



Title	ごみ焼却施設におけるリン酸化合物噴霧によるバグフィルター差圧低減の現象解明に関する研究
Author(s)	高橋, 滋敏
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12770号
Issue Date	2017-03-23
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k12770
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65631
Type	doctoral thesis
File Information	Shigetoshi_Takahashi.pdf



ごみ焼却施設におけるリン酸化合物噴霧による
バグフィルター差圧低減メカニズムの
現象解明に関する研究

2016 年 12 月

高橋 滋敏

目次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.2 バグフィルター差圧に関する既往の研究.....	3
1.3 研究目的と本論文の構成.....	4
第2章 焼却炉内へのリン酸噴霧が与える短期的・長期的な影響分析.....	7
2.1 はじめに	7
2.2 調査対象とした産業廃棄物焼却施設の概略.....	7
2.3 リン酸廃液噴霧による短期的影響.....	9
2.4 リン酸廃液噴霧による長期的影響.....	12
2.5 結論	16
第3章 産業廃棄物焼却施設におけるバグフィルター差圧低減の確認.....	18
3.1 はじめに	18
3.2 研究対象施設	18
3.2.1 施設概要	18
3.2.2 BF 差圧低下効果の原因物質.....	18
3.3 実験方法	19
3.3.1 バグフィルター差圧低下の仮説.....	19
3.3.2 実験条件と測定項目.....	19
3.3.3 分析方法	21
3.4 結果と考察	22
3.4.1 1 回目の実機試験の結果.....	22
3.4.2 2 回目の実機試験の結果.....	26
3.4.3 バグフィルターから排出された灰（BF1 灰）の物性変化.....	28
3.4.4 実験結果からの仮説の検証.....	29
3.4.5 消費電力の考察.....	30
3.5 結論	31
第4章 ベンチスケール装置における灰収支を考慮した差圧変化と捕集灰層の変化.....	34
4.1 はじめに	34
4.2 実験方法	36
4.2.1 実験装置と測定項目.....	36
4.2.2 ベンチスケール試験手順.....	37
4.2.3 灰投入量とダスト排出量の測定.....	38
4.2.4 実験条件	39
4.2.5 連続測定データ.....	39
4.2.6 ろ布上に捕集された捕集灰の厚さ測定と推定.....	40

4.3	リン酸噴霧による払い落とし挙動解析のためのデータ作成	42
4.3.1	パルス払い落とし条件の分類	42
4.3.2	パルスによる捕集灰の払い落とし量, パルス前の捕集灰堆積量, バグフィルター差圧データの作成	43
4.4	ろ布上に捕集された捕集灰層の透気係数	52
4.4.1	パルスによる捕集灰堆積量とバグフィルター差圧の変化	52
4.4.2	捕集灰層の透気係数の計算	53
4.4.3	捕集灰層表面の変化	56
4.5	リン酸噴霧による払い落とし量の変化	57
4.5.1	払い落とし量への影響因子	57
4.5.2	パルスによる払い落とし以外のリン酸噴霧のダスト排出量への影響	60
4.6	結論	61
第5章	ラボスケール装置を用いたリン酸化合物形態の影響と捕集灰の特性変化分析	62
5.1	はじめに	62
5.2	実験方法	62
5.2.1	試料, 実験装置, 測定項目	62
5.2.2	実験条件と手順	64
5.2.3	分析項目	66
5.3	結果と考察	67
5.3.1	リン酸化合物の形態の違いによる影響	67
5.3.2	捕集灰と非捕集灰におけるリンの分配	70
5.3.3	捕集灰中リン濃度の依存性	71
5.3.4	捕集灰の物理的・化学的特性変化	72
5.3.5	飛灰中の消石灰の影響	76
5.4	結論	78
第6章	ラボスケール装置での払い落とし量と非捕集灰量の評価及び付加効果	80
6.1	はじめに	80
6.2	払い落とし実験	80
6.2.1	実験方法と実験条件	80
6.2.2	分析項目	82
6.2.3	リン酸噴霧と払い落とし量の関係	82
6.2.4	リン酸噴霧と非集塵灰量の関係	86
6.3	リン酸化合物による集塵灰からの Pb, Cd 溶出抑制効果	87
6.3.1	試料	87
6.3.2	分析方法	87
6.3.3	飛灰中の Ca, P, Pb, Cd の含有量	88

