, AFS. Trans., **123** (2015) 169
- 60) 朝倉慶子, “後処理で広がる積層造形品の可能性”, 素形材, **54** (2013) 6, 66
- 61) 大庭孝之, 鈴木教和, 社本英二, “除去加工による 3 次元積層造形物の後処理技術に関する基礎的研究”, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2018) 491
- 62) 清水秀計, 金子順一, 堀尾健一郎, “積層痕除去処理を考慮した積層造形工程計画手法の開発”, 第 23 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集, **23** (2016) 75
- 63) 宮嶋圭太, 川原彰広, 渡辺裕和, 本堂剛, 加藤真示, “3D プリンターを用いた



- 精密鑄造用セラミックコアの開発”，先進セラミックス研究センター年報，**10**  
(2021) 31
- 64) 鈴木英和，斉藤昭雄，大井隆治，高瀬彰，“ポリスチレン粉末積層造形 3 次元  
模型の表面平滑化方法及びその模型を用いた精密鑄造方法”，WO2005/121229  
A1(2005)
- 65) 山内友貴，“粉末焼結法による積層造形品へのレーザ表面改質技術の探索”，  
天田財団助成研究成果報告書，**29** (2016) 259
- 66) N.N. Kumbhar and A.V. Mulay, “Post Processing Methods used to Improve Surface  
Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies:  
A Review”, J. Inst. Eng. India Ser. C, **99** (2018) 481
- 67) A. Triantaphyllou, C. L. Giusca, G. D. Macaulay, F. Roerig, M. Hoebel, R. K. Leach,  
B. Tomita and K. A. Milne, “Surface Texture Measurement for Additive  
Manufacturing”, Surf. Topogr. Metrol. Prop., **3** (2015) 24002
- 68) 波多野登，“有機自硬性鑄型”，鑄物，**66** (1994) 517
- 69) 黄子争，黒川豊，“強度低下したシェル鑄型の砂粒子接点樹脂被膜観察”，日本  
鑄造工学会第 180 回全国講演大会概要集，**180** (2022) 85
- 70) 蜂谷一郎，坂本美喜男，松川芳太郎，“ムライト製人工球状粒子の鑄物砂への  
適用”，鑄物，**64** (1992) 562
- 71) 川上学，“鑄型用骨材（掛津けい砂，人工砂）について”，素形材，**60** (2019) 8,  
7
- 72) 富田祐輔，藤井英俊，“積層造形砂型の曲げ強度に及ぼすかさ密度及び接触点  
数の影響”，鑄造工学，**91** (2019) 148
- 73) 柏井茂雄，兼吉高宏，種村光洋，金森陽一，伊藤恭祐，内田富士夫，黒沢憲吾，  
“積層造形鑄型の特性に及ぼす装置要因の調査”，日本鑄造工学会第 176 回全  
国講演大会概要集，**176** (2020) 151
- 74) 森康暢，金森陽一，近藤義大，服部俊，伊藤恭祐，“積層造形砂型の基本特性  
と造形のポイント”，日本鑄造工学会第 180 回全国講演大会技術講習会テキス  
ト，(2022) 83
- 75) 伊藤恭祐，金森陽一，中野真紘，“砂型積層造形を中子へ適用する際の造形条

- 件の検討”，三重県工業研究所研究報告，**45** (2021) 24
- 76) 太田英明，“鑄型の生産技術 第2版”，(2002) 33
- 77) 頃安貞利，“特集「人工砂」によせて”，鑄造工学，**89** (2017) 463
- 78) 黒川豊，“人工砂の特性”，鑄造工学，**89** (2017) 464
- 79) 黒川豊，木内一彦，“中子”，鑄造工学，**89** (2017) 524
- 80) 富永恭爾，“鑄型の生産技術 第2版”，(2002) 245
- 81) 中小企業総合事業団 情報・技術部，“シェルモールド中子造型に係る技術・技能”，(2001) 1-1
- 82) 俵田隆之，“人工砂 RCS 専用リサイクルシステムの確立”，素形材，**52** (2011) 1, 22
- 83) 橋本邦弘，“生型造型技術の課題と動向”，素形材技術セミナー(鑄物砂の現状とこれから)テキスト，(2018) 45
- 84) 枝根和也，天久裕樹，上林仁司，黒川豊，“ノルム法補正 X 線回折シリカプログラムによるオーリチック定量”，鑄造工学，**86** (2014) 136
- 85) 枝根和也，天久裕樹，上林仁司，黒川豊，“X 線回折シリカプログラム法へのノルム計算適用”，日本鑄造工学会第 160 回全国講演大会概要集，**160** (2012) 82
- 86) 上林仁司，枝根和也，天久裕樹，黒川豊，“オーリチック定量に関する新たな知見と管理技術”，日本鑄造工学会第 164 回全国講演大会技術講習会テキスト，(2014) 11
- 87) 黒川豊，“新版 鑄鉄の生産技術”，(2013) 547
- 88) 黒川豊，上林仁司，尾添伸明，太田英明，三宅秀和，“オーリチックの吸水と保水挙動”，鑄造工学，**72** (2000) 328
- 89) 黒川豊，“生型”，鑄造工学，**89** (2017) 424
- 90) 川上学，“人工砂の現状と課題”，素形材技術セミナー(鑄物砂の現状とこれから)テキスト，(2018) 3
- 91) 富田祐輔，藤井英俊，“バインダジェット法積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす積層ピッチおよび樹脂添加量の影響”，鑄造工学，**92** (2020) 225
- 92) 富田祐輔，藤井英俊，“熔融法人工砂を用いたバインダジェット式砂型積層造形における砂の流動性に及ぼす粒径の影響”，鑄造工学，**93** (2021) 115

## 第2章 積層造形砂型の積層段差エッジ部の形状と表面粗さ

### 2.1 緒言

経済産業省により技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合研究機構 (TRAFAM)が設立され、国家プロジェクトとして、バインダジェット式積層造形装置(以下、「積層造形装置」と記す)等の開発が進められた<sup>1-4)</sup>。開発された装置は市場投入され<sup>5)</sup>、積層造形砂型を活用した鑄造技術への期待は高まっている<sup>1)</sup>。

積層造形砂型を用いて高精度な鑄造品を安定して生産するためには、積層造形砂型の特性を把握することが必要不可欠である。これまでに、砂型を一定期間造形した際の寸法誤差の変動挙動<sup>6)</sup>、砂型の曲げ、圧縮などの機械的特性に及ぼす各種造形条件の影響<sup>6-12)</sup>、通気度や発生するガス量<sup>10-14)</sup>などの砂型の基本的な特性が調べられている。併せて、砂型の設計<sup>14-16)</sup>、造形後の後処理<sup>10,17)</sup>なども検討され、これらの研究から得られた知見を基に積層造形砂型に適した生産技術が構築されようとしている。

積層造形では、造形物の表面、特に巨視的斜面(設計上の造形物の外形であり、複数の層によって構成される巨視的な斜面)において、積層段差が形成される<sup>18-20)</sup>。積層段差は多くの場合、手作業などで除去されており、積層段差の形成は積層造形における課題の1つとなっている<sup>21,22)</sup>。砂型の積層段差を調べた研究としては、レーザ式積層造形により作製された砂型の研究<sup>20)</sup>があるものの、積層造形砂型について巨視的斜面の角度と積層段差の関係を調べた研究は見当たらない。そこで著者らは既報<sup>23)</sup>において、積層造形砂型について、巨視的斜面の角度と視認される積層段差の関係を評価した。その結果、低角度の斜面では積層段差が視認され、斜面の角度が大きくなると積層段差は視認されにくくなる現象を明らかにした。しかし、この現象が生じるメカニズムについては明らかになっていない。この現象は積層造形装置全般で同様に生じると考えられ、その解明が期待される。その解明のためには、積層段差そのものを計測し、砂粒スケールでの微小な積層段差形成メカニズムを明らかにする必要がある。また、積層段差に及ぼす造形条件の影響に関する知見は、砂型を設計する上で重要であると考えられる。造形条件の影響を定量的に評価するためには、積層段差を定量化する必要がある。

積層造形砂型に形成される段差としては、Z 軸(高さ)方向の積層厚さに起因する段差(積層段差)のほか、Z 軸方向の XY 解像度に起因する段差、さらには水平面などに生じる XY 軸方向の解像度に起因する段差がある。XY 解像度は多くの装置で 200 あるいは 400dpi であり、1dot あたりの段差はそれぞれ 127, 64 $\mu\text{m}$  である。このように現在では高解像度化が進み、造形物の出来栄は格段に向上している。他方、積層厚さは造形速度に相当することから小さくすることが困難である。通常、1 層あたりの厚さ(段差)は 280 $\mu\text{m}$  程度である。両者を比較すると、Z 軸方向の積層厚さに起因する積層段差は XY 解像度に起因する段差に比して 2~4 倍大きい。このように、積層造形砂型において積層段差は重要な課題となっている。

そこで本研究では、積層造形砂型について積層段差エッジ部の形状を評価し、巨視的斜面の角度が大きくなると積層段差が視認されにくくなる現象の解明を試みた。また、積層段差を定量化するため、積層段差側面の画像から巨視的斜面の表面粗さを求める方法を検討し、その方法を用いて、巨視的斜面の角度と表面粗さの関係、さらに積層段差エッジ部の形状および巨視的斜面の表面粗さに及ぼす造形条件(バインダ含有率、造形配置(以下、「配置」と記す))の影響を調べた。

本研究では、バインダ含有率について、質量百分率 mass%と体積百分率 vol%の両方を取り扱うため、質量百分率を「 $C_{B,m}$ 」、体積百分率を「 $C_{B,v}$ 」で表し、両者を区別する。なお、質量百分率「 $C_{B,m}$ 」については第 2~5 章、体積百分率「 $C_{B,v}$ 」については第 5 章において取り扱う。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 砂型試験片の作製

**Fig. 2-1** に作製した砂型試験片の形状を示す。その形状は巨視的斜面の角度  $\theta$  を 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45°とした「くさび型」であり、上面を 20mm×20mm とし、高さを 20mm とした。第 3 章では、鑄造用砂型(**Fig. 3-2**)を用いて **Fig. 2-1** の砂型試験片と同一形状の鑄造試験片(**Fig. 3-1**)を作製し、積層段差の鑄造品への転写特性を評価する。**Fig. 2-2** に鑄造用砂型の下型側面の模式図を示す。**Fig. 2-2** のように、鑄造試験片の斜面をはさんだ反対側の砂型形状は、鑄造試験片を上下 180°反転させた形状となる。この形状は砂型試験片と同一である。この関係を利用して、第

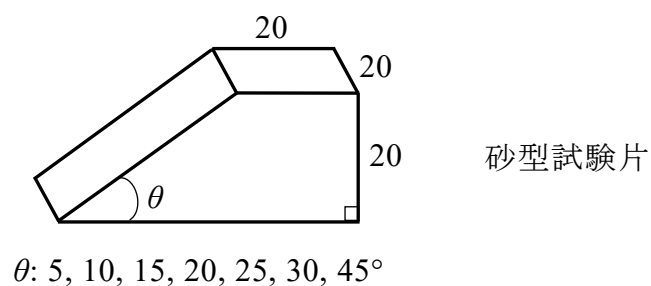


Fig. 2-1 Shape of sand mold specimen (unit: mm).

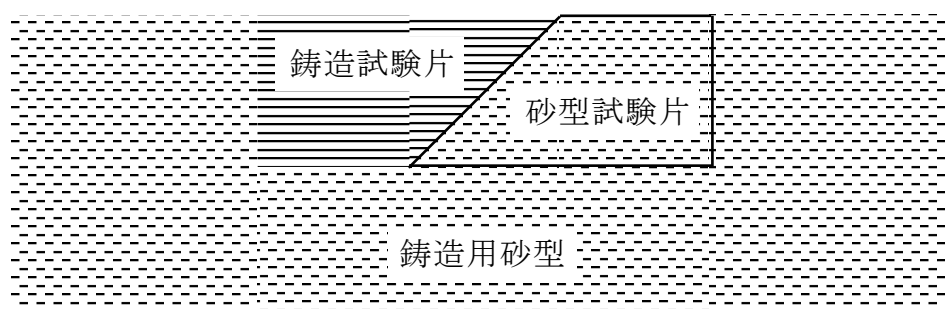


Fig. 2-2 Schematic diagram of casting sand mold showing relationship between sand mold specimen and cast specimen.

2 章では Fig. 2-1 の砂型試験片を作製して砂型の積層段差の評価を行い，第 3 章では铸造試験片(Fig. 3-1)を作製して铸造品への積層段差の転写特性の評価を行った。

砂型試験片の作製には，シーメット株式会社製積層造形装置 SCM-10 を用いた。本装置の XY 解像度は 200dpi である。また，原材料の砂およびバインダには，装置専用の人工砂およびフラン系バインダを用いた。Table 2-1 に使用した人工砂の粒度分布を示す。使用した人工砂は，106 $\mu\text{m}$  の階級にピークのあるシャープな粒度分布を有する砂である。

バインダ含有率  $C_{B,m}$  の影響を調べるため， $C_{B,m}$  は 1.6，2.0，2.5mass% の 3 条件

Table 2-1 Particle size distribution of artificial sand.

										mass%
Opening $\mu\text{m}$	600	425	300	212	150	106	75	53	PAN	AFS GFN
Artificial sand	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	72.1	18.5	1.1	0.0	106

とした．なお，これらの  $C_{B,m}$  は造形後に強熱減量を測定して得た値であり，砂の質量を  $m_s$  とし，バインダの質量を  $m_b$  とすると，式(2-1)で表される．

$$C_{B,m} = m_b / (m_s + m_b) \times 100 \quad (2-1)$$

異なる  $C_{B,m}$  の砂型試験片は同時に造形できないため，本研究では， $C_{B,m}$  毎に 3 回に分けて造形を行った．3 回の造形での温度と湿度の違いは，砂のリコートおよびバインダの硬化反応に差を生じさせ，砂型試験片のばらつきの要因となる可能性がある．そこで，造形室内の温度と湿度をそれぞれ  $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ， $25\%\text{RH} \pm 5\%\text{RH}$  の条件で 3 回の造形を行った．また，重力の向きが造形方向に及ぼす影響を調べるため，砂型試験片の配置は，Fig. 2-1 のままの配置(以下，「おもて配置」と記す)および Fig. 2-1 を上下  $180^{\circ}$  反転させた配置(以下，「うら配置」と記す)の 2 種類とした．なお，造形方向は 2 種類の配置とも下面から上面方向とし，積層厚さはすべての条件で  $0.28\text{mm}$  とした．

バインダの硬化反応を促進させるため，造形後 22 時間程度経過した後に装置から砂型試験片を取り出し，筆のブラッシングにより砂落としを行った．砂落としには，毛の材質が軟質のナイロン製，毛先の形状が平型，毛幅が  $13\text{mm}$  で，毛の長さが  $21\text{mm}$  の筆を用いた．ブラッシングでは，毛先端の押込み量を  $2\text{mm}$  程度とし，無理な力を加えずに，払い落すように未硬化砂を除去した．また，砂落とし後の砂型試験片については，熱処理を行わず積層段差エッジ部の形状および表面粗さを評価した．

### 2.2.2 積層造形砂型の積層段差エッジ部の形状の評価

観察により認められた積層段差エッジ部の形状の模式図を Fig. 2-3 に示す．Fig. 2-3 の a) は設計上の積層段差エッジ部，b) は実際の積層段差エッジ部の模式図であり，これらの図は砂粒を無視した概形を示している．設計上の積層段差エッジ部では，a) のように段差の突端が直角であるのに対し，実際の積層段差エッジ部では，b) のように段差の突端は直角でなく，角度  $\phi$  の微視的な斜面(以下，「微視的斜面」と記す)となっていた．なお，角度  $\theta$  は巨視的斜面の角度である．そこで本研究では，砂型の積層段差エッジ部の形状の代表値として積層段差エッジ部の微視的斜面の角度(以下，記号は「 $\phi_{\text{sand}}$ 」で表す)を画像計測した．

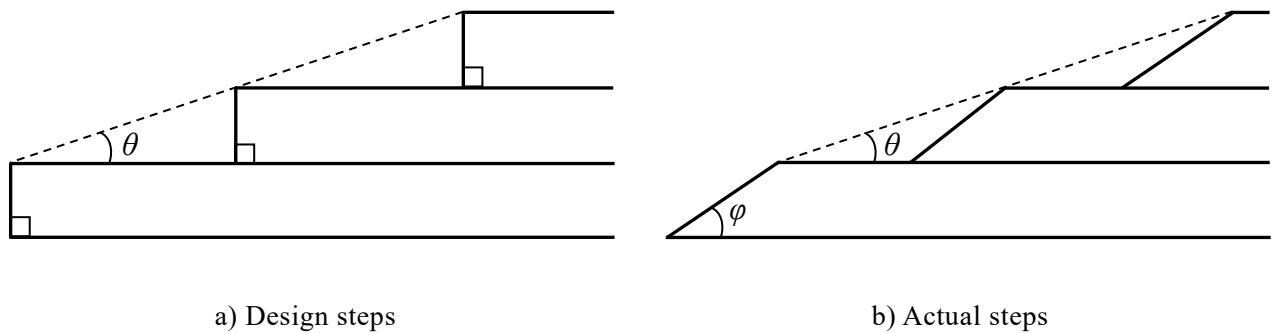


Fig. 2-3 Schematic diagrams of edge shapes of stair-steps.

### 2.2.3 積層造形砂型の表面粗さの画像計測

砂が脱落しやすく接触式計測法が適用できない砂型に対し、表面粗さにより積層段差を定量化するため、非接触計測法の画像計測法を用いて表面粗さを求めた。具体的には、積層造形砂型の巨視的斜面について、積層段差側面の画像から表面粗さの代表値の1つである最大高さ粗さ(以下、「 $Rz_{\text{sand}}$ 」と記し、一般的な最大高さ粗さは「 $Rz$ 」と記し区別する)を計測した。

$Rz_{\text{sand}}$  の計測では、まず、側面が鉛直上向き、かつ巨視的斜面が水平になるように砂型試験片を設置し、カメラを積層段差側面に正対させて画像を取得した。取得した画像の画素数は横 1600×縦 1200pixel とし、画素サイズは  $2.5\mu\text{m}/\text{pixel}$  とした。この条件で取得した画像の大きさは  $4\times 3\text{mm}$  となる。

接触式表面粗さ測定機による  $Rz$  測定では、評価長さ間で水平面と最も高い山間の距離  $Rp$  と最も低い谷間の距離  $Rv$  の和を  $Rz$  としている。Fig. 2-4 に1枚の画像の  $Rz_{\text{sand}}$  計測の概略図を示す。 $Rz_{\text{sand}}$  の計測では、撮像システムの解像度の制約から、各積層段差に対して、山と谷が1組以上入る画像を2枚取得し、その2枚の画像から評価長さ 8mm の  $Rz_{\text{sand}}$  を一点求めた。また比較として、 $\theta$  が  $0^\circ$  の水平面 (Fig. 2-1 の上面) および  $\theta$  が  $90^\circ$  の斜面 (Fig. 2-1 の巨視的斜面と反対側の垂直方向

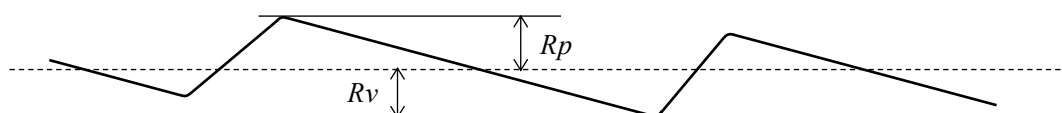


Fig. 2-4 Schematic diagram of maximum height roughness  $Rz_{\text{sand}}$  measurement.

の平面)についても，前述の方法により  $Rz_{\text{sand}}$  を計測した．

## 2.3 実験結果および考察

### 2.3.1 積層造形砂型の積層段差エッジ部の形状

代表的な砂型試験片として，**Fig. 2-5** にバインダ含有率  $C_{B,m}$  を 2.0mass% とし，おもて配置の条件で造形した砂型試験片の巨視的斜面の外観写真を示す．その斜面の角度  $\theta$  が最も小さい a)  $5^\circ$  では，積層段差の間隔は広く，積層段差は明瞭に視認される． $\theta$  が b)  $10^\circ$ ，c)  $15^\circ$  と大きくなるにつれて，積層段差の間隔は狭くなり，積層段差は明瞭ではなくなっていき，f)  $30^\circ$ ，g)  $45^\circ$  では積層段差を視認することは困難である．

**Fig. 2-6** にバインダ含有率  $C_{B,m}$  を 2.0mass% とし，おもて配置で造形した砂型試験片の巨視的斜面の角度  $\theta$  が  $5^\circ$  の積層段差側面の写真を示す．**Fig. 2-3** の b) で述べたとおり，実際の積層段差エッジ部では端面は直角ではなく，角度  $\varphi_{\text{sand}}$  の微視的斜面が形成されていた．なお，この写真の  $\varphi_{\text{sand}}$  は a)  $55^\circ$ ，b)  $34^\circ$ ，c)  $23^\circ$  である．

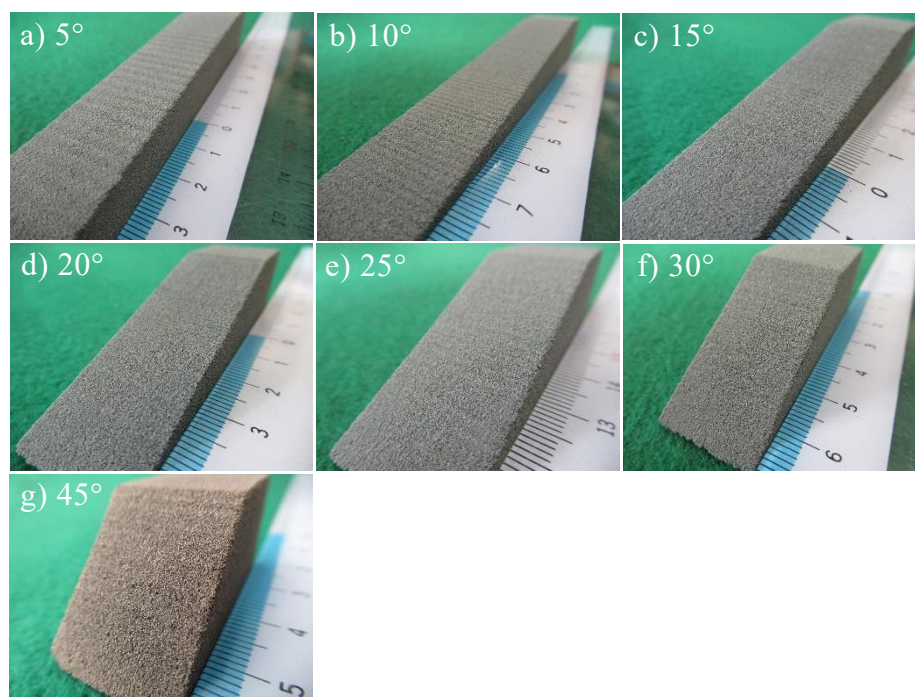


Fig. 2-5 Appearances of sand mold specimens (binder content  $C_{B,m}$ : 2.0mass%, normal placement).



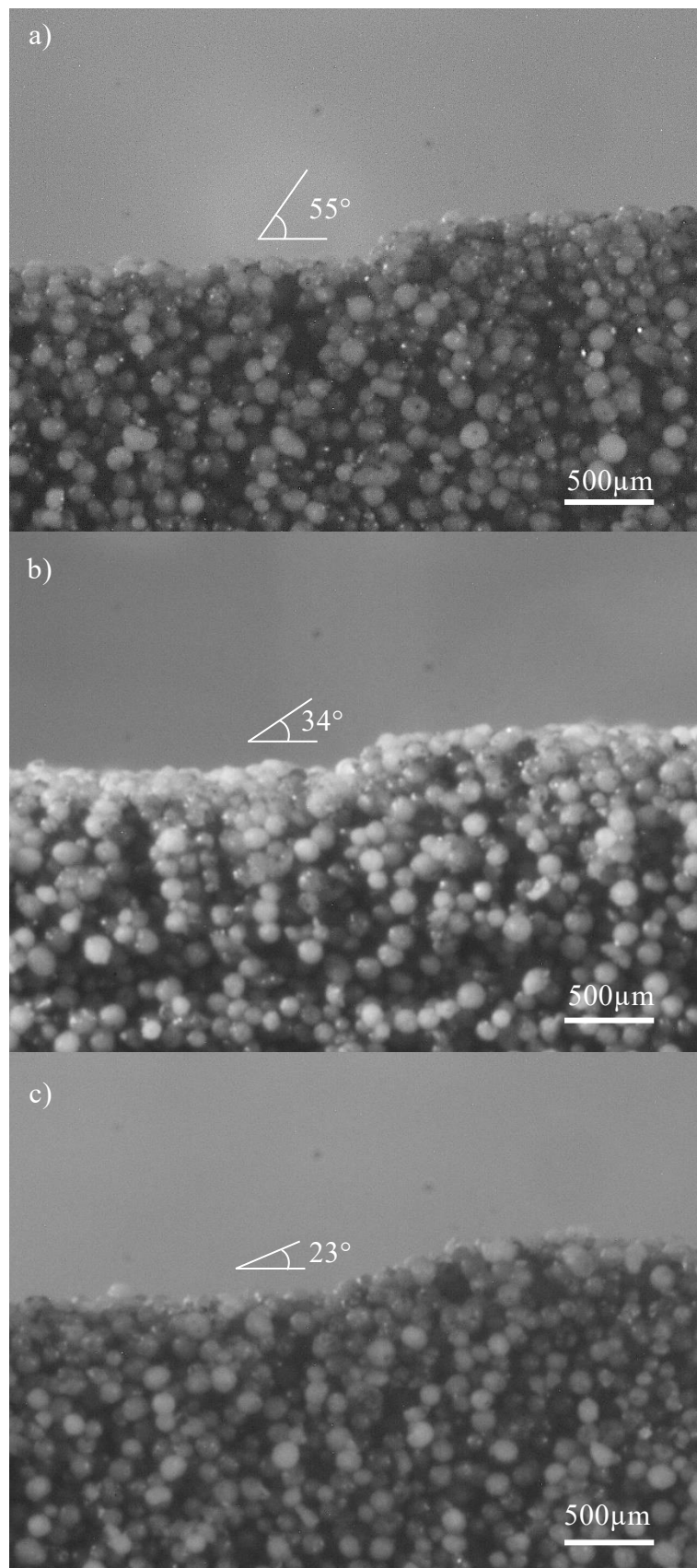


Fig. 2-6 Enlarged pictures of typical slope formed at edge of stair-step.

$\varphi_{\text{sand}}$  の具体的な計測手順は、以下のとおりである。まず、側面が鉛直上向き、かつ上面および下面が水平になるように砂型試験片を設置し、カメラを積層段差側面に正対させて画像を取得した。前述のとおり、取得した画像の画素数は横 1600×縦 1200pixel で、画素サイズは 2.4 $\mu\text{m}/\text{pixel}$  である。次に、株式会社イノテック製画像計測ソフトウェア Quick Grain の角度計測機能を用いて、取得した画像の  $\varphi_{\text{sand}}$  を計測した。 $\varphi_{\text{sand}}$  の計測では、目視にて、下部水平面と微視的斜面を構成する砂粒の外周から特徴点を 3 点以上抽出し、それぞれに直線を引き、得られた 2 本の直線の交点の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  を求めた。なお、特徴点については、下部水平面では高さが概ね揃っている砂粒の上端、微視的斜面では、砂粒の周囲を構成する画素の中で画素と直線の距離が近くなる点とした。以降、画像計測ソフトウェアを用いて、 $\varphi_{\text{sand}}$  を計測する方法を「ソフトウェア法」と記す。Fig. 2-7～2-9 に  $\varphi_{\text{sand}}$  の計測例を示す。Fig. 2-7～2-9 は Fig. 2-6 の a) ～ c) の積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  を計測した例である。なお、Fig. 2-7 の破線の円は、砂の脱落が生じたと思われる箇所を示す。砂が脱落したと思われる箇所については、Fig. 2-7 と同様に、特徴点を 2 点として直線を引いた。この方法により、 $\varphi_{\text{sand}}$  を 10 か所計測した。

Fig. 2-10 にバインダ含有率  $C_{B,m}$  を 2.0mass% とし、おもて配置で造形した砂型試験片について、積層段差側面の写真より積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  を計測した結果を示す。なお、巨視的斜面の角度  $\theta$  が 5～20°において  $\varphi_{\text{sand}}$  の計測が可能で、 $\theta$  が 25～45°において  $\varphi_{\text{sand}}$  の計測が困難であった。Fig. 2-11 に、a)  $\theta=20^\circ$ 、b)  $\theta=25^\circ$  の積層段差側面の写真を示す。a)  $\theta=20^\circ$  では、斜面と水平面はかろうじて判別できる。他方 b)  $\theta=25^\circ$  では水平面の判別が難しく、 $\varphi_{\text{sand}}$  を計測できないことがわかる。このため、Fig. 2-10 では  $\theta$  が 5～20°について、 $\varphi_{\text{sand}}$  を 10 回計測した平均がプロットされている。Fig. 2-10 から、エラーバーは大きいものの、 $\theta$  が 5～20°の範囲において、いずれも  $\varphi_{\text{sand}}$  は約 36°であり、 $\varphi_{\text{sand}}$  に及ぼす  $\theta$  の影響は小さいと推察される。

Fig. 2-12 は、積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  に及ぼす造形条件の影響を調べるため、バインダ含有率  $C_{B,m}$  を 1.6, 2.0, 2.5mass% の 3 条件、配置をおもておよびうら配置の 2 条件で造形した砂型試験片について、 $\varphi_{\text{sand}}$  を計測した結果

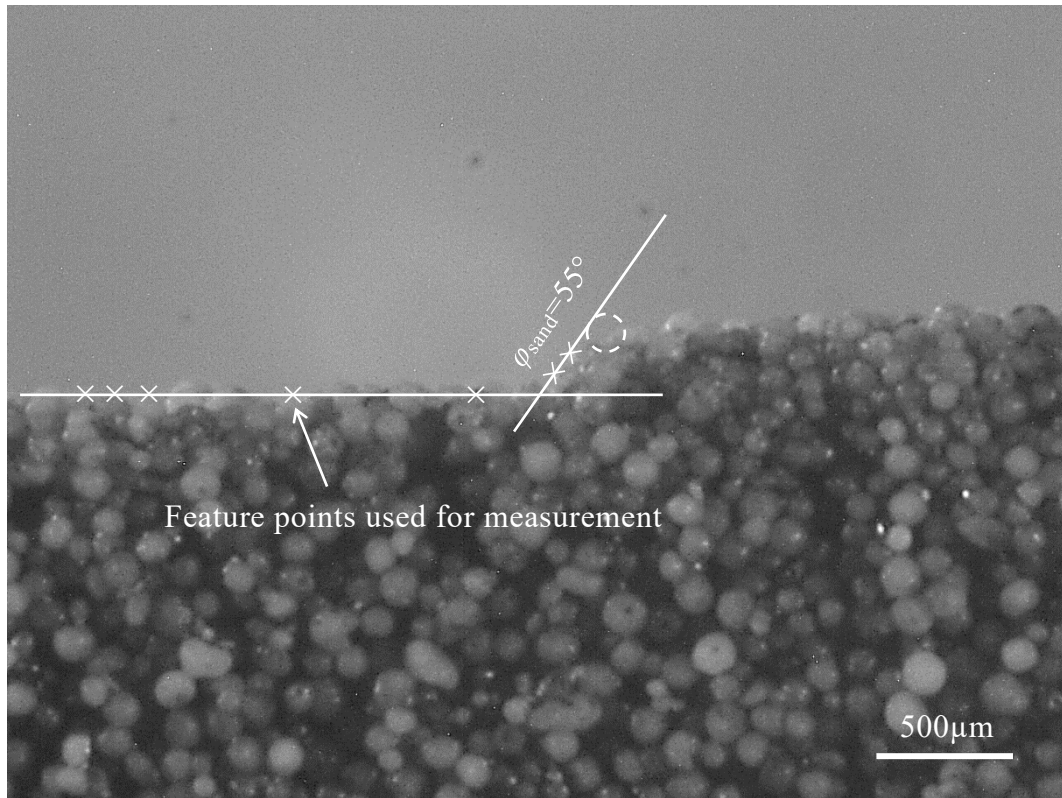


Fig. 2-7 Example of  $\phi_{\text{sand}}$  measurement ( $\phi_{\text{sand}} = 55^\circ$ ).

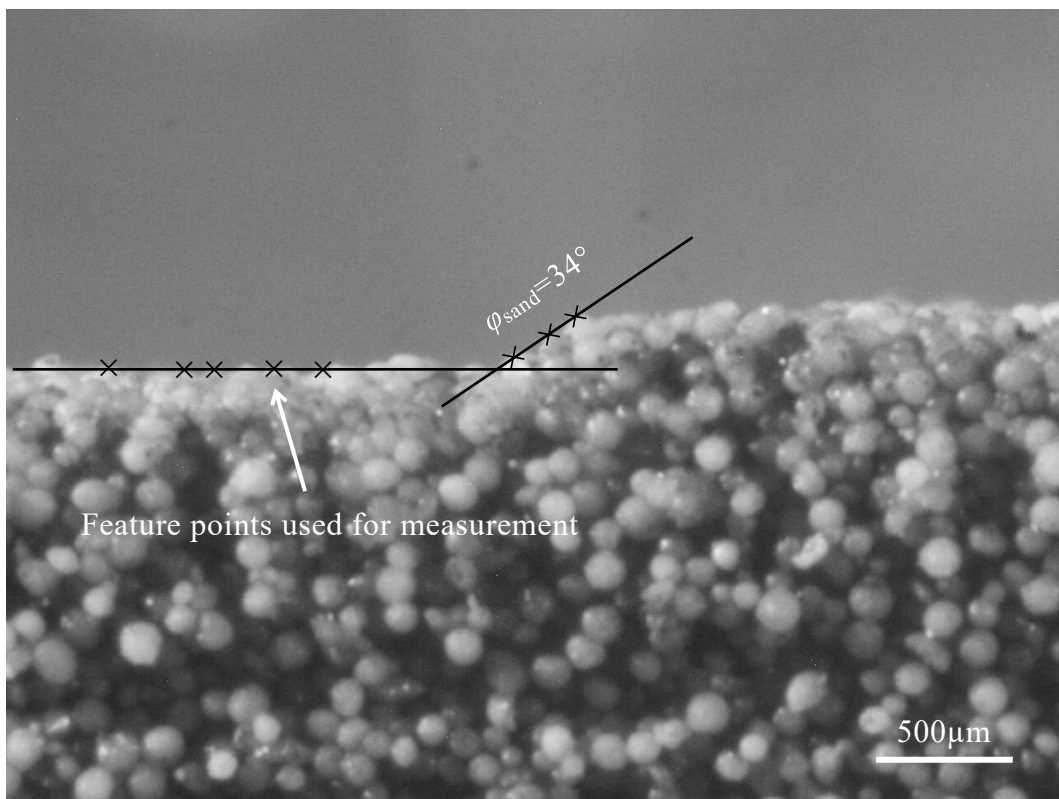


Fig. 2-8 Example of  $\phi_{\text{sand}}$  measurement ( $\phi_{\text{sand}} = 34^\circ$ ).

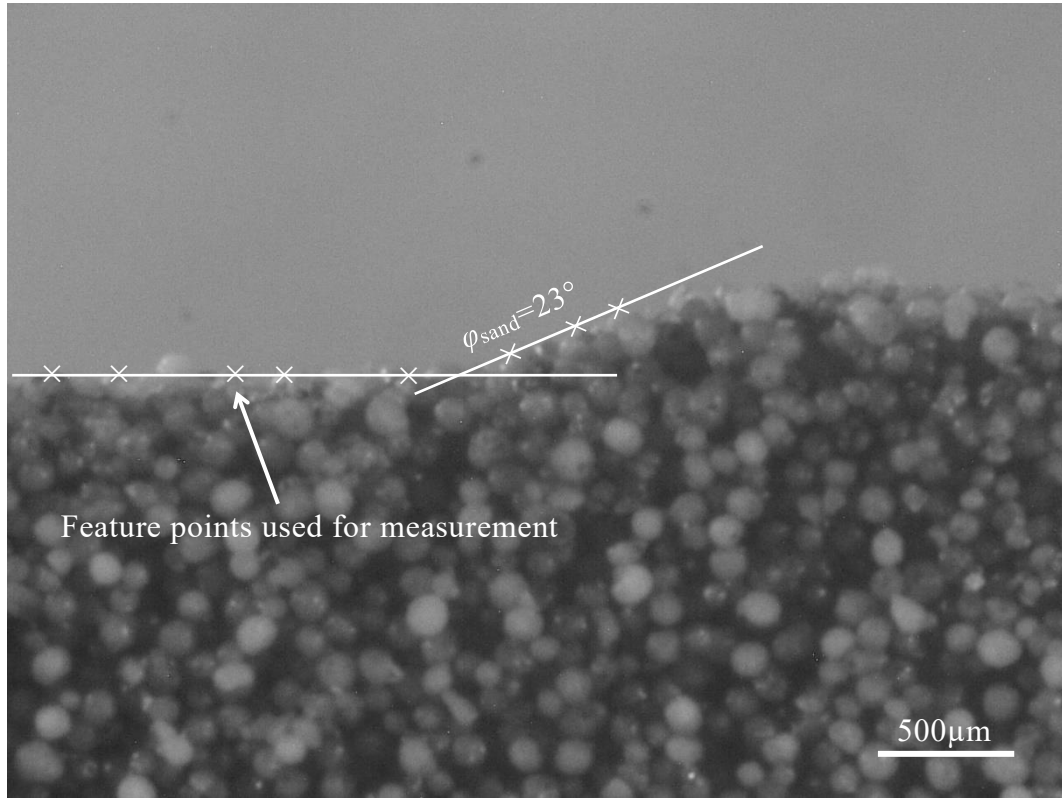


Fig. 2-9 Example of  $\phi_{\text{sand}}$  measurement ( $\phi_{\text{sand}}=23^\circ$ ).

