

埃の静電特性及び形状情報の解析と その埃分布量計測への検討

神奈川工科大学 大学院
工学研究科
電気電子工学専攻

大谷 昌生

指導教員 金井 徳兼

2023年7月25日

概要

埃を構成する主な成分は、ここ数年の住宅環境や衣類製造法などによって変化している。密閉性が高まった住宅環境下では、従来までは主流であった、室外から混流する植物の花粉や砂などの割合が減少し、衣類から脱着する繊維質の割合が増加している。空調機器の性能向上や衣類の素材の変化から、生活空間に存在する埃は、ポリエステルなどの化学繊維が中心である。電気的な接点に付着堆積した埃は、機器の故障や火災などの原因となる。埃の構成成分を考えると、その帯電量や静電容量を検出し、IoT 技術の活用により、生活空間内の埃の堆積量の計測につながると考える。

埃は、生活空間内で発生すると微小な繊維がランダムに連結し、大きな埃へと成長すると考える。この成長結果、出来上がる埃の形状は、フラクタルであると著者は考える。自然界に存在する形状の多くは、特徴的な長さを持たず自己相似性を持つフラクタルの概念で取り扱うことができる。雲の形状がフラクタルの代表例である。フラクタルは、その図形が持つ複雑さを次元で表すことができる。この次元は、平面の複雑さ・空間や質量的な複雑さに分けられる。埃は、3 次元的な堆積形状から、質量的なフラクタルであると考え。微細な埃の集合過程を 2 次元平面上でランダムに成長させ、その積層により埃の 3 次元の堆積モデルを検討した。ランダムに成長する 3 次元の埃堆積の様子をシミュレーションし、実際の観測画像と比較した。埃の堆積画像をピクセルカウント法によるフラクタル次元と空間占有率の相関から、埃の堆積形状がフラクタルであることを明らかにした。

住宅やマンション・ビル・工場などにも、電源やセンサーネットワークが組み込まれた高機能な床や壁が登場すると予想され、一部その機能提案がされている。堆積後の埃を検出することで、床や壁内のセンサーネットワークと連動し、室内空間の様々情報を可視化することで、ロボットクリーナーなどの機器の AI 制御に応用できると考える。

本研究では、室内の埃の持つ静電的な特性を実験やシミュレーションを用いて、埃の堆積量とともに帯電量や静電容量が直線的に増加することを確認した。また、埃の成長過程がフラクタルであることを実験的に確認し、フラクタル次元と埃の空間占有率の相関から、画像解析を用いた埃の堆積量の非接触的な検出が可能であることを示した。さらに、ブロック型センサーとネットワークを活用した埃の分布状況を遠隔的に検出するシステムの設計や試作を通して、その有効性も実験的に検討した。

目次

概要	.....	i
第 1 章 序論	.....	1
1.1 本研究の背景	.....	1
1.2 従来の埃検出手法	.....	2
1.3 本研究に関わる課題	.....	3
1.4 本論文の構成	.....	3
第 2 章 生活空間における埃とその静電的特性	.....	6
2.1 はじめに	.....	6
2.2 埃とその構成成分について	.....	7
2.3 堆積した埃の帯電量測定	.....	8
2.4 まとめ	.....	12
第 3 章 埃の堆積形状とフラクタル	.....	14
3.1 はじめに	.....	14
3.2 埃の堆積形状	.....	14
3.3 フラクタルとは	.....	15
3.4 埃の堆積過程について	.....	17
3.5 ランダムウォークとフラクタル	.....	20
3.6 画像処理によるフラクタル次元解析	.....	24
3.7 まとめ	.....	26
第 4 章 位置情報を取得するブロック型回路の試作	.....	28
4.1 はじめに	.....	28
4.2 工学分野におけるブロックシステム	.....	29
4.3 本研究の開発環境	.....	30
4.4 家電ブロックの位置情報取得システムの検討	.....	32
4.5 接続位置を認識するデバイスの基本回路設計	.....	35
4.6 まとめ	.....	38
第 5 章 埃のコンデンサーモデルと埃堆積画像を用いた	.....	40
静電容量のシミュレーション	.....	40
5.1 はじめに	.....	40
5.2 埃の堆積モデルと静電容量	.....	41
5.3 埃堆積画像の静電容量及び空間占有率の解析	.....	48
5.4 まとめ	.....	51

第 6 章	埃のフラクタル的堆積形状の.....	
	3次元堆積モデルとシミュレーション	53
6.1	はじめに	53
6.2	モンテカルロ法を用いたシミュレーション	54
6.3	フラクタル次元解析アプリケーション	54
6.4	埃の堆積モデルの検討.....	56
6.5	2つのモデルの妥当性について	71
6.6	まとめ.....	71
第 7 章	埃の分布量計測への検討.....	74
7.1	はじめに	74
7.2	様々な通信規格との連携.....	75
7.3	短距離通信システムを活用した埃の堆積の分布検出	76
7.4	PLC 技術と静電容量を用いた埃の分布量の検出.....	78
7.5	まとめ.....	82
第 8 章	結論	84
	謝辞	86
	付録 研究で開発した LabVIEW プログラム集	88
	本研究に関する論文集	91

第1章

序論

1.1 本研究の背景

近年の住宅環境は，都心部への人工集中により高層ビル化やセキュリティー向上の観点などから密閉された空間での生活が多くなっている．その上で，空気が入れ替わらず，埃に対する対策は不可欠となっている．近年では，コンピューターを内蔵した家電製品が広く普及している．家電製品などに組み込まれている電子部品や回路基板への埃の付着は，故障の原因となることが多い．例えば，大規模なネットワークサーバー室は，埃が電子機器に付着することで，サーバーダウンが生じることが報告されている[1]．配電盤やコンセントに付着した埃のトラッキング現象[2]による住宅火災も無視できない．埃の人体に及ぼす影響も数多く報告[3]されており，住宅環境における埃の対策は必須といえる．一方で，研究機関や製品工場などでも埃に対する対策を要する環境は多い．半導体製造工場では，集積回路への埃の付着は，品質に直結するとされている[4]．クリーンルームがその代表例ではあるが，食品工場でも製品への埃混入対策は，品質維持や消費者への信頼確保のため必須である．

一般的な生活空間での埃の除去方法としては，空気中に浮遊している埃をエアコンや空間清浄機などで吸引しフィルターを通して除去する方法がある．一方で，床や縁などに堆積した埃は，掃除機で吸引する他，雑巾やモップ等で拭き取る方法が考えられる．空気中に浮遊している埃の検出に関しては，発光ダイオードからの光を埃に放射し，反射した光を検出する方法が一般的な方法である[5]．

エアコンや空間清浄機などは，室内の空気を循環させる．そのため，フィルターに多くの埃が付着するが，その付着量は検出されていない．これらの家電製品は，一定時間稼働した際フィルター掃除を促すようプログラムされていることが多い．フィルターに多くの埃が付着したままの運用は，効率が低下する

と同時に、電力使用量も増加するなどデメリットが多い。このように、様々な場所に蓄積・堆積した埃に対する検出方法についても先行研究がなく十分な検討がされていない。埃の堆積量の検出やその分布を可視化することで、ロボット掃除機の掃除性能の向上につながると考える。以上のように、埃の除去を効率的に行うために埃の構成成分や堆積形状などの特性を観察し、静電気や図形的な埃の特性実験を見出し、解析することから本研究をはじめることにした。

1.2 従来の埃検出手法

従来の埃検出手法の代表例を、図 1.1 に示す。空気中を浮遊する埃にコヒーレント光による光の散乱現象を活用することで浮遊する埃を検出する手法である[6]。近年では、PM2.5をはじめとする極小粒子の検出も可能な埃センサーが開発され、空気貫通穴を通過する埃に赤外線を照射し、その散乱光を測定することにより、埃を検出する。埃を検出すると出力が LOW になり、出力を 30 秒間計測しその間の LOW 時間合計を埃の検出量とする。粒子径 $1\mu\text{m}$ の極小粒子も検出可能となっている。現在では、エアコンや空気清浄機、掃除機などに搭載されており、コンピューターのフィードバック制御に活用されている。このように、空気中に浮遊状態の埃に関して、気流量や空気中の体積に占める割合等で埃の量を検出することができる。

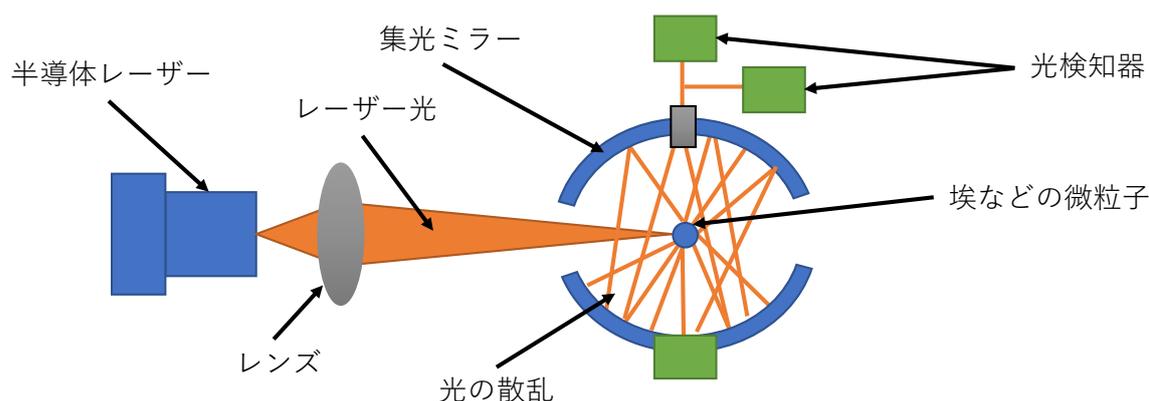


図1.1 コヒーレント光を用いた埃検出の例

1.3 本研究に関わる課題

埃は比重が非常に小さく、埃の堆積量を質量によって検出並びに計量することは困難である。埃を静電的に検出する方法については先行研究の調査からも見つけることができない。また、堆積形状に関わる研究も皆無であった。そこで、埃の堆積量の検出に向けて以下の課題に取り組むことにした。

1. 埃の静電的及び幾何学的特性を実験及びシミュレーションをもとに解析し、埃の成長過程を明らかにする。
2. 埃の静電的特性及びフラクタル的成長過程と IoT 技術を活用し、埃の分布量計測に向けた応用について検討する。

以上の項目について本論文で成果をまとめる。

1.4 本論文の構成

生活空間や製品工場・研究室など様々環境において埃への対策が必要である。一方で、埃の静電的特性や堆積過程及び形状に関しては十分な研究報告がない。埃の構成成分や堆積過程及び形状を考察することは、埃の堆積量の推定につながる。埃の構成成分は、衣類などから抜け落ちたナイロンやポリエステルなどの合成繊維が多いと考える。このことから、静電的な性質があると考える。また、埃の堆積形状が、雲のようなモクモクとした形状をしている。雲は、自然界におけるフラクタルの代表的な形状である。このことから、埃の堆積形状もフラクタル的な性質がある可能性が考えられる。

本論文では、埃堆積の静電的特性とフラクタル的特性を活用した空間占有率の推定方法について第 1 章から第 8 章で論述する。

本研究では、埃の堆積過程の解明を目的に、初歩的な埃堆積モデルを提案し、そのシミュレーションを行った。埃が気流の影響などによりランダムウォークし凝集した結果、フラクタルを形成すると仮定し、埃堆積の成長を考察する。堆積した埃のフラクタル次元と空間占有率の関係から、埃の堆積形状がフラクタルであることを実験的に確認し、提案する埃堆積モデルの有効性を考察する。

本論文では、埃堆積の静電的特性とフラクタル的特性を活用した空間占有率の推定方法について第 1 章から第 8 章で論述する。

第 1 章「序論」では、この研究を着想するに至った背景や詳細な目的につい

て説明する。埃が生活に及ぼす影響をまとめ、埃の堆積に対する現在の対策方法を調査した。既存の対策では、堆積後の埃の検出ができていないことから、静電的な特性や堆積過程及び形状について後章に論述する。

第 2 章「堆積した埃とその静電的特性」では、埃の成分や静電的な特徴についてまとめる。埃の構成成分を調査し、静電的特性について実験的に考察する。埃の構成成分が、主に衣類などから抜け落ちたナイロンやポリエステルなどの合成繊維であることから、埃は帯電していると考えられる。堆積した埃を採集しファラデーケージを用いて帯電量を測定する。さらに、採集する埃の堆積時間の変化と帯電量の増加の関係を実験から求め、埃の静電的特性を考察する。

第 3 章「埃の堆積形状とフラクタル」では、埃の堆積形状とフラクタルについて述べる。埃の堆積形状を顕微鏡によって観察しその形状の特徴を考察する。埃の堆積形状が、フラクタル形状特有の統計的に自己相似的な形状をしていることを明らかにし、フラクタルの基本概念をまとめる。さらに、フラクタルの概念を応用した先行研究の調査に基づき、埃堆積量推定方法の提案へつなげる。

第 4 章「位置情報を取得するブロック型回路の試作」では、埃の堆積量分布測定を目的とした位置情報とセンサー情報を取得するインテリジェントフロアを提案し、その基本システムのブロック型回路を試作し、その機能を考察する。

第 5 章「埃のコンデンサーモデルと静電容量のシミュレーション」では、埃の構成成分に着目し、静電的な特性を活用した埃の堆積量の測定及び可視化を目的として、埃のデジタル的なモデルを作成し、埃モデルとその静電的特性から堆積量を推定できることを報告する。シミュレーション及び実験により、埃の堆積量と静電容量の関係などの埃がもつ静電的な特性について考察する。

第 6 章「埃の 3 次元堆積モデルとシミュレーション」では、埃の堆積形状の観察からその特性を解析し、ランダムに成長する埃の堆積過程をモデル化する。微細な埃の集合過程として、2 次元平面内でランダムに成長し、それが積層化することにより 3 次元的に成長する埃堆積モデルを提案する。ランダムに成長する 3 次元埃堆積過程を LabVIEW によるシミュレーションを行い、3 次元的な埃堆積画像を生成する。シミュレーションで得た 3 次元埃堆積画像と実際の埃堆積画像を比較及び解析する。フラクタル次元と空間占有率の関係から、3 次元埃堆積モデルの有用性を考察すると共に埃の成長過程がフラクタル的な成長であることを示した。

第 7 章「埃の分布量計測への検討」では、静電容量や画像を用いた埃堆積量の検出方法の応用について考察・提案する。最近では、家庭内での無線ネットワークが普及、Bluetooth や ZigBee などの短距離通信システムなどを活用したデバイスが開発され、様々な製品の相互通信が可能となっている。第 6 章での考察から、埃の静電的な特性やフラクタル構造により埃の有無や堆積量を推定

することが可能であることが示されている。それらを活用し、センサーネットワークを活用した埃の堆積量の分布検出や、その可視化方法について検討する。

第 8 章「結論」では、本研究全体の総括として結論を述べるとともに、今後の展望や応用方法の検討並びに実用化に向けた課題について言及する。

参考文献

- [1] 株式会社マツシマメジャテックホームページ : <https://www.matsushima-m-tech.com/> (2023).
- [2] 木下勝博, “有機絶縁物のトラッキング現象と火災”, 日本鑑識科学技術学会誌, 6 (2), pp.65-83 (2002).
- [3] 海法克享, 高橋英俊, 富松大, 小林健, 松本潔, 下山勲, 伊藤寿浩, 前田龍太郎“圧力変動検出スイッチを付加したイベントドリブン型塵埃量センサの開発”, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.325-326, Mar. 2015.
- [4] 久保陽一, 大畑潔, 松村皓司, 鈴木秀明, “日立半導体集積回路の信頼性管理”, 日立評論, VOL.56 No.4 pp.406-409.
- [5] 橋本 知幸, 一般住宅木質フローリング上のダニ相およびダニアレルゲン量の実態調査, 日本衛生動物学会全国大会要旨抄録集, 2008, 60 巻, 第 60 回日本衛生動物学会大会, セッション ID A35, pp.43,(2008).
- [6] 浅野拓哉, 金井徳兼, “ほこり光検出機能を備えた掃除ロボットシステムの検討”, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.249-250, (2010).

第2章

生活空間における埃と

その静電的特性

第2章「堆積した埃とその静電的特性」では、埃の成分や静電的な特徴についてまとめる。埃の構成成分を調査し、静電的特性について実験的に考察する。埃の構成成分が、主に衣類などから抜け落ちたナイロンやポリエステルなどの合成繊維であることから、埃は帯電していると考えられる。堆積した埃を採集しファラデーケージを用いて帯電量を測定する。さらに、採集する埃の堆積時間の変化と帯電量の増加の関係を実験から求め、埃の静電的特性を考察する。なお、本章の内容については電気設備学会論文誌[1]に投稿、報告している。

2.1 はじめに

空気中を浮遊する花粉や微細な埃は、生活者の健康への影響[2]が心配される。パーティクルカウンターなどを用いた埃などの粒子数の計数は、空気清浄機などの運転制御に活かされている[3]。一方、床面や壁に堆積あるいは付着する埃の分布の具体的な計測方法に関する提案は、研究論文や特許からは見つけることができない。

電気的な接点に付着、堆積した埃は、機器の故障や火災などの原因となるなどその影響は多いと考える[4]。従来の光学式埃センサーでは、堆積後の埃の検出はできず、また、その位置情報も検出できない。近年ではパソコンやネットワーク需要が拡大しており、大規模なサーバー室を設ける企業も少なくない。埃の付着は、コンピューターの動作不具合の原因にもなり得る。床面等に堆積する埃のほとんどが繊維質であり、衣類や布製品から抜け落ちたものである。浮遊中の埃は、気流や電界の影響を受けながら、ランダムウォーク[5]しながら浮遊し、埃間の静電気力が原因で壁や床面に付着すると考える。また、これらの繊維は、微弱に帯電していると推測され、その帯電性や誘電性のため静電的な特性を示すと考える。

本章では、生活空間に堆積する埃の性質や発生原因、及び成分について分析し、その静電的な特性を実験的に考察する。

2.2 埃とその構成成分について

埃は、洋服などの繊維から出る糸屑（綿からでる綿埃（わたぼこり））、毛髪、ダニ、ダニの糞、カビの胞子、フケなどが空気中に浮遊し床などに溜まった集合体を一般的には指している。目に見える状態の埃を構成する個々の物体は、様々な色を呈している。しかし、埃とその観察者の間に距離があることがで、それらが混色し、埃は人間の目では灰色に見える。

ダスキン社の調査による住宅内の埃の構成成分を図 2.1 に示す[6]。図 2.1 に示すように繊維成分の割合は半数以上であり、年々増加傾向にある。このことは、時代ともに住宅環境や生活スタイルが変化していることが原因と考える。マンションなどの集合住宅では、セキュリティの観点から、窓を開けず閉め切った生活が長くなっている。そのため、室外から混入していた、砂埃や花粉などの割合が減少、相対的に衣服などから抜け落ちた合成繊維の割合が増加していると考えられる。

埃の対策は、住宅空間だけでなく、工場などでも重要視されている。特に、半導体製造においては、埃などの不純物の混入は、製品の品質低下に直結する[7]。また、大規模なネットワークサーバー室を設ける企業も少なくない。ネットワークサーバーに用いられるコンピューターは、24時間365日稼働していることが多く、埃の対策が必要とされている[8]。さらに、大電力を設ける工場では、配電盤のトラッキングによる工場火災の報告がある[9]。

衣類の繊維成分は、ナイロンやポリエステルなどの化学繊維が中心になっていることが報告されている[10]。これらの繊維成分は誘電体と考えることができ、静電誘導を起こすと考える。

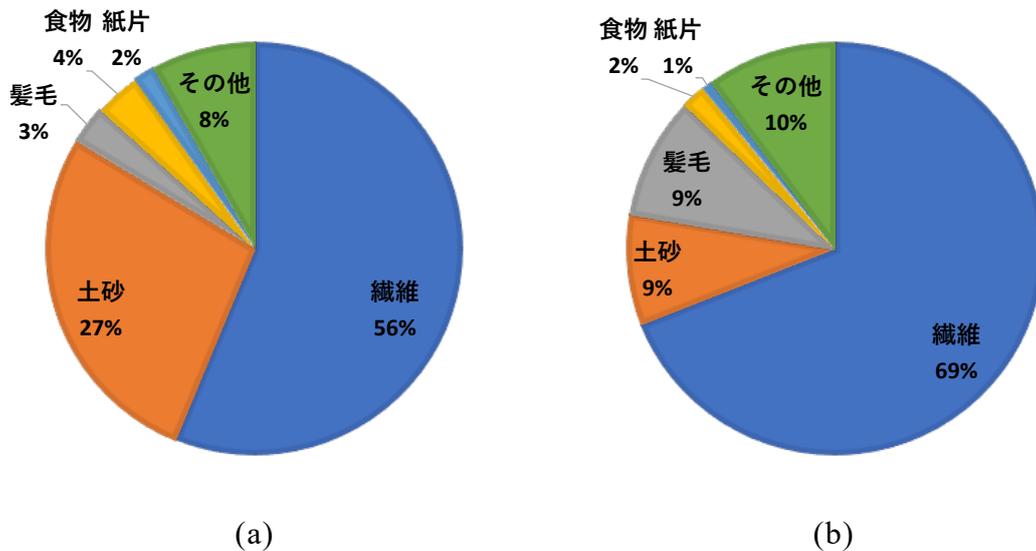


図2.1 住宅環境における埃の構成成分の変化.

(a)2008年, (b)2020年の調査結果.

2.3 堆積した埃の帯電量測定

本項では、堆積した埃の帯電量の測定を目的に、ファラデーケージの原理を述べ、ファラデーケージを活用した埃帯電量の測定実験の方法と実験結果とその考察について述べる。

2.3.1 ファラデーケージとは

ファラデーケージとは、導体に囲まれた空間、またはそのような空間を作り出すために用いられる導体制の籠や器そのものを示す[11]。導体に囲まれた内部には電気力線が侵入できないため外部からの電界が遮られ、内部の電位は全て等しくなる。また、内部に電荷を持ち込むと電荷はファラデーケージの表面に分布しようとするため、ファラデーケージの側に負電荷が移動する。英国の物理学者マイケル・ファラデーが発見した実験環境であり、ファラデーの籠やファラデーシールドとも呼ばれる。電界や帯電量などを計測する為に計測器と組み合わせて使用されるほか、図 2.2 に示すように、電磁波シールドの基本構造でもある。航空機や自動車などの金属製の乗り物に落雷があっても乗客が影響を受けないで済むのは、これらがファラデーケージとして働いて外部の電界を遮っているためと考える。

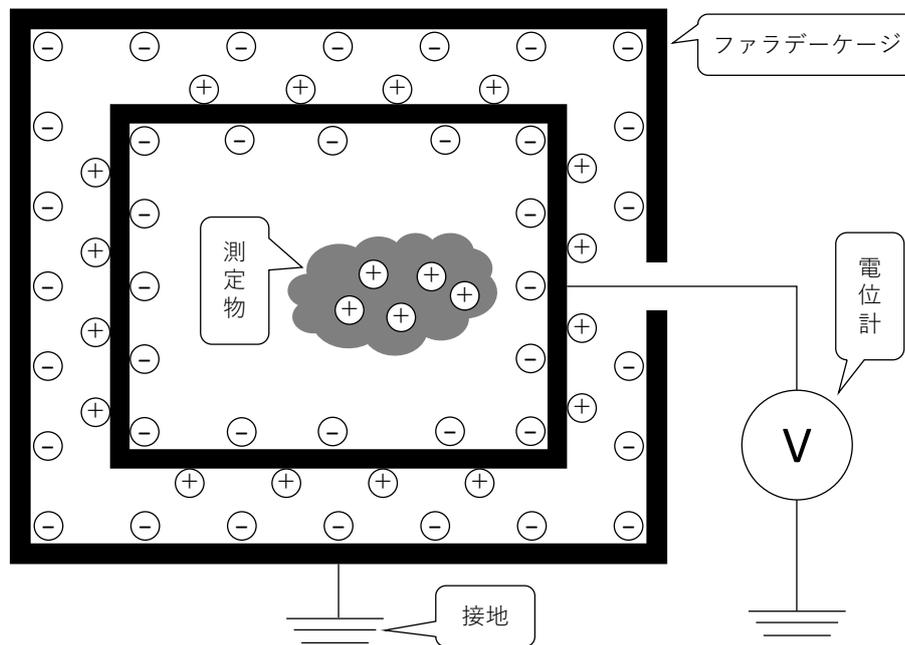


図2.2 ファラデーケージの原理

2.3.2 ファラデーケージを用いた埃帯電測定実験

図 2.3 は、ファラデーケージを用いた埃の帯電量の測定実験方法である。測定器は、タケダ理研株式会社製の振動容量型エレクトロメータ (TR-8401) 及びファラデーケージ (TR-8031) を用いて埃の帯電量を測定した。埃の堆積測定サンプルは、一般的な住宅環境の床面にスライドを設置して採取した。本実験は、以上の手順で埃の堆積サンプルを採取し埃の帯電量を測定した。

- ① はじめに 1 枚のスライドガラスを設置する。
- ② 1 週間後、1 枚のスライドガラスを追加して設置する。
- ③ さらに 1 週間後、1 枚のスライドガラスを追加して設置する。
- ④ 1 週間後、合計 3 枚のスライドガラスを測定サンプルとして回収する。
- ⑤ 測定サンプルを、ファラデーケージ内に入れ、帯電量を測定した。
- ⑥ ①～⑤を 5 回繰り返す

以上のようにして採取した測定サンプルを図 2.4 に示す。測定時スライドガラスをファラデーケージに入れる際は、実験者は、ゴム手袋を着用、木製ピンセットを用いて人体からの帯電を除去して取り組んだ。

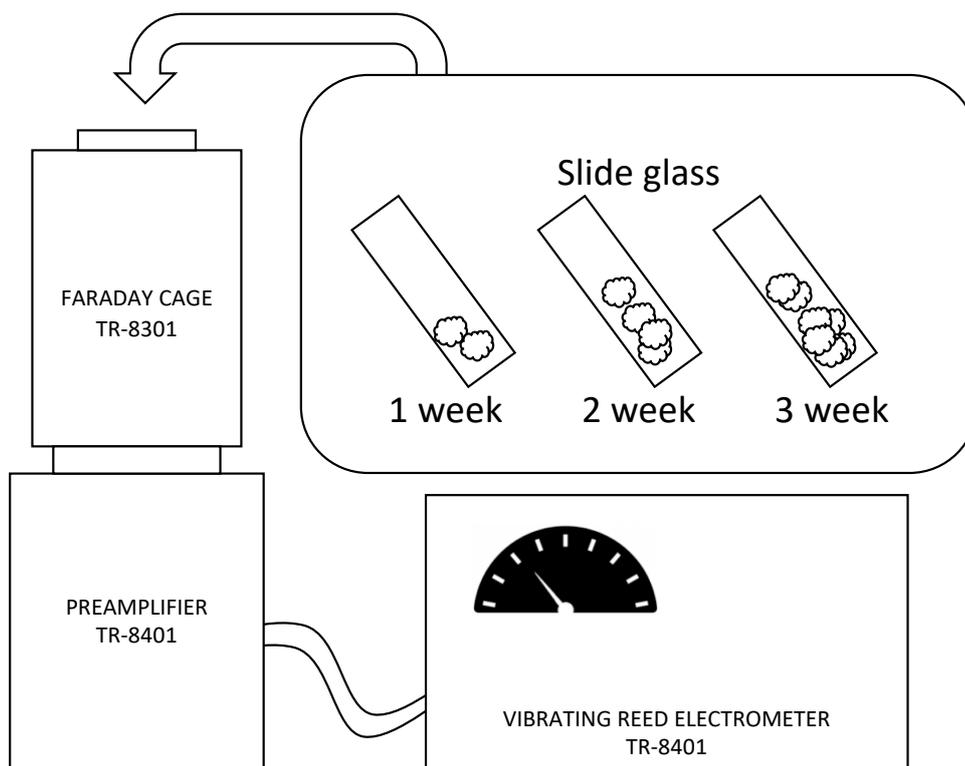


図2.3 ファラデーケージによる埃の帯電量の測定実験

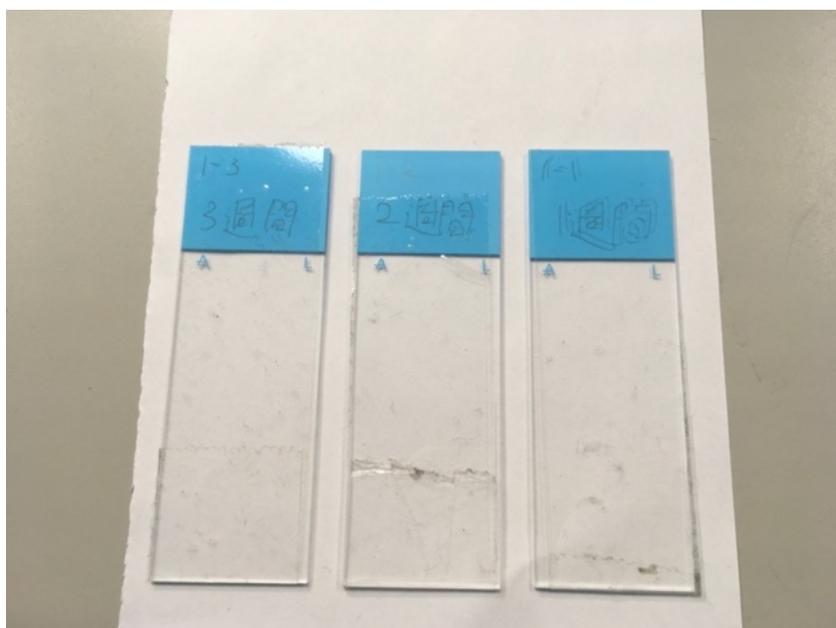


図2.4 スライドガラスに埃を散布させた様子

図 2.5 は、1 週毎 3 週間の測定サンプルの帯電量を示す。測定結果は、5 回の測定サンプルの平均値とばらつきを示す。帯電量が pC レベルと小さいことから、3 週間後の帯電量の平均値 0.52[pC]を 1 とする任意のスケールを用いて変化を表示した。この 5 回の測定日の平均気温は、 23 ± 3 [°C]、平均相対湿度は、 40 ± 17 [%]であった。この実験データは、ナイロンやポリエステルによる埃の帯電量の合計値が示され、正方向に帯電量が表れていることから、ポリエステル系の繊維による埃が多く浮遊しスライドガラスに堆積したと考える。帯電量の測定誤差が 20%程度と比較的大きいが、埃は pC オーダーで帯電し、堆積時間の経過に対し、帯電量も増加する傾向が確認できた。帯電量の誤差が大きいことは、埃の帯電量がそのまま維持されることはほとんどなく、放電により電気的な中性に向け減少するためと考える。また、室温や湿度も大きく影響すると考察する。特に四季の変化を有する国内ではその影響は大きいと考える。過去の研究[12]においても、繊維の静電特性と湿度に関する考察が報告されている。

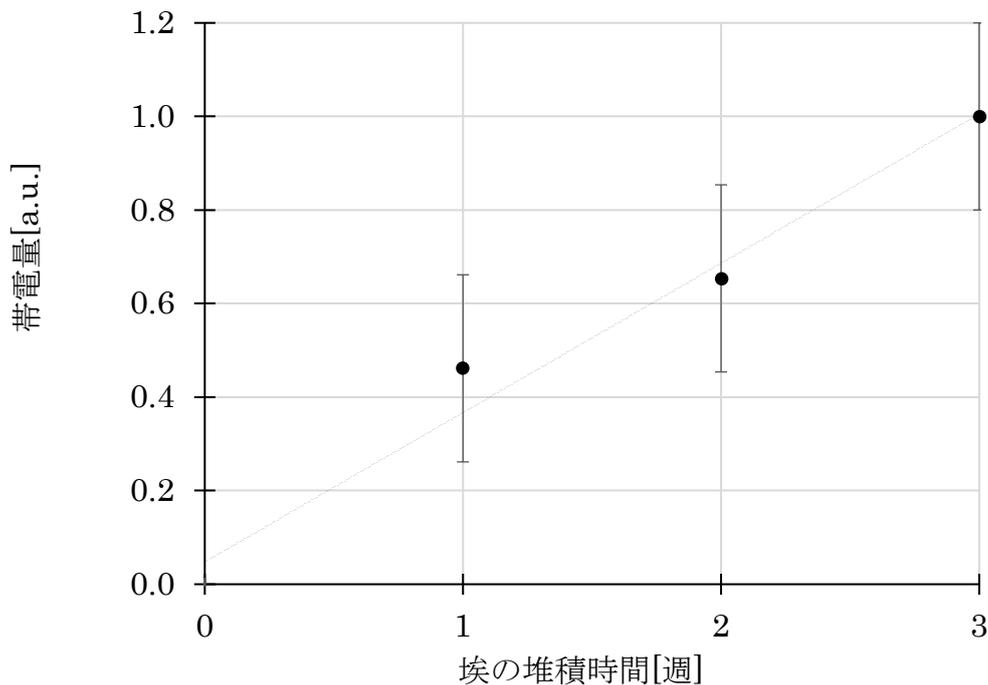


図2.5 埃の堆積時間[週]と帯電量の関係

2.4 まとめ

本章では、埃の構成成分を様々な研究機関の調査から確認した。埃の構成成分は、主に衣類などから抜け落ちた繊維で、その材質もナイロンやポリエステルなどの人工繊維が主であることがわかった。

静電気的な特性について、構成成分を調査し、ファラデーケージを活用し埃の帯電量を測定した。埃は、その堆積量(時間)に比例し帯電量が増加することを実験的に確認した。

参考文献

- [1] 大谷昌生, 金井徳兼, “埃の静電特性を用いた床面分布量の検出について”, 電気設備学会誌, Vol.1, No.1, pp.1-8, (2023).
- [2] 橋本知幸, 一般住宅木質フローリング上のダニ相およびダニアレルゲン量の実態調査, 日本衛生動物学会全国大会要旨抄録集, 2008, 60 巻, 第 60 回日本衛生動物学会大会, セッション ID A35, pp.43,(2008).
- [3] 堤富士雄, 田中伸幸, 岩松俊哉, “住宅内での簡易な空气中微粒子計測 IoT の可能性と課題”, CRIEPI 電力中央研究所, 研究資料 P1-21, (2021).
- [4] 山崎健三, “集積回路製造における塵埃対策の実施例”, 日本科学技術連盟 第 25 回品質管理大会報文集, 品質管理 26(11 臨増), pp.1426-1429, (1975).
- [5] 秋元琢磨, “ランダムウォークはじめの一步 自然現象の解析を見すえて, 共立出版”, (2018).
- [6] ダスキン公式ページ:<https://www.duskin.jp/> (2021.5).
- [7] 久保陽一, 大畑潔, 松村皓司, 鈴木秀明, “日立半導体集積回路の信頼性管理”, 日立評論, VOL.56 No.4. pp.406-409.
- [8] 吉田真澄, 岡田正, “安全なネットワークサーバ構築のための階層化した要件”, 津山工業高等専門学校紀要 Vol.5, No.1, pp.47-51, (2009).
- [9] 木下勝博, “有機絶縁物のトラッキング現象と火災”, 日本鑑識科学技術学会誌, Vol.6, No.2, pp.56-83, (2002).
- [10] 平塚豊“塵填の同定とその化学成分の分析”日立評論, Vol.52, No.8, pp.708-713, (1970).
- [11] 夏目賢一, “ファラデーの電磁気学研究における力・力能・粒子”, 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 相関基礎学科系 博士学位論文.
- [12] 松岡芳朗, “繊維および繊維製品の静電気に関する二,三の要因とその測定”, 日本繊維製品消費科学会, Vol.21 No.2 pp.67-76,(1980).