6.3.4 リン酸化合物の形態と添加率による Pb と Cd の溶出抑制効果	89
6.4 リン酸化合物による塩化物からの塩化水素発生実験	94
6.4.1 実験方法	94
6.4.2 結果と考察	94
6.5 結論	95
第 7 章 結論	97

第1章 序章

1.1 研究背景

国土の面積が 38 万 km² と狭く、埋立地の確保が難しい我が国において、廃棄物に対し減容化処理を施すことは重要な課題である。その中心的処理として焼却処理が挙げられる。焼却処理によって廃棄物は容積が 1/30～1/20 となり、埋立地容量を効率的に使用可能となる。また同時に腐敗性有機物は無機化されることによって、直接埋め立て処分された時の懸念事項である衛生害虫や臭気の問題を克服し、浸出水中の有機物濃度や埋立ガスの発生量を低減させることが可能となる。平成 26 年度における我が国の一般廃棄物の総排出量と総処理量は、それぞれ 4432 万トンと 4184 万トンであり、そのうち直接焼却されたものは 3347 万トンであった¹⁾。これは総処理量のおよそ 80%を占め、焼却処理が我が国における一般廃棄物処理の中心的処理を担っていることを示している。

廃棄物焼却施設の廃棄物投入から燃焼、排ガスを排出するまでの流れを示すと図 1-1 のようになり、主に焼却炉、廃熱ボイラ、減温塔、集塵機（図中ではバグフィルター）、誘引通風機、煙突から構成されている。

焼却炉は、ストーカ式（火格子）（図 1-1 はストーカ式）、流動床式、回転式（ロータリーキルン）と、その炉形式により分類される。ストーカ式は、我が国で最も一般的な炉形式であり、導入実績も最大である。特長は小型から大型まで幅広い規模に対応可能な点である。ストーカ式では、廃棄物は火格子の上を移動しながら、乾燥、燃焼、後燃焼のプロセスを経由し焼却処理される。流動床式は砂などの流動媒体を加熱し、炉の下