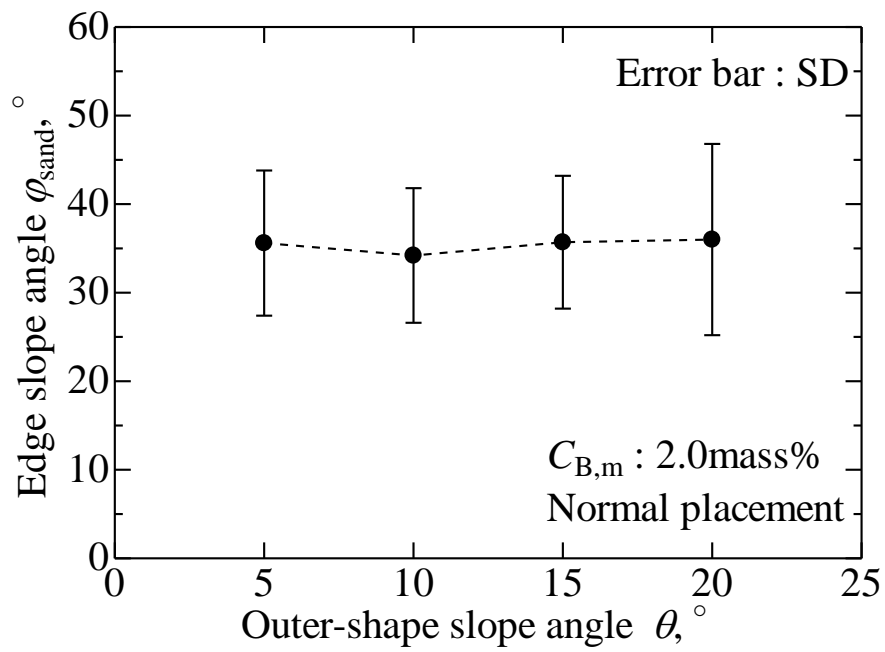


Fig. 2-10 Relationship between outer-shape slope angles  $\theta$  and edge slope angles  $\phi_{\text{sand}}$  (binder content  $C_{B,m}$ : 2.0mass%, normal placement).

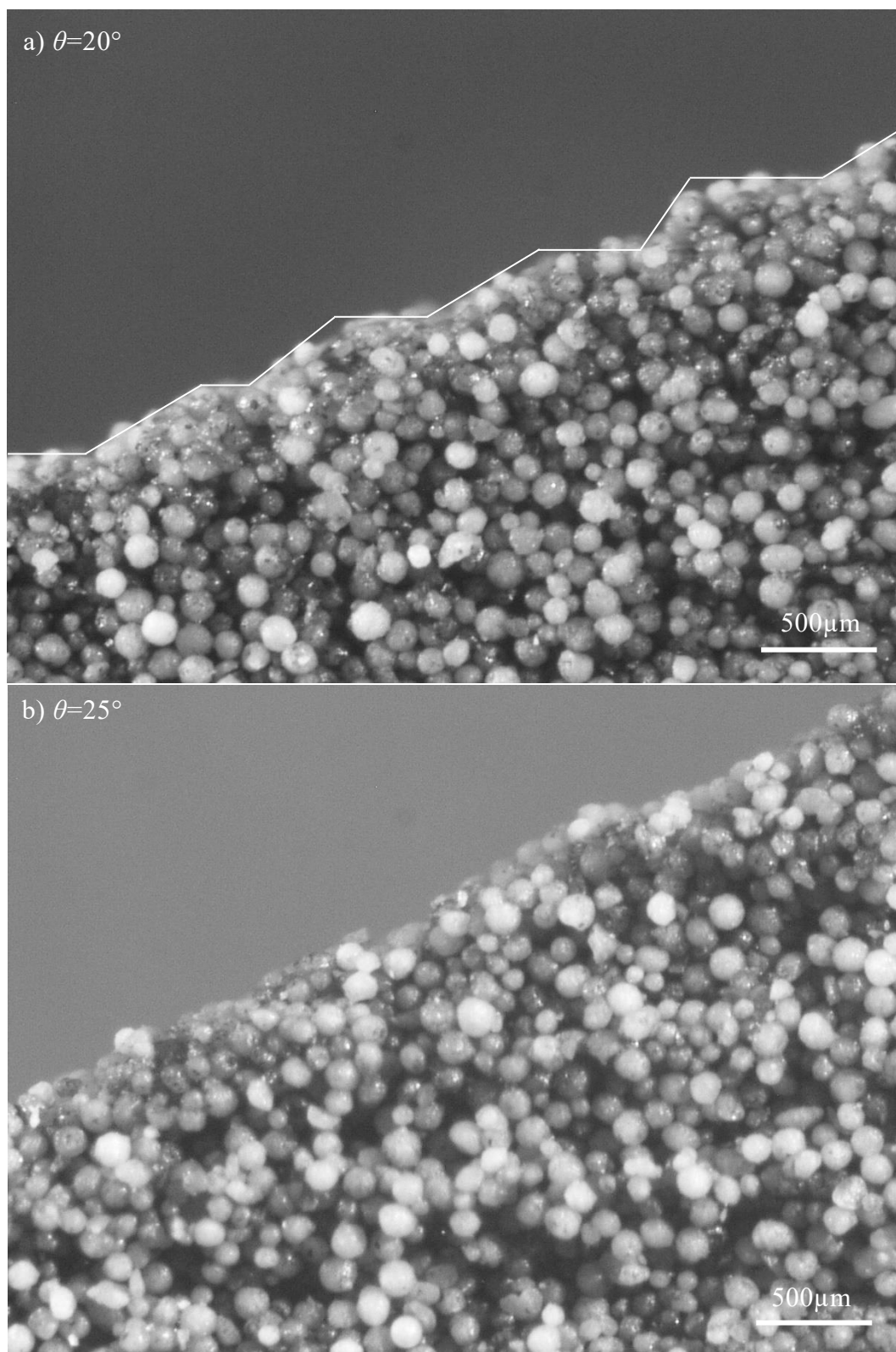


Fig. 2-11 Enlarged pictures of side of stair-steps at outer-shape slope angle  $\theta$  of  $20^\circ$  and  $25^\circ$  (binder content  $C_{B,m}$ : 2.0mass%, normal placement).

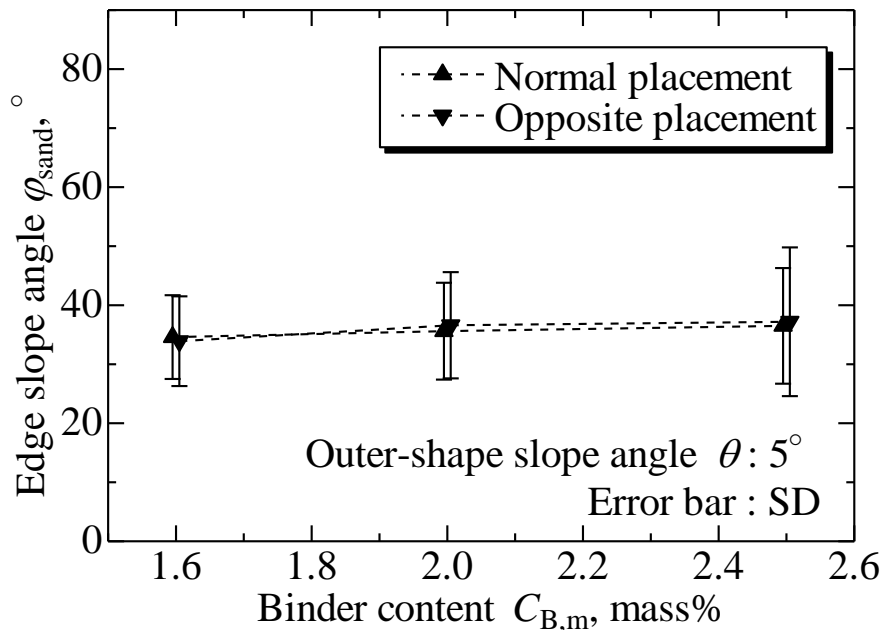


Fig. 2-12 Relationships between binder contents  $C_{B,m}$  and edge slope angles  $\varphi_{sand}$  (outer-shape slope angle  $\theta: 5^\circ$ ).

To make the graph easier to read, the binder contents  $C_{B,m}$  for normal and opposite placement are plotted at  $-0.05\%$  and  $+0.05\%$  with respect to their actual values, respectively.

である。Fig. 2-10 の結果と同様に、 $C_{B,m}$ 、配置のすべての条件において、巨視的斜面の角度  $\theta$  が  $5 \sim 20^\circ$  の範囲で  $\varphi_{sand}$  の計測が可能で、また、この範囲で  $\varphi_{sand}$  はほぼ同じであった。このため Fig. 2-12 では、 $\theta$  が  $5^\circ$  の結果のみ示してある。また、エラーバーは標準偏差である。Fig. 2-12 においてもエラーバーは大きいものの、 $\varphi_{sand}$  は約  $36^\circ$  であり  $C_{B,m}$  の増加に伴う  $\varphi_{sand}$  の変化は認められなかった。また、すべての  $C_{B,m}$  において、おもて配置とうら配置の  $\varphi_{sand}$  もほぼ同じであった。

積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{sand}$  に及ぼす巨視的斜面の角度  $\theta$ 、バインダ含有率  $C_{B,m}$ 、配置の影響を統計的に解析するため、これらの3因子に対し、 $\theta$  は  $5, 10, 15, 20^\circ$ 、 $C_{B,m}$  は  $1.6, 2.0, 2.5\text{mass}\%$ 、配置は、おもて配置、うら配置を水準に設定し、10回繰り返しのある3元配置の分散分析を適用した。Table 2-2 はその分散分析表である。なお、Table 2-2 中の「×」の記号は2または3因子の交互作用を示しており、例えば「Angle×Binder」は巨視的斜面の角度とバインダ含有率



Table 2-2 ANOVA table for edge slope angle  $\varphi_{\text{sand}}$ .

	Factor	Sum of squares	degree of freedom	Average sum of squares	Test statistic F	Significance probability (P-value)
Main Effect	Angle	0.4	3	0.13	0.00	1.00
	Binder	291.1	2	145.57	1.81	0.17
	Placement	23.9	1	23.91	0.30	0.59
2-factor interaction	Angle× Binder	56.7	6	9.44	0.12	0.99
	Binder× Placement	14.1	2	7.03	0.09	0.92
	Placement× Angle	5.2	3	1.75	0.02	1.00
3-factor interaction	Angle× Binder× Placement	21.7	6	3.61	0.04	1.00
error	Error factor	17419.5	216	80.65	-	-

間の交互作用の結果を示している．以降，分散分析表の「×」の記号については，同じの意味で用いる．Table 2-2 に示すように，各因子の主効果および 2 因子間の交互作用，さらには 3 因子間の交互作用，いずれについても P 値は 0.05 を大きく上回っており，有意性は認められなかった．一般的に P 値は有意確率を指し，これが 0.05 未満であるとき，因子の効果が有意であると判断される．以上の結果， $\varphi_{\text{sand}}$  に対する  $\theta$ ， $C_{B,m}$  および配置の影響は認められないことが明らかになった．

次に，積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  について， $\theta$  が 4 条件， $C_{B,m}$  が 3 条件，配置が 2 条件，各条件の計測値が 10 個，合計 240 個の計測値を累積確率で整理した．その結果を Fig. 2-13 に示す． $\varphi_{\text{sand}}$  は  $19^\circ$  から立ち上がり， $35^\circ$  で中央値を取り， $61^\circ$  で累積確率が 1 となった．なお， $\varphi_{\text{sand}}$  の平均は  $36^\circ$ ，標準偏差は  $8.6^\circ$  であった．t 分布に基づいて，平均と標準偏差を用いて 95% の下方および上方予測限界を求めると，それぞれ約  $18.7, 52.7^\circ$  であった．95% の下方および上方予測限界とは， $18.7^\circ$  以上， $52.7^\circ$  以下で定められる予測区間の範囲内に，95% の確率で計測値が収まることを意味している．

次に，積層段差エッジ部に微視的斜面が形成される理由について考察する．積層造形砂型では砂と砂の接触点数が多くなるほど接合強度が向上する．なお，積層造形砂型における一箇所の接合強度は約 0.042N であると報告されている<sup>7)</sup>．こ

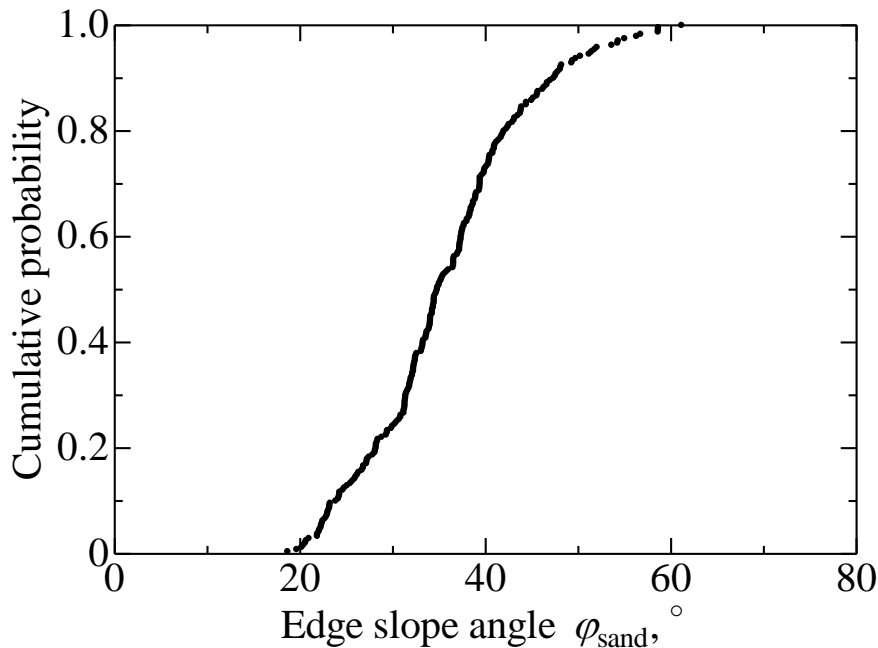


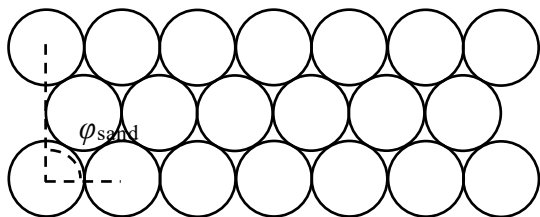
Fig. 2-13 Cumulative probability of edge slope angles  $\varphi_{\text{sand}}$ .

のように砂と砂の一箇所の接合強度は非常に小さいため，砂と砂が強く結合するためには多くの接触点が必要になる．しかし，積層段差エッジ部近傍の接触点数は少なく，砂が脱落しやすいと考えられる．

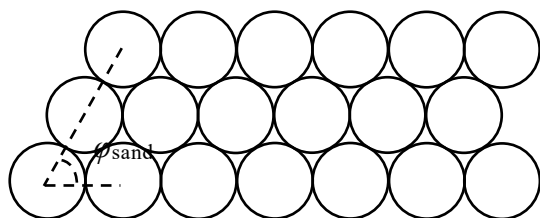
**Fig. 2-14** に積層段差エッジ部の微視的斜面形成のモデルを示す．a)の  $\varphi_{\text{sand}}=90^\circ$  のモデルは，設計上のモデルである．b)の  $\varphi_{\text{sand}}=60^\circ$  のモデルは，a)の最上層から 1 個の砂の脱落により形成される．このモデルは，Fig. 2-6 a)の  $\varphi_{\text{sand}}$  が  $55^\circ$  の斜面に近い形状を示し，Fig. 2-13 の 95%上方予測限界に近い条件を説明している．c)の  $\varphi_{\text{sand}}=30^\circ$  になるモデルは，a)の最上層から 3 個，中間層から 1 個，合計 4 個の砂の脱落により形成される．このモデルは，Fig. 2-6 b)の  $\varphi_{\text{sand}}$  が  $34^\circ$  の斜面に近い形状を示し，Fig. 2-13 の平均に近い条件を説明している．d)の  $\varphi_{\text{sand}}=19^\circ$  になるモデルは，a)の最上層から 5 個，中間層から 2 個，合計 7 個の砂の脱落により形成される．このモデルは Fig. 2-6 c)の  $\varphi_{\text{sand}}$  が  $23^\circ$  の斜面に近い形状を示し，Fig. 2-13 の 95%下方予測限界に近い条件を説明している．Fig. 2-14 のように，積層段差エッジ部では，砂の脱落により微視的斜面が形成され，脱落した砂の位置と個数により  $\varphi_{\text{sand}}$  が決まると推察される．



a)  $\varphi_{\text{sand}} = 90^\circ$

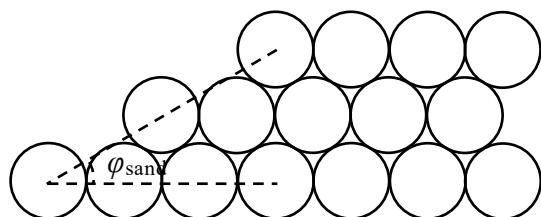


b)  $\varphi_{\text{sand}} = 60^\circ$



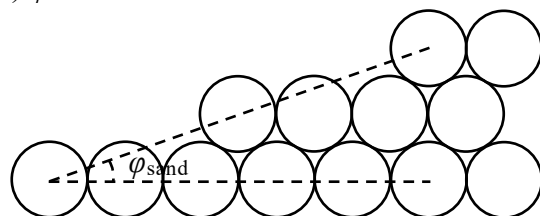
$$\varphi_{\text{sand}} = \tan^{-1}(2\sqrt{3}r/2r) = 60^\circ$$

c)  $\varphi_{\text{sand}} = 30^\circ$



$$\varphi_{\text{sand}} = \tan^{-1}(2\sqrt{3}r/6r) = 30^\circ$$

d)  $\varphi_{\text{sand}} = 19^\circ$



$$\varphi_{\text{sand}} = \tan^{-1}(2\sqrt{3}r/10r) \doteq 19^\circ$$

(The radius of the sphere is  $r$ )

Fig. 2-14 Schematic diagrams of slope formation at edge of stair-step.

次に、積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  の平均が  $36^\circ$  であるとの実験結果、Fig. 2-10, 2-12, 2-13 に基づいて、巨視的斜面の角度  $\theta$  が大きくなると積層段差が視認されにくくなる現象について考察する。 **Fig. 2-15** に  $\theta$  が  $20, 36^\circ$  の斜面において、積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  を  $36^\circ$  としたときの積層段

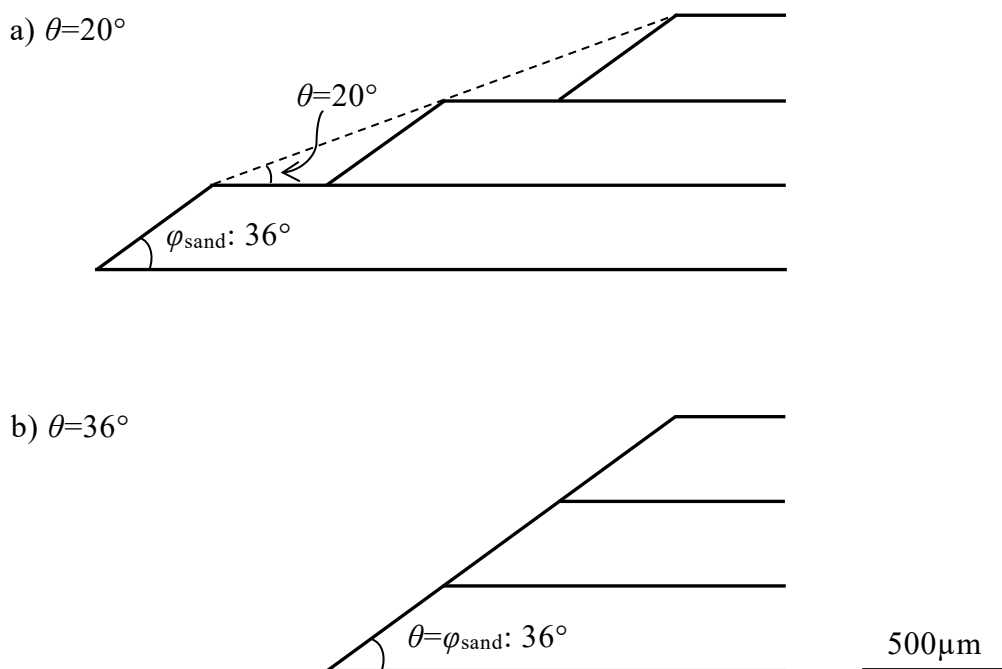


Fig. 2-15 Schematic diagrams of stair-steps for edge slope angle  $\varphi_{\text{sand}}$  of  $36^\circ$ .

差の模式図を示す．この図の a)  $\theta=20^\circ$ では，積層段差エッジ部の微視的斜面に挟まれた水平面が観察され，積層段差は視認される．他方，b)  $\theta=36^\circ$ では，水平面が形成されず，積層段差エッジ部の微視的斜面が連結し積層段差は形成されなくなる．このように，水平面と微視的斜面を接続した折れ線のモデルにより，積層段差の視認可否のメカニズムを説明することができる．ただし，実際には，仮に  $\theta$  が  $36^\circ$ であっても，すべての  $\varphi_{\text{sand}}$  が  $36^\circ$ にはならないため，積層段差はわかりにくくなるものの，すべての積層段差が完全に消失することはない．また， $\theta$  が  $36^\circ$ より大きい条件として，**Fig. 2-16** に  $\theta$  が  $45^\circ$ における斜面形成の模式図を示す． $\theta$  が  $36^\circ$ より大きくなると，積層段差エッジ部の微視的斜面に挟まれた水平面がさらに狭くなるため， $\varphi_{\text{sand}}$  が  $36^\circ$ の斜面を形成できなくなるものの，砂の脱落により積層段差は視認されにくくなる．

### 2.3.2 積層造形砂型の表面粗さ

砂型の積層段差を定量化し， $\theta$ ，バインダ含有率  $C_{B,m}$  および配置の影響を定量的に評価するため，積層段差側面の画像から  $Rz_{\text{sand}}$  を計測した． $Rz_{\text{sand}}$  の具体的な

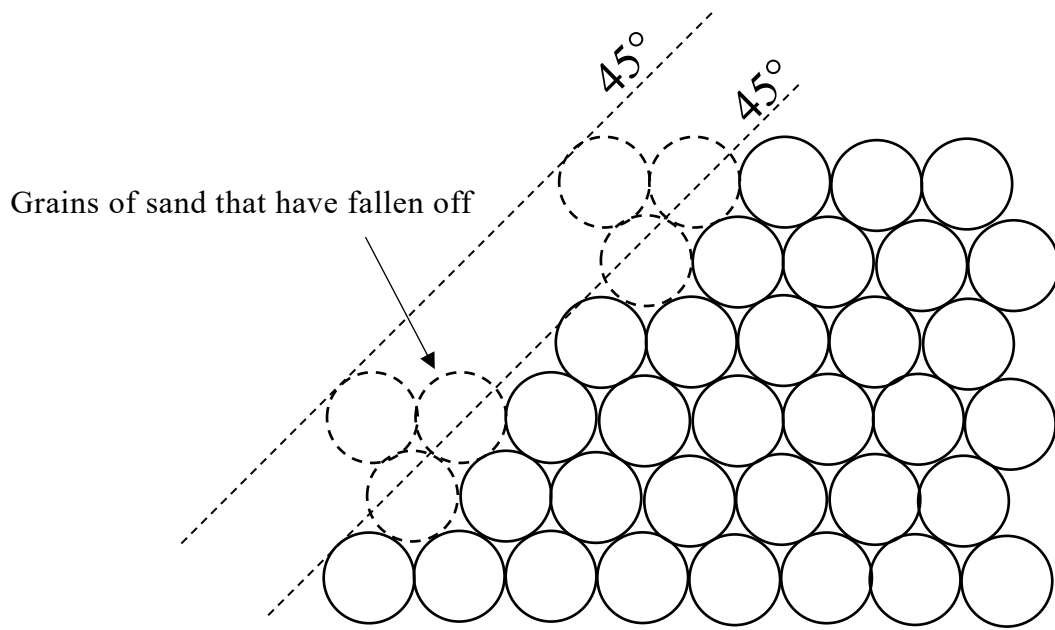


Fig. 2-16 Schematic diagram of slope formation at edge of stair-step  
(outer-shape slope angle  $\theta$ :  $45^\circ$ ).

計測方法は以下のとおりである．まず，2. 2. 3 項のとおり，2 枚の画像(画像の大きさは横 4×縦 3mm，画素数は 1600×1200pixel，画素サイズは  $2.5\mu\text{m}/\text{pixel}$ )を取得した．次に，取得した 2 枚の画像について， $\phi_{\text{sand}}$  の計測と同じ画像計測ソフトウェアの寸法計測機能を用いて，目視にて，斜面の水平面と最も高い山間の距離  $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$  と最も低い谷間の距離  $R_{v1}$ ,  $R_{v2}$  を計測した．ここで，それぞれの添え字は画像 1 と 2 を表す．**Fig. 2-17** に  $R_{z\text{sand}}$  の計測例を示す．**Fig. 2-17** は  $\theta$  が  $5^\circ$  の条件について， $R_{p1}$  と  $R_{v1}$  を計測した例である．次に，それらの和  $R_{p1}+R_{v1}=R_{z\text{sand},1}$ ， $R_{p2}+R_{v2}=R_{z\text{sand},2}$  を比較し，和の大きい方を対象の  $R_{z\text{sand}}$  とした．この方法により，場所を変えて  $R_{z\text{sand}}$  を 5 回計測した．なお，本研究では評価長さ間を 2 つに分割し，それぞれの和  $R_{z\text{sand},1}$  と  $R_{z\text{sand},2}$  を比較し，和の大きい方を  $R_{z\text{sand}}$  としているため，得られた  $R_{z\text{sand}}$  については若干小さく評価されている可能性がある．

**Fig. 2-18** は  $C_{B,m}$  を 2.0mass% とし，おもておよびうら配置の 2 条件で造形した砂型試験片の積層段差を定量化した  $R_{z\text{sand}}$  と  $\theta$  の関係である．エラーバーは標準偏差である．また，**Fig. 2-19** に巨視的斜面の角度  $\theta$  と積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\phi_{\text{sand}}$  を考慮した  $R_{z\text{sand}}$  の模式図を示す．**Fig. 2-19** の積層段差の山谷間の垂直方向の距離  $d$  は，積層厚さを  $t$  とすると式(2-2)で表される．また，模式図

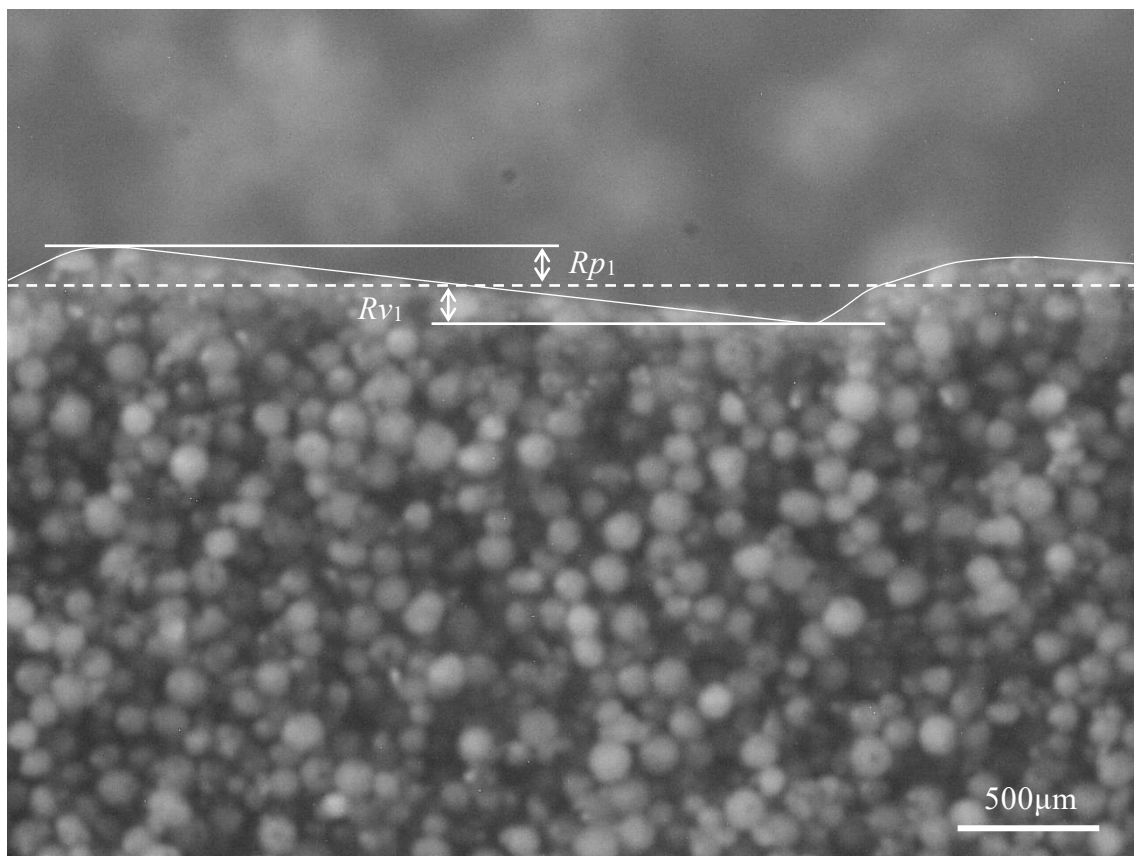


Fig. 2-17 Example of maximum height roughness  $Rz_{\text{sand}}$  measurement.

のとおり積層段差が形成されると仮定すると，式(2-2)の  $d$  は  $Rz_{\text{sand}}$  と等しくなる．

$$d = (l-a) \sin\theta = (t/\tan\theta - t/\tan\varphi_{\text{sand}}) \sin\theta \quad (2-2)$$

Fig. 2-18 の点線( $\varphi_{\text{sand}} = 19, 36, 53, 90^\circ$ )は，式(2-2)の  $\varphi_{\text{sand}}$  に  $\varphi_{\text{sand}}$  の 95%下方予測限界の  $19^\circ$ ， $\varphi_{\text{sand}}$  の平均値の  $36^\circ$ ， $\varphi_{\text{sand}}$  の 95%上方予測限界の  $53^\circ$ ，設計上の積層段差の  $90^\circ$ を代入して求めた  $Rz_{\text{sand}}$  と  $\theta$  の関係を示している． Fig. 2-18 から，おもて，うら配置ともに， $\theta$  が大きくなるとともに  $Rz_{\text{sand}}$  は小さくなり， $\theta$  が  $20^\circ$ 以上になると， $Rz_{\text{sand}}$  は  $160\mu\text{m}$  程度でほぼ一定になった．この傾向には，配置による差は認められない．  $Rz_{\text{sand}}$  と，4本の点線および垂直方向の平面の  $Rz_{\text{sand}}(90^\circ$ の計測値)と比較すると， $\theta$  が  $5\sim 15^\circ$ までは， $Rz_{\text{sand}}$  は  $\varphi_{\text{sand}} = 36^\circ$ の点線とよく一致した．これは  $\varphi_{\text{sand}}$  の平均値が  $36^\circ$ になっていることに起因すると考えられる．  $\theta$  が  $20^\circ$ 以上では， $Rz_{\text{sand}}$  は  $90^\circ$ の計測値よりわずかに大きいものの，概ね一致した．以上を総括すると， $Rz_{\text{sand}}$  については， $\varphi_{\text{sand}}$  の平均値から計算される  $Rz_{\text{sand}}$  と，画像計測により得られる垂直方向の平面の  $Rz_{\text{sand}}$  の大きい方が最終的な表面粗さを与えること

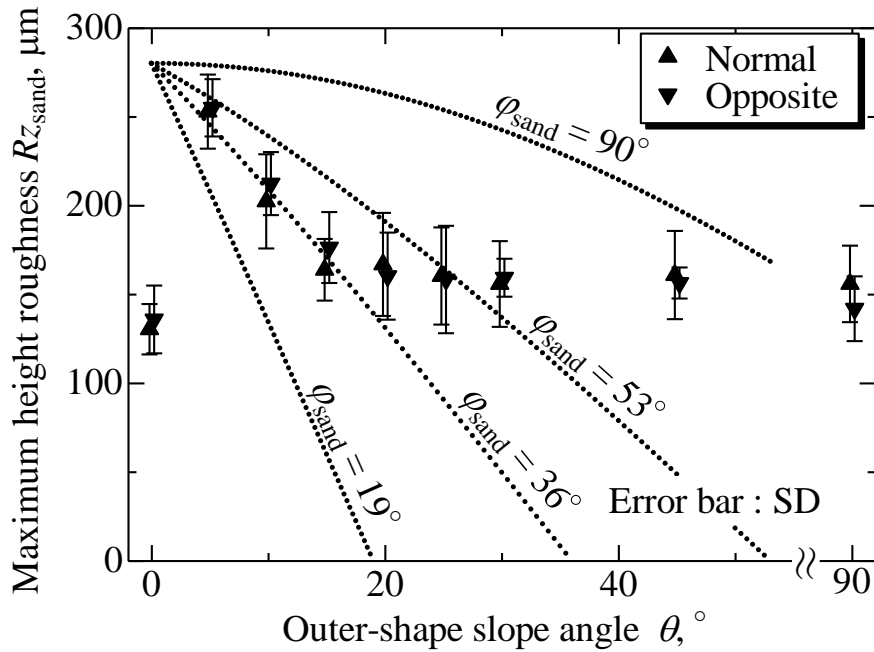


Fig. 2-18 Relationships between outer-shape slope angles  $\theta$  and maximum height roughness  $Rz_{\text{sand}}$  (binder content  $C_{B,m}$ : 2.0mass%).

To make the graph easier to read, the outer-shape slope angle  $\theta$  for normal and opposite placements are plotted at  $-0.2^\circ$  and  $+0.2^\circ$  with respect to their actual values, respectively.

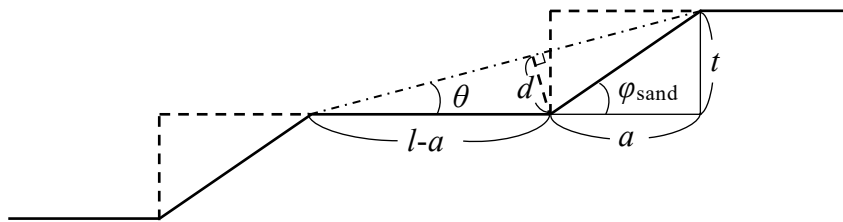


Fig. 2-19 Schematic diagram of maximum height roughness  $Rz_{\text{sand}}$  considering outer-shape slope angle  $\theta$  and edge slope angle  $\phi_{\text{sand}}$ .

を示している。また、 $Rz_{\text{sand}}$  のばらつく範囲は概ね  $\phi_{\text{sand}}$  の 95% 下方および上方予測限界で形成される  $Rz_{\text{sand}}(\phi_{\text{sand}}=19^\circ$  と  $53^\circ$  の点線) と、垂直方向の平面の  $Rz_{\text{sand}}$  (エラーバーを含む) に囲まれた領域に入っていることがわかる。一方、 $Rz_{\text{sand}}$  は、設計上の積層段差エッジ部の  $\phi_{\text{sand}}=90^\circ$  の点線と大きくずれている。以上の結果について

ては、1.6, 2.5mass%の  $C_{B,m}$  においても同じ傾向が確認された。

$Rz_{sand}$  に及ぼす巨視的斜面の角度  $\theta$ 、バインダ含有率  $C_{B,m}$ 、配置の影響を統計的に解析するため、3 因子に対し、 $\theta$  は 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 90°,  $C_{B,m}$  は 1.6, 2.0, 2.5mass%，配置は、おもて配置、うら配置を水準に設定し、5 回繰り返しのある 3 元配置の分散分析を適用した。Table 2-3 はその分散分析表である。Table 2-3 に示すように、 $Rz_{sand}$  に対し巨視的斜面の角度の主効果の P 値は 0.00 で 0.05 未満であり、有意であると認められた。一方  $C_{B,m}$  および配置の主効果および 2 因子間の交互作用、さらには 3 因子間の交互作用、いずれについても P 値は 0.05 を大きく上回っており、有意性は認められなかった。この結果から、 $Rz_{sand}$  に及ぼす造形条件 ( $C_{B,m}$ 、配置)の影響は認められないことが明らかになった。

Table 2-3 ANOVA table for maximum height roughness  $Rz_{sand}$ .

