

フォトンカウンティング型X線CTのダイカスト鋳巣 検査への応用

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2015-04-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 菅, 公一 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00008260

静岡大学 博士論文

フォトンカウンティング型 X 線 CT
のダイカスト鋳巣検査への応用

2014年6月

指導教官 青木 徹 教授

大学院自然科学系教育部
ナノビジョン工学専攻
菅 公一

博士論文目次

菅 公 一

論文名

「フォトンカウンティング型 X 線 CT のダイカスト応用」

目 次

第1章 序 論	1 頁
1-1. 研究の背景	1 頁
1-2. 本研究の目的	2 頁
1-3. 本論文の構成	3 頁
参考文献	4 頁
第2章 含浸	5 頁
2-1. 前書き	5 頁
2-2. 含浸の歴史	5 頁
2-3. 含浸とは	7 頁
2-4. 鑄巣	7 頁
2-5. 含浸	8 頁
2-6. 含浸装置	22 頁
2-6-1. 含浸装置型式	23 頁
2-6-2. 真空理論	26 頁
2-6-3. 真空ポンプ	30 頁
2-6-4. 真空トラップ	32 頁
2-7. 管理	33 頁
2-8. ダイカスト検査	34 頁
2-9. まとめ	35 頁
参考文献	36 頁
第3章 X 線 CT	37 頁
3-1. 前書き	37 頁
3-2. X 線と物質の相互作用	38 頁
3-2-1. X 線	38 頁
3-2-2. X 線発生方法	38 頁
3-2-3. 連続 X 線と特性 X 線	40 頁
3-2-4. X 線と物質の相互作用	42 頁

3-3. X線・ γ 線	44 頁
3-3-1. 半導体検出器の特性	45 頁
3-3-2. カドミウムテルライド検出器	46 頁
3-4. X線 CTにおける画像再構成法	46 頁
3-4-1. X線 CTの投影データ	47 頁
3-4-2. 2次元フーリエ変換法	49 頁
3-4-3. Filtered Back Projection	51 頁
3-5. Dual Energy X-ray CT (DXCT)による材料識別	53 頁
3-6. まとめ	54 頁
参考文献	55 頁
第4章 アルミダイカスト製品鑄巣含浸と X線 CT	56 頁
4-1. 前書き	56 頁
4-2. アルミダイカストの非破壊検査	57 頁
4-3. アルミダイカスト X線 CT 撮像の現状と課題	68 頁
4-4. アルミダイカスト鑄巣含浸と X線 CT による非破壊検査	69 頁
4-5. まとめ	71 頁
参考文献	72 頁
第5章 フォトンカウンティング型検出器による X線 CT	73 頁
5-1. 前書き	73 頁
5-2. フォトンカウンティング型検出器	73 頁
5-3. エネルギー情報の検出	76 頁
5-4. フォトンカウンティング型検出器による X線 CT : 従来型 CT との違い	79 頁
5-5. フォトンカウンティング型検出器を使った DXCT	80 頁
5-6. DXCT による含浸剤の材料識別	81 頁
5-7. まとめ	82 頁
参考文献	83 頁
第6章 アルミダイカスト含浸の X線 CT	84 頁
6-1. 前書き	84 頁
6-2. 漏れ量計測の実験	85 頁
6-2-1. 含浸処理	85 頁
6-2-2. 漏れ量計測	86 頁
6-3. X線 CT 像	88 頁
6-4. 漏れ量と X線 CT 像による漏れ量推定値の比較	95 頁
6-5. X線 CT 及び DXCT による材料識別	97 頁
6-6. まとめ	98 頁
参考文献	99 頁
第7章 結論	100 頁
謝辞	101 頁

第 1 章 序論

1-1 研究背景

ダイカストは高圧を用いてアルミニウム金属等を鑄造することで処理数が増加し高い生産性を実現している。しかしながら短時間での鑄造は空気を巻き込み製品内に鑄巣と呼ばれる空気の穴を発生させてしまう。ダイカスト業界では長年にわたり鑄巣発生防止対策としてPF法（酸素置換による鑄巣削減）、真空法（金型内を真空にし空気の巻き込みによる鑄巣を削減する）など数多くの技術を開発してきたが完全になくすことが出来ていない。発生してしまった鑄巣対策として巣を埋める技術に含浸がある。含浸は真空や加圧を用い低粘度の樹脂モノマーや水ガラス系の薬剤を浸透させ巣内を埋める技術である。含浸後の製品品質保証を考えると鑄巣対策の含浸が適正かどうかの判断が必要であるが現時点では圧力検査に頼っているのが現状である。圧力検査では一部の封孔箇所による合格判断となり全ての鑄巣が封孔されたか否かは判断出来ない。事前の圧力検査による漏れ量により鑄巣の大きさを類推し、大漏れは含浸処理から除外するケースが多いが確実な方法とは言えない。この他に製品を切って鑄巣を観察する方法があるが再現性を考えると十分な確認技術とは思えない。

X線を用いた非破壊検査はセキュリティ、医療、産業分野と多岐にわたって応用されてきた。これはX線の非常に高い物質透過力によって、物体内部の構造を高精度に取得できるためである。アルミニウム製鑄物の非破壊検査としても超音波及びX線が数多く用いられているが鑄巣内の含浸剤確認及び定量までの報告は見られていないのが現状である。

検査用 X 線 CT 装置の高解像度化、高速化が進められているが、透過型では材料識別等には限界がある。今後国内では製品品質の更なる向上により海外生産との差別化を計る工夫が必要であり、非破壊による確認技術の向上は業界に貢献できるものと確信している。

1-2 研究の目的

アルミニウムをはじめとする金属のX線CT画像においても医学分野同様に、コンプトン散乱 (Compton Scattering) およびビームハードニングによる画像の劣化が存在する。当研究室で開発したエネルギー弁別可能なフォトンカウンティング型 CdTe 検出[1]により、数十 keV以下の低エネルギー情報をカットすることによりコンプトン散乱の影響を除去し、さらに、エネルギー情報を用いてビームハードニングによる画像劣化を抑えることができることが分かっている。

また、同じくエネルギー情報を用いて実効原子番号、電子密度をマッピングが可能である[2][3][4][5]。

ビームハードニング除去、・実効原子番号マッピング、・電子密度マッピングがこれまでの画像を見ることが出来る CT を超えて、計測に用いることが出来る CT を目指していることを記述し、これをアルミ鋳造品内の鑄巣および含浸で検証したのが本論文である。

1-3 本論文の構成

ダイカスト業界における鑄巣発生対策として含浸技術がある。製品品質の保証までを考えると鑄巣対策の含浸が適正かどうかの判断が必要であるが現時点では圧力検査のみに頼っているのが現状である。この圧力検査では一部の封孔箇所による合格判断となり全ての鑄巣が封孔されたか迄は判断出来ない。事前の圧力検査による漏れ量の差により鑄巣の大きさを類推し、大漏れは含浸処理から除外する場合が多い。

今後国内では製品品質の更なる向上により海外生産との差別化を計る工夫が必要であり確認技術の向上は業界に更に貢献できると確信している。

ダイカスト製品の非破壊検査としては超音波及びX線 (X-ray) が数多く用いられているが、鑄巣内の含浸剤確認及び定量までの報告は見られない。検査用 X 線 CT 装置の高解像度化が進められているが、原理的にアルミニウムをはじめとする金属の X 線 CT 画像においては、コンプトン散乱およびビームハードニングによる画像の劣化が存在する。これに対し当研究室で開発したエネルギー弁別可能なフォトンカウンティング型 CdTe 検出器によるX線CT撮像では数十 keV以下の低エネルギー情報をカットすることによりCT画像上のコンプトン散乱の影響を除去し、さらに、エネルギー情報を用いてビームハードニングによる画像劣化を抑えることができる。またDXCTによって実効原子番号、電子密度をCT画像にマッピングする方法が、内部構造を観測する方法として医療分野を中心に注目を集めている。この技術を鑄巣ならびに含浸状況を計測する方法として応用できるのではないかと考えた。[6]本研究の目的は、アルミダイキャストの鑄巣および含浸をフォトンカウンティング型検出器によりCT撮像して推量した漏れ量を実験値との比較により評価し、CT計測の可能性を示し、また含浸処理後のダイカスト製品の鑄巣内の状況について、DXCTを用いて論ずることである。

第1章序論に続き、第2章では本研究の基本技術である含浸を含浸剤及び装置による効果について述べる。第3章において、X線CTの物質相互作用や検出器、画像再構成法について延べ、第4章でアルミニウムダイカスト製品鑄巣含浸とX線CTを現状の非破壊検査と比較して課題を述べる。第5章ではフォトンカウンティング型検出器によるX線CTの従来型CTとの違いやさらにDXCTによる材料識別について述べる。第6章ではアルミニウムダイカスト含浸のX線CTについて鑄巣による漏れ量計測と合わせCT計測と比較し、DXCTによる鑄巣内の含浸剤確認について述べる。第7章で本研究を総括する。

参考文献

- [1]G. Matsumoto, Y. Imura, H. Morii, A. Miyake and T. Aoki, “Analysis of artifact with X-ray CT using energy band by photon counting CdTe detector,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 621, (2010) pp. 292.
- [2]Y. Tomita, Y. Shirayanagi, S. Matsui, T. Aoki and Y. Hatanaka, “X-ray Color Scanner with Multiple Energy Discrimination Capability,” *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5922, No. 3, 2001, pp. 291-293.
- [3]W. Zou, T. Nakashima, Y. Onishi, H. Morii, Y. Neo, H. Mimura and T. Aoki, “Soft-Tissue Material Properties under Large Deformation: Strain Rate Effect,” *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, San Francisco, 1-5 September 2004, pp. 2758-2761.
- [4]W. Zou, T. Nakashima, Y. Onishi, A. koike, B. Shinomiya, H. Morii, Y. Neo, H. mimura and T. Aoki, “Atomic Number and Electron Density Measurement Using a Conventional X-ray Tube and a CdTe Detector,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 9, 2008, pp. 7313
- [5]R. Brooks and G. Chiro, “Principles of computer assisted tomography (CAT) in radiographic and radioisotopic imaging,” *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 21, 1976, pp.689.
- [6]菅公一, 井村ゆき乃, 青木徹, 「X線CTによるダ`缶製品内の含浸剤確認」アルビアvol. 41. No.6(2011年6月号), p.23-26 , カロス出版.

第 2 章 含浸

2. 1 前書き

含浸 (Impregnation) には対象により数々の方法と使用する薬剤がある。古くは木製電信柱をコールタールで含浸して電柱の耐腐蝕性と強度を確保した。線路の枕木も同じである。しかしながら木材に比べ金属への含浸処理は浸透性や耐久性など目標とする値が高く現在においても十分な効果確認が得られているとは言えない状況で、含浸業界にとっては含浸状況を正確に把握することは品質保証の面からも重要である。中でも鋳物を対象とした含浸剤には有機系や無機系が有り、対応設備も多種存在する。含浸技術の基本は真空等の圧力を利用して浸透させ保持させる事に尽きるが、安定した処理効果を得る為には工程管理も含めたデータの管理も重要である[1][2][3]。

ここでは含浸の歴史、鋳巣、含浸概要と含浸剤について説明しそれらに関する管理やダイカスト製品検査についても述べる。

2. 2 含浸の歴史

古くはラジエーターの水漏れ防止剤が含浸のはじまりと言われている。使用法は簡単でラジエーター内の冷却水に鉄粉入りの水ガラス（現在の無機含浸剤原料）を入れ、漏れた個所が空気に触れ乾燥することで水漏れが止まるという物であった。1930年頃米国では無機含浸剤（無機系）を用いて本格的に含浸処理が始まったが、当初は設備を使用しない内部加圧法で、1940年頃から設備を使用した真空加圧法が実施され始めた。1950年には含浸試験規格としてMIL-I-6869（米国軍規格）が軍需品、航空機部品、自動車部品に制定適用される。最新は1972年のMIL-I-6869Dである[4]。内容はアルニウム合金とマグネシウム合金の含浸処理後の熱耐久等試験方法である。合わせて1952年には含浸方法規格としてMIL-7878が制定された。含浸方法としての最新は1992年のMIL-STS-27 6Aである。材料規格については1945年のMIL-AN-I-36から始まり1992年のMIL-I-17563Cまで続いた。含浸のMIL規格としてはそれ以降の改訂は行われていない。制定及び改訂の流れを図2-2 History of MIL Specに示す。現在も鋳物含浸における世界統一規格、日本規格は制定に至っておらず世界標準としてMIL規格を多用しているのが現状である。

MIL規格制定の目的は戦車部品などの軍用部品の含浸処理対応だった。当時は鋳鉄製の部品が主流でアルミ製部品は少なかった。アルミ部品が多くなり始め

た1970年頃から有機含浸剤（有機系）が登場したが、当時はフロン等の溶剤で洗淨するタイプであった為に作業環境は悪かった。フロン溶剤の使用はオゾン層の破壊を防止する対策として脱フロンの動きが活発になり減少、1990年以降は水溶性有機含浸剤が主流となる。水溶性有機含浸剤は水のみでの洗淨が可能で現在に至るまで幅広く用いられ、各産業界に受け入れられている。しかも有機含浸剤は浸透力が高く、50 %以上水で希釈して使用する水ガラス系無機含浸剤と比べて硬化成分率も100 %と高く、高封孔性を有する薬剤である。

History of MIL Spec *Historical Development of Military Specifications on Impregnation*

Date	Process	Materials	Process & Materials
1945	OD-3618	AN-I-36	
08/07/1950			MIL-I-6869
12/04/1951			MIL-I-6869A
02/20/1952	MIL-I-7878		
11/15/1952	MIL-I-17414 (ships)		
03/03/1953		MIL-I-17563	
12/16/1954		MIL-I-13857	
02/02/1956	MIL-STD-276		
	Impregnation of Porous Nonferrous Metal Castings		
03/12/1957		MIL-I-17563A	
09/30/1960			MIL-I-6869B
05/12/1966			MIL-I-6869C
06/20/1966		MIL-I-13857B (MR)	
01/14/1971			MIL-I-6869D
04/14/1985		MIL-I-17563B	
09/18/1992	MIL-STD-276A		
	Impregnation of Porous Metal Castings and Powdered Metal Components		
12/30/1992		MIL-I-17563C	

図2-2 History of MIL Spec

2. 3 含浸とは

含浸には多用途あるが一般には対象材料内の隙間に液体を染み込ませる事で各種の効果を発生させる事にある。中でも鋳物用の含浸は鋳造工程で発生する表面からは見えない巣穴（鋳巣）の中に専用装置（含浸装置）を用いて薬剤（含浸剤）を充填しその後硬化させて巣穴を埋める技術である。

含浸に使用する真空領域は1.3 kPa以下を想定している。鋳巣内の真空を行う事で水分除去も同時に行い薬剤（含浸剤）を浸透させやすくする。しなしながら鋳巣の形状により浸透に時間がかかる場合もあり、0.5 MPa程度加圧して浸透効果を上げることも重要である。

2. 4 鋳巣

アルミニウム合金の溶湯は凝固収縮に際して、液体から固体への状態変化だけでも約5%の体積収縮を伴うために、収縮孔を生じることがある。さらに凝固に伴って溶湯内に溶けていた水素ガスが放出されるために気泡を生じ、且つ、ガス放出孔を生じる。この凝固時の収縮とガス放出により、パイプ、大型球状孔、ピンホール、粒界亀裂、収縮性多孔質等の各種欠陥を作ると考えられている。さらに鋳造方法により巻き込み巣も発生する。鋳巣の解析についてはX線CT画像を用いた有限要素解析[5]や切断面の鋳巣面積分布に対するフラクタル解析[6]等が行われている。切断面の鋳巣(Prosty, Internal Defect)例を図2-4-1に示す。このような欠陥を持ったダイカスト品において、一方の面から他方の面まで欠陥が貫通している場合は、両面間に圧力差が存在するような使用条件において漏洩を引き起こす。このような品物に含浸処理を施して貫通欠陥の封止を行えば、従来不良品として再鋳されていたものを正常品として救済でき、生産性の向上と生産コストの低減を同時に行う事が出来る。また鋳造品や焼結品に電気メッキまたは化学メッキをおこなう場合、これらの表面に露出している欠陥から内部にメッキの前処理液やメッキ液が浸入して、メッキ後、フクレや腐食を引き起こすので、これらに対しては、前もって含浸処理による封孔を施すことにより、フクレや腐食を防止する事が出来る。塗装の下地処理として行っても同様に有効であり、一般に孔食の防止に役立つ。また焼結体の含浸処理を行う事により、その後の切削加工性の向上にも大きく役だっている。近年、加速度的に高度化してきた技術、用途の拡大に伴って含浸剤も様々な特性を持ったものとなってきた。

Internal Defect



Hollows existing in die-castings; classified under shrinkage porosity, which is caused by solidification of molten metal, and blow hole, which is caused by the air or other gases involved inside the casting machine at injection.

図2-4-1 鑄巣 (Porosity)

2. 5 含浸

2-5-1 含浸の用途

アルミニウムダイキャスト製品に限定すれば、含浸は耐圧性が必要とされる部品に適用できる。また塗装やメッキの前処理にも使用される。含浸の実績は航空機部品、自動車部品、ガス計器部品、コンプレッサー部品、エレクトロニクス関連部品分野で数多く行われており、中でも自動車部品においては量産性と品質確保に役立っている。

2-5-2 含浸剤の種類

現在、アルミニウムダイキャスト製品に使用されている含浸剤は珪酸ソーダを主成分とする無機含浸剤と(メタ)アクリル系モノマーを主成分とする有機含浸剤に分けられる。無機含浸剤と有機含浸剤の物性および特性比較を図2-5-2に示す。

	無機含浸剤 テクニシールBP-3	有機含浸剤 スーパーシールP-601
主成分	珪酸ナトリウム	(メタ)アクリル酸モノマー
密度 (g/cm ³ , 25°C)	1.4	1.06
粘度 (mPa・s, 25°C)	40	6
pH	11	—
硬化後の固形分 (%)	約45	約100
可燃性	なし	消防法危険物 第4類第3石油類
耐熱性	約650°C	約200°C
封孔性	○	◎
洗浄性	○	◎
使用液の温度	加熱 (25~35°C)	冷却 (20°C以下)

図2-5-2 無機含浸剤と有機含浸剤の物性および特性比較

前者の特徴としては、耐熱性が高いこと、安価なことが挙げられる一方、硬化時の発泡現象(吹き出し)による不良、水に希釈されており固形分量が少ないために封孔効果が劣ってしまう特徴がある。後者は、低粘性であり浸透しやすく、液そのものが重合反応によって100%硬化するため、封孔可能な範囲が広いが、熱による加熱重合のため含浸液の冷却保管管理が必要であること、大量に排出される洗浄水の処理が困難な点が特徴として挙げられる。しかし含浸封孔能力の信頼性の面から有機含浸剤を採用する割合が大きい。

2-5-3 含浸工程

含浸方法には、真空浸漬法、真空浸漬加圧含浸法、浸漬真空法、内部加圧法があるが、現在アルミニウム合金ダイカスト製品に対して最も一般的な方法は真空加圧含浸方法である。含浸工程は含浸→液切り→洗浄→硬化→乾燥の順で処理される。各工程間はホイストやクレーンにより移動させる。含浸は含浸タンク内に被含浸物を入れてから行われ、真空→液入れ→加圧→液戻し後取り出し次工程の液切り工程に移る。液切り工程では遠心分離等を利用して余分な液を回収し再利用する。その後、水洗浄を行う。洗浄方法には上下揺動や回転洗浄が一般的である。洗浄工程では加工面やタップホールを洗浄するが、過洗浄により鑄巣内の含浸剤まで洗わないレベルに押さえることも重要である。洗浄が終わると硬化工程で硬化させるが、通常は90℃、15分程度湯浸させ硬化させる。他に乾燥を用いた硬化方法もあるが処理時間が長くなる欠点がある。

2-5-4 含浸工程の位置づけ

含浸工程の位置について図2-5-4に示す。

機械加工度の高い部品や主に機械加工部に圧漏れが発生する部品については機械加工、脱脂乾燥後に含浸することが一般的である。機械加工度の低い部品で、圧漏れ箇所が鋳肌面にあるものは鋳造直後の素材含浸でも有効である。

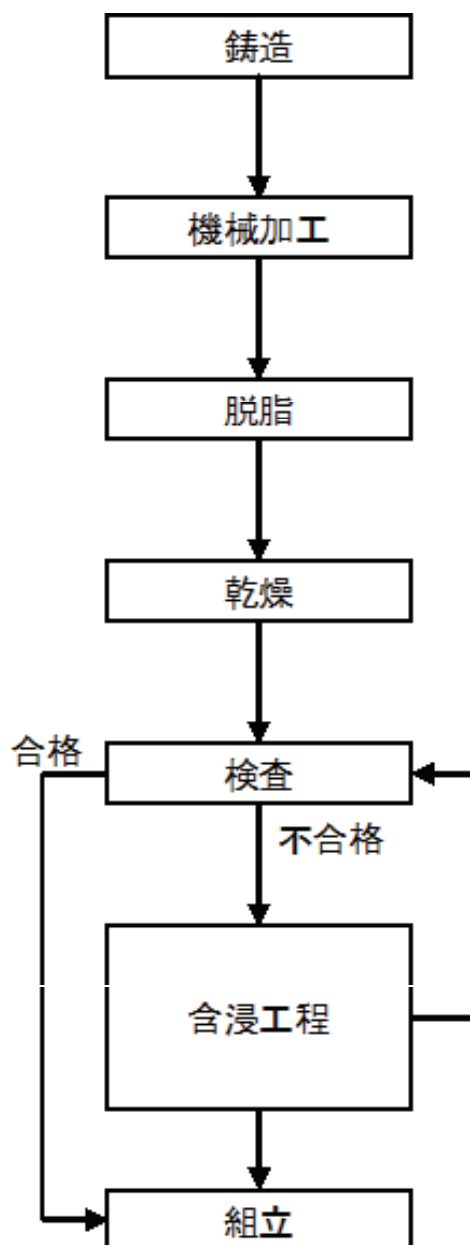


図2-5-4 含浸の位置

2-5-5 含浸方法

有機含浸剤による真空—浸漬—加圧(真空加圧法)含浸処理方法による含浸工程について説明する。図2-5-5-1に含浸標準工程(無機、有機)を示す。

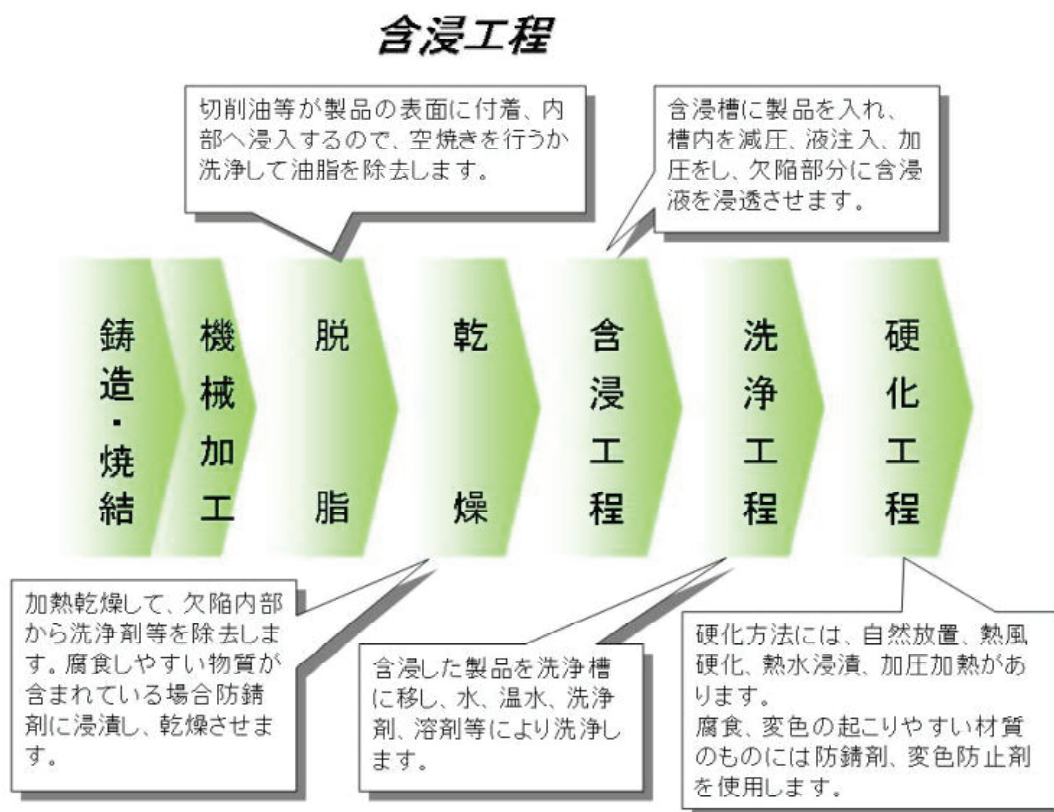


図2-5-5-1 含浸工程

前処理は含浸前の洗浄工程である。含浸処理は機械加工後に実施される事が多い。ダイカストの表面は緻密な表面層が形成されているが内部は表面に比べて荒くなっている。その為、表面を研削すると欠陥が露呈する可能性が高い。機械加工時に使用する切削油等の油脂類で表面が覆われ欠陥内部への浸透を阻害する。これを除去するその為に含浸前処理として前洗浄が必要である。欠陥内部の油脂類除去を怠ると、次工程の含浸工程で含浸剤の浸透に影響し含浸効果が低下する。一般に行われているのが脱脂処理であり、50～60℃に加熱された中性から弱アルカリ性の水系洗浄剤もしくは炭化水素などの洗浄溶剤により洗浄・脱脂する。水系洗浄剤を用いる場合は湯洗、加熱乾燥や真空乾燥によって十分に洗浄剤成分や水を除去する必要がある。

含浸は圧力容器、真空ポンプ、含浸剤供給槽、コンプレッサーで構成されている。圧力容器はそれぞれが配管によって接続されており、その間には開閉できるバルブが取り付けられている。含浸の対象となる製品を内カゴに敷き詰め、内カゴごと圧力容器に入れる。蓋をして真空ポンプを作動させ圧力容器内部を減圧にする。減圧にすることにより欠陥孔内部の空気を取り除き含浸剤と置換しやすくさせるためである。市販されている汎用の真空ポンプを使用した場合、0.5～1 kPa (50～1000 Pa) 程度まで減圧できる。続いて、減圧状態のまま含浸剤供給槽と圧力容器間のバルブを開き含浸剤を真空吸引させる。製品が含浸剤に完全に浸かったのを確認してから、吸引をやめ、続いてコンプレッサーにより圧縮空気を送り込む。加圧させることにより浸透する含浸剤の量を増やす効果がある。加圧力は一般に0.4～0.8 MPaである。一定時間の加圧後に圧縮空気を排気させ、含浸剤を供給槽に戻し含浸完了となる。

含浸には大きく分けて2通りの方法がある。図2-5-5-2と図2-5-5-3に示した方法で真空と加圧を併用した真空加圧法である。他に真空のみを使用した真空含浸法もある。封孔率を考えると加圧併用の方がより含浸剤が鑄巣奥深くまで入る為、良い結果となる場合が多い。