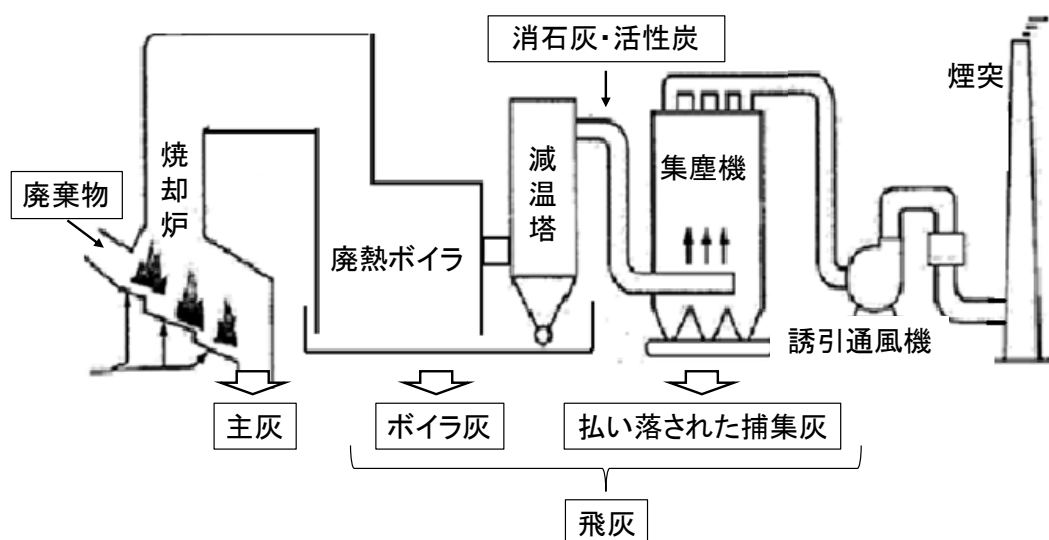


図 1-1 一般的な廃棄物焼却施設の設備フロー

部から空気を送り込み流動媒体を舞い上げる。そこへ上から廃棄物を投入し燃やす方式である。流動床炉は比較的小規模なものが多い。回転式は産業廃棄物への納入実績が多く、この炉形式では、傾斜のついた円筒を回転させ、廃棄物がその中を移動する間に、乾燥、着火、燃焼させる。このほかに、製鉄技術を応用して、コークスなどを用い高温で廃棄物を直接溶融しスラグ化させるガス化溶融がある。

どの処理方式であっても、廃棄物の焼却によって高温で有害物質を多く含んだ排ガスが生じる。代表的な排ガス中に含まれる有害物質は、廃棄物由来の塩素や硫黄によって生成した塩化水素や硫酸化物といった酸性物質、微粒子のばいじん、ダイオキシン類、窒素酸化物である。これらの物質は大気汚染防止法やダイオキシン類対策特別措置法によって排出規制がなされているため、排ガス処理が必要不可欠となる。排ガス処理は図 1-1 に示した廃熱ボイラからバグフィルターの間で行われる。

廃熱ボイラでは、高温の排ガスから熱回収を行い、排ガスの冷却を行う。回収された熱を利用し、温水として利用する施設や、発電を行う施設がある。平成 25 年度の循環型社会形成推進基本計画²⁾における取り組むべき課題の中で、「バイオマス系循環資源等のエネルギーへの再資源化や廃棄物発電等の熱回収を一層促進することが求められている」とされ、また発電能力が焼却施設建設のための交付金条件となっているため、発電を行う施設が増えている。近年では、電力の固定価格買取制度のため、改良し発電能力を向上させるケースもある。しかし、さらなる排ガスの冷却が必要なため、減温塔で排ガス中に水を噴射している。

その後、排ガスに含まれる酸性物質は、アルカリ性薬剤（たとえば消石灰）を煙道に吹き込み、中和反応を利用して除去される。反応生成物は集塵機によって捕集される。ばいじんは、集塵機で捕集され、捕集灰として排ガス中から分離、除去されている。かつて集塵機は、電気集塵機が一般的であったが、今ではダイオキシン対策のために、ろ布を用いたろ過式集塵機が一般的になっている。ろ布（バグフィルター）は高温に対応できないことに加え、ダイオキシンの再合成を防ぐため前述のように、減温塔で水を噴射し排ガスを冷却している。またダイオキシン類は、煙道に活性炭を吹き込み吸着させ、前述のばいじんや酸性ガスの中和生成物らとともに集塵機で分離除去される。窒素酸化物は、燃焼制御によって発生量を抑えるとともに、無触媒脱硝法（焼却炉内にアンモニアなどを噴霧し分解する方法）や触媒脱硝法（バグフィルターの後段に設けた触媒によって分解する方法）によって処理されている。

各設備において、圧力が正圧になると、排ガスが各部から噴出してしまう。これを防ぐために、焼却炉から排ガス処理システム全体を負圧にする必要があり、誘引通風機によってガス圧が制御されている。廃棄物焼却システムの上流から下流に引き込まれ処理された排ガスは、最後に煙突から系外に排出される。

焼却炉からは主灰、排ガス処理システムではボイラ灰や捕集灰（ボイラ灰と捕集灰をまとめて、飛灰と呼ばれる）が排出される。特に飛灰には廃棄物由来の重金属類が高濃

度で含まれており、そのまま埋め立て処分することはできない。そのため、キレート剤を加えるなどの重金属類の不溶化処理が行われている。そのほか、飛灰に脱塩素対策を施したのちに、セメント原料として用いる場合もある。