	Factor	Sum of squares	degree of freedom	Average sum of squares	Test statistic F	Significance probability (P-value)	
Main Effect	Angle	312544.4	8	39068.04	114.23	0.00	**
	Binder	348.9	2	174.46	0.51	0.60	
	Placement	941.0	1	941.01	2.75	0.10	
2-factor interaction	Angle× Binder	2072.0	16	129.50	0.38	0.99	
	Binder× Placement	649.7	2	324.87	0.95	0.39	
	Placement× Angle	2545.2	8	318.15	0.93	0.49	
3-factor interaction	Angle× Binder× Placement	1895.2	16	118.45	0.35	0.99	
error	Error factor	73874.3	216	342.01	-	-	

\*\*:  $p < 0.01$ , †:  $p < 0.1$

\*:  $p < 0.05$  (No applicable results in this tests)

## 2.4 最小二乗法の計測値との比較による、ソフトウェア法により計測された微視的斜面の角度の精度の検証

### 2.4.1 概要と目的

2.3.1 項において、ソフトウェア法により得られた、積層造形砂型の微視的斜

面の角度の計測値(2.4 節では、記号を「 $\varphi_{\text{sand,soft}}$ 」と記す)は、巨視的斜面の角度  $\theta = 5, 10, 15, 20^\circ$  の条件では、 $\theta$  に依らず、おおよそ一定になることを明らかにした。また  $\varphi_{\text{sand,soft}}$  の統計量として、平均(2.4 節では、記号を「 $M_{\varphi_{\text{sand,soft}}}$ 」と記す)および分散(2.4 節では、記号を「 $S_{\varphi_{\text{sand,soft}}}^2$ 」と記す)を導いた。さらに、2. 3. 2 項において、積層段差を定量化した最大高さ粗さ  $Rz_{\text{sand}}$  と  $\theta$  の関係をモデル化し、 $\varphi_{\text{sand,soft}}$  の平均  $M_{\varphi_{\text{sand,soft}}}$  に基づいて、 $Rz_{\text{sand}}$  が  $\theta$  に依存すること(以下、「 $\theta$  依存性」と記す)を説明した。

$\varphi_{\text{sand,soft}}$  については、計測が容易であるソフトウェア法を用いて、積層造形砂型の積層段差側面の画像から計測したものである。積層造形砂型の水平面や微視的斜面では、それらを構成する砂粒の一部が突出したり、脱落したりしている。このため、砂粒に対し目視により特徴点を抽出するソフトウェア法では、水平面や微視的斜面の角度に誤差を引き起こす可能性があると考えられる。

そこで、本節では、砂粒に対し円の当てはめにより特徴点を抽出する最小二乗法による計測法を導入し、その計測値に基づいて、ソフトウェア法により計測された微視的斜面の角度の精度を検証した。

## 2.4.2 実験方法

### (1) 供試画像

ソフトウェア法の精度の検証では、バインダ含有率  $C_{B,m}$  が 2.0mass% で、おもて配置、巨視的斜面の角度  $\theta$  が  $5^\circ$  の条件について、積層段差側面の画像を 10 枚取得した。なお、積層段差側面の画像の取得方法は 2.3.1 項のとおりである。

### (2) 微視的斜面の角度 $\varphi_{\text{sand}}$ の計測方法

ソフトウェア法および最小二乗法により、取得した積層段差側面の画像の  $\varphi_{\text{sand}}$  を計測した。ソフトウェア法による計測方法は 2.3.1 項のとおりである。最小二乗法による計測方法は以下のとおりである。

#### [ステップ 1]

下部水平面については、上端の高さが概ね揃っている砂粒を 3 個以上、微視的斜面については、その斜面に対して高さが概ね揃っている砂粒を 2~3 個程度選

び，円を当てはめた．砂粒に当てはめた円には砂粒の特徴点として，下部水平面では円の上端に，微視的斜面では円の上端から反時計回りに  $36^\circ$  回転させた位置に「+」のマークが付けてある．なお，微視的斜面において，円の上端から反時計回りに  $36^\circ$  回転させた位置に「+」のマークを付けたのは， $\varphi_{\text{sand}}$  の平均が約  $36^\circ$  であったためである．**Fig. 2-20** は Fig. 2-6 の c) について，下部水平面と微視的斜面の砂粒に円を当てはめた例である．

[ステップ 2]

砂粒に円を当てはめた画像について，砂粒の特徴点の X, Y 座標を読み取り，最小二乗法により下部水平面の回帰式  $y_h$  として式(2-3)を，微視的斜面の回帰式  $y_s$  として式(2-4)を得た．

$$y_h = a_h x + b_h \quad (2-3)$$

$$y_s = a_s x + b_s \quad (2-4)$$

次に，式(2-5)，(2-6)から下部水平面の角度  $\varphi_h$  と微視的斜面の角度  $\varphi_s$  を算出した．

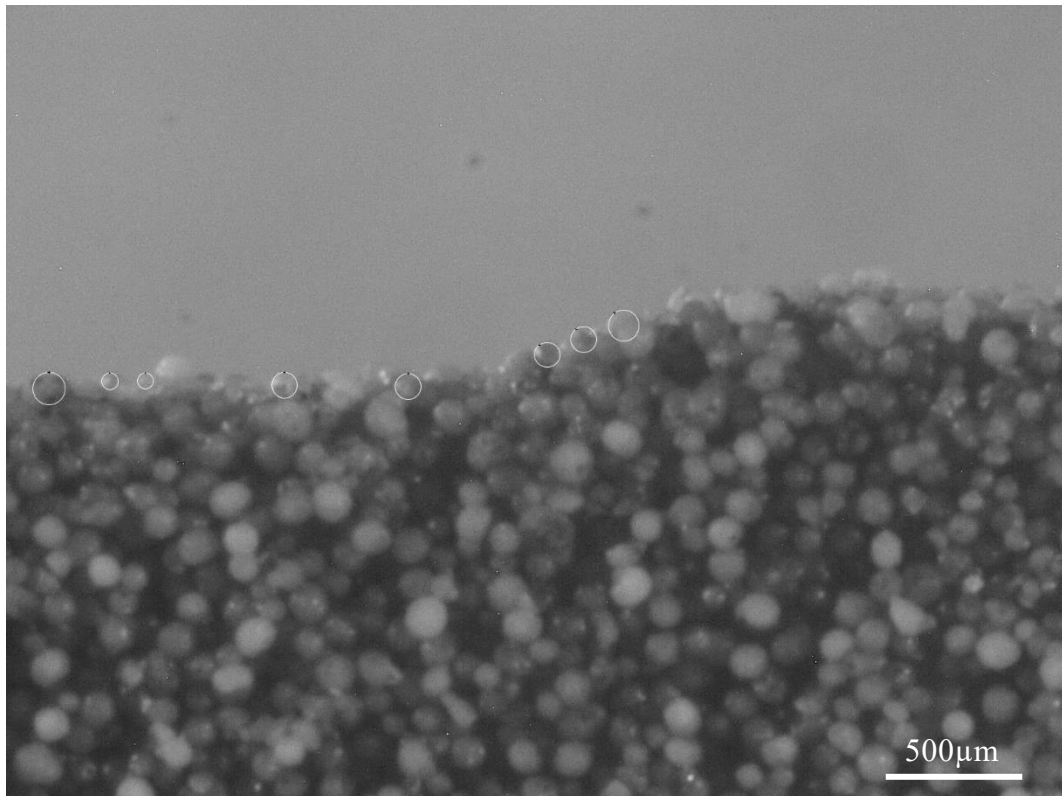


Fig. 2-20 Example of fitting circles to grains of sand (binder content  $C_{B,m}$ : 2.0mass%, normal placement, outer-shape slope angle  $\theta$ :  $5^\circ$ ).



$$\varphi_h = \tan^{-1} a_h \quad (2-5)$$

$$\varphi_s = \tan^{-1} a_s \quad (2-6)$$

[ステップ 3]

式(2-7)から，最小二乗法により計測された微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  を求めた．

$$\varphi_{\text{sand,LSM}} = \varphi_s - \varphi_h \quad (2-7)$$

**Fig. 2-21** に，回帰式  $y_h$ ， $y_s$ ，角度  $\varphi_h$ ， $\varphi_s$  および微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  の関係の模式図を示す．

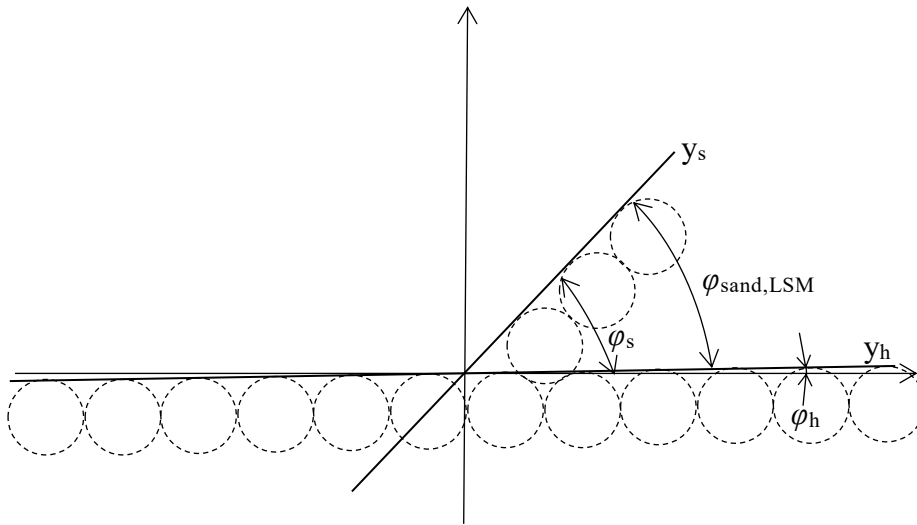


Fig. 2-21 Schematic diagram showing relationship between regression equation  $y_h$ ， $y_s$  and angle  $\varphi_h$ ， $\varphi_s$ ， $\varphi_{\text{sand,LSM}}$ .

### 2.4.3 $\varphi_{\text{sand,soft}}$ と $\varphi_{\text{sand,LSM}}$ の整合性の検証

ソフトウェア法の計測精度について，以下の(1)および(2)に示すように，二通りの統計的検定を適用し， $\varphi_{\text{sand,soft}}$  と  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  の整合性を検証した．

#### (1) 「一対の標本による母平均の差の検定」を用いた同一試料に対する $\varphi_{\text{sand,soft}}$ と $\varphi_{\text{sand,LSM}}$ の計測値間の整合性に関する検定

**Fig. 2-22** に，ソフトウェア法と最小二乗法により得られた  $\varphi_{\text{sand}}$  の計測値の関係を示す．ソフトウェア法により得られた計測値  $\varphi_{\text{sand,soft}}$  と最小二乗法により得られた計測値  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  は，よく一致している．

$\varphi_{\text{sand,soft}}$  と  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  は同一試料に対する計測値であることから，一対の標本によ

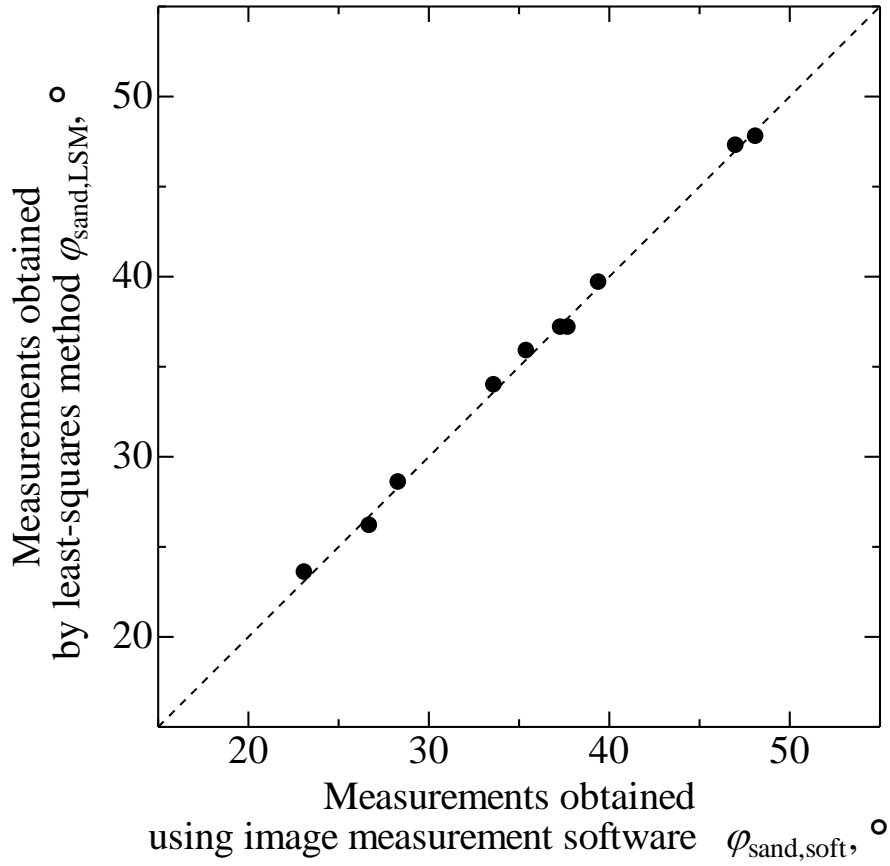


Fig. 2-22 Comparison of  $\varphi_{\text{sand}}$  measurements obtained with different measurement methods (binder content  $C_{B,m}$ : 2.0mass%, normal placement, outer-shape slope angle  $\theta$ :  $5^\circ$ ).

る母平均の差の検定を適用し、 $\varphi_{\text{sand,soft}}$  が高精度な  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  と整合すること示すことで  $\varphi_{\text{sand,soft}}$  を用いることの妥当性を検討した。

自由度(9=10-1)の t 分布において、検定統計量  $T$  値は、

$$T = \frac{M_{\Delta\varphi_{\text{sand}}}}{\sqrt{S^2/n}} = 0.813$$

となる。ここで、 $M_{\Delta\varphi_{\text{sand}}}$  と  $S^2$  は次のとおりである。

$$M_{\Delta\varphi_{\text{sand}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta\varphi_{\text{sand},i}}{n} = 0.103$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_{\text{sand},i} - M_{\Delta\varphi_{\text{sand}}})^2}{n-1} = 0.159$$

ただし、 $\Delta\varphi_{\text{sand},i} = \varphi_{\text{sand,soft},i} - \varphi_{\text{sand,LSM},i}$ ,  $n = n_{\varphi_{\text{sand,soft}}} = n_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}$

この  $T$  値に対する有意確率  $P(T \leq t)$  は  $T$  値における相補累積確率 0.44 (=1-「累積確率」) となる。この値は有意水準 0.05 より大きいことから、両方向による計測値の母平均には有意差は認められなかった。なお、 $P(T \leq t)$  の  $T$  は検定統計量であり、 $t$  は  $t$  分布における(一変量の)確率変数である。以降、 $P(T \leq t)$  については同じの意味で用いる。以上により、簡易なソフトウェア法による計測値  $\varphi_{\text{sand,soft}}$  が最小二乗法による高精度な  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  と整合することが示された。

## (2) 「等分散性の検定」と「等分散性を仮定した 2 標本の母平均の差の検定」を用いた $\varphi_{\text{sand,soft}}$ と $\varphi_{\text{sand,LSM}}$ の標本間の整合性に関する検定

2.3.2 項において、 $\varphi_{\text{sand,soft}}$  の標本平均を用いて、最大高さ粗さ  $Rz_{\text{sand}}$  の  $\theta$  依存性を明らかにした。2.4.3 項の(2)では、 $\varphi_{\text{sand,soft}}$  の標本平均を用いることの妥当性を評価するため、 $\varphi_{\text{sand,soft}}$  と  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  の標本平均と標本分散に基づいて、 $\varphi_{\text{sand,soft}}$  と  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  の標本間の整合性を検証した。なお、本論文では、「標本平均」を「平均」、「標本分散」を「分散」としている。しかし、2.4.3 項の(2)では母平均と母分散も扱うことから、両者を区別できるよう、「標本」を省略せずに「標本平均」と「標本分散」と記す。

Fig. 2-22 の、ソフトウェア法による  $\varphi_{\text{sand,soft}}$  の計測値と最小二乗法による  $\varphi_{\text{sand,LSM}}$  の計測値を、それぞれの標本平均と標本分散に組み替えて、**Fig. 2-23** に示す。なお、**Fig. 2-23** の各標本の左側の●は計測値、エラーバーのある●は標本平均、エラーバーは標本標準偏差(標本標準偏差は標本分散の 1/2 乗)である。**Table 2-4** は、各標本の統計量(標本サイズ、標本平均、標本分散)である。なお、本論文では角度の単位には「°」を使用しているが、**Table 2-4** の標本分散の単位には「deg<sup>2</sup>」を使用する。

以下に、これらの統計量を用い、ソフトウェア法と最小二乗法の  $\varphi_{\text{sand}}$  の計測値から、両方法による母分散および母平均の整合性の有無を検討した結果を示す。

### (a) 母分散の比の検定(F 検定)

ソフトウェア法と最小二乗法により得られた  $\varphi_{\text{sand}}$  の計測値の標本分散  $S_{\varphi_{\text{sand,soft}}}^2$ ,  $S_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}^2$  はそれぞれ 66.7 と 65.7deg<sup>2</sup> であった。自由度(分子 9, 分母 9)の F 分布

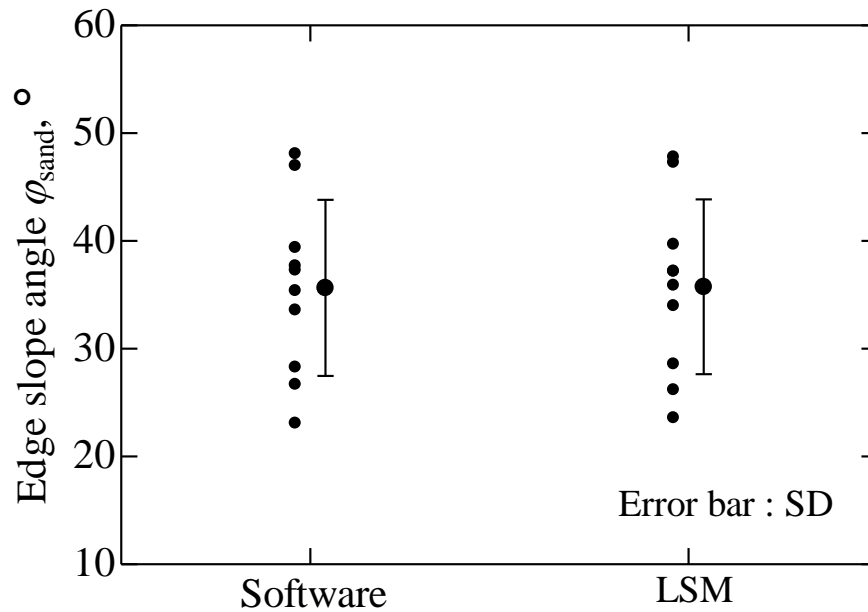


Fig. 2-23 Comparison of  $\varphi_{\text{sand}}$  means obtained with different measurement methods (binder content  $C_{B,m}$ : 2.0mass%, normal placement, outer-shape slope angle  $\theta$ : 5°).

Table 2-4 Statistics values.

	Edge slope angle obtained using image measurement software, $\varphi_{\text{sand,soft}}$	Edge slope angle obtained by least-squares method, $\varphi_{\text{sand,LSM}}$
Sample size	$n_{\varphi_{\text{sand,soft}}} = 10$	$n_{\varphi_{\text{sand,LSM}}} = 10$
Sample mean	$M_{\varphi_{\text{sand,soft}}} = 35.6^\circ$	$M_{\varphi_{\text{sand,LSM}}} = 35.7^\circ$
Sample variance	$S_{\varphi_{\text{sand,soft}}}^2 = 66.7\text{deg}^2$	$S_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}^2 = 65.7\text{deg}^2$

において検定統計量  $F$  値は,

$$F = S_{\varphi_{\text{sand,soft}}}^2 / S_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}^2 = 66.7 / 65.7 = 1.02$$

となる. この  $F$  値に対する有意確率  $P(F \leq f)$  は,  $F$  値における相補累積確率 0.49 (=1-「累積確率」)となる. この値は有意水準 0.05 より大きいことから, 両方法による計測値の母分散には不等分散性は認められなかった. なお,  $P(F \leq f)$  の  $F$  は検定統計量であり,  $f$  は  $F$  分布における (一変量の) 確率変数である.

## (b) 母平均の差の検定 (t 検定)

(a)で述べたように、両方法による計測値の母分散には不等分散性が認められなかったことから、ソフトウェア法と最小二乗法により得られた計測値の標本平均に対して、「等分散を仮定した2標本の母平均の差の検定」を適用した。ソフトウェア法と最小二乗法により得られた $\varphi_{\text{sand}}$ の計測値の標本平均 $M_{\varphi_{\text{sand,soft}}}$ と $M_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}$ は、それぞれ35.6と35.7°であった。自由度(18=(10-1)+(10-1))のt分布において、検定統計量 $T$ 値は、

$$T = \frac{M_{\varphi_{\text{sand,soft}}} - M_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_{\varphi_{\text{sand,soft}}}} + \frac{1}{n_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}}\right) S^2}} = 0.028$$

$$\text{ここで、} S^2 = \frac{(n_{\varphi_{\text{sand,soft}}} - 1) S_{\varphi_{\text{sand,soft}}}^2 + (n_{\varphi_{\text{sand,LSM}}} - 1) S_{\varphi_{\text{sand,LSM}}}^2}{n_{\varphi_{\text{sand,soft}}} + n_{\varphi_{\text{sand,LSM}}} - 2} = 66.2$$

となる。この $T$ 値に対する有意確率 $P(T \leq t)$ は、 $T$ 値における相補累積確率0.98(=1-「累積確率」)となる。この値は有意水準の0.05より大きいことから、両方法による計測値の母平均に有意差は認められなかった。

以上、(a)と(b)により、ソフトウェア法と最小二乗法により得られた $\varphi_{\text{sand}}$ の計測値の母分散の間には不等分散性が認められないこと、母平均の間には有意差が認められないことを確認した。これにより、2.3.1および2.3.2項において $\varphi_{\text{sand,soft}}$ を用いることの妥当性が示された。

第3章では、鋳造品に転写された微視的斜面の角度(以下、記号を「 $\varphi_{\text{cast}}$ 」で表す)を計測し、 $\varphi_{\text{cast}}$ と $Rz_{\text{cast}}$ の関係を検討する。積層造形砂型に比べ、鋳造品の下部水平面や微視的斜面の凹凸は少なく、 $\varphi_{\text{cast}}$ は計測しやすい。このため、鋳造品では $\varphi_{\text{cast}}$ の計測精度の検証を行わず、砂型と同様に、ソフトウェア法により $\varphi_{\text{cast}}$ を画像計測した。

## 2.5 結言

積層造形砂型について、積層段差エッジ部の形状を画像計測し、巨視的斜面の角度 $\theta$ が大きくなると積層段差が視認されにくくなる現象の解明を試みた。併せて、積層段差を定量化するため、積層段差側面の画像から巨視的斜面の $Rz_{\text{sand}}$ を求める方法を検討した。また、その方法を用いて求めた $Rz_{\text{sand}}$ と $\theta$ の関係、さらに積

層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  および  $Rz_{\text{sand}}$  に及ぼす  $C_{B,m}$ 、配置の影響を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 積層段差エッジ部では突端の端面は水平面に対して鉛直面ではなく、微視的斜面(角度  $\varphi_{\text{sand}}$  の平均値は  $36^\circ$ 程度)が形成される。この斜面の形成については、砂の脱落によるモデルを用いて説明することができた。
- 2) 積層段差の視認可否のメカニズムに対して、水平面と微視的斜面を接続した折れ線のモデルを提案した。このモデルでは、 $\theta$  が大きくなるにしたがって微視的斜面に挟まれた水平面が狭くなり、 $\theta$  がこの  $\varphi_{\text{sand}}$  を超えると、水平面が消失し巨視的斜面が微視的斜面のみで構成されるようになるため、積層段差が視認されにくくなる。
- 3)  $\varphi_{\text{sand}}$  に対し、 $\theta$ 、 $C_{B,m}$ 、配置の 3 因子に関する 10 回繰り返しのあるデータについて、繰り返しのある 3 元配置の分散分析を適用した。その結果、各因子の主効果および 2,3 因子間の交互作用、いずれについても P 値は 0.05 を大きく上回っており、有意性は認められなかった。
- 4) 積層段差を定量化した  $Rz_{\text{sand}}$  と  $\theta$  の関係をモデル化した。このモデルを用いて、 $\varphi_{\text{sand}}$  の平均値から計算される  $Rz_{\text{sand}}$  と、画像計測により得られる垂直方向の平面の  $Rz_{\text{sand}}$  の大きい方が最終的な表面粗さを与えることを説明することができた。また、 $Rz_{\text{sand}}$  のばらつく範囲は概ね  $\varphi_{\text{sand}}$  の 95% 下方および上方予測限界で形成される  $Rz_{\text{sand}}$  と、垂直方向の平面の  $Rz_{\text{sand}}$  に囲まれた領域に相当する。
- 5)  $Rz_{\text{sand}}$  に対し、 $\theta$ 、 $C_{B,m}$ 、配置の 3 因子に関する 5 回繰り返しのあるデータについて、繰り返しのある 3 元配置の分散分析を適用した。その結果、 $\theta$  の主効果の有意性が認められた。 $\varphi_{\text{sand}}$  の結果と同様に、 $Rz_{\text{sand}}$  に及ぼす造形条件( $C_{B,m}$ 、配置)の影響は認められなかった。

## 参考文献

- 1) 岡根利光, 吉田誠, 神戸洋史, 大場好一, 永井康弘, 小岩井修二, 戸羽篤也, 兼吉高宏, “3D プリンターの砂型造形への適用による鑄造品と鑄造技術の高度化”, 鑄造工学, **90** (2018) 266
- 2) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構, “超精密三次元造形システム”, 第4回シンポジウム講演集, (2018) 80
- 3) 大場好一, 鈴木幸吉, 諏訪光範, 宮野英昭, 加藤陽介, 江端幹夫, 岡根利光, “量産適用を目指した高速砂型積層造形装置の開発”, 鑄造工学, **90** (2018) 274
- 4) Y. Nagai, K. Takeshita and T. Okane, “Additive Manufacturing Technology by Furan Sand Mold Using Sintered Artificial Sand Coated with Solid Catalyst”, Mater. Trans., **61** (2020) 734
- 5) <https://www.tsurumipump.co.jp/corporate/technology/3D-technology.php> 2023.5.1
- 6) P. M. Hackney and R. Wooldridge, “Characterisation of Direct 3D Sand Printing Process for the Production of Sand Cast Mould Tools”, Rapid Prototyping Journal, **23** (2017) 7
- 7) 富田祐輔, 藤井英俊, “積層造形砂型の曲げ強度に及ぼすかさ密度及び接触点数の影響”, 鑄造工学, **91** (2019) 148
- 8) 富田祐輔, 藤井英俊, “バインダジェット法積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす積層ピッチおよび樹脂添加量の影響”, 鑄造工学, **92** (2020) 225
- 9) 伊藤恭祐, 金森陽一, 中野真紘, “砂型積層造形を中子へ適用する際の造形条件の検討”, 三重県工業研究所 研究報告, **45** (2021) 24
- 10) S. Mitra, A. R. de Castro and M. El Mansori, “The Effect of Ageing Process on Three-Point Bending Strength and Permeability of 3D Printed Sand Molds”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **97(1-4)** (2018) 1241
- 11) N. Coniglio, T. Sivarupan and M. EL Mansori, “Investigation of Process Parameters Effect on Anisotropic Properties of 3D Printed Sand Molds”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **94** (2018) 2175
- 12) D. Snelling, C. Williams and A. Druschitz, “A Comparison of Binder Burnout and Mechanical Characteristics of Printed and Chemically Bonded Sand Molds”, 2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium, (2014) 197

- 13) S. Ramrattan, P. Patel, R. Shah, T. Senish and M. Nastac, “Non-Standard Testing to Qualify 3D Printed Sands”, AFS. Trans., **124** (2016) 141
- 14) 近藤義大, 金森陽一, 伊藤恭祐, 赤田英里, “積層造形装置で作製した砂型の鑄造時のガスの抑制方法”, 三重県工業研究所 研究報告, **45** (2021) 49
- 15) E. S. Almaghariz, B. P. Conner, L. Lenner, R. Gullapalli, G. P. Manogharan, B. Lamoncha and M. Fang, “Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores”, International Journal of Metalcasting, **10** (2016) 240
- 16) J. Walker, E. Harris, C. Lynagh, A. Beck, B. Vuksanovich, B. Conner, E. MacDonald, R. Lonardo, J. Thiel and K. Rogers, “3D Printed Smart Molds for Sand Casting”, International Journal of Metalcasting, **12** (2018) 785
- 17) 永井康弘, “フラン積層造形鑄型にりん酸塩と硫酸塩を含浸置換して製作した無機鑄型とその特性”, 鑄造工学, **94** (2022) 181
- 18) 安齋正博, “よくわかる RP (積層造形) の活用法－積層造形の基礎－”, 素形材, **52** (2011) 8, 29
- 19) 大庭孝之, 鈴木教和, 社本英二, “除去加工による 3 次元積層造形物の後処理技術に関する基礎的研究”, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2018) 491
- 20) 前田見悟, 河内襄介, 松石正克, 前川真樹, “レーザ焼結積層造形による中子を用いた鑄造物の表面粗さ”, 鑄造工学, **71** (1999) 709
- 21) 中川威雄, “積層造形法の応用分野”, レーザー研究, **24** (1996) 443
- 22) 朝倉慶子, “後処理で広がる積層造形品の可能性”, 素形材, **54** (2013) 6, 66
- 23) 金森陽一, 伊藤恭祐, 樋尾勝也, “積層造形砂型の表面粗さと積層段差”, 三重県工業研究所 研究報告, **44** (2020) 36



## 第3章 鋳鉄鋳造品に転写された積層段差エッジ部の形状と表面粗さ

### 3.1 緒言

積層造形による砂型の造形は，模型が不要，設計変更が容易，複雑形状でも一体成形が可能など優れた特徴を有する技術である<sup>1-4)</sup>．特に，バインダジェット式積層造形については，造形速度が速く，装置の大型化が可能であることから，試作に留まらず，砂型の量産への適用が期待されている<sup>1,5-7)</sup>．しかしながら，積層造形砂型では，積層段差の形成が課題となっている<sup>8-10)</sup>．

第2章において，積層造形砂型の積層段差について，砂の脱落モデルにより積層段差エッジ部での微視的斜面の形成を，折れ線モデルにより積層段差視認可否のメカニズムを説明した．また，積層段差を定量化した巨視的斜面の表面粗さとその斜面の角度の関係をモデル化し，そのばらつく範囲を明らかにした．しかし，砂型に形成された積層段差エッジ部の微視的斜面の角度および巨視的斜面の表面粗さの鋳造品への転写特性は明らかになっていない．それらの鋳造品への転写特性は，鋳造品の製造条件の影響を受けると考えられる．そのため，鋳造品に転写される微視的斜面の角度および巨視的斜面の表面粗さに及ぼす製造条件の影響に関する知見は，積層造形砂型および鋳造品を設計，製造する上で重要である．

そこで本研究では，積層造形砂型を用いて鋳造品の中で最も生産されている鋳鉄鋳造品を作製し，積層段差の鋳造品への転写特性を調べた．具体的には，巨視的斜面の角度，注湯温度，および焼付いた砂を除去するためのショットブラスト処理(以下，「SB処理」と記す)を取り上げ，統計解析を用いて，鋳造品の積層段差エッジ部の形状および巨視的斜面の表面粗さに及ぼす製造条件の影響の把握を試みた．

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 鋳造試験片の作製

Fig. 3-1 に作製した鋳造試験片の形状を示す．その形状は，巨視的斜面の角度  $\theta$  を 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45°とした「くさび型」であり，上面を 20×20mm とし，高

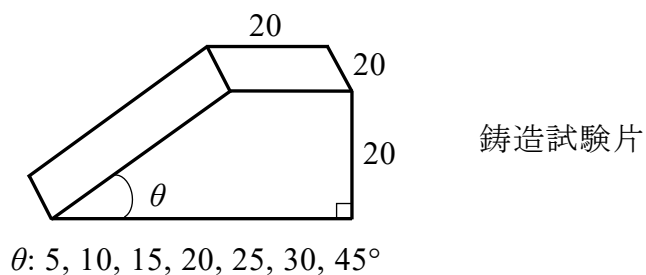


Fig. 3-1 Shape of cast specimen (unit: mm).

さを 20mm とした．この形状は第 2 章の Fig. 2-1 の砂型試験片と同じである．ただし，第 2 章の砂型試験片とは異なり，下底の長さが 50mm を超える铸造試験片については，下底の長さが 50mm になるように先端部を省略した形状とした．**Fig. 3-2** に铸造試験片を作製するための砂型(以下，「铸造用砂型」と記す)の形状を示す．**Fig. 3-3** に铸造用砂型の下型側面の模式図を示す．Fig. 3-1 の铸造試験片と Fig. 3-2 の铸造用砂型の関係は Fig. 3-3 のとおりである．

铸造用砂型の造形には，第 2 章と同じ，シーメット株式会社製積層造形装置

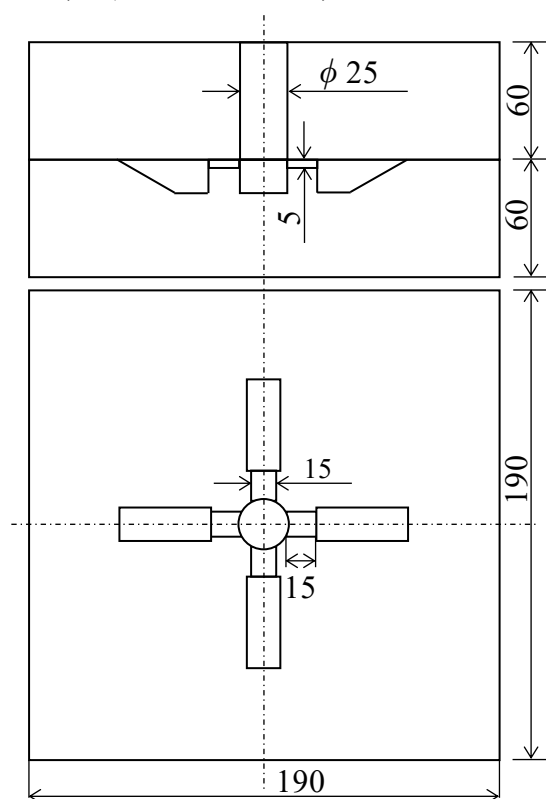


Fig. 3-2 Shape of casting sand mold (unit: mm).

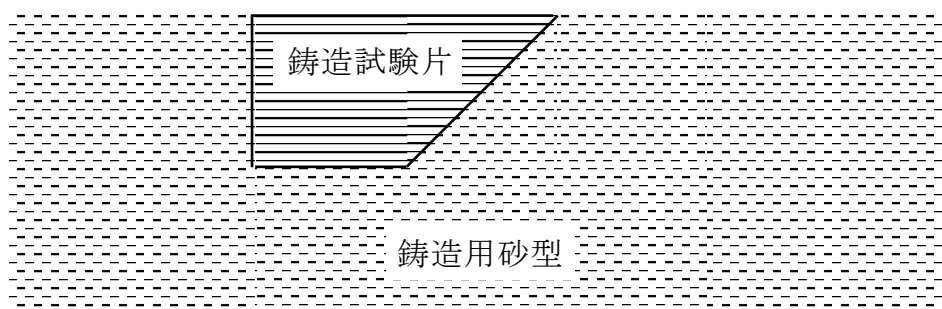


Fig. 3-3 Schematic diagram of casting sand mold showing relationship between casting sand mold and cast specimen.

SCM-10 を用いた。なお，铸造用砂型の造形方向は Fig. 3-2 の側面図の下面から上面方向とした。Table 3-1 に铸造用砂型の造形条件を示す。铸造用砂型の造形には，第 2 章と同一の人工砂を使用した。造形後の铸造用砂型の取り出し，砂落としの方法は 2.2.1 項のとおりとした。また，砂落とし後の铸造用砂型については，熱処理を行わず铸造に供した。

作製した铸造試験片は，铸铁铸造品の代表的な材質である FC250 相当とした。積層段差エッジ部の形状および巨視的斜面の表面粗さに及ぼす注湯温度の影響を調べるため，注湯温度は 1350, 1420℃の 2 条件とした。また，铸造後の後処理は，積層段差エッジ部の形状および巨視的斜面の表面粗さに及ぼす SB 処理の影響を調べるため，铸造後，刷毛などで砂を取り除いたもの(以下，「铸造放し材」と記す)および SB 処理を施したもの(以下，「SB 材」と記す)の 2 条件とした。SB 処理には新東工業株式会社製テーブル式ショットブラスト SNTOPA16 を用いた。また，SB 処理の投射材には，直径が約 1.4mm で，硬さが約 450HV の鋼球を用い，铸造試験片の表面と裏面に各 1 回，投射時間 5min の条件で SB 処理を施した。参考として，SB 処理前後の铸造試験片 7 個(5, 10, 15, 20, 25, 30, 45°)について，Fig. 3-1 の

Table 3-1 Molding conditions of casting sand mold.

Sand	artificial sand
Binder	furane 2.0mass%
Resolution in X, Y direction	200dpi
Layer thickness	0.28mm

20×20mm の部分の高さ(20mm)を各 5 か所測定した。その結果、SB 処理前後の高さの変化である、SB 処理による減耗厚さは注湯温度 1350℃と 1420℃で、それぞれ  $0.18 \pm 0.02$  mm と  $0.17 \pm 0.01$  mm (平均±標準偏差)でほぼ同じであった。この減耗厚さは表面と裏面の合計であることから、片面あたりの減耗厚さは約 0.09mm である。Table 2-1 のとおり、使用した人工砂は 106 $\mu$ m の階級にピークのあるシャープな粒度分布を有する砂であることから、砂の大きさは 0.13mm 程度((150 $\mu$ m(ふるいの目開きが 106 $\mu$ m の階級にある砂粒の径の最大値)+106 $\mu$ m(ふるいの目開きが 106 $\mu$ m の階級にある砂粒の径の最小値)/2 $\div$ 0.13mm)である。このため、今回施した SB 処理による減耗厚さは、焼付いた砂(一部が鑄造品内に取り込まれている砂)が除去される程度であると推定される。

### 3.2.2 鑄造試験片の評価

第 2 章と同様に、鑄造試験片の積層段差エッジ部の形状の代表値として積層段差エッジ部の微視的斜面の角度(以下、記号は「 $\phi_{\text{cast}}$ 」で表す)を積層段差側面から画像計測した。なお、鑄放し材では、注湯温度にかかわらず、刷毛で除去できず焼付いた砂が残っていたため、焼付いた砂を除外して  $\phi_{\text{cast}}$  を計測した。

第 2 章の砂型の計測と同様に、積層段差を定量化した巨視的斜面の表面粗さとその斜面の角度との関係を調べるため、積層段差側面の画像から最大高さ粗さ(以下、記号は「 $Rz_{\text{cast}}$ 」で表す)を計測した。 $Rz_{\text{cast}}$  の計測では、側面が鉛直上向き、かつ巨視的斜面が水平になるように鑄造試験片を設置し、カメラを積層段差側面に正対させて画像を取得した。取得した画像の画素数は横 1600×縦 1200pixel とし、画素サイズは 2.5 $\mu$ m/pixel とした。この条件で取得した画像の大きさは 4×3mm となる。各積層段差に対しては、山と谷が 1 組以上入る画像を 2 枚取得し、撮像システムの解像度の制約から、その 2 枚の画像から評価長さ 8mm の  $Rz_{\text{cast}}$  を一点求めた。Fig. 3-4 は 1 枚の画像の  $Rz_{\text{cast}}$  計測の概略図である。なお、鑄放し材では焼付いた砂が脱落せずに残っていたため、積層段差エッジ部の微視的斜面の角度の計測と同様に、焼付いた砂を除外して  $Rz_{\text{cast}}$  を計測した。また比較として、 $\theta$  が 0°の水平面(Fig. 3-1 の上面)および  $\theta$  が 90°の斜面(Fig. 3-1 の巨視的斜面と反対側の垂直方向の平面)についても、前述の方法により  $Rz_{\text{cast}}$  を計測した。

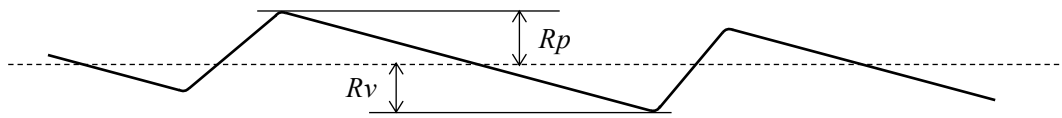


Fig. 3-4 Schematic diagram of maximum height roughness  $Rz_{\text{cast}}$  measurement.