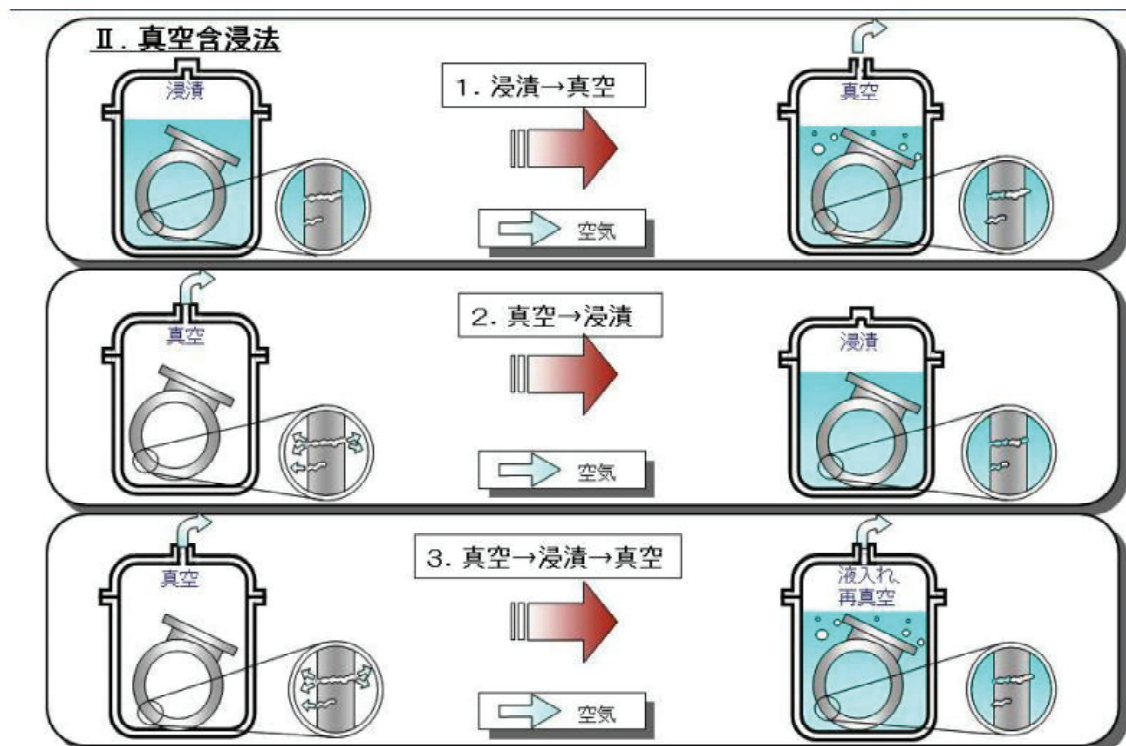


图2-5-5-2 含浸法 1

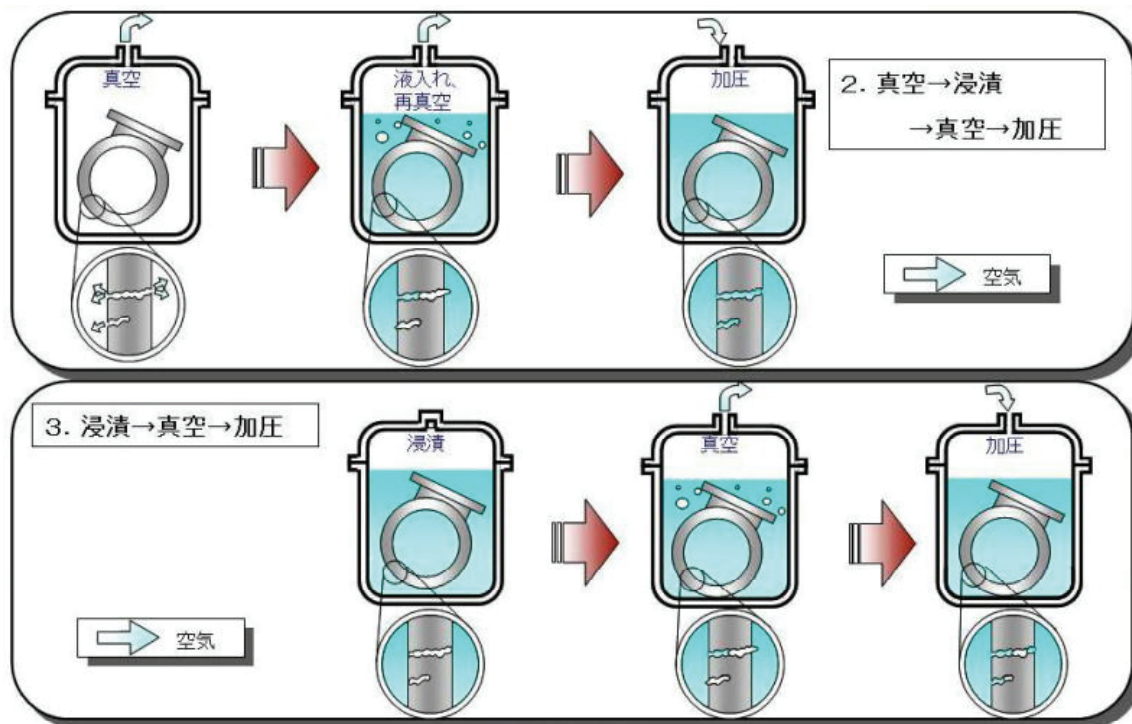


图2-5-5-3 含浸方法 2

次工程は液切りである。含浸を終えた製品は、内カゴごと液切りに移る。欠陥孔内部に浸透した含浸剤を除き表面に付着した含浸剤は遠心や傾動によって除去する。除去された含浸剤は再び含浸剤貯槽に戻し再利用される。十分に液を除去することは経済的でもある。

続いて洗浄工程に移る。液切りで取り除かれなかった表面の含浸剤を水または温水によって除去する。内カゴごと水または温水中に上下揺動させ、余剰含浸剤を洗い流す。洗浄には粗洗い槽と仕上げ槽に分ける場合が多い。必要に応じてエアレーションや水流、回転を組み合わせる。製品形状が複雑な場合は洗浄剤の添加も有効である。洗浄効果を高めるためにも、予め内カゴへの製品の詰め方は機械加工孔の向きが下方もしくは水平方向になるようにしておく。また、洗浄を繰り返すごとに水または温水中の含浸剤濃度が上昇し洗浄効果が低下していくため、一定濃度に達すると廃棄及びリサイクルに回す必要がある。

最終工程は硬化工程になる。欠陥孔内部に浸透した含浸剤を外部からの熱により化学反応させ重合固化させる。熱の供給源としては熱風でも熱水でも構わないが、熱風の場合は含浸剤が化学反応するのに必要な温度まで昇温するのに非常に時間を費やし、その上、設備的に大かがりになる。熱水の場合は比較的短時間で昇温し、設備的にも単純な構造になる。熱水中に浸漬させるため製品表面が化学反応で促進され黒変や白粉などの腐食となる場合がある。その場合は、防錆剤の添加や使用する水を改質する必要がある。

含浸剤の主成分はメタクリル酸エステルである。その為多くの含浸剤は熱可塑性樹脂の特徴を持っているが、線状高分子に架橋反応させる事により硬化物の耐久性を向上させている。図2-5-5-4に含浸剤の硬化状況を図2-5-5-5含浸剤硬化反応を示す。図2-5-5-6ではメタクリル酸エステルの分子モデルをしめす。含浸剤硬化前のモノマー分子の長さは1.1 nmであり1 μ m程度の鑄巣であれば十分浸透及び充填（含浸）する事が可能となる。

含浸剤の硬化反応

- ①開始反応で生成した生長ラジカルがモノマーのC=Cと付加反応を繰り返して高分子化する。重合速度は極めて速い。
- ②硬化物は線状高分子がからみ合った集合体。加熱によって軟化(溶融)し、冷却すると元の固体高分子に戻る性質を有する熱可塑性樹脂。
⇔ 熱硬化性樹脂(フェノール樹脂etc)

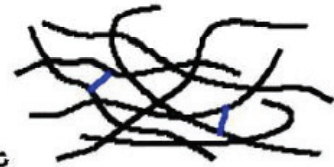


図2-5-5-4 含浸剤硬化状況

含浸剤主剤と硬化剤を混合・溶解して使用する。

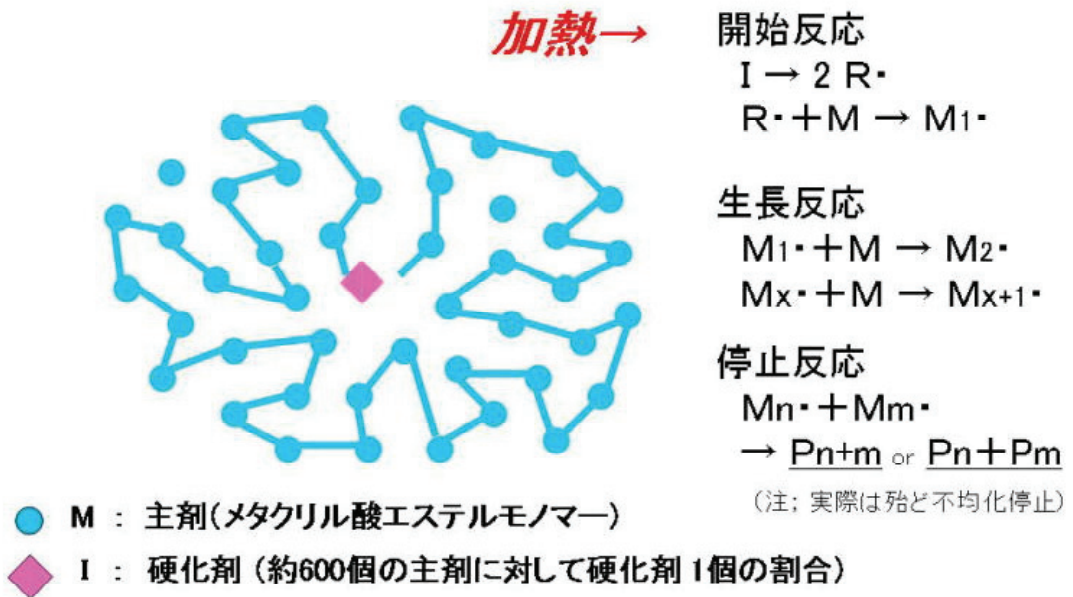


図2-5-5-5 含浸剤硬化反応

メタクリル酸エステル分子モデルと構造式

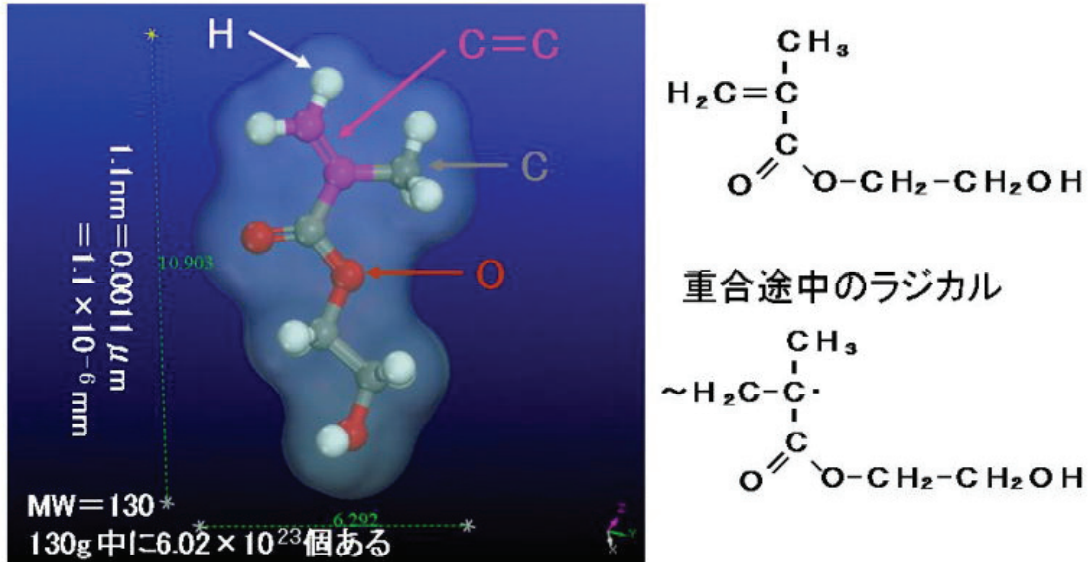


図2-5-5-6 含浸剤主成分分子モデル

後工程として、製品表面の腐食・変色を防ぐ事が重要になる。そのために硬化終了後、表面に付着した水分を取り除く必要がある。方法としては内カゴごと遠心により湯切りを行うか、もしくは乾燥機で付着水分を蒸発させる。また内カゴから取り出してエアブローによって水分を取り除く事も可能である。表面の清浄度が要求される部品は熱水硬化後に湯洗工程を追加する場合もある。

2-5-6 排水規制とリサイクルシステム

有機含浸剤の最大の欠点は洗浄廃水をそのまま河川等に放流できないことにある。放流できない原因はBOD、COD規制である。BODは生物化学的酸素要求量 (Biochemical Oxygen Demand)、CODは化学的酸素要求量 (Chemical Oxygen Demand) で水の汚染を示す数値である。数値が高いと汚染度も高いと判断できる。表2-5-6に廃水BOD、CODの値を示す。廃水の含浸剤濃度が1 %でCOD約10,000 ppmになり一般的な河川排水基準 30 ppm程度を下回るのは困難である[7]。

対策として特殊有機含浸剤（スーパーシールP-801）とリサイクルシステムを用いる方法がある。当然洗浄液も特殊で、洗浄液と含浸剤とにそれぞれ分離・再利用ができる。含浸された製品を洗浄した洗浄液はリサイクルシステムによって分離され、含浸剤は再度含浸剤として回収され供給槽に戻る。含浸剤が取り除かれた洗浄液は再度洗浄液として利用される。しかし、特殊な洗浄液であるため、水と比べ洗浄効果が劣り使用用途が限定されるのが難点である。また一般にリサイクル含浸剤は含浸剤の回収が続くと元の含浸剤の配合比が崩れるために含浸剤の特性が低下する恐れがあるが、スーパーシールP-801リサイクルシステムでは特性値を常時監視できるセンサーが付属しているため、含浸剤を定期交換する必要はない。

分析項目	P-601濃度	測定値	分析方法
生物化学的酸素消費量 BOD	0.1%	400 mg/ℓ	JIS K 0102.21
	1.0%	3300 mg/ℓ	
化学的酸素消費量 COD	0.1%	960 mg/ℓ	JIS K 0102.17
	1.0%	9800 mg/ℓ	
ノルマルヘキサン抽出物質	0.25%	22 mg/ℓ	JIS K 0102.24
	0.5%	45 mg/ℓ	
	1.0%	200 mg/ℓ	

表2-5-6 含浸剤廃水のBOD, COD値

2-5-7 排水処理

含浸工程では含浸後に欠陥孔内部に浸透した含浸剤以外の製品に付着した含浸剤はすべて洗浄によって取り除く必要がある。洗浄を繰り返すと洗浄水の含浸剤濃度が上昇し洗浄効果が低下するため一定の周期または濃度ごとに廃棄される。含浸剤廃液はそのまま河川等に排出できないために処理業者に委託して処分しているのが現状である。加熱重合法や蒸留方法などもあるが実用化してもランニングコストの面で長続きしていないのが現状である。図2-5-7-1に示す。

現在は水溶性含浸廃水から寸分を除去して含浸剤を回収する研究も進んでいる。問題は処理コストであり現時点では大手自動車会社では活性汚泥処理を主にした大型の処理設備を導入している、図2-5-7-2に示す。中小では初期コストの面で専門の処理業者に依頼する「産廃方式」が主流である。

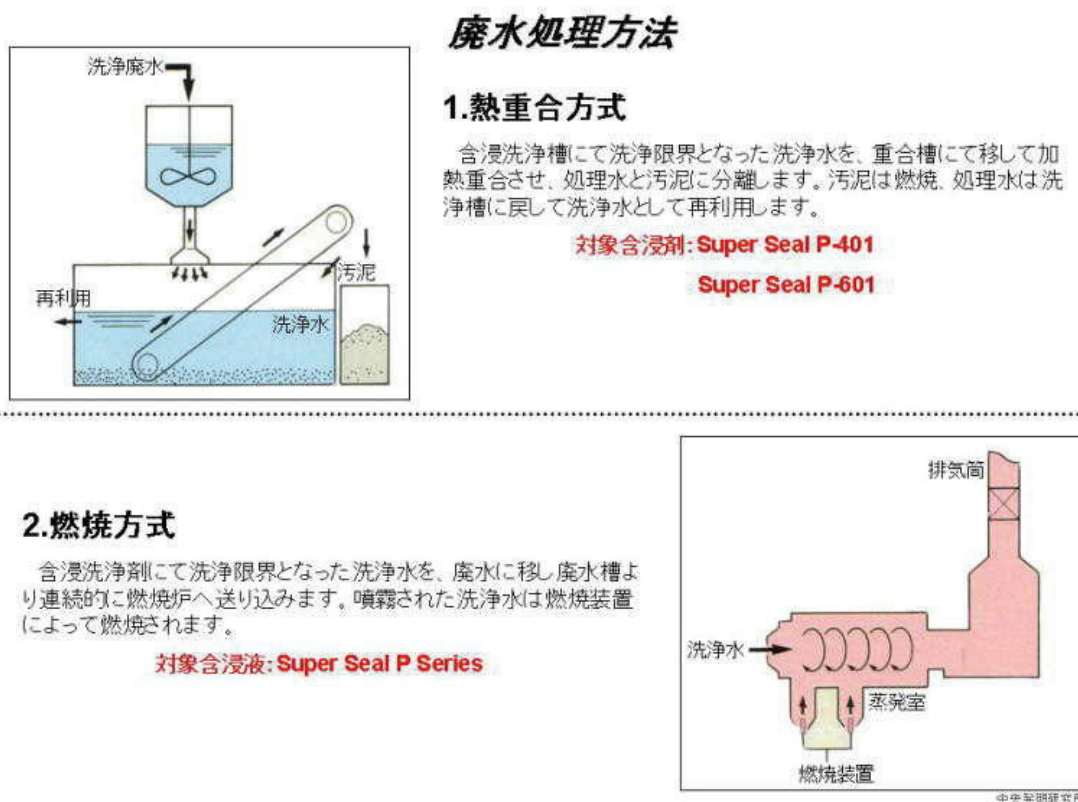
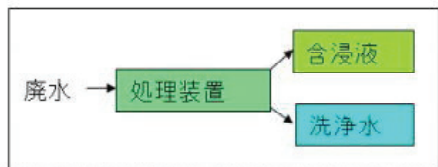


図2-5-7-1 廃水処理方法 1



3.液-液分離方式

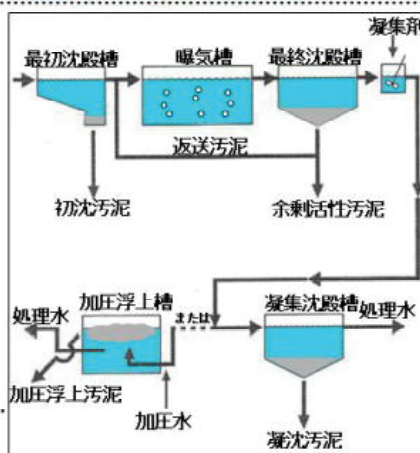
含浸剤が溶解している各洗浄槽の過剰排水が、最終的に第1洗浄槽より液-液分離槽に移動し、含浸剤と洗浄水に分離されます。洗浄水は洗浄槽に戻され、再利用します。

対象含浸液: Super Seal P-801

4.活性汚泥方式

曝気槽には好気性微生物が一定の濃度で保たれており、洗浄水と混合接触して洗浄水の基質を酸化分解し、混合液はそのまま次の沈殿槽に流入します。ここで微生物群は自ら大きなフロックとして凝集して沈降します。上澄みは凝集剤を添加し、加圧浮上槽、凝集沈殿槽を経て汚泥と処理水に分離されます。

対象含浸液: Super Seal P Series



5.業者引取

専門業者に依頼する事により、洗浄水を引き取ってもらいます。自社に廃水処理設備がない場合に有効です。

対象含浸液: Super Seal P Series

図2-5-7-2 廃水処理 2

2-6. 含浸装置

装置には大別すると全自動のインラインタイプと半自動のバスケットタイプがあり含浸方法は真空法と真空加圧法より選ぶ事が出来る。汎用性では真空加圧法を用いた半自動有機含浸装置が挙げられる。バスケットタイプの為、部品を選ばず処理が可能となるが手作業部分による工程の違いが発生する可能性がある。搬送方法によりインライン型、M型やロボット型の選択も可能である。

TYPE	型式 Model	w	D (mm)	H (mm)	推奨含浸方法 Impregnant Method	標準タクト Tact(min)
バッチ式 Batch Type	BS-200A	1200	630	1300	真空浸漬加圧法	20~30
	BS-800A	10500	3800	3200	真空浸漬加圧法	
	BS-900A	12000	4300	3800	Vacuum and pressure impregnation process	
	BS-1000A	13000	4600	4000		
	BS-1200A	15500	5000	4100		
	BS-1400A	16000	5500	4400		
バッチ式全自動 Full-Auto Batch Type	BS-800FA	12000	3400	4000	真空浸漬加圧法	20~30
	BS-900FA	13000	3600	4200	Vacuum and pressure impregnation process	
	BS-1000FA	14500	3900	4500		
	BS-1200FA	17000	4500	5000		
	BS-1400FA	20000	5000	5500		
インライン型全自動 Full-Auto In-Line Type	LS-300FA	7500	2000	2200	真空浸漬加圧法	5~10
	LS-400FA	9500	2500	2400	Vacuum and pressure impregnation process	
	LS-600FA	14000	3500	2600	浸漬真空法	2~5
	LS-800FA	18500	3800	2800	Vacuum impregnation process	
	LS-1000FA	23000	4100	3000		
インラインM型全自動 Full-Auto In-Line Type-M	LS-750FAM	7000	4000		真空浸漬法 Vacuum impregnation process	5
ロボット型全自動 Full-Auto Robot Type	BS-850FAR	7500	6000	3800	真空浸漬法	2~5
	BS-900FAR	8000	6500	3800	Vacuum impregnation process	

図2-6 含浸装置諸元[8]

2-6-1 含浸装置型式

バッチ式半自動 BS-200A～BS1400A[8]

バスケットに詰めた製品を、含浸タンクにセットし、1バッチ毎に、真空・加圧含浸工程を行う。これを手動ホイスで、液切、洗浄、硬化の各工程を移動させ処理するシステムで、手動システムと半自動システムがある。製品の種類が変わっても対応でき、一度に多くの製品が処理できる。多種の含浸対象物を処理する例が多い為真空加圧法を選択する機会が多い。価格は真空法に比べて割高となる。

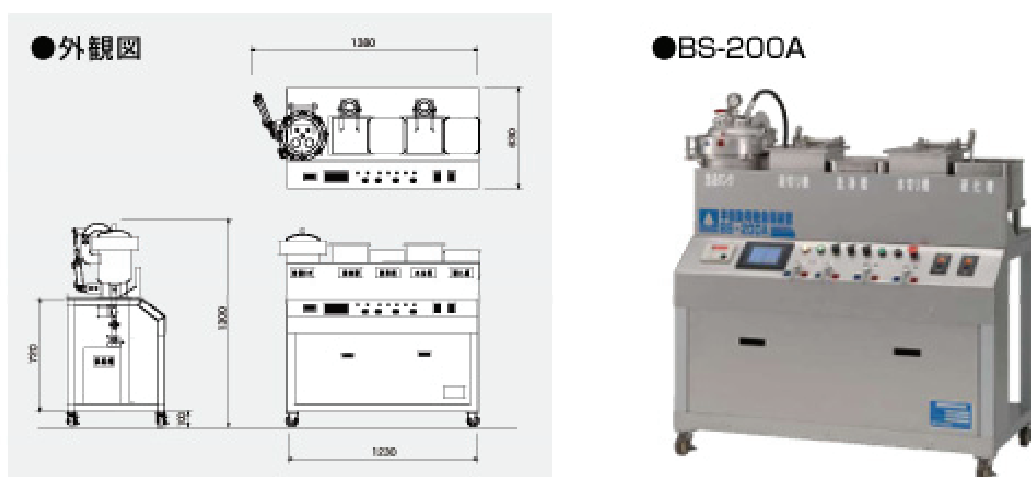


図2-6-1-1 小型半自動含浸装置BS-200A[8]

バッチ式全自動 BS-800FA～BS-1400FA

バッチ型半自動含浸システムの手動ホイストによる移動を、遠心液切り機能付きのキャリアで自動化することにより、含浸の全行程を無人化させたシステムである。手動ホイストタイプよりも設置スペースが少なくすむため、省スペースでの含浸システムの設置が可能である。限定機種を処理する例が多い為、真空法を選択する場合が多く処理タクトも短縮出来る利点がある。

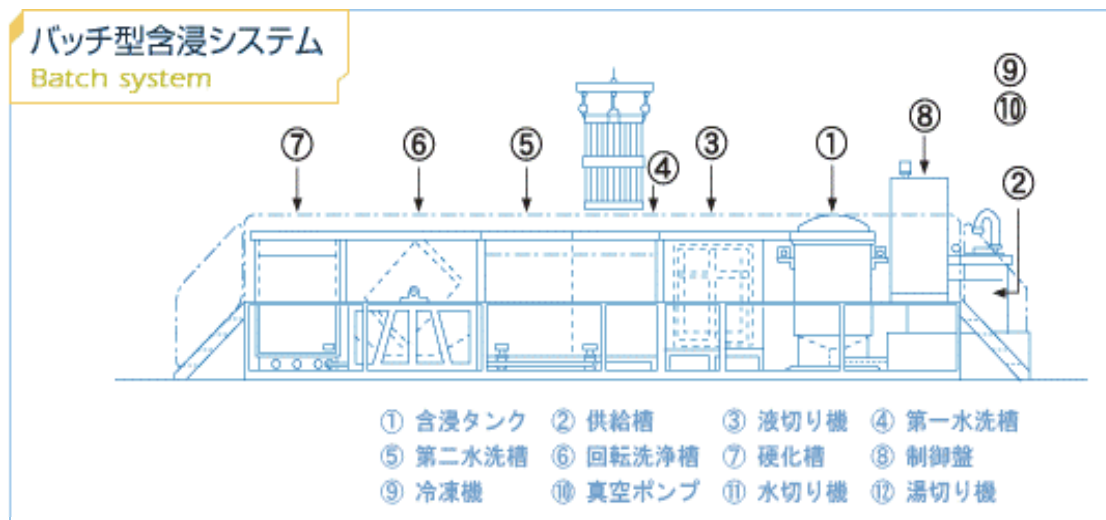


図2-6-1-2 半自動含浸装置レイアウト[8]



図2-6-1-3 半自動含浸装置レイアウト

インライン型全自動 LS-300FA～LS-1000FA

製造・加工工程内に含浸工程を組み込み、バッチ処理システムの含浸タクトの時間を短くすることで、短時間で処理することを可能にした全自動システムである。単品種対応のため、タップ位置が確定されることでエアノズルの設置がしやすくなり、液切、洗浄への対策がしやすくなる。真空法を選択する事により更にタクトを短くする事も出来る。

インラインM型全自動 LS-750FAM

含浸、液切、洗浄、硬化の各工程を、単独で独立したユニットとし、それぞれのユニットをマシニングセンターのように組み合わせることで、自由度の高いレイアウトへの対応を可能にした全自動システムである。また、ユニットの組み合わせにより、様々な工程変更にも対応できる。

ロボット型全自動 BS-850FAR

バスケットに詰めた製品を、含浸タンクにセットし、1バッチ毎に、真空・加圧含浸工程独立させた含浸、液切、洗浄、硬化の各工程間の移動をロボットによりスピーディで正確な処理を可能にした全自動システムである。自由度の高いレイアウトへの対応はもちろん、迅速な行程変更への対応を可能にした含浸システムである。詳細なエア拭き工程等追加も可能となる。

2-6-2 真空理論[9][10][11]

含浸には真空がもっとも重要である。含浸タンクと合わせて真空ポンプの選定や構造を決定する上でも真空理論は重要になる。

真空ポンプの排気速度は、真空度（圧力）によって変化する。排気速度と圧力の関係は、真空ポンプに固有のデータであり、例えば、本装置に設置されている真空ポンプ（BUSCH R5A-0040Eなど）の性能曲線は図2-6-2-3のようになる。

排気速度は、圧力が高い場合（真空度が低い場合）には高く、圧力とともに減少する。最終的に到達する真空度 P_0 [Pa]も真空ポンプによって決まり、それ以上に真空度を上げることはできない。

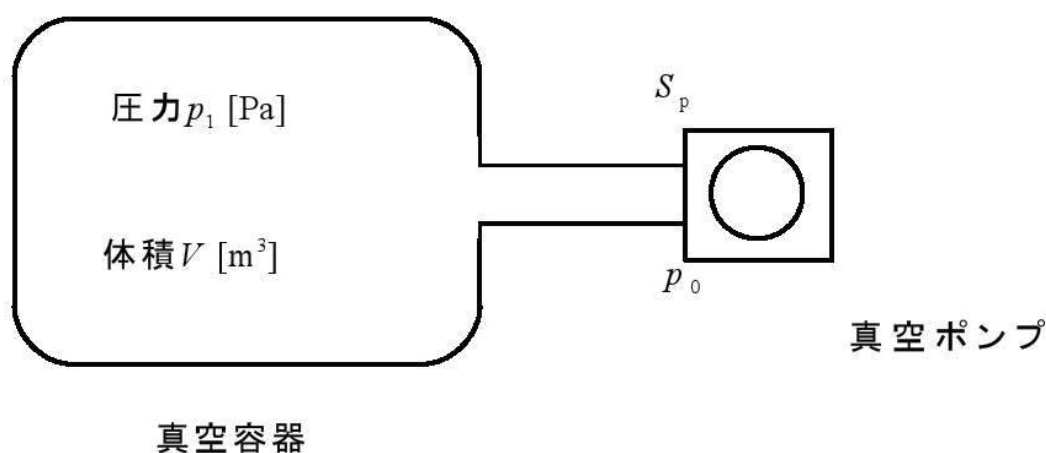


図2-6-2-1 密閉容器排気装置

真空ポンプを密閉容器に設置して容器内を減圧するとき、所定の圧力に到達するまでの時間を計算する方法について説明する。

図2-6-2-1に密閉容器排気装置の概略を示す。ここでは、体積 V [m³]の容器を真空ポンプで排気する場合を考える。真空排気の際には、容器へのリーク、装置材料からの放出ガス量などを考慮する必要があるが、比較的低真空ではこれらは無視できる場合が多い。また、真空ポンプと容器との間の排気管の抵抗（コンダクタンスという）が大きい場合、真空ポンプの性能曲線通りの排気量が得られない。