第3章

埃の堆積形状とフラクタル

第3章「埃の堆積形状とフラクタル」では、埃の堆積形状とフラクタルについて述べる。埃の堆積形状を顕微鏡によって観察した。埃の堆積形状が、フラクタル形状特有の統計的に自己相似的な形状をしていると仮定し、埃の持つ形状・構造を解析する。フラクタルの概念を応用した先行研究に基づき、フラクタル次元を用いた埃堆積量推定方法の提案へつなげる。埃の堆積形状とフラクタルの関係については、日本シミュレーション学会論文誌[1]に投稿・報告している。

3.1 はじめに

埃を構成する主成分が繊維成分であることを前章で述べた [2]。一方、その堆積形状やその生成過程については十分な研究報告がされていない。空間を浮遊する埃はその比重から、気流の影響を受け、ゆらゆらと浮遊しながら落下すると考える。その運動は、ブラウン運動[3]やランダムウォーク[4]において記述させる、不規則な運動に類似していると考ええる。さらに、埃の堆積形状は、総計的に自己相似なフラクタル形状にも類似していると考ええる。

本章では、埃の堆積状態を顕微鏡で観察する。その形状の特色や成長の過程について、ブラウン運動やランダムウォークに従う落下運動や、拡散律速凝集 (diffusion-limited aggregation, DLA) や、クラスタ・クラスタ凝集 (cluster-cluster aggregation, CCA) などの凝集・凝縮メカニズムと比較・考察する。

3.2 埃の堆積形状

図 3.1 は、堆積した埃を拡大した写真である。微細な繊維同士が複雑に絡み合い、雲状のかたまりとなっていることがわかる。微細な繊維同士が帯電し、静電的に引き付け合い絡まっていると考える。微細な繊維の径は約 0.02[μm]程度、長さは 0.5~2.0[μm]であった。

埃の堆積形状の観察の際，顕微鏡の倍率を拡大していくと，細かな繊維が絡み合う様子が，自己相似的な形状をしていると考える．自己相似な図形は，フラクタル的な性質があることを意味している．さらに，埃の堆積画像には，繊維間に十分な隙間があり，透過性があることがわかる．このことから，グリーンバックのような一様な背景に埃を堆積させた画像の濃淡を活用することで，堆積量の検出及び推定につながると考える．

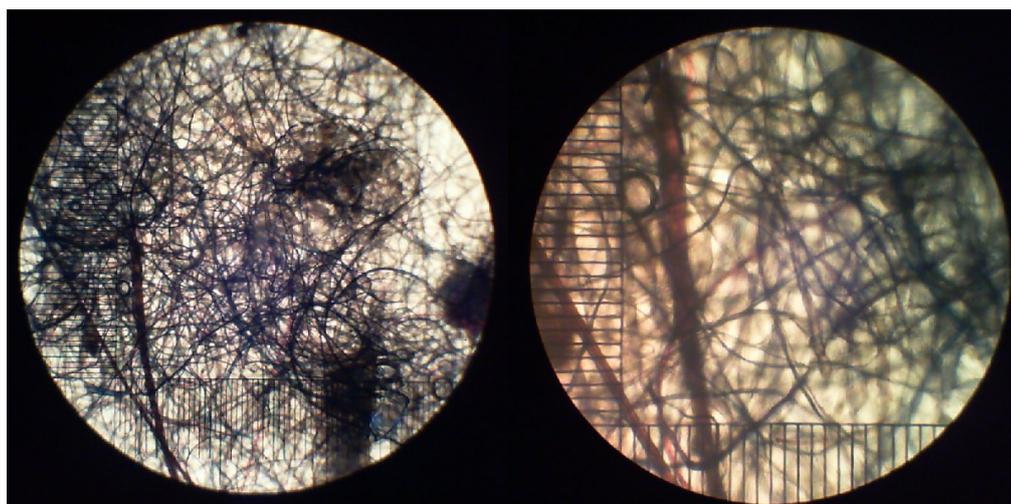


図3.1 埃の繊維物の顕微鏡写真（左 40 倍，右 100 倍）

3.3 フラクタルとは

フラクタルとは，樹木の枝分かれや積乱雲，海岸線などの特徴的な長さを持たない図形や構造，現象などの総称である．人工的な構造物では，鉄塔の骨組みがフラクタル形状を示す構造もある[5]．フラクタルは，一般に非整数の値を持つフラクタル次元によって特徴付けられ，このフラクタル次元は，図形の複雑さを示している．よく知られたフラクタルとしてコッホ曲線に代表される自己相似がある．樹木の場合，樹木を構成する質量の空間分布がフラクタルになっている．このような構造は質量フラクタルと呼ばれる[6]．コッホ曲線も，その線上に一様な質量分布を仮定すれば，質量フラクタルである．埃も，特徴的な長さを持たない図形で，質量フラクタルであると著者は考える．

フラクタル図形として最も有名なコッホ曲線について説明する．コッホ曲線は 1904 年にスウェーデンの数学者ヘルゲ・フォン・コッホ (Helge von Koch) が考案したものである[7]．図 3.2 に示すように，線分を 3 等分し，分割した 2 点を頂点とする正三角形の作図を無限に繰り返すことによって得られる図形である．このコッホ曲線について，その長さを測定してみると，1 回の操作で線

分の長さが $4/3$ 倍になるので，操作を無限に繰り返して得られるコッホ曲線の長さは $\lim_{n \rightarrow \infty} (4/3)^n$ ，すなわち無限大となる．コッホ曲線の生成規則にランダム性を導入することで，総計的に自己相似なフラクタルを生成できる．自然界においては，リアス式海岸が同様なフラクタルの代表例である．

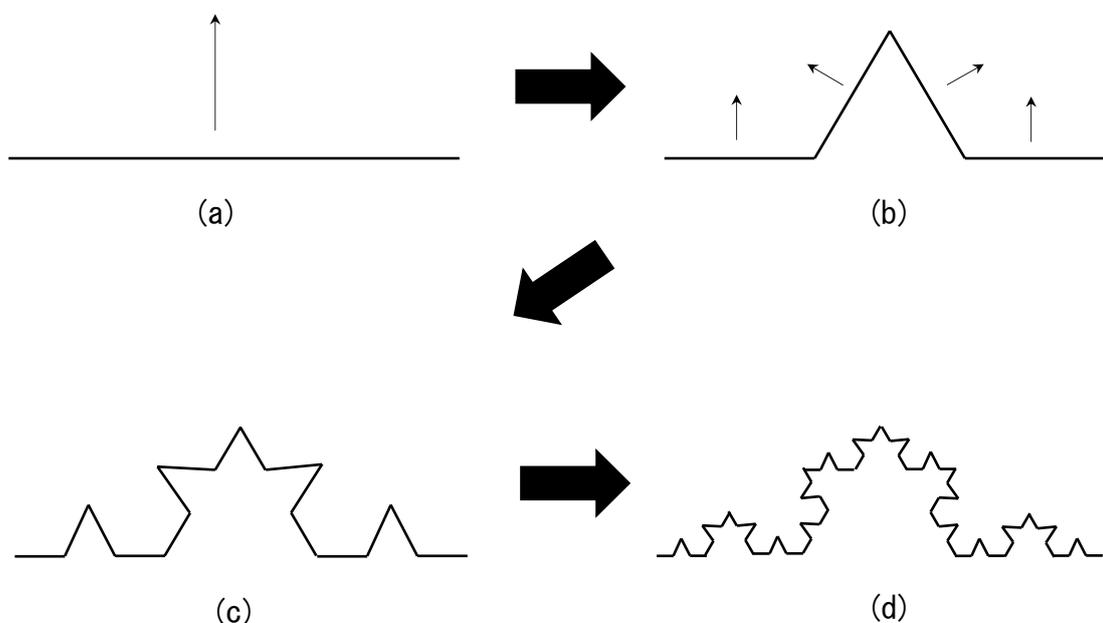


図3.2 コッホ曲線の例(a)~(d)のように複雑な線になる．

3.3.2 フラクタル表面

フラクタル表面とは，対象とする質量分布が外場と接する表面がフラクタル形状になっているものを指す．その代表例として山の地表面である．画像の濃淡に2次元の棒グラフで表すとき，各棒の先端が形作る表面（画表面という）は，濃淡画像の起伏の複雑さを表す特徴量を示す．したがって，主に画像解析によるフラクタル次元解析は，フラクタル表面にあたる．グレースケール画像では，ピクセル毎の濃淡から起伏の複雑さを表す．一方，カラー画像ではピクセル毎のRGB値を活用することで，RGB毎の起伏の複雑さを表すことができる．フラクタル表面による画像解析は，工学[8,9]・医療[10]など様々分野で応用され，対象となる画像の評価に用いられている．

3.3.3 質量フラクタル

樹木を構成する質量の空間分布はフラクタルになっていると考える[6]．こ

のような構造を質量フラクタルとよぶ。拡散運動する微粒子の凝集によって生じる凝集体，例えばススなども代表的な質量フラクタルとされている。質量フラクタルでは，質量密度の空間的分布 $\rho(\mathbf{r})$ の相関関数 $C_\rho(\Delta\mathbf{r})$ は，

$$C_\rho(\Delta\mathbf{r}) = \langle \rho(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) \rangle \propto \Delta r^{D-E} \quad (3.1)$$

の関数に従う。ここで， E は物体が存在する空間の次元(ユークリッド次元)であり， D はフラクタル次元の 1 つである質量次元である[6]。図 3.3 に示すように，ゲルやデンドリマーなどから見られる多分岐性高分子の結合形状も質量フラクタルとして扱っている[11]。

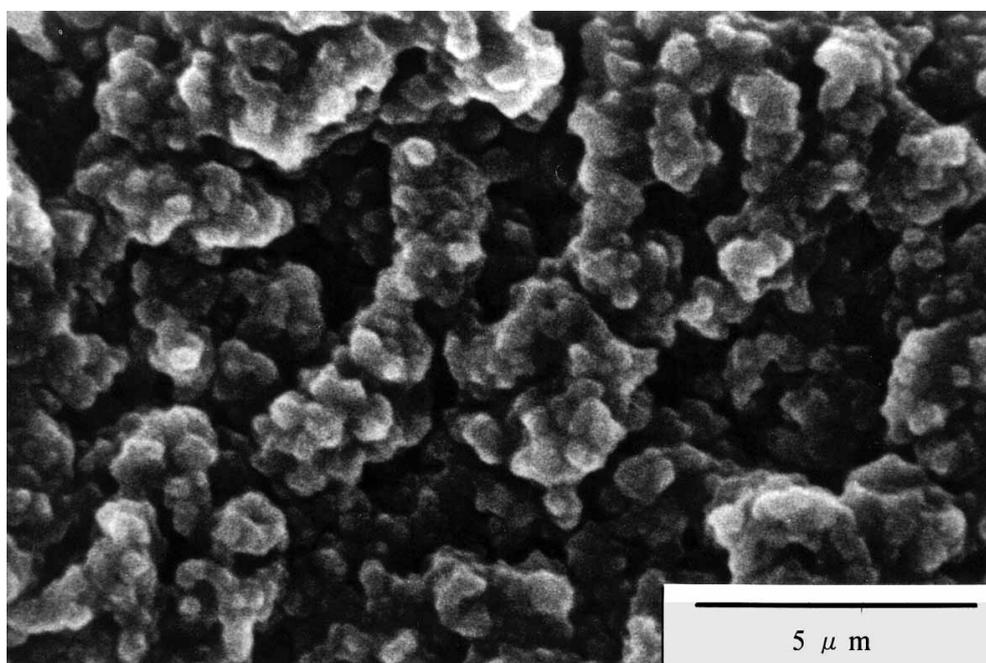


図3.3 高分子の形-偶然的に形成されるフラクタル-
st-PMMA のゲルの構造の例[12]

3.4 埃の堆積過程について

埃の堆積に関しては，静電気やシミュレーションの分野においてほとんど議論や研究がされていない。埃は衣類などの繊維質が剥がれ空気中を浮遊して床面や壁に付着して形成した集合体であると考える。埃の繊維同士の接続は，繊維形状の絡まり合いや静電気力がその要因にあると考える。この過程は，拡散

律速凝集 (Diffusion-Limited Aggregation, 以下 DLA とする) や, クラスタ・クラスタ凝集 (Cluster-Cluster Aggregation, 以下 CCA とする) などの凝集過程と類似している. 凝集とは粒子が結合し集合体をなすことであり, 拡散律速とはクラスタの成長過程において粒子の拡散の影響が支配的であることを指す. 平面の DLA 二次元ラディアルパターンは, ある種粒子から放射状に成長していくが, その系の非平衡の度合いによってできるパターンが変わり, それによって成長パターンを制御できると考えられている[13,14].

コンピュータで作成された DLA の例を図 3.4 に示す. DLA は 1981 年に, T.A.Witten と L.M.Sander によって提唱された過程である[15]. この過程は, 拡散によって成長するパターンをあらわすもので, Brown 粒子をクラスタに次々と付着させることによってクラスタを成長するものである.

DLA の要素を持つ埃の堆積モデルを図 3.5 に示す. 空気中に発生した微細な埃繊維が拡散し, ゆらゆらと落下する. 空気中を浮遊する微細な埃繊維は, 気流や静電気力の影響を受け, それらの接続などからクラスタ化すると考える. 図 3.6 は, 埃が薄く堆積した様子を示している. このように埃が堆積し薄く積もった形状は, DLA が広範囲かつ多発的に発生し成長したと考察する. 一度凝集した埃繊維が種となり, 他の繊維と絡み合い, 徐々に拡大しクラスタ化していく. 本報告は, 図 3.6 のように薄く積もった埃の堆積を対象に初歩的なモデルでシミュレーションした.

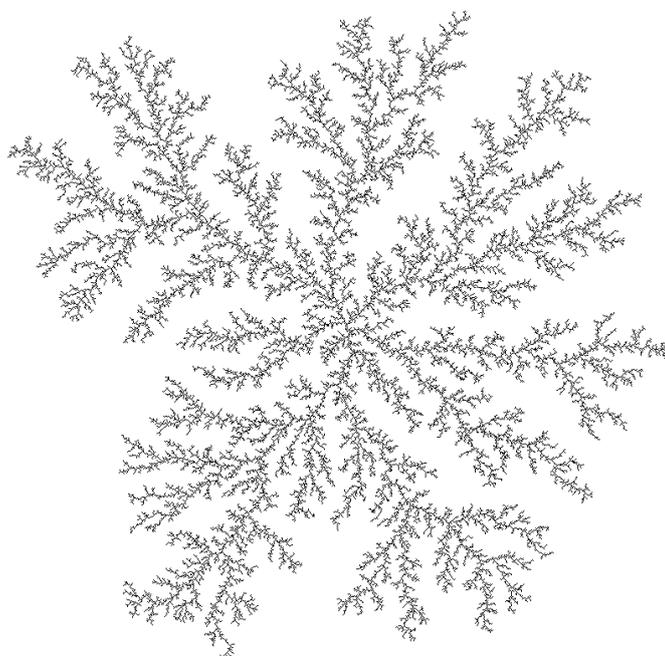


図3.4 拡散律速凝集凝縮の例 [16]

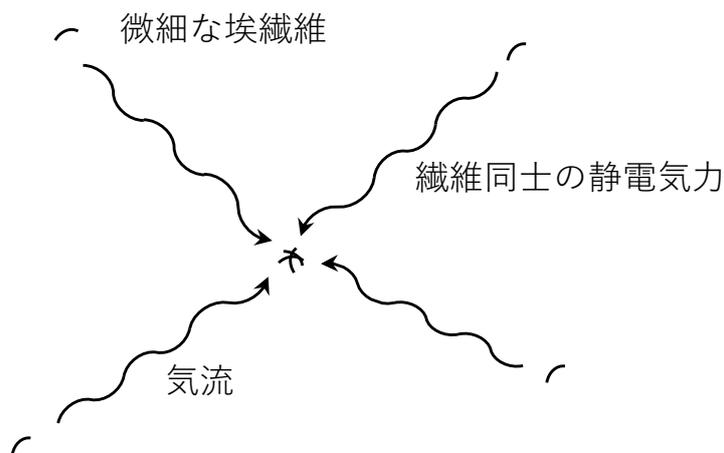


図3.5 気流や静電気力の影響を受け凝集する埃の堆積過程

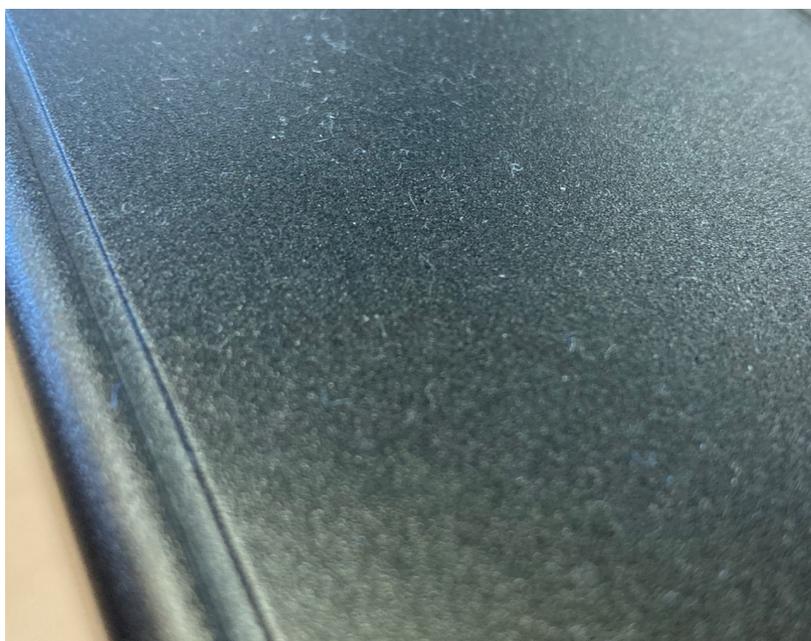


図3.6 DLA 的に成長したと考察する埃堆積の例

一方で、CCA による埃のクラスタ過程を図 3.7 に示す。1 度床面に落ちた埃は、埃同士の凝集が少ない場合、人の動きなどで発生するわずかな気流の影響を受けて舞い上がる。絡まり合う力は、繊維同士の静電気力よりも大きく、一度凝集・クラスタ化した埃は離れにくいと考える。図 3.8 は、これらの運動を繰り返したときに気流の影響を受けにくく、家具の隅や隙間に埃が凝集し堆積した形状と考える。凝集した埃は、外部からの圧力や温度変化で生じる化学変化などは起こらないため、それ以上の凝縮的な結合は無いと考える。このように、埃の凝集過程は、DLA や CCA による微粒子の拡散・凝集メカニズムとよく似ていると考察する [17]。

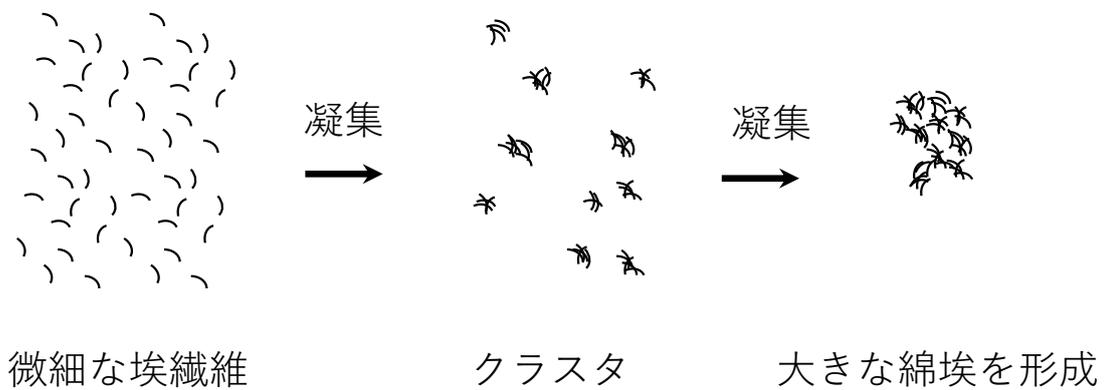


図3.7 CCAによる埃の凝集過程の考え方



図3.8 CCA的に成長したと考察する埃堆積の例

3.5 ランダムウォークとフラクタル

ブラウン運動は、微粒子の不規則変動が分子の熱運動に起因するランダムウォーク現象であることを 1900 年代初頭にアインシュタインが突き止めた背景がある。1820年代に水面の花粉の微粒子変動の不規則性を英植物学者ブラウンが発見したことから、この動きは、ブラウン運動と呼ばれているが、金融商品の値動きがブラウン運動と同じように不規則にランダムウォークする性質をもつのを最初に見つけたのは仏数学者バシェリエであり、1900年代に関連する論

文が発表されている[18]. このようにブラウン運動の基礎となるランダムウォークは様々なランダム過程に現れる基本的な確率現象である. 物理学のランダムウォークの和訳には酔っ払った人の千鳥足状態になぞらえた「酔歩」があるが, 酔人がランダムウォーク状態で歩いた(変動)距離は歩いた(変動)時間の平方根に比例することが, 現在の位置(場所)が過去の位置(場所)とは独立していることから導かれる. この考え方は, 埃の堆積糧のランダム性や堆積形状のフラクタル的自己相似に関連すると考える.

3.5.1 整数の一樣乱数を用いたランダムウォーク

図 3.9 のような点 0 から始まる粒子の 1 次元のランダムウォークを考える. その運動は, 近接点のうちの 1 つへのステップで記述される. ランダムウォークにおける異なるステップは, 総計的に独立であると仮定する. 右へのステップは確率 p , 左へのステップは確率 $q=1-p$ で実行する. n ステップのランダムウォーク後の位置は, 右と左へのそれぞれのステップ数により決定される. 図 3.10 に示すように, 右へのステップ確率 p 及び左へのステップ確率 q の比を $1:1$ とすると, n ステップ後の位置の確率は, 図 3.11 に示すように, 点 0 を中心とする正規分布に従う. 図 3.11 では, 実際に, $n=100$ ステップとし, 300 個の粒子の位置をカウンティングした.

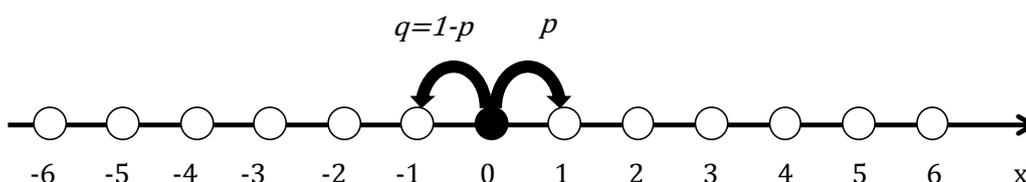


図3.9 1次元格子上的ランダムウォークの概念図

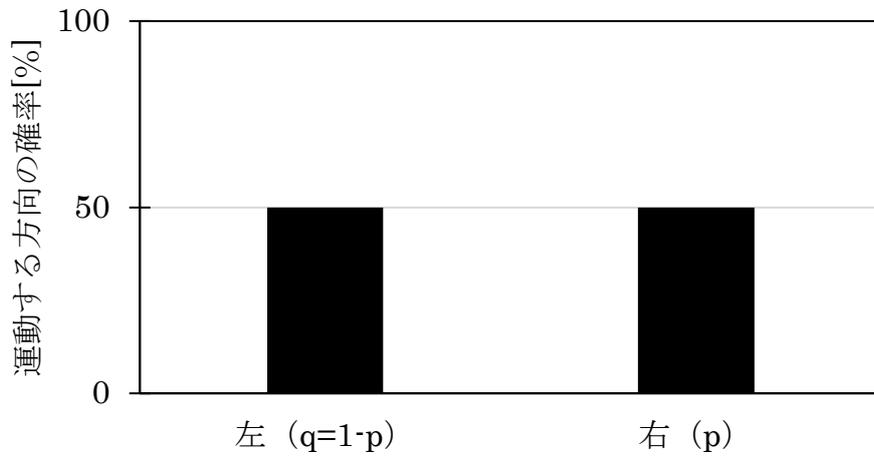


図3.10 左右のステップ確率

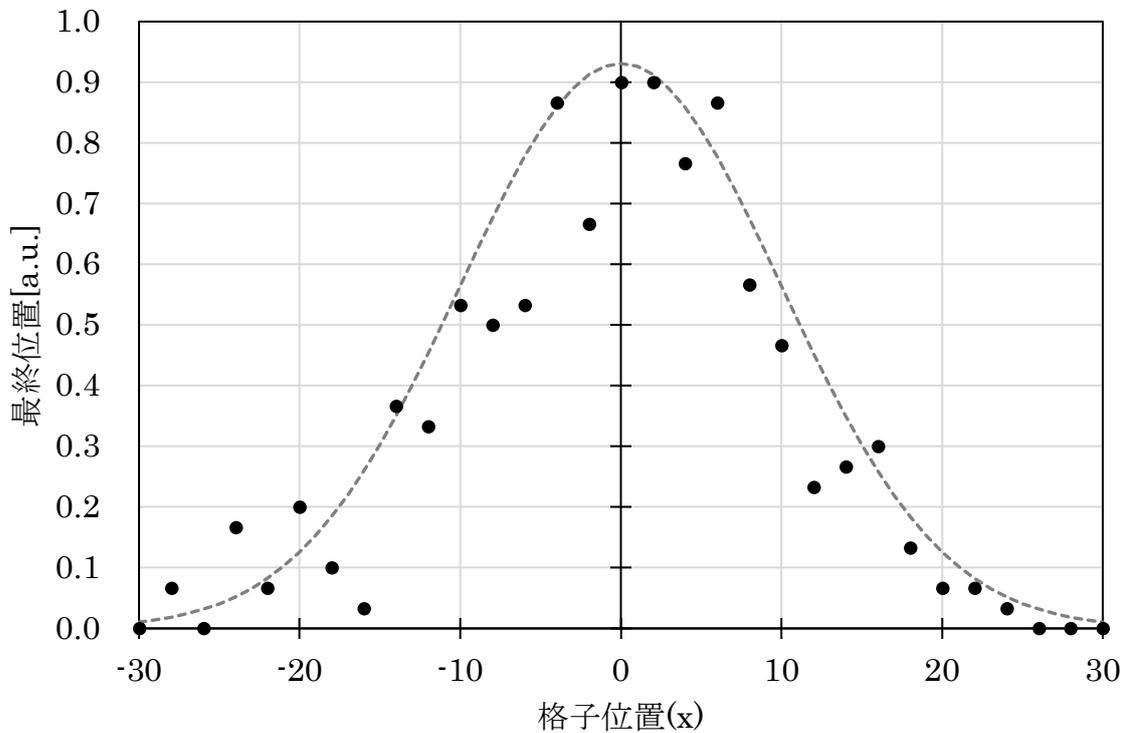


図3.11 1次元上のランダムウォークの最終位置の確率分布（点線-理論的確率分布，黒点-シミュレーション結果）

3.5.2 実数乱数を用いたランダムウォーク

埃の空気中の浮遊をランダムウォークで考える場合，一定の歩幅でのランダムウォークではなく，時間毎の運動量の異なるランダムウォークで浮遊すると

考える．すなわち 1 ステップ当りの移動距離は一定では無いと考える．ココでは，図 3.12 に示すような， -0.5 [mm]以上 0.5 [mm]未満の範囲の一様乱数を用いてランダムウォークさせる．埃の発生点を $x_0 = 0$ としたとき，1 ステップ目の一様乱数の値を a_{x_0} と置くと，1 ステップ後の座標 x_1 は，

$$x_1 = x_0 + a_{x_0} \quad (3.2)$$

となる．さらに 2 ステップ目の座標 x_2 は，1 ステップ後の座標 x_1 から 2 ステップ目の一様乱数 a_{x_1} だけ移動することになるため，2 ステップ目の座標 x_2 は，

$$x_2 = x_1 + a_{x_1} \quad (3.3)$$

となる．故に， n ステップ後の座標 x_n は， a_{x_i} の総和から，

$$x_n = x_0 + \sum_{i=0}^n a_{x_i} \quad (3.4)$$

となる． z 方向に関しては，ここでは終端速度による落下を仮定した簡単なモデルとして 1 ステップ毎にデクリメント(-1)する．

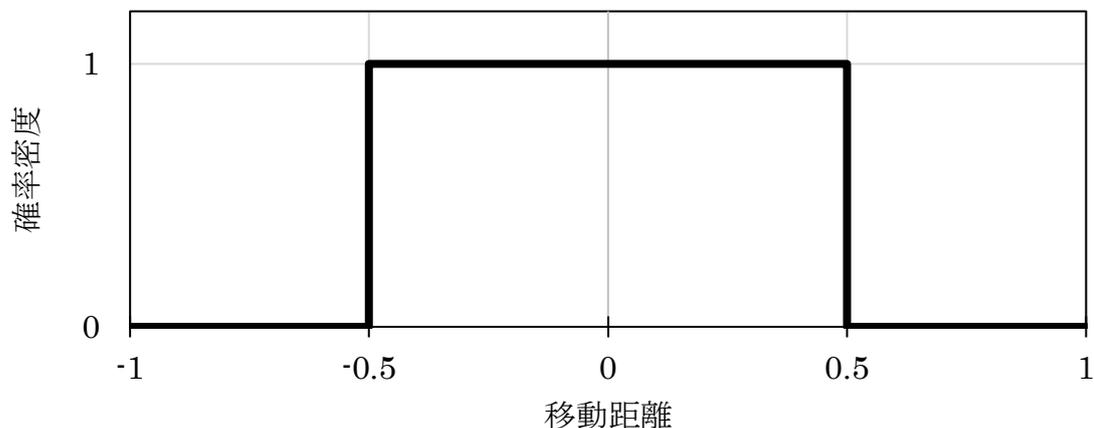


図3.12 -0.5 [mm]以上 0.5 [mm]未満の一様乱数の確率分布

点 $x_0 = 0$ に発生した 4 つの埃粒子を $n = 100$ ステップ運動させた．このときの粒子の軌跡を図 3.13 に示す．このようなランダムウォーク運動の軌跡にはフラクタル的な性質があるとされている[19]．また，多くの埃粒子の最終位置を数