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 鑄造品の積層段差エッジ部の形状

**Fig. 3-5** に代表的な鑄造試験片として，巨視的斜面の角度  $\theta$  が  $5^\circ$  の外観写真を示す．鑄放し材について，注湯温度が異なる a)  $1350^\circ\text{C}$  と b)  $1420^\circ\text{C}$  を比較すると，a), b) とともに表面に焼付いた砂は観察されるが，b) においてより多く観察される．SB 材について，注湯温度が異なる c)  $1350^\circ\text{C}$  と d)  $1420^\circ\text{C}$  を比較すると，c), d) とともに，SB 処理により砂が除去され，積層段差が明瞭に視認される．

代表的な積層段差エッジ部として，巨視的斜面の角度  $\theta$  が  $5^\circ$ ，注湯温度が  $1420^\circ\text{C}$  の積層段差側面の写真を **Fig. 3-6** に示す．なお，Fig. 3-6 の a) は鑄放し材，b) は SB

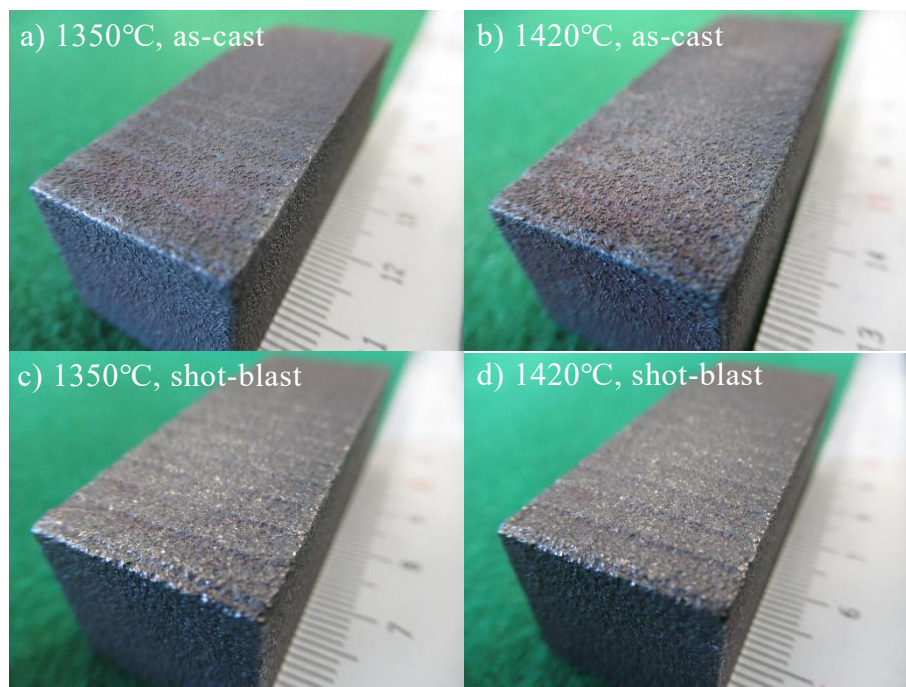


Fig. 3-5 Appearances of cast specimens (outer-shape slope angle  $\theta$ :  $5^\circ$ ).

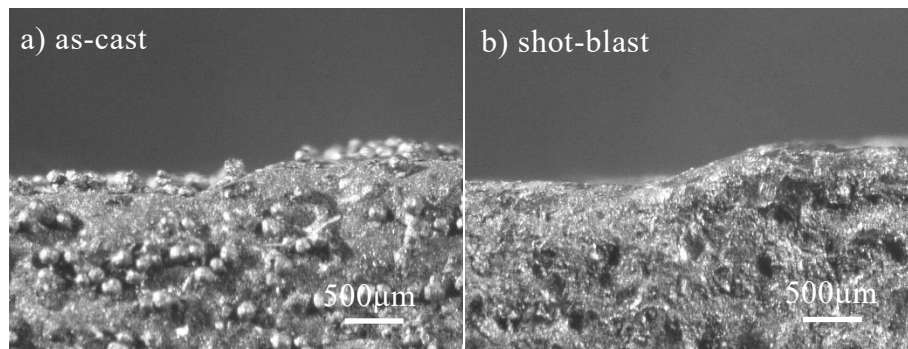


Fig. 3-6 Photographs of side view of stair-step (outer-shape slope angle  $\theta$ :  $5^\circ$ , pouring temperature:  $1420^\circ\text{C}$ ).

材である．a) 鑄放し材では表面に付着した砂は残っているが，側面からの写真であれば，砂を除外して微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{cast}}$  を計測できることがわかる．第2章の砂型の結果と同様に，鑄放し材と SB 材ともに積層段差エッジ部の端面は直角ではなく，角度  $\varphi_{\text{cast}}$  の微視的斜面となっていた．なお，この写真の積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{cast}}$  は a) 鑄放し材と b) SB 材それぞれ a)  $22^\circ$  と b)  $20^\circ$  である．

$\varphi_{\text{cast}}$  の具体的な計測手順は以下のとおりである．第2章の砂型試験片と同様に，まず，側面が鉛直上向き，かつ上面および下面が水平になるように鑄造試験片を設置し，カメラを積層段差側面に正対させて画像を取得した．取得した画像の画素数は横 1600×縦 1200pixel とし，画素サイズは  $2.4\mu\text{m}/\text{pixel}$  とした．次にソフトウェア法により，取得した画像の  $\varphi_{\text{cast}}$  を求めた．第2章の砂型と同様に， $\varphi_{\text{cast}}$  の計測には，株式会社イノテック製画像計測ソフトウェア Quick Grain の角度計測機能を用いた． $\varphi_{\text{cast}}$  の計測では，目視にて，下部水平面と微視的斜面の外形から特徴点を3点以上抽出し，それぞれに直線を引き，得られた2本の直線の交点から角度  $\varphi_{\text{cast}}$  を求めた．なお，特徴点については，下部水平面では高さが概ね揃っている画素，微視的斜面では，斜面の外形を構成する画素の中で画素と直線の距離が近くなる点とした．**Fig. 3-7** に  $\varphi_{\text{cast}}$  の計測例を示す．**Fig. 3-7** は **Fig. 3-6** の a) 鑄放し材，b) SB 材の  $\varphi_{\text{cast}}$  を計測した例である．前述のとおり，a) 鑄放し材では，表面の焼付いた砂を除外して  $\varphi_{\text{cast}}$  を計測した．この方法により， $\varphi_{\text{cast}}$  を10か所計測した．

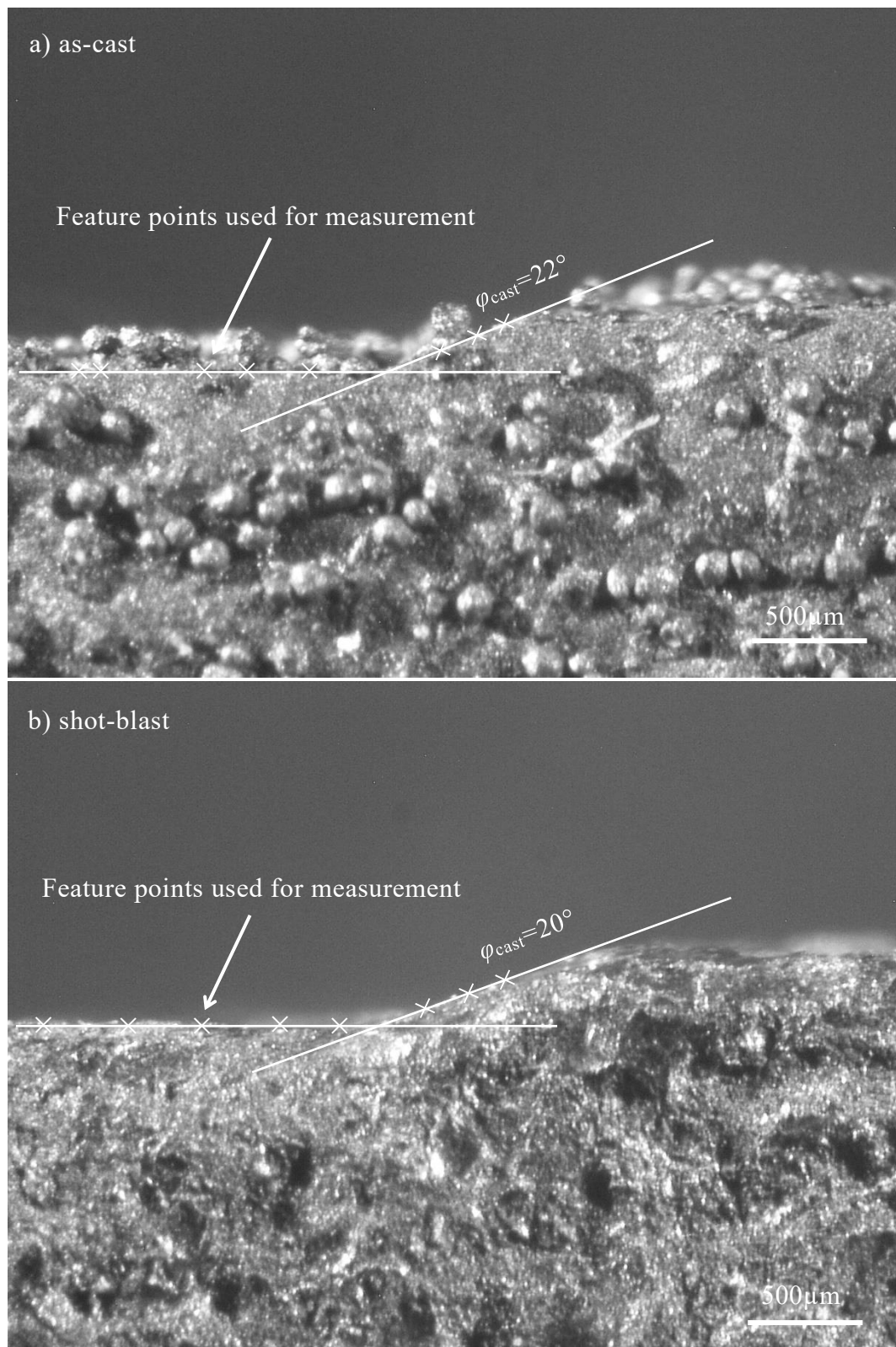


Fig. 3-7 Examples of  $\phi_{\text{cast}}$  measurement.

**Fig. 3-8** に，鑄造試験片の積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{cast}}$  を計測した結果を示す．また，比較として第 2 章の砂型  $\varphi_{\text{sand}}$  の結果(バインダ含有率  $C_{B,m}$  が 2.0mass%で，おもて配置)も示す．なお，エラーバーは標準偏差である．鑄放し材，SB 材ともに，巨視的斜面の角度  $\theta$  が 5～15°において積層段差エッジ部の  $\varphi_{\text{cast}}$  の計測が可能で， $\theta$  が 20～45°において  $\varphi_{\text{cast}}$  の計測が困難であった．**Fig. 3-9** に鑄放し材の a)  $\theta=15^\circ$  と b)  $\theta=20^\circ$  の積層段差側面の写真を，**Fig. 3-10** に SB 材の a)  $\theta=15^\circ$  と b)  $\theta=20^\circ$  の積層段差側面の写真を示す．Fig. 3-9 の鑄放し材，Fig. 3-10 の SB 材ともに， $\theta=15^\circ$  では，斜面と水平面は判別できる．他方， $\theta=20^\circ$  では，水平面が判別できず，Fig. 3-9 の鑄放し材，Fig. 3-10 の SB 材ともに， $\varphi_{\text{cast}}$  を計測できないことがわかる．このため，Fig. 3-8 では  $\theta$  が 5～15°について， $\varphi_{\text{cast}}$  を 10 回計測した平均がプロットされている．なお，砂型では， $\theta$  が 5～20°において積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  の計測が可能であった．したがって，この結果は砂型に比して，鑄放し材と SB 材ともに積層段差エッジ部の微視的斜面の角度の計測

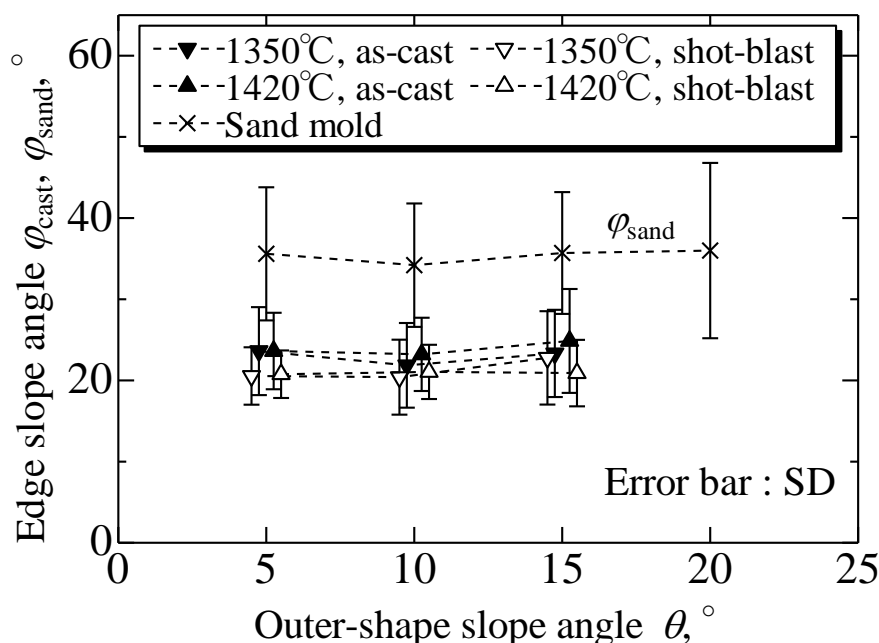


Fig. 3-8 Relationships between outer-shape slope angles  $\theta$  and edge slope angles  $\varphi_{\text{cast}}$ .

To make the graph easier to read, the outer-shape slope angles  $\theta$  for pouring temperatures of 1350°C and 1420°C are plotted at  $-0.25^\circ$  and  $+0.25^\circ$  for as-cast and  $-0.5^\circ$  and  $+0.5^\circ$  for shot-blast with respect to their actual values, respectively.



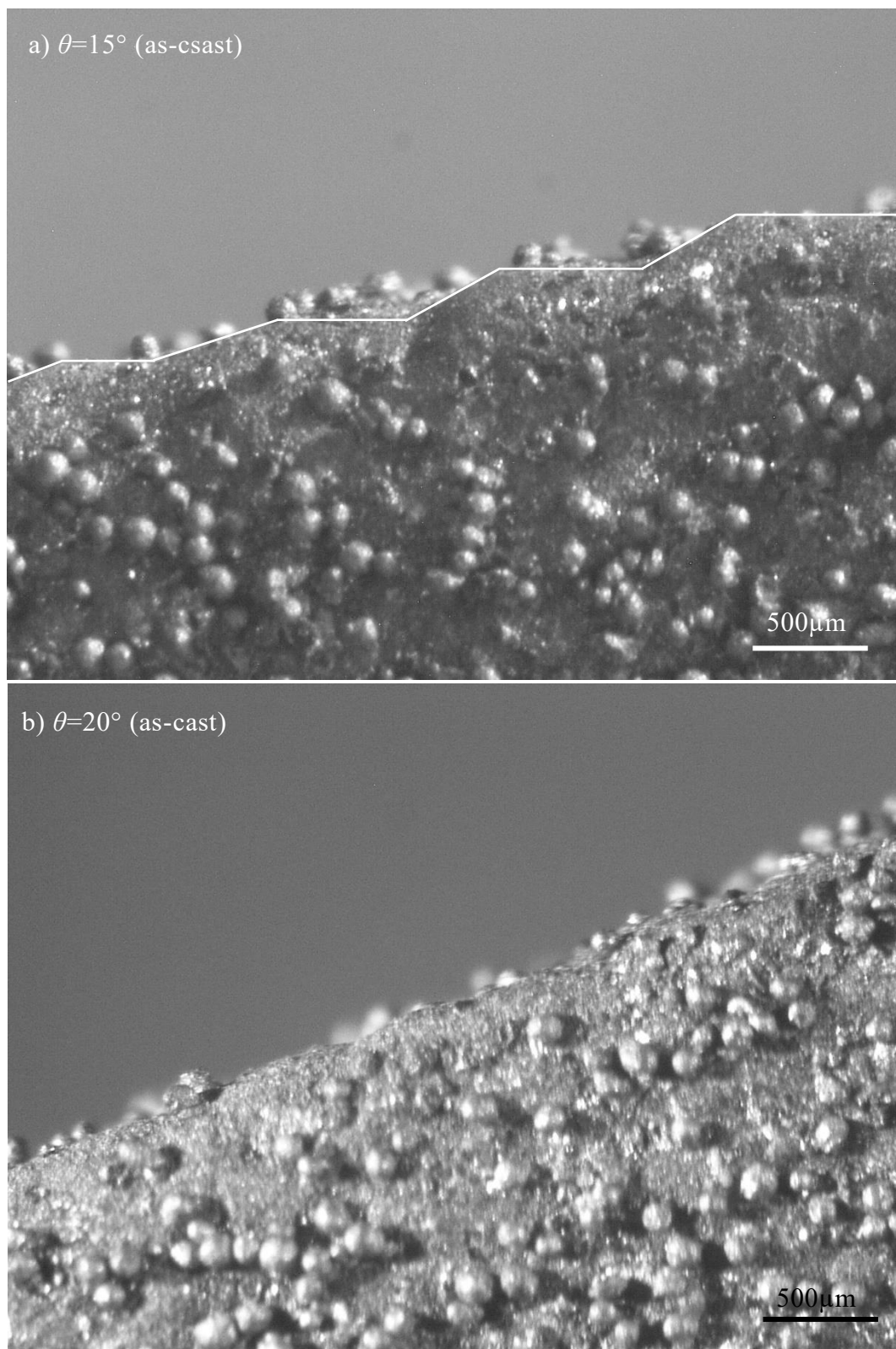


Fig. 3-9 Enlarged pictures of side of stair-steps at outer-shape slope angle  $\theta$  of  $15^\circ$  and  $20^\circ$  (as-cast, pouring temperature:  $1420^\circ\text{C}$ ).

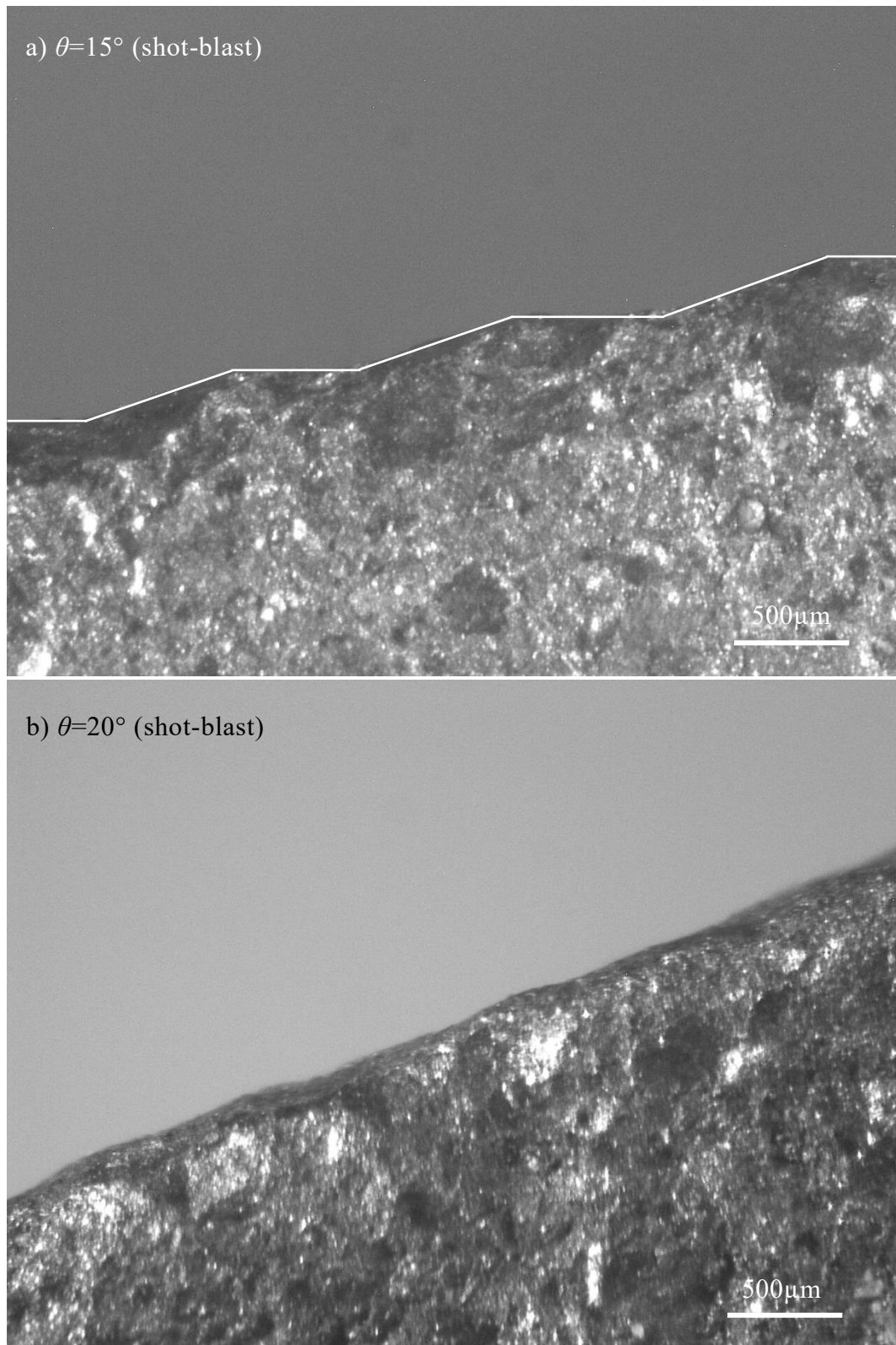


Fig. 3-10 Enlarged pictures of side of stair-steps at outer-shape slope angle  $\theta$  of  $15^\circ$  and  $20^\circ$  (shot-blast, pouring temperature:  $1420^\circ\text{C}$ ).

できる範囲が 5°狭くなったことを示している. Fig. 3-8 から, 砂型の  $\phi_{\text{sand}}(\times)$  に比して, 鑄放し材(▼, ▲), SB 材(▽, △)の  $\phi_{\text{cast}}$  は大幅に小さくなったことがわかる. また, 鑄放し材と SB 材を比較するとエラーバーは大きいものの, 注湯温度にかかわらず  $\phi_{\text{cast}}$  はそれぞれ約 23°と 21°であり, わずかな差が確認された. しかし, 鑄放し材, SB 材ともに注湯温度にかかわらず,  $\phi_{\text{cast}}$  に及ぼす  $\theta$  の影響は小さいと推察される.

$\phi_{\text{cast}}$  に及ぼす  $\theta$ , 注湯温度, SB 処理の影響を統計的に解析するため, 3 因子に対し,  $\theta$  は 5, 10, 15°, 注湯温度は 1350, 1420°C, SB 処理は鑄放し材, SB 材を水準に設定し, 10 回繰り返しのある 3 元配置の分散分析を適用した. **Table 3-2** はその分散分析表である. Table 3-2 に示すように,  $\phi_{\text{cast}}$  に対し SB 処理の主効果の P 値は 0.01 で 0.05 未満であり, 有意であると認められた. 一方,  $\theta$  および注湯温度の主効果および 2 因子間の交互作用, さらに 3 因子間の交互作用, いずれについても P 値は 0.05 を大きく上回っており, 有意性は認められなかった. 以上の結果,

Table 3-2 ANOVA table for edge slope angle  $\phi_{\text{cast}}$ .

	Factor	Sum of squares	degree of freedom	Average sum of squares	Test statistic F	Significance probability (P-value)	
Main Effect	Angle	36.5	2	18.26	0.80	0.45	
	Temperature	3.0	1	2.99	0.13	0.72	
	Shot-blast	164.5	1	164.46	7.25	0.01	**
2-factor interaction	Angle× Temperature	7.5	2	3.73	0.16	0.85	
	Temperature× Shot-blast	12.7	1	12.71	0.56	0.46	
	Shot-blast× Angle	6.8	2	3.39	0.15	0.86	
3-factor interaction	Angle× Temperature× Shot-blast	17.8	2	8.88	0.39	0.68	
error	Error factor	2450.4	108	22.69	-	-	

\*\*:  $p < 0.01$

\* :  $p < 0.05$  (No applicable results in this tests)

$\varphi_{\text{cast}}$  に対する SB 処理の影響の有意性が認められ、巨視的斜面の角度および注湯温度の影響は認められないことが明らかになった。

3 元配置の分散分析の結果、 $\varphi_{\text{cast}}$  に対し SB 処理の主効果に有意性が確認されたことから、その条件の異なる鋳放し材と SB 材について、これらを分けて  $\varphi_{\text{cast}}$  の計測値を累積確率で整理した。その結果を **Fig. 3-11** に示す。 $\varphi_{\text{cast}}$  の計測値は鋳放し材と SB 材ともに、 $\theta$  が 3 条件、注湯温度が 2 条件、各条件 10 個で合計 60 個である。Fig. 3-11 の●と○は、それぞれ鋳放し材の  $\varphi_{\text{cast}}$ 、SB 材の  $\varphi_{\text{cast}}$  である。比較として第 2 章の砂型の  $\varphi_{\text{sand}}$  の結果(×)も示す。鋳放し材、SB 材ともに、 $\varphi_{\text{cast}}$  の立ち上がり角度は  $14^\circ$  で砂型の  $19^\circ$  に比して  $5^\circ$  小さくなった。また、 $\varphi_{\text{cast}}$  の中央値は鋳放し材、SB 材それぞれ  $23^\circ$  と  $20^\circ$  で、これは砂型  $\varphi_{\text{sand}}$  の  $35^\circ$  に比してそれぞれ  $12^\circ$  と  $15^\circ$  小さい値である。さらに累積確率が 1 となる  $\varphi_{\text{cast}}$  の最大角度は鋳放し材、SB 材それぞれ  $39^\circ$  と  $36^\circ$  で、砂型  $\varphi_{\text{sand}}$  の  $61^\circ$  に比してそれぞれ  $22^\circ$  と  $25^\circ$  小さい値である。以上の結果を整理する。まず、砂型  $\varphi_{\text{sand}}$  と鋳放し材  $\varphi_{\text{cast}}$  を比較すると、最大角度、中央値、立ち上がり角度の順に両者の差は大きくなっている。この両者の差については、 $\varphi_{\text{sand}}$  が大きい微視的斜面ほど溶湯により砂が脱落し、脱落后

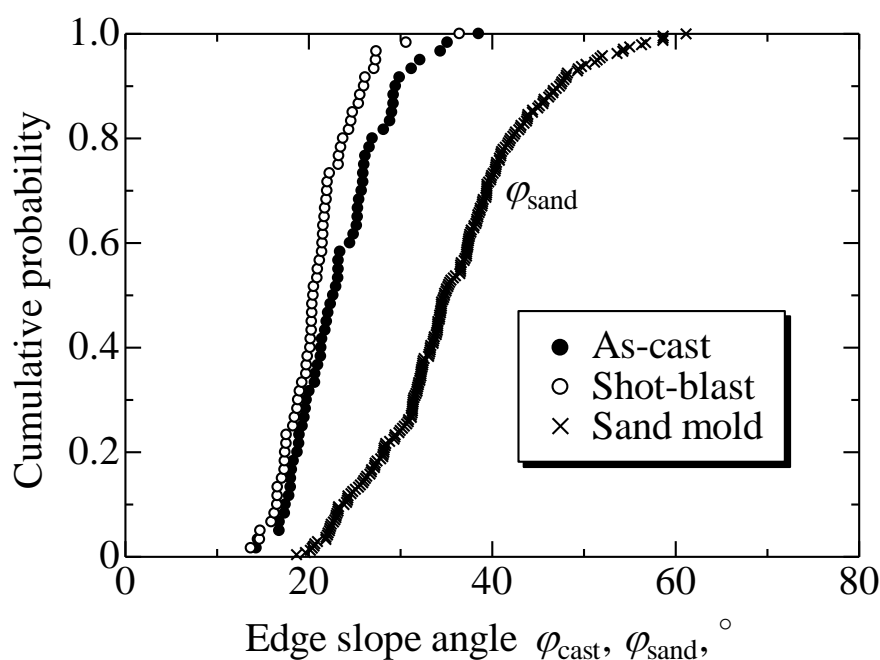


Fig. 3-11 Cumulative probability of edge slope angles  $\varphi_{\text{cast}}$ .

の砂型の形状が鑄放し材に転写されたことにより生じたと推察される．また，この結果は砂型から鑄造品への形状の転写特性を示していると考えられる．鑄放し材と SB 材を比較すると，立ち上がり角度では  $\varphi_{\text{cast}}$  に差はないが，最大角度，中央値の  $\varphi_{\text{cast}}$  の差は  $3^\circ$  である．この結果については，鑄放し材の  $\varphi_{\text{cast}}$  が大きい微視的斜面ほど SB 処理により積層段差エッジ部が圧潰され， $\varphi_{\text{cast}}$  が小さくなったことによるものと推察される．しかし，本実験の条件では，砂型と鑄放し材との差に比べるとその減少の程度は小さかった．

$\varphi_{\text{cast}}$  の 60 個の計測値の平均は鑄放し材では  $23^\circ$ ，SB 材では  $21^\circ$ ，標準偏差は鑄放し材では  $5.2^\circ$ ，SB 材では  $4.0^\circ$  であった．t 分布に基づいて，平均，標準偏差を用い 95% の下方および上方予測限界を求めると，鑄放し材では約  $13.1, 33.7^\circ$ ，SB 材では約  $13.0, 29.2^\circ$  であった．第 2 章の砂型の結果 (95% の下方および上方予測限界は約  $18.7, 52.7^\circ$ ) と鑄放し材を比較すると，鑄放し材の 95% の下方および上方予測限界ともに小さくなったが，特に上方予測限界が大幅に小さくなった．この結果は，Fig. 3-11 において  $\varphi_{\text{sand}}$  が大きい微視的斜面ほど鑄放し材の  $\varphi_{\text{cast}}$  が小さくなったことに対応している．また，鑄放し材と SB 材を比較すると，下方予測限界は同じで，SB 材の上方予測限界はわずかに小さくなった．この結果も Fig. 3-11 において，鑄放し材の  $\varphi_{\text{cast}}$  が大きい微視的斜面ほど，SB 材の  $\varphi_{\text{cast}}$  が小さくなったことに対応している．

次に，Fig. 2-14 の c) と d) のモデルを用いて，鑄放し材の  $\varphi_{\text{cast}}$  が形成されるメカニズムについて考察する．c) の  $\varphi_{\text{sand}}=30^\circ$  になるモデルは，砂型の  $\varphi_{\text{sand}}$  の平均に近い条件を説明している．d) の  $\varphi_{\text{sand}}=19^\circ$  のモデルは，c) の最上層から 2 個，中間層から 1 個，合計 3 個の砂の脱落により形成される．この砂の脱落は，鑄造により生じると考えられる．まず，溶湯により c) の砂型から砂が脱落し d) の砂型になる．次に，d) の砂型で凝固することにより，d) の砂型の形状が鑄放し材に転写され，鑄放し材の積層段差エッジ部に角度  $\varphi_{\text{cast}}$  の微視的斜面が形成される．

### 3.3.2 鑄造品の表面粗さ

積層段差の転写特性に及ぼす鑄造品の製造条件の影響を定量的に評価するため，第 2 章の砂型と同様に，鑄造品の積層段差側面の画像から  $Rz_{\text{cast}}$  を計測し，積層段

差を定量化した。  $Rz_{\text{cast}}$  の具体的な計測方法は以下のとおりである。まず、3. 2. 2 項のとおり、2 枚の画像(画像の大きさは横 4×縦 3mm, 画素数は 1600×1200pixel, 画素サイズは 2.5 $\mu\text{m}$ /pixel)を取得した。次に、第 2 章の  $Rz_{\text{sand}}$  の計測と同様に、取得した 2 枚の画像について、画像計測ソフトウェアの寸法計測機能を用いて、目視にて、斜面の水平面と最も高い山間の距離  $Rp_1$ ,  $Rp_2$  と最も低い谷間の距離  $Rv_1$ ,  $Rv_2$  を計測した。ここで、それぞれの添え字は画像 1 と 2 を表す。Fig. 3-12 に  $\theta$  が 5°の条件の  $Rz_{\text{cast}}$  の計測例を示す。Fig. 3-12 の a)は鑄放し材, b)は SB 材の  $Rp_1$  と  $Rv_1$  を計測した例である。なお、前述のとおり、a) 鑄放し材では焼付いた砂を除外して  $Rz_{\text{cast}}$  を計測した。次に、それらの和  $Rp_1+Rv_1=Rz_{\text{cast},1}$ ,  $Rp_2+Rv_2=Rz_{\text{cast},2}$  を比較し、和の大きい方を対象の積層段差の  $Rz_{\text{cast}}$  とした。この方法により、場所を変えて  $Rz_{\text{cast}}$  を 5 回計測した。なお、本研究では評価長さ間を 2 つに分割し、それぞれの和  $Rz_{\text{cast},1}$  と  $Rz_{\text{cast},2}$  を比較し、和の大きい方を  $Rz_{\text{cast}}$  としているため、得られた  $Rz_{\text{cast}}$  については若干小さく評価されている可能性がある。

Fig. 3-13 は注湯温度 1350°Cと 1420°Cの鑄放し材の積層段差を定量化した  $Rz_{\text{cast}}$  と  $\theta$  の関係である。比較として、第 2 章の砂型の結果も示す。なお、エラーバーは標準偏差である。また、Fig. 3-14 に巨視的斜面の角度  $\theta$  と積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{cast}}$  を考慮した  $Rz_{\text{cast}}$  の模式図を示す。Fig. 3-14 の積層段差の山-谷間の垂直方向の距離  $d$  は、積層厚さを  $t$  とすると式(3-1)で表される。式(3-1)の  $d$  は模式図のモデルのとおり積層段差が形成されると仮定すると、 $Rz_{\text{cast}}$  となる。

$$d = (l-a) \sin\theta = (t/\tan\theta - t/\tan\varphi_{\text{cast}}) \sin\theta \quad (3-1)$$

Fig. 3-13 の点線( $\varphi_{\text{cast}} = 13, 23, 34^\circ$ )は、式(3-1)の  $\varphi_{\text{cast}}$  に  $\varphi_{\text{cast}}$  の 95%下方予測限界の  $13^\circ$ ,  $\varphi_{\text{cast}}$  の平均値の  $23^\circ$ ,  $\varphi_{\text{cast}}$  の 95%上方予測限界の  $34^\circ$ を代入して求めた  $Rz_{\text{cast}}$  と  $\theta$  の関係を示している。Fig. 3-13 から、注湯温度 1350, 1420°Cともに、 $\theta$  が大きくなるとともに  $Rz_{\text{cast}}$  は小さくなり、 $\theta$  が  $15^\circ$ 以上になると、 $Rz_{\text{cast}}$  は 110 $\mu\text{m}$  程度でほぼ一定になった。この傾向に注湯温度による差は認められない。 $Rz_{\text{cast}}$  と、3 本の点線および 1350, 1420°Cの垂直方向の平面の  $Rz_{\text{cast}}(90^\circ$ の計測値)と比較すると、 $\theta$  が  $5\sim 10^\circ$ までは、 $Rz_{\text{cast}}$  は  $\varphi_{\text{cast}} = 23^\circ$ の点線とよく一致した。これは  $\varphi_{\text{cast}}$  の平均値が  $23^\circ$ になっていることに起因すると考えられる。 $\theta$  が  $15^\circ$ 以上では、 $Rz_{\text{cast}}$  は  $90^\circ$  の計測値よりわずかに大きいものの、概ね一致した。以上を総括すると、 $Rz_{\text{cast}}$  に

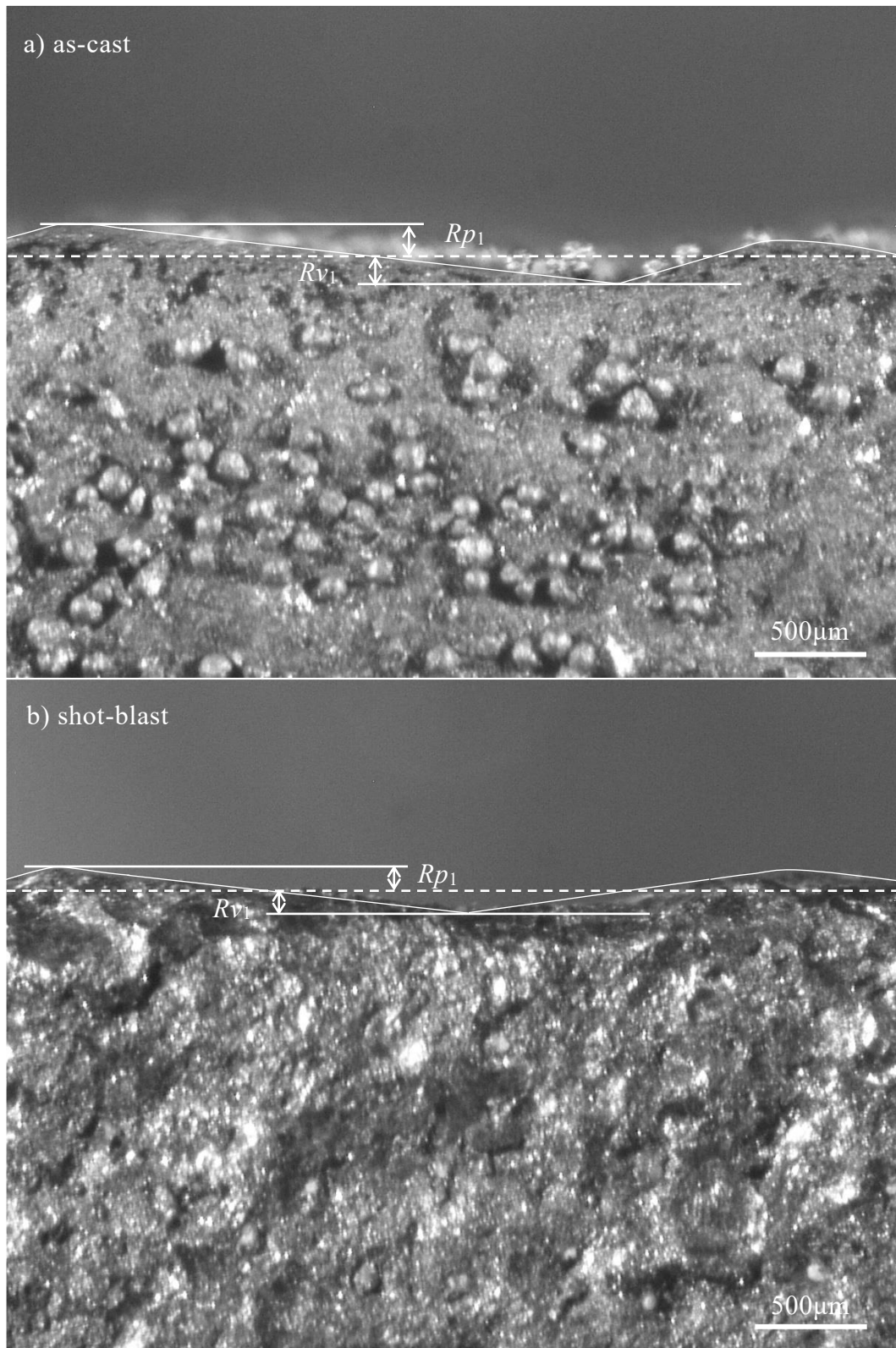


Fig. 3-12 Examples of maximum height roughness  $Rz_{\text{cast}}$  measurement.