排気管の抵抗を無視できる場合、容器内圧力 P [Pa]の時間変化に対して次の関係が成り立つ。

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{S_p}{V}(p - p_0) \quad \text{式2-6-2-1}$$

ここで、 p_0 は真空到達圧力[Pa]である。さらに S_p は真空ポンプの排気速度[m³/s]である。式(1)を変形し、圧力 p_1 [Pa]から p_2 [Pa]まで変化するのに要する時間 t [s]を計算する式(2)が導かれる。

$$t = \frac{V}{S_p} \ln \left\{ \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0} \right\} \quad \text{式2-6-2-2}$$

さらに、ある時間が経った後の圧力は次の式から計算できる。

$$p = p_0 + (p_1 - p_0) \exp \left(- \frac{S_p}{V} t \right) \quad \text{式2-6-2-3}$$

真空ポンプの排気速度 S_p が変化しなければ、式(2)から容易に真空時間を計算できる。しかしながら、真空ポンプの排気速度 S_p は、圧力によって変化する。したがって、 S_p の変化を考慮しつつ真空時間を予測する必要がある。

具体的には、 p_1 から p_2 まで減圧するのに要する時間を求めるのに、 p_1 から p_2 の間をさらに細かく区切り ($p_1 \rightarrow p_1(1) \rightarrow p_1(2) \rightarrow \dots \rightarrow p_2$)、それぞれの区間の圧力に対応する排気速度 S_p を上式(2)に代入して計算する。最終的には、それぞれの区間で得た時間を合計することで真空時間が求められる。

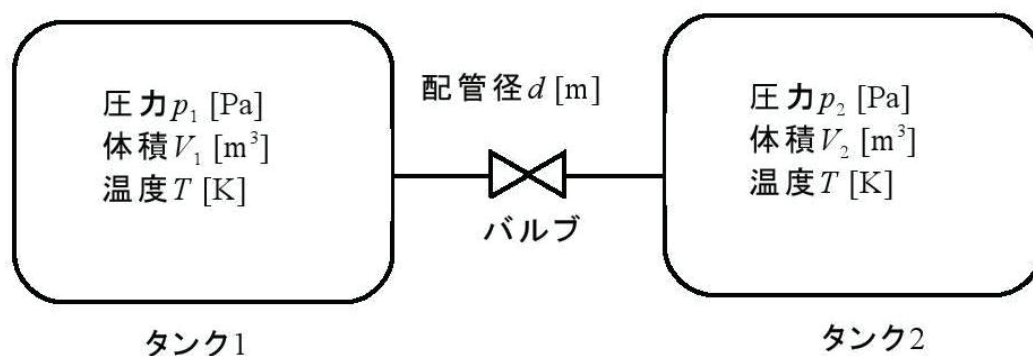


図2-6-2-2 連結容器装置

連結した2つの容器の圧力変化の場合は図2-6-2-2のようなモデルを考える。容積、圧力の異なるタンク2つが連結し、その間にバルブが設置されている。はじめにバルブを閉めた状態では、タンク間の圧力が異なっているが、バルブを開くと、同じ圧力 P [Pa]となる。この圧力は、タンク内温度を一定とする

と式2-6-2-4のように計算できる。

$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2} \quad \text{式2-6-2-4}$$

タンク間を移動するガスの速度を考える。比較的圧力が高い場合には、粘性流となり、そのときの移動速度 v_n [mol/s] はハーゲン・ポアズイユ式に基づき、式2-6-2-5で計算される。

$$v_n = \frac{\pi d^4}{256 \mu L R T} (p_1^2 - p_2^2) \quad \text{式2-6-2-5}$$

一方で真空度が高く分子流（クヌーセン流れ）のときには、式2-6-2-6で計算される。

$$v_n = \frac{d^3}{6 L R T} \left(\frac{2 \pi R T}{M} \right)^{1/2} (p_1 - p_2) \quad \text{式2-6-2-6}$$

ここで、 d ：配管の直径 [m]、 L ：配管の長さ [m]、 M ：気体の分子量 [mol/kmol]、 R ：気体定数 [J/(mol·K)]、 T ：温度 [K]、 μ ：気体の粘度 [Pa·s] である。

$L/d < 30 \sim 40$ の場合には、さらに管の端効果が現れるために補正が必要となる。

粘性流か分子流かを定める指標としてクヌーセン数 Kn があり、式2-6-2-7で表される。

$$Kn = \frac{\text{分子の平均自由行程}}{\text{流れ場の代表長さ (管直径)}} = \frac{\lambda}{L} \quad \text{式2-6-2-7}$$

クヌーセン数 Kn が 0.01 よりも小さい場合には粘性流、10 よりも大きいときには分子流となる。

各タンク中のガス量 n_1 または n_2 [mol] は気体の状態方程式から計算できる。

$$n_1 = \frac{p_1 V_1}{RT}, \quad n_2 = \frac{p_2 V_2}{RT} \quad \text{式2-6-2-8}$$

微小時間 Δt [s]の間に、タンク間を移動するガス量は、 $V_n \Delta t$ [mol]である。 $p_1 > p_2$ とすると、微小時間後のタンク1中のガスのモル数は $(n_1 - V_n \Delta t)$ となり、タンクの圧力は式2-6-2-9のようになる。

$$p_1 = \frac{(n_1 - v_n \Delta t)RT}{V_1}, \quad p_2 = \frac{(n_2 + v_n \Delta t)RT}{V_2} \quad \text{式2-6-2-9}$$

この計算を繰り返すことで、タンク内圧力の時間変化を得ることができる。

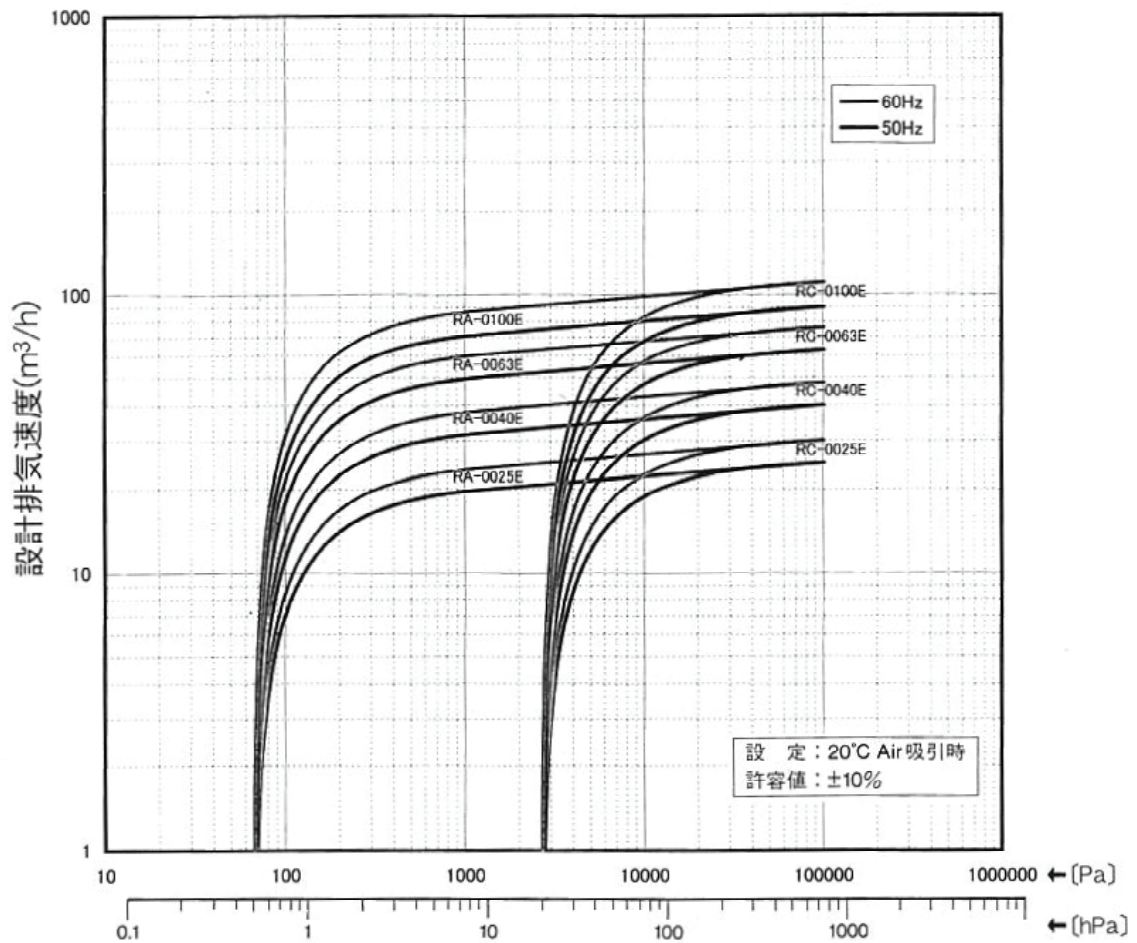


図2-6-2-3 真空ポンプ予想性能曲線[12]

2-6-3 真空ポンプ

真空ポンプ方式は多種有るが含浸における適正な真空ポンプを選定する必要があり、真空領域を0~26 hPaと想定し価格と能力を考慮すると油回転式を採用するが多い。中でもロータリーベーン式真空ポンプは真空度の立ち上がりが良く、構造が簡単でメンテナンス性も良い為多くの使用実績が有る。含浸用として、真空ポンプの到達圧力は1 hPa (100 Pa) 程度のロータリーベーン式で十分である。それ以上の到達圧力を持つ真空ポンプ（高精度）を使用して故障回数を増加させるリスクを負うより賢明な選択と言える。ロータリーベーン式真空ポンプはシンプルな構造で吸入した空気を排出しやすい構造と排出した気体を清浄化する機能がついている。BUSCH製ポンプの構造を図2-6-3-1に示す。

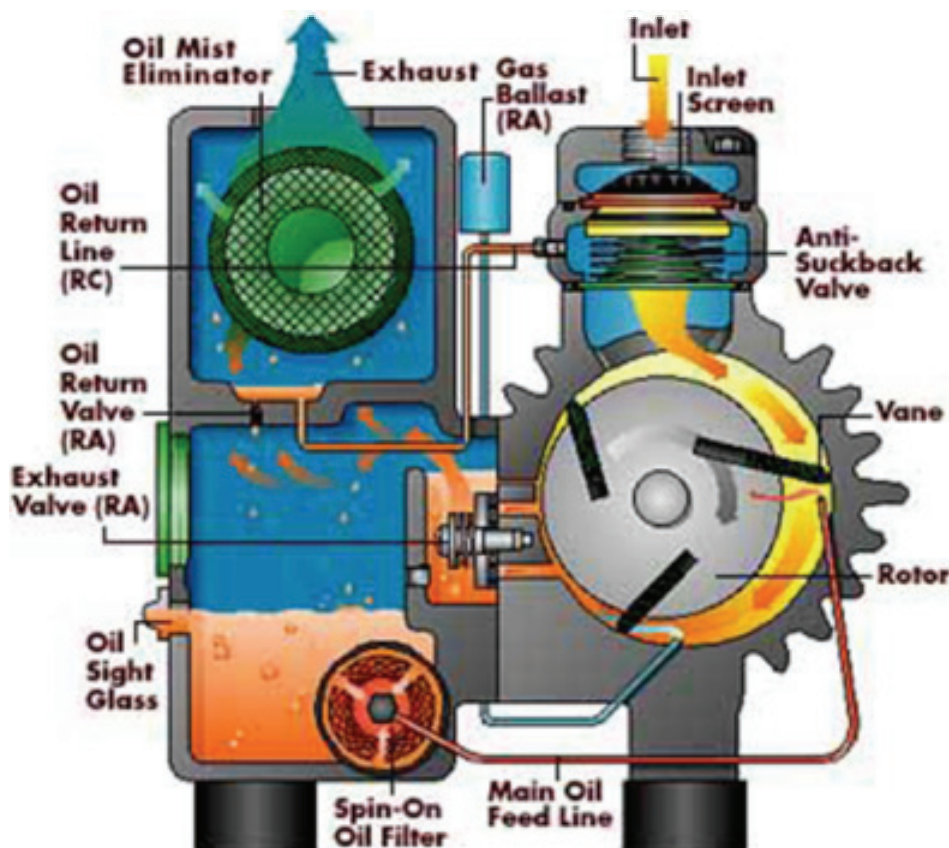


図2-6-3-1 BUSCH製真空ポンプ構造[12]

BUSCH製真空ポンプにはR5A-250D、R5A-100E、R5A-40E等の型式がある。ロータリーベーンを電動機により直動させる構造で、故障箇所が少なく13 hPa

領域での真空には最適である。含浸剤の吸い込み等の過酷な条件である含浸設備用として実績が有り、配管構造、オイル交換等を適切に行えば10年以上のオーバーホール不要例もある。真空ポンプ外観を図2-6-3-2に、また仕様を図2-6-3-3に示す

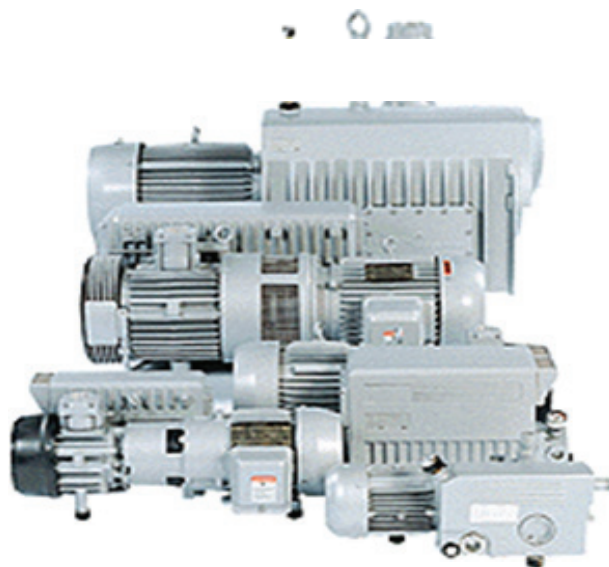


図2-6-3-2 BUSCH製真空ポンプ外観[12]

型式	排気量				到達真空度 Pa	電動機 kw	接続 口径 A	オイル 量 L	重量 kg
	50Hz		60Hz						
	m ³ /h	L/min	m ³ /h	L/min					
R5A-0250D	250	4170	300	5000	65	7.5	50	6.5	195
R5A-0160D	160	2670	192	3200	65	5.5	50	5.0	160
R5A-0100E	100	1670	120	2000	65	3.0	32	2.0	67
R5A-0063E	63	1050	76	1260	65	2.2	32	2.0	58
R5A-0040E	40	670	48	800	65	1.5	32	1.0	47
R5A-0025E	25	420	30	500	65	1.1	32	1.0	40

図2-6-3-3 BUSCH製真空ポンプ仕様[8]

2-6-4 真空トラップ

真空ポンプ保護の為に吸い込んだ異物を除去する必要がある。エアークリーナーとしてインレットフィルターを用いる場合もあるが、含浸用としては目詰まりを起こしにくいオイルトラップが有効である。仕様諸元を図2-6-4示す。

型式 Type	寸法			接続口 Connection	油量(L) Amount Oil	質量(kg) Weight
	φ胴径(mm) Diameter	L全高(mm) Height	内容積(?) Capacity			
T-250-5	250	980	24	VG50	5	24
T-300-11	300	1280	55	VG80	11	72

図2-6-4 真空トラップ諸元[8]

T-300-11対応真空ポンプはR5A-0250D (5000 L/min)、R5A-0160D (3200 L/min) でありT-250-5対応真空ポンプはR5A-0100E (2000 L/min)、R5A-0063E (1260 L/min)、R5A-0040E (800 L/min) になる。()内は60 Hz稼働時の排気量を表す。

真空トラップはトラップ内に入って来た空気がオイル面に衝突して跳ね上がり異物の直進性を利用してオイル内に捕まえる構造となっている。重要な因子はトラップ内配管径と配管出口ーオイル面間の距離(高さ)である。配管径にたいしてオイル面間の距離が短いとトラップ効果は高くなるが、真空に対する圧力損失となる可能性もある。

2-7. 管理

含浸装置の管理項目の中でも冷凍機、昇温装置等も重要になるがここでは真空関係を主に紹介する。

2-7-1 真空計

真空計基準にはゲージ圧（大気圧）と絶対圧がある。管理する圧力が2600 Pa以下の場合には絶対圧型が必要になる。近年ではデジタル真空計が多いが、絶対圧型としてSATO PVD-9500、OKANO AVG-143N-11とVALCOMを使用している。これらの機種はアナログ出力を持っておりデータロガーとの連携により低価格で効率のよいデータ管理に用いることも可能である。

2-7-2 真空ポンプ保全

各フィルター及びオイル交換を定期的に行うことにより真空ポンプ能力を高次元で維持できる。ブッシュ製真空ポンプは空冷式でオイルを冷却しており、オイル冷却が不足するとオイル劣化が早まり真空ポンプの能力に影響が出る。

2-7-3 GSC（含浸システムチェック）

量産対応の含浸装置は能力維持する為に定期的確認が必要になる。測定項目は含浸剤保管条件、真空、加圧、液切り、洗浄や硬化条件である。真空度測定は水銀マンノメーターを使用するが、デジタル真空計も併用する。各部の真空度測定を行う事により不具合箇所の特定期間も可能となる。

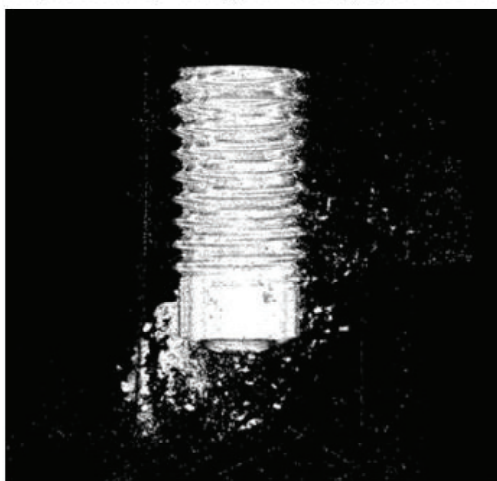
含浸装置のメンテナンスとして真空ポンプオイルや各フィルター等の交換時期は各社で基準を定め実施しているが、時間が経過すると実施率が低下する傾向にある。維持の為に担当外の部署による実施が望ましい。

2-8. ダイカスト検査

ダイカストの検査方法としては圧力検査があるが、内部を確認することは出来ない為、製品を抜き取り切断して内部確認を行うのが一般的である。しかしながら切断した部品は確認後使用できない点や精密切断を持ってしても、500 μm 以下の鑄巣を確認することは難しい。非破壊検査として超音波もあるが主力はX線CTである。近年はX線CTの進歩により100 μm 以下の空壁（鑄巣）の確認も可能になってきたが材料識別までは至っていないのが現状である。[13]

Inspection of Aluminum Die Casting

Inspection by using the X-ray penetration property



Leak Testing

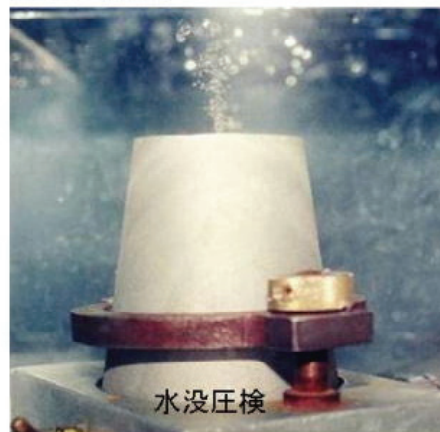


図2-8 アルミニウムダイカスト製品の圧力検査

2-9. まとめ

ここではダイカスト製品と含浸の関わり、処理工程や問題点について述べた。含浸処理の対象となるのは鑄造時に発生する鑄巣である。鑄巣が原因で製品に圧漏れや塗装不良等が発生する。鑄巣を封孔する事で製品の耐久性を含んだ品質向上を得ている。含浸には含浸剤と含浸装置、それを操作する人員と保守がある。初期能力を維持することが重要であり、そのためには工程管理と真空ポンプを中心とした保守管理が必要に成ってくる。また、含浸剤には有機系含浸剤（主成分：メタクリル酸エステルモノマー）と無機系含浸剤（主成分：水ガラス）があるが封孔能力を考えると有機含浸剤が主流になっている。設備構成を決定するためには真空理論を基にした設計を行う事が重要である。さらに現時点では品質保証の有効手段が圧力検査を中心としたダイカスト検査で有ることも明らかにした。

参考文献

- [1]菅公一, 嶋崎泰功, 金丸賢一, 「アルミニウム鋳物における含浸技術」ある529号(2012年1月号), p. 26-32, 軽金属通信ある社.
- [2]菅公一, 嶋崎泰功, 金丸賢一, 「エンジンブロックと含浸技術」アルトピアvol. 42. No. 6 (2012年6月号), p. 27-35 , カロス出版.
- [3]菅公一, 「ブロックのアルミダイカスト化と含浸の変遷」ある546号(2013年6月号), p6-7 , 軽金属通信ある社.
- [4]MIL-I-6869D, Mil Sepc (Military Specification), 1971
- [5]Yoshihiro Hangai, Soichiro Kitahara, Osamu Kuwazuru, "Compression Process for Porosity Reduction of Aluminum Alloy Die Casting Using Image-Based Finite Analysis", J. Japan Inst. Metals, Vol71, No. 5 (2007), pp. 458-462.
- [6]Yoshihiro Hangai, Soichiro Kitahara, "Evaluation of Porosity Area Distribution in Die Casting by Fractal Dimensions", J. Japan Inst. Metals, Vol71, No. 9 (2007), pp. 699-692.
- [7]Chuo Hatsumei Institute Co. Ltd., Super Seal P-601 技術資料, p. 10
- [8]Chuo Hatsumei Institute Co. Ltd., Fine Product 2014
- [9]真空工学, 山科俊郎, 広畑優子著, 共立出版, p. 57-62 (1991)
- [10]立元雄治, 菅公一, 「ダイカスト用高真空装置における真空技術の紹介」アルトピアvol. 40, No. 6 (2010年6月号), p. 40-46 , カロス出版.
- [11]. 立元雄治, 菅公一, 「ダイカスト用高真空装置における真空技術の応用」ある523号 (2011年7月号), p. 12-16 , 軽金属通信ある社.
- [12]日本ブッシュ株式会社, R5シリーズロータリーベーン真空ポンプカタログ. No. NBC0307D
- [13]菅公一, 井村ゆき乃, 青木徹, 「X線CTによるダイカスト製品内の含浸剤確認」アルトピア vol. 41, No. 6 (2011年6月号), p. 23-26 , カロス出版.

第 3 章 X線CT

3-1 前書き

コンピュータトモグラフィ (Computed Tomography, CT) は誕生以来、医療用として広く用いられてきた。X線は1895年ドイツの科学者レントゲン (W. C. Röntgen) が発見した後、広く医学研究に使用されるようになった。当初は単純投影画像であったが、奥行き等を把握する為にイギリスの研究者 G. N. Hounsfield が1967年にCT装置を開発した。この功績は大きく中でも重要なのは再構成法の理論的基礎を築いた事にある。対象物に対しX線の照射によって投影を得るのがX線CT装置であり、CT像として得られる物体断面の物理量は断面物質の減弱係数 (単位距離当たりX線の減弱を表す数値) である。その相対値の分布が画像として得られる。

X線CT装置で対象物 (断面) のCT像を取得するには2段階がある。第1段階は投影データの取得であり、第2段階は取得した投影データを使用したCT像の構成である。通常、第1段階を『投影』、第2段階を『再構成』と呼んでいる。この再構成のアルゴリズムは様々なものが提案されており、その用途によって使い分けが行われている。

X線CT装置は鋳物業界においても30年程度前より用いられるようになったが、当時では大型のX線装置でもアルミダイカスト製品内の空壁を見ることは難しく詳細は切断確認を行うのが主流であった。CT装置の進歩により現在では100 μm 以下の鋳巣レベルの確認も可能な領域になってきた。

ここではX線と物質の相互作用、X線、 γ 線の違いに続きX線CTにおける画像再構成法とDXCTによる材料識別について述べる。

3-2. X線と物質の相互作用

3-2-1 X線

X線は物質の構造を調べる為には欠かせない手段である。化合物分析からDNA解析まで広範囲に用いられている。X線はオングストローム (Å) 領域の波長を持つ電磁波である。波長が短くなると透過性が高くなり検査において「硬いX線」と呼ばれる。波長が短くなると透過性は低くなり「軟らかいX線」と呼んでいる。これらの違いは線質として表現されている。線質はX線管電圧により変えることが出来る。電圧を上げると波長の短い「硬いX線」になり、下げると「軟らかいX線」になる。検査対象により線質を使い分けることが重要である。

3-2-2 X線発生方法

現在でも広く使用されているX線発生管はレントゲン(W.C.Röntgen)によって発見されたものと基本的には変わっていない。X線管は陰極(cathode)と陽極(anode)から構成されている真空管である。陰極には収束カップ(focusing cup)と呼ばれる窪みの中にコイル式フィラメントがあり、銅塊の表面にターゲット(target)を張り付けた構造である。フィラメントを数百度以上に加熱すると熱電子が表面から発生し、陽極の正電位により加速されてターゲットに衝突する。その時点で電子は運動エネルギーを失う。放射線として放出されるのはそのうち1%以下であり、残りの99%以上は熱に変わる。通常のX線管ではターゲットに高融点のタングステンを使い、ターゲット支持台には高熱伝導率の銅を使って放射効率をよくする。X線管発生装置を図3-2-1、X線管のスペクトルを図3-2-2に示す。

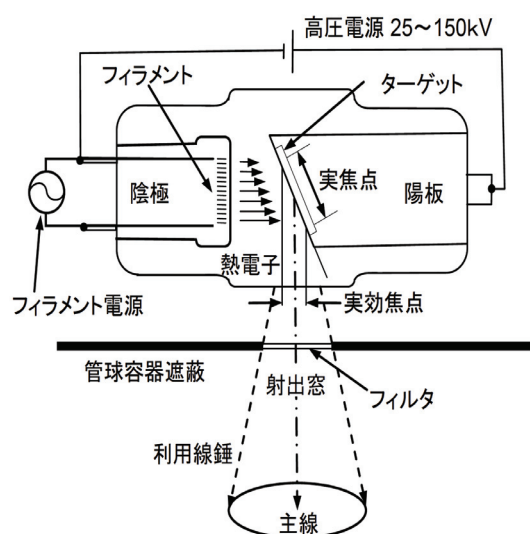


図3-2-1 X線発生装置[2]

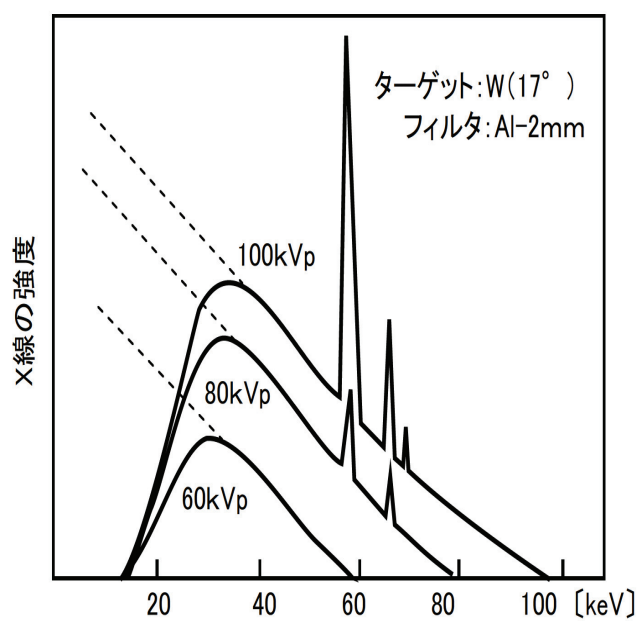


図3-2-2 X線スペクトル[2]

陽極の電圧を増加させ、電子のエネルギーが高くすると得られるX線は透過性の高いものとなる。

3-2-3 連続X線と特性X線

電子がターゲット物質に衝突すると原子核（物質中）の電場によってクーロン力を受ける。そのとき電子の進路が曲げられ減速する。その過程で放射される制動幅射（制動放射 Bremsstrahlung）が連続X線である[3]。同じ衝突は電子では起こらないので毎回異なるエネルギー損失になる。このような衝突を何回も繰り返し行うので、放射されるX線のスペクトルは連続である。