えると、3.5.1節で述べた2値ステップの場合同様、埃の発生点を中心極限定理による正規分布になる。実際の埃の運動では、この運動にy方向のランダムウォークも考慮する必要がある。

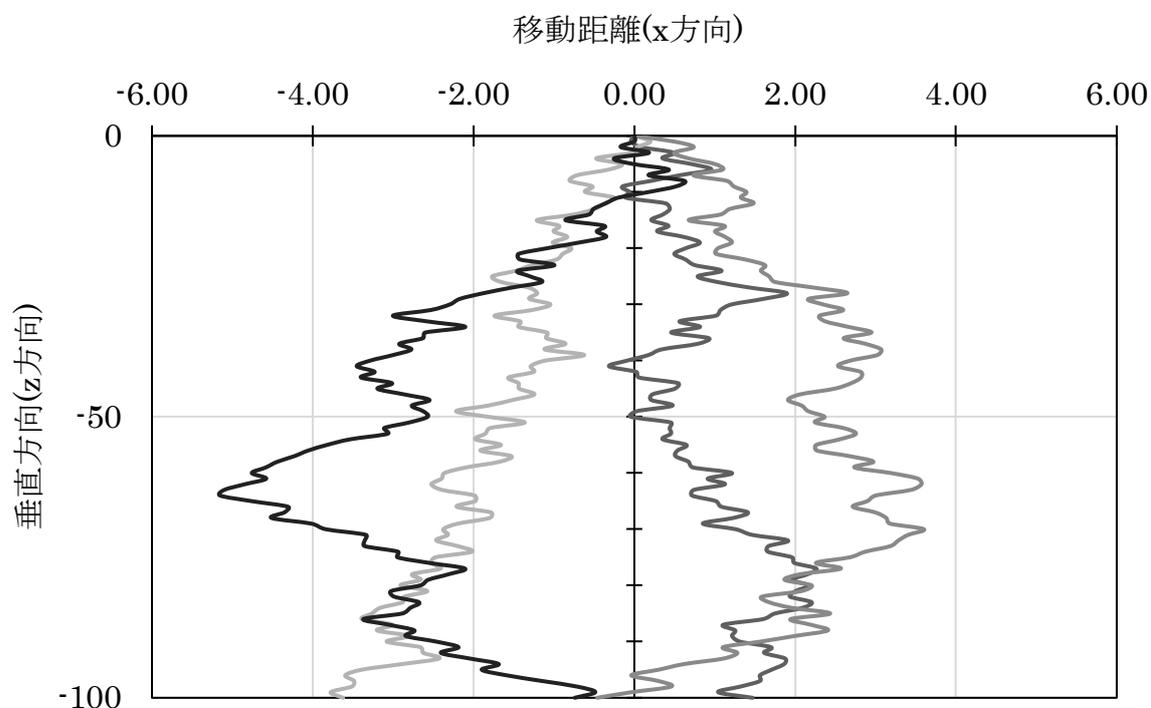


図3.13 実数乱数を用いたランダムウォークの軌跡

3.6 画像処理によるフラクタル次元解析

フラクタルの重要な特徴は、その微細な構造にある。すなわち、その自己相似性により、いくら拡大しても同じ構造が現れるという微細さである。フラクタル次元は、このことを数値化する試みで、フラクタルを拡大すると、どのくらい細かい構造が見られるかを数値的に定義する。こうして定義したフラクタル次元は、フラクタルの複雑さを示す数値となり、高倍率で見たときにフラクタルが空間を占めている割合を示す。

フラクタル次元の定義は様々あるが、どの定義も何らかの意味で拡大しながら（より細かいスケールで見ながら）フラクタルの複雑さを測ることが共通している。解析の代表的な手法として、ボックスカウンティング法があり、この方法により求めた次元は、しばしば「ボックス次元（箱数え次元）」と呼ばれる。ボックスカウンティング法は、フラクタル構造に対し、グリッド（格子）を重ねて描き、フラクタルと交わりをもつグリッド（ボックス）の数を数える

ことにより求める手法である[19].

画像処理におけるフラクタル次元解析は、画像濃淡曲面の起伏の複雑さを表す特徴量となる。フラクタル次元解析を活用することで、構造物や製品の表面を数値化し、品質評価に応用できる。例えば、工業製品における加工表面の粗さの評価[20]やトンネル切羽画像からフラクタル解析を活用した地質評価[21]などの報告がされている。解析方法は、デジタル画像の RGB 値やグレースケール下での濃淡レベルをピクセル毎に数値化、解析範囲を設定して、ボックスカウンティング法を用いている。したがって埃の堆積画像の場合にも画像処理によるフラクタル次元解析により、堆積情報を検出できると考える。

本研究では、ボックスカウンティング法を用いてフラクタル次元の画像解析を行う。図 3.14 に、ボックスカウンティング法の例を示す。ボックスカウンティング法は、画像をグレースケール化し、対象とする画像を 1 辺の長さが r の正方形（グリッド）で覆ったとき、その中に対象とする点や線が含まれる正方形の数 $N(r)$ を数え、 r を変化させていったときの $\log(r)$ に対する $\log(N(r))$ のプロット傾きから、フラクタル次元を求める。

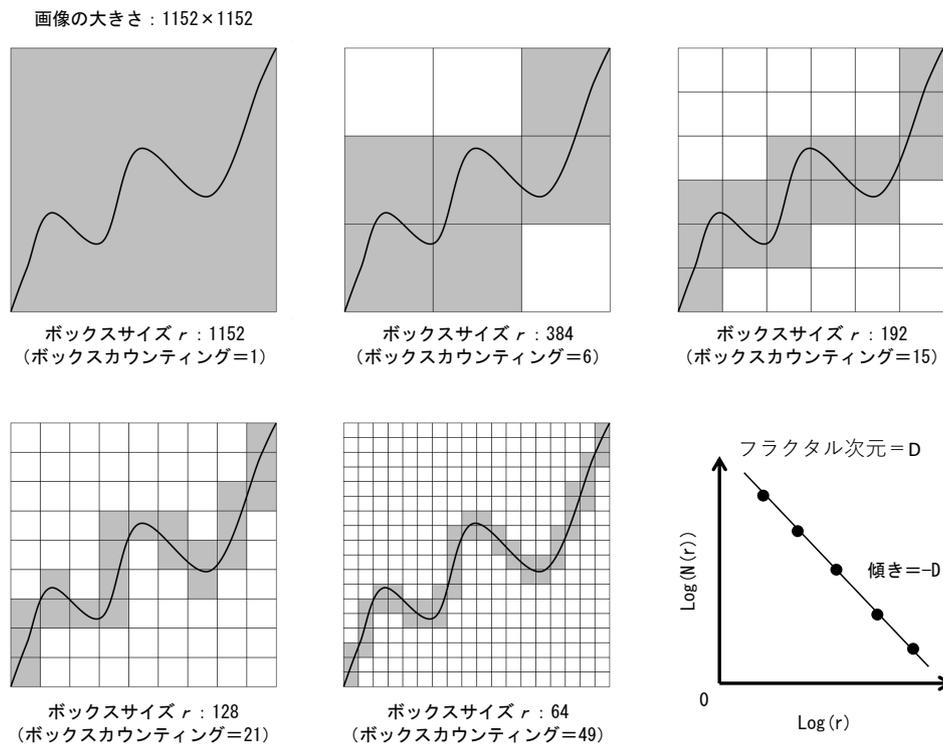


図3.14 ボックスカウンティング法の例[22]

3.7 まとめ

本章では，埃の堆積形状を顕微鏡を用いて観察し，埃の堆積過程のメカニズムを考察した．埃は，細かな繊維が複雑に絡み合い大きな綿埃へ成長していく．微細な繊維同士が，その繊維が持つ微弱な静電気力や，気流の影響を受け，衝突・凝集する．一度凝集した埃は，繊維質形状により絡まり合い徐々にクラスタ化する．この凝集過程は，拡散律速凝集(DLA)に類似していると考えられる．形成されるパターンは複雑な枝分かれ構造をもち，自己相似性を有している．このことから埃の堆積形状も自己相似的なフラクタル形状であると推測した．粒子のランダムウォーク運動をまとめた．埃の浮遊運動も，ランダムウォーク的な運動であると考えられる．埃の顕微鏡画像から，埃には透過性があり，堆積画像の濃淡を解析することによりフラクタル次元や空間占有率による埃堆積量の推定へとつながると考える．

次章では，凝集・クラスタ化のメカニズムやランダムウォーク運動を参考にモデル化することで，埃の堆積シミュレーションについて述べる．シミュレーションでは，埃堆積画像を生成し，画像解析を用いて，フラクタル次元と空間占有率の相関から，埃の堆積形状がフラクタルであるかについて考察する．また，そのモデルの妥当性について議論する．

参考文献

- [1] 大谷昌生，金井徳兼，“埃の堆積とフラクタルについて”，日本シミュレーション学会誌，Vol.15, No.1, pp.12-19, (2023).
- [2] ダスキン公式ページ:<https://www.duskin.jp/> (2021.5).
- [3] 米沢富美子，“ブラウン運動”，共立出版，(1986)
- [4] 秋元琢磨，“ランダムウォークははじめの一步 自然現象の解析を見すえて”，共立出版，(2018).
- [5] 臼田昭司，東野勝治，井上祥史，伊藤敏，葭谷安正．“カオスとフラクタル Excelで体験”，オーム社，(1999).
- [6] 魚住純 “フラクタル構造における光散乱現象”応用物理学会 第 67 卷 第 11 号 PP.1270-1275. (1998).
- [7] 中村亮一，“フラクタルって知っていますか-1.26 次元や 1.58 次元の図形ってどんなものなのだろう-”，ニッセイ基礎研究所，(2021).
- [8] 風間健太郎，栗原哲彦，“表面粗さ評価指標としてのフラクタル次元の算出方法に関する検討”，土木学会関東支部技術研究発表会，(2011).

- [9] 黒岩孝, 矢澤翔大, 新妻清純, “フラクタル画像解析による 走行車両の検出に関する研究”, 平成 31 年電気学会全国大会, 講演論文集, pp.456, Mar.(2019).
- [10] 外山比南子, 上村幸司“医用画像 におけるフラクタル次元解析”, 日本生体医工学会学会誌, 13 卷 5 号 pp.30-38, (1999).
- [11] 芝山充弘, “ゲルのフラクタル解析”, 高分子学会 48 卷 2 月号(1999 年).
- [12] 高分子-ミクロの世界-[#119] 高分子の形(61)偶然的に形成される形-フラクタル-(18)st-PMMA のゲルの構造, livedoor Blog, <http://microstructure.livedoor.blog/>, (2007).
- [13] Y. Sawada, A. Dougherty and J. P. Gollub, Phys. Rev. Lett. 56, 1260 (1986).
- [14] D. Grier, E. Ben-Jacob, R. Clarke and L. M. Sander, Phys. Rev. Lett. 56, 1264 (1986).
- [15] T. A. Witten, L. M. Sander, “Diffusion-limited aggregation”, PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 27, NUMBER 9, MAY (1983).
- [16] T. A. Witten, L. M. Sander, Phys. Rev. Lett. 47, 1400 (1981).
- [17] 奥山喜久夫, 他, “微粒子の付着・凝集メカニズムと実用系における評価, 制御”, 技術情報協会, (2000).
- [18] 野村証券証券用語解説集, <https://www.nomura.co.jp> (2022).
- [19] ケネス・ファルコナー, “フラクタル”, 岩波書店, (2020).
- [20] 児野武郎 “表面粗さ曲線のフラクタル解析” 長野県工技センター研報 No.5,PP.52-55.(2010).
- [21] 宇田川義夫“トンネル切羽画像のフラクタル解析による地質評価手法の開発”応用地質学会誌,第 48 卷,第 3 号,pp.116-125 頁,(2007).
- [22] 金子博, “フラクタル特徴とテクスチャ解析”電子情報通信学会論文誌, Vol J70-D No.5 pp.964-972 (1987).

第4章

位置情報を取得する

ブロック型回路の試作

第4章「位置情報を取得するブロック型回路の試作」では、埃の堆積量分布測定を目的とした位置情報とセンサー情報を取得するインテリジェントフロアを提案し、その基本システムのブロック型回路を試作し、その機能を考察する。先行研究である「スマートハウスのエネルギー管理システムのモデル」を電気学会[1,2]に、「3次元位置情報の取得方法の検討」を International Workshop on Informatics 国際会議[3]にてそれぞれ報告している。

4.1 はじめに

IoT 技術が発展し、様々な製品がネットワークにつながる時代に突入した。特に家庭環境では、多くの家電製品が IoT 技術により、家庭内ネットワークに接続されている住宅が増えつつある[4]。家庭内ネットワークにつながれた家電製品は、それぞれに IP アドレスを割り当てられ、ホームエネルギーマネジメントシステム (HEMS) によって管理されている。エコーネットコンソーシアム定める通信プロトコル[5] (エコーネットライト) によって、タブレットやモバイル端末からコントロールできる。さらに、ネットワークにつながれた家電製品が、インタラクティブに動作するサービスが開発されている[6]。しかし、家電製品同士をインタラクティブに動作させるには、設置された家電製品の位置情報が必要である。現在は、家電製品の位置情報を手動で入力して HEMS に接続している。Wi-Fi による無線通信が普及する一方で、電力線に情報信号を伝送させる電力線通信が存在する。しかし、電力線内のノイズが極めて多いという問題があります。また、高速の伝送ができないため、日本国内では、実用化されていなかった。近年、これらの問題が改善され、パナソニックなどが実用・製品化している。

著者は、PLC による有線ネットを活用することで、物理的に家電製品の位置

情報を取得できないか検討している[7]. 一方、ブロックシステムは工学研究において、幅広く活用されている. それらの多くは、ブロック内に組み込まれたマイクロコンピューター、センサー、およびモーターを有する. これらのブロックを組み合わせることにより、様々なデバイスを自由に作成することができる. また、ブロックの形状を認識し、VR化する研究が多数報告されている[8,9].

ブロックシステムを活用した製品は、モデル作製やシミュレーションツールとして幅広く活用されている. 近年は、電子部品やマイクロコンピューターを組み込み、電氣的な接続を可能とするブロックが普及しており、活用の幅が広がっている. 先行研究として、スマートハウスやHEMSに関するシミュレーションや学習ツールとして報告している[10]. 住宅建築においては、ユニット工法による建設方法が広まっている[11]. ユニット毎にブロック化し現場で組み立てるユニット工法は、納期短縮につながっている. さらに、フリーアクセスによる床下配線を導入したオフィスが増えている. 今後の住宅やマンション・ビル・工場など、より高機能なインテリジェントフロアが登場すると私たちは考える.

本章では、近い将来登場すると考えられるインテリジェントフロアのシミュレーションツールを組み換え可能なブロックシステムを活用して試作する.

「電氣的な接続を持つ回路ブロック」の位置情報を認識するインテリジェントフロアの基本回路を設計する. 基本回路を試作し、その機能を考察する. さらに、センサーとブロックを組み合わせることで3次元位置情報を取得する方法を提案する. 手法として、単一レベルとマルチレベルで作製する. 2つの方法を組み合わせることで3次元位置情報を取得するシステムを提案する. また、センサー付きブロックを用いて垂直方向の情報も取得する.

4.2 工学分野におけるブロックシステム

近年、工学研究や教育分野においてブロックシステムが幅広く活用されている. その多くは、ブロックにマイコン、センサー、モーターなどの電子部品が組み込まれている. 複数のブロックを組み合わせることで、ユーザが自由に様々な装置を作ることができる. しかし、作製した装置自身は、センサーやモーターなどのブロックの接続位置情報を認識できない.

例えば図4.1(a)のようなLEGO Mindstormsで作製したロボットや、図4.1(b)のような回路実験が行える“電子ブロック”は、センサーやモーターなどのブロックの3次元的位置情報を認識できない. これらのブロックの3次元的位置

置情報を認識する方法は 2 パターンあると考える。1 つ目は、外部から非接触型のセンサーで 3 次元的な位置情報を認識する方法[12,13]である。2 つ目は、センサーとモーター自身が電氣的な接続点から 3 次元的な位置情報を認識する方法[14,15]である。ここでは、2 つの方法を組み合わせることで 3 次元的な位置情報を認識する手法を考える。さらに、このシステムを発展させると、住宅に設置された家電製品の 3 次元的な位置情報を取得できると考える。



(a)

(b)

図4.1 センサーやモーター・電子部品などが組み込まれたブロックの例

(a) LEGO Mindstorms で作成した基本ロボット，(b) 電子ブロック

4.3 本研究の開発環境

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench の略) [16]は、National Instruments (NI) 社製の開発環境で、グラフィック型言語によってプログラミングできる。関数の代わりに Virtual Instruments (通称 VI) を使用する。視覚オブジェクトである VI アイコンを使用しウィンドウ上に配置し、ブロックのように各 VI を組み立ててプログラムを作成する。LabVIEW は主にテスト・計測及び制御が必要なアプリケーション向けのシステム開発ソフトウェアである。LabVIEW の最大の特徴は、図 4.2 に示すように、プログラミング開発画面 (ブロックダイアグラム) とユーザーインターフェース開発画面 (フロントパネル) の二画面一対になっており、プログラム作成と解析結果のグラフ化を同時に実行できる。

LabVIEW は、様々な企業で活用されている。JAXA 鹿児島宇宙センター気象観測システムもその実例である。このシステムは、株式会社ペリテック[17]が

LabVIEW を活用して、設計・開発している。このシステムは、種子島宇宙センターと内之浦宇宙空間観測所に設備する気象観測センサーを取り込むシステムとなる。種子島宇宙センターに関しては既存の『気象データ処理設備』の老朽化更新及び「地震観測システム」の取り込み機能を追加することを目的とし、内之浦宇宙空間観測所はイプシロン打ち上げ対応のための新規設備となっている。大規模なインフラの整備は、長期にわたるため、既設システムの導入は億単位のコストがかかっていた。しかし、システム全体に関するプログラムを LabVIEW で統一的に構築できる。

研究開発の場合、本来の目的とは別に、計測と制御、その後のデータ解析のプログラム作成に膨大な時間を費やしてしまうことになる。このような計測、制御、解析分野でのプログラム作成の煩わしさを、解決してくれるプログラミングツールが LabVIEW である。本研究では、主にコンピューター制御、計測器を接続し埃の検出やシミュレーションに活用した。

4.3.1 画像収録モジュール (NI Vision 開発モジュール)

NI Vision 開発モジュール (Vision Development Module) は、LabVIEW 専用の画像収録モジュールである[18]。本研究では、シミュレーションで作成した埃の堆積画像や、図 4.2 に示すように、実際の埃の堆積画像を LabVIEW に収録し、画像解析に活用した。LabVIEW に収録した画像を、グレースケール化や 2 値化処理し、画像を解析した。

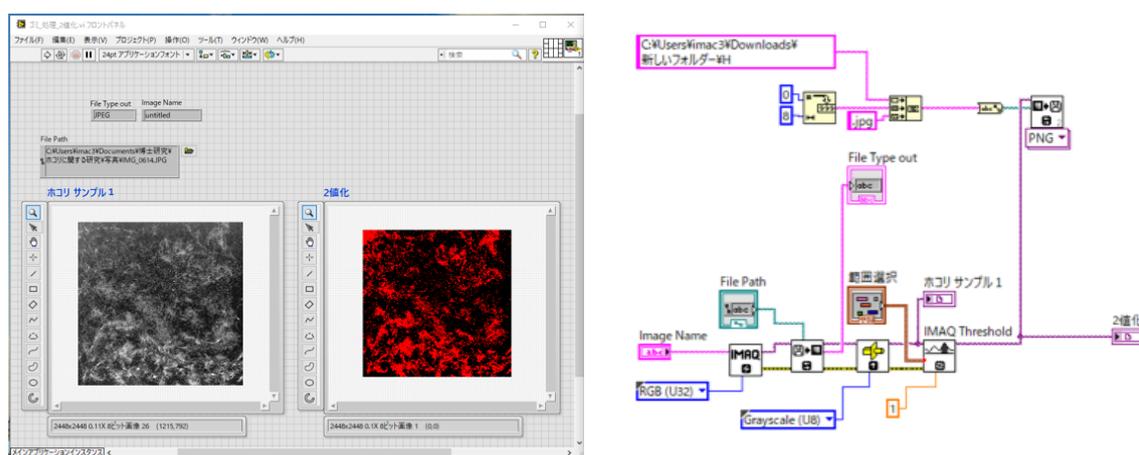


図4.2 LabVIEW の開発画面

左:フロントパネル 右:ブロックダイアグラム。埃の堆積画像の LabVIEW による収録、グレースケール化及び 2 値化処理の様子

4.3.2 活用したマイコンボード（NI myRIO）

図 4.3 は、NI 社製のマイコンボード NI myRIO である。1つの再構成可能 I/O (RIO) デバイスで複数の設計概念を教えるために使用できるツールである。MXP および MSP コネクタの形式でデバイスの両側に I/O を搭載し、10 個のアナログ入力、6つのアナログ出力、40 個のデジタル I/O ライン、Wi-Fi, LED, プッシュボタン, オンボード加速度計, Xilinx FPGA, およびデュアルコア ARM Cortex-A9 プロセッサを搭載したマイコンボードである。NI myRIO は、LabVIEW または C 言語でプログラムが可能である。本研究では、試作した回路やセンサーを接続し、情報の共有や制御に活用した。



図4.3 NI myRIO

4.4 家電ブロックの位置情報取得システムの検討

著者は先行実験として、ブロックシステムを活用したスマートハウスのエネルギー管理システムのモデル化と電力シミュレーション装置を作製している。図 4.4 にスマートハウスの電力シミュレーション装置を示す。我々は、ブロック内に抵抗器を組み込んだ、“家電ブロック“を設計した。家電ブロックは、冷蔵庫・IHクッキングヒータ・電子レンジ・テレビ・洗濯機の5種類を設計した。さらに、それぞれの家電ブロックは、消費電力の大きい物と小さい物（省エネ）

の 2 種類を設計した。合計 10 個の家電ブロックを試作した。抵抗器の大きさの違いで流れる電流を制御し，消費電力の見える化を実現した。現在は，工学学習者に対して，活用し評価している。

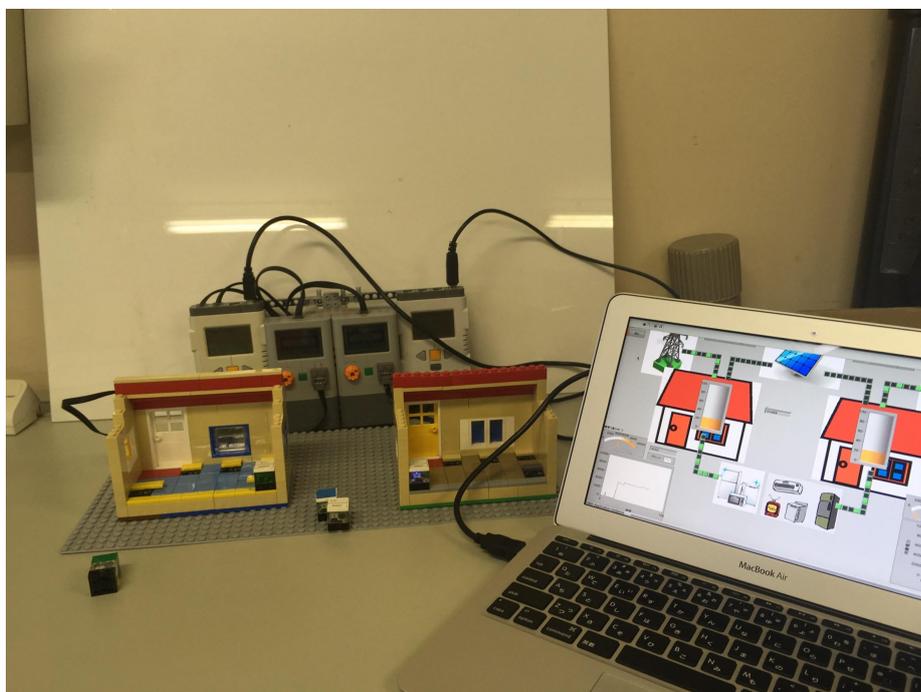


図4.4 LEGO スマートハウス

画像処理により各ブロックの機能だけでなく水平座標も認識するシステムを開発した。家電ブロックの種類ごとに色分けし，カメラで家電ブロックの状態を取得し，画像処理により家電ブロックの位置情報と種類を認識するシステムを試作しました。図 4.5 にプロトタイプを示す。また，このシステムの LabVIEW のプログラムを付録 1 に示す。ベースとなる黒いブロックの上に家電ブロックを配置し，上部カメラで家電ブロックの色とその水平座標を認識する。画像処理の色認識方法では，各色を HSV の 3 要素（色相・彩度・彩度・明度・明るさ）で認識した。図 4.6 に家電ブロック座標の認識方法を示す。取得した画像は，赤，青，黄，緑の 4 色をそれぞれ 2 値化し， 3×3 のマトリクス座標を表すデジタル信号に変換する。さらに，マイコンを組み込んだ電気回路ブロックを作り，それができるか検証した。設定された座標を認識し，電力とデータを送信する。送電・通信方式は，PLC (Power Line Communication) 技術を活用し，直流(DC)3~5[V]で駆動するマイコンに対し，信号を 3~5[V]にすることで PLC と同様の動作を可能にした。

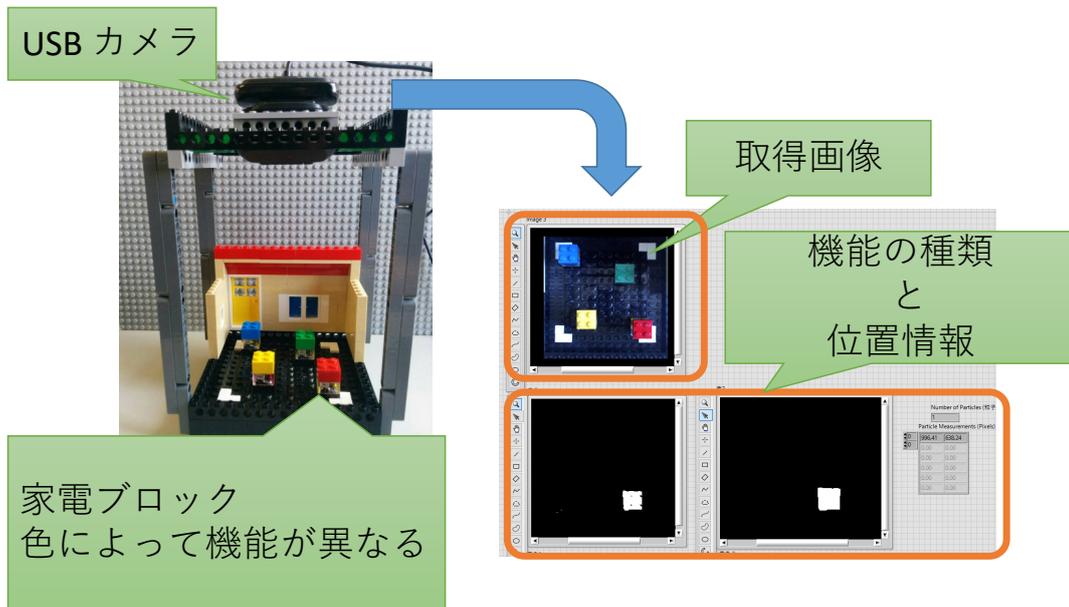


図4.5 画像処理による家電ブロックの位置情報の認識

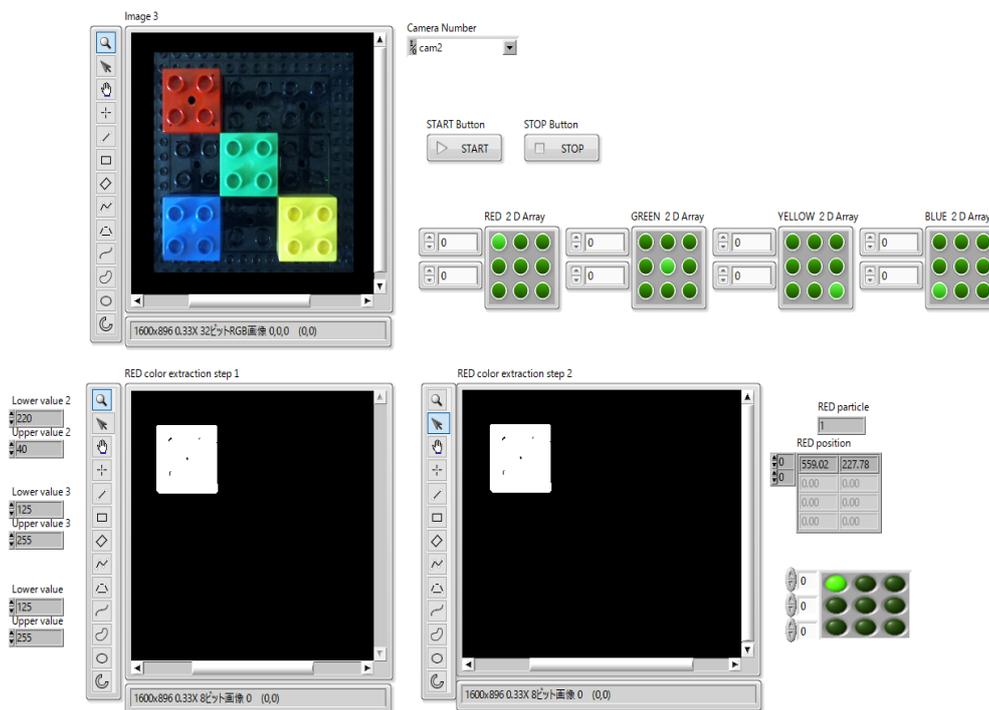


図4.6 位置情報をデジタル信号に変換する様子

4.5 接続位置を認識するデバイスの基本回路設計

回路ブロックの位置情報の認識する手法としてマトリックス認証法を活用し、座標による位置情報を認識する回路システムを検討した。ブロックの接続を検知し座標を取得する方法としてセンサーを活用することが最も容易な方法ではあるが、マトリックス座標の位置に、全てにセンサーを埋め込むのは、非現実的である。先行実験では、イメージセンサーを活用した位置情報の取得とインタラクティブな動作可能なインテリジェントフロアの研究を行ったが、実際のスマートハウス住宅への導入も考慮し、インテリジェントフロアの回路は、単純な回路が望ましい。また、マトリックス座標のマス目が増加してもデバイスとの通信端子は増えない回路を検討した。先行研究を参考に、抵抗器による分圧回路を応用することで、位置情報を認識するインテリジェントフロアの基本回路を検討した。