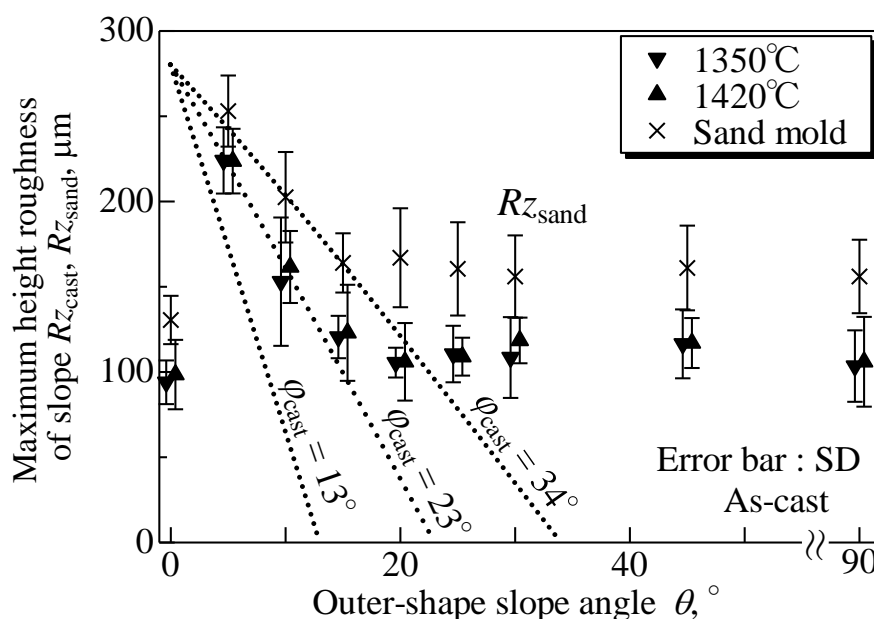


Fig. 3-13 Relationships between outer-shape slope angles  $\theta$  and maximum height roughness  $Rz_{\text{cast}}$  (as-cast).

To make the graph easier to read, the outer-shape slope angle  $\theta$  for pouring temperatures of 1350°C and 1420°C are plotted at  $-0.4^\circ$  and  $+0.4^\circ$  with respect to their actual values, respectively.

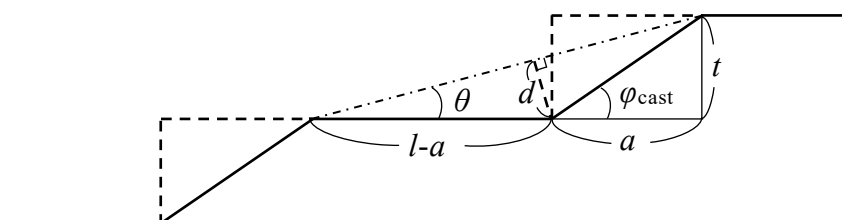


Fig. 3-14 Schematic diagram of maximum height roughness  $Rz_{\text{cast}}$  considering outer-shape slope angle  $\theta$  and edge slope angle  $\phi_{\text{cast}}$ .

については、 $\phi_{\text{cast}}$  の平均値から計算される  $Rz_{\text{cast}}$  と、画像計測により得られる垂直方向の平面の  $Rz_{\text{cast}}$  の大きい方が最終的な表面粗さを与えることを示している。また、 $Rz_{\text{cast}}$  のばらつく範囲は概ね  $\phi_{\text{cast}}$  の 95% 下方および上方予測限界で形成される  $Rz_{\text{cast}}$  と、垂直方向の平面の  $Rz_{\text{cast}}$  (エラーバーを含む) に囲まれた領域に入っていることがわかる。第 2 章の砂型の結果と比較すると、鑄放し材、SB 材ともに、 $Rz_{\text{cast}}$



は  $50\mu\text{m}$  程度小さくなったが、 $Rz_{\text{cast}}$  と  $\theta$  の関係は概ね同じであった。

**Fig. 3-15** は注湯温度  $1350^\circ\text{C}$ 、 $1420^\circ\text{C}$ での SB 材の  $Rz_{\text{cast}}$  と  $\theta$  の関係である。比較として、鑄放し材の注湯温度  $1350^\circ\text{C}$ の結果も示す。なお、エラーバーは標準偏差である。SB 材の注湯温度  $1350^\circ\text{C}$ と  $1420^\circ\text{C}$ についても、Fig. 3-13 と同様の傾向が確認された。

$Rz_{\text{cast}}$  に及ぼす巨視的斜面の角度  $\theta$ 、注湯温度、SB 処理の影響を統計的に解析するため、3 因子に対し、 $\theta$  は  $0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 90^\circ$ 、注湯温度は  $1350, 1420^\circ\text{C}$ 、SB 処理は鑄放し材、SB 材を水準に設定し、5 回繰り返しのある 3 元配置の分散分析を適用した。**Table 3-3** はその分散分析表である。Table 3-3 に示すように、 $Rz_{\text{cast}}$  に対し  $\theta$  の主効果の P 値は  $0.00$  で  $0.05$  未満であり、有意であると認められた。また、SB 処理の主効果の P 値は  $0.07$  で  $0.1$  未満であり、有意傾向が認められた。一般的に P 値が  $0.05$  未満であるとき、因子の効果が有意、P 値が  $0.1$  未満である

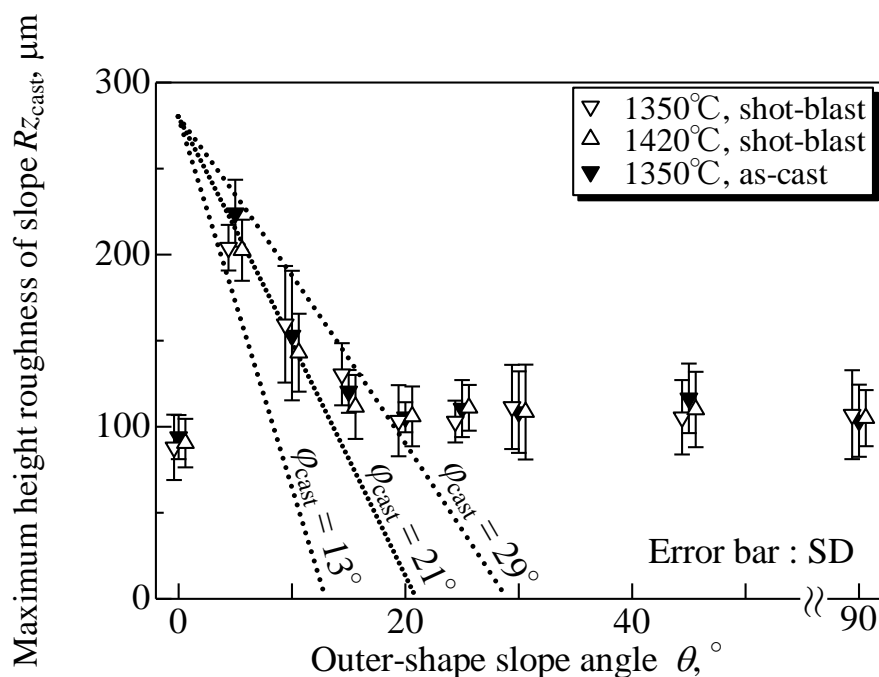


Fig. 3-15 Relationships between outer-shape slope angles  $\theta$  and maximum height roughness  $Rz_{\text{cast}}$  (shot-blast).

To make the graph easier to read, the outer-shape slope angle  $\theta$  for pouring temperatures of  $1350^\circ\text{C}$  and  $1420^\circ\text{C}$  are plotted at  $-0.6^\circ$  and  $+0.6^\circ$  with respect to their actual values, respectively.

Table 3-3 ANOVA table for maximum height roughness  $Rz_{\text{cast}}$ .

	Factor	Sum of squares	degree of freedom	Average sum of squares	Test statistic F	Significance probability (P-value)	
Main Effect	Angle	225363.6	8	28170.46	69.14	0.00	**
	Temperature	0.0	1	0.00	0.00	1.00	
	Shot-blast	1388.7	1	1388.66	3.41	0.07	†
2-factor interaction	Angle× Temperature	499.8	8	62.47	0.15	1.00	
	Temperature× Shot-blast	452.5	1	452.49	1.11	0.29	
	Shot-blast× Angle	1755.6	8	219.45	0.54	0.83	
3-factor interaction	Angle× Temperature× Shot-blast	1520.2	8	190.02	0.47	0.88	
error	Error factor	58672.1	144	407.45	-	-	

\*\* :  $p < 0.01$ , † :  $p < 0.1$

\* :  $p < 0.05$  (No applicable results in this tests)

とき、有意傾向であると判断される。一方、注湯温度の主効果および 2 因子間の交互作用、さらには 3 因子間の交互作用、いずれについても P 値は 0.05 を大きく上回っており、有意性は認められなかった。以上の結果、 $Rz_{\text{cast}}$  に対して巨視的斜面の角度の影響の有意性および SB 処理の影響の有意傾向が認められたが、注湯温度の影響は認められないことが明らかになった。

### 3.3.3 積層段差への対策

本研究で得られた知見を踏まえ、鑄造品の積層段差への対策について述べる。積層造形砂型を造形する段階での対策としては、巨視的斜面の角度による対策が挙げられる。砂型を、斜面を含む部分と斜面を含まない部分に分割し、斜面を含む部分の斜面を平面、あるいは鑄造品の  $\varphi_{\text{cast}}$  の平均値である  $20^\circ$  程度に傾けた形で砂型を造形する。そして、分割した砂型を組み合わせて鑄造する方法が考えられる。この対策により  $Rz_{\text{cast}}$  を小さくすることが可能である。また、鑄造による転写により、鑄造品の  $\varphi_{\text{cast}}$  および  $Rz_{\text{cast}}$  は積層造形砂型の  $\varphi_{\text{sand}}$  および  $Rz_{\text{sand}}$  に比べ小

さくなる．さらに，SB 処理を施すことも積層段差への対策となる．SB 処理は  $\phi_{\text{cast}}$  を低下させ， $Rz_{\text{cast}}$  を小さくできる．なお，注湯温度については  $\phi_{\text{cast}}$  および  $Rz_{\text{cast}}$  に対し有意性が認められないことから，注湯温度による対策は有効ではない．

### 3.4 結言

積層造形砂型により作製された鋳鉄鋳造品について，積層段差エッジ部の形状を画像計測し，微視的斜面の角度  $\phi_{\text{cast}}$  と巨視的斜面の  $Rz_{\text{cast}}$  に及ぼす製造条件の影響を，統計的手法を用いて解析した．その結果，以下のことが明らかとなった．

- 1) 鋳放し材では， $\phi_{\text{sand}}$  が大きい微視的斜面ほど溶湯により砂が脱落し，脱落後の砂型の形状が鋳放し材に転写されたと推察される．この結果は砂型から鋳造品への形状の転写特性を示していると考えられる．SB 材でも，鋳放し材の  $\phi_{\text{cast}}$  が大きい微視的斜面ほど SB 処理による圧潰により  $\phi_{\text{cast}}$  は小さくなったと推察されるが，本実験の条件では鋳造に比してその効果は小さかった．
- 2)  $\phi_{\text{cast}}$  に対し， $\theta$ ，注湯温度，SB 処理の 3 因子に関する 10 回繰り返しのあるデータについて，繰り返しのある 3 元配置の分散分析を適用した．SB 処理の主効果の P 値は 0.01 であり，有意であると認められた．
- 3) 鋳造品においても，積層段差を定量化した  $Rz_{\text{cast}}$  と  $\theta$  の関係をモデル化した．このモデルを用いて， $\phi_{\text{cast}}$  の平均値から計算される  $Rz_{\text{cast}}$  と，画像計測により得られる垂直方向の平面の  $Rz_{\text{cast}}$  の大きい方が最終的な表面粗さを与えることを説明できた．また， $Rz_{\text{cast}}$  のばらつく範囲は概ね  $\phi_{\text{cast}}$  の 95% 下方および上方予測限界で形成される  $Rz_{\text{cast}}$  と，垂直方向の平面の  $Rz_{\text{cast}}$  に囲まれた領域に相当する．
- 4)  $Rz_{\text{cast}}$  に対し， $\theta$ ，注湯温度，SB 処理の 3 因子に関する 5 回繰り返しのあるデータについて，繰り返しのある 3 元配置の分散分析を適用した．その結果， $\theta$  の主効果の有意性と SB 処理の主効果に有意傾向が認められた．
- 5) 積層段差への対策として，砂型の段階で巨視的斜面を含む部分を分割し，斜面を平面，あるいは  $20^\circ$  程度に傾けた形で造形し，分割した砂型を組み合わせる方法が考えられる．また，SB 処理は積層段差エッジ部の微視的斜面の角度を低下させ， $Rz_{\text{cast}}$  を小さくすることが可能であるが，注湯温度による対策は有効ではない．

## 参考文献

- 1) 岡根利光, 吉田誠, 神戸洋史, 大場好一, 永井康弘, 小岩井修二, 戸羽篤也, 兼吉高宏, “3D プリンターの砂型造形への適用による鑄造品と鑄造技術の高度化”, 鑄造工学, **90** (2018) 266
- 2) M. Upadhyay, T. Sivarupan and M. El Mansori, “3D Printing for Rapid Sand Casting - A Review”, Journal of Manufacturing Processes, **29** (2017) 211
- 3) E. S. Almaghariz, B. P. Conner, L. Lenner, R. Gullapalli, G. P. Manogharan, B. Lamoncha and M. Fang, “Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores”, International Journal of Metalcasting, **10** (2016) 240
- 4) P. M. Hackney and R. Wooldridge, “Characterisation of Direct 3D Sand Printing Process for the Production of Sand Cast Mould Tools”, Rapid Prototyping Journal, **23** (2017) 7
- 5) 小岩井修二, “(株) コイワイにおける 3D プリンターの活用”, 日本鑄造工学会第 169 回全国講演大会技術講習会テキスト, (2017) 7
- 6) 大場好一, 鈴木幸吉, 諏訪光範, 宮野英昭, 加藤陽介, 江端幹夫, 岡根利光, “量産適用を目指した高速砂型積層造形装置の開発”, 鑄造工学, **90** (2018) 274
- 7) 小川学, “鑄造用砂型 3D プリンタを活用した省力化”, 日本鑄造工学会第 181 回全国講演大会技術講習会テキスト, (2023) 47
- 8) K. Woods and S. Ravi, “Design Considerations for Three Dimensional Printed Cores and Molds”, AFS. Trans., **123** (2015) 169
- 9) C. Hartmann, L. van den Bosch, J. Spiegel, D. Rumschöttel and D. Günther, “Removal of Stair-Step Effects in Binder Jetting Additive Manufacturing Using Grayscale and Dithering-Based Droplet Distribution”, MDPI Materials, **15** (2022) 3798
- 10) 前田見悟, 河内襄介, 松石正克, 前川真樹, “レーザ焼結積層造形による中子を用いた鑄造物の表面粗さ”, 鑄造工学, **71** (1999) 709

## 第 4 章 影線間距離計測法を用いた積層造形砂型の 積層厚さの推定

### 4.1 緒言

積層造形砂型を活用した鑄造技術では、複雑形状への対応が望まれている<sup>1,2)</sup>。複雑形状の砂型を造形するためには、積層造形砂型の寸法精度および強度の向上が必須である。これまでに、砂型の寸法精度<sup>3,4)</sup>、砂型を一定期間造形した際の寸法誤差の変動挙動<sup>5)</sup>、砂型の曲げや圧縮などの機械的特性に及ぼす各種造形条件の影響<sup>6-11)</sup>が調べられている。しかし、測定時に砂が脱落してしまうため、砂型に対しては一般的に行われている測定、例えば、接触式表面粗さ測定機を用いた表面粗さの測定は困難である<sup>12)</sup>。このため、複雑形状に対応するためには、積層造形砂型の寸法精度および強度の向上に加え、砂型に適した評価法の開発も必要である。

積層造形砂型の各層の端部に出現した積層段差の高さは、造形物の積層厚さである。積層厚さは最も基本的な造形条件であるが、多くの場合、公称値として扱われ、測定されることはほとんどなく、また、その測定方法も報告されていない。積層段差の形状から簡易に積層厚さを測定できれば、積層造形砂型や装置の寸法精度の確保、さらには寸法精度の向上に寄与すると考えられる。

積層段差からの積層厚さの測定には、第 2 章で述べた単層の積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\phi_{\text{sand}}$  を画像計測する方法の応用が考えられる。この方法は単層の積層段差を高倍に拡大し、積層段差の形状を画像計測することから高精度ではあるものの、計測に時間が必要となり積層厚さを簡易に計測できない。

そこで、本研究では、積層造形砂型について、複数の層(段差)により構成される影線間の距離を画像計測し、その距離から積層厚さを推定する「影線間距離計測法」を検討し、その有効性を評価した。

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 砂型試験片の作製

Fig. 4-1 に作製した砂型試験片の形状を示す。その形状は第 2 章の砂型試験片と

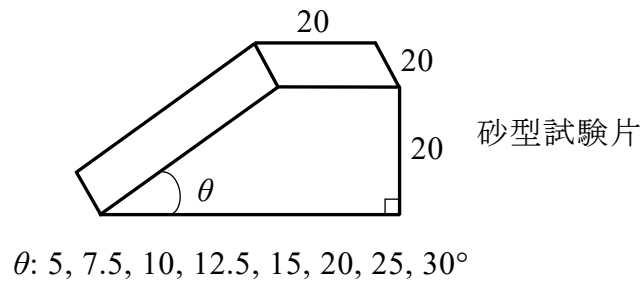


Fig. 4-1 Shape of sand mold specimen (unit: mm).

同じ「くさび型」であり，上面を 20mm×20mm とし，高さを 20mm とした．ただし，巨視的斜面(設計上の造形物の外形であり，複数の層によって構成される巨視的な斜面)の角度  $\theta$  を 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30° の 8 条件とし，第 2 章の砂型試験片に比べ，後述する「影線間距離」を多く計測できる条件 (7.5, 12.5° を追加，45° を削除) とした．

砂型試験片の造形には，第 2 章，第 3 章と同じ，シーメット株式会社製積層造形装置 SCM-10 を用いた．なお，砂型試験片の造形条件は，XY 解像度を 200dpi とし，バインダ含有率  $C_{B,m}$  を 2.0mass% とし，積層厚さを 0.28mm とした．Table 4-1 に第 4 章で使用した人工砂の粒度分布を示す．第 4 章で使用した砂の粒度分布は第 2 章，第 3 章で使用した砂の粒度分布とほぼ同じである．

Table 4-1 Particle size distribution of artificial sand.

										mass%
Opening $\mu\text{m}$	600	425	300	212	150	106	75	53	PAN	AFS GFN
Artificial sand	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	73.9	19.3	1.2	0.1	107

#### 4.2.2 影線間距離計測法

本研究では，積層造形砂型の積層厚さの簡易的な評価法として，影線間距離を画像計測する方法(以下，「影線間距離計測法」と記す)を検討した．Fig. 4-2 に影線間距離計測法の概略図を示す．影線間距離計測法では，巨視的斜面が水平になるように砂型試験片を設置した．そして，右方向から光を入射角 10° 程度で照射し，光の当たる部位と影になる部位が明瞭に見分けられる場合，「積層段差が視認され

た」と判定した．なお，入射角に応じて，光の当たる部位と影になる部位は変位する．光の照射による積層段差の判定において，「積層段差が視認された」と判定された場合，影線間距離  $L_h$  を画像計測した．影線間距離  $L_h$  は斜面を水平にした際の積層段差の山-山間の距離である(Fig. 4-2 の右図)．1 本の影線には影線の横幅方向に明るさ(濃度)の分布があり，影線の端部は明るさの分布の裾野にあたるため，境界を判別できない場合がある．本計測では，影線の横幅方向で最も暗い(濃度が小さい)部位間の距離である影線間距離を計測した(Fig. 4-2 の左図)．さらに，計測した影線間距離  $L_h$  と巨視的斜面の角度  $\theta$  から，式(4-1)より積層方向における各層の厚さ，すなわち積層厚さ(以下，記号は  $P$  で表す)を求めた．

$$P = L_h \sin \theta \quad (4-1)$$

このように間接的ではあるが，影線間距離計測法によって簡易に砂型の積層厚さを推定することが可能となる．

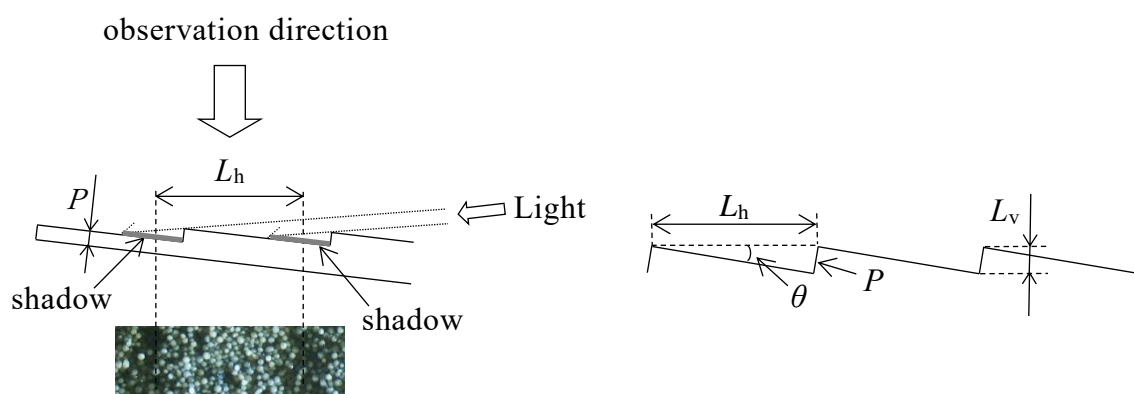


Fig. 4-2 Schematic diagram of distance measurement between shadow lines.

### 4.3 実験結果および考察

#### 4.3.1 巨視的斜面への光の照射による積層造形砂型の積層段差の視認性

Fig. 4-3 に作製した砂型試験片の外観を示す．砂型試験片では，巨視的斜面の角度が最も小さい a)  $5^\circ$  において，積層段差の間隔は広く，積層段差は明瞭に視認される．斜面の角度が b)  $7.5^\circ$ , c)  $10^\circ$  と大きくなるにつれて，積層段差の間隔は狭くなり，積層段差は明瞭ではなくなっていく，h)  $30^\circ$  では積層段差を視認することは



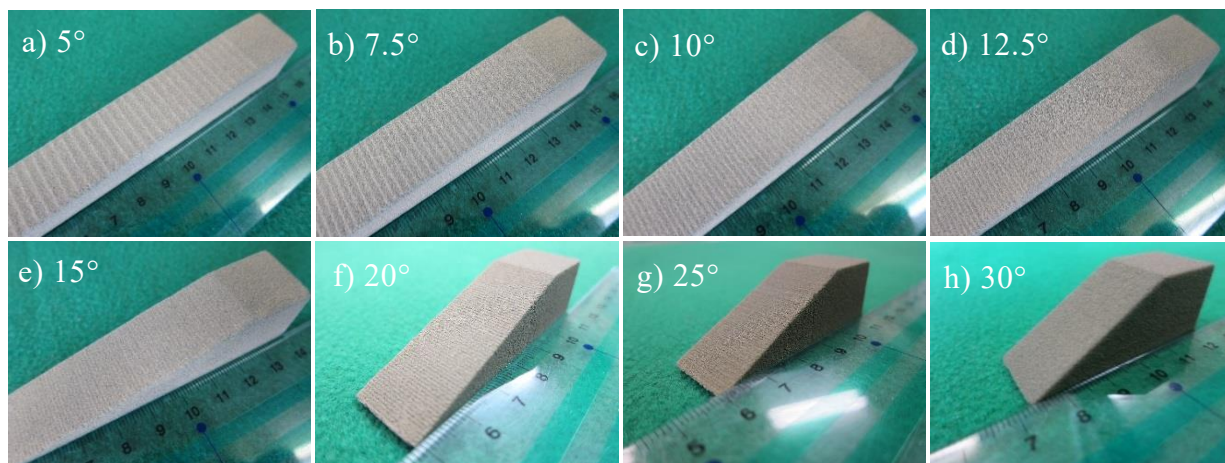


Fig. 4-3 Appearances of sand mold specimens.

困難である．この結果は第 2 章と同様の結果である．

**Fig. 4-4** は巨視的斜面に光を照射し，巨視的斜面の表面を垂直方向の上方から撮影した写真である．a) 5°において，光による影は縦方向に平行に配置された 3 本の黒線の部位であり，この黒線と黒線の間の距離が影線間距離(白矢印)である．影線間距離測定法では光の当たった部位と影になった部位の見分けにより，積層段差を視認できる．Fig. 4-4 の a) 5°では，光の当たった部位と影になった部位は明瞭であり，積層段差は視認される．巨視的斜面の角度が大きくなるにつれて，影線間距離  $L_h$  の間隔は狭くなり，光の当たった部位と影になった部位は明瞭ではなくなっていく．g) 25°では光の当たった部位と影になった部位は明瞭でなく，特に写真の左下では光の当たった部位と影になった部位を見分けられず，積層段差を

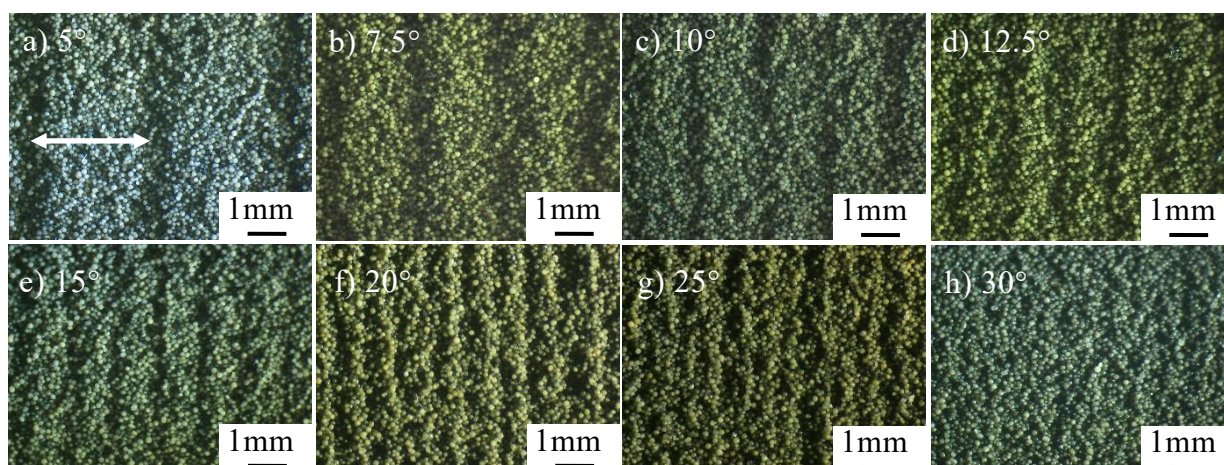


Fig. 4-4 Photographs observed from the direction perpendicular to slope surfaces.



視認できない。h) 30°では光の当たった部位と影になった部位を見分けることは困難であり、積層段差を視認できない。このように、積層段差を目視観察(Fig. 4-3)するのに比べ、影線間距離計測法(巨視的斜面への光の照射, Fig. 4-4)は積層段差を容易に視認できることが確認された。

#### 4.3.2 影線間距離計測による積層造形砂型の積層厚さの推定

Fig. 4-4 の写真を用いて、影線間距離を計測した。影線間距離の具体的な求め方は以下のとおりである。まず、取得した画像(画素数は横 1600×縦 1200pixel, 画素サイズは 4.7μm/pixel)を 8 ビットのグレースケール画像に変換し、各画素の色を数値(以下、「画素値」と記す)に変換した。次に、画像の横方向(1600pixel)について、縦方向(1200pixel)の画素値の平均をそれぞれ算出した。次に、横軸に横方向の画素番号(1～1600)、縦軸に縦方向の画素値の平均をプロットした図を作成した。Fig. 4-4 の a) 5°を例に、変換した 8 ビットのグレースケール画像と、この画像から得られた縦方向の画素値の平均を Fig. 4-5 に示す。Fig. 4-5 では、画像の暗い領域において画素値の平均が小さく、画像の明るい領域において画素値の平均が大きい曲線となっている。次に、この曲線から、画素値の平均が小さい部位(影線の横幅方向で最も暗い部位)の画素番号を読み取り、部位間の画素数  $N_1$  と  $N_2$  の平均画素数を求めた。この値に画素サイズを乗じて、影線間距離  $L_h$  を算出した。

Fig. 4-6 に巨視的斜面の角度  $\theta$  と、影線間距離計測法により得られた積層厚さ  $P$  の関係を示す。●は、式(4-1) に影線間距離  $L_h$  の計測値と巨視的斜面の角度  $\theta$  を代入して、間接的に求めた積層厚さ  $P$  の推定値である。積層厚さの推定値●については、積層段差が視認された巨視的斜面の角度 5～20°の範囲においてプロットされている。破線は積層厚さの設計値の 0.28mm である。Fig. 4-6 に示すように、積層厚さの推定値は設計値とほぼ一致し、作製した砂型試験片の積層厚さが設計値に等しいこと、さらにはこれにより、影線間距離計測法の有効性が確認された。以上の結果、影線間距離計測法により積層段差が視認される範囲である、 $\theta$  が 5～20°の間において、間接的ではあるが簡易に砂型の積層厚さを推定できることが明らかになった。

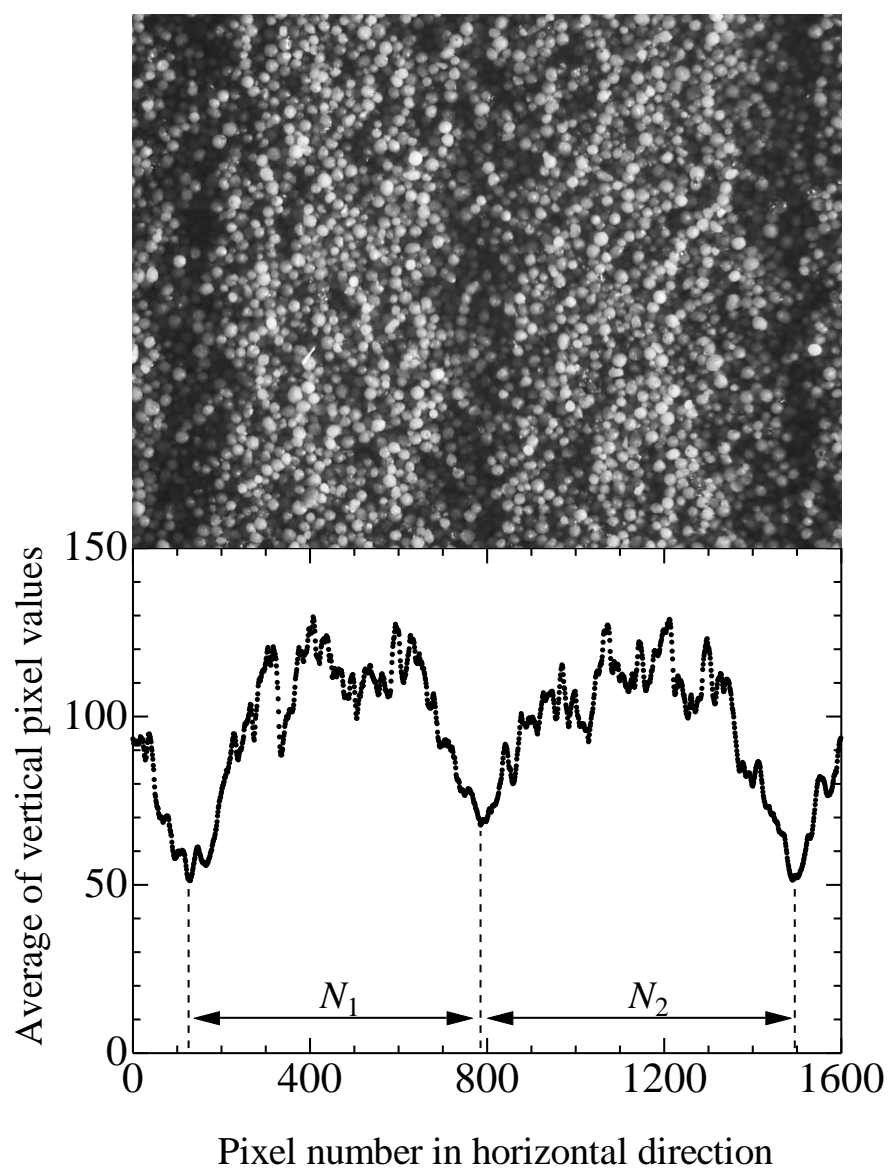


Fig. 4-5 Distribution of pixel values in the horizontal direction.

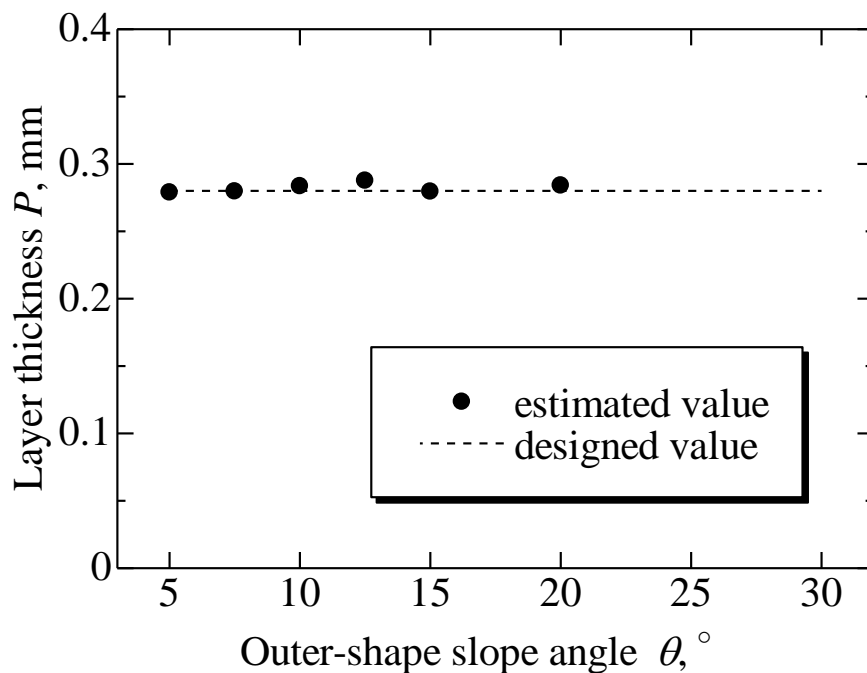


Fig. 4-6 Relationships between outer-shape slope angle  $\theta$  and layer thickness  $P$ .