制動放射の発生

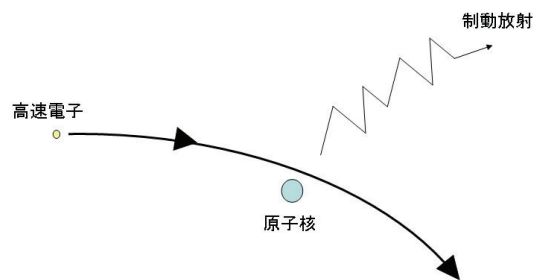


図3-2-3-1 連続X線の発生[3]

スペクトルの最短波長は電子1回の衝突で全エネルギーを失うのに相当している。電子の加速電圧をVとし最短波長 λ_m 、プランク定数hは式3-2-3-1に表される。

$$\lambda_m = \frac{hc}{eV} = \frac{1.2398}{V[kV]} [nm] \quad \text{式3-2-3-1}$$

例えば、12.4 kVの時、 λ_m は0.1 nmである。連続X線の全強度IはX線管の管電圧をVとし管電流をi、ターゲット物質の原子番号をZとすると式3-2-3-2の関係で表され、mは約2になる。[3]

$$I \propto iV^m Z \quad \text{式3-2-3-2}$$

連続X線はタンゲステンのような重金属のターゲットで効率よく得られる。

一方、特性X線は高速の電子が物質内の原子に衝突する時に核近くの電子がたたき出されてその場所に空孔を作る。空いた場所（空孔）にその外側より電子が遷移して埋める時に特性X線が放射される。

原子中の電子の状態は量子数により決まってくる。主量子数は殻（shell）を構成してエネルギー準位が決まる。図3-2-3-2に示されるようにK, L, M殻に遷移する時に放射されるX線をそれぞれK, L, M系列のX線と呼び、波長は順に長くなる。K系列が強く、L系列は弱い、M系列は更に弱くなる。L, MからK殻のエネルギー準位遷移する時はK α 線、K β 線と呼ぶ。

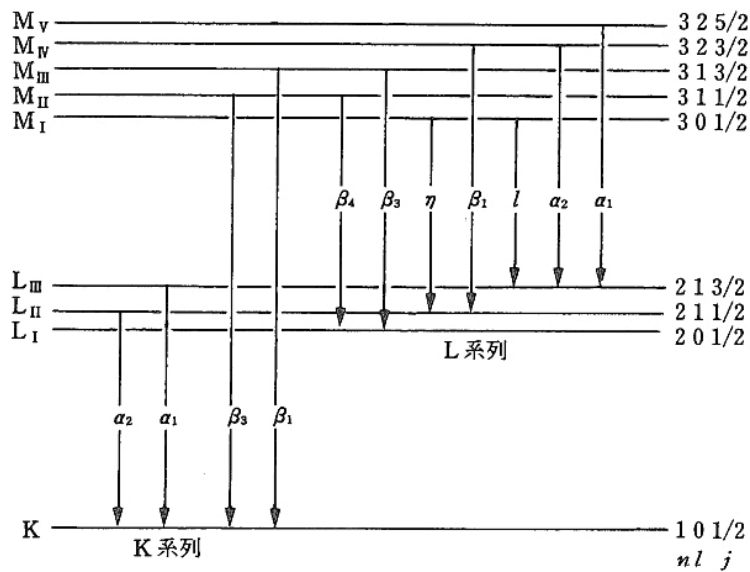


図3-2-3-2 エネルギー準位とX線放射・吸収[3]

特性X線の振動数 ν と放射にかかわる準位間のエネルギー差 ΔE は式3-2-3-3の関係で表される。

$$h\nu = \Delta E \quad \text{式3-2-3-3}$$

K α 線の波長を $\lambda_{k\alpha}$ 、K, L殻電子の結合エネルギー（Binding Energy） E_k , E_L とすると式3-2-3-4で表される。

$$\frac{hc}{\lambda_{k\alpha}} = E_K - E_L \quad \text{式3-2-3-4}$$

K系列のスペクトルを放射される為にはK殻電子の飛び出しが必要である。それに要する最低の加速電圧を V_k をK線の励起電圧といい、式3-2-3-5で表される。

$$eV_k = E_k \quad \text{式3-2-3-5}$$

3-2-4 X線と物質の相互作用

X線と原子の相互作用には散乱と吸収がある。物質が原子及び分子の密な集合体であると考え、入射したX線は空気及び真空と原子の境で屈折もしくは反射する。屈折は原子レベルで散乱になる。30 keV～150 keVのX線を物質に入射した場合には光電効果、コンプトン散乱等の相互作用を起こす事は知られている[6]。X線と物質の相互作用に基づく散乱と吸収に加え、2次放射を加えた物を図3-2-4-1に示す。以下でそれぞれの相互作用を説明する。

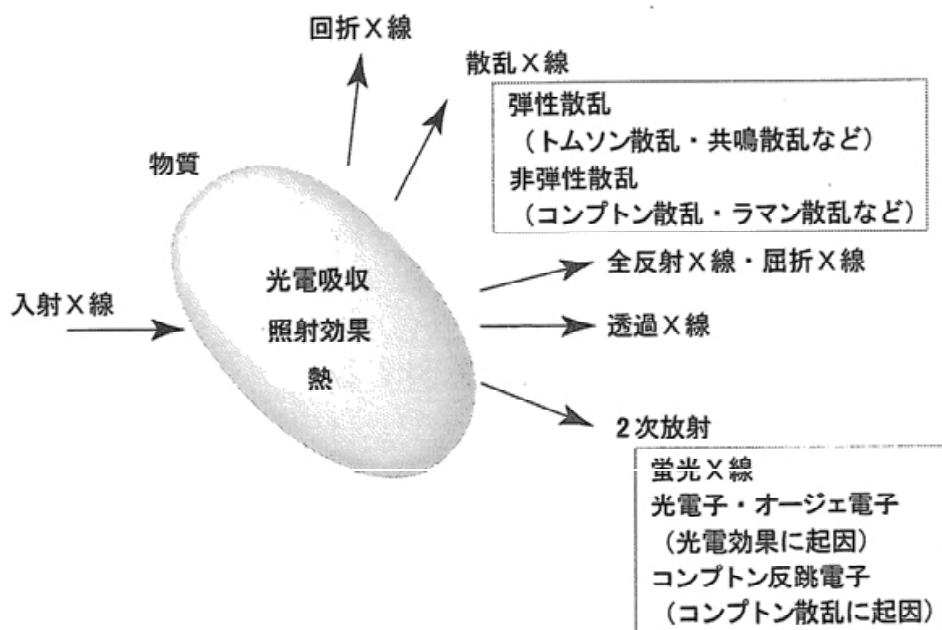


図3-2-4-1 X線が物質に入射した時に生ずる諸現象[5]

光電効果

光電効果は、電磁波であるX線の振動のエネルギーによって、その進路にある軌道電子が原子の束縛を断ち切って軌道から飛び出すことである。この現象は、ある種の金属や半導体物質に光や紫外線が照射すると電子が発生することとして、よく知られている。高エネルギーの電磁波であるX線についても同じ現象であり、この場合は強く結合された内殻電子において顕著である。光電効果においては、飛び出した電子は物体内で全エネルギーが吸収される。検出器内であれば、励起・電離作用によりキャリアを生成する。内殻電子が飛び出した後の空孔には、すぐに外殻の電子が遷移する。その時のエネルギー差が特性X線として放出される[4]。

コンプトン散乱

コンプトン散乱は、X線の粒子としての性質がよく現れた現象で、X線と電子の弾性散乱である。ところが、軌道電子は束縛状態にあるため、光子と軌道電子の系が運動エネルギーを保存する弾性散乱は厳密な意味では起こさない。これは散乱過程で、電離エネルギーに相当する分が、系の運動エネルギーから失われるからである。しかし、光子のエネルギーが軌道電子の電離エネルギーに比べ十分に大きい場合、電離の為に消費されるエネルギーの寄与がほとんど無視できるので、軌道電子による光子の散乱も、近似的に弾性散乱とみなせるようになる[5]。また、コンプトン散乱波X線光子と電子の衝突の際に、X線のエネルギーの一部が電子に移るので、散乱波の波長は1次波長よりもわずかに長くなる[4]。このため、コンプトン散乱は非干渉性散乱(incoherent scattering)である。

エネルギー ε は式3-2-4-1で表される。

$$\varepsilon = hck \quad \text{式3-2-4-1}$$

運動量 $h k$ を持った光子がエネルギー mc^2 を持った静止電子によって散乱される。電子は衝突の際の反動で運動量 hq' を持つことになる。

$$hq' = h(k - k') \quad \text{式3-2-4-2}$$

Compton散乱は1個のX線光子と1個の電子との相互作用であり物質の電子構造の情報を得るために使う事ができる[7]。

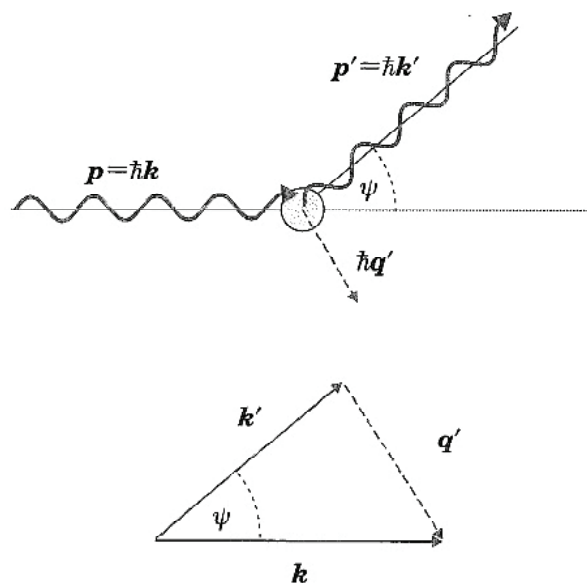


図3-2-4-2 Compton scattering[7]

3-3 X線・ γ 線の検出

半導体検出器は光子をパルスの信号に変換して計測するパルス型検出器になる。発生したパルス波高は入射した光子のエネルギーに比例するためにX線エネルギー測定に適している。

X線・ γ 線を含む放射線の検出には図3-3-1に示したフローが考えられる。入射したX線・ γ 線はコンプトン散乱等の光子相互作用により高速二次電子が生成される。高速二次電子は電離及び励起作用により電気信号に変換される。変換された信号を検出、表示に用いる。検出器から出される出力信号にはパルスと直流がある。パルス信号ではX線強度とエネルギー情報を取得することが出来るが直流信号は強度取得のみが一般的である。

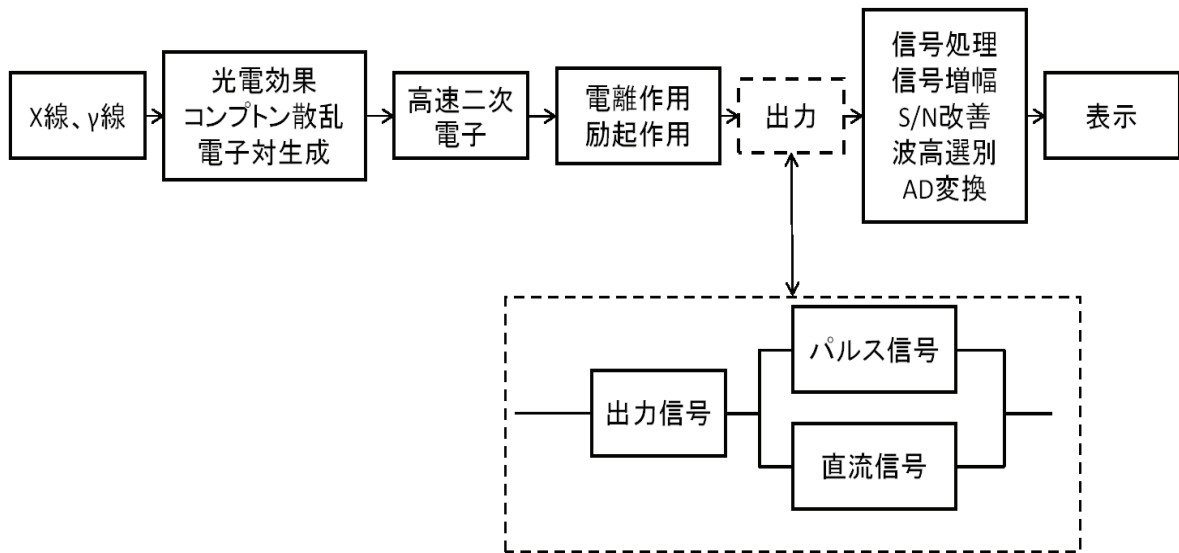


図3-3-1 X線・ γ 線による信号の生成プロセスと分類[12]

X線検出器は2種類の方式に大別することが出来る。一つは直接変換で、もう一つは間接変換である。直接変換方式は半導体本体で入射X線を吸収し発生する電荷を読み出す方式である。間接変換方式は入射X線をシンチレータと呼ばれる蛍光体が吸収・発光し、この光をフォトダイオードで光電変換し、発生した電荷を読み出す。検出器の構成を図3-3-2に示す。

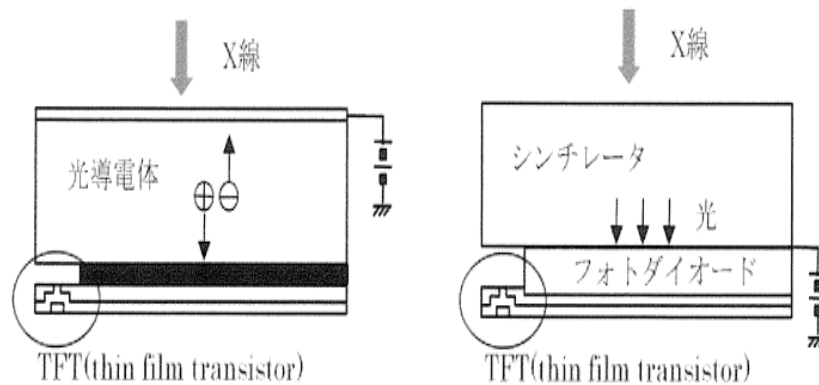


図3-3-2 直接変換方式と間接変換方式の検出器構成[11]

3-3-1 半導体検出器の特性[11]

間接変換方式の場合、フォトダイオードの優れた光検出機能を利用できるといった利点があるが、光散乱による空間分解能の低下や原理的にはX線光子のエネルギー情報を取得できないといった不利な点もある。直接変換方式は解像度の劣化が少なく、さらにフォトンカウンティング (Foton Counting) を用いることによりX線光子のエネルギー情報を取得することが可能となる。

フォトンが検出器内で1個の電子・正孔対を生成するのに必要な平均エネルギーを ϵ 値 (eV) とすると、半導体は気体のW値に比べ10分の1程度と小さく、効率良く電子・正孔対が生成されるため、出力信号を大きくでき、エネルギー分解能も高い値が得られる。半導体によりX線・ γ 線が入射して電子・正孔対が生成されると、電子は半導体結晶内の電場により陽極 (n^+ 層) へ、正孔は陰極 (p^+ 層) へ移動する。十分に高い電場の場合は生成された電子・正孔対は電極に到達しパルス波形信号として検出できる。

例えば、 E (keV) のエネルギーのフォトンが半導体検出器に吸収された場合、 $E/\epsilon \times 1000$ 個の電子・正孔対が生成され、全部が電極に到達した場合、 $1.602 \times 10^{-19} \times E/\epsilon \times 1000$ [Coulomb] の電荷信号が生じる。

X線や γ 線が物質に入った場合の光電効果の確率はほぼ (Z は原子番号、 E はフォトンのエネルギー) に比例するため、原子番号 Z が高いほど、また、エネルギー (E) が低いほど光子にたいする全エネルギー吸収の確率が高くなる。そのため、 Z の低いSiは低エネルギーに使用される。Ge、CdTeは高エネルギー帯での計測が可能になる。

禁止帯域 (エネルギーギャップ、 E_g) が大きいほど常温での電気伝導度が小さいため漏洩電流による雑音が低い。シリコン、CdTeは E_g が大きい室温で動作可能であるが、Geは小さいため冷却を必要とする。

放射線検出器として利用される半導体の特性を表3-3-1-1に示す。

半導体	原子番号Z	密度 (g/cm ³)	エネルギー ギャップ (eV)	ε 値 (eV)
Si	14	2.33	1.12	3.61
Ge	32	5.32	0.665	2.96 (@77K)
GaAs	31.33	5.31	1.43	4.27
CdTe	48.52	5.85[6.7]	1.5	4.43

表3-3-1-1 放射線検出器用半導体の特性[2]

3-3-2 カドミウムテルライド検出器

前述の通りCdTe ($E_g=1.47\text{eV}$)はバンドギャップがSiシリコン ($E_g=1.1\text{ eV}$)に比べ大きい室温動作が可能であり、また高い実効原子番号 ($Z=48, 52$)を有するため高エネルギーX線に対して高い吸収効率を持つ。p型半導体であるCdTeにn型層を形成し、p型側に電極を形成するM⁻・n構造のダイオード型CdTe放射線検出器を作製することで高エネルギー分解能を得ることができる[8][9][10]。

CdTeは優れた光電変換特性と高い電荷収集効率、高いエネルギー分解能が得られやすい特徴を有しているためにX線・γ線検出に適した半導体材料である。

本研究では、フォトンカウンティング型のCdTe検出器を用い、エネルギー弁別型CT撮像を行った。

3-4 X線CTにおける画像再構成法

CT撮像データを再構成する方法として2つの方法がある。解析再構成 (AR:analytic reconstruction) と逐次近似再構成 (IR:iterative reconstruction) がある。解析再構成法は高分解能や画像の高速化実現の利点があり、代表的なものにフィルター補正逆投影法 (FBP: filtered back-projection) がある。歴史は古く1970年にCT装置が医療分野に導入されて以来、ゴールドスタンダードされてきた[13]。FBPは高速画像処理が可能であるが、ノイズやアーチファクトにも敏感であり、仮説による除外項目もあり精確なCT画像構成法とはいえない。

他の手法として逐次近似再構成法は演算を重ねることで時間を必要とし問題であったが、近年のコンピューター処理能力の進歩により実用化が進んできた。

3-4-1 X線CTの投影データ[12]

X線の計測においては既知の強度 I_0 のX線を被写体に照射後、X線の強度 I を検出する。図3-4-1-1に示すように、線減弱係数を一様 μ とすると、強度 I は式3-4-1-1になる。

$$I = I_0 e^{-\mu x_0} \quad \text{式3-4-1-1}$$

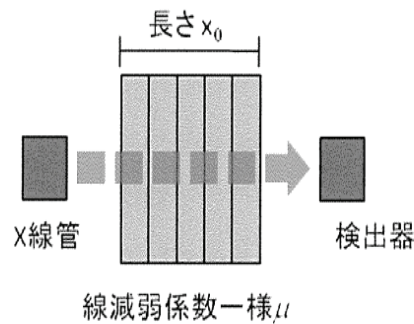


図3-4-1-1 線減弱係数が一様なX線計測[12]

長さ x_0 を透過した減弱量は μx_0 となるが、これを積分形式で表すと式3-4-1-2に表すことができる。

$$I = I_0 \exp \left[- \int_0^{x_0} \mu dx \right] \quad \text{式3-4-1-2}$$

図3-4-1-2に示すように、線減弱係数が不均一でという分布を持つとすると、直線 l に沿ったX線の減弱は、積分系の形を用いると式3-4-1-3になる。

$$I = I_0 \exp \left[- \int_0^{x_0} f(x, y) dl \right] \quad \text{式3-4-1-3}$$

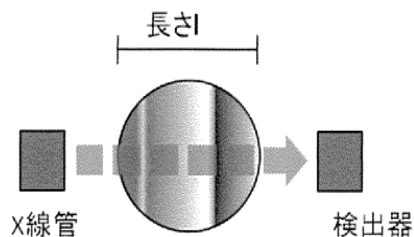


図3-4-1-2 線減弱係数が不均一な場合のX線計測[12]

X線CTの測定データは、X線管から放射され、被写体を透過して減弱を受けたX線を検出器で測定し、その強度として与えられる。まず、図3-4-1-3 のような座標系を考える。

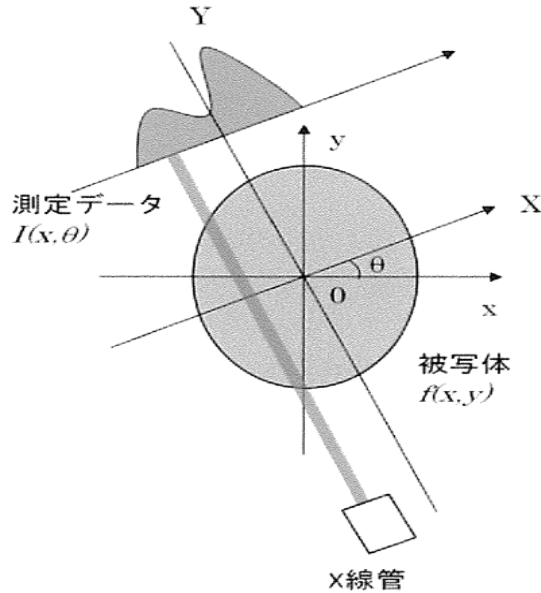


図3-4-1-3 X線CTの座標系[12]

被写体に対して固定した直交座標系をx-0-yとし、この座標(x, y)において被写体の線減弱係数の分布をf(x, y)とする。この座標系x-0-yに対し原点を中心に角度thetaだけ回転した新たな直交座標系をX-0-Yとする。両座標系間の関係は式3-4-1-4で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x = X \cos \theta - Y \sin \theta \\ y = X \sin \theta - Y \cos \theta \end{pmatrix} \quad \text{式3-4-1-4}$$

ここで、Y軸に平行に強度 I_0 のX線ビームを照射すると、被写体を透過した後のX線強度 $I(X, \theta)$ は式3-4-1-5になる。

$$I(x, \theta) = I_0 \exp \left[- \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dY \right] \quad \text{式3-4-1-5}$$

これから、X線強度の減弱率の対数変換 $g(x, \theta)$ は式3-4-1-6にて表すことができる。

$$g(x, \theta) = \ln \left[\frac{I_0}{I(x, \theta)} \right] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dY \quad \text{式3-4-1-6}$$

これをX線CTの投影データと呼ぶ。f(x, y)からg(X, θ)を求める変換をRadon変換と呼ぶ。

このデータを $0 \leq \theta < 2\pi$ の範囲に対して取得して被写体の線減弱係数の分布f(x, y)を求めることがX線CTの画像再構成の問題である。

3-4-2 2次元フーリエ変換法[12]

一般的に、2次元フーリエ変換は、X（縦）方向の1次元フーリエ変換とY（横）方向の1次元フーリエ変換を組み合わせることにより計算できる。

2次元フーリエ変換法は、投影データg(X, θ)の集合からf(x, y)を求める解析的アルゴリズムである。2次元の再構成問題として、実空間(x, y)に対応する周波数空間の角周波数の座標を(ξ, η)で表し、被写体の線減弱係数の分布f(x, y)の2次元フーリエ変換をF(ξ, η)とすると、式3-4-2-1で表される。

$$F(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(\xi x + \eta y)} dx dy \quad \text{式3-4-2-1}$$

直交座標系で表されている(ξ, η)を極座標系に変換すると式3-4-2-2となる。

$$\begin{pmatrix} \xi = \omega \cos \theta \\ \eta = \omega \sin \theta \end{pmatrix} \quad \text{式3-4-2-2}$$

ωは各周波数であり、式3-4-2-2を式3-4-2-1に代入すると式3-4-2-3になる。

$$F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad \text{式3-4-2-3}$$

ここで、 $X = x \cos \theta + y \sin \theta$ と積分 $dx dy = dX dY$ と表されることにより式3-4-2-4のように書くことができる。

$$\begin{aligned}
F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i\omega X} dx dy \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy \right] e^{-i\omega x} dx \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} g(X, \theta) e^{-i\omega X} dX
\end{aligned}
\tag{式3-4-2-4}$$

この式から、角度 θ の方向に取られた投影データ $g(X, \theta)$ を変換 X について1次元フーリエ変換すれば、求める線減弱係数の分布 $f(x, y)$ の2次元フーリエ変換の極座標表示における角度 θ 方向成分が得られる。よって、投影データ $g(X, \theta)$ を $0 \leq \theta < \pi$ に対して得ることにより、 $f(x, y)$ のフーリエ変換 $F(\xi, \eta)$ は完全に定まる。

従って、被写体の線減弱係数の分布 $f(x, y)$ は $F(\xi, \eta)$ の2次元逆フーリエ変換であり、式3-4-2-5で求めることができる。

$$F(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) e^{i(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta
\tag{式3-4-2-5}$$

以上の関係を図3-4-2に示す。この関係は、投影切断面定理である。この関係を直接実行する方法は2次元フーリエ変換と呼ばれている。

この方法では、具体的な計算は1次元および2次元のフーリエ変換に関するもののみであり、いずれも高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) を利用して、きわめて迅速に計算することができる。しかしながら具体的な計算機によるデジタル計算を考えると、式3-4-2-4の表す極座標表現による格子点と式3-4-2-5で表す直交座標表現による格子点の位置は一般には異なるため、適当な内挿計算が必要となる。この際、計算精度が十分に得られなければ、誤差に基づくアーチファクト(偽像)が発生する [14]。

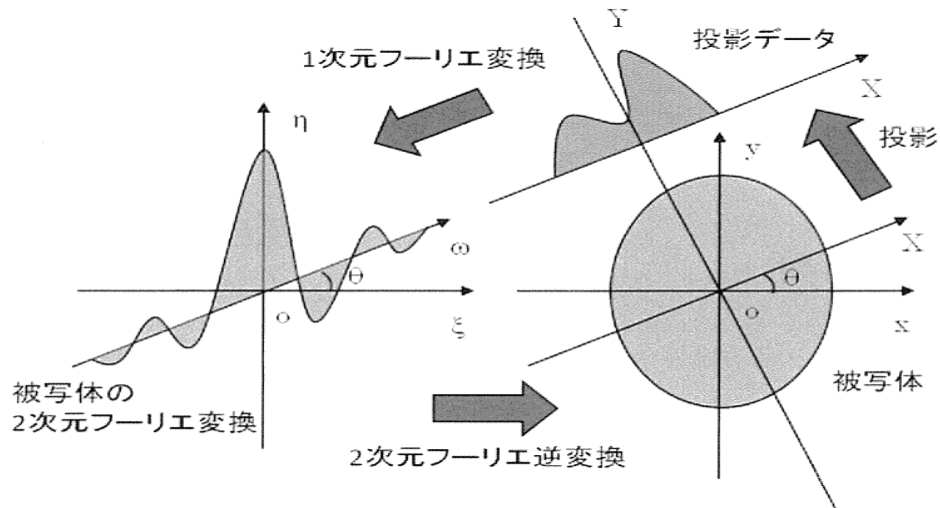


図3-4-2 X線CTにおける解析解(投影切断面定理) [12]

3-4-3 Filtered Back Projection(フィルタ補正逆投影法) [12]

フィルタ補正逆投影法は、投影データを逆投影することによって投影切断面定理と等価なCT像を得るために、フーリエ逆変換を行うためのフィルタ処理を行い断面像を得る方法である。

この方法では内挿計算による誤差を避けるために、式3-4-2-5を直交座標表現ではなく、極座標表現で行う。式3-4-2-2を用いて式3-4-2-5を動径方向、角度方向の極座標系で表すと、積分は式3-4-3-1となるので式3-4-3-2となる。

$$d\xi d\eta = \omega d\omega d\theta \tag{式3-4-3-1}$$

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) e^{i\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} \omega d\omega d\theta \tag{式3-4-3-2}$$

ω の積を $|\omega|$ とすることにより、 ω の範囲をマイナス領域に拡張することができる。よって式3-4-3-2は式3-4-3-3となる。

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) e^{i\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} |\omega| d\omega \right] d\theta \tag{式3-4-3-3}$$

ここで式3-4-3-3の [] 内の積分を $q(x, \theta)$ として

$$\begin{aligned}
 q(X, \theta) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) e^{i\omega X} |\omega| d\omega \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} g(X, \theta) e^{-i\omega x} dx \right] |\omega| e^{i\omega X} d\omega
 \end{aligned}
 \tag{式3-4-3-4}$$

となる。このを用いて残りの式を表すと式3-4-3-5となる。

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} q(X, \theta) d\theta \\
 &= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} q(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta
 \end{aligned}
 \tag{式3-4-3-5}$$

この方法では、図3-4-3に示すように角度方向の投影データにたいして式3-4-3-4で示したフィルタリングで修正した新しい投影データをつくった後、これを逆投影して求める。このために、この方法はフィルタ補正逆投影法と呼ばれる。フィルタ補正逆投影法は、現在のCTで最も一般的に用いられている再構成法である。