2次元座標を認識するインテリジェントフロアの基本回路を作成した。図4.7 (a) に示すように、抵抗器による分圧回路による電位を用いて座標の位置情報を取得する回路を作製した。この方法を用いることで、検出位置を増加させることが可能である。但し、電位を測定する測定器の分解能により上限がある。

行列式で表現すると、 n 個の抵抗 (R_x) x_1, x_2, \dots, x_n と、 m 個の抵抗 (R_y) y_1, y_2, \dots, y_m についての双一次形式 $Q(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m)$ は、

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

をつかって、行列積 ${}^t y {}^t A x$ と表せる。したがって、

$${}^t y {}^t A x = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} {}^t \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

となる。図3.1 (c)の抵抗値 R_2 は、行列の総和式から、

$$R_2 = \sum_{k=1}^n R_k - R_1 \quad (4.3)$$

となる。次に、各抵抗器の値を求める。図4.7 (b)は、1軸のみ示した回路図である。接続点を3ヶ所として考えると、3つのスイッチ（実際にはブロックが接続される）が押されると、それぞれ対応する電圧がデジタルピンに出力される。図4.7 (c) に示す分圧回路より、分圧式(4.4)が成り立つ。

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{cc} \quad (4.4)$$

図 4.7 (b) 1 軸回路の各抵抗器の値は，式(4.3)及び(4.4)により，式(4.5)～(4.7)の 3 つの式から算出する．

$$R_4 + R_3 + R_2 = \frac{V_{out_1}}{V_{cc} + V_{out_1}} \times R_1 \quad (4.5)$$

$$R_4 + R_3 = \frac{V_{out_2}}{V_{cc} + V_{out_2}} \times (R_1 + R_2) \cdot \quad (4.6)$$

$$R_4 = \frac{V_{out_3}}{V_{cc} + V_{out_3}} \times (R_1 + R_2 + R_3) \quad (4.7)$$

3 つの式に $V_{cc}, V_{out_1}, V_{out_2}, V_{out_3}$ の設定値を代入する． R_1 の値から，3 つの式の連立方程式を活用し R_2, R_3, R_4 の値を求めた．

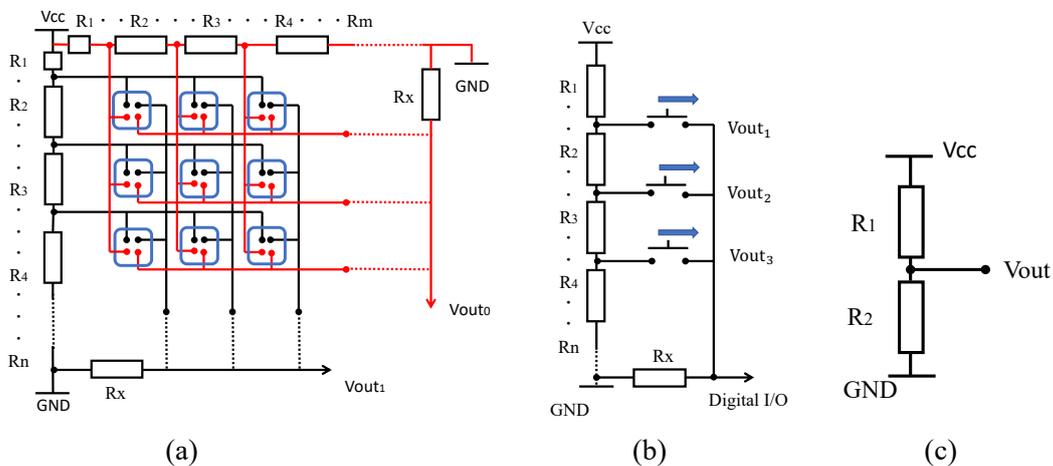


図4.7 スマートベースの基本回路

(a)2 軸回路，(b)単軸回路，(c)分圧回路

高さ方向の認識には，並列抵抗による電位差で高さを認識する方法を検討した．設計した回路を図 4.8 に示す．マイコンと抵抗 R_1, R_2 を組み込んだ回路ブロックを作製した．また，回路ブロックの高さをマイコンに認識させるために，

抵抗 R_3 を組み込んだ配線ブロックを製作した。配線ブロックの層数に応じて変化する電位は、マイコンブロックの高さに関する情報を取得する。抵抗値は、サンプル条件でシミュレーションする。図 4.9 にシミュレーション結果を示します。シミュレーションの結果、抵抗値の比率 $R_1:R_2$ を 1:10 に設定することで、高さを認識できる十分な電位差が得られることがわかった。また、抵抗を大きくすることで流れる電流が小さくなることを確認されました。試作回路では、 $R_1=1[k\Omega]$ 、 $R_2=10[k\Omega]$ も配線ブロックも作製した。

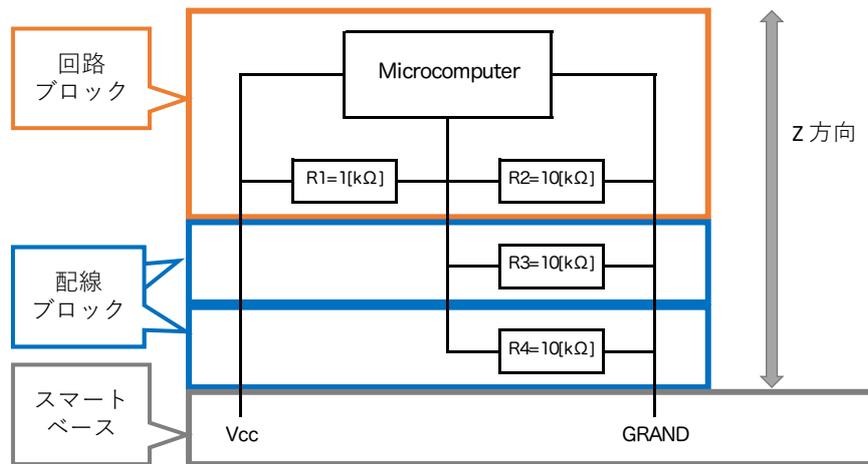


図4.8 垂直座標認識回路の設計

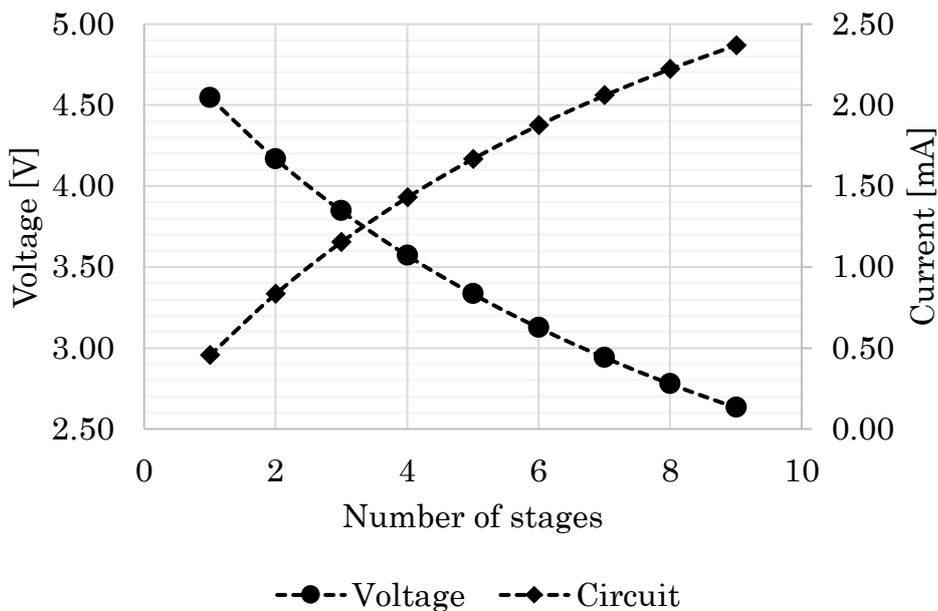


図4.9 垂直座標認識回路のシミュレーション結果

4.6 まとめ

本章では、ブロックの位置情報を認識するシステムを提案した。さらに、本研究に用いる開発環境や、埃堆積画像の解析に活用するアプリケーションについて述べた。LabVIEW は、グラフィカル言語による直感的なプログラミングができる。データ解析やシミュレーションのプログラムの作製が容易であることから、本研究では主に、LabVIEW を用いてモデル作製やシミュレーション、画像の解析を行うことにした。また、埃の分布検出における基本回路の試作には、LabVIEW でコントロールできる NI myRIO について説明した。

各ブロックの座標を認識するために、水平位置と垂直位置を認識するシステムを作製した。水平方向の位置認識では、画像処理によりブロックの色を認識し、2次元座標を取得することができた。垂直位置の認識には、並列抵抗によって生じる電位差を利用した。2種類の位置情報を組み合わせて3次元位置情報を取得した。今後は、3次元座標情報を取得できる複数の回路ブロックを対話的に動作させる可能性を実験的に検討していきたい。

参考文献

- [1] 大谷昌生, 金井徳兼, “ブロック型スマートハウス 電力管理学習教材の試作と活用 (I)”, 平成 29 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.10-11, Mar.(2017).
- [2] 大谷昌生, 金井徳兼, “ブロック型スマートハウス 電力管理学習教材の試作と活用 (II)”, 平成 29 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.14-16, Mar.(2017).
- [3] Masaki Ohtani, Kazuki Hayashi, Kazuki Tokunaga, Junnosuke Takeuchi, Norikane Kanai, Masao Isshiki, “Building Smart Block and Base Recognizing 3D Electric Circuit”, International Workshop on Informatics 2017, pp.13-18, Sep.3-6,2017.
- [4] 岩船由美子, “これからの HEMS”, 電気学会誌, 133 巻 12 号 pp.809-812, (2013).
- [5] ECHONET コンソーシアム公式サイト, echonet.jp, (2016).
- [6] 大谷昌生, 林千希, 徳永和樹, 金井徳兼, “位置情報を認識するインテリジェントフロアの検討 (I)”, 平成 30 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.411-412, Mar.(2018).

- [7] 大谷昌生, 林千希, 徳永和樹, 金井徳兼, ”位置情報を認識するインテリジェントフロアの検討 (II)”, 平成 30 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.413-414, Mar.(2018).
- [8] 柴田史久, 木村朝子, 橋本崇, 古野光紀, 平岡貴志, 田村秀行 “多様な可搬型機器に対応可能な複合現実感システムの共通フレームワークの設計と実装”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.10, No.3 323-332, 2005
- [9] 安藤正宏, 細井俊輝, 中島康祐, 高嶋和毅, 伊藤雄一, 足立智昭, 尾上孝雄, 北村喜文, “StackBlock: 積み重ね形状構築を可能とするブロック型デバイス”, 情報処理学会 インタラクシオン 2014, pp.135-142, Feb. (2014).
- [10] 宇田涼佑, 山田幸宏, 大谷昌生, 池田康秀, 金井徳兼, “工学初学者向けブロック学習教材の試作と活用”, 日本工学教育学会, Aug.(2017).
- [11] セキスイハイム公式ページ : <http://hc.sekisuiheim.com/> (2017.12).
- [12] 永井淳之介, 沼野剛志, 東孝文, Matthieu Tessier, 宮田一乗, “積み木を用いたインタラクティブな VR システムとその評価”, エンターテインメントコンピューティングシンポジウム EC2013, pp.97-102, Oct. (2013).
- [13] Bui Minh Khuong, Kiyoshi Kiyokawa, Andrew Miller, Joseph J. LaViola Jr, Tomohiro Mashita and Haruo Takemura, “Context-relate Visualization Modes of an AR-based Context-Aware Assembly Support System in Object Assembly”, TVRSJ Vbl.19No.2, pp.195-205, (2014).
- [14] 矢敷貴之, 秋田純一, “電力重畳通信機能を用いたブロック型デバイスの設計と実装”, IEICE technical report:信学技報 114 (479), pp.61-66, Mar. (2015).
- [15] 伊藤雄一, 北村喜文, 河合道広, 岸野文郎, “リアルタイム 3 次元形状モデリングとインタラクシオンのための 双方向ユーザインタフェース ActiveCube”, 情報処理学会論文誌, Vol.42 No.6, pp.1338-1347, Jun. (2001).
- [16] ロバート・H・ビショップ, “LabVIEW プログラミングガイド”, 株式会社アスキー, (2005).
- [17] 株式会社ペリテックホームページ : <https://www.peritec.co.jp/>
- [18] 堀桂太郎, “図解 LabVIEW 実習”, 森北出版株式会社, (2006).

第5章

埃のコンデンサーモデルと

埃堆積画像を用いた静電容量の

シミュレーション

第5章「埃のコンデンサーモデルと静電容量のシミュレーション」では，埃の構成成分に着目し，静電的な特性を活用した埃の堆積量の測定及び可視化を目的として，埃のデジタル的なモデルを作成し，埃モデルとその静電的特性から堆積量を推定できることを報告する．シミュレーション及び実験により，埃の堆積量と静電容量の関係などの埃がもつ静電的な特性について考察する．埃のデジタルかつ静電的なモデルに関しては，電気設備学会論文誌[1]に投稿，報告している．

5.1 はじめに

生活や製造における空間には様々な環境が存在する．その情報とネットワークが連携し，環境の可視化や機器の制御に活用されている[2]．空气中を浮遊する花粉や微細な埃は生活者の健康への影響[3]が心配され，パーティクルカウンターなどを用いて粒子数を計数し，空気清浄機などの運転制御に活かされている[4]．一方，床面や壁に堆積あるいは付着する埃の分布の具体的な計測方法に関する提案は見掛けない．電気的な接点に付着堆積した埃は，機器の故障や火災などの原因となるなどの影響があると考えられる[5]．従来の光学式埃センサーでは，堆積後の埃の検出はできず，また，その位置情報も検出できない．近年ではパソコンの需要が拡大しており，大規模なサーバー室を設ける企業も少なくない．コンピューターの動作不具合の原因は，静電気が原因で起こる埃の付着によるものが報告されている．

床面等に堆積する埃のほとんどが繊維であり，衣類や布製品から抜け落ちたものである．浮遊中の埃は，気流や電界の影響を受け，ランダムウォーク[6]

後、静電気が原因で壁や床面に付着すると考える。また、これらの繊維は、微弱に帯電していることを、2章3項にて実験的に確認している。さらにその帯電性や誘電性のため静電的な特性を示すと考える。

今後は、住宅やマンション・ビル・工場などにも、電源やセンサーネットワークが組み込まれた高機能な床や壁が登場すると予想され、一部その機能提案がされている[7]。堆積後の埃を検出することで、床や壁内のセンサーネットワークと連動することで、室内空間の様々な情報を可視化し、ロボットクリーナーなどの機器のAI制御に応用できると期待する。

本章は、室内の埃のもつ静電的な特性を実験やシミュレーションを用いて確認及び考察する。埃のデジタル的なモデルを作成し、埃モデルとその静電的特性から堆積量を推定できることを報告する。また、埃コンデンサーを試作し、センサーネットワークと静電容量を用いた埃の分布量の検出及び埃堆積位置情報の見える化に関して実験的に考察する。

埃の主成分である繊維質は誘電体と考えることができる。この章では埃を小さな誘電体のランダムな集合体と考え、埃の堆積と空間占有率・静電容量との関係についてモデルを用いて考察する。

5.2 埃の堆積モデルと静電容量

2章3項の埃の帯電量測定から、床に堆積する埃は誘電体と考えられる。ここでは、さらに埃層と空気層が積層化したコンデンサーを形成すると仮定する。この埃によるコンデンサーの静電容量の測定や、充放電などの電気回路現象が観測できれば、埃の堆積量の検出に繋がると考える。埃は線状繊維の集合体で、本来は糸状の繊維が複雑に絡み合う堆積形状は、複雑な構造である。フラクタル的な形状を粗視化した箱型モデルを用いて簡易的な埃コンデンサーモデルを提案する。

5.2.1 単純な箱型埃モデルによるシミュレーション

埃の堆積形状の単純なモデルとして、埃層と空気層を組み合わせた箱型埃コンデンサーモデルを用いて埃の空間占有率と静電容量の関係を考察する。図5.1は、箱型埃コンデンサーの単純なモデルを示す。これらのモデルは、埃の堆積を、埃層と空気層を直列あるいは並列接続に組み合わせたコンデンサーと考え、以下の2種類のコンデンサーモデルとした。ここでは、極板面積 S (1辺

が a 及び b の長方形) と極板間隔 d は一定とし、埃層の縦横の長さをそれぞれ μ と ξ とした。

i) 並列接続型：図 5.1(a)の場合

コンデンサーの電極に対して埃層と空気層を左右に組み合わせたモデルである。等価回路は、空気コンデンサーと埃コンデンサーの並列接続と考える。埃の空間占有率 ρ [%]は埃層と空気層の比から、

$$\rho = \frac{a\xi d}{Sd} \times 100 = \frac{\xi}{b} \times 100 \quad (5.1)$$

となる。

ii) 直列接続型：図 5.1(b)の場合

コンデンサーの電極に対して埃層と空気層を上下に組み合わせたモデルである。等価回路は、空気コンデンサーと埃コンデンサーの直列接続と考える。埃の空間占有率 ρ [%]は、埃層と空気層の比から、

$$\rho = \frac{S\mu}{Sd} \times 100 = \frac{\mu}{d} \times 100 \quad (5.2)$$

となる。

2種類のコンデンサーモデルの合成静電容量 C を求める。ここでは、図 5.1 に示すように、空気層の静電容量を C_a 、埃層の静電容量を C_d とし、それぞれの比誘電率を ϵ_1, ϵ_2 、真空の誘電率を ϵ_0 とする。

箱型埃コンデンサーモデルが、図 5.1(a)のような並列接続型の場合、埃層と空気層の合成静電容量 C は、

$$C = C_a + C_d \quad (5.3)$$

となる。したがって比誘電率 ϵ_1, ϵ_2 、真空の誘電率 ϵ_0 を用いると

$$C = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 a (b - \xi)}{d} + \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 a \xi}{d} = \frac{\epsilon_0 a}{d} \{ \epsilon_1 (b - \xi) + \epsilon_2 \xi \} \quad (5.4)$$

となる。

一方、箱型埃コンデンサーモデルが、図 5.1(b)のような直列接続型の場合、

埃層と空気層の合成静電容量 C は、

$$C = \frac{C_a C_d}{C_a + C_d} \quad (5.5)$$

となる。したがって比誘電率 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 、真空の誘電率 ε_0 を用いると

$$C = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{S}{(d-\mu)} \cdot \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{S}{\mu}}{\varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{S}{(d-\mu)} + \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{S}{\mu}} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{\varepsilon_1 \mu + \varepsilon_2 (d-\mu)} \quad (5.6)$$

となる。

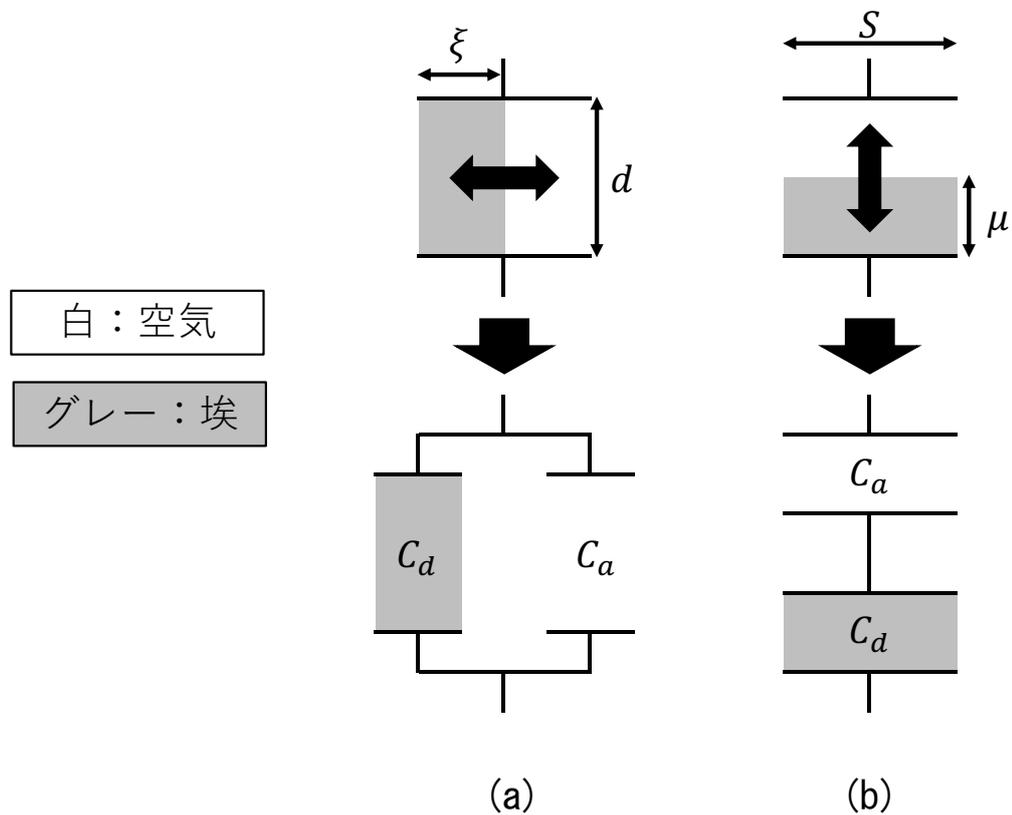


図5.1 空気と埃を組み合わせた単純な箱型埃コンデンサーモデル
(a) 並列接続型コンデンサーモデル, (b) 直列接続型コンデンサーモデル

式 (5.4), (5.6)を用いて、埃の空間占有率 ρ [%]を 0~100[%]で変化させた並列接続型と直列接続型の合成静電容量の計算結果を図 5.2 に示す。埃の空間占

有率 ρ [%] に対して，並列接続型の場合は直線的に，直列接続型の場合は曲線的に，合成静電容量が変化した．実際の埃は，線状の繊維などが複雑に絡み合いながら堆積することから，高さ d に対する μ の大きさが，凹凸に堆積するため，図 5.2 に示す実線と点線の間に静電容量が現れると考察する．

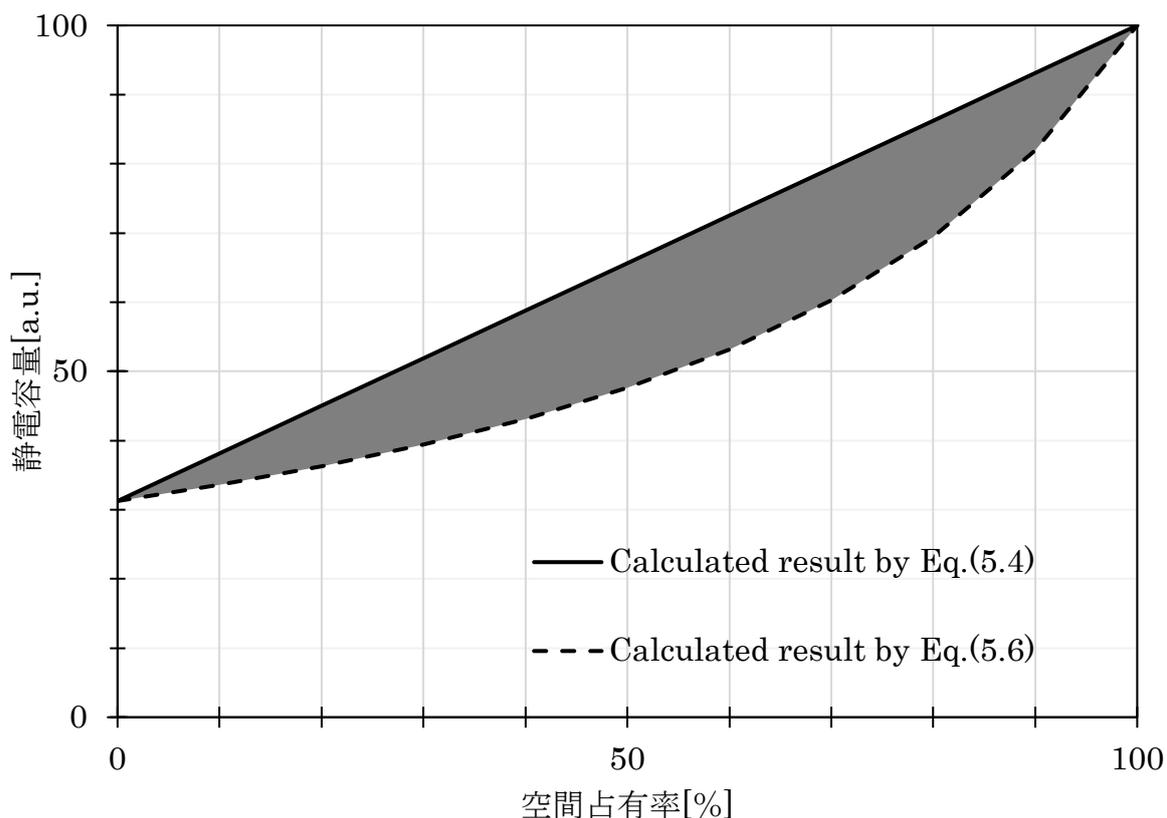


図5.2 埃の空間占有率と静電容量の関係

(実線-並列接続型コンデンサーモデル，点線-直列接続型コンデンサーモデル)

5.2.2 堆積形状の箱型埃モデルによるシミュレーション

本項では，複雑に絡み合う埃の堆積形状をデジタル的に捉え，静電容量をシミュレーションする．ある埃が，図 5.3(a)のような形状で堆積したと仮定する．この埃の堆積形状を 3 次元のデジタル的な形状と考え，図 5.3(b)に示すように，埃の堆積形状を床面に対し垂直方向に複数の断面に分け，できるだけ小さな正立方体で粗視化する．粗視化した形状を埃層と空気層とし，図 5.3(c)に示すよ

うに、積み上げた立体的な箱型埃モデルを作成した。埃をデジタル的に考えると、図 5.4 に示すように、高さが異なる埃層と空気層が直列接続されたコンデンサーが並列に複数接続された等価回路で表すことができる。等価回路から立体的な箱型埃の静電容量を求める。

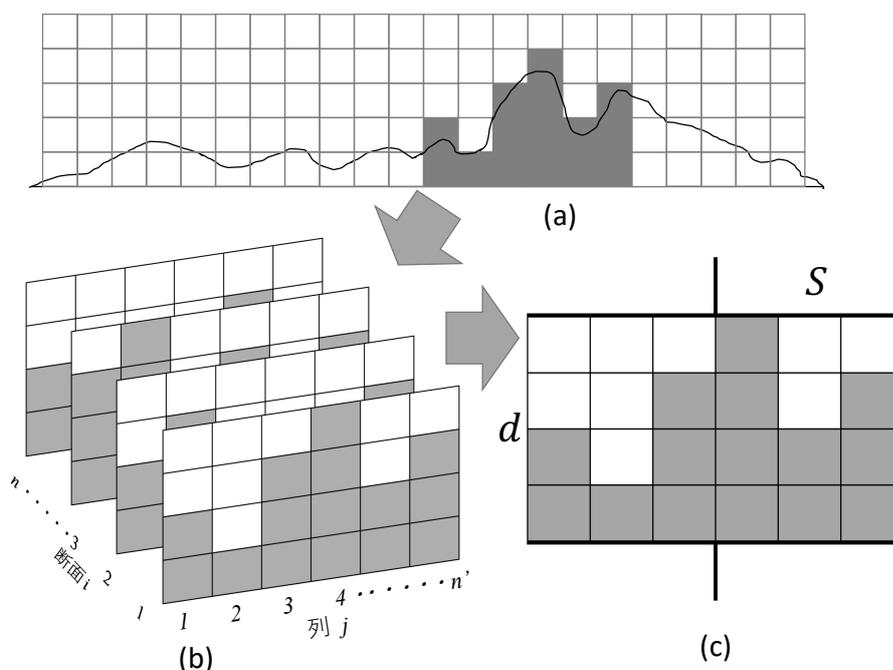


図5.3 デジタル的な埃の堆積の断面モデル

(a)埃の堆積断面，(b)粗視化イメージ，(c)箱型埃コンデンサーモデル

埃全体の静電容量 C は、図 5.3(b) に示すように、各断面 i の静電容量の総和であることから、

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (5.7)$$

となる。さらに、各断面静電容量 C_i は、図 5.3 (b) 及び図 5.4 に示すように、各列 j の静電容量の総和であることから、

$$C_i = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} + \dots + C_{in'} = \sum_{j=1}^{n'} C_{ij} \quad (5.8)$$

となる。よって、埃全体の静電容量 C は、式(5.6)を用いると、

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} C_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{\varepsilon_1 \mu_{ij} + \varepsilon_2 (d - \mu_{ij})} \quad (5.9)$$

となる．ここでsは，極板面積図 5.4 に示す 1 列分の面積になることから，

$$s = \frac{S}{nn'} \quad (5.10)$$

となる．また，埃の空間占有率 ρ [%] は，コンデンサーの大きさに対する埃の体積比から，

$$\rho = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} \frac{\mu_{ij}}{nn'd} \times 100 \quad (5.11)$$

となる．

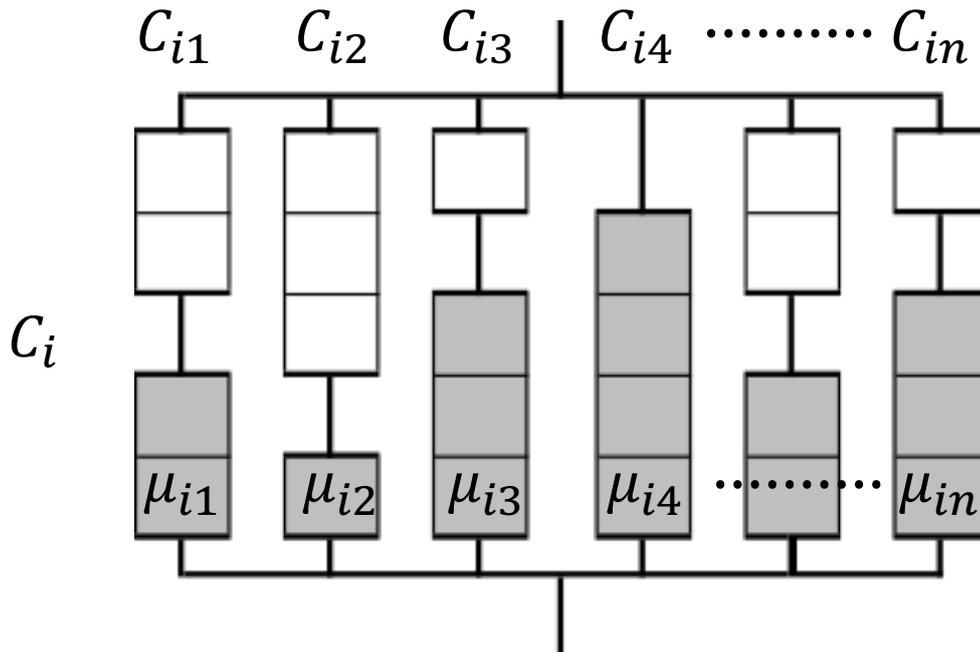


図5.4 デジタル的な箱型埃コンデンサーモデルの等価回路

デジタル的な箱型埃堆積モデルを活用し，埃堆積形状の静電容量をシミュレーションする．本項では，ランダムウォークによって堆積した微細な埃の重なりを，一様乱数を用いてシミュレーションした．ここでは，25[mm]×25[mm]高さ1[mm]の範囲に 0.02[mm]立方体の微細な埃粒子が降り堆積したと仮定する．

1250×1250 個のマスに 0～50 の一様乱数を生成し埃の堆積形状を作成し，シミュレーションした．埃の空間占有率が，12.5,25,50,75[%]に近い結果を抜き出し，式(5.9)を用いて求めた空間占有率と静電容量のシミュレーションを行った．図 5.5 にシミュレーション結果を示す．埃の空間占有率に対して静電容量は増加した．また，3.1 項の考察の通り，静電容量は，式 (5.4)，(5.6)が表す直線及び曲線の間になった．シミュレーション結果から，極板面積 25[mm]角，極板間隔 1[mm]，繊維の比誘電率 3.2 にしたときの埃の静電容量の理論値を推定する．埃が全く無い 0[%]のときの静電容量が，5.5[pF]となるのに対して，シミュレーション結果では，埃が 25[%]前後堆積した場合は，堆積形状にもよるが，おおよそ 6.6[pF]程度となり，その差の 1.1[pF]が埃の堆積量に相当すると推測する．