#### 4.4 結言

積層造形砂型の積層厚さを簡易に評価する方法として、影線間距離を画像計測し、巨視的斜面の角度を用いて積層厚さを推定する影線間距離計測法を考案し、巨視的斜面の角度と視認される積層段差の関係および推定した積層厚さを評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 影線間距離計測法による積層厚さの推定は、簡単に、また著しく脆い砂型にも適用できる。また、実験によってその有効性を確認した。
- 2) 影線間距離計測法(巨視的斜面への光の照射)は目視観察に比べ、容易に積層段差を視認できる。

## 参考文献

- 1) 岡根利光, 吉田誠, 神戸洋史, 大場好一, 永井康弘, 小岩井修二, 戸羽篤也, 兼吉高宏, “3D プリンターの砂型造形への適用による鑄造品と鑄造技術の高度化”, 鑄造工学, **90** (2018) 266
- 2) 砂山昇, 駒井公一, 谷内大世, 藤井要, 舟木克之, 岡根利光, “3D 積層造形砂型の航空機部材への適用”, 鑄造工学, **90** (2018) 322
- 3) K. Woods and S. Ravi, “Design Considerations for Three Dimensional Printed Cores and Molds”, AFS. Trans., **123** (2015) 169
- 4) 金森陽一, 樋尾勝也, “積層造形により作製した砂型の特性”, 三重県工業研究所 研究報告, **41** (2017) 95
- 5) P. M. Hackney and R. Wooldridge, “Characterisation of Direct 3D Sand Printing Process for the Production of Sand Cast Mould Tools”, Rapid Prototyping Journal, **23** (2017) 7
- 6) 富田祐輔, 藤井英俊, “積層造形砂型の曲げ強度に及ぼすかさ密度及び接触点数の影響”, 鑄造工学, **91** (2019) 148
- 7) 富田祐輔, 藤井英俊, “バインダジェット法積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす積層ピッチおよび樹脂添加量の影響”, 鑄造工学, **92** (2020) 225
- 8) 伊藤恭祐, 金森陽一, 中野真紘, “砂型積層造形を中子へ適用する際の造形条件の検討”, 三重県工業研究所 研究報告, **45** (2021) 24
- 9) S. Mitra, A. R. de Castro and M. El Mansori, “The Effect of Ageing Process on Three-Point Bending Strength and Permeability of 3D Printed Sand Molds”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **97(1-4)** (2018) 1241
- 10) N. Coniglio, T. Sivarupan and M. EL Mansori, “Investigation of Process Parameters Effect on Anisotropic Properties of 3D Printed Sand Molds”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **94** (2018) 2175
- 11) D. Snelling, C. Williams and A. Druschitz, “A Comparison of Binder Burnout and Mechanical Characteristics of Printed and Chemically Bonded Sand Molds”, 2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium, (2014) 197
- 12) 根本明, “鑄肌の粗さについて(第一報)”, 日立評論, **32** (1950) 1, 25

## 第 5 章 積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす充填率と バインダ含有率の影響

### 5.1 緒言

積層造形砂型を用いて高精度な鋳造品を安定して生産するためには、積層造形砂型の特性を把握することが必要である。特に、複雑形状への対応<sup>1,2)</sup>が求められる積層造形砂型では、中子の強度、特に曲げ強度の把握が重要である。そのため、積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす各種造形条件(バインダ含有率、砂のリコート条件など)の影響が精力的に調べられている<sup>3-8)</sup>。

富田らは、積層造形砂型の曲げ強度は砂型の充填率(かさ密度)の二次関数<sup>3,4)</sup>で表され、また、曲げ強度は砂型のバインダ含有率の 0.57 乗の関数で表される<sup>4,5)</sup>と報告している。富田らの研究では、積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす充填率の影響を評価した上で、特定の充填率について、曲げ強度に及ぼすバインダ含有率の影響を評価している。しかし、積層造形砂型では、砂型の充填率とバインダ含有率はそれぞれ独立である。このため、砂型の充填率、バインダ含有率と曲げ強度の関係を 1 つの回帰式で表すことができれば、一方を固定せずに曲げ強度を推定することが可能となる。砂型の充填率とバインダ含有率については、その一方が 0 であれば、曲げ強度は 0 になる。このため、砂型の充填率とバインダ含有率は、曲げ強度に対し相乗的に作用すると考えられる。したがって、砂型の充填率とバインダ含有率に乘法モデルを適用することにより、曲げ強度の回帰式を得られる可能性がある。

積層造形装置には、バインダであるフラン樹脂、硬化剤ともに液体を用いる二液式積層造形装置<sup>9)</sup>と、バインダに液体、硬化剤に固体を用いる一液式積層造形装置<sup>10)</sup>がある。富田らの研究は二液式積層造形装置により作製された砂型を対象とした研究であることから、一液式積層造形装置で作製された砂型に対して、富田らの研究の適用可能性を検討することは重要である。

そこで本研究では、まず、一液式積層造形装置で作製された砂型に対する富田らの研究の適用可能性を検討した。次に、乘法モデルを適用して、砂型の曲げ強度と充填率、バインダ含有率について回帰分析を行い、曲げ強度に対する充填率

とバインダ含有率の回帰式の取得を試みた。

## 5.2 実験方法

### 5.2.1 砂型試験片の作製

砂型試験片の形状は幅  $W$  と高さ  $H$  を 22.5mm とし，奥行  $D$  を 200mm とした直方体である．砂型試験片の作製には，第 2 章～第 4 章と同じ，シーメット株式会社製積層造形装置 SCM-10 を用いた．本装置はバインダであるフラン樹脂に液体，硬化剤に固体を用いる一液式積層造形装置である．本装置で使用される砂は焼結法で作製された人工砂で，表面には予め固体の硬化剤がコートされている．なお，固体の硬化剤をコートする前の人工砂は富田らの研究<sup>3)</sup>と同じものである．

本研究では，砂型試験片内の充填率の差が小さく，かつ広範囲の充填率の砂型試験片を得るため，砂型試験片の造形配置とリコータ速度  $V_r$  を次のとおり設定した．**Fig. 5-1** に砂型試験片の造形配置を示す．本装置では，造形エリア (X800×Y400mm) の X 軸方向の左端から右端に向かって繰り返し砂がリコートされることから，作製される砂型の充填率は左端から右端に向かって高くなる．一方，造形エリアの Y 軸である上下方向の充填率の差は小さい．そこで，本研究では，Fig. 5-1 のように，1 造形あたり造形エリア内に 9 本の砂型試験片を配置した．また，リコータ速度を速くすると砂型の充填率は低くなり，リコータ速度を遅くすると砂型の充填率は高くなることから，リコータ速度については，標準速度の

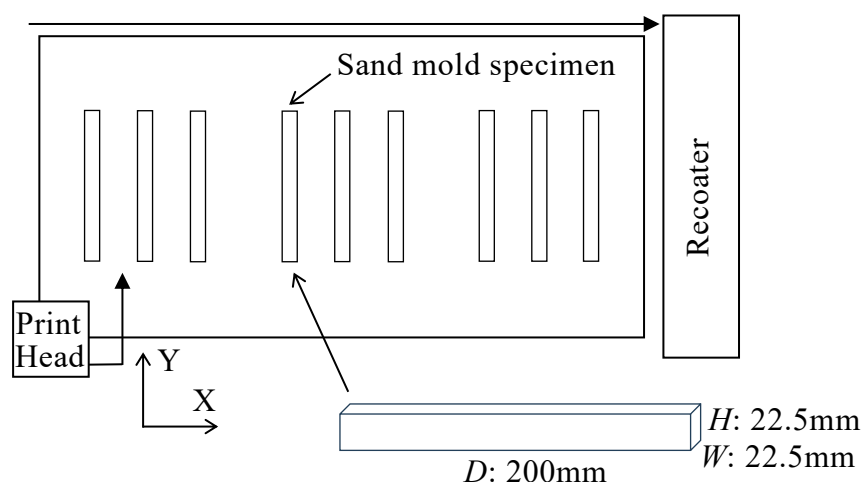


Fig. 5-1 Schematic diagram of sand mold specimen layout.

100mm/s に加え、高い充填率が得られる低速の 50mm/s の 2 条件とした。また、バインダ含有率  $C_{B,m}$  の影響を調べるため、 $C_{B,m}$  は 1.8, 2.1, 2.6, 3.1mass% の 4 条件とした。なお、 $C_{B,m}$  は第 2 章と同様に、造形後に強熱減量を測定して得た値である。また、すべての条件において、XY 解像度を 200dpi とし、積層厚さを 0.28mm とした。以上の条件により作製した砂型試験片の総数は、1 条件の造形本数が 9 本 × リコータ速度が 2 条件 × バインダ含有率が 4 条件、合計 72 本である。

### 5.2.2 砂型試験片の評価

砂型試験片のかさ密度  $\rho$  については、各砂型試験片の質量  $m$  と外形寸法の幅  $W$ 、高さ  $H$ 、奥行  $D$  を測定し、これらの値を式(5-1)に代入して算出した。

$$\rho = m / (W \cdot H \cdot D) \quad (5-1)$$

作製した砂型試験片 72 本の外形寸法の測定値は、 $W$  が  $22.5 \pm 0.1$  で、 $H$  が  $22.7 \pm 0.1$  で、 $D$  が  $200.0 \pm 0.1$  mm (平均 ± 標準偏差) であった。さらに、かさ密度を粒子密度で除して、各砂型試験片の充填率を算出した。なお、粒子密度には  $2.79 \text{ g/cm}^3$  を用いた<sup>3)</sup>。また、曲げ強度についてはスパン距離 150mm の 3 点曲げ試験より測定した。なお、砂型試験片の形状のうち曲げ試験に関連する幅  $W$  と高さ  $H$  の寸法および曲げ試験の条件は富田らの研究<sup>3,4)</sup>とほぼ同じである。

## 5.3 実験結果および考察

### 5.3.1 砂型試験片の曲げ強度と充填率、バインダ含有率の関係

Fig. 5-2 に、バインダ含有率  $C_{B,m}$  を 1.8, 2.1, 2.6, 3.1mass% として造形した砂型試験片の充填率と曲げ強度の関係を示す。いずれの  $C_{B,m}$  においても、リコータ速度  $V_r$  に関わらず、1 本の直線近傍にプロットされ、砂型試験片の充填率が高くなるほど曲げ強度は大きくなった。また、 $C_{B,m}$  が高くなるほど曲げ強度は大きくなった。Fig. 5-2 の 72 本の砂型試験片の測定結果を用いて、一液式積層造形装置で作製された砂型に対する富田らの研究の適用可能性を検討した。

富田らの研究では、砂型の曲げ強度  $\sigma$  と充填率  $f$  の間には式(5-2)の関係が得られたと報告されている<sup>3,4)</sup>。 $A$  は製造条件により決まる定数である。

$$\sigma = A (35.7 f^2 - 12.7 f) \quad (5-2)$$

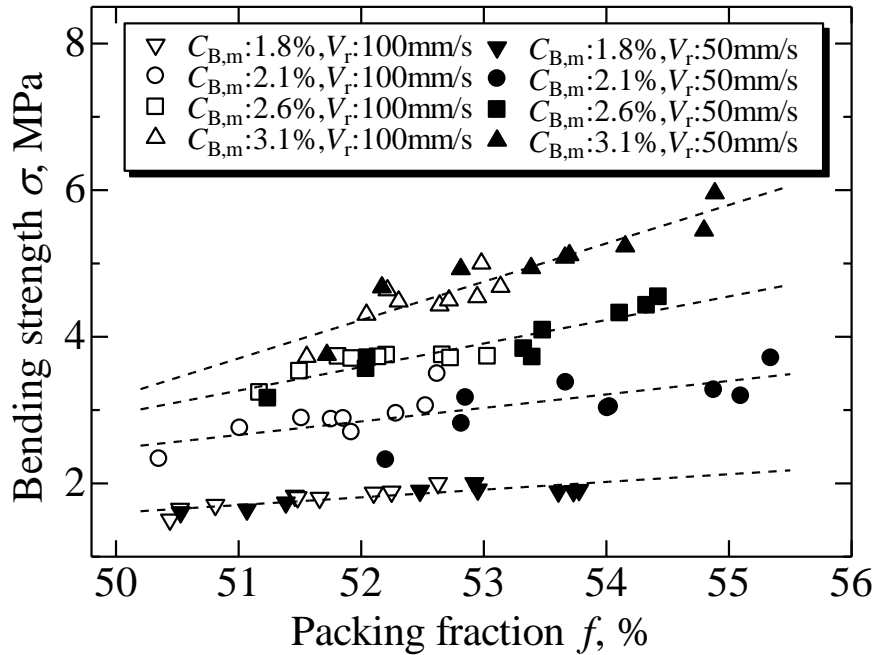


Fig. 5-2 Relationships between packing fraction of sand mold and bending strength.

式(5-2)の関係から、各バインダ含有率  $C_{B,m}$  およびリコータ速度  $V_r$  について、 $\sigma$  と  $(35.7f^2 - 12.7f)$  を与える **Fig. 5-3** を作成し、傾き  $A$  の値を求めた。Fig. 5-3 の各凡例の最後の値は、各条件で得られた  $A$  の値である。Fig. 5-3 から、すべての条件において、プロットされた点は傾き  $A$  の原点を通る直線近傍に分布しており、一液式積層造形装置で作製された砂型に対しても、式(5-2)が成立していることが確認された。

前述のとおり、本研究では、富田らの研究と同じ人工砂を使用し、同じ形状の試験片により評価を行っている。一液式と二液式積層造形装置では、バインダおよび硬化剤が異なっている。式(5-2)は砂の充填率と製造条件から得られる式である。また、式(5-2)の製造条件  $A$  は、結合 1 箇所あたりの強度、平均粒径、結合の露出率(単位体積中の全結合点数のうち断面に現れる結合点数の割合)により決まる定数である<sup>3,4)</sup>。このうち、結合 1 箇所あたりの強度および結合の露出率はバインダおよび硬化剤の影響を含む因子であると考えられる。一液式と二液式積層造形装置の違いであるバインダおよび硬化剤の影響が式(5-2)の製造条件  $A$  に含まれるため、一液式積層造形装置に対しても式(5-2)が成立したと推察される。また、



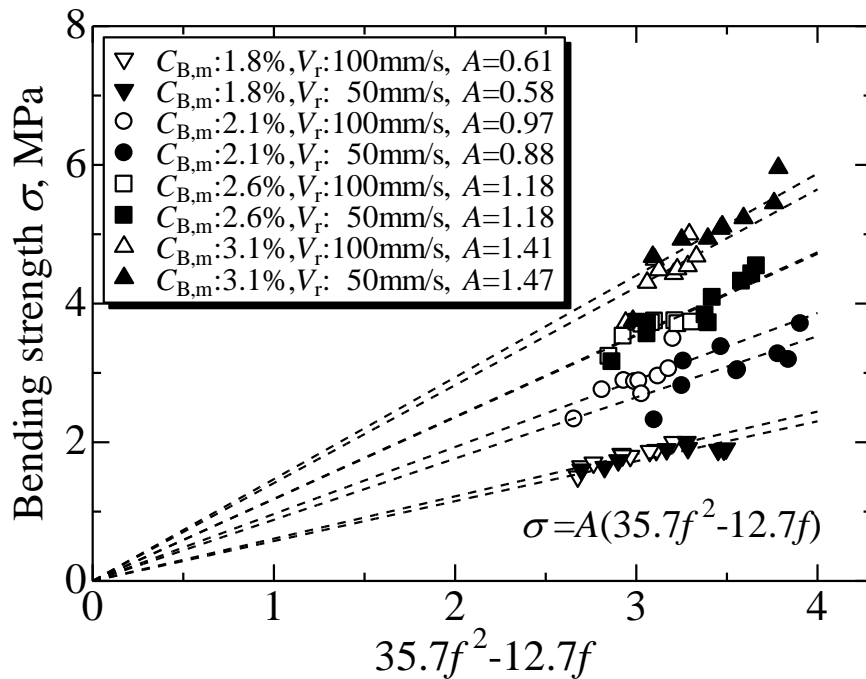


Fig. 5-3 Graph for finding  $A$  in equation (5-2).

バインダ含有率が同一でリコータ速度が異なる条件では、両者の  $A$  の差は小さく、リコータ速度が同一の条件では、バインダ含有率が大きくなるとともに  $A$  は大きくなった。このことから、 $A$  に及ぼすリコータ速度の影響は小さく、バインダ含有率の影響は大きいと推測される。

次に、砂型試験片の充填率  $f$  を 53% とし、式(5-2)に  $A$  と  $f$  を代入し、充填率 53% での曲げ強度  $\sigma_c$  を得た。Fig. 5-4 に、充填率 53% でのバインダ含有率  $C_{B,m}$  (mass%) と曲げ強度  $\sigma_c$  の関係を示す。参考として、Fig. 5-4 の上側の横軸はバインダ含有率  $C_{B,v}$  (vol%) を示す。なお、 $C_{B,v}$  (vol%) は、 $C_{B,m}$  (mass%) に砂の粒子密度の  $2.79\text{g/cm}^3$  とバインダの密度の  $1.14\text{g/cm}^3$  を用いて換算した値である。Fig. 5-4 の破線について説明する。富田らの研究では、砂型の曲げ強度とバインダ含有率の間には式(5-3)の関係が得られたと報告されている<sup>4,5)</sup>。

$$\sigma_c = a (C_B - b)^{0.57} \quad (5-3)$$

ここで、 $C_B$  はバインダ含有率、 $a$  はバインダと砂の接着強度に関係する定数、 $b$  はネッキング形成に関係しないバインダ含有率である。式(5-3)の  $a$  と  $b$  について、エクセルのソルバーを用いて、 $\sigma_c$  の測定値との差が最小になる解を求め、得られ

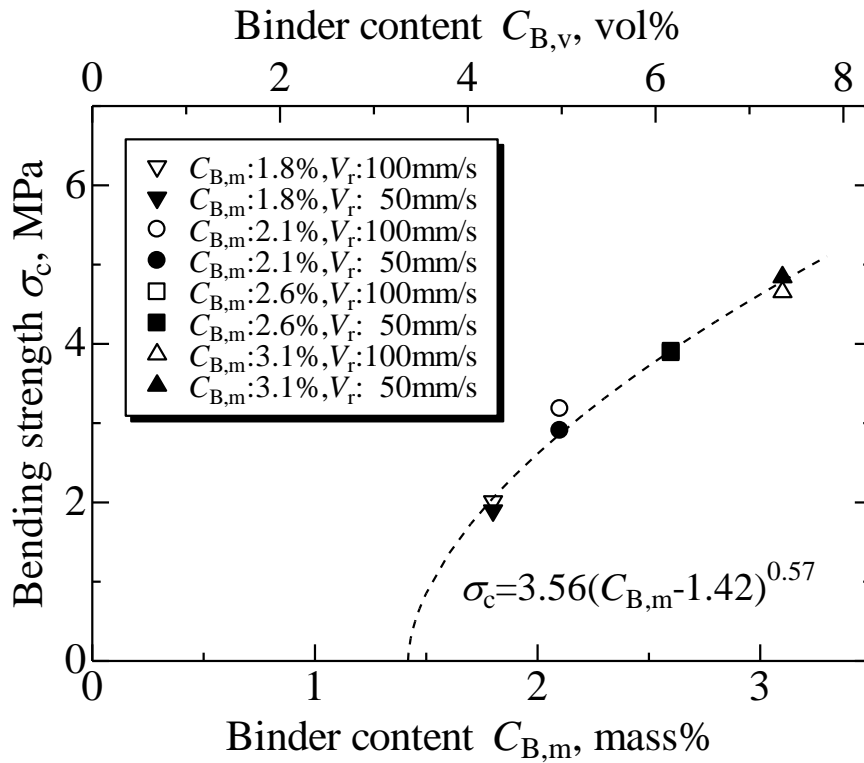


Fig. 5-4 Relationship between binder content and bending strength of sand molds with packing fraction: 53%.

た  $a$  と  $b$  を式(5-3)に代入し、式(5-3')を得た。

$$\sigma_c = 3.56 (C_{B,m} - 1.42)^{0.57} \quad (5-3')$$

なお、式(5-3')のバインダ含有率  $C_B$  には  $C_{B,m}$  (mass%)を用いた。Fig. 5-4 に、式(5-3')をプロットしたものが Fig. 5-4 の破線である。Fig. 5-4 は、▽などで示されている、測定値から得られた曲げ強度  $\sigma_c$  と、破線で示されているソルバーで求めた  $\sigma_c$  がよく一致することを示している。この結果から、一液式積層造形装置で作製された砂型に対しても、砂型の曲げ強度はバインダ含有率の 0.57 乗の関数で表されることが確認された。また、式(5-3')の 1.42 はネッキングの形成に使用されないバインダ含有率である。これは 1.42mass%以下のバインダ含有率では、砂型の強度が得られないことを意味している。

式(5-3)は、球形の砂粒間のネッキングから幾何学的に導き出された関係式である<sup>4)</sup>。バインダと硬化剤が異なる一液式積層造形装置に対しても式(5-3)が成立し

たのは、式(5-3)が球形の砂粒間のネッキングから幾何学的に導き出された式であることによると推察される。

### 5.3.2 乗法モデルによる回帰分析

5.3.1項において、一液式積層造形装置の曲げ強度と砂型の充填率の関係は式(5-2)で、曲げ強度と砂型のバインダ含有率の関係は式(5-3')で表されることが明らかになった。ここで、式(5-2)の  $A$  の値は Fig. 5-3 のとおりである。砂型の曲げ強度に対し、充填率とバインダ含有率は相乗的に作用すると考えられることから、式(5-2)と式(5-3')に乗法モデルを適用し、曲げ強度と充填率、バインダ含有率の回帰分析を行った。式(5-4)に乗法モデルを適用した回帰式を示す。

$$\sigma = B (35.7 f^2 - 12.7 f) (C_{B,m} - 1.42)^{0.57} \quad (5-4)$$

ここで、 $B$  は式(5-2)の  $A$  と式(5-3')の 3.56 をまとめた定数である。式(5-4)の  $B$  について、エクセルのソルバーを用いて  $\sigma$  の測定値との差が最小になる解を求め、得られた  $B$  を式(5-4)に代入し、曲げ強度の回帰式、式(5-4')を得た。

$$\sigma = 1.08 (35.7 f^2 - 12.7 f) (C_{B,m} - 1.42)^{0.57} \quad (5-4')$$

Fig. 5-5 に、曲げ強度の測定値  $\sigma_{\text{mea}}$  と式(5-4')から得られた曲げ強度の計算値  $\sigma_{\text{calc}}$  の関係を示す。Fig. 5-5 の  $\sigma_{\text{mea}}$  と  $\sigma_{\text{calc}}$  は、よく一致している。 $\sigma_{\text{mea}}$  と  $\sigma_{\text{calc}}$  について、さらに詳細に検討するために、一対の標本による母平均の差の検定を行った。試料数は 72 本であることから、自由度 71(=72-1)の  $t$  分布において、検定統計量  $T$  は 0.02、有意確率  $P(T \leq t)$  は 0.98 であった。検定の結果、有意確率  $P$  は 0.05 よりも大きい値であり、 $\sigma_{\text{mea}}$  と  $\sigma_{\text{calc}}$  の母平均の間に有意差は認められなかった。以上の結果、曲げ強度の回帰式である式(5-4')を用いることで、一液式積層造形装置により作製された砂型の充填率とバインダ含有率から曲げ強度を推定できることが明らかになった。

富田らは、曲げ強度と充填率の関係、曲げ強度とバインダ含有率の関係をモデル化し、それぞれ式により整理した。これらの式が砂型の設計などに広く活用され、さらに改良されることにより、積層造形砂型のさらなる普及が期待される。

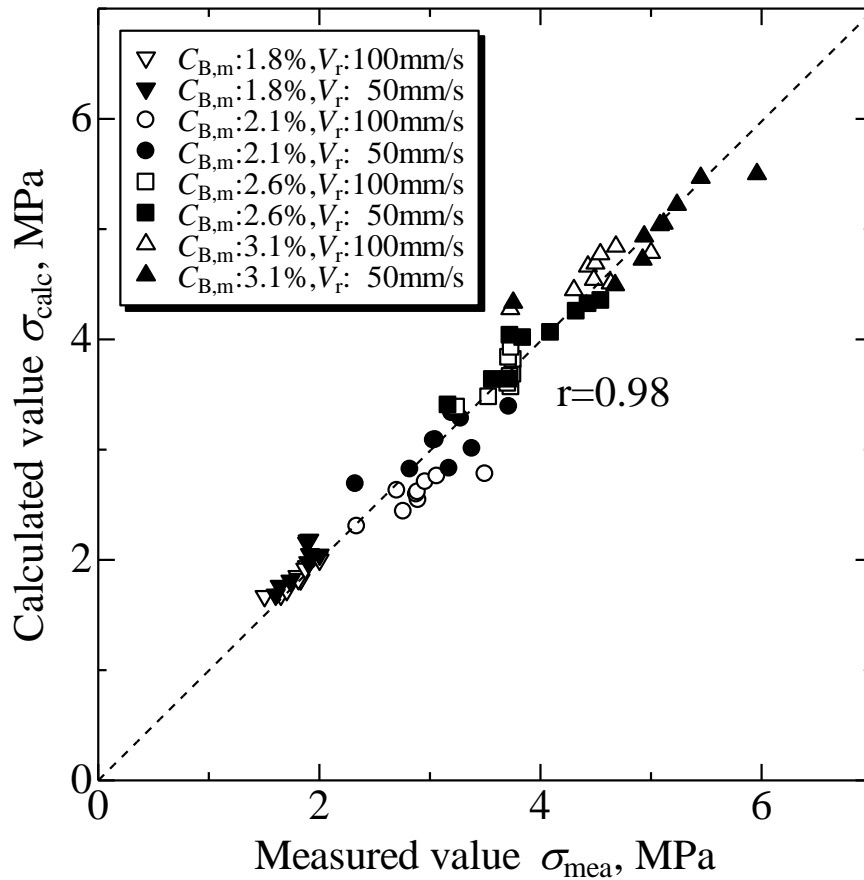


Fig. 5-5 Relationship between measured and calculated bending strength.

#### 5.4 結言

一液式積層造形装置により作製された砂型に対しても，富田らの研究で得られた曲げ強度と充填率の関係，曲げ強度とバインダ含有率の関係が成り立つことを確認した．さらに，乗法モデルを適用して，曲げ強度と充填率，バインダ含有率について回帰分析を行い，以下の結論を得た．

- 1) 一液式積層造形装置で作製された砂型に対しても，砂型の曲げ強度は充填率の二次関数で表される．
- 2) 一液式積層造形装置で作製された砂型に対しても，砂型の曲げ強度はバインダ含有率の 0.57 乗の関数で表される．
- 3) 一液式積層造形装置で作製された砂型について，砂型の曲げ強度と充填率，バインダ含有率に乗法モデルを適用することにより，曲げ強度の回帰式を得た．

この回帰式により，砂型の充填率とバインダ含有率から曲げ強度を推定することができる．

## 参考文献

- 1) 岡根利光, 吉田誠, 神戸洋史, 大場好一, 永井康弘, 小岩井修二, 戸羽篤也, 兼吉高宏, “3D プリンターの砂型造形への適用による鑄造品と鑄造技術の高度化”, 鑄造工学, **90** (2018) 266
- 2) 砂山昇, 駒井公一, 谷内大世, 藤井要, 舟木克之, 岡根利光, “3D 積層造形砂型の航空機部材への適用”, 鑄造工学, **90** (2018) 322
- 3) 富田祐輔, 藤井英俊, “積層造形砂型の曲げ強度に及ぼすかさ密度及び接触点数の影響”, 鑄造工学, **91** (2019) 148
- 4) 富田祐輔, 藤井英俊, “バインダジェット法積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす積層ピッチおよび樹脂添加量の影響”, 鑄造工学, **92** (2020) 225
- 5) 富田祐輔, 藤井英俊, “熔融法人工砂を用いたバインダジェット式砂型積層造形における砂の流動性に及ぼす粒径の影響”, 鑄造工学, **93** (2021) 115
- 6) 伊藤恭祐, 金森陽一, 中野真紘, “砂型積層造形を中子へ適用する際の造形条件の検討”, 三重県工業研究所 研究報告, **45** (2021) 24
- 7) S. Mitra, A. R. de Castro and M. El Mansori, “The Effect of Ageing Process on Three-Point Bending Strength and Permeability of 3D Printed Sand Molds”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **97** (2018) 1241
- 8) N. Coniglio, T. Sivarupan and M. EL Mansori, “Investigation of Process Parameters Effect on Anisotropic Properties of 3D Printed Sand Molds”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **94** (2018) 2175
- 9) <https://www.exone.com/> 2023.5.1
- 10) <https://www.cmet.co.jp/> 2023.5.1

## 第 6 章 SEM-EDS による再生砂中の人工砂混入率の計測

### 6.1 緒言

シェル中子(熱硬化方式の代表的な製造法であるシェルモールド法により製造された中子)は、生型用として広く使用されている<sup>1,2)</sup>。Fig. 1-6 のとおり、生型ラインで使用されたシェル中子等は回収、再生され再生砂となる<sup>2,3)</sup>。再生砂はレジコーテッドサンドに加工され、再びシェル中子等として生型ラインで使用される<sup>2,3)</sup>。

シェル中子には主にけい砂が使用されている。しかし、ガス欠陥、焼付き欠陥などの発生を防ぐために人工砂の使用も増加している<sup>1,4)</sup>。使用された人工砂は、それが混入した再生砂を用いて作製されたシェル中子を介して、けい砂の生型ラインに混入されている<sup>5,6)</sup>。生型ラインに人工砂が混入すると、オーリチックス量の測定<sup>6~8)</sup>や、外引け欠陥の発生<sup>9,10)</sup>などの問題が生じる。

現在、砂の仕様をけい砂、または人工砂とした 2 種類の積層造形装置が販売されている<sup>11-15)</sup>。装置で使用される砂については、仕様と同一の砂を再生して繰り返し使用するワンサンド化(単一の種類の砂を用いること)が望ましい。しかし、現状では、積層造形砂型の再生システムは、流通を含め構築されていない。このため、多くの鑄造工場において、積層造形砂型の廃砂は廃棄あるいはシェル中子等と一緒に回収、再生されている。このような回収、再生では、前述のとおり、生型ラインにおいて、ラインとは異なる砂の混入が生じる。特に、人工砂で作られた積層造形砂型の廃砂の回収、再生では、けい砂生型ラインへの人工砂混入の問題を生じる可能性がある。

工業的にけい砂と人工砂を分別することは困難であることから、積層造形砂型を活用した鑄造技術をリサイクル性も考慮した技術にするために、再生砂を適切に管理・運用することが求められる。この要求を満たすためには、迅速かつ精度の高い人工砂混入率の計測方法を開発する必要がある。再生砂中の人工砂混入率が計測できれば、再生砂を管理する上で有効であり、人工砂混入率が高い場合、けい砂を投入するなどの対策も行える。

再生砂中の人工砂混入率の計測に関する先行研究としては、砂の形状から再生

砂中の人工砂混入率を調べた研究<sup>16)</sup>がある．しかし、砂の形状だけではけい砂と人工砂を区別できず、用途によっては、計測精度が十分でない場合があると考えられる．

そこで著者らは、再生砂中の人工砂混入率を計測する新たな方法として、「SEM-EDS による再生砂中の人工砂混入率計測法(以下、「EDS 計測法」と記す)」を検討した．EDS 計測法では、まず、画像計測を用いて、再生砂断面の EDS のマッピング像からけい砂および人工砂の個数を求め、人工砂混入率を計測する．ここで、再生砂をサンプリングして人工砂混入率を計測する場合、サンプリングする再生砂の個数が人工砂混入率の計測精度に大きく影響する．そのため、適切な個数だけ砂粒を計測しないと、必要な計測精度を確保できない．

ここで、2 種類の粉末を混ぜるときの割合を「配合率」、2 種類の粉末の割合が未知であるときの粉末の割合を「混入率」としたとき、これまでに、「配合率」が既知の 2 種類の粉末の混ざり具合(混合度)の評価が検討されてきた<sup>17,18)</sup>．しかし、これらは、本研究の対象である「混入率」を計測する際に、目標精度を確保するために必要とされる計測個数を表していない．また、砂粒の個数から人工砂混入率を求める場合、得られる人工砂混入率の単位は個数百分率(以下、「個数%」と記す)になる．しかし、工学的には、質量百分率(以下、「mass%」と記す)で表された人工砂混入率の方が有効であると考えられる．このため、EDS 計測法では、人工砂混入率の個数%だけでなく、人工砂混入率の mass%を推定する必要がある．

そこで本研究では、著者らが提案する EDS 計測法の確立を目的として、画像計測を用いて EDS のマッピング像から人工砂混入率を求める際の、砂粒の計測個数と人工砂混入率の計測精度の関係について、統計的な手法を用いて検討した．さらに、砂粒を球に近似し、EDS マッピング像(砂粒の断面)から切断円直径 (円相当径) を求め、研磨深さとの対応で砂粒の正射影直径や砂粒の体積を推定する方法を検討した．ここでの砂粒は球に近似しているが、人工砂はまだしも、けい砂では砂種によっては形状が球とは異なる．この誤差を見積もることができるよう、11 種の代表的な立体形状を想定し、これらの体積に対する球近似体積を体積倍率として整理した．最後に、再生砂を模擬した砂として、けい砂と人工砂を組み合わせた種々の混合砂を作製し、これら混合砂の人工砂混入率を個数%および



mass%で求め、上記方法の計測精度を検証した。

## 6.2 EDS 計測法

### 6.2.1 EDS 計測法の概要

EDS 計測法は 2 つのステージ，ステージ 1 と 2 から構成される．ステージ 1 では，SEM-EDS を用いて砂粒の EDS マッピング像を取得し，画像計測を用いて人工砂混入率の個数%を算出する．なお，ステージ 1 では，砂粒の計測個数に基づいて人工砂混入率(個数%)の計測精度を見積もる．ステージ 2 では，ステージ 1 で得られた砂粒の EDS マッピング像から人工砂混入率の mass%を推定する．

### 6.2.2 ステージ 1：人工砂混入率(個数%)の計測

EDS 計測法において，ステージ 1 では，まず，多数個の砂粒の研磨断面について EDS を用いて元素分析を行い，Si および Al 等の EDS マッピング像を取得する．次に，画像計測を用いて，この Si 等のマッピング像からけい砂の個数  $n_s$ ，Al 等のマッピング像から人工砂の個数  $n_a$  を求める．そして，式(6-1)より人工砂混入率  $p$  (個数%)を算出する．

$$p = n_a / ( n_s + n_a ) \times 100 \quad (6-1)$$

### 6.2.3 人工砂混入率(個数%)の目標計測精度を満たす砂粒の計測個数

けい砂と人工砂からなる再生砂において，再生砂中の人工砂混入率の真値を  $p_{\text{true}}$ ，計測された砂粒の全個数(けい砂と人工砂)を  $n (= n_s + n_a)$  とする．このとき，人工砂混入率の空間的な分布(再生砂全体を 1 つの空間と見なした表現)およびサンプリングに偏りがないと仮定すれば，人工砂の個数  $n_a$  の確率分布は二項分布に従うことから，人工砂混入率の計測値  $p_{\text{mea}}$  の分散  $\sigma_{p,\text{mea}}^2$  は式(6-2)で与えられる<sup>18)</sup>．

$$\sigma_{p,\text{mea}}^2 = p_{\text{true}} ( 1 - p_{\text{true}} ) / n \quad (6-2)$$

$n$  が十分に大きい場合，この確率変数  $p_{\text{mea}}$  は正規分布に近似できる<sup>18)</sup>．また， $p_{\text{mea}}$  の  $p_{\text{true}}$  からの誤差をその標準偏差で除した商， $(p_{\text{mea}} - p_{\text{true}}) / \sigma_{p,\text{mea}}$  については標準

正規分布に従うことが知られている<sup>18)</sup>。

ここで、標準正規分布に従う確率変数  $z$  において、信頼係数  $\beta$  (必要に応じて定めればよいが、一般的には、0.95 が用いられる) に対応する上限を「 $z_{1/2+\beta/2}$ 」で表し ( $z = -\infty$  から  $z_{1/2+\beta/2}$  までの累積確率が  $1/2+\beta/2$  であることを意味する)、これが  $(p_{\text{mea}} - p_{\text{true}}) / \sigma_{p,\text{mea}}$  に等しいとすれば、式(6-3)が得られる。

$$(p_{\text{mea}} - p_{\text{true}}) / \sigma_{p,\text{mea}} = z_{1/2+\beta/2} \quad (6-3)$$

また、計測値と真値との差が誤差である基本的な関係から式(6-4)が得られる。

$$p_{\text{mea}} - p_{\text{true}} = \Delta p_{\text{nec}} \quad (6-4)$$

ここで、信頼係数  $\beta$  で推定される人工砂混入率  $p_{\text{true}}$  の信頼区間が、目標計測精度 (以下、「目標精度」とよび、 $\Delta p_{\text{nec}}$  と記す) に対応するときの砂粒の計測個数を  $n_{\text{nec}}$  とする。式(6-3)に式(6-2)、(6-4)を代入すると、この  $n_{\text{nec}}$  は式(6-5)で与えられる。

$$n_{\text{nec}} = z_{1/2+\beta/2}^2 p_{\text{true}} (1 - p_{\text{true}}) / \Delta p_{\text{nec}}^2 \quad (6-5)$$

信頼係数  $\beta$  が 95% であり、目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  が  $\pm 1, 2, 5$  パーセントポイントのときの  $n_{\text{nec}}$  と  $p_{\text{true}}$  の関係を式(6-5)により算出した。その関係を **Fig. 6-1** に示す。信頼係数  $\beta = 95\%$  に対する  $z_{1/2+\beta/2}$  は 1.96 である。Fig. 6-1 から、信頼係数  $\beta$  の下で、目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  を満たす砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  を得ることができる。また、Fig. 6-1 から、目標精度が高く ( $\Delta p_{\text{nec}}$  値が小さい)、さらに、実際の人工砂混入率  $p_{\text{true}}$  が高いほど、目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  を満たす砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  は多くなることがわかる。

以下では、砂の形状から再生砂中の人工砂混入率を調べた研究<sup>16)</sup>において、人工砂混入率が約 10% であったことから、実際の人工砂混入率  $p_{\text{true}}$  が 10% の再生砂を計測する場合を例に、目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  を満たす砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  の導出について述べる。信頼係数  $\beta$  を 95% とし、目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  を (a)  $\pm 1$ , (b)  $\pm 2$ , (c)  $\pm 5$  パーセントポイントとする (人工砂混入率  $p$  の予測値が、それぞれ (a)  $10 \pm 1\%$  (9~10%), (b)  $10 \pm 2\%$  (8~12%), (c)  $10 \pm 5\%$  (5~15%) の範囲内に入る精度であることを意味する)。これらの条件下では、 $\pm 1 \sim 5\%$  の範囲の精度を満たす砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  は式(6-5)より、(a) 3457, (b) 864, (c) 138 個と算出される。例えば、 $p_{\text{true}} = 10\%$  に対して目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  が  $\pm 5$  パーセントポイント ( $p$  の予測値は 5~15%) では、誤差は広範囲であるものの、 $n_{\text{nec}}$  は 138 個と少数になる。これに対し、目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  が  $\pm 2$  パーセントポイント ( $p$  の予測値は 8~12%) では、 $n_{\text{nec}}$  は 864 個になる。

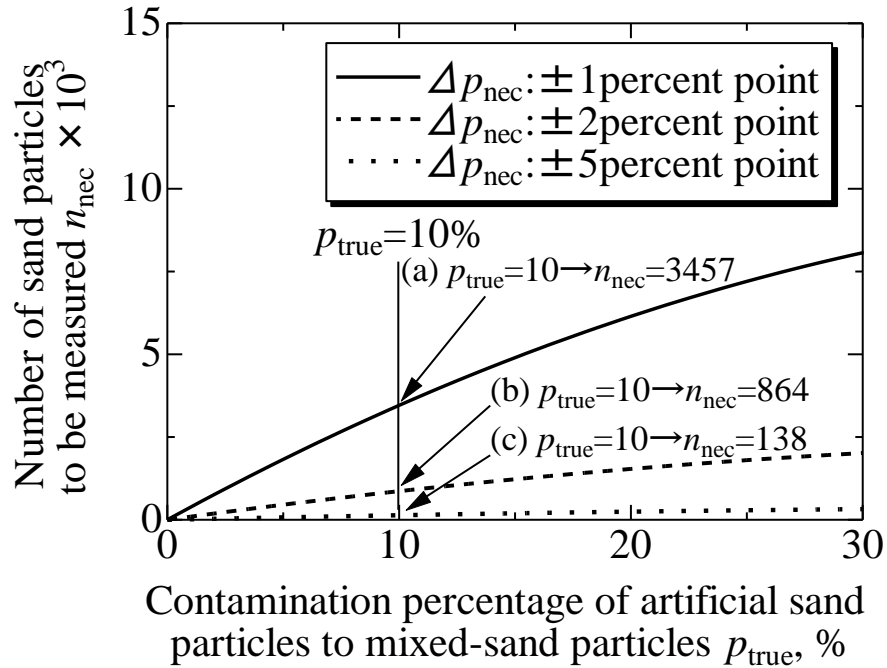


Fig. 6-1 Relationships between number of sand particles to be measured and contamination percentage of artificial sand particles to mixed-sand particles to achieve target accuracy  $\Delta p_{nec} : \pm 1, 2, 5$  percent point, under confidence coefficient  $\beta$ : 95%.