廃棄物焼却は、廃棄物を衛生的に処理する方法である一方で、欠点もある。排ガス処理において薬剤や活性炭を用いる。安定に運転するために、焼却炉内に燃料を投入する。処理内容によっては、一度冷却させた排ガスを再加熱することもある。酸性物質による装置内部の腐食もあり、さらには排ガスを引き込むために圧力損失が生じる。このように、廃棄物焼却においては、費用がかかるという最大の欠点があり、解決すべき課題である。

本研究で取り扱うバグフィルター差圧は、排ガス処理システムにおける圧力損失の一つである。バグフィルターはばいじんの除去性が高く、代表的な集塵装置として広く使われている一方で、ろ布表面でばいじんを捕集するため、集塵が進むにつれて圧力損失は増加する。圧力損失が増加すると、排ガス流量と圧力を保つために下流の誘引通風機の負荷が増大し、誘引通風機の消費電力が増える。このため、焼却施設では、定期的に圧縮空気（パルス）による捕集灰の払い落としを行い、バグフィルター差圧の上昇を抑制している。しかし、排ガス処理システム全体の圧力損失のうち約 6 割を占めるといわれているため、バグフィルター差圧の管理は焼却施設を運転する上で重要な項目と言える。

1.2 バグフィルター差圧に関する既往の研究

ろ布を用いた集塵における圧力損失の増加メカニズムについて、Callé³⁾らが三段階であると報告している。一段階目がろ布内部での集塵、二段階目がろ布表面での捕集灰層の形成、そして三段階目が捕集灰層の成長である。また、Song ら⁴⁾、Chen and Hsiau⁵⁾、Saleem ら⁶⁾によると、圧力損失に影響を与える要因は、ろ布へのダスト負荷、ガス中のダスト濃度、捕集灰層の厚さ、ろ過速度であるが、中でもろ過速度の影響が最も大きい。

ろ布を用いた集塵と払い落としに関する既往の研究は、廣田ら⁷⁾が払い落とし後のろ布上の粉体の残留量はその流動性に依存すると報告したものや、井伊谷ら⁸⁾が払い落とし操作を繰り返すことで払い落としによる粉体の残留率が一定になると報告したもの等がある。また Sievert ら⁹⁾や池野ら¹⁰⁾によって、ろ布上に堆積した灰の払い落としは表面全体で一様に起こるのではなく、払い落される部分と払い落されない部分があること（粉体の斑落ち）が示された。田中¹¹⁾らは、ろ布の寿命は払い落されなかった粉体の残留率に深く関連していると報告し、金岡¹²⁾は使用期間が長いろ布ほど、払い落とし後の圧力損失の上昇が早いと報告した。

さらに、パルスによる払い落としはろ布の清掃と圧力損失低下のために一般的に用いられているが、Ellenbecker and Leith¹³⁾と Saleem ら¹⁴⁾が、パルスによる集塵灰の払い落とし量はろ布の材質により変動し、PTFE 製のろ布が最も効率よく捕集灰を除去できると報

告している。

しかし、バグフィルター差圧を低減させる方法については、パルス等による払い落としろ布の材質に関するもの以外に研究例がほとんどない。

1.3 研究目的と本論文の構成

廃棄物の焼却処理においては、1.1 でも述べたように廃熱ボイラを用いて熱回収し、回収した熱を利用し温水としての利用や発電を行っている。したがって、廃棄物焼却施設は、単に廃棄物を衛生的に処理するだけの施設にとどまらず、エネルギープラントとしての役割も持つようになった。一方で、運転にかかるエネルギー消費量が大きければ、全体でエネルギーバランスを見たときの回収分の効果が小さくなってしまう。これからの廃棄物焼却は、処理プロセスのエネルギー消費量とコストの削減を目標としなければならない。こうした背景のもと、ある産業廃棄物焼却処理施設において、処理物として受け入れたリン酸廃液を焼却炉内へ噴霧し焼却処理した際に、バグフィルター差圧が低下したと報告があった。そこで本研究では、排ガス処理プロセスにおけるバグフィルター差圧低減に関し、リン酸化合物（特にリン酸）噴霧によるバグフィルター差圧低減メカニズムの現象解明を目的とした。