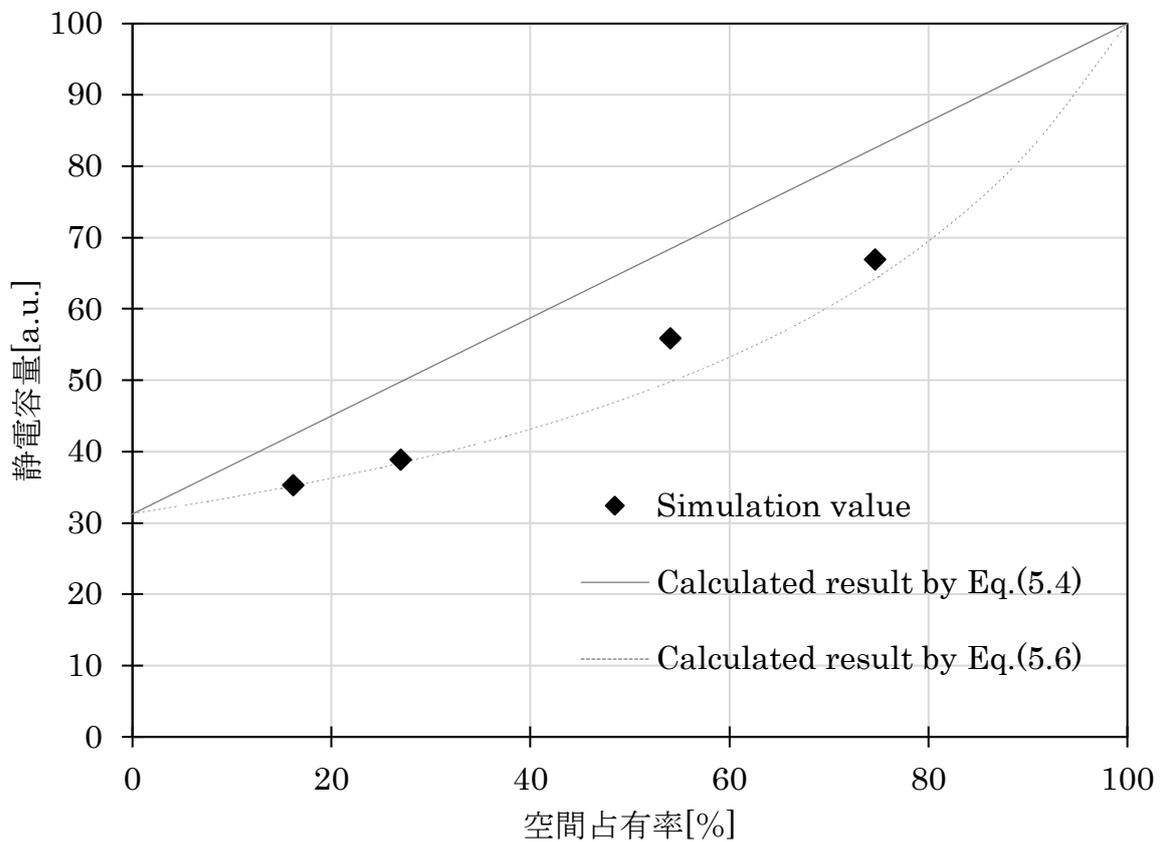


図5.5 堆積形状を用いた埃の静電容量と空間占有率の関係

(◆-シミュレーションの値，実線-並列接続型コンデンサー，点線-直列接続型コンデンサー)

5.3 埃堆積画像の静電容量及び空間占有率の解析

一般的なデジタル画像は、ピクセル毎の各 RGB 値に 8bit を割り当てる。その 8bit データは 2 桁の 16 進数で表せる。2 章 2 項で述べたように、埃の塊は、様々な色の混色で灰色に見える。そこで、黒色板の上に埃を堆積させ、上面から撮影した画像をグレースケール化し、その濃淡レベルを解析することで、空間内の堆積量を割合的に推定できると考える。また、箱型埃コンデンサーを応用し、各ピクセルの濃淡を式(5.9)の μ_{ij} に代入することで、埃堆積画像から静電容量の推定ができると考える。ここでは、埃の堆積画像サンプルを作成し、画像解析を活用して埃堆積画像から空間占有率と静電容量の関係を実験的に考察する。

5.3.1 埃堆積画像サンプルの作成

実験に用いる埃堆積画像サンプルを作成した。図 5.6 に作成した埃堆積画像サンプルを示す。作成したサンプルは、黒背景の板の上に、繊維の疑似埃[8]を散布し、上面からデジタルカメラで撮影した。解析でグレースケール化の濃淡レベルを活用することから、外光を極力一様にして撮影した。黒背景の板及び撮影した画像の大きさは、 160×160 [mm]である。作成した埃堆積画像サンプルは堆積量を増加し、10 種類のサンプルを作成した。

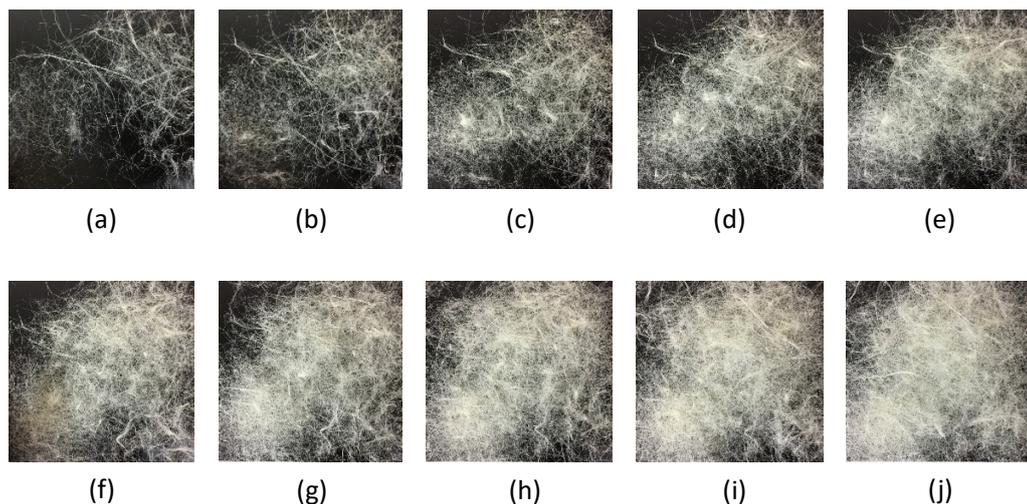


図5.6 埃堆積画像サンプル (a)~(j)の順に堆積量が増加している

5.3.2 埃堆積画像の画像解析ツールの作成

埃堆積画像の空間占有率及び静電容量の解析を目的とした画像解析ツールを、LabVIEW を用いて作製した。作製した解析ツールを図 5.7 に示す。また、この解析ツールの LabVIEW のプログラムを付録 2 に示す。デジタル画像は、均等に分割したピクセル数でデータ化されることから埃の堆積画像をグレースケール化及び 2 値化する。2 値化の閾値を 0 から 255 まで変化させ、ピクセル毎の濃淡レベルをカウントして数値化し、埃全体の空間占有率を求めた。また、その結果に基づいて、埃箱型モデルで検討した式(5.9)を用いて静電容量を求めた。ピクセル毎の濃淡レベルを式(5.9)の μ_{ij} に代入し、誘電率 ϵ_0 などのパラメータをツールに入力することで、静電容量を求める解析ツールを設計・製作した。

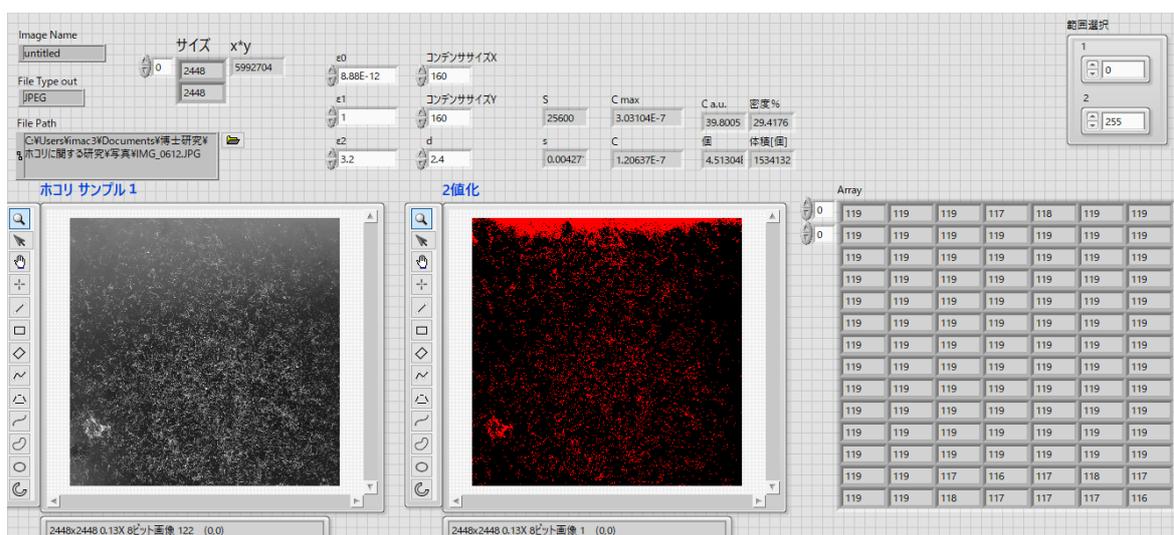


図5.7 LabVIEW を用いて自作した埃堆積画像解析ツール

埃堆積画像の静電容量及び空間占有率の解析の例

5.3.3 埃堆積画像サンプルの解析結果

作製した埃堆積画像サンプルを、LabVIEW を用いて、著者が開発した埃堆積画像の解析ツールを用いて画像解析をした。解析結果を図 5.8 に示す。作製した 10 種の類埃堆積画像サンプルは、5.2.3 項で行ったシミュレーションに非常に近い結果が得られた。このことから、埃の堆積画像から、埃の空間占有率及びその静電容量の推定が可能であると考えられる。

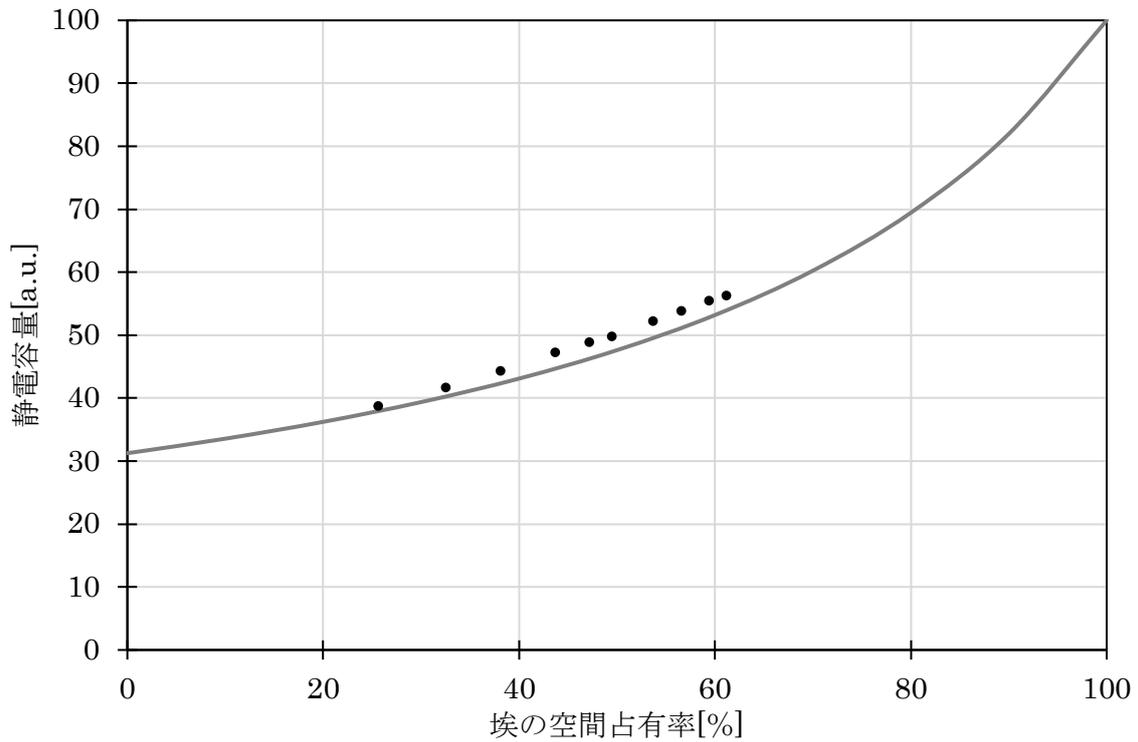


図5.8 埃堆積画像の静電容量及び空間占有率の関係

この実験で用いた、埃の堆積画像（図 5.6）は、グレースケール化した画像のピクセル毎の濃淡レベルに凹凸が生じることがわかった。ある断面の濃淡レベルを図 5.9 に示す。図 5.9 に示すように、断面の濃淡レベルをグラフ化すると、その凹凸の形状にはフラクタル的な性質があると考えられる。

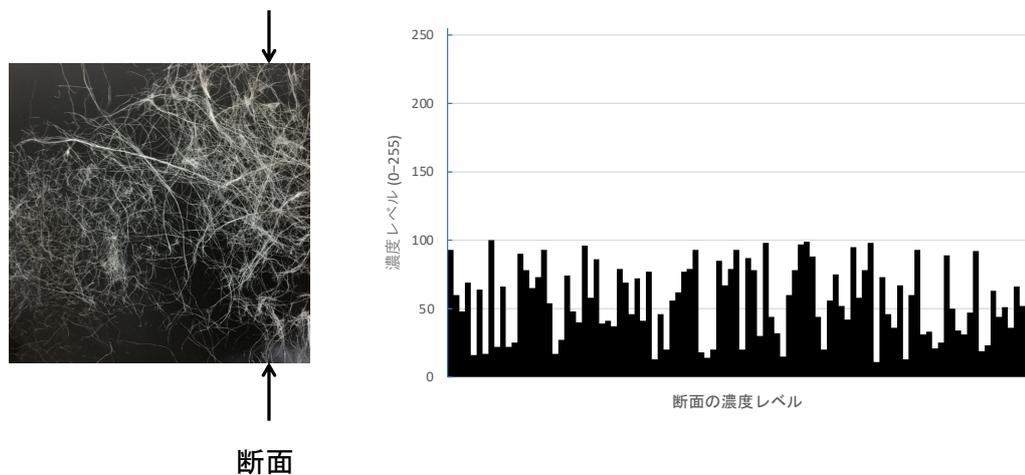


図5.9 埃堆積画像サンプルのある断面の濃淡レベルの解析結果

5.4 まとめ

本章では、埃の主な構成成分がナイロンなどの繊維成分であったことから、埃の離散的な箱型埃コンデンサーモデルを作成し、埃の堆積密度と静電容量の関係を考察した。埃の堆積過程のシミュレーションを用いて埃の堆積形状を生成し、その静電容量と堆積密度の関係を考察した。その結果、埃の静電容量と堆積密度には、相関があることがわかった。また、埃の堆積画像 1 列の濃淡レベルはフラクタル的な形状を示すことも推測される。埃の堆積形状と浮遊及び堆積過程時のランダムウォークには、フラクタル的な性質があると著者は考える。次章において、フラクタル次元と埃の堆積密度の関係をシミュレーション及び実験的に考察し、非接触な埃の堆積量の測定につなげる手法について述べる。

参考文献

- [1] 大谷昌生, 金井徳兼, “埃の静電特性を用いた床面分布量の検出について”, 電気設備学会誌, Vol.1, No.1, 8-pages, (2023).
- [2] 間部文彰, 内藤克浩, 森香津夫, 小林英雄, “照度情報を用いたセンサネットワークデバイスのグルーピング手法の開発”, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-DPS-155 No.23.
- [3] 橋本 知幸, “一般住宅木質フローリング上のダニ相およびダニアレルゲン量の実態調査”, 日本衛生動物学会全国大会要旨抄録集, 60 巻, 第 60 回日本衛生動物学会大会, セッション ID A35, pp.43, (2008).
- [4] 海法克享, 高橋英俊, 富松大, 小林健, 松本潔, 下山勲, 伊藤寿浩, 前田龍太郎, “圧力変動検出スイッチを付加したイベントドリブン型塵埃量センサの開発”, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 325-326, Mar. (2015).
- [5] 木下勝博, “有機絶縁物のトラッキング現象と火災”, 日本鑑識科学技術学会誌, 6 (2), pp. 65-83 (2002).
- [6] 秋元琢磨, “ランダムウォークはじめの一步 自然現象の解析を見すえて”, 共立出版, (2018).
- [7] M. Ohtani, K. Hayashi, K. Tokunaga, J. Takeuchi, N. Kanai, M. Isshiki “Building Smart Block and Base Recognizing 3D Electric Circuit” , International Workshop on Informatics,(2017).
- [8] 出口景悟,鈴木紘夢“家庭環境におけるコードレス掃除機の性能評価方法の検討”神奈川工科大学ホームエレクトロニクス開発学科 卒業論文集, pp.1-8.(2017).

第6章

埃のフラクタル的堆積形状の3次元堆積モデルとシミュレーション

第6章「埃の3次元堆積モデルとシミュレーション」では、埃の堆積形状の観察からその特性を解析し、ランダムに成長する埃の堆積過程をモデル化する。微細な埃の集合過程として、2次元平面内でランダムに成長し、それが積層化することにより3次元的に成長する埃堆積モデルを提案する。ランダムに成長する3次元埃堆積過程をLabVIEWによるシミュレーションを行い、3次元的な埃堆積画像を生成する。シミュレーションで得た3次元埃堆積画像と実際の埃堆積画像を比較及び解析する。フラクタル次元と空間占有率の関係から、3次元埃堆積モデルの有用性を考察すると共に埃の成長過程がフラクタル的な成長であることを示した。本章で用いたランダムに成長する埃の3次元堆積モデルは、電気学会[1,2]、日本シミュレーション学会論文誌[3]及び同学会国際会議[4]に投稿報告している。

6.1 はじめに

前章までに、埃の堆積形状が複雑な形状をしていることから、フラクタルの概念に基づいて扱えないか述べている。3章で述べた凝集メカニズムは、様々なモデルが検討され、コンピューターを活用したシミュレーションが報告されている[5]。埃の堆積過程や堆積形状も同様な手法を用いることでシミュレーションが可能と考える。本多氏らの研究では、人の歩行で発生する気流の影響による室内の埃の飛散に関する3次元解析について報告されている[6]。しかし、埃の堆積過程をモデル化し、その形状の解析を行った実験は報告されていない。ランダムに成長する埃をモデル化しシミュレーションすることは、埃の3次元的な堆積量の非接触的な計測に繋がると考える。

本章では、埃の特性を観察し、モンテカルロ法を用いた2種類のランダムに

成長する埃の 3 次元的な堆積モデルを提案し検討する。ひとつは、微細な埃粒子をランダムウォーク的に浮遊させ堆積させる 3 次元的な堆積モデルである。他方は、微細な埃を 2 次元平面内でランダムに成長させ、それを積層化することにより 3 次元的に成長させる埃堆積モデルである。

提案・検討した 2 種類のモデルの妥当性について考察し、LabVIEW を用いてシミュレーションを行った。ランダムに成長する 3 次元埃堆積過程を、LabVIEW を活用してシミュレーションし、3 次元的な埃堆積画像を示す。シミュレーションで得た 3 次元埃堆積画像と実際の埃堆積画像を解析・比較する。フラクタル次元と空間占有率の関係から、3 次元埃堆積モデルの有用性を考察すると共に、埃の成長過程のフラクタル的な特性について考察する。

6.2 モンテカルロ法を用いたシミュレーション

確率的な現象をコンピューターで再現するには、不規則な数、すなわち乱数を用いる。乱数を用いたコンピューター実験のことをモンテカルロ法という [7]。離散変化モデルのランダム現象のシミュレーションは、モンテカルロ法が基本となっている。モンテカルロ法の最初の例は、18 世紀のフランスの自然科学者 Comte de Buffon の実験に見られる。間隔 $2L$ の 2 本の平行線を引いた平面の上に長さ $2a$ ($a < L$) の針を N 回落し、針と平行線の交わる回数 n を数えることにより、 π の近似値を $2aN/nL$ から計算できる [8]。また、モンテカルロ法が実用化されたのは、第 2 次大戦中の研究である。ロスアラモス科学研究所の John von Neumann らは、中性子が物質の中を動くさまを知るために、通常の方法では危険で時間がかかりすぎるため、Buffon の珍奇とわれてきた方法を、コンピューターで再度採用した。そしてこのやり方の暗号名を、知的な賭遊びと同じ原理に基づいていることから、モンテカルロ法と呼んだことがその由来である。

埃の浮遊モデルやフラクタル的な成長モデルでは、一様乱数を用いてモンテカルロ法によるモデルを設計し、シミュレーションを行うことにした。

6.3 フラクタル次元解析アプリケーション

画像のフラクタル次元解析には、(有) デジタル・ビーイング・キッズ社製の PopImaging を活用した。PopImaging は、多彩な画像解析・処理機能を備えたソフトウェアである。ヒストグラム解析、スペクトル解析、テクスチャ解析

をはじめとした解析機能と、空間フィルター、リサンプルフィルタによる拡大・縮小、レンズ歪補正などが揃う処理機能を合わせて、100種類以上の機能を搭載する。BMP/JPEG/TIFFなどの一般的な画像形式のほか、PPM/PGM/PBM、医療用画像ファイルであるDICOM、さらに8bit RGB、8/16bit グレースケール画像などにも対応する。

画像解析では、特定ピクセルのRGB値を得るといった簡単ものから、「画像の一部や全体のピクセル値の平均/最大/最小値を得る基礎的な算術演算」「0～255までのピクセル値の分布をグラフ化する『ヒストグラム表示』」といった高度な解析までが可能である。画像を水平/垂直に切断した切断面におけるピクセル値のグラフ表示「断面表示」や、水平/垂直方向のピクセル値を平均化した「投影表示」なども行える。解析機能の多くは、RGBのチャンネルごとに対応できる。

解析の補助とするため、明るさ/コントラスト/ガンマ値、色相/彩度/明度、ヒストグラムの3種類の画像補正機能も備えている。フォトタッチソフトの色調補正とほぼ同等の機能だが、PopImagingでは「解析用の補助補正」機能という位置づけになっている。解析結果を元にした（または解析用の助けとなる）画像操作機能もある。部分切り抜き、画像のトリミングはもちろん、他の画像データを読み込んだのAND/OR/NOTといったピクセルごとの論理演算、拡大・縮小や、たる型/糸巻き型の歪み補正などの幾何学的変換、元画像の濃淡からピクセル変換を行う濃淡変換、グレースケール/2値化/任意色数への減色といった色数変換、特定色域指定による画像抽出などを行える。PopImagingのフラクタル次元解析を活用した先行研究では、佐藤氏らの「フラクタル解析を用いた景観の数値化と適用事例」でも活用されている[9]。本研究では、LabVIEWでシミュレーションを行い、生成した埃の堆積画像や実際の埃の画像のフラクタル次元解析にPopImagingを活用した（図6.1）。

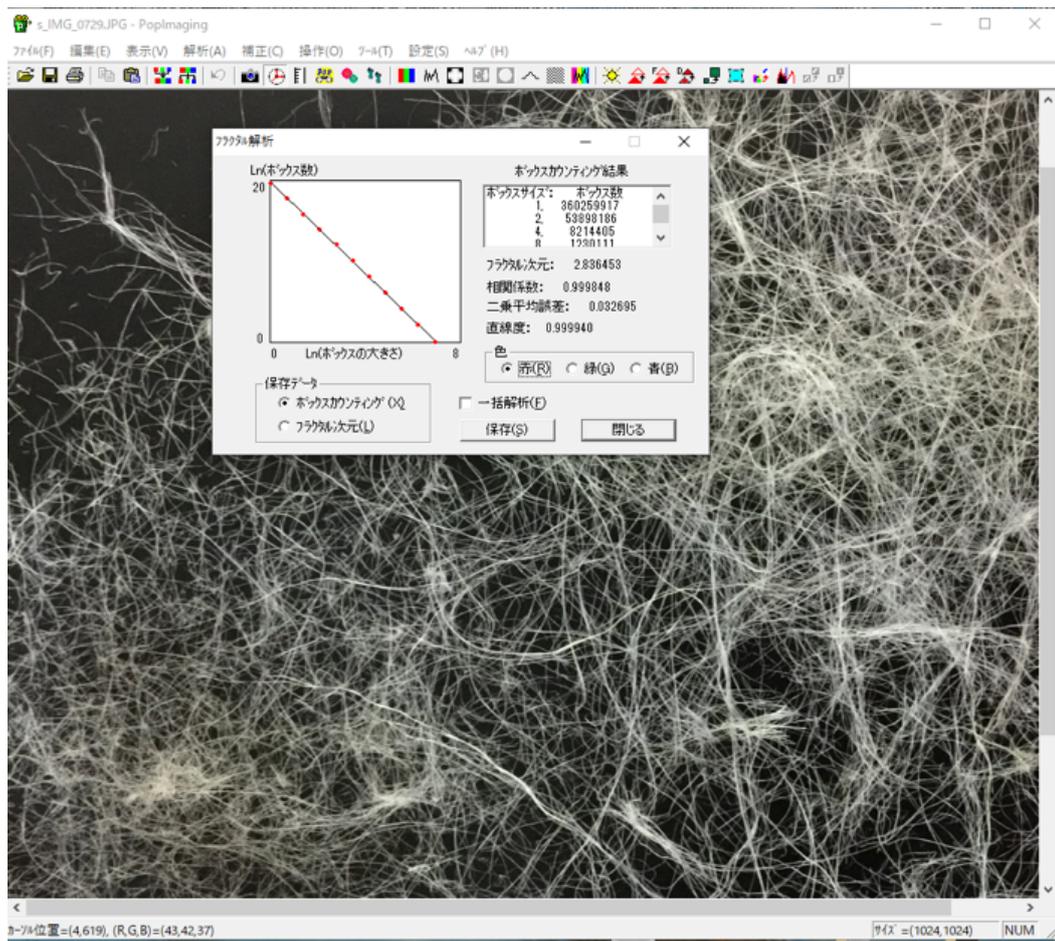


図6.1 PopImaging を活用した埃のフラクタル次元解析の様子

6.4 埃の堆積モデルの検討

ここでは、ランダムに堆積する埃の堆積モデルを 2 種類提案する。モデルの基本は、ランダムウォークによる不規則な運動による埃の堆積をモデルである。ここで検討する堆積モデルでは、微細な埃の大きさを、 $0.1[\text{mm}]$ の立方格子とする。これは、3 章 2 項 図 3.1 の埃の顕微鏡写真に基づき、シミュレーションモデルの微細な埃の大きさとした。

6.4.1 埃のランダムウォーク的堆積モデル

埃のランダムウォーク的堆積モデルでは、生活空間内の埃の浮遊運動をランダムウォークと仮定し、堆積運動のモデルを検討する。検討した埃の運動モデ

ルをもとに、埃の堆積過程のシミュレーションツールを作成する。作成したシミュレーションツールを活用して、生活床面に堆積する埃の堆積画像を生成する。生成した堆積画像から画像解析を用いてフラクタル次元を求める。求めたフラクタル次元から静電的特性への変換方法を検討する。ただし、人の動きなどで発生する気流の影響に関しては、本多氏らの研究報告[6]があることから、ここでのモデルでは考慮しないこととする。

第3章 5.2 項で述べたランダムウォークを参考に、埃の浮遊のランダムウォーク的な導出を試みた。しかし、時間毎に変化する速度ベクトルや摩擦係数を考慮することは非常に困難である。そこで、3次元座標を用いてランダムウォーク的な運動モデルを検討することにした。はじめに、2次元方向のランダムウォーク的な運動モデルを検討した後に、落下方向を加えた3次元座標で微細な埃粒子の運動モデルを検討した。

衣類や布団などの布製品から抜けた微細な繊維が空気中に発生したとする。その点 $P_0(x_0, y_0)$ を開始座標とするランダムウォークが開始すると、次の座標点 $P_1(x_1, y_1)$ は、第3章 5.2 項で述べた実数を用いたランダムウォークの式(3.2)～(3.4)を参考に、はじめのステップでは、

$$x_1 = x_0 + Ka_{x0} \quad (6.1)$$

$$y_1 = y_0 + Kb_{y0} \quad (6.2)$$

とする。ここで用いる a_{xi}, b_{yi} は、 -0.5 [mm]以上 0.5 [mm]未満の範囲の実数値の一樣乱数である。また、 K は運動倍率定数 ($0 < K$) である。ここで示すモデルでは、運動倍率定数 K を1とするが、シミュレーション時の観測範囲を変化させる時、運動倍率定数 K を調整することで観測範囲の縮小拡大ができる。但し、拡大方向に関して理論的に無限に拡大できるが、観測範囲やシミュレーションで使用するコンピューターの性能により、10倍程度が現実的な範囲と考える。さらに次のステップでは、

$$x_2 = x_1 + Ka_{x1} \quad (6.3)$$

$$y_2 = y_1 + Kb_{y1} \quad (6.4)$$

となる。故に、 n 回運動後の埃の座標 $P_n(x_n, y_n)$ は、総和式を用いて

$$x_n = x_0 + K \sum_{i=0}^n a_{xi} \quad (6.5)$$

$$y_n = y_0 + K \sum_{i=0}^n b_{yi} \quad (6.6)$$

となる．点 $P_0(0,0)$ に発生し， $n = 100$ 回運動した埃の軌跡を図6.2に示す．この軌跡も第3章5.2項で述べたように，フラクタル的な性質があるとされている．

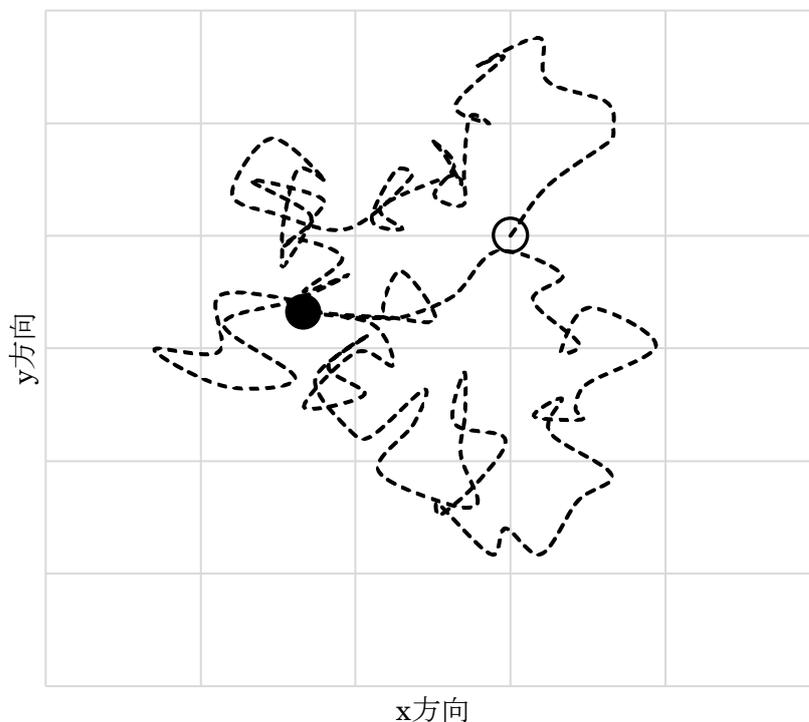


図6.2 埃のランダムウォークの軌跡（○を始点，●終点を示す）

次に，埃の落下方向について検討する．浮遊する微細な埃は，重力と流体抵抗がつりあった終端速度[10]で落下する．このモデルでは，埃の繊維を一粒の粒子として扱い， z 軸方向終端速度で落下させる．このときの埃粒子の落下軌跡を図6.3に示す．このように，空気中に浮遊する埃の軌跡を，乱数によるランダムウォークを用いて描くことで，埃の堆積過程をシミュレーションすることができる．また，浮遊させる微細な埃粒子を複数個発生させ，ランダムウォーク後の最終地点を集めることで，埃の堆積モデルを作成できると考える．