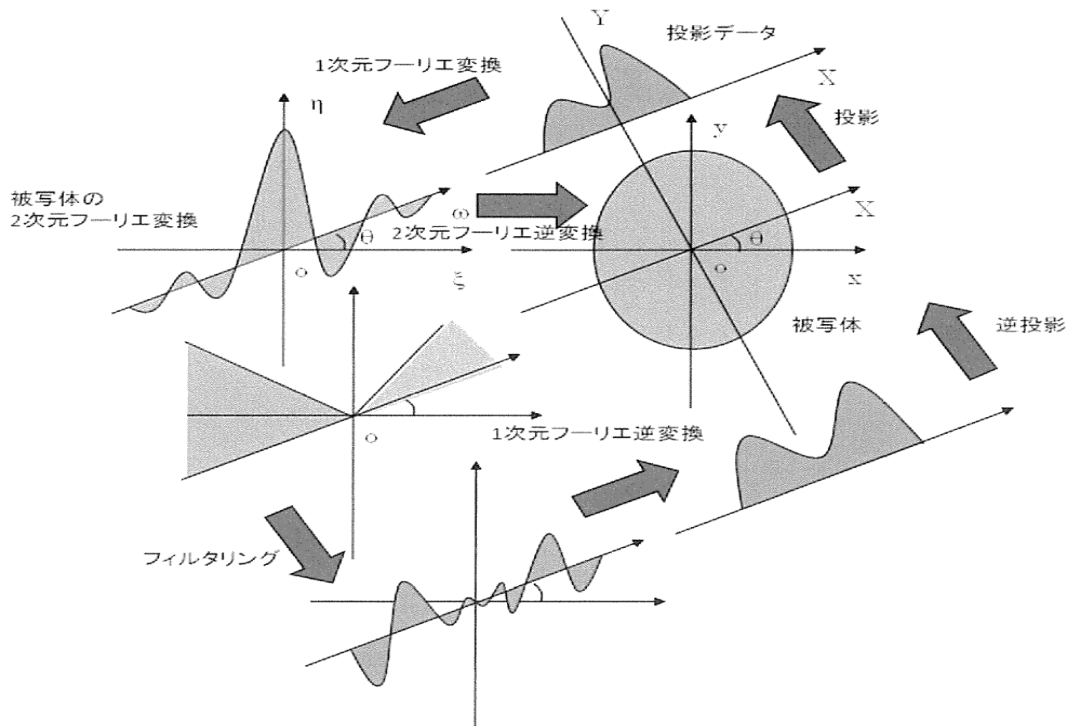


図3-4-3 FBP (Filtered back-projection) 法[12]

3-5 Dual Energy X-ray CT (DXCT) による材料識別 [19]

通常のCTではCT値が唯一のパラメーターであるために物質の正確な弁別は困難であるが、DXCTは異なる2つのエネルギーのX線減弱の差による電子密度分布から材料識別を行うことが可能である [12]。2003年には医療分野における応用及び有効性の報告がある [15]。また、RatherfordらはX線管に異なる電圧を印加して撮られた画像から、半経験的なモデルを用いて実効原子番号と電子密度を求め、脳腫瘍の性状を調べた [16] [17] [18]。

単色X線CTの再構成像は、通常のCT値の代わりに線減弱係数で構成される。X線診断領域のエネルギー（～約150 keV）では、線減弱係数は以下に示すように、主に光電吸収項と弾性・非弾性散乱 (coherent・incoherent scattering) の項で式3-5-1で表せる。 ρ は物質の密度 [g/cm³]、 A は原子数 [g/mol]、 N_A はアボガドロ数 [mol⁻¹] を表す。右辺の括弧内第1項は光電吸収断面積、第2項は弾性散乱断面積、第3項は非弾性散乱断面積である。

$$\mu = \rho \frac{N_A}{A} \left(\sigma_{el} + \sigma_{sc}^{coh} + \sigma_{sc}^{incoh} \right) \quad \text{式3-5-1}$$

式3-5-1より電子密度 [cm⁻³] を ρ_e 、原子番号を Z 、また $F(E_n, Z)$ 、 $G(E_n, Z)$ はそれぞれ線減弱係数の光電吸収項、散乱項を示している条件により、近似式 3-5-2を得る。

$$\mu = \rho_e \left[Z^4 F(E, Z) + G(E, Z) \right] \quad \text{式3-5-2}$$

エネルギースペクトル測定において少なくとも2つのX線エネルギーの線減弱係数を得ることで、電子密度 ρ_e と原子番号 Z を未知数とする式3-5-3、式3-5-4を得る。

$$\mu_1 = \rho_e \left[Z^4 F(E_1, Z) + G(E_1, Z) \right] \quad \text{式3-5-3}$$

$$\mu_2 = \rho_e \left[Z^4 F(E_2, Z) + G(E_2, Z) \right] \quad \text{式3-5-4}$$

ここで $F(E_n, Z)$ と $G(E_n, Z)$ が強く Z に依存しないと仮定し、 Z^4 について連立方程式を解くと式3-5-5になる。この式を繰り返し計算で解くことで、収束値として原子

番号が得られる。

$$Z^4 = \frac{\mu(E_2)G(E_1, Z) - \mu(E_1)G(E_2, Z)}{\mu(E_1)F(E_2, Z) - \mu(E_2)F(E_1, Z)} \quad \text{式3-5-5}$$

そのZの収束値を用いて次の式で電子密度 ρ_e を得ることができる。

$$\rho_e = \frac{\mu(E_1)F(E_2, Z) - \mu(E_2)F(E_1, Z)}{F(E_2, Z)G(E_1, Z) - F(E_1, Z)G(E_2, Z)} \quad \text{式3-5-6}$$

DXCT法では式3-5-1の近似として標準原子を酸素 (Z=8) としている。酸素の値と開きが大きい場合には近似をそのまま利用することが出来ない。原子番号の大きな金属を対象とした材料認識を行う場合はスペクトルX線とエネルギー弁別を用いた新たな方法も検討が必要である。

3-6 まとめ

ここではX線と物質の相互作用、X線、 γ 線の違いと検出器について述べ、画像再構成については投影データとCT像構成からなる事を説明した。さらに、異なる2つのエネルギーX線減弱差から得られる電子密度分布から材料識別を行う事が出来るDXCT (Dual Energy X-ray CT) を説明した。

参考文献

- [1]原島 鮮, *基礎物理学II*. : 学術図書出版社, 1969.
- [2]羽石秀昭, “X線イメージング技術” 画像電子学会誌, vol. 37, no. 5, p. 748, 2008.
- [3]菊田惺志, “X線散乱と放射線科学 基礎編 ”, :東京大学出版会, 2011.
- [4]富永洋, 野口正安, 「放射線応用計測」, 日刊工業社, 2004.
- [5]多田純一郎, 「わかりやすい放射線物理学(改訂2版)」, オーム社, 1997.
- [6]B. K. Agarwal, “X-Ray Spectroscopy”, Second edition, Springer-Verlag(1991).
- [7]J. Ala-Nielsen, D. McMorrow, “X線物理学の基礎” , 講談社, 2012.
- [8]H. Vogel, “Search by X-rays applied technology” , European Journal of Radiography. 63, pp. 227-236, 2007.
- [9]Catharine H. Malden, Robert D. Speller, “A CdZnTe array for the detection of explosive in baggage by energy-dispersive X-ray diffraction signature at multiple scatter angles” , Nucl. Instr. And Meth. A449, pp. 408-415, 2000
- [10]D. F. Jackson, D. J. Hawkes, “X-ray attenuation coefficients of elements and mixture” , physics reports, 70, No. 3, pp. 169-233, 1981.
- [11]井村ゆき乃, “ エネルギー情報を用いたX線CT画像の高画質化” , 博士論文, 2013.
- [12]大西慶明, “ 材料識別型フォトンカンテイングX線CT” , 修士論文, 2008.
- [13]上野景子, “ スペクトラルCT基本原理と臨床応用” , 秀潤社, 2013.
- [14]篠原広行、中世古和真他, “ コーンビームCT画像再構成の基礎” , 医療科学社, 2013
- [15]Masami Torikoshi et al., “Electron density measurement with dual-energy x-ray CT using synchrotron radiation.,” *Physics in medicine and biology*, vol. 48, no. 5, p. 673, 2003.
- [16]Bethe H A and Salpeter, “Quatum Mechanics of One and Two Electron Atoms” , E E 1957.
- [17]Stobbe M, “Zur Quantenmechanik photoelektrischer Prozesse” , Ann. Phys. 7, p. 661, 1930.
- [18]Sauter F, “Über den atomaren Photoeffekt bei großer Härte der anregenden Strahlung” , Ann. Phys. 9, p. 217, 1931.
- [19]Wenjuan Zou, Takuya Nakajima et al., “Atomic Number and Electron Density Measurement Using a Conventional X-ray Tube and a CdTe Detector” , Japanese Journal of Applied Physics Vol. 47, No. 9, 2008, pp. 7317-7323.

第 4 章 アルミダイカスト製品鑄巣含浸と X 線 CT

4-1 前書き

アルミニウムは産業界で幅広く使われている材質である。古くは鑄鉄より製造していた部品を変更する機会が多い。部品として使用する場合、量産効率と価格を考慮してダイカスト鑄造の採用が多い[1]。アルミニウムダイカスト法には多種有るが最近では鑄巣を少なくする為に真空やPF法を用いた鑄造方法がある。それらは鑄巣を無くすことで製品強度維持や熱処理による膨れ防止と圧力漏れ防止等の効果を得ている。しなしながら製品内に鑄巣の発生する事は不可避である[2]。熱処理対策にはならないが強度維持や圧力漏れ防止には鑄造後に含浸処理を行う事でも同様の効果が得られる。近年の鑄造技術向上により複雑化した部品の生産取り組みも進んでいるがそれに伴い含浸の需要も増えているのが現状である。

アルミダイカスト製品を含浸した場合の性能評価は通常漏れ量を計測した製品を含浸した後再度漏れ量を計測して評価している。当然漏れが止まっている状態が最良である。耐熱や冷熱の耐久性を評価する場合も同様に各試験を行っている課程で漏れ量を計測して最終判断としている。漏れ量からは鑄巣の口径は想定できるが鑄巣状況は不明である。切断等で判明する場合もあるが製品として使用できないので抜き取り評価であり品質保証の観点からも製品実態を正確に把握しているとは言えない。

非破壊検査は量産使用部品を検査確認出来ることから多く使用されているが、中でも、X線CTがもっとも有効な判断材料となっている。問題点は測定に時間がかかることやエンジンプロック等の大型部品を測定するためには装置がそれ以上に大型になり高価になってしまう点である。自動車会社でも品質上の問題が起きたときには必ずX線CTを使用しており対策の柱としている。また当然ダイカスト鑄造方案向上の確認にも使用されてはいるが工数と装置価格の問題で量産対応には至っていないのが現状である。

ここではアルミダイカストの非破壊検査とX線CT像の現状と課題を説明し、最後にアルミダイカスト鑄巣含浸とX線CTによる非破壊検査の状況を述べる。

4-2 アルミダイカストの非破壊検査[3]

非破壊検査(Non-destructive Inspection)と非破壊試験(Non-destructive Test)があるがデータを取る目的の試験ではなく製品の合否判定(使用可否)を行う非破壊検査を説明する。非破壊検査の基本は壊さず探るである。当然のことながら実製品を壊してしまっては使えないからである。

一般に非破壊検査ではキズと欠陥を区別して使用している場合が多い。ダイカスト業界では鑄巣を欠陥孔と言う場合もあるが鑄巣が全て欠陥とは言えない状況も多くあり欠陥孔は限られた場合のみに使用されている。非破壊検査でのキズは重要な問題になっていない場合に使用されている表現のようである。

<目視検査>

一般に非破壊検査の方法として目視検査がある。目視による検査は視力差等もあり熟練を必要とするが、検査の基本として現在でも実用で用いられている。中でも外観検査はダイカスト業界でも広く用いられている。鑄巣として外観上では0.5φ程度の位までは容易に確認することが出来る。当然、切断して確認する以外に内部状況は推測するしかない。図4-2-1は飛行機エンジン部品を目視検査にて疲労割れを確認した例である。

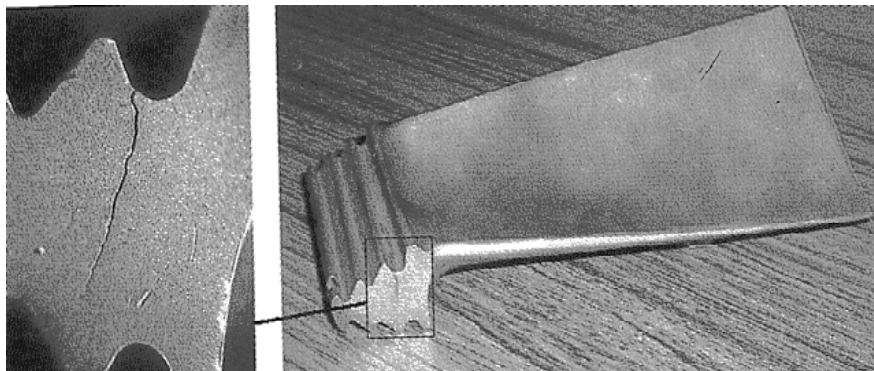


図4-2-1 目視検査で確認されたタービンの疲労割れ[3]

<浸透探傷検査>

目視を進化させた方法に浸透探傷検査がある。表面観察の手法は目視検査と変わらないが目視では判りづらい表面の隙間を毛細管現象により浸透させた液を蛍光作用等でコントラストを出す事で判断する事が出来る。条件にもよるが隙間が1ミクロンレベル迄も判断する事も可能である。目視検査同様に表面状態から内部状況を判断する事しかできないが、量産部品等の全数検査対応も可能である。アルミダイカスト製品においては蛍光性を持たせた浸透探傷剤をスプレーで吹いたり浸漬させたりした後、余剰液を除去して暗幕の中で紫外線を照射して判断している。毛細管現象の高さ（ h ）は液体の表面張力（ Γ ）と接触角（ θ ）隙間幅（ r ）液体の密度（ ρ ）より式4-2-1で表すことが出来る。

$$h = \frac{\Gamma \cos \theta}{\rho r g} \quad \text{式4-2-1}$$

隙間が狭くなった場合を式4-2-2に示す。

$$h = \frac{2\Gamma \cos \theta}{\rho r g} \quad \text{式4-2-2}$$

どちらにしても浸透する高さは隙間幅もしくは径に反比例する。このことは狭い隙間ほど浸透液が入りやすいこと示している。コントラストより隙間の深さを知る手がかりともなる。通常目視では確認できないレベルが見られる可能性があるのが浸透探傷検査である。ここでの問題は余剰液の除去が不十分だと判りづらいことである。図4-2-2は浸透探傷検査における像のコントラスト拡大イメージである[1]。通常目視検査では判別しづらい傷を浸透探傷剤によりコントラストを拡大することで判別の精度を上げることが出来る。

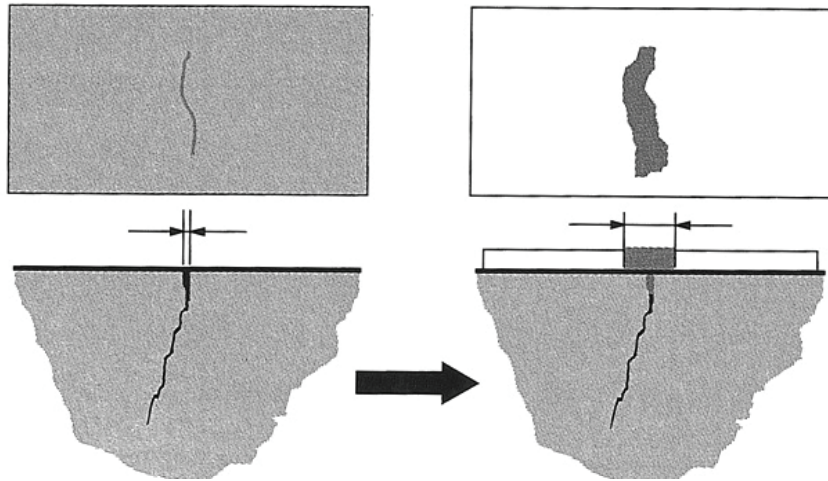


図4-2-2 浸透探傷検査での像とコントラスト拡大[3]

例としてゆで卵の傷を蛍光浸透探傷剤を用いて傷の確認を行っている図4-2-3を示す。蛍光性浸透探傷剤の場合は暗室にて紫外線光を照射して確認している。この例は実用ではなく蛍光浸透探傷剤の効果を確認するための試験である。

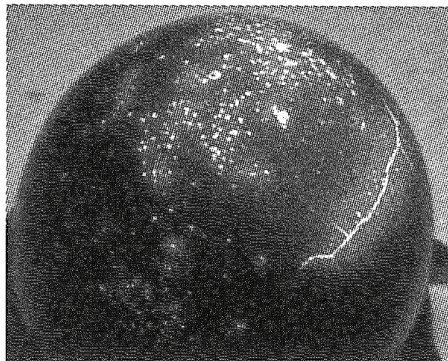


図4-2-3 ゆで卵の浸透探傷検査[3]

<磁粉探傷検査>

アルミ用には向かないが鋳鉄用には磁粉探傷検査もある。原理は隙間があるとN極とS極が発生するので磁粉が集まりやすくなり磁粉模様を形成する。こちらも表面状態の観察が主であるが磁気センサーの併用により目視より正確に判断する事も可能になる。隙間が広がるほど磁界が強くなり磁粉が集まりやすくなるので隙間を判断するには都合のよい検査方法である。欠点は検査対象が鉄、ニッケル、コバルト等の磁性体に限定される事である。当然今回のアルミダイカスト製品には使用されていない。図4-2-4に磁粉探傷検査の原理を示す。

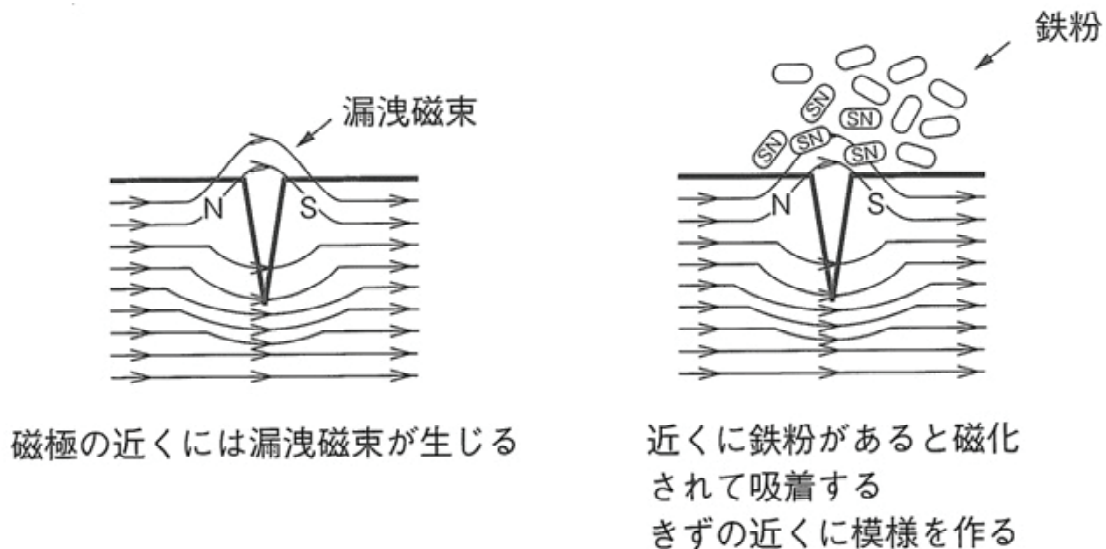


図4-2-4 磁粉探傷検査の原理[3]

<過電流探傷検査>

電氣的検査方法では過電流探傷もある。電磁誘導を用いて隙間を見ることが出来る。目視等に比べて短時間で判断できるが隙間の形を見分けるのは難しい。原理は検査製品（導電材料）交流コイルを近づけると発生する過電流差により隙間の有無を瞬時に判断する事である。基本的に隙間があると過電流が流れにくくなる。浸透高さ（h）は試験周波数（f）試験体の導電率（ σ ）及び磁性率（ μ ）で決まり式4-2-3で表す。

$$h = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad \text{式4-2-3}$$

同じ材料（導電率、磁性率）では浸透深さは検査コイルに流す電流の周波数（f）により決められる事になる。

図4-2-5は表面からの式4-2-3の深さ h を δ に置き換え過電流密度 (J) を求めた物である。

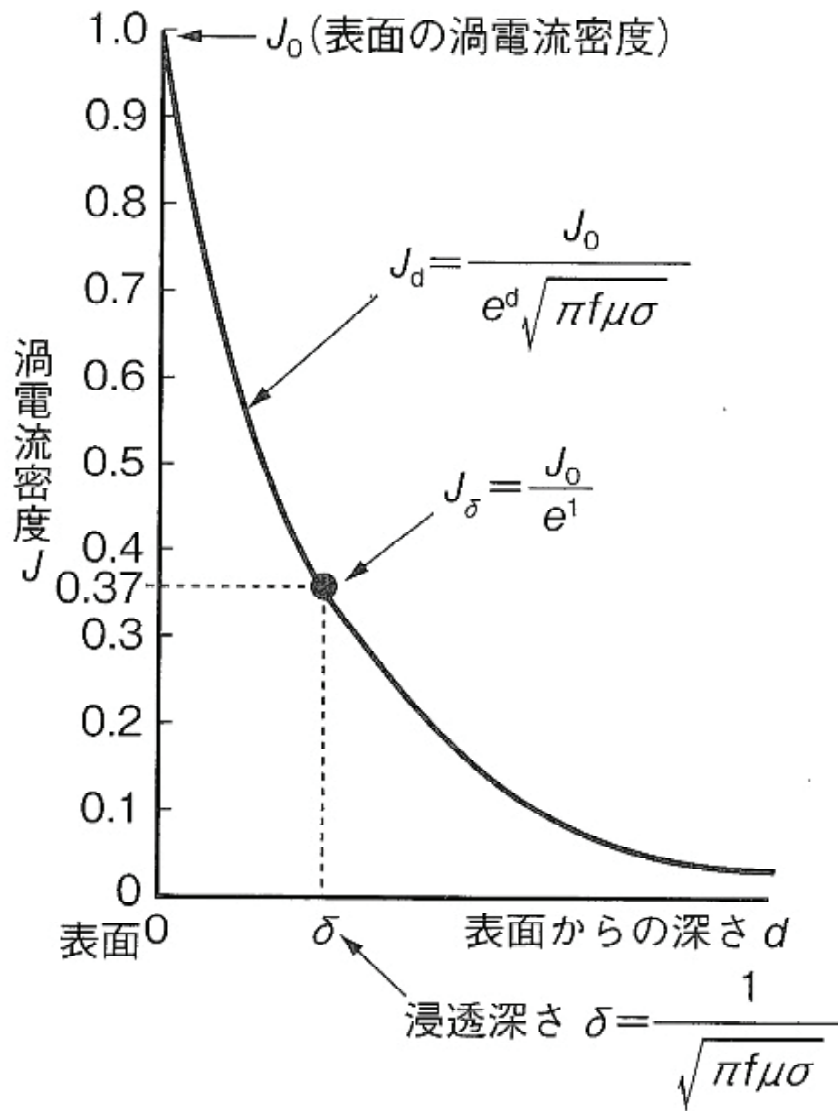
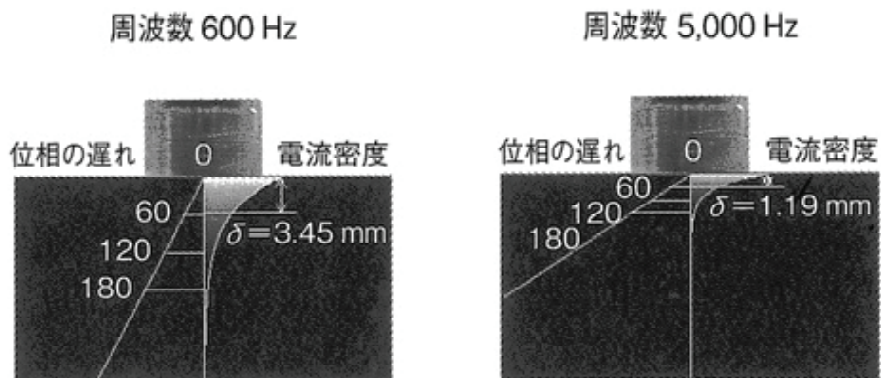
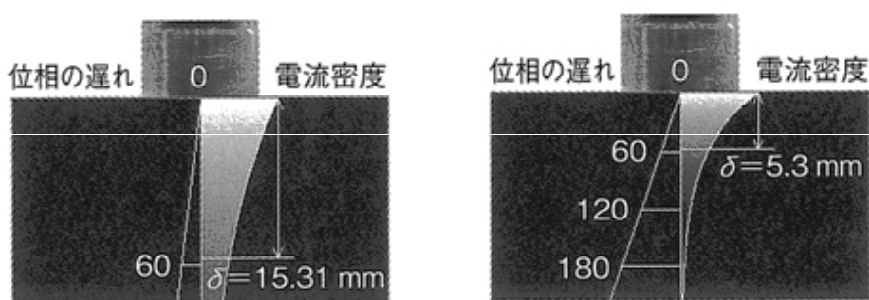


図4-2-5 過電流の浸透深さ [3]

図4-2-6に過電流密度と周波数・材料の導電率の関係を示す。
 導電率と周波数が高いと奥まで見えなくなり、アルミニウムの導電率は35.4で高く周波数を下げても導電率の高い材料に比べ隙間の奥は見えづらくなる。



(a) アルミニウム (導電率 : 35.4)



(b) チタニウム (導電率 : 1.8)

材料の導電率が高いほど、試験周波数が高いほど
浸透深さ (δ) は浅くなる

図4-2-6 過電流密度と周波数・材料の導電率の関係[3]

過電流探傷検査は一般に、飛行機などの部品検査に用いられる例が多い。ダイカスト製品においては、隙間を見るという目的では不十分な為、あまり使用されていない。

<超音波探傷検査>

内部を見る検査方法として超音波探傷検査がある。超音波の測定方法には透過法と共振法があるが主流は後者である。透過法は超音波を入れた反対面に受信機を置き受信がない場合に隙間を確認する方式である。この方法だと隙間までの距離は不明である。その為、薄肉製品に限られて使用されている。共振法は内部の隙間より反射してくるエコーを受信して画像にするものである。医学の分野では妊娠中の胎児検査によく利用されているパルス反射法がある。アルミダイカスト製品の分野でも同じ方法で短いパルスにした超音波を利用している。1秒間に数百万回振動する音のMHz台の超音波を使用しエコーの高さを画像化するが鮮明な画像は難しいのが現状である。精度を上げる為に垂直照射に加え斜角照射も行う技術も開発されているが、鑄巣径100 μ 以下の判別は難しいのが現状である。

航空機部品の分野では強度の必要な構造部材にCFRP（炭素繊維強化プラスチック）を使用してきたが、製品検査に超音波が多用されている。図4-2-7にCFRPの層間剥離の水浸漬法による探傷例を示す。この場合は探触子と呼ばれる発信及び受信器（一体型）を用いて検査を行っている。図4-2-7中程の白い部分が剥離をおこした部分である。

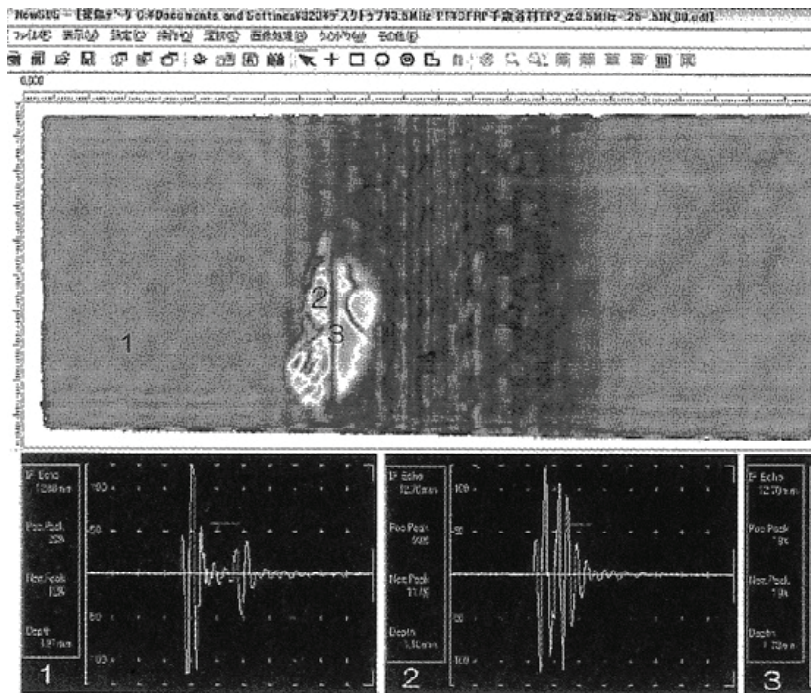


図4-2-7 CFRPの超音波探傷検査[3]