本論文は大きく2つの部分から構成されている（図1-2）。一つが実際の焼却処理施設における現象であり、もう一つが集塵灰の収支を考慮した実験である。以下に各章の内容をまとめる。

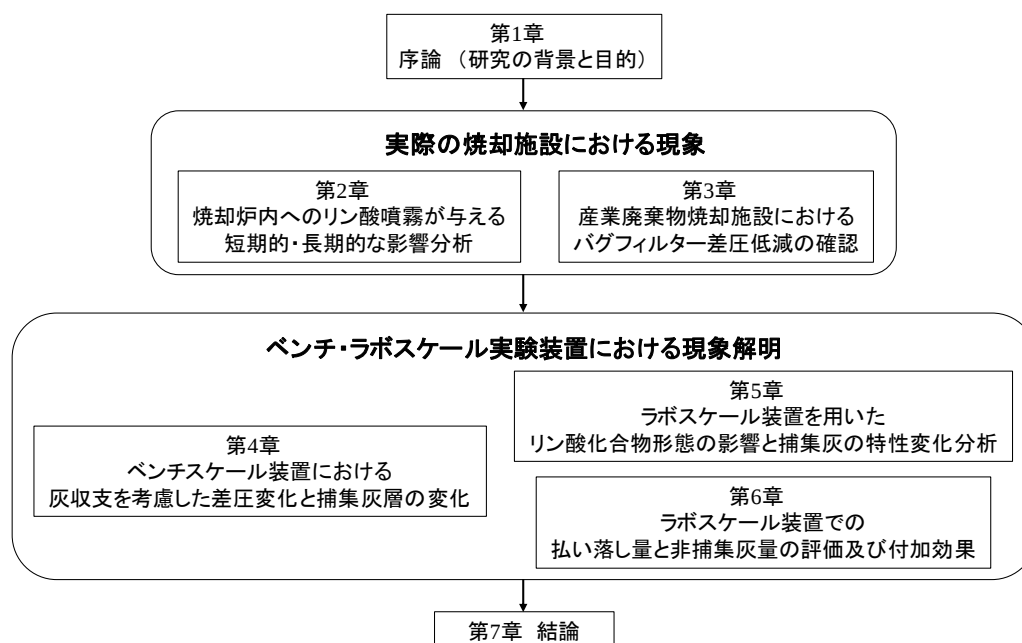


図 1-2 本論文の構成

第1章である本章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、リン酸廃液の焼却炉内への噴霧処理におけるバグフィルター差圧低下事例として、実際の産業廃棄物焼却処理施設の運転データ分析を行った。バグフィルター差圧の変化をリン酸廃液噴霧時の短期的なものと、噴霧後の長期的なものに分け、リン酸廃液噴霧の影響を調べた。リン酸廃液噴霧の短期的な影響としては、バグフィルター差圧の低下と低い値で維持されること、バグフィルター差圧低下現象は再現性があり、ろ布の使用期間によらず起こることを示した。長期的な影響としては、噴霧後にバグフィルター差圧が上昇傾向を示した。特にろ布の継続使用の中での初回噴霧後、または交換後の初回噴霧後に、バグフィルター差圧が急激に上昇することがわかった。

第3章では、第2章で対象とした施設において実機試験を行い、リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低減現象の確認を行った。実験は2回行い、両方でリン酸廃液噴霧時のバグフィルター差圧の低下および誘引通風機での消費電力が低下することを明らかにし、リン酸廃液噴霧が運転コスト削減につながる可能性を示した。またバグフィルターから排出される捕集灰の回収、計量、物性分析を行った。その結果、リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低減現象は、捕集灰の払い落とし量増加によって、ろ布上に捕集されている捕集灰が減ったことによる効果と、捕集灰の物性変化（灰粒子の大粒径化）による捕集灰層の通気性の向上による効果の両方によるものであると示唆された。