人工砂混入率が高い条件，例えば，人工砂混入率  $p_{ture}$  が 30%では  $30 \pm 1\%$ の精度は必要なく  $30 \pm 5\%$ でも十分な精度である場合が多い．この場合は式(6-5)より，必要となる砂粒の計測個数は少なくなる．これは，人工砂混入率  $p_{ture}$  が増えるにつれ，目標精度に対し  $\Delta p_{nec}$  を低く ( $\Delta p_{nec}$  の値を大きく) 設定できるためである．このことは，目標精度を絶対値としてではなく，人工砂混入率に対する比率である相対精度として考えることも可能であることを示している．目標とする精度を相対精度で考える場合，目標精度  $\Delta p_{nec}$  を人工砂混入率  $p_{ture}$  で除した  $\Delta p_{nec} / p_{ture}$  を，目標とする相対精度  $\Delta p_{rela}$  として定義する．**Fig. 6-2** は信頼係数  $\beta$  を 95%とし，目標とする相対精度  $\Delta p_{rela} (\Delta p_{nec} / p_{true}) \pm 10, 20\%$  を満足する砂粒の計測個数  $n_{nec}$  と人工砂混入率  $p_{ture}$  (個数%)の関係である．**Fig. 6-2** から，人工砂混入率  $p_{true}$  が高くなると，目標とする相対精度を満たす砂粒の計測個数  $n_{nec}$  が急激に減少することがわかる．

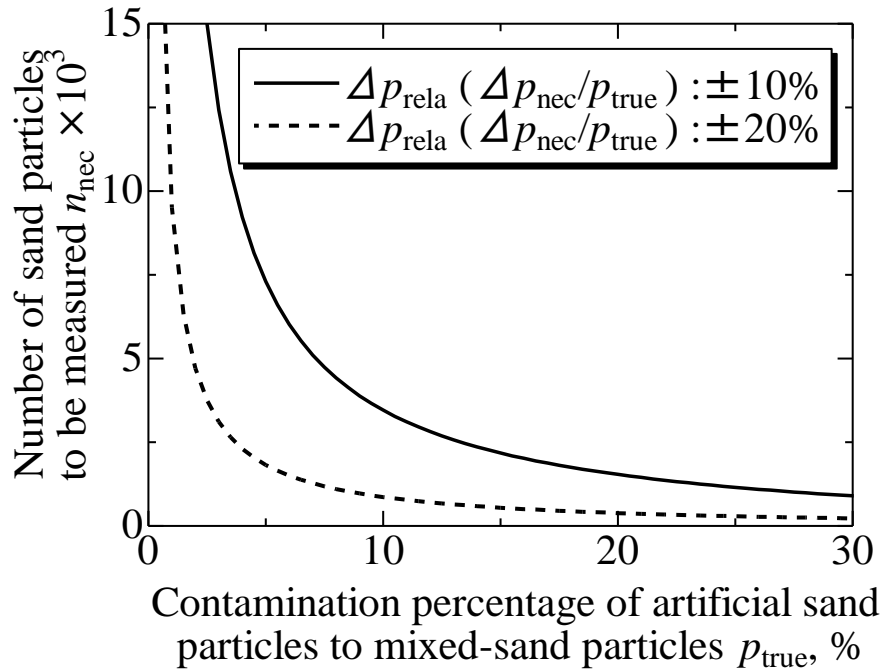


Fig. 6-2 Relationships between number of sand particles to be measured and contamination percentage of artificial sand particles to mixed-sand particles to achieve accuracies, defined by relative error  $\Delta p_{\text{rela}} (\Delta p_{\text{nec}} / p_{\text{true}}) : \pm 10, 20\%$ , under confidence coefficient  $\beta : 95\%$ .

#### 6.2.4 EDS 計測法ステージ 1 の現場での適用方法(スクリーニングと本計測)

EDS 計測法ステージ 1 において、高い目標精度を得るためには、砂粒の計測個数を多くする必要がある。一方で、砂粒の計測個数を少なくし、迅速に計測を行うことも実用上重要である。現場での適用を考えると、まずスクリーニングとして砂粒の計測個数を少なくした迅速計測を行い、スクリーニングの結果に応じて、目標精度の高い本計測を行う 2 段階の計測が有効である。スクリーニングでは、計測をより迅速に行うために 1 画面のマッピング像での計測を想定し、砂粒の計測個数を 100 個程度にする。なお、この計測個数は筆者らの用いた装置を前提としたものである。

そこで、砂粒の計測個数を 100 個として、各人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}}$  に対する

人工砂混入率の計測値  $p_{\text{mea}}$  の範囲を調べた．まず，計測値  $p_{\text{mea}}$  が取り得る上限(上方信頼限界)  $p_{\text{mea,upper}}$  と下限(下方信頼限界)  $p_{\text{mea,lower}}$  は，6.2.3 項の式(6-4)を変形すると，それぞれ式(6-6)，(6-7)で与えられる．

$$p_{\text{mea,upper}} = \Delta p_{\text{nec}} + p_{\text{true}} \quad (6-6)$$

$$p_{\text{mea,lower}} = -\Delta p_{\text{nec}} + p_{\text{true}} \quad (6-7)$$

また，6.2.3 項の式(6-5)を変形すると，式(6-5')が得られる．

$$\Delta p_{\text{nec}} = (z_{1/2+\beta/2}^2 p_{\text{true}} (1 - p_{\text{true}}) / n_{\text{nec}})^{1/2} \quad (6-5')$$

式(6-6)，(6-7)に式(6-5')を代入すると， $p_{\text{mea,upper}}$  と  $p_{\text{mea,lower}}$  は，それぞれ式(6-8)，(6-9)で与えられる．

$$p_{\text{mea,upper}} = (z_{1/2+\beta/2}^2 p_{\text{true}} (1 - p_{\text{true}}) / n_{\text{nec}})^{1/2} + p_{\text{true}} \quad (6-8)$$

$$p_{\text{mea,lower}} = - (z_{1/2+\beta/2}^2 p_{\text{true}} (1 - p_{\text{true}}) / n_{\text{nec}})^{1/2} + p_{\text{true}} \quad (6-9)$$

**Fig. 6-3** に，砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  を 100 個とし，信頼係数  $\beta$  を 95%としたときの人工砂混入率(個数%)の真値  $p_{\text{true}}$  と計測値  $p_{\text{mea}}$  の関係を示す．**Fig. 6-3** の横軸は人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}}$  を，縦軸は人工砂混入率の計測値  $p_{\text{mea}}$  を示す．**Fig. 6-3** の実線は  $p_{\text{true}}$  を，上下の破線は式(6-8)，(6-9)より求めた計測値の 95%信頼区間の上限  $p_{\text{mea,upper}}$  と下限  $p_{\text{mea,lower}}$  を示す．**Fig. 6-3** より，横軸の人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}}$  に対する人工砂混入率の計測値  $p_{\text{mea}}$  の範囲を知ることができる．例えば，砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  を 100 個としてスクリーニング(計測)を行ったとき，仮に人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}}$  が 10%であったとすると，**Fig. 6-3** の横座標  $p_{\text{true}} = 10\%$ における縦座標  $p_{\text{mea,lower}} = 4\%$  と  $p_{\text{mea,upper}} = 16\%$ を読み取る．この場合は，確率 95%で人工砂混入率の計測値  $p_{\text{mea}}$  が 4～16%の範囲内にあることを意味する．なお，**Fig. 6-3** で人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}}$  が約 3.7%以下のとき，人工砂混入率の計測値の下限  $p_{\text{mea,lower}}$  が 0 になっている．これは，人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}} > 0\%$ であったとしても，人工砂混入率の計測値  $p_{\text{mea}}$  が 0%と計測される可能性のあることを意味している．このような状況も含め，例えば，目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  を  $\pm 2$  パーセントポイントとするような高い精度での計測が必要な場合には，6.2.2 および 6.2.3 項に基づいて砂粒の計測個数を十分に多くした本計測を行う．

**Fig. 6-3** より，得られた  $p_{\text{mea}}$  から  $p_{\text{true}}$  の範囲を知ることができる．**Fig. 6-4** に  $p_{\text{true}}$  と  $p_{\text{mea}}$  の関係を示す．**Fig. 6-4** では， $p_{\text{true}}$  が与えられると  $p_{\text{mea}}$  は確率密度曲線のよ

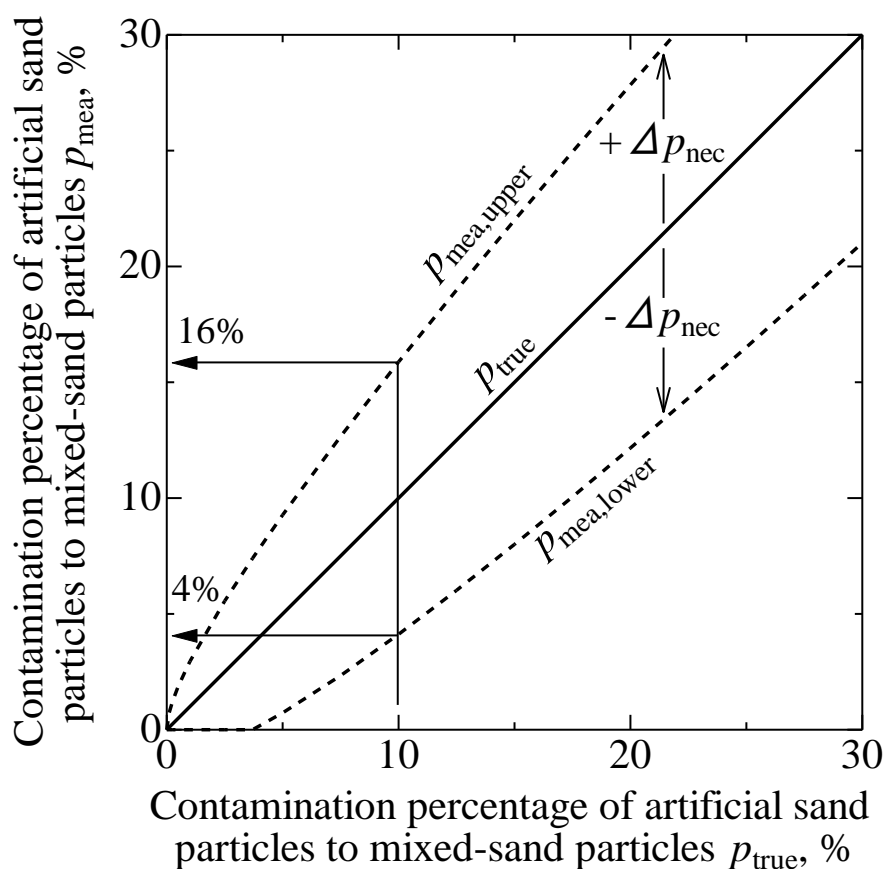


Fig. 6-3 Relationship of true value to measured value as for contamination percentage of artificial sand particles to mixed-sand particles under condition that number of sand particles to be measured was 100 grains (confidence coefficient  $\beta$ : 95%).

うにばらつき，他方， $p_{\text{mea}}$  が与えられると  $p_{\text{true}}$  は確率密度曲線のようにばらつくことを示している．このように， $p_{\text{true}}$  と  $p_{\text{mea}}$  は入れ替わった関係にあることから，Fig. 6-3 の縦軸と横軸を入れ替えて考えることが可能である．Fig. 6-3 の縦軸と横軸を入れ替えると，縦軸が  $p_{\text{true}}$ ，横軸が  $p_{\text{mea}}$  となる．例えば，砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  を 100 個としてスクリーニングを行ったとき，仮に人工砂混入率の計測値  $p_{\text{mea}}$  が 10% であったとすると，Fig. 6-3 の横座標  $p_{\text{mea}} = 10\%$  における縦座標  $p_{\text{true,lower}} = 4\%$  と  $p_{\text{true,upper}} = 16\%$  を読み取る．この場合は，確率 95% で人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}}$  が 4～16% の範囲に入り得ることを意味する．

以上のように，計測時間を重視したスクリーニングと目標精度を重視した本計

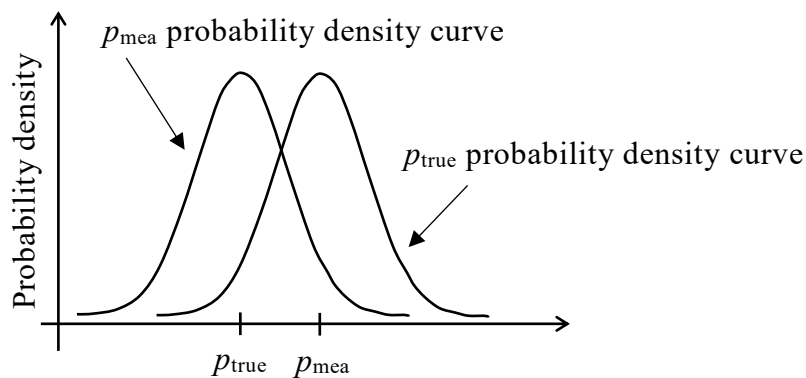


Fig. 6-4 Relationships between  $p_{\text{true}}$  and  $p_{\text{mea}}$ .

測を使い分けることで、目的に応じて効率的に人工砂混入率を計測できる。

## 6.2.5 ステージ 2：人工砂混入率 mass%の推定

### (1) 球の切断断面積から正射影面積への変換

EDS 計測法では、再生砂(人工砂，けい砂の混合)を水平面に散布し，樹脂で固めた後，再生砂を散布した面を研磨して人工砂，けい砂の切断断面積を求め，これから砂粒の体積および質量を推定する．砂粒をある切断高さで切断したときの断面積から砂粒の体積を推定する場合，研磨により得られる切断面の断面積は，切断高さにより，正射影面積(最大値)から 0(最小値)近傍まで変化する．これが計測誤差の要因となる．このことに関し，以下 2 点を補足説明する．

補足 1：研磨深さより小さな径の砂粒は削り落とされる．これについては対処できない．

補足 2：固体(3D 空間)内に砂粒が散布されている場合，上記誤差要因に加え，研磨により砂粒の露出する確率は砂粒の大きさに依存する．結果的には，大径の砂粒ほど切断される確率が高くなる．この効果を考慮した「平面(2 次元)像の 3 次元化手法」として，Saltykov 法が知られている<sup>19~21)</sup>．Saltykov 法は粒径をいくつかの階級に分け，各階級における砂粒の個数の割合を推定するものである．この方法は固体内に砂粒が散布されている場合に適用され，本実験の平面に砂粒が散布されている場合には適用できない．

そこで本研究では，砂粒を球に近似し，EDS マッピング像(砂粒の断面)から切

断円直径(円相当径)  $d$  を求め、研磨深さ  $h$  に対する正射影直径  $D$  の推定(変換)方法を検討する。なお、砂を平面に散布することから、この方法では粒径に比例する切断確率の違いを考慮する必要はない。

**Fig. 6-5** a) ～ c) は、研磨深さ  $h$  と砂粒径に関する三つの典型的なパターンおよびそれぞれにおける砂粒の切断面直径  $d$  と正射影直径  $D$  との関係を示す模式図である。Fig. 6-5 の a)  $D < h$  では研磨により砂粒は剥落するが、b)  $D/2 < h < D$ , c)  $h < D/2$  では研磨による砂粒の剥落はない。斜辺が  $D/2$  の小直角三角形と斜辺が  $D$  の大直角三角形の相似関係および大直角三角形に三平方の定理を適用すると、b)  $D/2 < h < D$  では式(6-10)が、c)  $h < D/2$  では式(6-11)が成り立つ。

$$D^2 = (2h - D)^2 + d^2 \quad (6-10)$$

$$D^2 = (D - 2h)^2 + d^2 \quad (6-11)$$

式(6-10), (6-11), それぞれを正射影直径  $D$  について解くと、いずれも式(6-12)となる。

$$D = (4h^2 + d^2) / (4h) \quad \text{ただし, } D \geq h \quad (6-12)$$

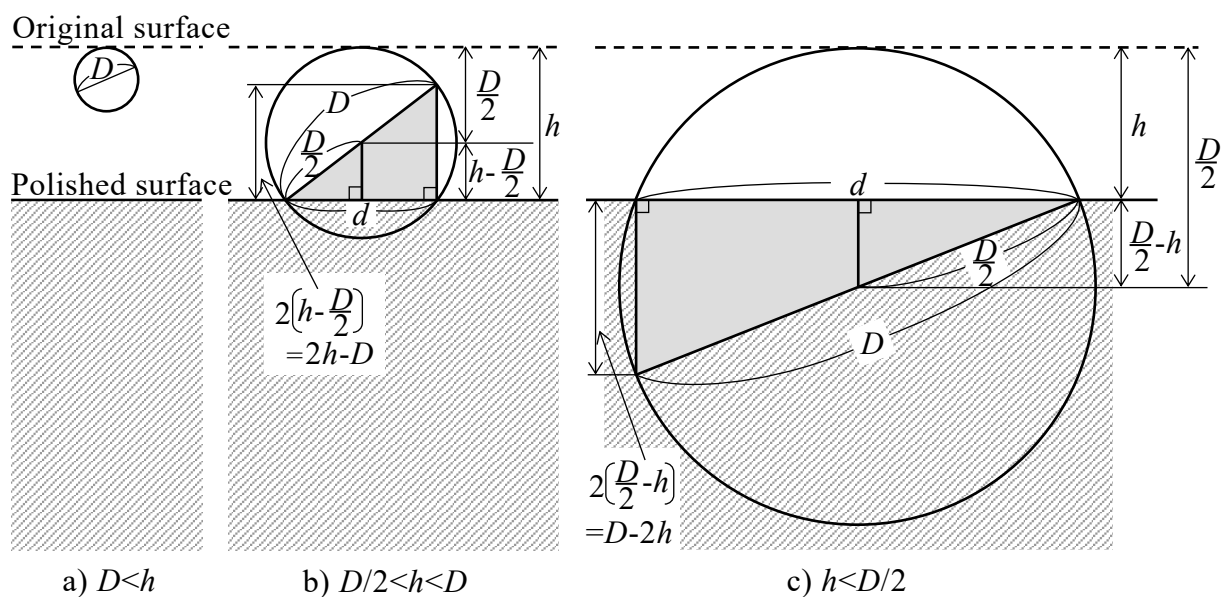


Fig. 6-5 Schematic diagram showing three representative patterns with relationship of sand particle diameter to polish depth, and their geometrical relationships of cross-sectional diameter to orthogonally projected diameter.



砂粒を球に近似し、式(6-12)より変換された砂粒の正射影直径  $D$  から体積を求める。以下、砂粒の切断面直径  $d$  から正射影直径  $D$  に変換することを「断面補正」と記す。そして体積に真密度  $\rho$  を乗じて、式(6-13)のように砂粒 1 個の質量  $m$  を求める。

$$m = (D^3/6) \pi \times \rho \quad (6-13)$$

けい砂と人工砂、それぞれの砂粒 1 個の質量を  $m_s$  と  $m_a$  とすると、式(6-14)から人工砂混入率  $P$  (mass%)を算出できる。この  $P$  は、個数%を表す  $p$  とは異なる。

$$P = \sum m_a / (\sum m_s + \sum m_a) \quad (6-14)$$

## (2) 砂粒の球および立方体近似による誤差要因

上記ステージ 2 では、砂粒の形状を球に近似している。人工砂はまだしも、けい砂では砂種により形状は大きく異なり、これが推定体積の誤差要因となる。これについては複数の代表的な立体形状を想定し、これらの間で生じる体積の変動の特性を導き、整理する。

鑄物砂のけい砂の形状は、多様である<sup>22~24)</sup>。例えば、アメリカ産の輸入砂は粒形係数(長軸/短軸)1.2 の回転楕円体として報告<sup>22)</sup>されているが、けい砂はさまざまな多面体の各面に凸凹が重なる複雑な形状を呈している<sup>24)</sup>。このようにさまざまな粒子形状が存在することへの対処法として球や正多面体など、代表的な立体形状について、粒子の方向が全立体角方向で不定であることを前提として、全立体角方向での平均挟み径(フェレ径ともいわれ、計測対象を挟む形で外接する平行線間距離)を計算し、対応する体積を求める方法が示されている<sup>25)</sup>。しかし、本研究の研磨方法では、水平面に平行な軸周りの粒子の方向は確定することから、挟み径に基づく方法を使うことができない。

そこで、けい砂の候補形状として、面数 6, 8, 12, 20 の正多面体(面数 6 は立方体)および文献の情報<sup>22, 23)</sup>に従い粒形係数が 1.2, 1.3, 1.4 の回転楕円体、そしてこの 1.2, 1.3, 1.4 を縦横比とし正方形断面をもつ直方体、さらには基本となる球の 11 種類の形状を選定した。そして、これら 11 種の候補形状について、典型的な立体形状である球および立方体に近似した場合の推定体積を計算し、これが真の体積の何倍になるかを幾何学的に考察する。さらに、得られた結果を全体的に比較する

ことで、球または立方体近似による誤差の特性を評価した。以下に、具体的に述べる。

球近似または立方体近似における体積倍率  $M_{\text{sphere}}$  または  $M_{\text{cube}}$  は、以下の手順で求められる。

- (1) 各候補形状(正多面体, 回転楕円体, 直方体, 球および立方体)において実体積  $V_{\text{true}}$  を計算する。
- (2) 多面体では 1 つの側面を水平面(研磨面に相当する)に置いたと仮定し、また直方体と回転楕円体では長辺または長軸を水平にして水平面に置いたと仮定し、正射影の面積  $S_{\text{pro}}$  を計算する。
- (3)  $S_{\text{pro}}$  に相当する球近似の半径  $r = (S_{\text{pro}} / \pi)^{1/2}$  および立方体近似の辺長  $a = (S_{\text{pro}})^{1/2}$  を計算する。
- (4)  $r$  に基づいて球近似の体積  $V_{\text{sphere}} = 4\pi r^3 / 3$  および  $a$  に基づいて立方体近似の体積  $V_{\text{cube}} = a^3$  を計算する。(以下、推定した体積を「推定体積」と記す)。
- (5) 各候補形状において、「体積倍率」=「実体積」÷「推定体積」と定義する。これにしたがって、球近似における体積倍率  $M_{\text{sphere}} = V_{\text{true}} / V_{\text{sphere}}$ 、立方体近似における体積倍率  $M_{\text{cube}} = V_{\text{true}} / V_{\text{cube}}$  を計算する。

**Fig. 6-6** に 11 種の候補形状の体積倍率を示す。Fig. 6-6 の横軸は 11 種の候補形状、縦軸は各候補形状における体積倍率である。また、横軸に記載した各形状の英語名の後の AR は縦横比(aspect ratio)を表し、括弧書きの数字、例えば(8)は正八面体であることを表す。Fig. 6-6 から以下の 2 つのことがわかる。

立方体近似と球近似における体積倍率を比較すると、11 種の候補形状いずれにおいても、立方体近似は球近似の  $\frac{3\sqrt{\pi}}{4}$  分の 1( $\approx 0.75$  倍)になる。

11 種の候補形状間で体積倍率を比較すると、候補形状が正 12 面体のときに最小値(球近似では約 0.78)となり、立方体のときに最大値(球近似では約 1.33)となる(両者の比率は約 1.71 ( $=1.33/0.78$ ))。

最後に、この計算には以下の誤差要因が含まれることを付記する。①2D 画像から 3D 体積を推定すると近似により誤差を生じる。②今回の 11 種の候補形状で説明できないほど不規則になっていけば、体積倍率にさらなる誤差を生む。③人工砂とけい砂がともに球であり、かつ粒度分布が一致していれば、統計的には切断

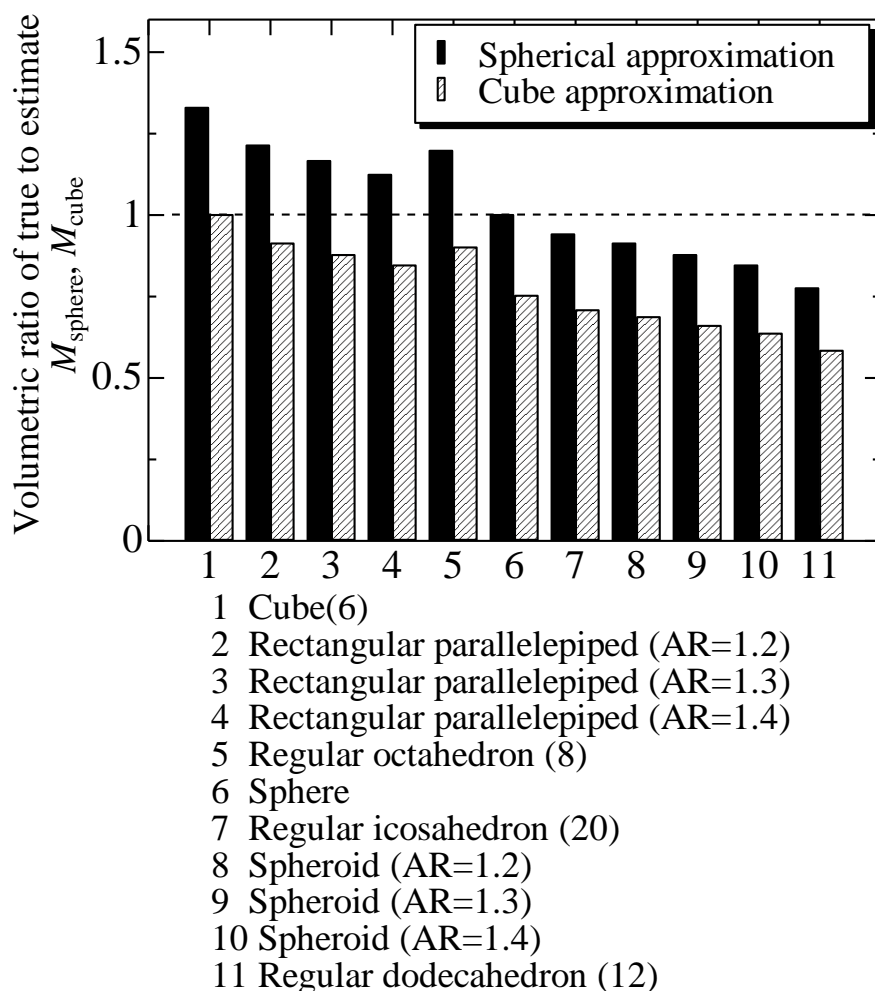


Fig. 6-6 Volumetric ratio of true to estimate for 11 candidate shapes.

高さの影響は考えなくてもよい。しかし，粒度分布が等しければ，粒度指数も等しくなるが，逆は必ずしも成り立たない。したがって，粒度指数が一致していても粒度分布が異なっていれば誤差を生む。

## 6.3 実験方法

### 6.3.1 再生砂を模擬した混合砂

本研究では，けい砂と人工砂からなる再生砂を模擬した混合砂として，高純度と低純度の2種類のけい砂およびムライト系とアルミナ系の2種類の人工砂を組み合わせた合計5種類の混合砂1～5を用いた。Table 6-1, 6-2に使用した高純度と低純度の2種類のけい砂およびムライト系とアルミナ系の2種類の人工砂の化

学成分と粒度分布，**Table 6-3** に作製した混合砂 1～5 の配合を示す．

Table 6-1 Chemical compositions of silica sands and artificial sands.

	mass%	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Silica sand (high purity)	99.8	0.0
Silica sand (low purity)	76.5	11.4
Artificial sand (mullite)	36.3	60.8
Artificial sand (alumina)	9.3	77.0

Table 6-2 Particle size distributions of silica sands and artificial sands.

	mass%								
Opening $\mu\text{m}$	600	425	300	212	150	106	75	53	AFS
Mesh	26	36	50	70	100	140	200	281	GFN
Silica sand (high purity)	0.1	2.8	12.9	33.2	40.7	10.0	0.3	0.0	61.5
Silica sand (low purity)	0.0	0.1	0.3	46.9	47.5	4.9	0.3	0.1	62.3
Artificial sand (mullite)	0.0	0.0	3.2	47.5	39.5	9.0	0.7	0.0	62.7
Artificial sand (alumina)	0.2	8.3	20.7	27.8	20.4	18.7	3.8	0.1	63.2

Table 6-3 Compounding percentages of mixed sands.

	mass%			
	Silica sand (high purity)	Silica sand (low purity)	Artificial sand (mullite)	Artificial sand (alumina)
Mixed sand 1	95		5	
Mixed sand 2	90		10	
Mixed sand 3	90		5	5
Mixed sand 4	80		10	10
Mixed sand 5		90	5	5

### 6.3.2 EDS 計測法ステージ 1 における砂粒の計測個数と人工砂混入率の計測精度の関係の検証

EDS 計測法ステージ 1 における砂粒の計測個数と人工砂混入率の計測精度の関係を検証する実験を行った。検証実験には、再生砂を模擬した砂として、高純度けい砂にムライト系人工砂を混合した 2 種類の混合砂 1 と 2 を用いた。鑄造現場では通気度等に影響が出ないように、AFS(American Foundry Society)粒度指数に差のない人工砂を添加することが多い。本実験でも人工砂とけい砂の AFS 粒度指数を約 62~63 とし、なるべく差のないようにした。

検証実験では、まず、混合砂 1 と 2 について、人工砂混入率  $p$  (個数%) を 1 回計測する際の砂粒の計測個数を 10, 20, 50, 100, 200 個の 5 種類に変えて、人工砂混入率を繰り返し 10 回計測し、砂粒の計測個数と人工砂混入率の関係を得た。次に、6.2.4 項の式(6-5')より求めた  $\Delta p_{nec} - n_{nec}$  の関係と計測値を比較することで、6.2.3 項の式(6-5)の妥当性を検証した。

以下に、EDS 計測法ステージ 1 の手順を述べる。混合砂 1 と 2 を容器内の平面に散布後、その容器に 2 液硬化型樹脂を流し込み、樹脂埋込みを行った。その後、樹脂埋めされた砂粒を SiC 耐水研磨紙で #1500 まで研磨し、SEM-EDS 用試料とした。研磨深さについては、砂粒の研磨断面の挟み径が SEM-EDS の解像度に比べ十分な大きさとなり、かつ研磨による砂の剥落を防ぐため、 $75 \pm 25 \mu\text{m}$  の範囲に入るようにした。

SEM-EDS 用試料をカーボン蒸着した後、EDS 計測を行った。EDS 計測には、SEM-EDS(株式会社日立ハイテクノロジーズ製 SU3800, オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社製 AZtecLIVE-UltimMax65)を用いた。EDS のマッピングは Si, Al, O について行い、得られたマッピング像から砂粒の個数を求め、6.2.2 項の式(6-1)より人工砂混入率  $p$  (個数%) を算出した。EDS 計測の条件は、加速電圧を 15kV とし、計測倍率を 50 倍とし、マッピングの画素数を  $1024 \times 768 \text{ pixel}$  とし、画素サイズを  $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$  とした。なお、1 画面あたりの砂粒の個数は 50~100 個であることから、目標精度を満たす砂粒の計測個数に合わせて、1 視野から複数の視野について EDS 計測を行った。

### 6.3.3 再生砂を模擬した混合砂の人工砂混入率の計測

#### (1) EDS 計測法ステージ 1

けい砂と人工砂からなる再生砂を模擬した砂として、高純度と低純度の 2 種類のけい砂およびムライト系とアルミナ系の 2 種類の人工砂を組み合わせた合計 4 種類の混合砂 2~5 について、6.3.2 項と同様の方法により試料を作製し、人工砂混入率  $p$  (個数%)を計測した。なお、砂粒の計測個数は、信頼係数  $\beta$  を 95% とし、人工砂混入率  $p$  の目標精度  $\Delta p_{nec}$  を  $\pm 2$  パーセントポイントとしたときの目標精度を満たす個数以上とした。

#### (2) EDS 計測法ステージ 2

6.2.5 項(1)の方法により、砂粒を球に近似し、EDS 計測で得られたけい砂および人工砂のマッピング像(切断断面積)、研磨深さ  $h$ 、砂の真密度  $\rho$  から人工砂混入率の mass% の推定を行った。砂の真密度  $\rho$  として、高純度および低純度けい砂には  $2.6\text{g/cm}^3$ 、ムライト系人工砂には  $3.0\text{g/cm}^3$ 、アルミナ系人工砂には  $3.2\text{g/cm}^3$  を用いた<sup>26)</sup>。また、ムライト系とアルミナ系人工砂を混合した混合砂 3~5 の人工砂の真密度には  $3.1\text{g/cm}^3$  を用いた。

## 6.4 実験結果および考察

### 6.4.1 EDS 計測法ステージ 1 における砂粒の計測個数と人工砂混入率の計測精度の関係の検証

Fig. 6-7, 6-8 に、混合砂 2(高純度けい砂と人工砂)と混合砂 5(低純度けい砂と人工砂)の人工砂混入率(個数%)の計測例を示す。両図において、a)は二次電子像、b)は Si のマッピング像、c)は Al のマッピング像、d)は O のマッピング像である。Fig. 6-7 の混合砂 2 では、b)の Si のマッピング像から高純度けい砂を、c) Al のマッピング像から人工砂を容易に判別可能であるため、それぞれの砂粒の個数を計測できる。他方、Fig. 6-8 の混合砂 5 の b) Si のマッピング像は、混合砂 2 の高純度けい砂とは異なっている。しかし、低純度けい砂は人工砂に比べ明るいいため、人工砂を除外して、低純度けい砂の個数を計測できる。Fig. 6-8 の混合砂 5 の c) Al のマッピング像では、人工砂だけでなく、Al を含む低純度けい砂がいくつか確認

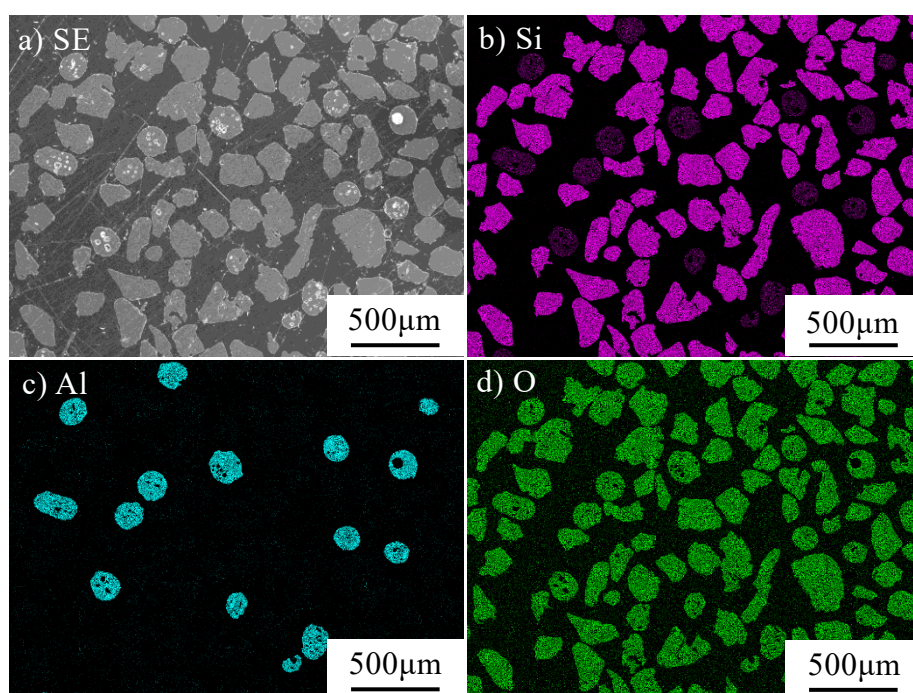


Fig. 6-7 EDS element maps of mixed sand 2.

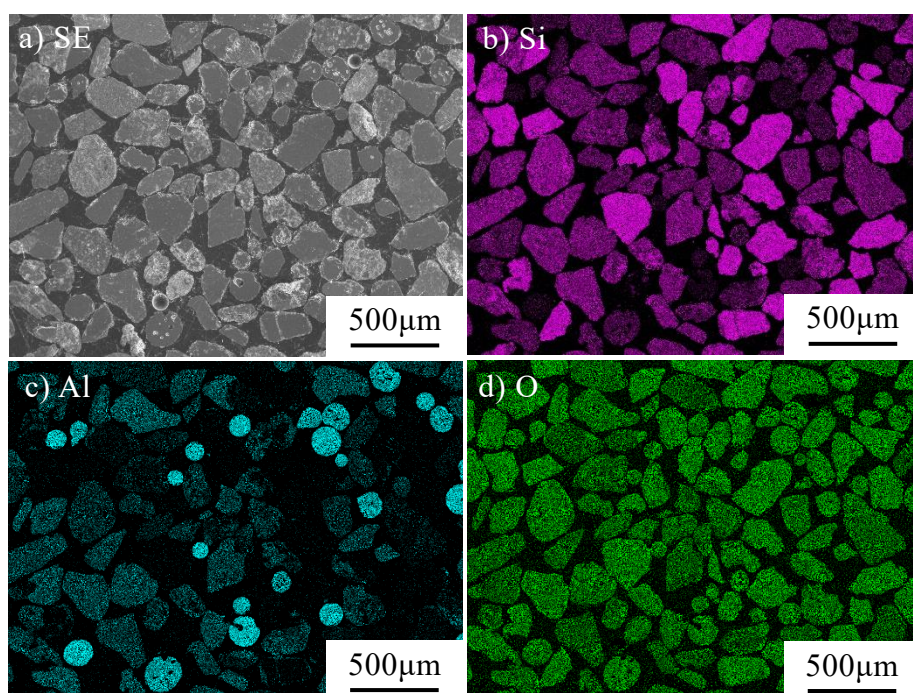


Fig. 6-8 EDS element maps of mixed sand 5.