図4-2-8は鑄鉄（鉄の鑄造品）超音波検査の例である。検査対象物は水中で、探触子は非接触で測定している。想定方法は底面反射法で行っており欠陥（鑄巣）反射法とは異なるが、欠陥の位置を確認する必要がないので効率を考えると有効である[4]。

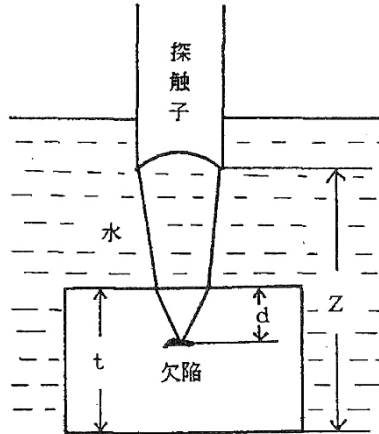


図4-2-8 探触子と欠陥（鑄巣）との位置関係[3]

図4-2-9は図4-2-8に示した測定方法による超音波画像とX線透過画像である。超音波画像(a)はノイズのみが写っており対応するガス欠陥（鑄巣）は見られないが、X線透過画像(b)には多数の欠陥（鑄巣）が確認出来る。

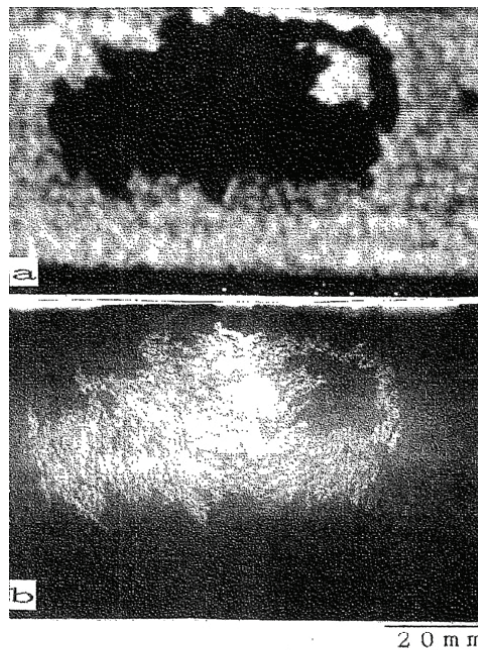


図4-2-9 欠陥（鑄巣）の底面反射波像（a）とX線透過像（b）[3]

超音波における鑄巣確認は難しいが鑄巣位置が判明している場合は超音波の焦点を当てることで、より正確なデータ（画像）を得られる。X線に比べ被爆等の心配がない超音波探査による検査方法は、今後の進歩によりダイカスト製品でも使用される可能性は高いと考えられる。

<圧力検査>

圧力検査は鑄巣そのものを見るわけではなく製品内に一定圧力をかけ漏れてはいけない箇所を漏れ量を測定する。媒体は多種有り目的に応じて選定するが、一般的には空気を用いることが多い。水没圧検は漏れ量を測定する為に水槽に製品を水没させメスシリンダー等で空気を集め一定時間の漏れ量を測定する。圧力、媒体と漏れ量から鑄巣の径を近似値として得ることが出来る。実際の鑄巣形状は複雑でありなおかつ同じ物が存在しない。その為に直管で便宜的にハーゲンポアズイユの式4-2-4を用いて計算している。算出した結果を図4-2-10を表す。

$$Q = \left(\frac{\pi D^4 \Delta P}{128 \mu L} \right) \times 60 \quad \text{式4-2-4}$$

ここでは圧力差 ΔP (空気圧)、径 D 、長さ L 、空気の粘度 μ より漏れ量 Q を求めている。

例として図4-2-10より0.49 MPaの空気圧で径 (鑄巣径) $10 \mu\text{m}$ だと約0.1 ml/minの漏れ量になる。水没圧検の弱点は時間と工数がかかることである。したがって量産検査には向いていない。

Pore Size :
Though the real defective has quite complex shape, suppose it is like a straight line here. The mean volume velocity of liquid leak Q can be acquired by the following equation by applying Hagen-Poiseuille's law, and this enables rough estimation of liquid leak:
 $Q = (\pi D^4 \cdot \Delta P / 128 \mu L) \cdot 60$
 D : Pore Size
 ΔP : Pressure Difference
 μ : Air Viscosity
 L : Pore Length

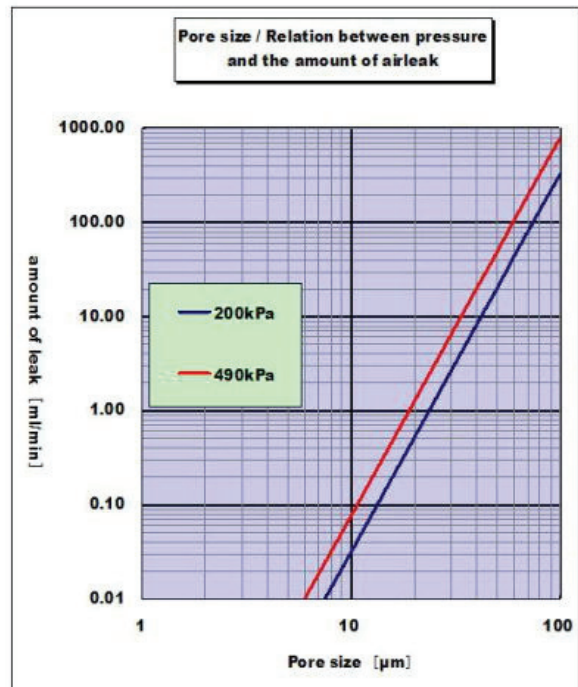


図4-2-10 漏れ量と想定鑄巣口径

ダイカスト業界及び産業界においては漏れ量の数値を規定して製品判断基準としているところが多い。ここでは水没式の圧力検査を説明したが、他に差圧を利用した差圧検査装置やヘリウムガス (He) や水素ガス (H₂) を媒体にしてそれぞれの検知器により漏れ量を測定する方法も多用されている。例を挙げるとカークーラーコンプレッサーは冷媒ガス検査の代わりにHeガス検知を有効活用している。問題は漏れ箇所同定の同定が量産では難しいことにある。現在でも窒素ガス (N₂) を媒体にした水没圧検を漏れ箇所同定に使用している。差圧検査も同様に自動化による量産性はあるが製品全体での検査となる為に漏れ箇所同定は出来ない。ガスメーターケース、ミッションケース等によく用いられている。当然最終確認は水没圧検に頼っているのが現状である。

<放射線透過検査>

非破壊検査の中で内部確認を行えるもっとも有効な手法は放射線透過検査である。検査にはX線や γ 線の電磁波を使用しており一般的な検査はレントゲン検査である。アルミダイカスト製品を検査する場合も同じ方法で透過画像を得ている。X線はX線管（真空管）を使用する為電源を切れば電磁波も止まるが、 γ 線はコバルト60やイリジウム192等のラジオアイソトープ(Radio Isotope)を使用する為、制御が不能である。しかも発生期間に限られる為に使用期限がある。発生電力不要の利点もあるがダイカスト製品検査には向いていない。X線検査の中でもX線CTは鮮明な画像を得られる可能性が高く、アルミダイカスト製品に対してもっとも有効で確実な検査方法と言える。

図4-2-11はアルミダイカスト製品のX線透過画像である。同製品の切断面の画像が図4-2-12である。鑄巣は黒くなった部分であり、切断画像を比較しても鑄巣形状を明確化出来ている。

X線透過画像で鑄巣を明確化出来るが、鑄巣内に浸透した含浸剤や他の物質は確認は出来ない。品質保証の観点から見てもそれらを明確にすることは重要である。

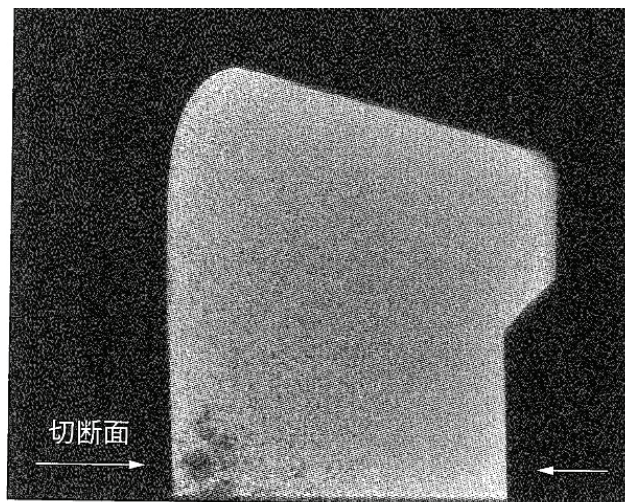


図4-2-11 アルミダイカスト製品のX線透過画像[3]



図4-2-12 アルミダイカスト製品切断画像[3]

4-3 アルミダイカストX線CT撮像の現状と課題

透過画像中心のX線CT像においてアルミダイカスト内部の鑄巣は濃淡により判別可能である。検査対象なる製品寸法にもよるがX線CTにより100 μm 以下の鑄巣確認も行われている。撮像例として図4-3を示す。

測定は(株)島津製作所製マイクロフォーカスX線CT SMX-225CT、X線源はタンゲステン（管電圧80 kV、管電流200 μA ）を用いて縦方向スライドピッチ0.1 mm \times 100枚で行っている。断面画像1024 \times 1024で1ピクセルは0.01 mm相当になり透過像のサンプリングは1断面1200回転している[5]。試験片はADC12でアルミニウム合金のダイカスト製品の大部分を占める材料である[6]。鑄巣は黒い部分である。結果として50 μm 以下の鑄巣判別は難しく鑄巣内の成分確認も出来ない。

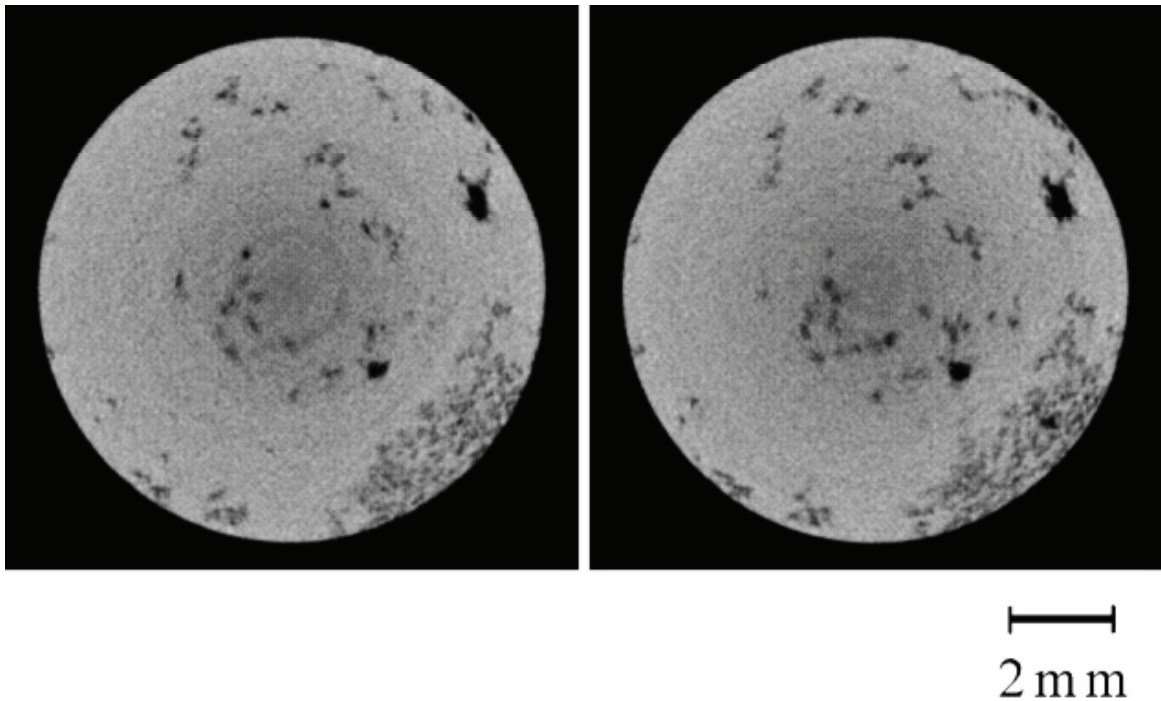


図4-3 Two successive images of multi-slice X-ray CT of porosity in cylindrical column alloy die casting specimen[5].

4-4 アルミダイカスト 鑄巣含浸とX線CTによる非破壊検査

アルミダイカスト製品の鑄巣形状の考え方は多種有るが含浸対象で考えると大きく分けて3つのパターンが考えられる。図4-4-1に示す[7]。

Mechanism of Impregnation



1. Typical condition of porosity

Since it is impossible to prevent liquid and gas having pressure from leaking, impregnation must be provided. If plating or coating are performed in this condition, clouding, bulge, or exfoliation may be caused.



2. Preventing future risks by impregnation

Pressure test cannot detect such leaks, and they may also be caused from light corrosion. Besides, plating or coating requires impregnation as a prior treatment, which leads to prevent future risks.



3. Impregnation after processing

This condition would not cause problems in the future, but it can be easily estimated that pressure leak or corrosion inside of plating film would occur if this product is machined. Therefore, impregnation after machining is ideal.

図4-4-1 鑄巣形状と含浸（含浸のメカニズム）

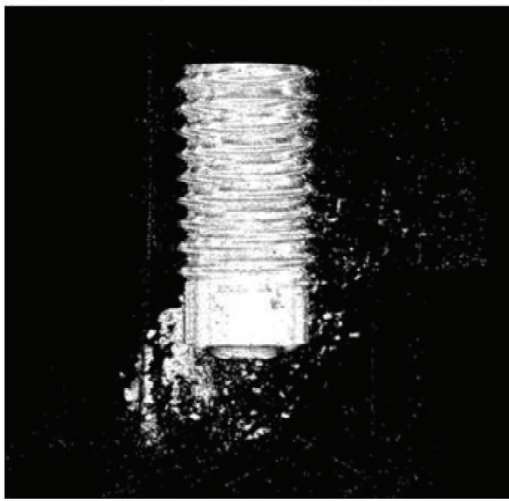
一つ目は貫通孔で典型的な「巣」の状態(Typical condition of porosity)である。製品を貫通した穴が空いており、鑄巣状況にもよるが表面から観察することも可能である。圧力のある液体・気体の漏れを抑えることはできず、含浸を施しておく必要がある。この状態のまま鍍金や塗装をした場合、曇り、膨れ、剥離の原因ともなる。前述した浸透探傷検査でも確認できることからダイカスト業界では広く用いられている。

二つ目は含浸で将来の危険性の予防(Preventing future risks by impregnation)をすることである。圧力テストでは漏れを発見することはできない。しかし、機械加工や腐食によって漏れが起こる可能性がある。また、耐蝕性を持たせる為に鍍金や塗装を行うとすれば、前処理として含浸を施す必要があり、それは同時に将来の危険性を予防することにもなる。この場合、浸透探傷検査でも確認する事が出来る。

三つ目は加工後に含浸を施す場合 (Impregnation after processing) でこのままでは、将来とも表面に影響を及ぼすことは考えられない。しかし、機械加工後、圧洩れや、鍍金被膜の内面腐食の原因となる。この場合は機械加工後に含浸を施すのが最も理想的である。この状態は表面からの検査では確認することは出来ない。非破壊検査の中でもX線CTがもっとも検査に適している。

Inspection of Aluminum Die Casting

Inspection by using the X-ray penetration property



Leak Testing

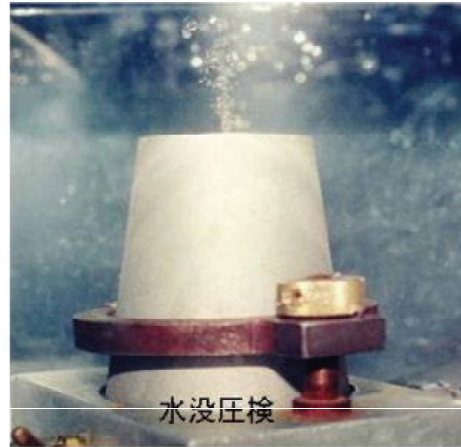


図4-4-2 アルミダイカスト製品の圧力検査

耐久レース用エンジン部品において圧力検査合格品を含浸すると完走率が上がったとの話もある。これは図4-4-1の二、三つ目の状況において含浸が有効であることを証明していると考えられる。これは部品の品質保証に繋がる事例である。こういった状況をX線CT検査により明確に出来るとしたら今後の製品生産性は性能向上に寄与することは間違いない。

4-5 まとめ

ここではアルミダイカストの非破壊検査について述べ、X線CTが現在ではもっとも有効な検査手法であると指摘した。X線CT像の問題点については透過型の限界を説明し、最後にアルミダイカスト鑄巣含浸品の非破壊検査にはX線CTが適しているが圧力検査が用いられている現状を述べた。

参考文献

- [1]Japan Die Casting Association, "What's die casting?", Japan Die Casting Association, Tokyo, 2004, p26.
- [2]Japan Foundry Engineering Society, "Cast Defect of Die Casting and Case Examples of Measures", Japan Foundry Engineering Society, Tokyo, 2000, p. 7, pp. 27-34
- [3]谷村康行, "非破壊検査基礎のきそ" 日刊工業新聞社, 2011
- [4]Toshihiko Abe, Masahiro Kawahara, Katsuya Ikawa, "Ultrasonic Imaging of Internal Defects in Cast Iron", 鋳物, 62巻, 1990, 第8号, pp. 631-636
- [5]Yoshihiro Hangai, Soichiro Kitahara, Osamu Kuwazuru, "Compression Process for Porosity Reduction of Aluminum Alloy Die Casting Using Image-Based Finite Analysis", J. Japan Inst. Metals, Vol71, No. 5 (2007), pp. 458-462.
- [6]N. Nishi, J. Jfs. 76, 2004. pp. 266-271.
- [7]Chuo Hatsumei Institute Co, Ltd., Fine Product 2014, pp. 94

第 5 章 フォトンカウンティング型検出器による X 線 CT

5-1 前書き

一般的な X 線 CT は物質の密度に相当する CT 値を 2 次元マッピングすることで断層像にしているため白黒画像の濃淡で表している。カラー画像も見られるがディスプレイ上の擬似的表現であり、CT 値そのものに新しい値が得られているわけではない。DXCT (Dual Energy X-ray CT) は、物質の線減弱係数のエネルギー依存性を利用したもので、異なる 2 種類のエネルギーをもつ X 線を別々に照射し、それぞれの画像の差 (ピクセルごとの値の差) を利用して画像化する技術である [1]。

本章ではフォトンカウンティング型検出器、エネルギー情報の検出と従来型 CT との違いについて述べ、最後に DXCT を用いた含浸剤の材料識別を説明する。

5-2 フォトンカウンティング型検出器 [2]

半導体を用いた X 線検出は、検出原理の違いによって「間接変換型」と「直接変換型」の 2 通りに分けることができる。間接変換型は入射 X 線をシンチレータと呼ばれる蛍光体が吸収・発光し、この光をフォトダイオードで光電変換し、発生した電荷を読み出す。一方、直接変換型は半導体本体で X 線を吸収し、それに伴い発生する電荷を読み出す方式である。

前者の「間接変換型」の場合、フォトダイオードの優れた光検出機能を利用できるといったメリットを有する反面、光散乱による空間分解能の低下や原理的に X 線光子のエネルギー情報を取得できないといったデメリットもある。後者の「直接変換型」の場合は、原理的に解像度の劣化が少なく、またフォトンカウンティングモードを用いることにより X 線光子のエネルギー情報を取得することができる。

CdTe ($E_g=1.47\text{eV}$) はバンドギャップがシリコン ($E_g=1.1\text{eV}$) に比べ大きいため室温動作が可能である。そのうえ高い実効原子番号 ($Z=48, 52$) を有するため高エネルギー X 線に対して高い吸収効率を持っている。エキシマレーザドーピング法を用いて、p 型半導体である CdTe に In ドーパントを熱拡散させ n 型層を形成し、p 型側に金のオーミック電極を形成する M- π -n 構造のダイオード型 CdTe 放射線検出器を作製することで、高バイアス印加を可能とし、高エネルギー分解能を得ることができる [3] [4] [5]。この CdTe 検出器を 64 個ライン状に配置した、エネルギー弁別型フォトンカウンティング放射線ラインセンサ (以下ラインセンサと呼ぶ) [6] を使用して測定を行った。ラインセンサの模式図を図 5-2 に示す。CdTe 検出器に入射し吸収された X 線光子は、相互作用によりエネルギーに応じた量の電子・正孔対を発生させる。電荷は CdTe 素子に印加された逆バイアスにより電極へ掃引され、前置増幅器によりその電荷信号を電圧パルスに変換し増幅される。一つの X 線光子により一つの電圧パル

スが発生し、この波高値を毎回5つのコンパレータで高さごとに弁別し、カウンタにより計数する。この一連の処理をフォトンカウンティングモードによるエネルギー弁別と呼ぶ。

64個全てのCdTe素子に前置増幅器と5つのコンパレータと5つのカウンタが接続されている。そのため各素子でX線光子を吸収し、後段の回路で素子ごとに光子一つ一つのエネルギー情報を取得することができる。

このラインセンサを用いることにより、白色X線源から放出される連続スペクトルから、任意のエネルギー帯のX線強度を取得することができる。すなわち、市販の白色X線源とラインセンサを用いることで、擬似的に単色X線を照射した場合と類似のデータを取得することができる。

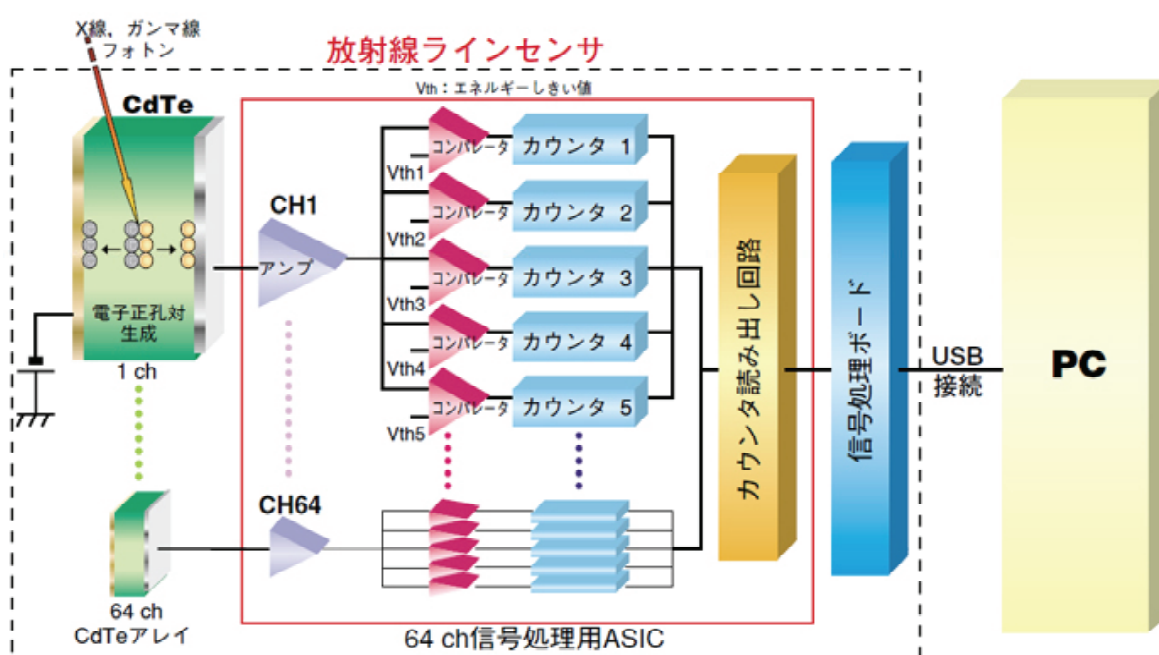


図5-2 ラインセンサ構成[6]

項目	数値・内容
検出素子	直接遷移型半導体 (CdTe)
素子数	64
素子サイズ	0.8 mm×0.5 mm (厚さ5 mm)
素子ピッチ	1 mm
エネルギー測定範囲	20 ~ 1000 keV
エネルギー分解能 ※	FWHM≒10 keV @122 keV : ⁵⁷ Co
検出効率	82 % @150 keV
エネルギーしきい値数	5 (エネルギー測定範囲内で任意設定可能)
最大カウントレート / ch ※	$2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
1ライン蓄積時間	1 ms ~ 4000 ms
カウンタ	15 bit

※測定フォトンエネルギーや測定条件に依存

表5-2 エネルギー弁別型フォトンカウンティング放射線
ラインセンサ仕様[6]

5-3 エネルギー情報の検出[2]

フォトンカウンティングCdTe 放射線ラインセンサと ^{241}Am (59.5 keV), ^{57}Co (122.1 keV)の γ 線源を用いてエネルギー分解能の測定を行った。エネルギー分解能は線スペクトルの半値幅(FWHM)で表され、パルス信号波高に対するエネルギー応答特性によって決まる。そのため、CdTe 検出器と増幅器などの回路系によって決まる。エネルギー分解能はパルス信号測定では、線スペクトルの分別に関わる。隣り合う線スペクトルを分解して測定することが、エネルギー測定では重要となる。測定方法は、コンパレータの閾値を0.01 V ずつ増加させ、閾値以上のパルスを順次カウントし、差分をとることで、最小0.01 V 間隔のヒストグラムを作成できる。ガウス分布近似によりピーク位置を決定する。それぞれの γ 線源のピーク位置電圧は ^{241}Am が1.76 [V], ^{57}Co が1.90 [V]であった。この結果から、閾値電圧V[V]とX線のエネルギーE[keV]には式5-3ような関係がある。

$$E = 447.1V - 725.7$$

式5-3

フォトンカウンティング放射線ラインセンサによる ^{241}Am (59.5keV), ^{57}Co (122.1 keV)のスペクトルと半値幅(FWHM)の結果を図5-3-1と図5-3-2に示す。

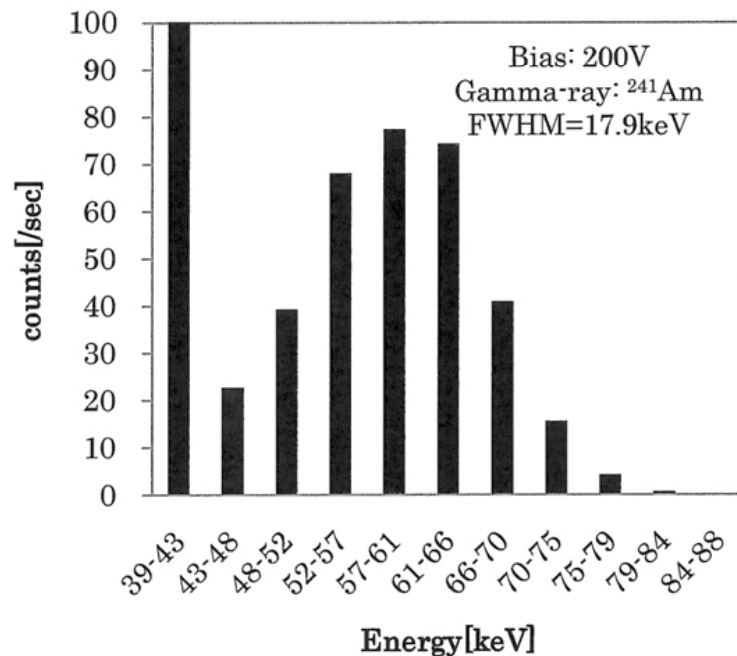


図5-3-1 ^{241}Am 線源のエネルギースペクトル特性[2]