生活床面に堆積する埃の堆積過程をシミュレーションするツールの開発を行った。開発環境には、LabVIEW を用いた。作製したシミュレーションツールの LabVIEW のプログラムを付録 3 に示す。シミュレーションの結果床面に堆積した埃の堆積状態を表す図形を画像データとして作成する。

開発したシミュレーションツールを活用し埃の堆積過程をシミュレーションした。シミュレーション条件は、微細な埃に見立てた 100 個の粒子（以下埃粒子）を、 $4[\text{mm}^2]$ のエリア内にランダムに発生させ、 $10[\text{mm}]$ 落下させる。中心 $1[\text{mm}^2]$ の埃の堆積図形を画像化した。

図 6.4 に埃の堆積過程シミュレーション結果を示す。図 6.4 に示すように、 $z = 0$ の $x - y$ 面内にランダムに発生した 100 個の埃粒子が $x - y$ 面内でランダムウォークしながら落下し、床面に堆積する。

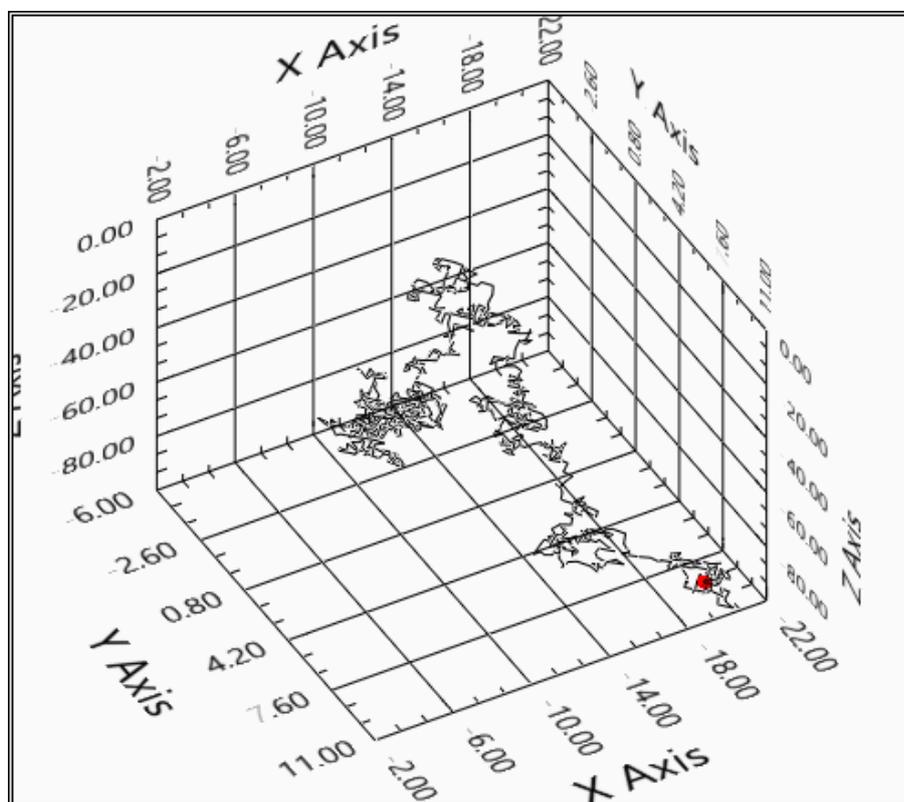
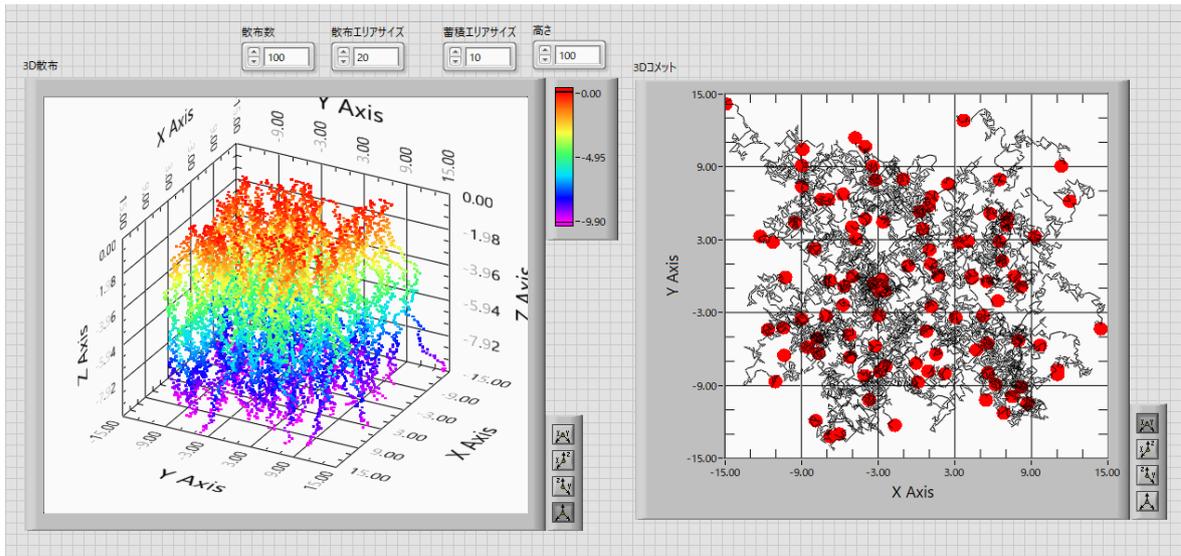


図6.3 微細な埃粒子を一定速度で落下させた時の運動軌跡



(a) (b)

図6.4 浮遊する埃の堆積過程 (a) ランダムウォークによる埃の落下軌跡，
(b) 埃の堆積の軌跡を上から見た図形

床面に到達した最終地点を集めて埃の堆積画像を生成する．図 6.5 に，図 6.4(b)の黒点を集めた埃の堆積画像を示す．生成した堆積画像 $1[\text{mm}^2]$ を 10×10 ピクセルのドット画像で示す．また，実際の埃の堆積画像との比較を目的に，埃の堆積画像を拡大した画像を作製した．実際の埃の堆積画像を図 6.6 に示す．シミュレーション画像と実際の埃の堆積画像との比較の結果，ドット画像が生成できた．

シミュレーションで生成した埃の堆積画像のフラクタル的な次元を求める．シミュレーションで生成した図 6.5 の埃蓄積画像から，本章 3 項で説明した PopImaging を用いてフラクタル次元を求めた．解析結果は，約 2.55 次元であった．このことから生成した埃の堆積画像が立体的なフラクタル次元がわかった．シミュレーションの比較として，第 5 章 3.1 項で活用した埃堆積画像と比較した．比較に用いた画像を図 6.6 に示す．シミュレーションで生成した画像サイズに合わせるため，埃堆積画像の一部を切り抜いた．この画像から求めたフラクタル次元は 2.62 であった．

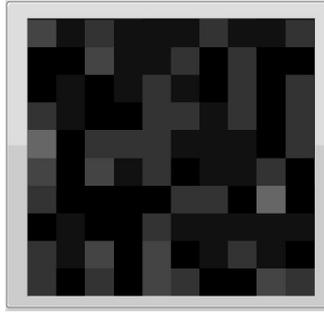


図6.5 シミュレーション結果で生成した埃の堆積画像

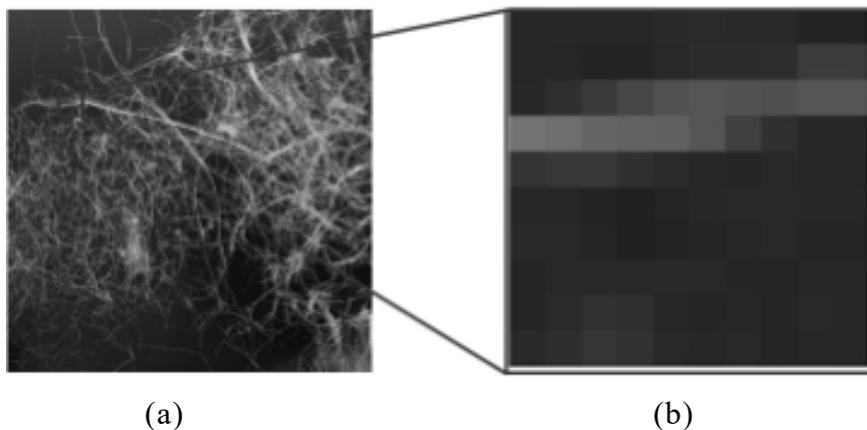


図6.6 比較に用いた実験により作成した埃の堆積画像の拡大画像
(a)拡大前, (b) 拡大後

6.4.2 埃の3次元的積層モデル

生活空間を浮遊する微細な埃は、2.2節で述べたように、その構成成分が主に衣類から抜け落ちるナイロンやポリエステルなどの繊維であることから、帯電していると考える。微弱に帯電した微細な埃は、埃同士が静電気力で引力が生じ、繊維が絡み合い大きな埃へと成長すると考える。繊維質な埃の微細要素が2次元的な動きが絡み合い積層化していることが、前項の議論や実際の埃の堆積する様子より確認できる。ここでは、2次元的に成長したフラクタル図形が層形状を構成し埃を形成する3次元堆積モデルを検討する。

図6.7に示すように、前述の埃堆積モデルでは、ランダムウォークの最終位置点をモデル化した。ここでのモデルは、ランダムウォークの各ステップに現れる点(座標)を集めてモデル化する。

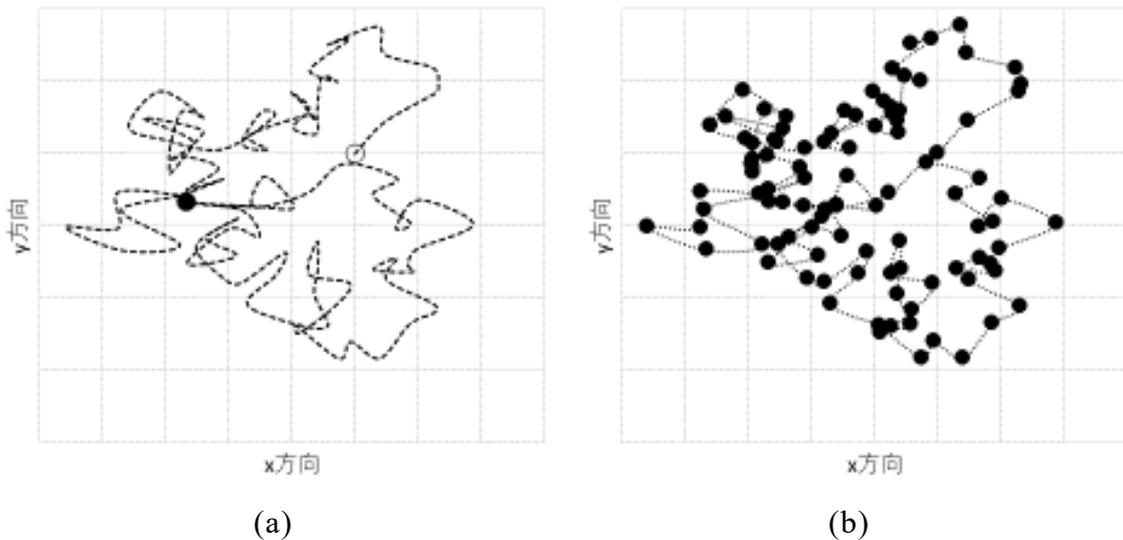


図6.7 埃堆積モデルの比較

- (a) ランダムウォークの軌跡と最終地点を埃の堆積位置とするモデル，
 (b) ランダムウォークの各ステップに現れる点を埃の堆積位置とするモデル

積層モデルにおいても，それを構成する各 2 次元平面内のランダムウォークは，式(6.5)，(6.6)を用いてモデル化する．ただし，このモデルでは， n を埃の成長回数， K を埃の成長倍率とする．埃の画像を構成する画像の規格を定める．観測範囲を $550[\text{mm}]$ 角の正方形とし，ランダムに発生する微細な埃を図 3.1 の観察より，1 辺 $0.1[\text{mm}]$ の立方格子とする．シミュレーションで生成する 3 次元埃堆積モデルの 2 次元画像は，画素数 500×500 [ピクセル] のグレースケール画像とする．したがって 1 ピクセルあたり $0.1 \times 0.1[\text{mm}]$ 角とする．一般的なグレースケール画像の濃淡レベルは，黒を 0，白を 255 とする 8bit で表すことから，積層化した埃の成長図形を階層毎の濃淡レベルを 0 から 255 の等間隔に扱い，3 次元埃堆積画像を生成する．

埃の構成要素は，ランダムウォークした各ステップ後の座標点のみを埃の構成点とし，点と点を結ぶ直線は構成要素に含まないこととした．ランダムに現れた埃の座標を描画（プロット）すると図 6.8 のようになる．ランダムに発生した座標を粗視化することで，図 6.8 に示すように埃の成長をデジタル化できる．ここで粗視化する格子サイズを $0.1 \times 0.1[\text{mm}]$ 角とし，後に画像化するピクセルサイズと同じにする．次にランダム発生する埃の座標の相対距離の最大値が $0.5[\text{mm}]$ のため，隣接した埃同士は絡み合う．一方，離れた座標で発生した埃は孤立するが，後にその座標に隣接した埃が発生することで成長することができる．このようにして，繊維状の構造やそれらがクラスタ化する様子を，部分的

ながら再現できると考える．成長回数 n を増やすことで，図 6.9 に示すように 2次元方向に大きく成長する埃のデジタル画像を生成した．

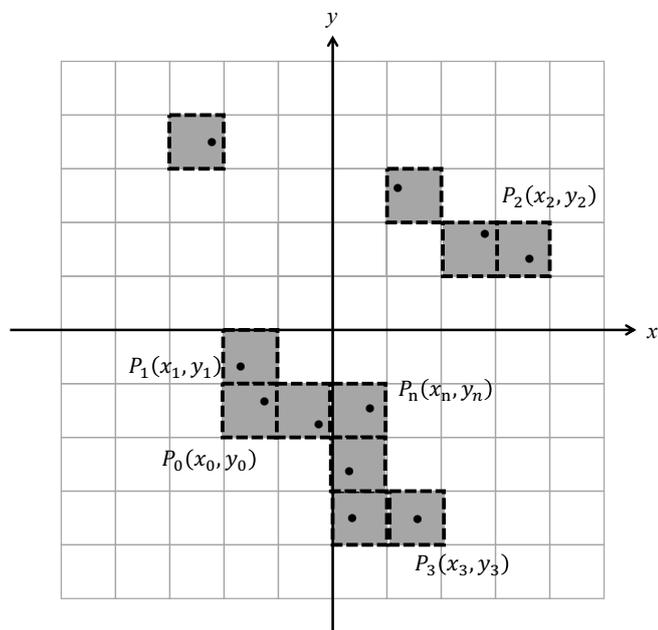
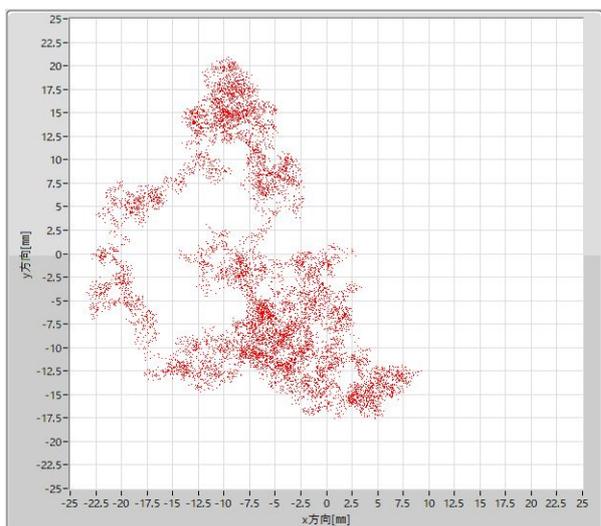
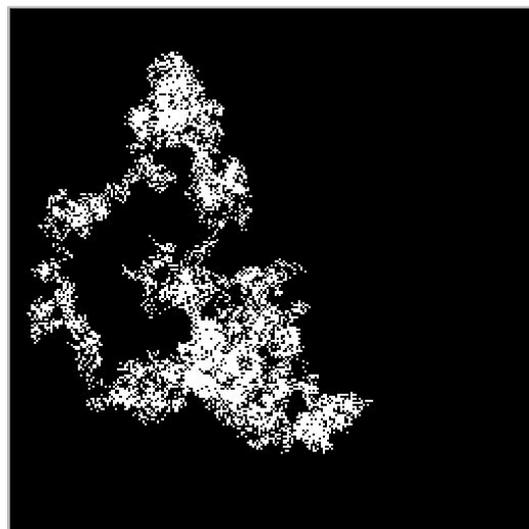


図6.8 2次元方向に成長する埃の成長過程



(a)



(b)

図6.9 2次元に成長する埃の計算例

(a) 埃の成長の描画例，(b) 埃の成長の粗視化例

3次元的な堆積モデルは、2次元平面に n 回成長した埃モデルを N 層作成し、重ね合わせることで作成する。図 6.10 に、3次元的な埃の堆積成長モデルを示す。合計の成長回数 N' は、

$$N' = n \times N \quad (6.7)$$

となる。x-y 方向 n 回成長と z 方向 N 層の積で成長回数 N' を決定する。

モデル作製時は 1 層目から順番に計算していく。1 層目を n 回成長させた後 2 層目を計算する。このとき、2 層目開始座標 $P_0(x_0, y_0)$ は、1 層目の n 回成長後の座標 $P_n(x_n, y_n)$ とする。故に N 層目の開始点 $P_0(x_0, y_0)$ は、 $N-1$ 層目の $P_n(x_n, y_n)$ と同じ座標になる。したがって、基本的には、上下の層は互いに総計的に独立に生成されるが、隣接する層間において、この 1 点のみが座標を共有していることになる。この層間の独立性は、クラスタの上下への成長を無視することを意味することを意味するが、このシミュレーションの結果は、その 3 次元構造ではなく、上から撮影した濃淡画像に変換して、そのフラクタル表面の構造を評価することから、質量フラクタルとしての内部構造の不備の影響は大きくはないものと考えられる。このように上方向に連続的に成長堆積していくモデルを検討した。

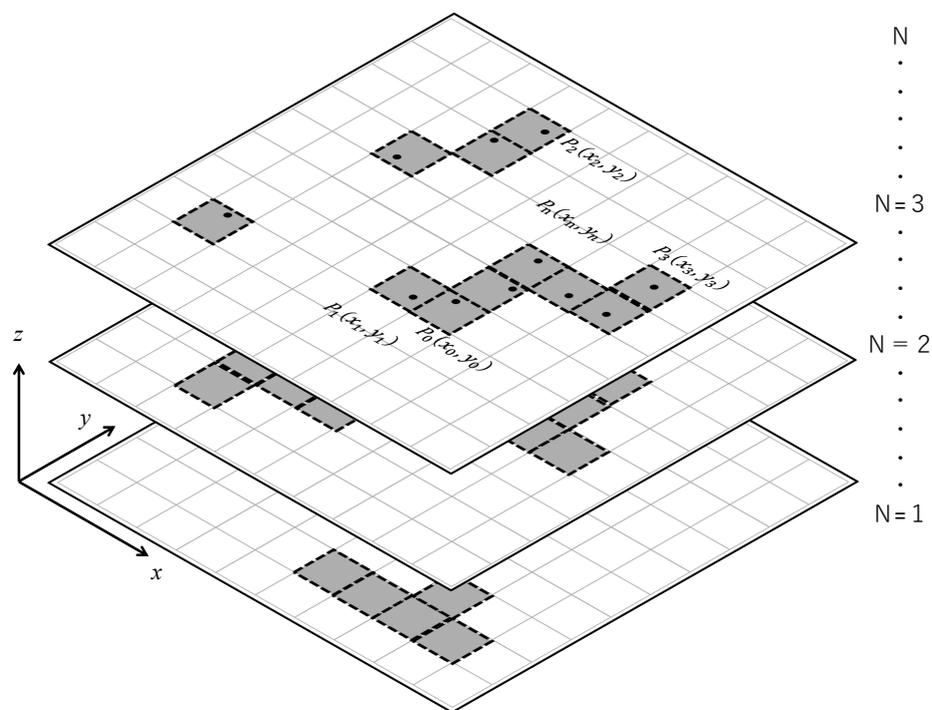
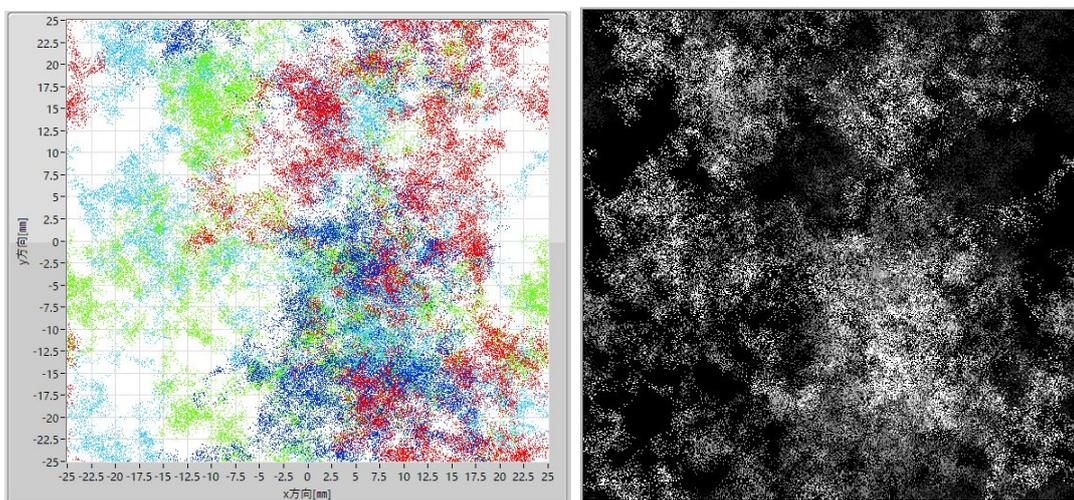


図6.10 3次元的に堆積する埃のモデル

検討したフラクタル的に成長する埃の 3 次元的積層モデルを活用したシミュレーションにより埃の堆積画像を生成した。図 6.11 にフラクタル的に成長する埃の 3 次元的積層モデルによるシミュレーション例を示す。また、作製したシミュレーションツールの LabVIEW のプログラムを付録 4 に示す。前述の通り、シミュレーションで成長する埃の大きさを 1 ピクセルサイズの $0.1[\text{mm}^2]$ に相当させる。また、z 軸方向の埃の重なりを、グレースケールの濃度値の加算によって表現、画像を生成する。一様乱数を用いた 1 層の成長回数 n を、4 万回から 20 万回まで 4 万回毎に変化させた 5 種類の画像を各々 4 層作成し、積層化した埃堆積モデルの画像を図 6.12 に示す。成長回数が異なる図 6.12(a)~(e) の 5 種のシミュレーション結果を埃堆積画像として表したものである。また、シミュレーションで生成した 3 次元埃堆積画像との比較及び評価に用いる実験的な埃の堆積画像として、5.3 項で撮影した埃堆積画像サンプルを活用する。図 6.13 に撮影した埃堆積画像サンプルを示す。この画像は、 $160 \times 160 [\text{mm}]$ 角の撮影範囲を黒背景にし、疑似埃[11]を活用し約 $500[\text{mm}]$ の高さから人工的に堆積させ真上から撮影した。空間占有率の異なる 5 種の埃堆積画像を図 6.13 (A)~(E) に示す。シミュレーション及び実験により生成された画像について、空間占有率とフラクタル次元の比較に活用する画像の大きさを表 6.1 に示す。



(a)

(b)

図6.11 フラクタル的に成長する埃の 3 次元的積層モデルのシミュレーション例

(a) 埃の成長の描画例, (b) 埃の成長の粗視化例

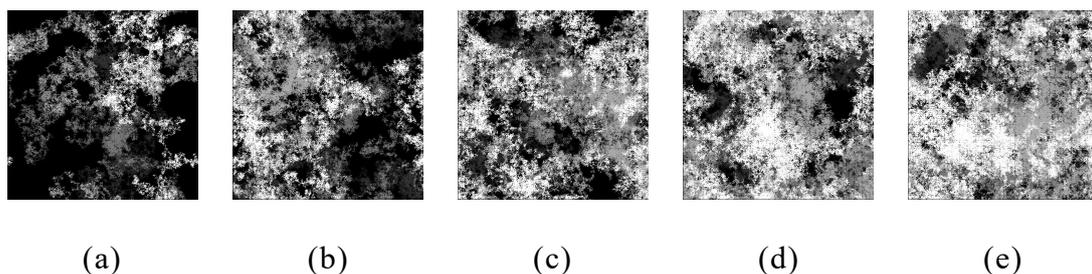


図6.12 シミュレーション結果から生成した N=4 層の埃堆積画像

(a)~(e)で埃の堆積量が増加する

(埃の成長回数 左から n =4, 8, 12, 16, 20[万回])

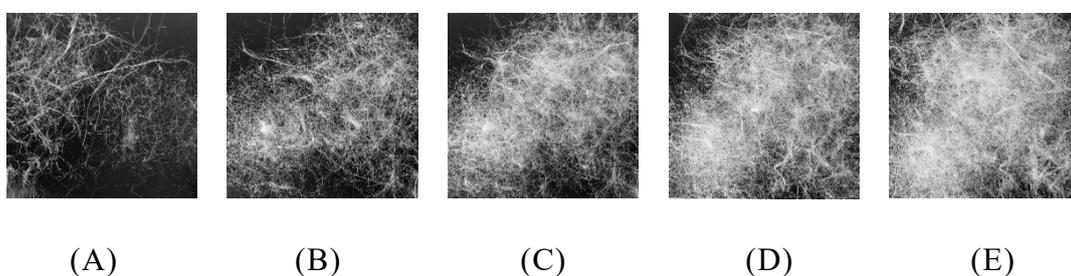


図6.13 実際の埃の堆積画像 (A)~(E)で埃の堆積量が増加する

表6.1 比較した画像の大きさ

	3次元埃堆積モデル(図 6.12)	実画像(図 6.13)
画像数[ピクセル]	500×500	1024×1024
観測範囲[mm×mm]	50×50	160×160

ボックスカウンティング法は、対象とする画像の表面を 1 辺 r の立方体で覆ったとき、その中に対象とするフラクタル表面が含まれる立方体の数 $N(r)$ を数え、 r を変化させたときの $\log(r)$ に対する $\log(N(r))$ の傾きから、フラクタル次元 D を算出する方法で、式(6.8)のように表わされる。

$$D = - \frac{\Delta \log(N(r))}{\Delta \log(r)} \quad (6.8)$$

ただし、 Δ は $\log(r)$ の変化に対する $\log(N(r))$ の変化が直線的であるとみなされる区間を表すものとする。図 6.12 (a)~(e)に示すシミュレーションから生成

した 3 次元埃堆積画像及び図 6.13 (A)~(E)に示す疑似的な埃の堆積画像の解析結果を図 6.14 に示す. 図 6.14 は両対数グラフで表されており, 各埃の堆積画像の $\log(r)$ に対する $\log(N(r))$ の変化は直線性を示しており, これらの画像がグラフに示されたスケール範囲内においてフラクタル表面の特性を有することがわかる. 各埃堆積画像の解析結果に最小 2 乗法を活用して回帰直線の傾きからフラクタル表面の次元 D を算出した.

埃の堆積画像の空間占有率の解析には, 5 章 3.2 項で作成した空間占有率解析ツールを活用した. グレースケール化された堆積画像を 2 値化の閾値を 0 から 255 に変化させ, ピクセル毎の濃淡レベルをカウントして数値化し, 埃全体の空間占有率を求めた. 図 6.15 は, 画像を画像処理し空間占有率を解析した際の処理画面を示す. 左が元画像, 真中が 2 値化時の画像, 右が各ピクセルの濃淡の解析結果を示す.