される．この場合も，人工砂は低純度けい砂に比べ十分に明るいため，低純度けい砂を除外して，人工砂の個数を計測できることがわかる．また，Fig. 6-7, 6-8 と

もに、d) O のマッピング像から全砂粒数を求め、c) Al と d) O のマッピング像から人工砂混入率を求めることも可能である。

けい砂と人工砂の個数の具体的な求め方、粒子計測方法について、Fig. 6-7 の b) Si と c) Al のマッピング画像を例に説明する。本粒子計測には、株式会社イノテック製画像計測ソフトウェア Quick Grain を用いた。まず、取得した Si と Al のカラーのマッピング画像を 8 ビットのグレースケール画像に変換した。次に画像計測ソフトウェアの粒子計測機能を用いて、目視にてグレースケール画像を二値化し、けい砂と人工砂の抽出を行った。抽出方法は次のとおりである。Table 6-1 のとおり、けい砂については Si の含有率が高く、Al の含有率が低いことから、b) Si のマッピング画像ではけい砂は明るく、c) Al のマッピング画像ではけい砂は暗くなる。他方、人工砂については Si の含有率が低く、Al の含有率が高いことから、b) Si のマッピング画像では人工砂は暗くなり、c) Al マッピング画像では人工砂は明るくなる。したがって、けい砂については b) Si のマッピング画像の明るい砂を、人工砂については c) Al マッピング画像の明るい砂を抽出し、けい砂と人工砂の個数を求めた。本画像計測ソフトウェアを用いれば、砂粒の個数に加え、面積、周囲長などを同時に得ることができる。Fig. 6-9 に粒子計測後の Si と Al のマッピング画像を示す。Fig. 6-9 から、a) Si のマッピング画像では Si(けい砂)を、b) Al のマッピング画像では Al(人工砂)を抽出できていることがわかる。人工砂混入率  $p$  (個数%)の計測では、Fig. 6-7, 6-8 と同様な画像を複数取得し、上記方法により砂粒の個数を求め、人工砂混入率  $p$  (個数%)を算出した。

混合砂 1 と 2 について、人工砂混入率  $p$  (個数%)を 1 回計測する際の砂粒の計測個数を 10, 20, 50, 100, 200 個に変えて、人工砂混入率  $p$  を繰り返し 10 回計測して得られた結果を Fig. 6-10, 6-11 に示す。縦軸は人工砂混入率  $p$  (個数%)を、横軸は 1 回の計測における砂粒の計測個数を示し、砂粒の計測個数の 10, 20, 50, 100, 200 には、それぞれ繰り返し 10 回計測した結果が 10 点プロットされている。また、砂粒の計測個数の 10, 20, 50, 100, 200 にある縦軸方向のエラーバーは、6.2.4 項の式(6-5')の砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  に 10, 20, 50, 100, 200 を代入して得られた目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  の範囲を示す。なお、信頼係数  $\beta$  には 95%を、その信頼係数  $\beta$  に対応させて  $z_{1/2+\beta/2}$  には 1.96 を、人工砂混入率の真値  $p_{\text{true}}$  には全計測個数(3800 個)から得



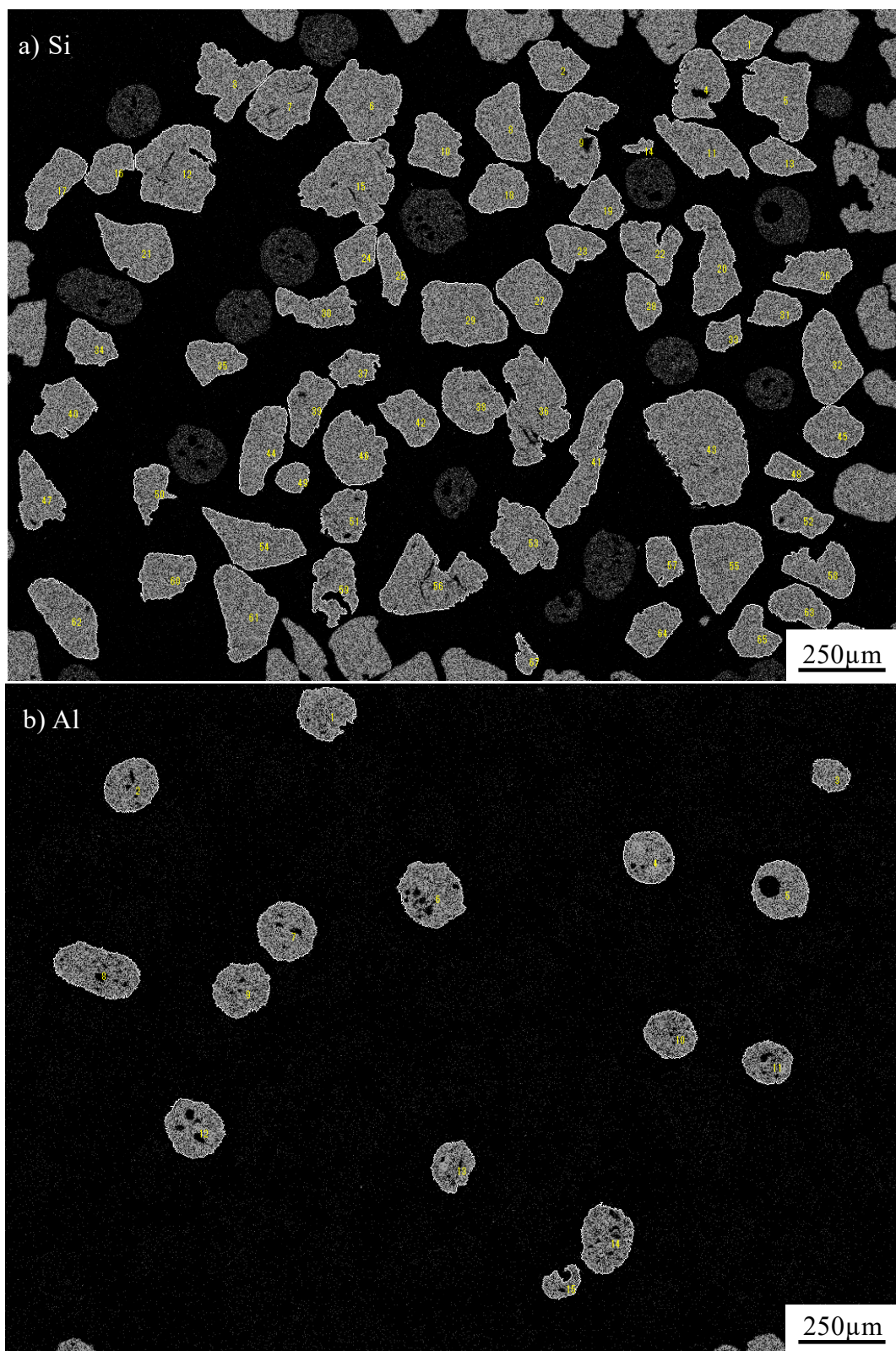


Fig. 6-9 Particle-measured EDS element maps (mixed sand 2).

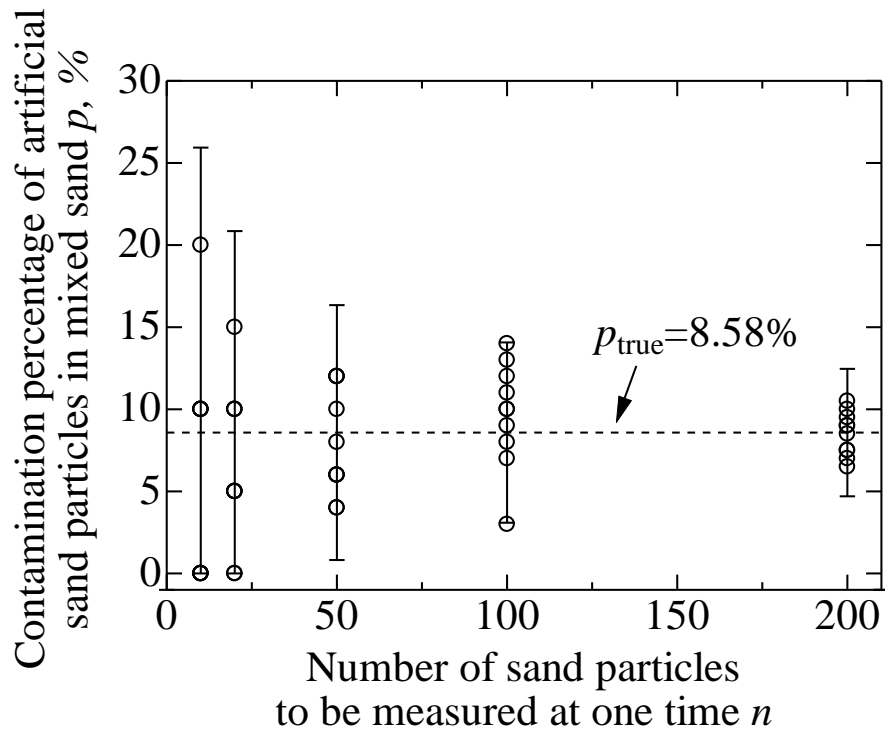


Fig. 6-10 Result showing that the accuracies  $\Delta p_{\text{nec}}$  theoretically modeled by number of sand particles to be measured agree well with experimental data of percentages of artificial sand particles to mixed-sand particles (mixed sand 1).

られた値(混合砂 1 は 8.58%, 混合砂 2 は 14.6%)を用いた. Fig. 6-10 では目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  の範囲に入った計測値は 50 点中の 49 点, Fig. 6-11 では 50 点中の 47 点であった. 両者を併せれば, 計測値 100 点中の 96 点, つまり割合 0.96 ( $=96/100$ ) で  $\Delta p_{\text{nec}}$  の範囲に入ったことになる. その一方で, 信頼係数が 95%であることから, 目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  の範囲に収まる確率は 0.95 である. 実験で得られた割合 0.96 は信頼係数に対応する確率 0.95 とよく一致しており, EDS 計測法ステージ 1 に対して 6. 2. 3 項の式(6-5)の有効性が確認された. また, 砂粒の計測個数が増えるとともに, 計測値は人工砂混入率の真値である  $p_{\text{true}}$  に収束していく.

## 6. 4. 2 再生砂を模擬した混合砂の人工砂混入率の計測

### (1) EDS 計測法ステージ 1

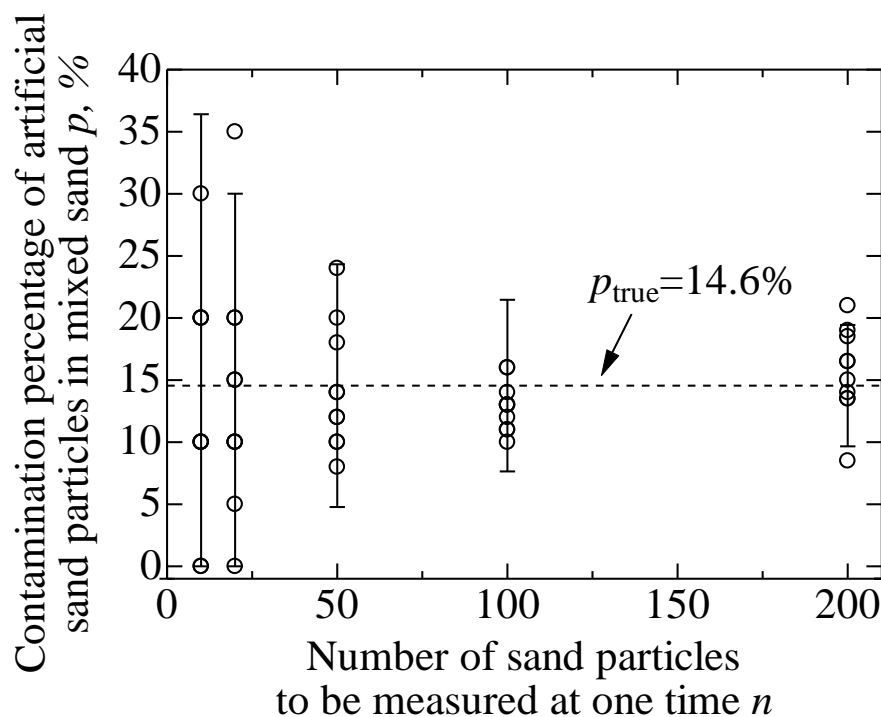


Fig. 6-11 Result showing that the accuracies  $\Delta p_{\text{nec}}$  theoretically modeled by number of sand particles to be measured agree well with experimental data percentages of artificial sand particles to mixed-sand particles (mixed sand 2).

**Table 6-4** の①に、混合砂 2～5 について、EDS 計測法ステージ 1 により人工砂混入率  $p$  (個数%)を計測した結果を示す。人工砂配合率が 10mass%の混合砂 2, 3 と 5 では、人工砂混入率  $p$  (個数%)の計測値は、それぞれ 13.6, 16.3, 19.7 個数%である。両パーセンテージには大きな差があるため、単純に、EDS 計測法ステージ 1 により得られた人工砂混入率の個数%を mass%とみなすことはできない。一方、けい砂と人工砂の組み合わせが同じで人工砂配合率が異なる、混合砂 3 と 4 では、人工砂配合率が 2 倍であるのに対し、人工砂混入率  $p$  (個数%)も約 2 倍になっており、同じ砂種の組み合わせであれば、人工砂配合率との差はあるものの、人工砂混入率の比例関係は成立していると推察される。

## (2) EDS 計測法ステージ 2

Table 6-4 Contamination percentage for the four kinds of mixed sand: ①measured  $p$ , ②measured and estimated  $P$  using spherical approximation without cross sectional correction, ③ measured and estimated  $P$  using spherical approximation.

	Designed $P$ [mass%]	①Measured $p$ [particle%]	②Measured & estimated $P$ using spherical approximation without cross sectional correction [mass%]	③Measured & estimated $P$ using spherical approximation [mass%]
Mixed sand 2	10	13.6 (+3.6)	11.6 (+1.6)	8.6 (-1.4)
Mixed sand 3	10	16.3 (+6.3)	11.8 (+1.8)	10.5 (+0.5)
Mixed sand 4	20	30.3 (+10.3)	24.3 (+4.3)	20.1 (+0.1)
Mixed sand 5	10	19.7 (+9.7)	11.5 (+1.5)	10.5 (+0.5)

(The numerical value in parentheses shows the difference of  $P$  from designed.)

6.2.5 項(1)に記載のとおり，砂粒を球に近似し，EDS 計測で得られたけい砂および人工砂のマッピング像から切断円直径(円相当径)  $d$  を求め，断面補正により研磨深さ  $h$  との対応で正射影直径  $D$  を推定(変換)する．本実験で用いた混合砂 4 の人工砂を例として，断面補正を用いて，計測値  $d$ (切断面直径)から推定値  $D$ (正射影直径)へ変換した結果を **Fig. 6-12** に示す．なお，混合砂 4 の研磨深さ  $h$  は  $64\mu\text{m}$  である．この変換結果に基づいて，ふるい分けによる粒度分布(mass%)と比較できるように，上記の断面補正前の直径  $d$  と断面補正後の直径  $D$  から砂粒 1 個の質量を求め，それぞれをふるい分けと同じ階級に分類し，粒度分布(mass%)を求めた．**Fig. 6-13** は，その結果である．なお，混合砂 4 ではムライト系人工砂とアルミナ系人工砂が 1:1 であることから，人工砂のふるい分けによる粒度分布(mass%)は，階級ごとに両人工砂の平均として求めた．**Fig. 6-13** では断面補正後の粒度分布のグラフは断面補正前のグラフに比べ，ふるい分けによるグラフの形にかなり近づいている．AFS 粒度指数は，粒度分布を 1 つの数値で表したものである．**Fig. 6-13** から AFS 粒度指数を計算した．ふるい分けの AFS 粒度指数が 62.9 に対し，断

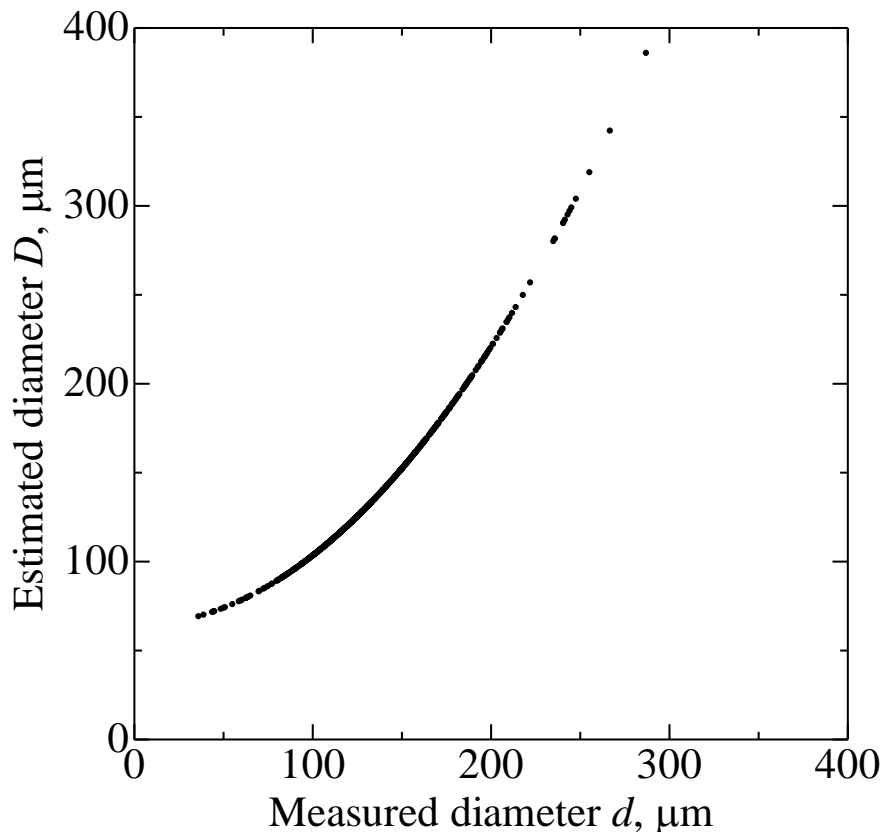


Fig. 6-12 Diameter transformation from cross-section to orthogonal projection  
(mixed sand 4, artificial sand).

面補正前の AFS 粒度指数は 82.4 であり，断面補正前の AFS 粒度指数は，ふるい分けによる AFS 粒度指数に比べかなり大きくなった．これに対し，断面補正後の AFS 粒度指数は 75.6 であり，断面補正を行うことにより，ふるい分けによる AFS 粒度指数との差が小さくなることが確認された．

Table 6-4 の②と③に，球近似により推定された人工砂混入率  $P$  (mass%)を示す．②は断面補正なしで球近似により推定された人工砂混入率  $P$  (mass%)，③は EDS 計測法ステージ 2 により推定された人工砂混入率  $P$  (mass%)である．②と③の違いは，断面補正の有無である．混合砂 2～5 の人工砂の配合率は 10 または 20% である．これに対して，②の研磨断面から推定(断面補正なし)された人工砂混入率  $P$  (mass%)の誤差(推定人工砂混入率-配合率)は，混合砂 2～5 のすべての条件で③より大きく，最大+4 パーセントポイントであった．一方，③EDS 計測法ステージ 2

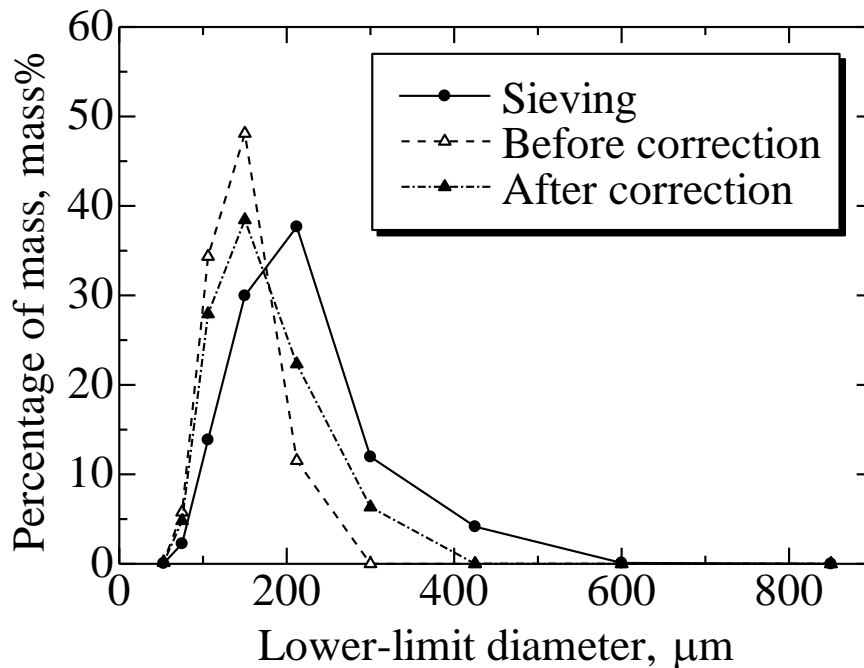


Fig. 6-13 Particle size distributions of before- and after-cross sectional correction, and that of sieving for mixed sand 4 (artificial sand).

により推定された人工砂混入率  $P$  (mass%)の誤差は、 $\pm 2$  パーセントポイントの範囲であり、断面補正により推定値は改善され精度よく推定できていることが確認された。

## 6.5 結言

再生砂中の人工砂混入率の新たな計測法として、SEM-EDS による個数%の計測、その計測誤差の定量化、さらには砂粒の球近似に基づく切断断面積から球の体積・質量への変換法について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 再生砂中の人工砂混入率の新たな計測法として、画像計測を用いて EDS マッピング像から人工砂混入率の個数%を求め、人工砂混入率の mass%を推定する計測法(EDS 計測法)を提案し、その有効性を確認した。
- 2) EDS 計測法において、目標精度(信頼係数  $\beta$ ，目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$ )を満たす砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  は、人工砂混入率  $p_{\text{true}}$ ， $\beta$  に対応する標準正規分布の上限  $z_{1/2+\beta/2}$  に

より， $n_{\text{nec}} = z_{1/2+\beta/2} p_{\text{true}} (1 - p_{\text{true}}) / \Delta p_{\text{nec}}^2$  で表される．この式の有効性を確認するため，再生砂を模擬した混合砂を用いて人工砂混入率を計測する実験を行った．その結果，人工砂混入率の計測値は，この式より得られた目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  の範囲に信頼係数  $\beta$  とほぼ等しい割合で入っており，EDS 計測法に対して，この式が有効であることを確認した．

- 3) 砂粒を球に近似し，EDS マッピング像(砂粒の断面)から切断円直径 (円相当径) を求め，研磨深さとの対応で砂粒の正射影直径ひいては砂粒の体積を推定(変換)する方法を考案した．
- 4) 人工砂とけい砂の粒度指数に差がない場合において，人工砂，けい砂ともに，球に近似して求めた正射影直径から砂粒の体積を求め，これに真密度を乗じて人工砂混入率(mass%)を推定した結果，人工砂配合率(mass%)とよく一致した．

## 参考文献

- 1) 黒川豊，木内一彦，“中子”，*鑄造工学*，**89** (2017) 524
- 2) 富永恭爾，“*鑄型の生産技術 第2版*”，(2002) 245
- 3) 中小企業総合事業団 情報・技術部，“*シェルモールド中子造型に係る技術・技能*”，(2001) 1-1
- 4) 俵田隆之，“*人工砂 RCS 専用リサイクルシステムの確立*”，*素形材*，**52** (2011) 1, 22
- 5) 橋本邦弘，“*生型造型技術の課題と動向*”，*素形材技術セミナー(鑄物砂の現状とこれから)テキスト*，(2018) 45
- 6) 枝根和也，天久裕樹，上林仁司，黒川豊，“*ノルム法補正 X 線回折シリカプログラムによるオーリチックス定量*”，*鑄造工学*，**86** (2014) 136
- 7) 枝根和也，天久裕樹，上林仁司，黒川豊，“*X線回折シリカプログラム法へのノルム計算適用*”，*日本鑄造工学会第160回全国講演大会概要集*，**160** (2012) 82
- 8) 上林仁司，枝根和也，天久裕樹，黒川豊，“*オーリチック定量に関する新たな知見と管理技術*”，*日本鑄造工学会第164回全国講演大会技術講習会テキスト*，(2014) 11
- 9) 川上学，“*人工砂の現状と課題*”，*素形材技術セミナー(鑄物砂の現状とこれから)テキスト*，(2018) 3
- 10) 黒川豊，“*人工砂の特性*”，*鑄造工学*，**89** (2017) 464
- 11) <https://www.cmet.co.jp/> 2023.5.1
- 12) <https://www.exone.com/> 2023.5.1
- 13) <https://www.voxeljet.com/> 2023.5.1
- 14) <https://www.fhzi-3dp.com/> 2023.5.1
- 15) <https://www.kocel.com/> 2023.5.1
- 16) 伊藤恭祐，樋尾勝也，赤田英里，“*画像処理による再生砂（天然砂・人工砂）の判別*”，*三重県工業研究所 研究報告*，**44** (2020) 133
- 17) 青木圭子，秋山鐵夫，“*固体混合の混合度とサンプリング*”，*粉体工学会誌*，**33** (1996) 410
- 18) 渡辺治夫，“*2成分粒子の混合状態評価ーランダムネスの検定ー*”，*粉体工学会*



誌, **23** (1986) 738

19) R. T. DeHoff and F. N. Rhines, “Quantitative Microscopy”, McGraw-Hill Book Co., (1968) 149

20) 野口徹, 宮城一裕, 成田利勝, 長岡金吾, “球状黒鉛鑄鉄の三次元黒鉛粒度分布”, 鑄物, **56** (1984) 683

21) 幸田成康, “金属学への招待”, (1998) 145

22) 黒川豊, 天久裕樹, “新しい砂の耐摩耗性評価法”, 素形材, **49** (2008) 2, 36

23) H. Ameku, H. Kambayashi, Y. Kurokawa, H. Hirata and H. Miyake, “Evaluation of Compression Strength of Foundry Sand Grains”, AFS Trans., **113** (2005) 361

24) 吉村優治, 小川正二, “砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法”, 土木学会論文集(III)-22, **463** (1993) 95

25) 宮本潔, “厚みのある材料の形態計測の基礎(2)”, 電子顕微鏡, **19** (1984) 114

26) 一般社団法人日本鑄造協会 技術部会 人工砂委員会, “鑄鉄工場への人工砂導入のための指針と事例”, (2012) 76



## 第 7 章 結論

積層造形砂型を活用した鑄造技術は、試作開発期間の短縮が可能であるなどの特長を有する。一方で、本技術の 3 つの問題点、(1)積層段差、(2)砂型の強度、(3)人工砂の混入への対応が必要である。本研究では、積層造形砂型を活用した鑄造技術に関する 3 つの問題点を解決するための検討を行い、以下の成果を得た。

第 1 の問題点である積層段差については、積層段差エッジ部での微視的斜面の形成に対して砂の脱落によるモデルを提案し、その形成された微視的斜面の角度  $\phi_{\text{sand}}$  の平均値が  $36^\circ$  程度になることを明らかにした。さらに、水平面と微視的斜面を接続した折れ線のモデルを用いて積層段差の視認可否のメカニズムを説明した。また、積層段差を定量化した巨視的斜面の表面粗さと、その角度の関係をモデル化し、そのばらつく範囲を明らかにした。さらに、砂型に形成された積層段差の鑄造品への転写特性を明らかにし、積層段差への対策を提案した。

第 2 の問題点である砂型の強度については、乗法モデルを適用し、曲げ強度と充填率、バインダ含有率について回帰分析を行い、充填率とバインダ含有率を説明変数として、目的変数の曲げ強度を説明することができる回帰式を導出した。これにより、中子折れなどに対応するための手立てを提供することが可能となった。

第 3 の問題点である人工砂の混入への対応としては、画像計測により再生砂中の人工砂混入率を計測する方法を提案した。これにより、再生砂中の人工砂混入率を把握し、必要に応じてけい砂を投入するなどの対策も可能になった。

本研究の各章で得られた主な成果は以下のとおりである。

第 1 章では、模型を用いた砂型鑄造を俯瞰し、積層造形を用いて砂型を直接造形する技術を概観した。さらに、積層造形砂型を活用した鑄造技術の特長および問題点を整理した。

第 2 章では、積層造形砂型について、積層段差エッジ部での微視的斜面形成のモデル化、巨視的斜面の角度  $\theta$  によって積層段差が視認されにくくなるメカニズ

ムの解明を試みた．また，積層段差を定量化するため，積層段差側面の画像から砂型の巨視的斜面の表面粗さを求める方法を検討し，その方法を用いてその斜面の表面粗さ  $Rz_{\text{sand}}$  と  $\theta$  の関係について調べた．得られた主な知見は以下のとおりである．

- 1) 砂型の積層段差エッジ部での微視的斜面形成に対し，砂の脱落によるモデルを提案した．また，砂の脱落により形成される微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{sand}}$  の平均値が  $36^\circ$ 程度になることを明らかにした．
- 2) 積層段差の視認可否のメカニズムに対して水平面と微視的斜面を接続した折れ線のモデルを用いて，以下のように説明することができた． $\theta$  が大きくなるにしたがって微視的斜面に挟まれた水平面が狭くなり， $\theta$  が  $\varphi_{\text{sand}}$  を超えると，水平面が消失し巨視的斜面が微視的斜面のみで構成されるようになるため，積層段差が視認されにくくなる．
- 3) 積層段差を定量化した  $Rz_{\text{sand}}$  と  $\theta$  の関係をモデル化した．このモデルを用いて， $\varphi_{\text{sand}}$  の平均値から計算される  $Rz_{\text{sand}}$  と，画像計測により得られる垂直方向の平面の  $Rz_{\text{sand}}$  の大きい方が最終的な表面粗さを与えることを説明することができた．また， $Rz_{\text{sand}}$  のばらつく範囲は概ね  $\varphi_{\text{sand}}$  の 95% 下方および上方予測限界で形成される  $Rz_{\text{sand}}$  と，垂直方向の平面の  $Rz_{\text{sand}}$  に囲まれた領域に相当する．

第 3 章では，積層造形砂型を用いて鋳鉄鋳造品を作製し，積層段差の鋳造品への転写特性を調べた．さらに第 2 章と第 3 章で得られた結果から，積層段差について，積層造形砂型の造形および鋳造での対策を検討した．得られた主な知見は以下のとおりである．

- 1) 鋳放し材では， $\varphi_{\text{sand}}$  が大きい微視的斜面ほど，溶湯により砂が脱落し，脱落後の砂型の形状が鋳放し材に転写されることを明らかにした．この結果は砂型から鋳造品への形状の転写特性を示している．
- 2) 砂型と同様に，鋳放し材について，積層段差を定量化した表面粗さ  $Rz_{\text{cast}}$  と  $\theta$  の関係をモデル化した．このモデルを用いて， $\varphi_{\text{cast}}$  の平均値から計算される  $Rz_{\text{cast}}$  と，画像計測により得られる垂直方向の平面の  $Rz_{\text{cast}}$  の大きい方が最終的な表面粗さを与えることを説明することができた．また， $Rz_{\text{cast}}$  のばらつく範囲は概ね

$\varphi_{\text{cast}}$  の 95% 下方および上方予測限界で形成される  $Rz_{\text{cast}}$  と、垂直方向の平面の  $Rz_{\text{cast}}$  に囲まれた領域に相当する。

第 2 章と第 3 章で得られた結果から、積層段差に対する砂型の対策として、巨視的斜面を含む部分と含まない部分に分割し、斜面を含む部分の斜面を平面あるいは  $20^\circ$  程度に傾けた形で造形し、その後これらを組み合わせる方法を提案した。さらに鋳造では、溶湯による砂の脱落により、砂型の  $\varphi_{\text{sand}}$  および  $Rz_{\text{sand}}$  に比して、鋳放し材の  $\varphi_{\text{cast}}$  および  $Rz_{\text{cast}}$  は小さくなる。また、SB 処理は積層段差エッジ部の微視的斜面の角度  $\varphi_{\text{cast}}$  を低下させ、 $Rz_{\text{cast}}$  を小さくすることを明らかにした。

第 4 章では、積層造形砂型において複数の層(段差)により構成される影線間の距離を画像計測し、その距離から積層厚さを推定する方法を検討し、その有効性を評価した。得られた主な知見は以下のとおりである。

- 1) 影線間距離計測法による積層厚さの推定は、簡単に、また著しく脆い砂型にも適用できる。また、実験によってその有効性を確認した。
- 2) 影線間距離計測法(巨視的斜面への光の照射)は目視観察に比べ、容易に積層段差を視認できる。

以上のことから、「影線間距離計測法」は積層段差を容易に視認できることに加え、影線間距離を画像計測し、巨視的斜面の角度を用いて積層厚さを推定できることを明らかにした。この方法を活用することにより積層造形装置の寸法精度の評価ができるようになった。

第 5 章では、一液式積層造形装置により作製された積層造形砂型に対しても、富田らの研究で得られた曲げ強度と充填率の関係、曲げ強度とバインダ含有率の関係が成り立つことを確認した。さらに、乗法モデルを適用し、砂型の曲げ強度と充填率、バインダ含有率について回帰分析を行い、曲げ強度に対する充填率とバインダ含有率の回帰式の取得を試みた。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 一液式積層造形装置で作製された砂型に対しても、砂型の曲げ強度は充填率の二次関数で表される。
- 2) 一液式積層造形装置で作製された砂型に対しても、砂型の曲げ強度はバインダ

含有率の 0.57 乗の関数で表される。

- 3) 一液式積層造形装置で作製された砂型について、砂型の曲げ強度と充填率、バインダ含有率に乘法モデルを適用することにより、曲げ強度の回帰式を得た。この回帰式により、砂型の充填率とバインダ含有率から曲げ強度を推定することができる。

以上のことから、砂型の重要な造形条件である充填率とバインダ含有率との対応で曲げ強度を予測することができ、注湯に際して、中子折れなどの砂型の破損を未然に防ぐ手立てを提供することが可能となった。

第 6 章では、再生砂中の人工砂混入率を計測する新たな計測法(EDS 計測法)の確立を目的として、SEM-EDS による個数%の計測およびその計測誤差の定量化、さらには砂粒の球近似に基づく切断断面積から球の体積・質量への変換法を検討した。また、再生砂を模擬した砂として、けい砂と人工砂を組み合わせた種々の混合砂を作製し、これら混合砂の人工砂混入率を個数%および mass%で求め、上記方法の計測精度を検証した。得られた主な知見は以下のとおりである。

- 1) 再生砂中の人工砂混入率の新たな計測法として、画像計測を用いて EDS マッピング像から人工砂混入率の個数%を求め、人工砂混入率の mass%を推定する計測法(EDS 計測法)を提案し、その有効性を確認した。
- 2) EDS 計測法において、目標精度(信頼係数  $\beta$ , 目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$ )を満たす砂粒の計測個数  $n_{\text{nec}}$  は、人工砂混入率  $p_{\text{true}}$ ,  $\beta$  に対応する標準正規分布の上限  $z_{1/2+\beta/2}$  により、 $n_{\text{nec}} = z_{1/2+\beta/2}^2 p_{\text{true}} (1 - p_{\text{true}}) / \Delta p_{\text{nec}}^2$  で表される。この式の有効性を確認するため、再生砂を模擬した混合砂を用いて人工砂混入率を計測する実験を行った。その結果、人工砂混入率の計測値は、この式より得られた目標精度  $\Delta p_{\text{nec}}$  の範囲に信頼係数  $\beta$  とほぼ等しい割合で入っており、EDS 計測法に対して、この式が有効であることを確認した。
- 3) 砂粒を球に近似し、EDS マッピング像(砂粒の断面)から切断円直径 (円相当径)を求め、研磨深さとの対応で砂粒の正射影直径ひいては砂粒の体積を推定(変換)する方法を考案した。

以上のことから、「EDS 計測法」により、再生砂に混入した人工砂について、必

要な精度に応じて人工砂混入率の個数%を計測することが可能となり，さらには，球近似に基づく切断断面積から体積・質量への変換により人工砂混入率の mass% を算出できることが明らかとなった．これにより再生砂を適切に管理する上で重要な人工砂混入率を把握できるようになった．

本研究を総括すると，積層造形砂型を活用した鑄造技術に関する 3 つの問題点，(1)積層段差，(2)砂型の強度，(3)人工砂の混入に対し，砂型造形および鑄造における積層段差対策，積層造形砂型の充填率およびバインダ含有率から曲げ強度を予測する方法，さらには，人工砂混入率の計測による再生砂の適切な管理を提案する．本研究により得られた成果を普及，発展させることにより，積層造形砂型を活用した鑄造技術は，リサイクル性を考慮しつつ，高品質な砂型および鑄造品を安定して製造できる技術として確立され，さらには，次世代に対応した砂型造形および鑄造技術として社会に貢献できる．





## 本論文に関連する研究発表

### 第 2 章

- 1) 金森陽一，森 康暢，野村由司彦，“バインダジェット式積層造形により作製された砂型の積層段差エッジ部の形状と表面粗さ”，*鑄造工学*, Vol. 95, pp. 357-363, 2023.

### 第 3 章

- 1) 金森陽一，森 康暢，野村由司彦，“積層造形砂型により作製された鑄鉄鑄造品の積層段差のエッジ形状と表面粗さに及ぼす製造条件の影響”，*鑄造工学*, Vol.95, pp. 497-503, 2023.

### 第 4 章

- 1) 金森陽一，樋尾勝也，野村由司彦，内田富士夫，黒沢憲吾，“バインダジェット式積層造形により作製された砂型および鑄鉄鑄造品の表面粗さと積層段差”，*鑄造工学*, Vol. 94, pp. 297-302, 2022.
- 2) 金森陽一，伊藤恭祐，樋尾勝也，内田富士夫，黒沢憲吾，“積層造形砂型および鑄造品に発生する積層段差”，*日本鑄造工学会第 174 回全国講演大会講演概要集*, p. 19, 2019.

### 第 5 章

- 1) 金森陽一，伊藤恭祐，中野真紘，野村由司彦，“バインダジェット式積層造形砂型の曲げ強度に及ぼす充填率とバインダ含有率の影響”，*鑄造工学*, Vol. 95, pp. 444-447, 2023.

### 第 6 章

- 1) 金森陽一，野村由司彦，“SEM-EDS 分析による再生砂中の人工砂混入率測定”，*鑄造工学*, Vol. 94, pp. 472-481, 2022.



## 謝辞

本研究は、2020 年 4 月から 2024 年 3 月にかけて、三重県工業研究所金属研究室において行われました。本研究をまとめるにあたり、多くの方にお世話になりました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

まず、本論文を執筆するにあたり、数多くの有益なご助言を賜り、考察の論理的な組み立て方など細部にわたるご指導を頂きました三重大学大学院工学研究科情報工学専攻教授 成瀬央博士に深く感謝の意を表します。

そして、本研究の遂行と本論文の執筆にあたり、研究に取り組む姿勢から研究手法、データ解析の方法、論文のまとめ方まで、終始懇切丁寧にご指導とご鞭撻を賜りました三重大学名誉教授 野村由司彦博士に心から深謝の意を表します。三重大学大学院工学研究科機械工学専攻教授 矢野賢一博士、同情報工学専攻教授 若林哲史博士には審査を引き受けて頂き、貴重なご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

また、本研究の遂行および本論文の執筆に関して、幾多の適切なご助言を頂きました三重県工業研究所金属研究室長 樋尾勝也博士に深甚なる感謝を申し上げます。

さらに、本研究の機会を与えて下さいました三重県工業研究所 林一哉所長に深く感謝申し上げます。三重県工業研究所金属研究室の皆様には、本研究の遂行に際して多大なご協力とご助力を頂きました。厚くお礼申し上げます。

最後に、研究生生活のベースを献身的に支えてくれた家族に感謝の意を表して謝辞といたします。

2024 年 3 月 金 森 陽 一