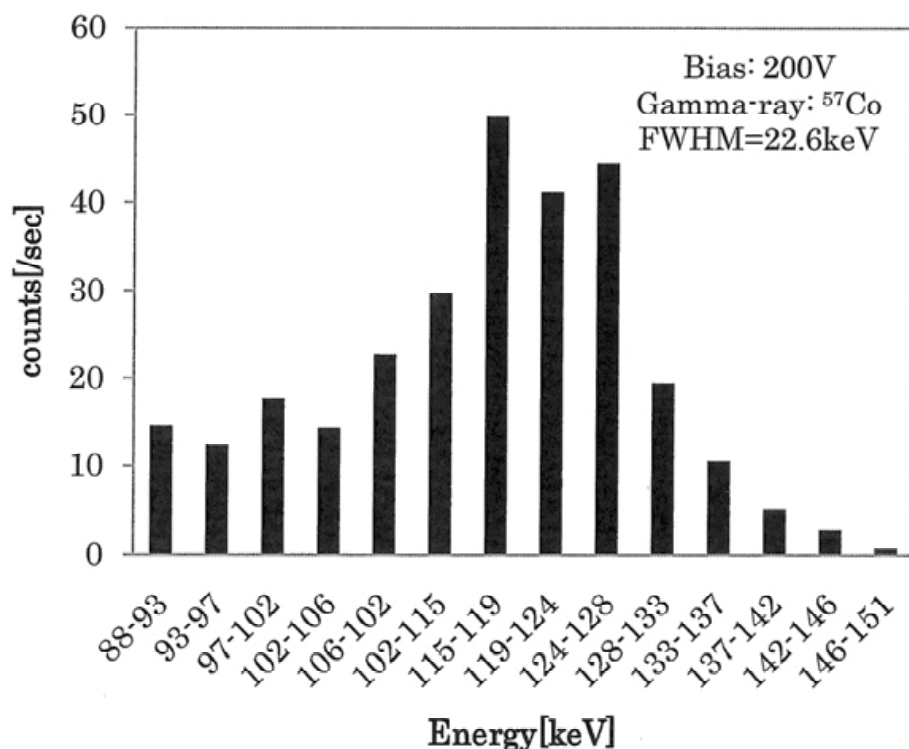


図5-3-2 57Co線源のエネルギースペクトル特性[2]

X線管の管電圧を140 kVとし、管電流を1 μ Aから35 μ Aまで1 μ Aずつ増やして、単位時間当たりのカウント数を測定している。エネルギー閾値は40 keVから120 keV まで20 keV間隔で設定した。40-60 [keV]と100-120 [keV]のエネルギー帯でのX線管の管電流に対する検出器のカウント数を図5-3-3と図5-3-4に示す。

低エネルギー帯40-60 [keV]では電流量が上がるにつれて、傾きが下がる。これはパイルアップ現象が起こったため、カウント数が下がったと考えられる。パイルアップ現象とは、ほぼ同時に2 つ以上のX線が検出器に入射し、2 つのパルス信号が重なり合うことで、1 つのパルス信号ではあるが、パルス信号の波高は2 つのX線エネルギーの重ね合わせとなる。特に、低エネルギー帯40-60 [keV]は、X線管の特徴として強度が強いため、パイルアップする確率が高くなる。そのため、管電流を上げるほどパイルアップが起こり、40-60 [keV]エネルギーのX線がそれよりも高いエネルギーのX線として計測され、管電流に対する強度が落ちる。高エネルギー帯100 keV-120 [keV]では電流量が上がるにつれて、傾きが上がる。これは低エネルギー領域でパイルアップして、高エネルギーX線のカウント数が増えるためと考えられる。特に、X線管電流量を上げると、パイルアップする確率が高くなるため、X線強度があがる。

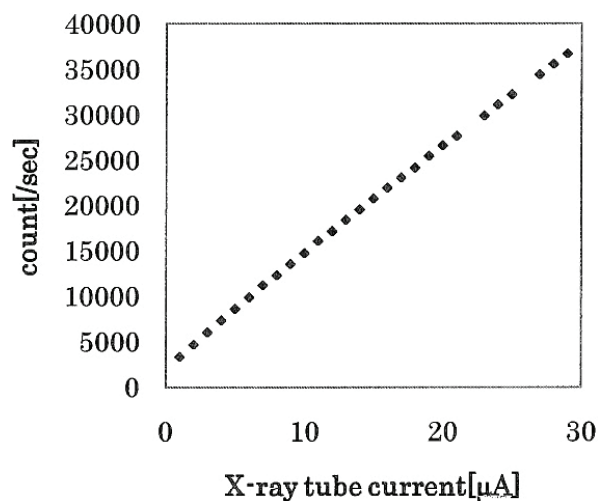


図5-3-3 40-60 [KeV] の管電流にに対するカウント数[2]

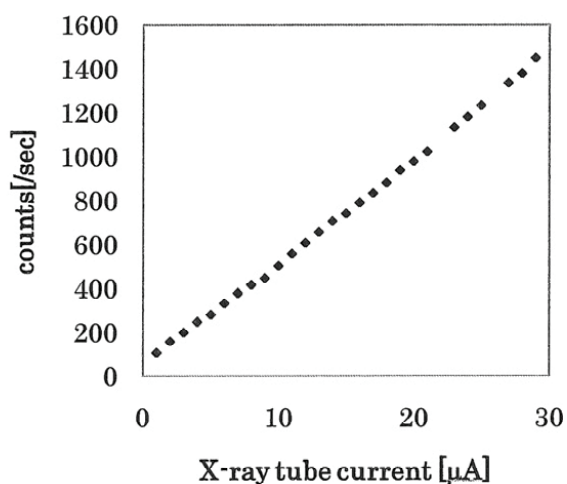


図5-3-4 100-120 [KeV] の管電流にに対するカウント数[2]

表5-3に各エネルギー帯の14 chの10 μA, 20 μA, 30 μAのカウント数を示す。

	10[μ A]	20[μ A]	31[μ A]
40-60[keV]	14755	26594	38795
60-80[keV]	6827	12200	17627
80-100[keV]	1848	3485	5313
100-120[keV]	504	979	1528
More than 40[keV]	23935	43258	63263

表5-3 14chのカウントレート [/sec] [2]

5-4 フォトンカウンティング型検出器によるX線CT：従来型CTとの違い

フォトンカウンティング型検出器を用いたX線CTと従来型CTとの違いは材料識別の可能性有無にある。画像の濃淡による透過画像から材料（物質）の違いを認識するには相当の経験を持ってしても難しい。

通常のCTで用いられるX線エネルギーは連続的に分布し、管電圧が80 kVpと140 kVpでは図5-4に示すようなX線強度分布となる。

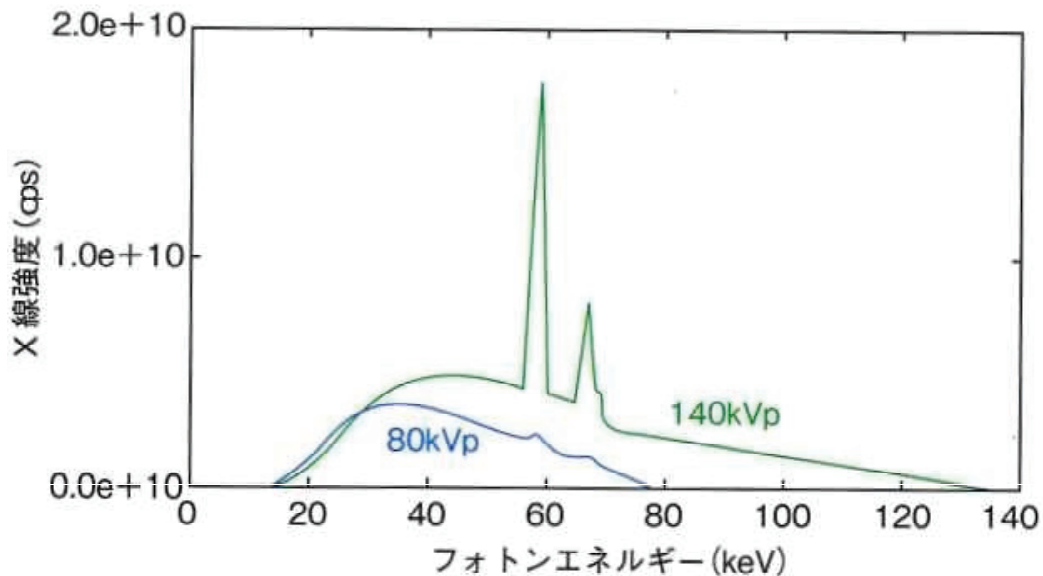


図5-4 X線連続エネルギー分布[7]

管電圧が140KVpの場合、X線エネルギーは約20～140 keVであり、80 kVpの場合は約20～80 keVで連続的に発生している。これによりCTで用いられるX線は混合エネルギーX線と言える。この混合エネルギーを用いてさまざまな物質を撮影すると通常のCTでは、異なるX線実効エネルギーに対する各物質特有の質量減弱が正確に計算できなくなる。CT値の精度不足やアーチファクト発生の問題もある[7][8]。

これらの限界や問題点を解決するのがDXCTである。

5-5 フォトンカウンティング型検出器を使ったDXCT

異なる2つのエネルギーのX線の減弱の違いを利用して電子密度分布(Dual-energy X-ray CT, DXCT)を求め、医療分野で応用する試みは、2003年鳥越らによって有効性が示された[9]。

CT精度向上やアーチファクト解決にはDXCTが有効である。フォトンカウンティングは1つのX線管により1種類の管電圧で撮像されるために1種類の混合エネルギーX線のみが発生する。検出器側ではX線を構成する各フォトンのエネルギーが計測され、エネルギー帯別の画像化が行われる。そのため高いエネルギー分解能や良好なノイズ抑制効果を有している。

フォトンカウンティング方式では投影データに基づいて計算を行うために、ビームハードニング効果の影響を最小限にできるのでデュアルエネルギー画像の精度向上に有用である。得られるエネルギー情報はエネルギー帯別での区分やX線エネルギースペクトラムを細かくすることで増やすことが出来る。このような高い識別能力が高精度の単色X線等価画像や材料識別を可能にしている。フォトンカウンティングは直接変換方式であるためにアナログデジタル変換が不要になる。それは電気ノイズや画質向上にも効果を発揮する。

5-6 DXCTによる含浸剤の材料識別

2色X線CT法の理論によるとCT像から実効原子番号と電子密度を計算出来る[2]。実効原子番号と電子密度のマッピングは次のようにして求められる[10]。異なる2つのエネルギー E_1 , E_2 におけるCTイメージから得られる線減弱係数(linear attenuation coefficient)をそれぞれ $\mu(E_1)$, $\mu(E_2)$ としたとき、実効原子番号 Z は以下の式で与えられる。

$$Z = \frac{\mu(E_2)G(E_1, Z) - \mu(E_1)G(E_2, Z)}{\mu(E_1)F(E_2, Z) - \mu(E_2)F(E_1, Z)} \quad \text{式5-6-1}$$

ここで、 $G(E_n, Z)$ 、 $F(E_n, Z)$ は、それぞれ線減弱係数の散乱光、および光電吸収項である。実効原子番号 Z はiterative algorithmにより得られたあと、式5-6-2で電子密度が決定される。

$$\rho_e = \frac{\mu(E_1)F(E_2, Z) - \mu(E_2)F(E_1, Z)}{F(E_2, Z)G(E_1, Z) - F(E_1, Z)G(E_2, Z)} \quad \text{式5-6-2}$$

含浸剤は通常液体であるがダイカスト内に浸透した後、熱により硬化する。硬化物主成分はメタクリル酸樹脂である。化学式は $C_6H_{10}O_3$ で実効原子番号は6.58になる。表5-6-1は実効原子番号と電子密度の平均値を表している。アルミニウムの実効原子番号は13である。実効原子番号に差がある場合は材料認識を行いやすい状況である。

()内は誤差率[%]

		水	アルミニウム	塩	砂糖	ワインナー
Theory	Z_{eff}	7.4	13	15.2	6.9	-
	ρ [g/cm ³]	0.96	2.68	1.21	0.85	-
CT	Z_{eff}	6.4 (14)	11.0 (16)	11.9 (22)	5.7 (17)	6.2
	ρ_e [/cm ³]	3.5E+23	9.4E+23	5.0E+23	3.0E+23	3.5E+23

表5-6-1 実効原子番号と電子密度の平均値[2]

参考に実効原子番号(Z)と電子密度(ρ)関係を図5-6-1に表す。

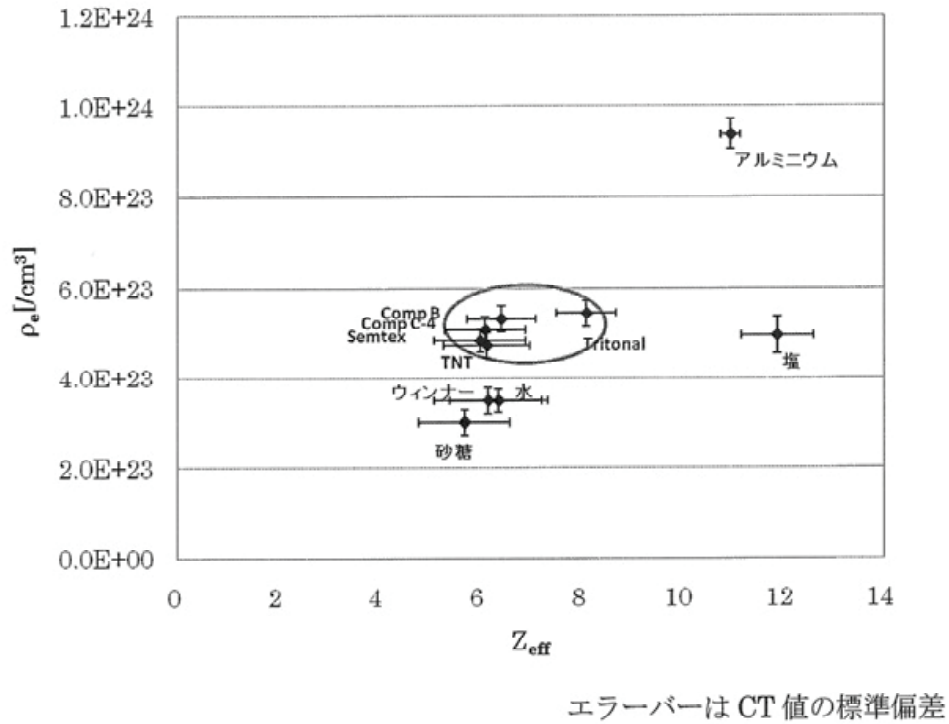


図5-6-1 実効原子番号と電子密度の関係[2]

塩とアルミニウムを例にとると実効原子番号は近い値である。その場合、電子密度を加えることによりより正確な識別が可能となる。

5-7 まとめ

ここでは光子カウンティング型検出器におけるエネルギー情報の検出と従来型CTとの違いについて述べた。さらにDXCTを用いることによりCT精度向上やアーチファクトの低減を可能にし、光子カウンティングを組み合わせることでビームハードニングの影響も最小限に出来ることを述べた。

参考文献

- [1]青木徹, 山川俊貴, 森井久史, 小池昭史, ” フォトンカウンティングCTの原理” , 映像情報メディア学. 44, 2012, p. 168-174
- [2]大西慶明, ” 材料識別型フォトンカンテイングX線CT”, 修士論文, 2008.
- [3]T. Aoki, Y. Hatanaka and D. C. Look, “ZnO diode fabricated by excimer-laser doping” , Appl. Phys. Lett., 76, pp. 3257-3258, 2000
- [4]Y. Hatanaka, M. Niraula, A. Nakamura and T. Aoki, “Excimer laser doping techniques for II-VI semiconductors” , Appl. Surf. Sci. 175-176, pp. 462-467, 2001
- [5]T. Aoki, Y. Shimizu, A. Miyake, A. Nakamura, Y. Nakanishi and Y. Hatanaka, “p-type ZnO layer formation by excimer laser doping” , Phys. Stat. Sol. (b), 229, pp. 911-914, 2002
- [6] 富田康弘, 松井信二郎, 白柳雄二, 青木徹, 畑中義式 : “エネルギー弁別型フォトンカウンティング放射線ラインセンサ” , 検査技術, Vol. 13, No. 1, pp. 19-25 (Jan. 2008)
- [7]上野景子, ” スペクトラルCT基本原理と臨床応用” , 秀潤社, 2013.
- [8]岸本俊二, 田中義人, ” 放射光ユーザーのための検出器ガイド” , 日本放射光学会, 2011
- [9]Masami Torikoshi et al., “Electron density measurement with dual-energy x-ray CT using synchrotron radiation.” , *Physics in medicine and biology*, vol. 48, no. 5, p. 673, 2003.
- [10]W. Zou, T. Nakashima, Y. Onishi, H. Morii, Y. Neo, H. Mimura, T. Aoki, Proc. SPIE 7079 (2008) 70790I.

第 6 章 アルミダイカスト含浸のX線CT

6-1 前書き

ダイカスト業界における鑄巣発生対策として含浸技術がある。製品品質の保証までを考えると鑄巣対策の含浸が適正かどうかの判断が必要であるが現時点では圧力検査のみに頼っているのが現状である。圧力検査では一部の封孔箇所による合格判断となり全ての鑄巣が封孔されたか迄は判断出来ない。そのため、事前の圧力検査による漏れ量の差により鑄巣の大きさを類推し、大漏れは含浸処理から除外する場合が多い。今後、国内では製品品質の更なる向上により海外生産との差別化を計る工夫が必要であり鑄巣確認技術の向上はダイカスト鑄造業界に更に貢献できると確信している。

非破壊検査としては超音波やX-rayが数多く用いられているが鑄巣内の含浸剤確認や定量までの報告は見られない。アルミニウム等、金属のX線CT画像においてはコンプトン散乱およびビームハードニングによる画像の劣化が存在する。それは、得られた画像を計測として使用するには誤差が大きく困難にしている。エネルギー弁別可能なフォトンカウンティング型CdTe検出器によるCT画像は数十keV以下の低エネルギー情報をカットする事が出来る。そのエネルギー情報を用いることでコンプトン散乱とビームハードニングによる画像劣化を抑えることが可能である。そのため、ノイズを除去する事で得られるCTピクセル数と強度(μ)は計測としても使用出来る。

本研究においてはフォトンカウンティングを利用したX-ray CTを用いる事によりアルミニウムダイカスト品内の鑄巣計測をsampleA,Bを用いて行った。そして、sampleCを用いてDual X-ray CT(DXCT)より得られる実効原子番号によりアルミニウム材と含浸剤の材料識別を行った。

6-2. 漏れ量計測の実験

6-2-1 含浸処理

含浸は中央発明研究所製含浸装置BS-200Aを用いて、真空浸漬加圧法（MIL-1-6869）に準じて行った。被含浸物をφ200×h200のバスケットにセットし含浸タンク（圧力容器）内に納める。タンクの蓋を閉めクラッチにより固定した後、65 Paまで真空にし5分保持する。その後液入れ（貯液槽より真空を利用して液を移動）を行い、0.4 MPaまで加圧し5分保持する。大気解放後含浸タンクのクラッチ外し蓋を開けバスケットを取り出す。被含浸物をバスケットより出し不要な含浸剤を拭き取った後乾燥機により95℃まで昇温して1時間硬化させる。被含浸物は全てアルミダイカスト品を使用した。

実験に使用したsampleの仕様を下記と外観を図6-2-1に示す。

sampleA: 20 mm角、厚さ5 mm、中心にφ0.5~5 mm穴加工板2枚を合わせて溶接して
製作。

材質 ADC12(アルミニウムダイカスト品)

sampleB: 含浸処理後漏れが発生したダイカスト製品のカット品。

材質 ADC12(アルミニウムダイカスト品)

sampleC: 10 mm角、厚さ5 mm、中心にφ5, 4, 3, 2, 1, 0.5 mmの貫通穴加工品

材質 ADC12(アルミニウムダイカスト品)

含浸剤: メタクリル酸エステルモノマー（スーパーシールP-601）

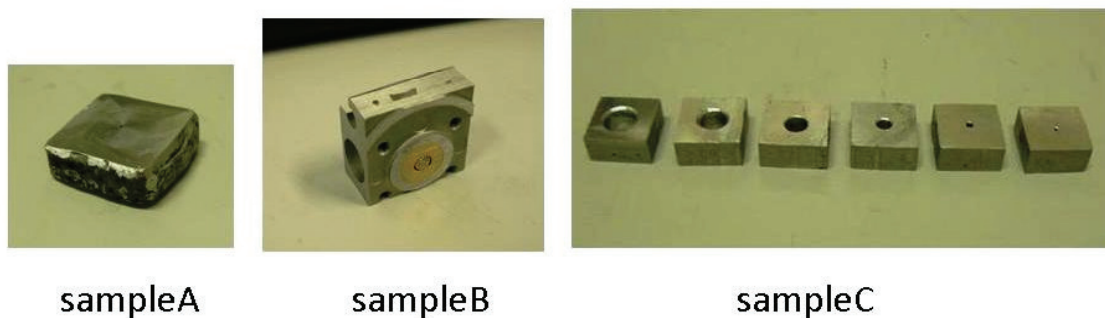


図6-2-1 sample外観

6-2-2 漏れ量計測

sampleA漏れ量は水没圧検機を用いて測定した。対象とする穴を図6-2-2-1のような直線と仮定すると、鑄巢の径は漏れ量からハーゲンポアズイユの計算式6-2-2を用いて求められる。

$$Q = \frac{60 \pi D^4 \Delta P}{128 \mu L} \quad \text{式6-2-2}$$

D : 鑄巢平均径 (cm)

ΔP : 圧力差、検査エア一圧 (Pa)

μ : 空気の粘性係数 (1.81×10^{-5} Pa·s、20°C)

L : 管の長さ \div 鑄巢の長さ \div 肉厚 (cm)

Q : 水没圧検の漏れ量 (ml/min)

Hagen-Poiseuille flow

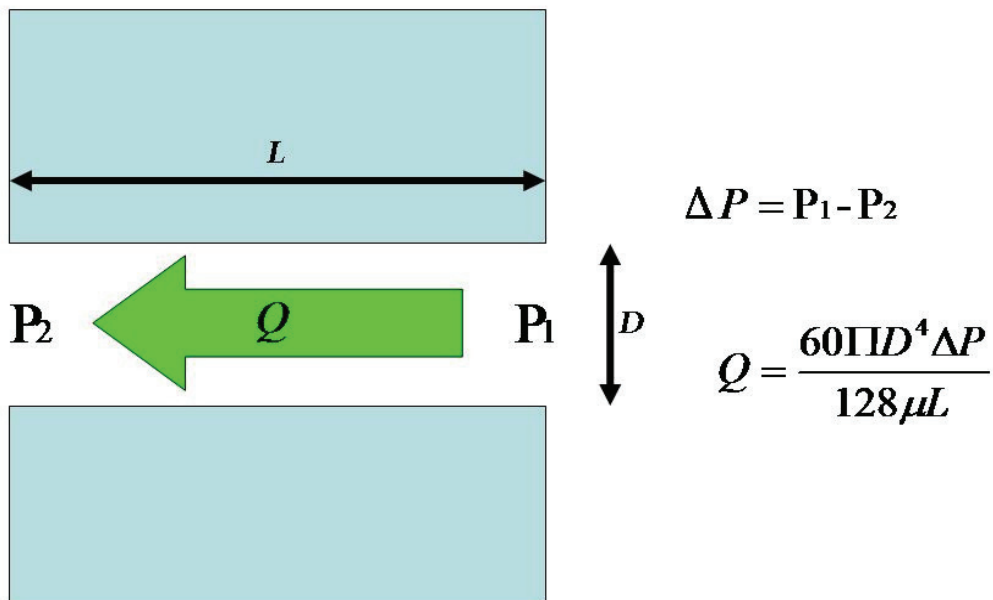


図6-2-2-1 ハーゲンポアズイユ式 of 概念

含浸処理後のsampleBを水没圧検にて漏れ量を測定した。測定状況を図6-2-2-2に示す。漏れ量はメスシリンダー及びメジャーカップを用いて一定時間測定する。今回は、5秒間漏れ量を測定して分単位に換算した値である。

SampleBの漏れ量測定結果 (Q 18,000 ml/min) より検査圧 ΔP を0.1 MPa、肉厚 L を10 mmとすると鑄巣平均径 D は約0.4~0.5 mmと想定される。

Dipping water leak test

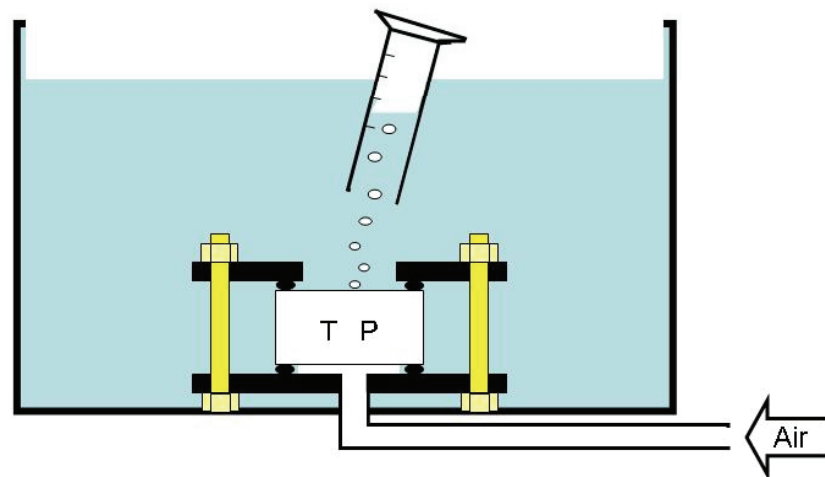


図6-2-2-2 水没圧検 (検査圧0.1 MPa)



図6-2-2-3 圧検治具

6-3 X線CT像

X線撮像にはCdTe検出器を64個ライン状に配置した、エネルギー弁別型フォトンカウンティング放射線ラインセンサを用いた。センサーの間隔は0.1 mmである。

X線管にはマイクロフォーカスX線管を用い、X線の出力は150 keV、管電流50 μ AでCT撮像を行った。回転速度は360度(450ステップ)90秒。sampleはCdTe検出器から300 mm、X線管から500 mmの位置に設置した。実験装置の概要を図6-3-1に示す。

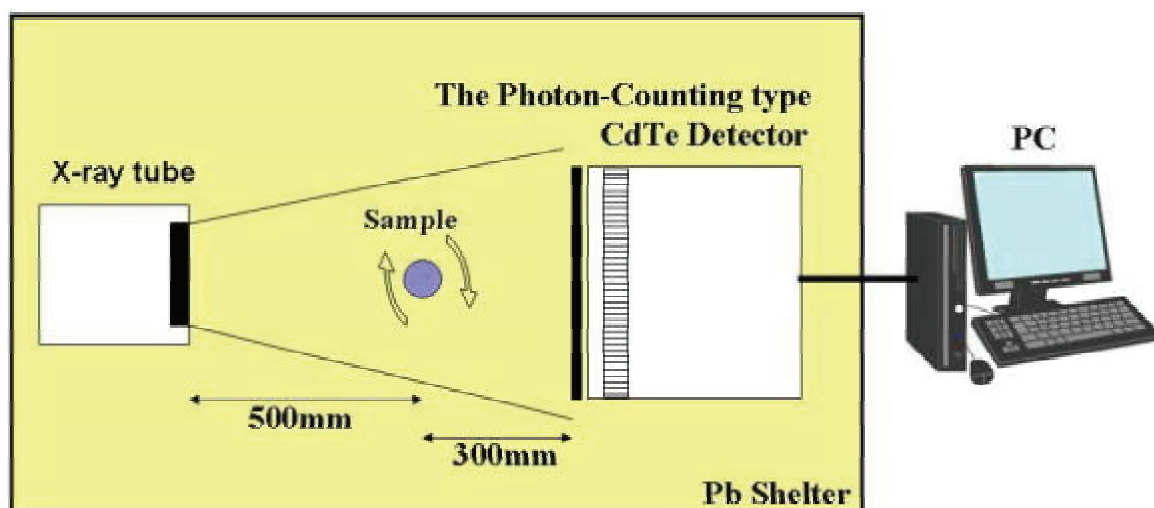


図6-3-1 実験装置の概要

穴加工したアルミ板を二枚溶接したsampleAを製作し表面からは見えない穴の確認をCT測定により行った。図6-3-2はsampleAを上から1 mm、3 mm、5 mmでCT測定を行った。上から5 mmは中心に相当する。50 keVの低エネルギーフォトンのカットすることで内部空壁の確認を行った。

The CT imaging part 1mm, 3mm, 5mm from the top of the sample

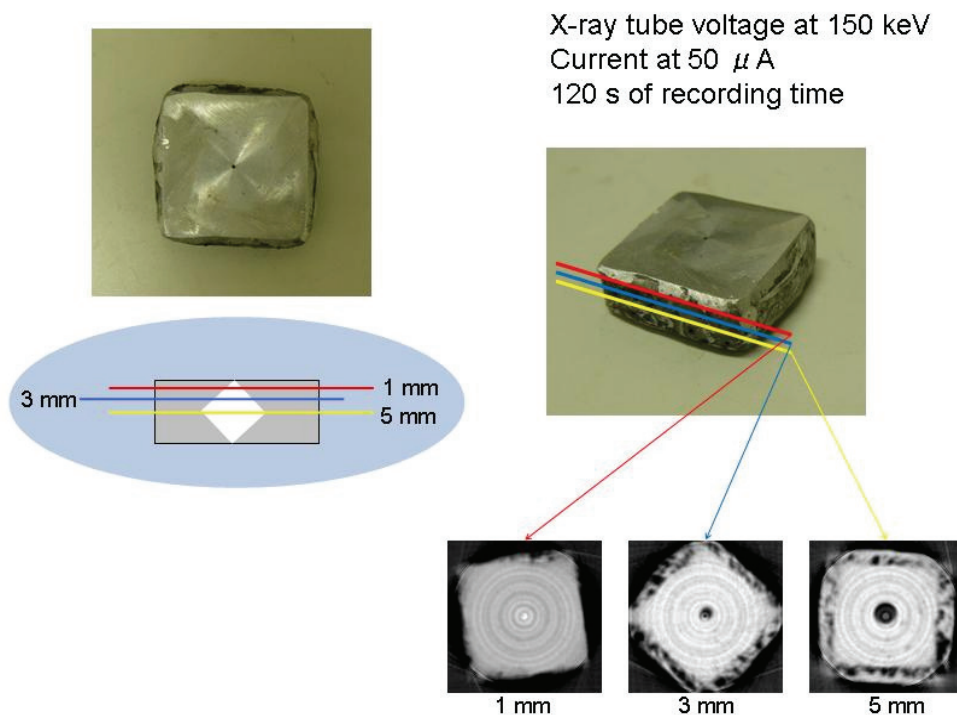


図6-3-2 sampleAのCT像

含浸処理後漏れたsampleBのCT像を図6-3-3に示す。図6-3-4は拡大画像である。拡大画像と合わせて判断すると含浸剤が鑄巢内を埋めているのがわかるが一部に空壁が残っている。特に11~13 mmの空壁は大きいと思われる。