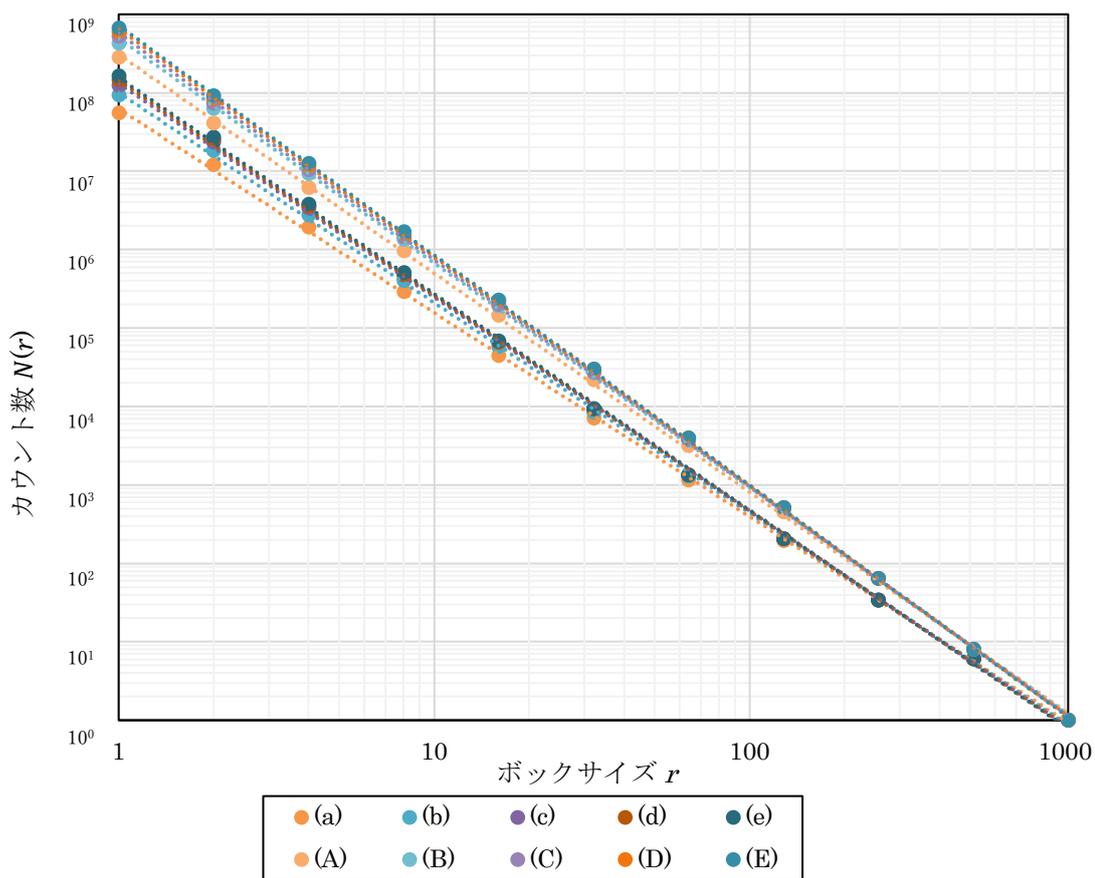


図6.14 シミュレーションから生成した 3 次元埃堆積画像及び実際の埃の堆積画像における $N(r)$ の r 依存性

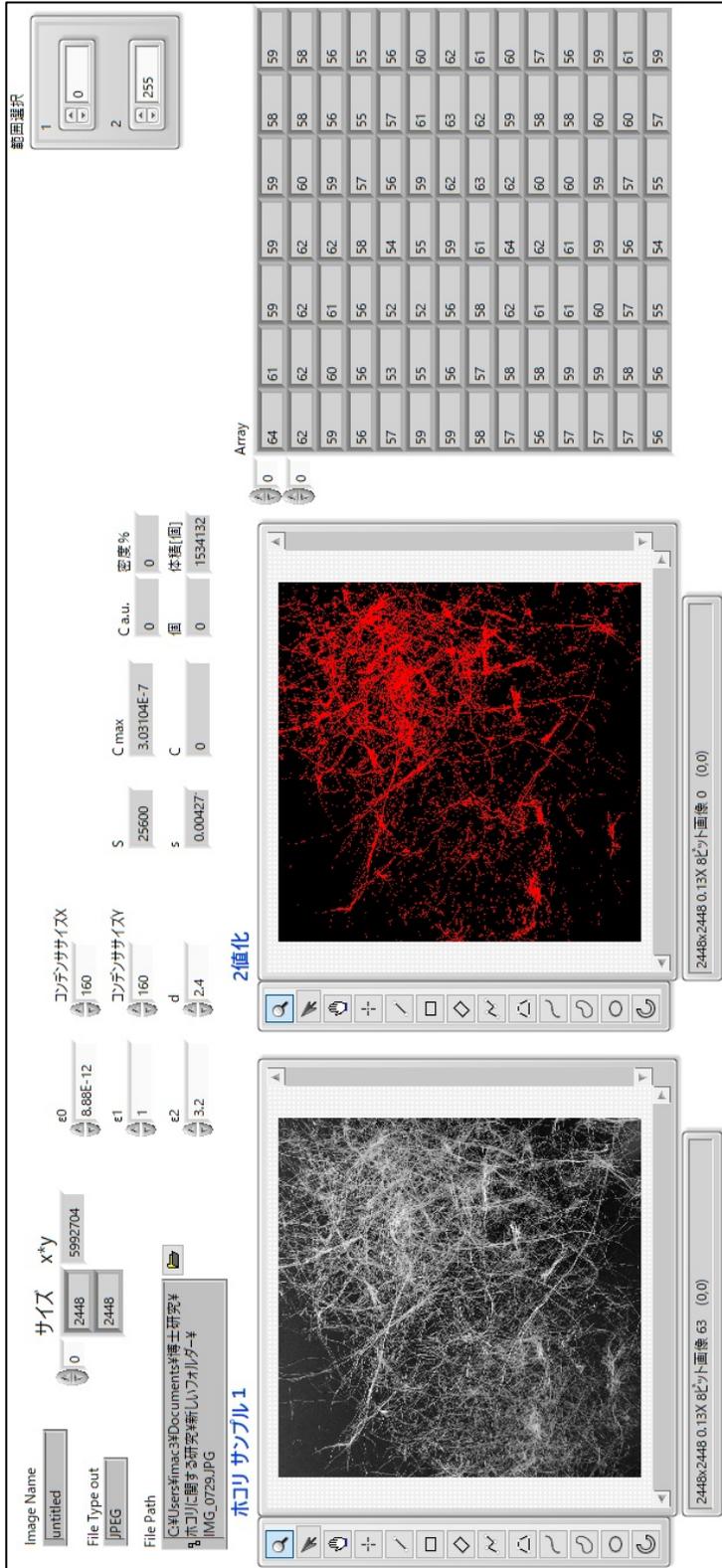


図6.15 埃堆積画像の空間占有率の解析の様子
 (左：元画像，中：2値化画像，右：ピクセル毎の濃淡値)

埃のランダム的な堆積過程シミュレーションの結果から生成した、堆積画像 図 6.12 (a)~(e)及び比較用に撮影した堆積画像 図 6.13 (A)~(E), 計 10 種の画像のフラクタル次元と空間占有率の関係を図 6.16 に示す. 図 6.16 から, フラクタル次元と空間占有率の相関係数は, 疑似的な埃堆積画像の場合は 0.99, シミュレーションで生成した 3 次元埃堆積画像の場合は 0.98 と双方の相関を確認した. このことから, これまで議論した初歩的な 3 次元埃堆積モデルがある程度有効であると考ええる. また, 埃の堆積画像のフラクタル次元解析より空間占有率を推定できると考える. 但し, この方法は, 空間占有率 10[%]~60[%]程度に限られると考える. 理由は, グレースケール化したデジタル画像に置いて, 空間占有率 0[%]では黒色一色に, 100[%]では白色一色になり, 自己相似性が失われフラクタルとして扱えないからである.

一方, 図 6.16 におけるフラクタル表面の次元と空間占有率の関係から, 基準となる切片が異なった原因として, 比較に活用した埃堆積画像である図 6.13 が, シミュレーションの結果から生成した堆積画像である図 6.12 より比較画像の尺度によるものと考ええる. フラクタル次元の基本的な定義は, 粗視化の度合い (あるいは観測の尺度) r とそのスケールにおけるボックスの個数 $N(r)$ によって定義すべきであると考えられる[12]. このことから, 観測の尺度が r のときのフラクタル次元 $D(r)$ は,

$$D(r) = -\frac{d \log(N(r))}{d \log(r)} \quad (6.9)$$

とするのが望ましいと考える. 実際の計測の際は, 画像の尺度やピクセル数等に注意する必要がある. 埃の堆積画像のフラクタル次元及び空間占有率から, 画像処理を用いて埃の立体情報の検出ができた. 同様の方法で非接触的に物体の空間占有率や形状などの立体情報が検出できると考える. 但し, 検出対象物がフラクタル形状で且つ透過物である必要がある. また, 画像の濃淡レベルを活用しているため, 画像の背景を一様に撮影する必要もあると考える. 以上がこれまで述べた画像解析を用いた物体の非接触的な空間占有率や体積の推定の条件であると考ええる. これらの条件から, 例えば, 雲の体積の推定や, 食パンなどのベイクト製品の気泡 (すだち) の評価などに応用できると考える.

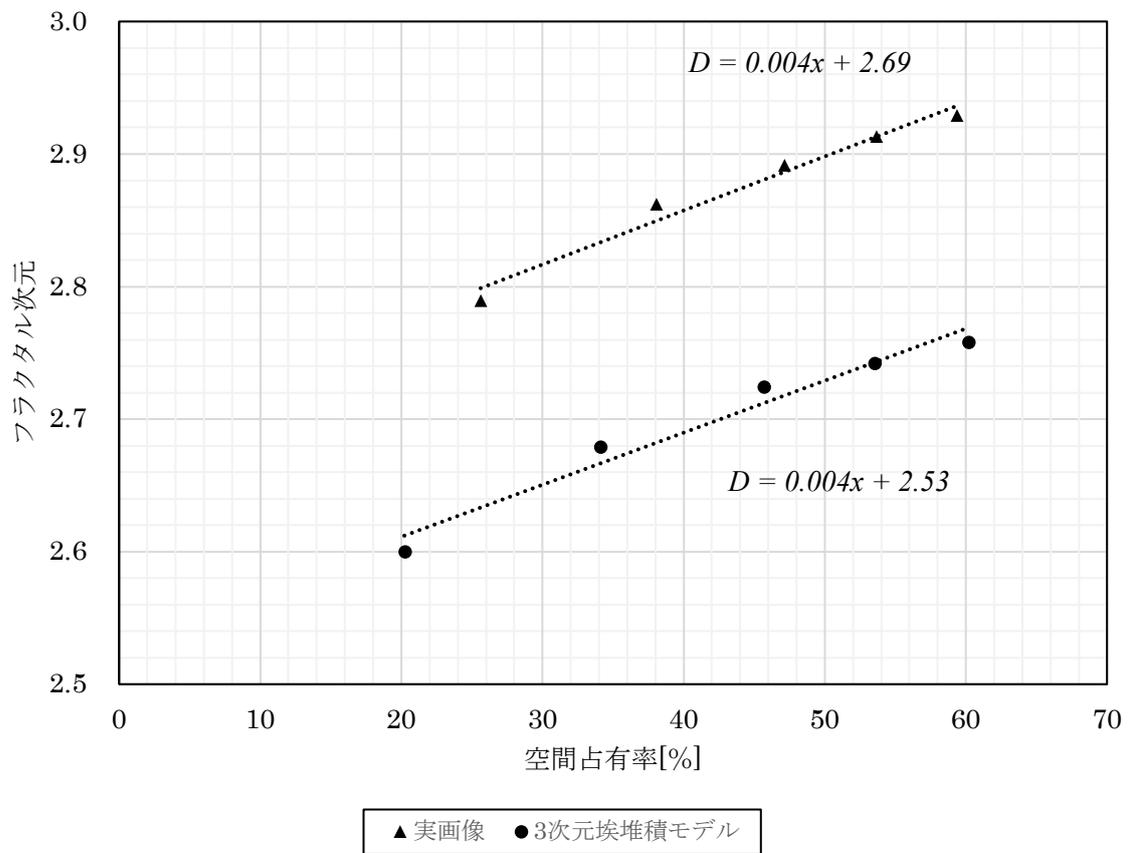


図6.16 シミュレーションから生成した3次元埃堆積画像及び実際の埃の堆積画像のフラクタル次元と空間占有率の関係

6.5 2つの提案モデルの妥当性について

ここでは、本章 3.1 項及び 3.2 項で検討した 2 種類の埃堆積モデルの妥当性について考察する。実際の埃の堆積形状は、多くの糸状の繊維形状が複雑に絡み合うフラクタル的な形状していると考えられる。検討した 2 つのモデルは、共通して $0.1 \times 0.1 [\mu\text{m}]$ 角の粒子として扱っていることから繊維質な形状と異なっている。一方で、第 3 章 2 項で埃の堆積形状を顕微鏡で観察した際、繊維の大きさは、 $0.2 [\mu\text{m}]$ 程度と小さいことから、シミュレーションとして妥当と考える。

本章 3.1 項で検討した、埃のランダムウォークによる堆積モデルは、そのシミュレーション結果から生成された堆積画像の濃淡レベルを観察すると、画像表面に凹凸が存在し、フラクタル表面構造になったと考える。一方で、ランダムウォークの最終地点情報を集めていることから、全体像は正規分布になってしまい、部分的なフラクタル表面構造にしかならないと考える。また、シミュレーションで生成される埃堆積形状の断面をみると、空気の隙間がなく、質量的なフラクタル形状にならない。また、生成した画像のピクセル数が少なく、画像サイズも小さいことから、自己相似になっておらずフラクタル表面として扱えないと考える。シミュレーション条件を広範囲にする必要があると考える。

本章 3.2 項で検討した、フラクタル的成りに成長する埃の 3 次元的積層モデルは、2 次元での埃の成長はランダムウォークの発生点を参照していることから、正規分布ではなく、フラクタル的な成長である。一方で、3 次元的に積層化していることから、堆積形状の断面には、空気の隙間が現れるが、上方向にはランダムウォークを考慮しておらず、また凝集する仕組みも組み込んでいないことから、全体として質量フラクタルにはなっていないと考える。

実際の埃が示す質量フラクタル的な形状をシミュレーションするためには、3 次元にフラクタル的に埃を成長させるモデルを導入する必要があると考える。

6.6 まとめ

本章では、埃の特性からと堆積過程がランダムに成長すると考え、3 次元埃堆積モデルを提案した。ランダム関数を活用し、2 次元平面に成長する埃を積層化することで、3 次元的な埃堆積モデルを検討した。3 次元的な埃堆積モデルを活用し、粗視化したデジタルデータに変換、グレースケール画像をシミュレーションから生成し、実際の埃堆積画像と比較した。埃の堆積画像の解析結果から、堆積モデル及び実際の埃の堆積画像には、フラクタル次元及び空間占有率の相関があり、堆積モデルの有用性を示した。さらに、時間とともに堆積

量が増加する埃の堆積形状が質量フラクタルであり、フラクタル的な成長することが確認できた。

一方で、シミュレーションでは、微細な埃をランダムウォークさせた点で表したことから、実際の埃の堆積図形に比べ、繊維質形状になっていないと考える。ランダムに発生する微細埃の形状にもランダム性をもたせると同時に繊維特有の絡まり合う性質を持たせる必要がある。

本研究では、埃の堆積過程の解明を目的に、初歩的な埃堆積シミュレーションモデルを提案し評価した。初歩的なモデルによる埃堆積画像及び疑似的な埃堆積画像の解析結果から、埃がフラクタル形状を持つことがわかった。また、フラクタル表面の次元及び空間占有率の相関があり、堆積量の増加に対してフラクタル表面の次元が増加することも明らかとなった。このことから埃の堆積形状の画像表面はフラクタル表面の特性を有していることを確認し、提案した初歩的な埃堆積モデルの有効性を示した。

今後は、DLA や CCA などの凝集メカニズムを活用するとともに、埃の精密な堆積モデルを検討し、埃の堆積が質量的なフラクタルであるか実験的に明らかにしたいと考える。また、画像サイズやピクセル数から尺度の補正方法を検討し、非接触的な埃堆積量の推定へ繋げたい。

参考文献

- [1] 大谷昌生, 宮内佑輔, 早坂亮, 川島健弥, 金井徳兼, “住宅床面における埃の静電特性のフラクタル的考察 (Ⅱ)”, 平成 31 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.485-486, Mar.(2019).
- [2] 宮内佑輔, 早坂亮, 川島健弥, 大谷昌生, 金井徳兼, “住宅床面における埃の静電特性のフラクタル的考察 (Ⅲ)”, 平成 31 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.487-488, Mar.(2019).
- [3] 大谷昌生, 金井徳兼, “埃の静電特性を用いた床面分布量の検出について”, 電気設備学会誌, Vol.1, No.1, 8-pages, (2023).
- [4] Masaki Ohtani, Norikane Kanai, “Consideration of Dust Accumulation Process of Grows Fractal-wise”, The 41st JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Student Session Proceedings, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Fukuoka, JAPAN, Online Conference, pp.21-24, Aug.31-Sep.2, (2022).
- [5] 中曾浩一, 島田学, 奥山喜久夫“凝集粒子の生成・成長過程のシミュレーション”エアロゾル研究 Vol.15, No.3, pp.226-223, (2000).
- [6] 本多宏輝, 辻紀子, 加藤直朗, 中山司, “人の歩行による室内塵埃の飛散の 3 次元解析のための数値計算法”, 中央大学理工学研究所論文集, 22, pp.17-29 (2016).
- [7] 宮武修, 脇本和昌, “乱数とモンテカルロ法”, 森北出版株式会社, (1978).
- [8] 片岡洋右, “分子動力学法とモンテカルロ法”, 講談社サイエンティフィック, (1994).
- [9] 佐藤隆洋, 磯打拓也, 斎藤静彦, “フラクタル解析を用いた景観の数値化と適用事例”, Nippon Koei technical forum: 日本工営技術情報 / 日本工営株式会社技術委員会 編 第 16 号, pp.1-7, (2007).
- [10] 土田理, “空気中を自由落下する物体における終端速度の推定”, 日本物理教育学会 物理教育 Vol.43 No. 1, pp.18-21, (1995).
- [11] 出口景悟, 鈴木紘夢“家庭環境におけるコードレス掃除機の性能評価方法の検討”神奈川工科大学ホームエレクトロニクス開発学科 卒業論文集, pp.1-8.(2017).
- [12] 高安秀樹, “フラクタル(新装版)”, 朝倉書店, (2010).

第7章

埃の分布量計測への検討

第7章「埃の分布量計測への検討」では、静電容量や画像を用いた埃堆積量の検出方法の応用について考察・提案する。最近では、家庭内での無線ネットワークが普及、Bluetooth や ZigBee といった短距離通信システムなどを活用したデバイスが開発され、様々な製品の相互通信が可能となっている。第6章での考察から、埃の静電的な特性やフラクタル構造により埃の有無や堆積量を推定することが可能であることが示されている。それらを応用し、センサーネットワークを活用した、埃の堆積量の分布検出や可視化方法について検討する。検討し、試作したブロック回路型 埃堆積量の分布検出システムに関しては、電気学会論文誌[1]にて報告している。

7.1 はじめに

前章まで、埃の構成成分であるナイロンやポリエステルなどの成分を活用した静電的な埃堆積量の推定と、埃の堆積過程やそのフラクタル的な形状を活用した埃堆積量の推定について述べた。ここでは、実際の生活空間や工場など様々な場面で、具体的な埃堆積量の推定方法や可視化について述べる。

生活や製造環境における空間には様々な情報が存在する。その情報とネットワークが連携し、環境の可視化や機器の制御に活用されている[2]。今後は、住宅やマンション・ビル・工場などにも、電源やセンサーネットワークが組み込まれた高機能な床や壁が登場すると予想され、一部その機能提案がされている[3]。堆積後の埃を検出することで、床や壁内のセンサーネットワークと連動させ、室内空間の様々な情報を可視化し、ロボットクリーナーなどの機器のAI制御に応用できると期待する。

無線通信やホームネットワーク通信により、家庭内の様々な電化製品がインターネットにつながり、遠隔操作や情報配信が行われている。デバイス間のデジタル信号を活用したシリアル通信や I2C 通信などの規格が国際的に統一され、

データの読み書きや情報通信が高速化されている。これらの通信方法は、デバイスの種類や機能は認識と、デバイスの位置の検出が組み合わさることで、空間内の様々な情報（例えば、室温や湿度・照度など）の位置分布の可視化が可能となる。

最近では、ZigBee や Bluetooth といった短距離無線通信や Wi-Fi 通信による高速・大容量無線通信などが人々の生活を便利にしている。その一方で、電力線に情報信号を伝送させる電力線通信が存在する。しかし、電力線内のノイズが極めて多いという問題がある。また、高速の伝送ができないため、日本国内では、実用事例が少ない。近年、これらの問題が改善され、パナソニックなどが実用・製品化している。ここでは、様々な通信システムと組み換え可能なブロックシステムを活用した家電製品やセンサー情報などの位置情報を取得するシステムを検討する。

本章では、位置情報の認識を可能とする回路とセンサーネットワークによるスマートフロアの基本構成を提案する。オフィスビルなどで活用される床内配線と通信技術、さらに電氣的な埃検出がつながれば、埃分布の可視化が可能になると考える。2種類の位置を組み合わせて3次元電気回路情報を認識することができる。6章での考察から埃の静電的な特性やフラクタル構造より埃の有無や堆積量を推定することが可能と考える。前章までに述べた静電容量や画像を用いた埃堆積量の応用について考察・提案する。

7.2 様々な通信規格との連携

7.2.1 ZigBee や Bluetooth

ZigBee や Bluetooth は、無線 PAN (Personal Area Network) に属する。ZigBee は、低コスト、低消費電力でワイヤレスセンサーネットワーク構築に適した無線通信規格である。伝送速度は、250kbps とほかの無線 PAN に比べると遅いのですが、1つのネットワークに最大で 65535 ノード（端末）が接続できる。また、複雑な設定をすることなく 30 ミリ秒程度でアドホックなネットワークを構築したり、15 ミリ秒程度でスリープ状態から回復も可能である。ボタン電池 1 個でおよそ 1 年間、単三乾電池 2 本で 2 年間程度の稼働できる。このような特徴を生かして、家電や各種センサーを組み合わせたホームオートメーション、ビルディングオートメーション、ファクトリーオートメーション用インフラを担うものと期待されている。Bluetooth は、近距離でデジタル機器のデータ通信をやり取りする無線通信技術である。ラジコンと、ラジコンを操作す

るリモコンのようなイメージで、線がなくても操作出来るワイヤレス技術が Bluetooth である。Bluetooth は国際標準規格で、異なるメーカー同士の機器接続も可能である、例えば、SONY のイヤホンと apple の iPhone も接続できる。Bluetooth の特徴は、1 対 1 の通信を想定している。ネットワークの有効範囲は 10m 程度である。また、電力の消費が少ないなどが挙げられる。

7.2.2 PLC (Power Line Communication) とは？

PLC は、元来電力ネットワークの制御に使用されていたが、一般の情報伝達にも使用できるシステムが 10 年以上前に開発された。住宅用の PLC の原理を図 7.1 に示す。家庭内に配線されている電力線を伝送媒体とし、電源コンセントに接続するだけで、電気エネルギーと情報信号の両方を共有する。無線 Wi-Fi のような複雑な設定を用いることケーブルを接続するだけでネットワークにつながるができる。PLC の技術は、直流電源にも応用できると考えた。

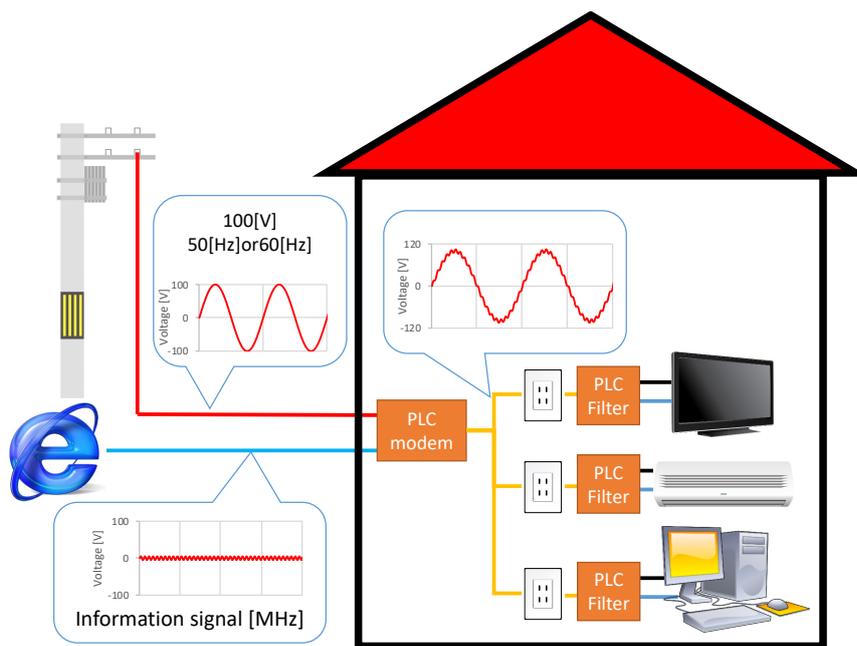


図7.1 家庭用 PLC の仕組み

7.3 短距離通信システムを活用した埃の堆積の分布検出

生活空間内の床や棚の上など全面を埃センサー化するのは非現実的である。そこで、複数の埃センサーを設置し分布測定を行うことにした。図 7.2 に生活

空間内の埃堆積分布の検出イメージを示す。生活空間内に設置した複数の埃センサーに、短距離無線通信システムを活用し、データを集計空間内の埃堆積分布を可視化する。複数の埃センサーと無線通信することから、活用する短距離無線通信システムは、1対1の通信を想定している Bluetooth より、ZigBee が望ましいと考える。

ZigBee の最初の仕様は 2004 年末に策定された。IoT (Internet of Things) や M2M (Machine to Machine), スマート・グリッド, スマート・メーターなどが登場し、その重要度は高まっている。IoT では、さまざまなモノにセンサ・モジュールを取り付け、さまざまな情報を取得し、電子機器の制御に生かす。その結果、電子機器の利便性や快適性を高めるだけでなく、新たな機能を付加できるようになる。この際に問題になるのは、センサ・モジュールへの電源供給である。多くのセンサ・モジュールに電源ラインを設置するのは現実的ではない。従って、電池駆動が大前提となる。このため、センサ・モジュールの消費電力削減が不可欠になる。こうした要求に ZigBee は合致する。低速だが低消費電力な点が特長だからである。IoT や M2M, スマート・グリッドなどの用途に最適である。

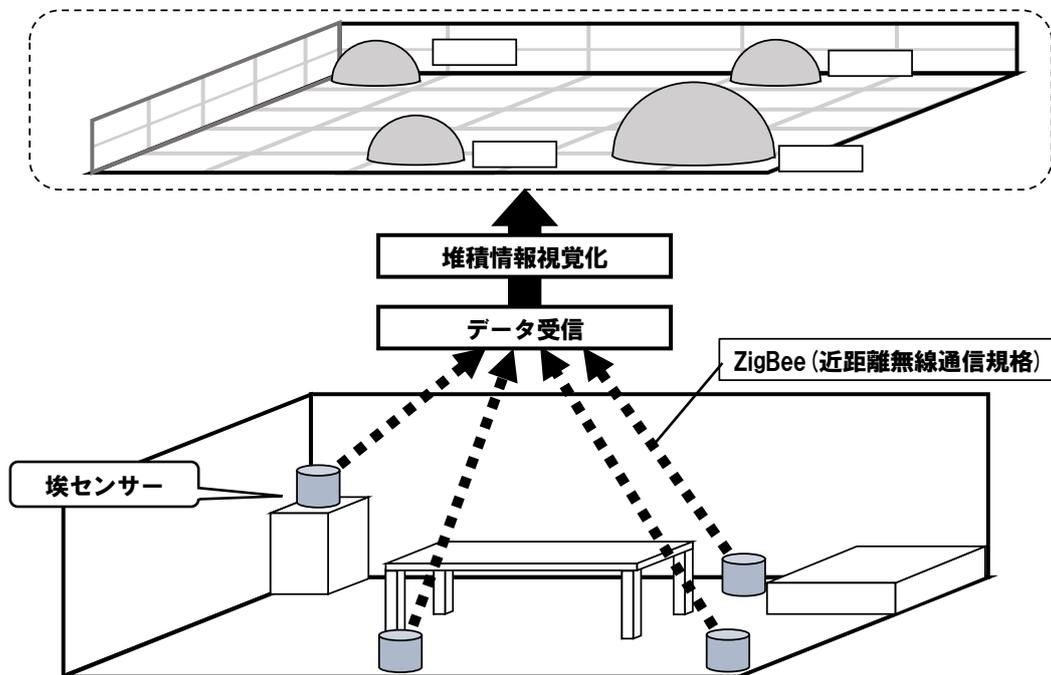


図7.2 埃の堆積分布検出のイメージ

7.4 PLC 技術と静電容量を用いた埃の分布量の検出

ここでは、プロトタイプのスマートベース、配線ブロック、および電気回路ブロックの作成方法について述べる。縦位置認識と横位置認識の2つの視点からブロックの3次元位置情報を取得する方法を検討した。開発環境にはナショナルインスツルメンツのLabVIEWとNI myRIOを使用した。

PLCは、家庭用電力にデータ通信信号を重畳する技術である(図7.3)。PLCモジュールを導入することで、複雑な無線設定をせずに家電をネットワークに接続することができる。

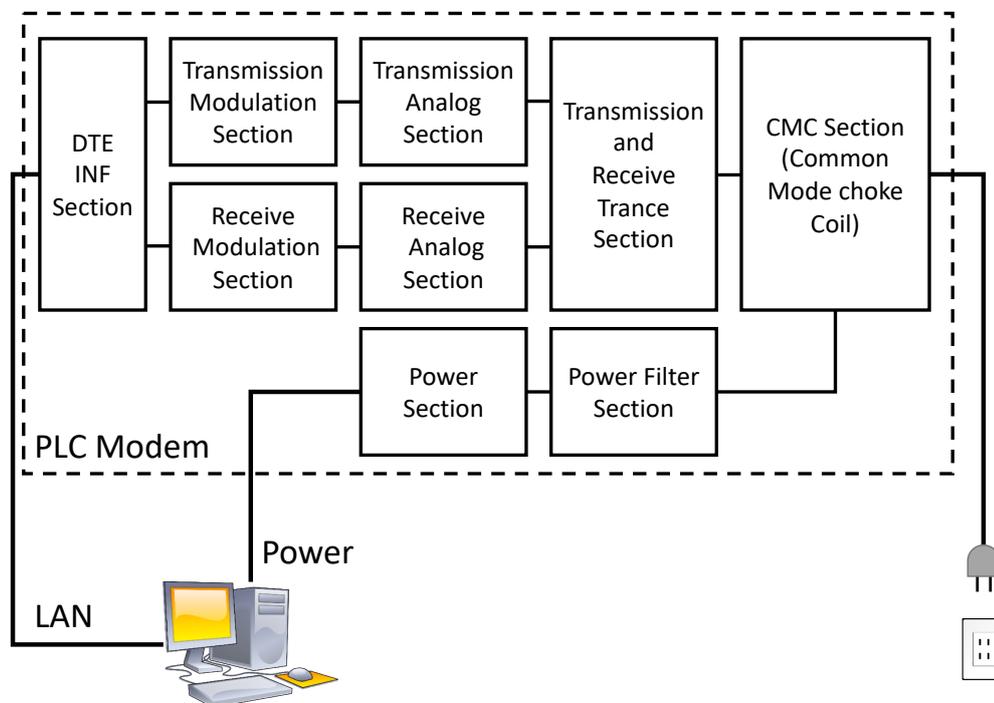


図7.3 PLC モデムのシステム構成ブロック図

7.4.2 埃コンデンサーの試作

3.3 項のシミュレーション結果をもとに、実際にコンデンサーに埃を挿入し、静電容量を測定する。図7.4に試作した埃コンデンサーを示す。試作した埃コンデンサーは、5章2項で行ったシミュレーションで仮定した極板サイズ及び極板間で試作した。25[mm]角の銅板テープをアクリルに貼り並行平板の電極を

作製した。電極間は 1[mm]とした。本実験では、埃溜まりを電極に挟み込む形で静電容量を測定した。測定には、シリアル通信出力が必要であったため、JYE Tech 社製 Cap Meter 060 を用いた。測定器精度は $\pm 2[\%]$ で測定範囲は 1pF ~500 μ F 自動レンジ切替可能である。最大の特徴は、タイムスタンプ付き測定値のリアルタイムシリアル出力が可能であることで、NI myRIO でのシリアル通信ができ、LabVIEW での計測・制御に活用できることから、本研究では、Cap Meter 060 を活用した。

測定結果は、埃が無い空気コンデンサー状態では、25[pF]、埃溜まりを挟み込んだ状態では、30[pF]であった。箱型埃堆積モデルでのシミュレーションとは異なり、測定器の精度や繊維外の埃成分（髪の毛や微生物など）の混入、極板の歪み、室温や湿度により誤差が生じたと考える。現に、埃に髪の毛が混じると、静電容量が 19[pF]に減少した。髪の毛の持つ導電性の影響と考える。堆積する埃の成分が、ナイロンなどの誘電率が高い成分の割合が多い場合、静電容量が増加すると考える。微弱な静電容量の変化ではあるが、埃の有無や空間占有率を検出することが可能と考える。

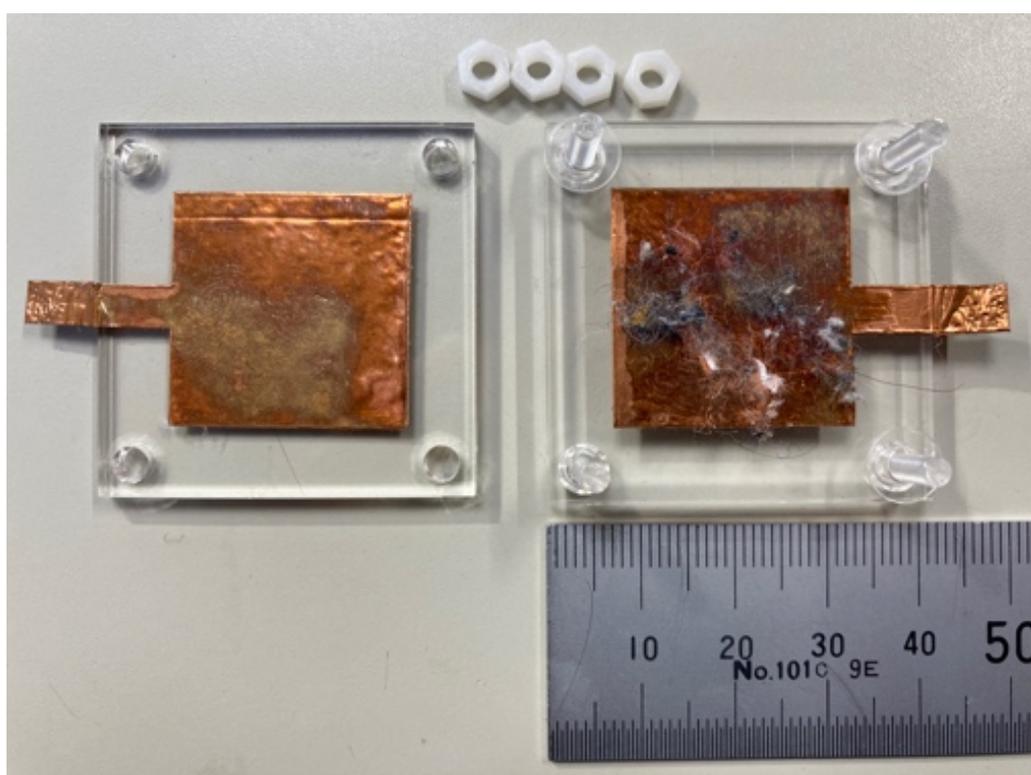


図7.4 埃コンデンサーの試作と測定実験

7.4.3 通信システムの構成

位置情報とデバイス情報の通信システム構成を図 7.5 に示す。基盤回路は、直流の電子回路と PWM 波形によるデジタル信号を活用し、位置情報の認識・デバイスの種類の認識・デバイス情報の順に通信する手法を検討した。①基盤回路は接続の待機状態から、デバイスの接続を感知する。②デバイス接続後、分圧の位置情報を取得したデバイス側が PWM 波形を活用し位置情報を、基盤回路に返信する。③位置情報の認識後、デバイスの機能情報を基盤回路に送信する。④基盤回路は、接続されたデバイスの機能に合わせて、センサー情報を受信及び動作情報を送信する。

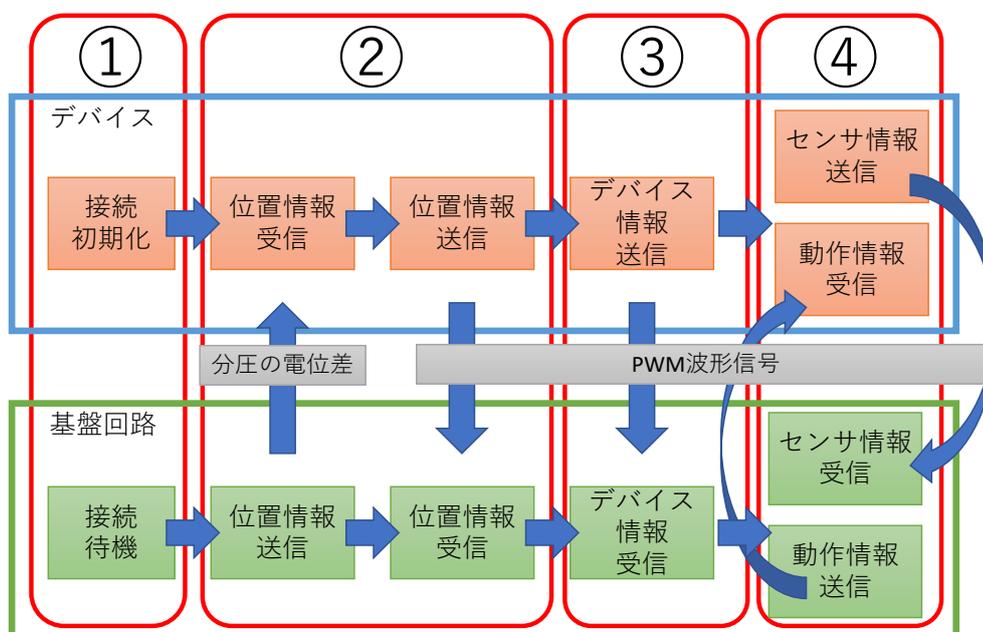


図7.5 位置情報を認識するデバイスの通信手法

7.4.4 位置情報認識システム試作基板回路

図 7.6 は、試作した位置情報認識システム回路の外観である。試作した基盤回路は、3×3 列のデバイス接続部により、接続されたデバイスの位置情報を認識する。にコントローラは、National Instruments 社製 NI myRIO を活用、デバイスへの電力供給と位置情報を認識する端子を配線した。デバイスのマイコンには、8 ピンの AR マイコンを組み込み、センサーは、埃の検出が行える平

行平板コンデンサー型センサーを試作した。

図 7.7 は、試作した基板回路にデバイスを接続した様子である。基板回路は、電力供給回路と位置情報認識回路を積層化し、デバイス側は、通信用コンピューターとセンサーなどの入出力素子を組み合わせシステムを動作した。

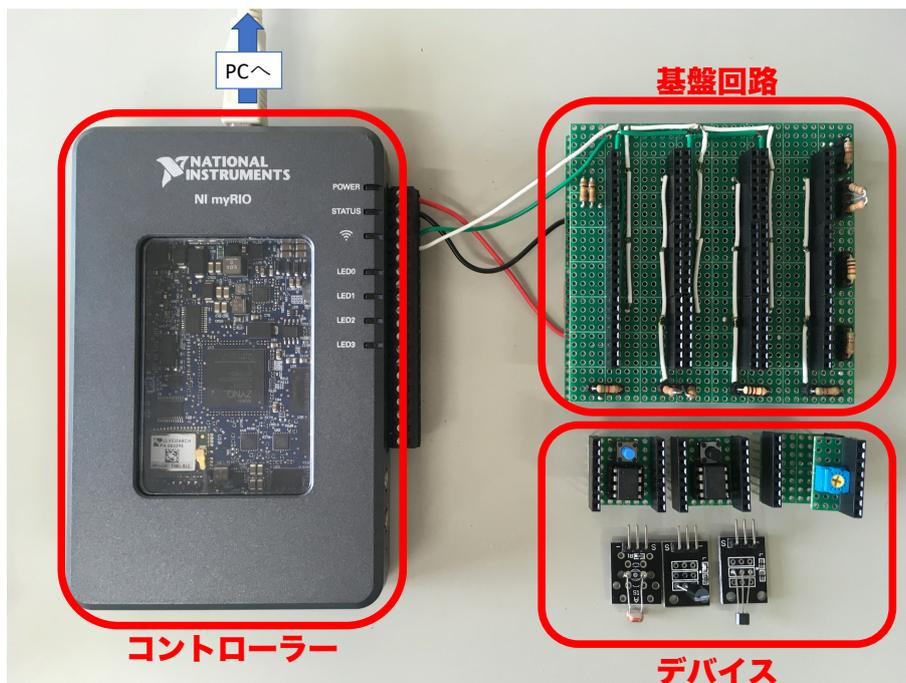


図7.6 試作した位置情報認識システムの基板回路

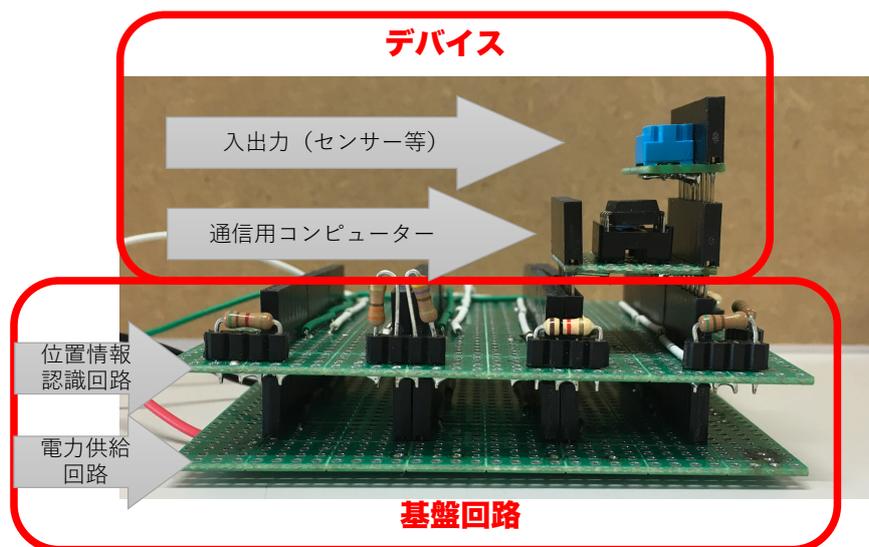


図7.7 積層化した位置情報認識システムの基板回路

7.4.5 動作実験

図 7.8 は動作実験の出力画面を示す。出力された波形は、図 7.5 のデバイス通信手法①～④に対応して動作している。動作実験では、デバイスから送られる PWM 波形を用いて通信情報を確認した。位置情報通信、デバイスの機能情報通信、センサー情報受信が行えていることが確認できた。また、センサーに埃を封入すると、デバイスが検知し埃の有無を確認できた。

試作した基盤回路をさらに床面や壁に拡張することで、生活空間の様々な埃分布の位置情報をもとに可視化できると考える。また、サーバー室や分電盤内部などの電子回路基板上に設置することで、基盤面に付着する埃を検出できる。

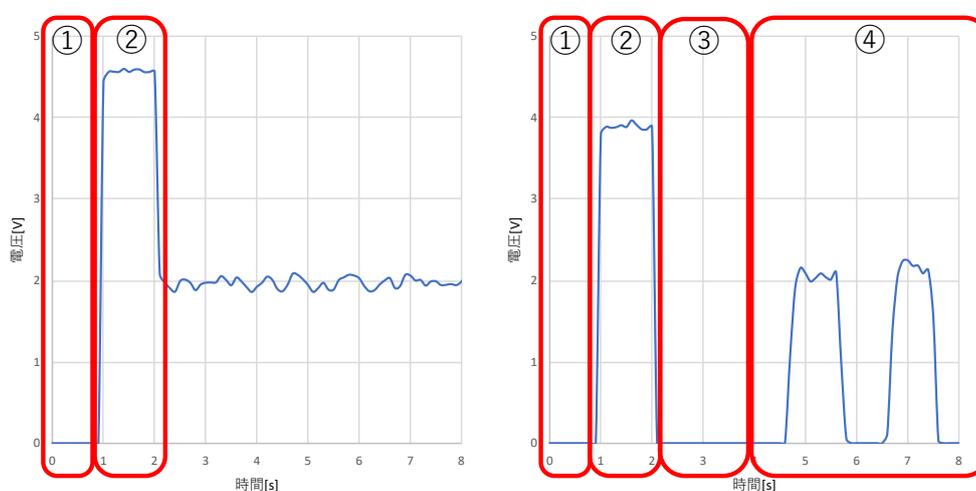


図7.8 動作実験の出力画面(a)X軸情報(b)Y軸情報及びデバイス情報
(図 7.5 の過程①～④における動作信号を表している)

7.5 まとめ

本章では、短距離無線通信システムを活用した埃堆積分布検出の検討した。埃センサーと ZigBee による短距離通信システムを活用することで、分布検出が可能となる。一方で、ZigBeeなどの短距離通信システムでは、複数の埃センサーの位置関係が認識できないことを確認した。そこで、PLC ネットワークシステムのような有線情報に位置を乗せることで、複数のセンサーの位置関係を認識する通信システムを検討し、小さなスケール下で試作を行った。動作実験の結果から、センサー情報と位置情報を認識するシステムを施策し動作を確認した。

参考文献

- [1] 大谷昌生, 金井徳兼, “埃の静電特性を用いた床面分布量の検出について” 電気設備学会誌, Vol.1, No.1, 8-pages, (2023).
- [2] 奥村克夫, “スマートハウス内の HAMS 構成機器と電磁環境対策”電気学会学会誌 Vol.138, No.6, pp.333-336, (2018).
- [3] Masaki Ohtani, Kazuki Hayashi, Kazuki Tokunaga, Junnosuke Takeuchi, Norikane Kanai, Masao Isshiki, “Building Smart Block and Base Recognizing 3D Electric Circuit”, International Workshop on Informatics, Proceedings of International Workshop on Informatics,pp.13-18, September 3-6, (2017).

第8章

結論

本論文は、埃堆積量の検出を目的とした埃の堆積過程や形状を解析し、銻英の静電的特性やフラクタル的な形状情報をもとに、その手法について堆積モデルを作製し埃堆積量の推定方法を検討した。

第1章「序論」では、本研究に至った背景について述べた。従来の埃の検出手法について確認し、本研究に関わる課題をまとめた。

第2章「生活空間における埃とその静電的特性」では、初めに埃の構成成分を調査した。埃の構成成分は、主に衣類などの布製品から抜け落ちたポリエステルやナイロンなどの人工繊維であることを確認した。また、その割合は、近年人々のライフスタイルの変化から増加傾向にあることも確認した。ポリエステルやナイロンなどの人工繊維は帯電していると推測し、堆積した埃を採集、ファラデーケージを用いて帯電量の計測実験をした。実験結果から、埃の堆積量と帯電量の直線的な相関を確認した。

第3章「埃の堆積形状とフラクタル」では、初めに顕微鏡を用いて埃の堆積形状を観察した。観察結果は、衣類などから抜け落ちた繊維が複雑に絡み合い、自己相似的な幾何学形状を確認した。自己相似や幾何学形状は、フラクタルの性質の一種であることから、フラクタル概念をまとめた。また、様々な凝集メカニズムを調査した。その中で、埃の堆積・成長の過程が拡散律速凝集(DLA)と類似していることを議論した。

第4章「研究に用いるツール」では、本研究で活用したアプリケーションや測定器、開発環境についてまとめた。本研究で主に活用した開発環境であるLabVIEWの特徴をまとめ、LabVIEWの活用事例や活用に至った理由についてまとめた。

第5章「埃のコンデンサーモデルと静電容量のシミュレーション」では、埃の構成成分に着目し、デジタル的な箱型埃コンデンサーモデルを設計した。埃の構成成分から、堆積した埃を極板で挟むことでコンデンサーとして扱うことができる。実際の埃の堆積画像を解析し、埃堆積量の静電容量が推定できた。また、2次元の画像から3次元的な情報を推定できることを確認した。

第 6 章「埃の 3 次元堆積モデルとシミュレーション」では、埃の特性を観察・解析し、ランダムに成長する埃の堆積過程を 2 種類のモデルを設計した。

1 つ目のモデルは、微細な埃をランダムウォーク的に浮遊させ、堆積させるモデルを設計した。このモデルの堆積形状は、部分的なフラクタル表面構造にはなるが、全体では正規分布形状になることがわかった。また、堆積断面を見ると質量フラクタル的な構造にはならないことがわかった。

2 つ目のモデルは、微細な埃の集合過程を 2 次元平面でランダムに成長させ積層化した 3 次的に成長する埃堆積モデルを設計した。このモデルは、全体的にフラクタル表面構造になった。また、堆積断面はフラクタル的な構造になっていることから、質量フラクタル構造になることを確認した。

埃の積層モデルを活用してシミュレーションをした。シミュレーションで堆積画像を生成し、実際の埃堆積画像と比較した。それぞれの画像解析し、フラクタル次元と空間占有率の相関を実験から考察した。シミュレーション画像及び実際の堆積画像の相関から、埃の成長は面フラクタルを形成することを確認した。

第 7 章「埃の分布量計測への応用」では、静電容量や画像を用いた埃堆積量の検出方法の応用について考察提案した。埃の堆積量だけでなく空間の分布情報の検出には、複数のセンサーデバイスが必要となる。複数のセンサーデバイスを、短距離無線通信 ZigBee を活用し、接続する分布検出方法を検討した。無線通信の場合、接続デバイスの位置情報を自動的に認識できない、そこで、PLC 技術を応用した電力供給のための接続点を活用した位置情報認識システムを検討、試作し動作実験から実用性について検討した。

ここからは、残された課題について言及する。埃の構成成分は、人々のライフスタイルが大きく変化しない限り今後も繊維成分の割合が多いと考える。衣類などの布製品の材質に応じて静電的な測定が可能と考える。その一方で、静電的な測定に関しては、湿度や温度に応じて測定結果が変化する。測定結果に対して補正が必要と考える。埃のフラクタル的な堆積シミュレーションに関しては、様々凝集メカニズムを参考に今後もシミュレーションモデルを検討したい。アプリケーションの観点からは、ZigBee を活用した埃の分布検出方法の提案までに留まっている。実験的な検証及び考察が必要と考える。

現行のエアコンや空気清浄機のフィルターは、埃の付着に関して検出するセンサーは付いていない。累計稼働時間からフィルターへの埃の付着量を推定し、使用者にフィルター洗浄及び交換を促す仕組みになっている。このような場面で本研究の成果を活かしたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり，御指導及び御助言を頂きました神奈川工科大学創造工学部ホームエレクトロニクス開発学科 金井 徳兼 教授に心から深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

フラクタルの基本的な概念や埃とフラクタル関係について，様々な視点から御意見頂いた北海学園大学工学部電子情報工学科 魚住 純 教授に心から深く感謝します。

埃の静電気的な特性やファラデーケージを活用した埃の帯電実験方法について御助言頂いた神奈川工科大学工学部電気電子工学科 瑞慶 覧章朝 教授に心から深く感謝します。

センサーネットワークなどのセンサー技術に関して御意見頂いた神奈川工科大学創造工学部ホームエレクトロニクス開発学科 黄 啓新 教授に心から深く感謝します。

アプリケーションなどの視点から埃の分布検出方法，さらにフラクタルシミュレーションに関して様々な御意見を頂きました神奈川工科大学創造工学部ホームエレクトロニクス開発学科 奥村 万規子 教授に心から深く感謝します。

埃の堆積量に関して静電容量やフラクタル次元との比較に「空間占有率」を定義，活用するようご助言頂いた神奈川工科大学創造工学部ホームエレクトロニクス開発学科 山崎 洋一 准教授に心から深く感謝します。

また，教授方におかれましては，ご多忙な時期に本論文を何度となく査読・添削していただきました。重ねて御礼申し上げます。

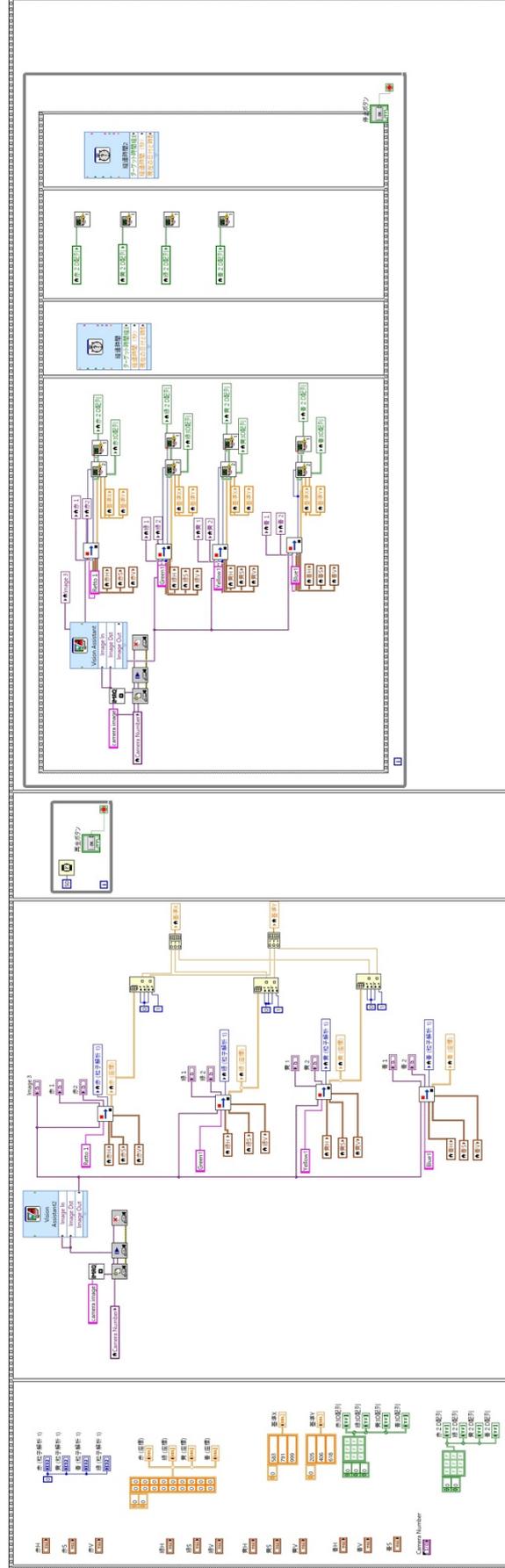
満期退学後，就業時間外の活動並びに博士論文の審査に，ご気遣い並びにサポート頂いた，岩谷学園 本部 本部長 折笠初雄様を始め，岩谷学園の職員の皆様に心より感謝申し上げます。

実験や論文執筆に関して御助力を頂きました神奈川工科大学 金井研究室の学生並びに卒業生の皆様に深く感謝致します。

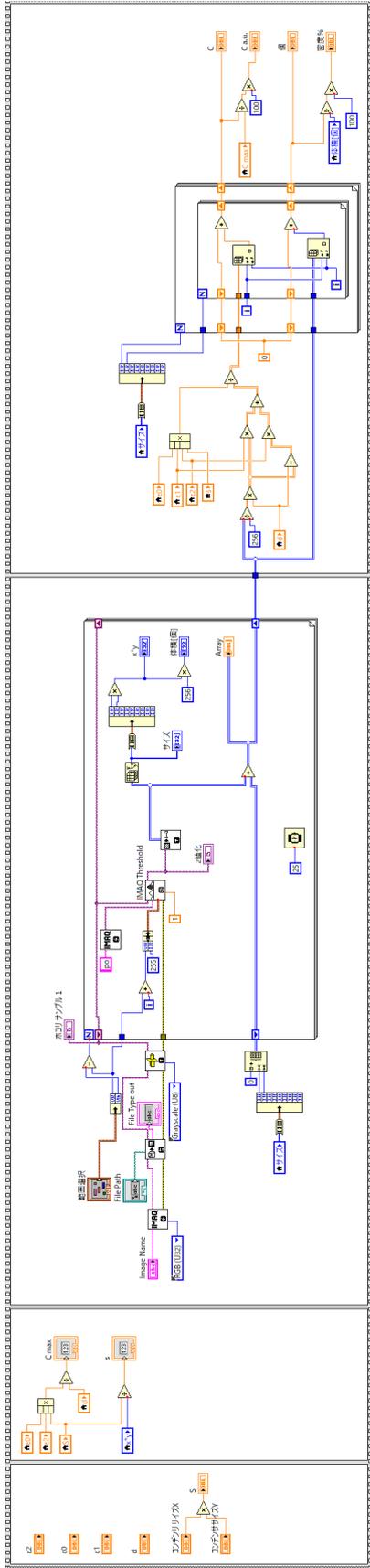
多くの方々の御指導と御助言並びに御助力頂いたことに心から感謝し，本論文を終えます．

付録

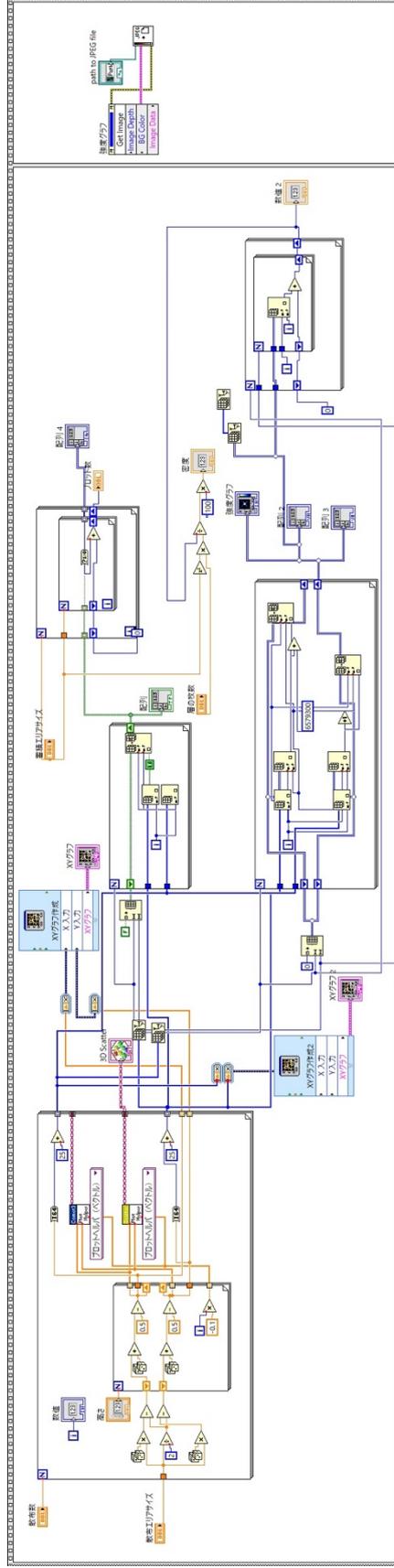
研究開発した LabVIEW プログラム集



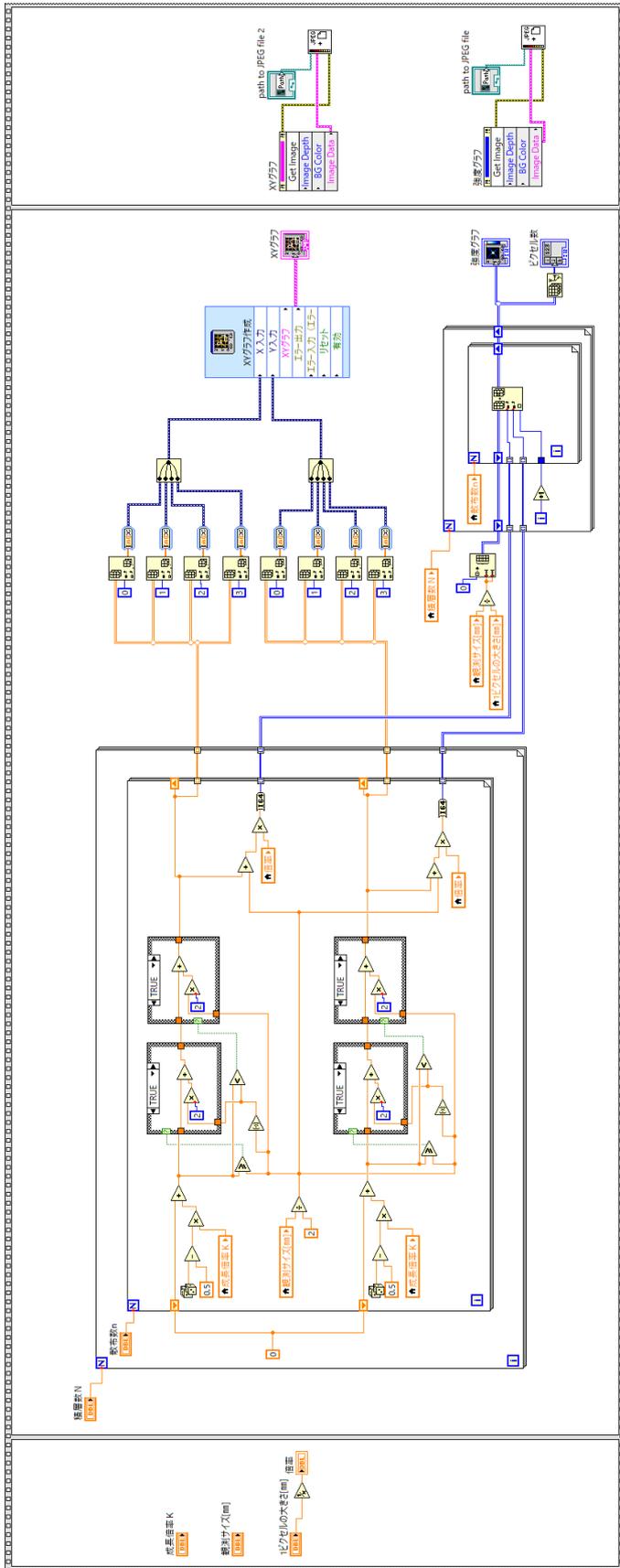
録 1 位置情報をデジタル信号に変換するプログラム
4 章 4 項で作製したプログラム



付録 2 埃堆積画像の空間占有率及び静電容量解析ツール
第 5 章 3.2 項で作製したプログラム



付録 3 積層化した埃の堆積モデルのシミュレーション
第 6 章 4.1 項で作製したプログラム



付録 4 積層化した埃の堆積モデルのシミュレーション
第 6 章 4.2 項で作製したプログラム

本研究に関する論文集

1. 論文誌

- (1) 大谷昌生, 金井徳兼, “埃の静電特性を用いた床面分布量の検出について” 電気設備学会誌, Vol.1, No.1, pp.1-8, (2023).
- (2) 大谷昌生, 金井徳兼, “埃の堆積とフラクタルについて”, 日本シミュレーション学会誌, Vol.15, No.1, pp.12-19, (2023).

2. 国際会議 (査読付き)

- (1) Masaki Ohtani, Kazuki Hayashi, Kazuki Tokunaga, Junnosuke Takeuchi, Norikane Kanai, Masao Isshiki, “Building Smart Block and Base Recognizing 3D Electric Circuit”, International Workshop on Informatics 2017, pp.13-18, Sep.3-6,2017.
- (2) Masaki Ohtani, Norikane Kanai, “Consideration of Dust Accumulation Process of Grows Fractal-wise”, The 41st JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Student Session Proceedings, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Fukuoka, JAPAN, Online Conference, pp.21-24, Aug.31-Sep.2, 2022.

3. 国内会議

- (1) 大谷昌生, 金井徳兼, “ブロック型スマートハウス 電力管理学習教材の試作と活用 (I)”, 平成 29 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.10-11, Mar.(2017).
- (2) 大谷昌生, 金井徳兼, “ブロック型スマートハウス 電力管理学習教材の試作と活用 (II)”, 平成 29 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.14-16, Mar.(2017).
- (3) 宇田涼佑, 山田幸宏, 大谷昌生, 池田康秀, 金井徳兼, “工学初学者向けブロック学習教材の試作と活用, 日本工学教育学会, Aug.(2017).
- (4) 大谷昌生, 林千希, 徳永和樹, 金井徳兼, “配線レスを可能とするブロック配線システムの検討”, KAIT シンポジウム 2017 人工知能(AI)の拓くイノベーションの進展と未来社会の創造, Dec.(2017).
- (5) 宇田涼介, 大谷昌生, 金井徳兼, “LEGO Mindstorms とプログラムシートを組み合わせた児童向けプログラム学習教材の検討(I)”, 平成 30 年

- 電気学会全国大会 講演論文集, pp.15-16, Mar.(2018).
- (6) 林千希, 徳永和樹, 大谷昌生, 金井徳兼, “ブロック型配線レスウォールの検討(I)”, 平成 30 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.407-408, Mar.(2018).
 - (7) 林千希, 徳永和樹, 大谷昌生, 金井徳兼, “ブロック型配線レスウォールの検討(II)”, 平成 30 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.409-410, Mar.(2018).
 - (8) 大谷昌生, 林千希, 徳永和樹, 金井徳兼, “位置情報を認識するインテリジェントフロアの検討 (I)”, 平成 30 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.411-412, Mar.(2018).
 - (9) 大谷昌生, 林千希, 徳永和樹, 金井徳兼, “位置情報を認識するインテリジェントフロアの検討 (II)”, 平成 30 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.413-414, Mar.(2018).
 - (10) 大谷昌生, 金澤哲, 宮内佑輔, 金井徳兼, “スマートハウスをテーマとした課題解決学習の実践—事例：スマートハウスに関する高校大学連携 PBL 学習—”, 平成 30 年度工学教育研究講演会 講演論文集, pp.66-67, Aug.(2018).
 - (11) 大谷昌生, 宮内佑輔, 早坂亮, 川島 健弥, 金井 徳兼, “住宅床面における埃の静電特性のフラクタル的考察 (I)”, 2018 年度 第 42 回静電気学会全国大会 静電気学会講演論文集 2018, pp.49-50, Sep.(2018).
 - (12) 大谷昌生, 宮内佑輔, 早坂亮, 川島健弥, 金井徳兼, “住宅床面における埃の静電特性のフラクタル的考察 (II)”, 平成 31 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.485-486, Mar.(2019).
 - (13) 宮内佑輔, 早坂亮, 川島健弥, 大谷昌生, 金井徳兼, “住宅床面における埃の静電特性のフラクタル的考察 (III)”, 平成 31 年電気学会全国大会 講演論文集, pp.487-488, Mar.(2019).
 - (14) 大谷昌生, 金井徳兼, “生活空間における埃位置情報の検出”, 2020 年電気設備学会全国大会, 講演論文集, pp.17-18, Aug.(2020).
 - (15) 大谷昌生, 高橋明優, Rahel Azad Noori Noori, 金井徳兼, “トースターにおける食パンの焼き色とフラクタルの成長”, 日本食品科学工学会第 68 回大会, 講演論文集, pp.134-134, Aug.(2021).