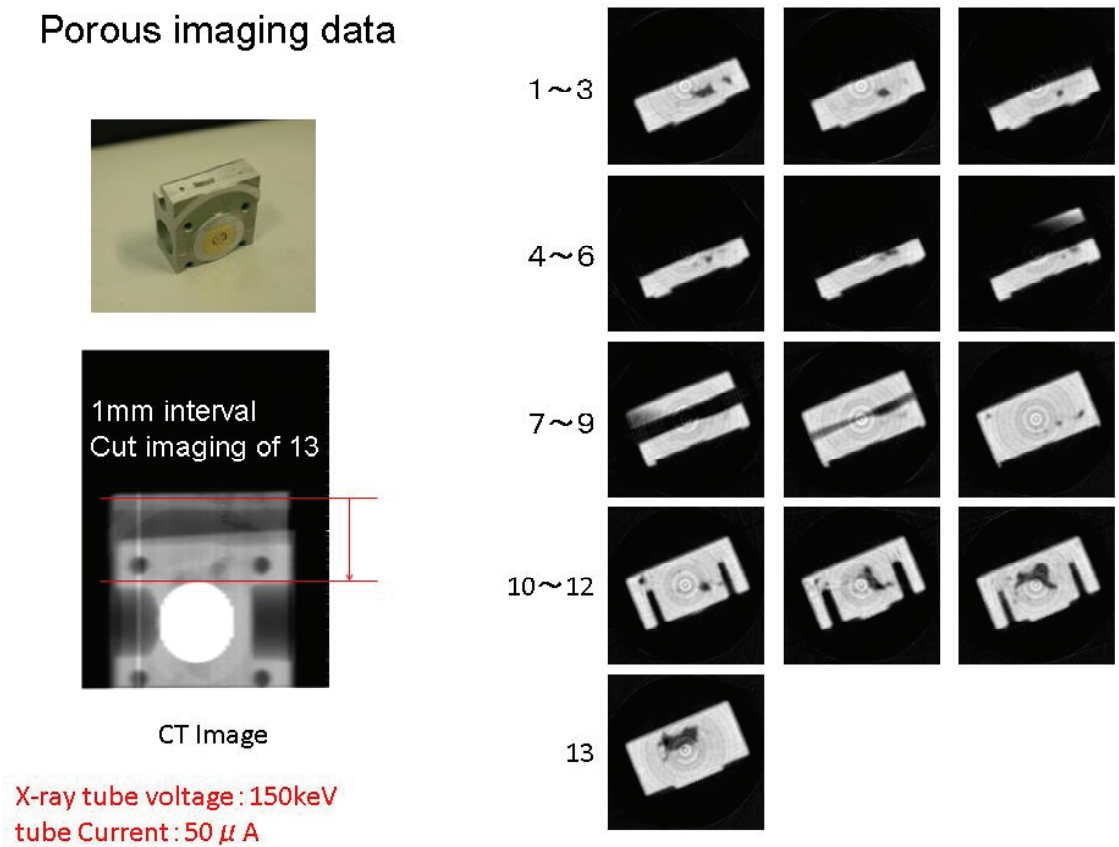


図6-3-3 sampleB CT像

CT imaging data

X-ray tube voltage: 150keV, tube current: 65 μ A

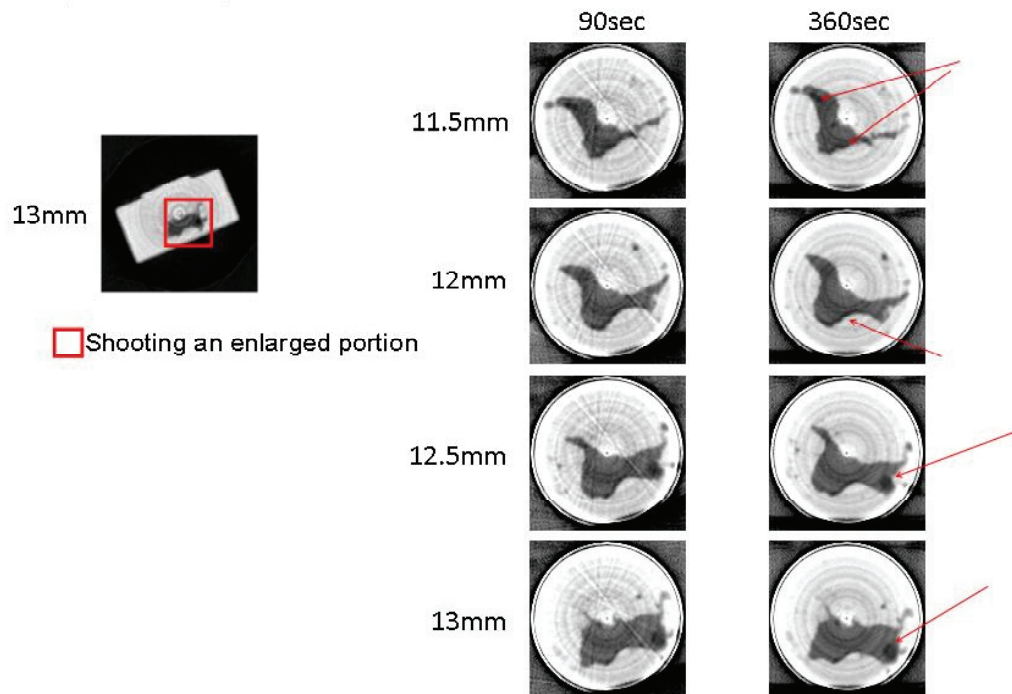


図6-3-4 sampleB 铸巢部拡大画像

CT測定データよりCT ピクセルと μ CTにより空壁を計測する。含浸処理後のSampleBのCT像を図6-3-5(a) (b)に示す。図(b)内の実線で示した位置における画像のCT値のグラフ (μ CTピクセル) を図6-3-7(c)に示す。測定条件を図6-3-6に示す。計測値は9 ピクセルで画像化の拡大比より1.1 mmとなった。

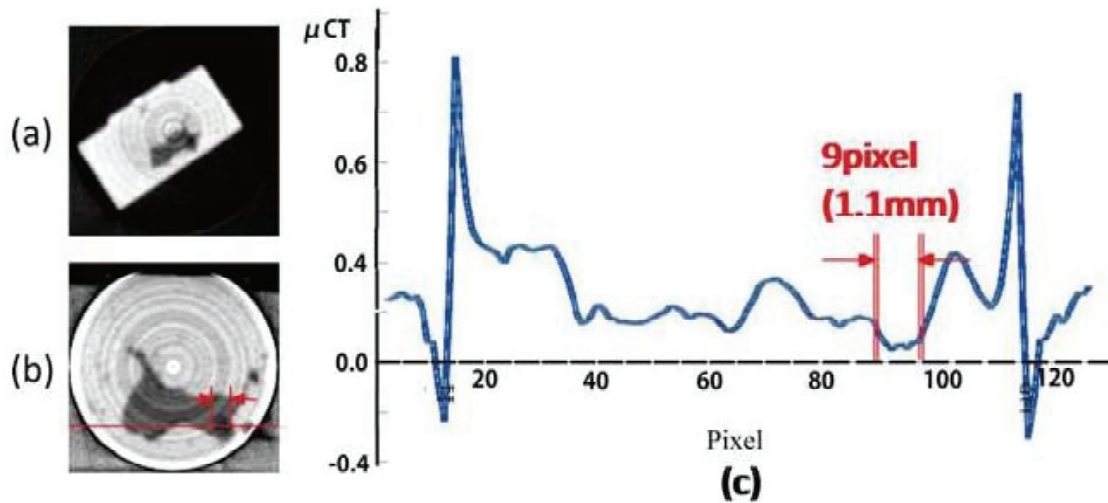


図6-3-5 SampleBのCT画像と μ CT-pixel

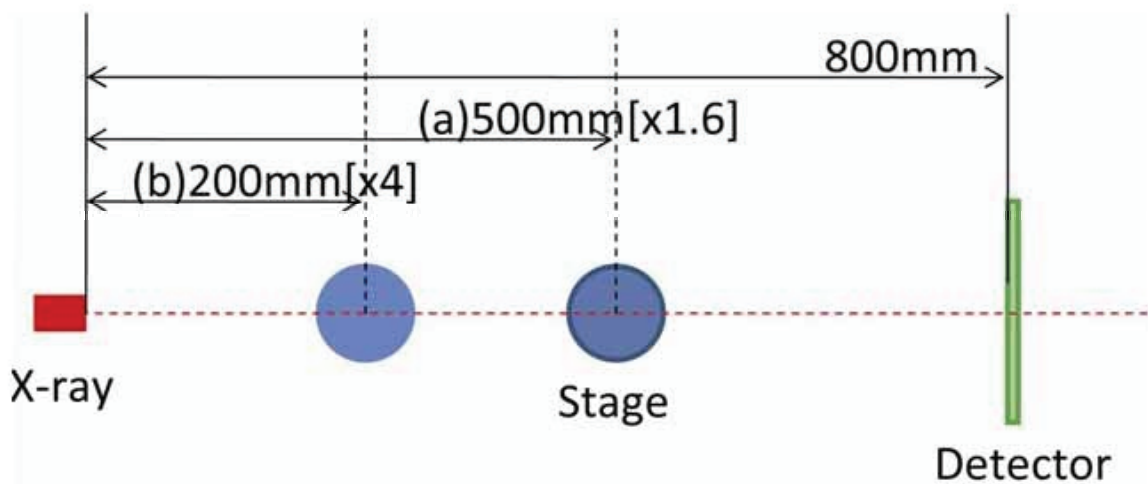


図6-3-6 samle測定条件例

図6-3-7 と図6-3-8はsampleCのCT像である。

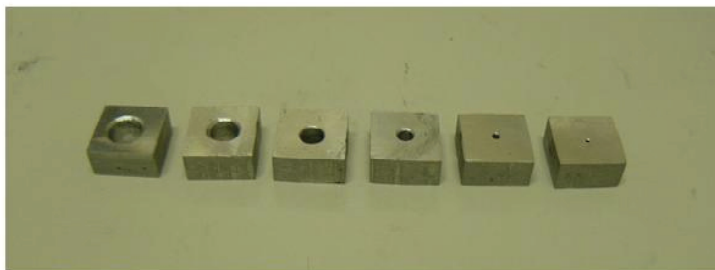


図6-3-7 SampleCのCT画像

50 keV以下の領域をカットすることで貫通穴 ϕ 5, 4, 3, 2, 1, 0.5 mmの径を確認する事が出来た。CT像を図6-3-8に示す。

Aluminum Test Piece

Sample ϕ 5,4,3,2,1,0.5mm



X-ray tube voltage : 150keV
X-ray tube current : 50 μ A
Imaging time : 2min

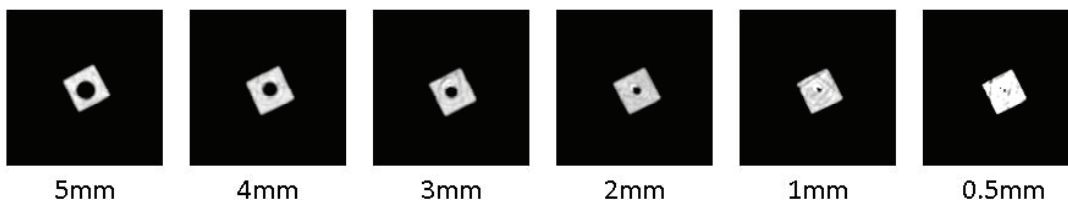


図6-3-8 sampleC CT像

sampleCに含浸処理を行い貫通穴 $\phi 5$ mmを含浸剤（メタクリル酸エステル）で封孔した。図6-3-9に示す。含浸処理済みsampleCをCT測定した。

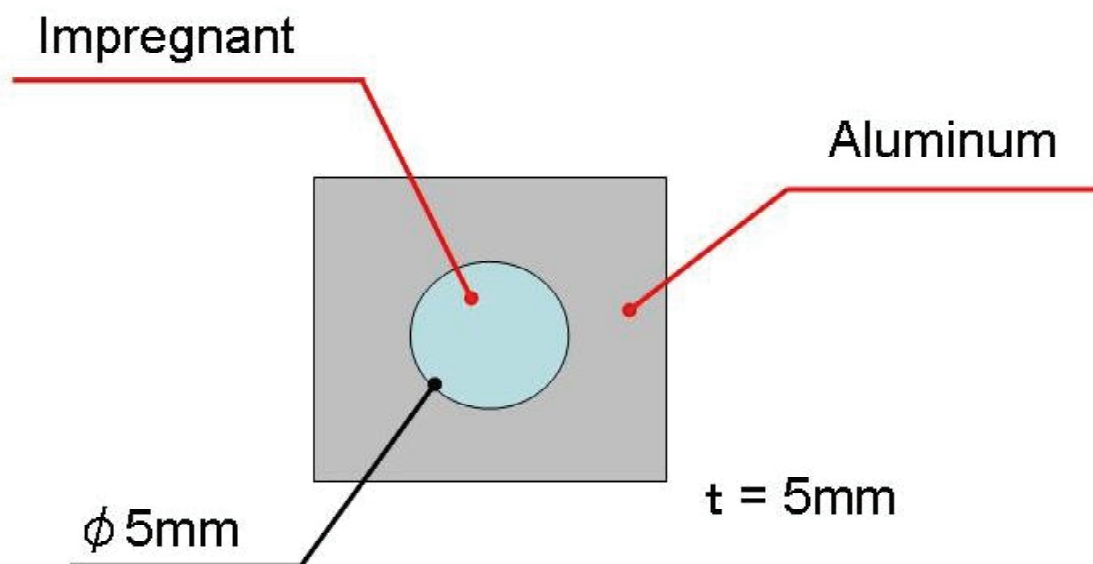


図6-3-9 含浸処理後sampleC

6-4 漏れ量とX線CT像による漏れ量推定値の比較

水没圧力検査の漏れ量より算出できるのは平均口径である。6-2-2で述べた通りハーゲンポアズイユの式を用いて漏れ量（流量）より直管に直した口径を求めている。

ダイカスト製品内の鑄巣は図6-4-1で見られるように内部で曲がりくねり、尚かつ径も大きく変化している。

Examples of cutting Aluminum Block

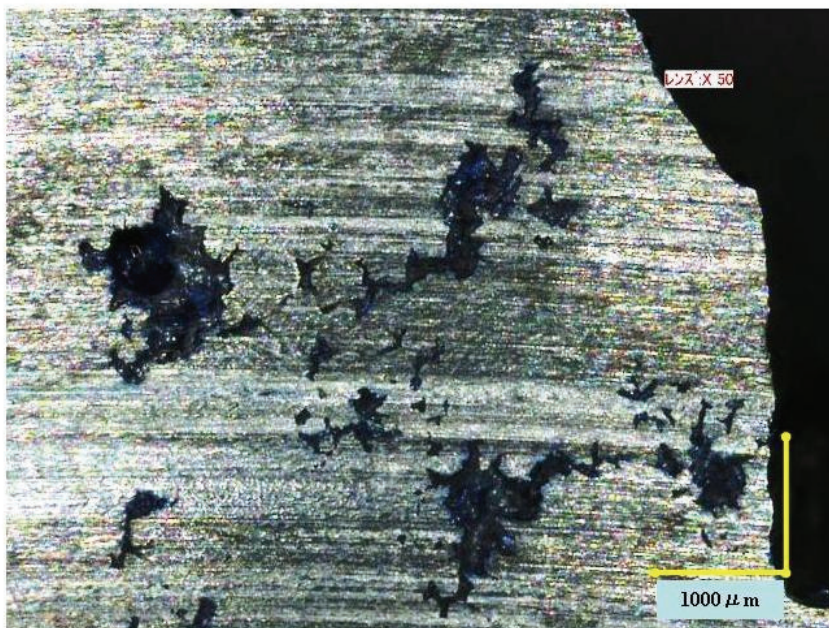


図6-4-1 ダイカスト製品鑄巣切断写真[9]

X線CT像及び μ CTピクセルより計測したSampleBの口径は測定条件による拡大率より1.1 mmとなった。それに対し水没圧検による漏れ量測定より算出した口径は約0.5 mm程度であった。圧漏れが発生したsampleBの鑄巣は繋がっていると想定できると考え、図6-3-6の各鑄巣画像を重ねて鑄巣形状を推察したのが図6-4-2である。この推定鑄巣経路（CT計測値：0.4~1.1 mm）は水没圧力検査より求めた平均口径（0.4~0.5 mm）と近似値になる。

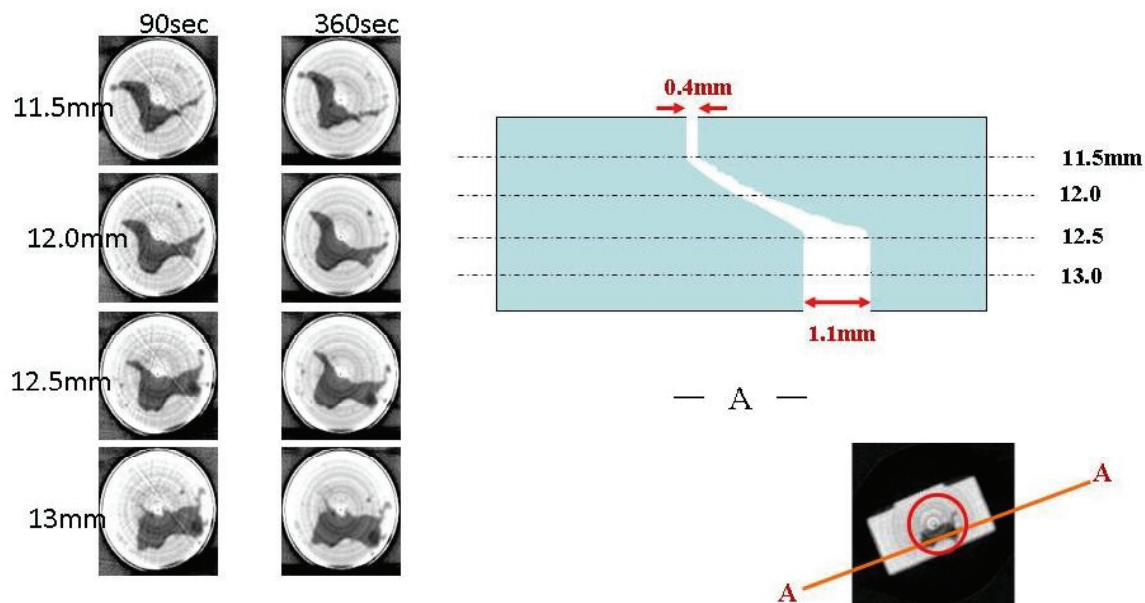


図6-4-2 sampleB 想定鑄巣経路（想定）

フォトンカウンティングを用いたX線CTにより鑄巣の計測も可能であると証明できた。さらなる計測精度向上にはCT像の3D化が必要である。

6-5 X線CT及びDXCTによる材料識別

フォトンカウンティング64chCdTe検出器を用いたDXCTにて含浸処理済みsample 2のCT測定を行った。X線CT測定により求められた実効原子番号は12.2と7.6であった。フォトンカウンティングを利用したX-ray CTより得られる実効原子番号には1.0程度のずれが出る事は報告されており、今回の実効原子番号はアルミニウム13、メタクリル酸樹脂 ($C_6H_{10}O_3$) 6.58である事からほぼ材料の同定ができる結果となった。

図6-5(a)は含浸処理済みsampleCのCT像である。さらに、拡大して撮像した結果を図6-5(b)に示している。図6-5(b)において矢印でしめした箇所は、周囲より一段と黒くなっており、含浸剤やアルミニウムとは異なる材質であることを示している。測定はX線管電圧：150 keV、管電流：10 μ A、使用エネルギー帯：40～50 keV、70～80 keVにて行った。

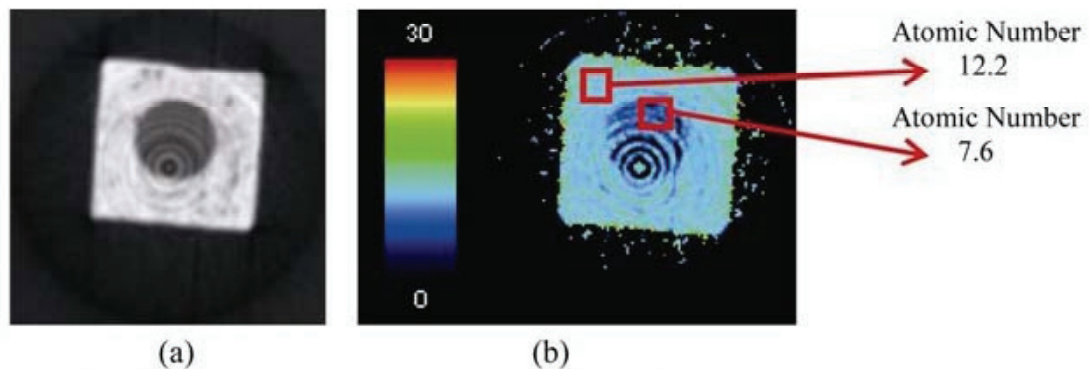


図6-5 SampleCのCT画像

(a) X線CT画像、(b) 原子番号マップ (材料識別)

6-6 まとめ

DXCTによる材料識別によって、含浸剤とアルミニウム材との判別が可能であることを示した。また、50 keV以下の低エネルギーフォトンのカットし、さらにエネルギー情報を利用することにより、コンプトン散乱による画像劣化およびビームハードニングの影響を低減させ、鑄巣内の空壁（空間）を明瞭に捉えることに成功した。

CT計測としては、含浸処理後のSampleA, B1鑄巣内空壁（空間）をX-ray CTにより測定した。測定値は水没圧検結果の算出値に近似した結果であった。材料識別としては、含浸処理後のsampleCをDXCTにより金属（アルミ）、樹脂部（含浸剤）の判別を行った。実効原子番号の差により、アルミニウムとメタクリル酸エステル（含浸剤）の材料識別を可能にした。

通常はアクリル樹脂含浸処理による封孔により漏れが止まる。今回のsample1は漏れが発生し、封孔が不十分であったと判断した物である。金属樹脂含浸には液切りと水洗浄工程も封孔を阻害する要因となっている。封孔不足の原因として鑄巣の形状が考えられたがフォトンカウンティングを利用したX-ray CTにより封孔不足の形状を立証した。今後はCT像を三次元表示し、鑄巣像を立体的に捉えることにより、さらに詳細かつ正確な鑄巣の判定が可能となることが期待できる。

参考文献

- [1]Y. Tomita, Y. Shirayanagi, S. Matsui, T. Aoki and Y. Hatanaka, “X-ray Color Scanner with Multiple Energy Discrimination Capability,” *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5922, No. 3, 2001, pp. 291-293.
- [2]W. Zou, T. Nakashima, Y. Onishi, H. Morii, Y. Neo, H. Mimura and T. Aoki, “Soft-Tissue Material Properties under Large Deformation: Strain Rate Effect,” *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, San Francisco, 1-5 September 2004, pp. 2758-2761.
- [3]W. Zou, T. Nakashima, Y. Onishi, A. koike, B. Shinomiya, H. Morii, Y. Neo, H. mimura and T. Aoki, “Atomic Number and Electron Density Measurement Using a Conventional X-ray Tube and a CdTe Detector,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 9, 2008, pp. 7313
- [4]G. Matsumoto, Y. Imura, H. Morii, A. Miyake and T. Aoki, “Analysis of artifact with X-ray CT using energy band by photon counting CdTe detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 621, (2010) pp. 292.
- [5]R. Brooks and G. Chiro, “Principles of computer assisted tomography (CAT) in radiographic and radioisotopic imaging,” *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 21, 1976, pp.689.
- [8]菅公一, 井村ゆき乃, 青木徹, “X線CTによるダイカスト製品内の含浸剤確認”*アルビオ*vol. 41. No. 6(2011年6月号), p. 23-26 , カロス出版.
- [9]Chuo Hatsumei Institute Co.,Ltd. ”含浸技術報告書”2006.

第 7 章 結論

本研究の第2章においてダイカスト製品と含浸の関係を明らかにした。含浸はダイカスト業界にとって必要不可欠の技術である。そこにはダイカスト製品内の鑄巣による圧漏れや強度不足と言った数々の問題がありそれらを解決する手段として含浸がある。

第3章ではカドミウムテルライド検出器を用いる理由を説明した。半導体の特性からの優れた光電変換特性と高いエネルギー分解能を有する事を上げ、Dual-X線CT (DXCT)は異なる2つのエネルギーのX線減弱の差により電子密度分から材料識別が可能である。

第4章ではアルミダイカスト製品の非破壊検査の中でもX線CTが有効ではあるが現状は材料識別までは至っていないことを明らかにした。

第5章ではフォトンカウンティング型検出器を用いればアルミダイカストと鑄巣内含浸剤の実効原子番号より材料識別が可能となることを明らかにした。

第6章ではアルミダイカストにより鑄造した製品内の鑄巣とそれに対する含浸剤の封孔（充填、浸透）状況をフォトンカウンティング検出器を利用したDXCTにより明らかにした。

- (1)ダイカスト業界にて通常使用されている水没圧検とCT ピクセルの比較をおこなった。漏れ量より推定される鑄巣平均口径は0.5 mm、それに対してCT測定値は1.1 mmであった。この値により推定平均口径とCT測定値は近似値であったと判断できる。それによりCT測定値の3D化及び解析を行う事で漏れ量との相関性を取れる可能性を残した。
- (2)実効原子番号アルミ13、含浸剤6.58に対してDXCT測定値は12.2、7.6であった。この値によりアルミダイカスト鑄巣内の含浸剤を判別できる事を確認した。

今後はより微細な鑄巣形状の確認と測定対象品の大型化が必要になってくる。ダイカスト及び含浸業界においては鑄巣状況と含浸等の処理薬剤の封孔量を非破壊により把握することは長年の課題であり夢であった。鑄巣原因の漏れ、塗装の膨れ、剥がれや強度不足は品質保証上でも重要な問題である。DXCT等の利用により部品の信頼性を確保できるとなれば今後の自動車、電気、機械、軍需産業に寄与できる。今後も部品は多様性と複雑化により進化して行くのは間違いのない事象である。部品進歩はさらなる鑄巣発生を招く。生産性と性能向上の為に必要になってくる技術が被破壊検査の中でもDXCTになることを信じている。その為にはDXCTの処理能力向上や大型部品対応などが必要になってくる。それは自動車業界を中心とした産業界に新たな一歩を開くことになる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導、御鞭撻くださいました静岡大学電子工学研究所教授 青木徹先生に心から感謝申し上げます。

また、本論文の草稿を査読いただき、貴重なご意見・ご指導を賜りました静岡大学電子工学研究所所長 三村秀典先生、同研究所教授、早川泰弘先生 同研究所教授、橋口原先生 同研究所教授に謹んで感謝の意を表します。

元静岡大学電子工学研究所 学術研究員 森井久史氏（現 株式会社ANSeeN）、元電子工学研究所 井村ゆき乃氏にはX線CT撮像など実験に際し多大な支援を頂きました。厚く御礼申し上げます。

同研究所ビジョンインテグレーション分野、三村・青木研究室の皆様には、様々なご協力を賜りました、厚く御礼申し上げます。

最後に、博士課程での研究を支援して頂いた株式会社中央発明研究所 曾我夏人氏 同代表取締役社長、浜松TSC 峰村照男氏、小林孝次氏、鈴木由美氏、永田晋氏、技術部 嶋崎泰功氏、金丸賢一氏、品質管理部 渡辺正行氏、スペイン事務所 嶋田直明氏、ダラス事務所 井深洋平氏、製造部 土橋徳臣氏ならびに同社社員の皆様に感謝の意を表します。