第4章では、廃棄物焼却施設の排ガス処理システムを模擬したベンチスケール試験を行い、リン酸噴霧による捕集灰とバグフィルター差圧低下の関係について調べた。明確な因果関係は明らかにはできなかったが、リン酸噴霧によってバグフィルター差圧が復帰する速度が遅くなり、それは捕集灰層の表面性状が変化したことによる可能性が示された。

第5章では、排ガス処理システムを模擬したラボスケールの装置を用い、液体のリン酸だけではなく、粉体のリン酸カルシウムを用いた実験を行い、リン酸化合物の形態によるバグフィルター差圧低減効果について調べた。捕集灰量と捕集灰中のリン濃度分析から、リン酸化合物の形態によらず捕集灰中のリン濃度が増加するほど捕集灰層の通気性が向上することが明らかとなった。また、捕集灰の物性分析より、リン酸噴霧によって捕集灰が大粒径化すること、ろ布上で不均一な捕集灰層を形成することを明らかにした。

第6章では、第5章と同じ装置を用い、リン酸噴霧による捕集灰の払い落とし量の変化と、非捕集灰量の変化について調べた。また、リン酸化合物によるバグフィルター差圧低減効果以外の効果として、飛灰からの重金属類（PbとCd）の溶出抑制効果とリン酸化合物と塩化物の反応による塩化水素の発生について検討を行った。その結果、リン酸噴霧は捕集灰の払い落とし量の増加にはつながらないが、非捕集灰量が増加することが分かった。これらのことから、リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減現象は、捕集灰の大粒径化による捕集灰層の通気性の向上と、非捕集灰の増加によるろ布への捕集灰負

荷の低下によるものであると示された。飛灰からの重金属類の溶出抑制については、リン酸化合物の効果よりも pH 変化が支配的であることがわかった。さらに、塩化物とリン酸化合物の反応では、条件によって塩化水素が発生することが明らかとなった。

第 7 章はまとめの章とし、本論文の結論を述べた。

参考文献

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 廃棄物対策課：日本の廃棄物処理，平成 26 年度版，2016.
- 2) 環境省：第三次循環型社会形成推進基本計画，2013.
- 3) Calle, S., Contal, P., Thomas, D., Bémer, D., Leclerc, D. : Description of the clogging and cleaning cycles of filter media. *Powder Technology*. 123 (1), pp. 40–52. 2002.
- 4) Song, C.B., Park, H. S., Lee, K.W. : Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles. *Powder Technology*. 163 (3), pp. 152–159. 2006.
- 5) Saleem, M., Krammer, G., Khan, R. U., Tahir, M. S. : Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter. *Powder Technology*. 224, pp. 28–35. 2012.
- 6) 廣田満昭，府藤篤，水野義照，大島敏男：濾布集塵特性に及ぼす粉体の流動性の影響，化学工学論文集，第 11 巻，第 1 号，pp. 1-12. 1985.
- 7) 井伊谷鋼一，森康維，牧野和孝，小松延勝，尾崎美喜雄，永嶋良一：パルス・ジェット式バグ・フィルターの払い落とし性能，化学工学論文集，第 5 巻，第 5 号，pp. 500-505. 1979.
- 8) J Sievert, F Löffler : Fabric cleaning in pulse-jet filters, *Chemical Engineering and Processing*, 26, pp. 179-183. 1989.
- 9) 池野栄宣，多田豊，平岡節郎，池井正輝，周戸祐介：斑落ちモデルに基づくバグフィルターの圧力損失の考察，化学工学論文集，第 30 巻，第 1 号，pp. 14-21. 2004.
- 10) 田中信寿，牧野和孝，井伊谷鋼一：多室バグフィルタの粉塵払い落とし操作に関する理論的考察，化学工学，第 37 巻，第 7 号，pp. 72-78. 1973.
- 11) 金岡千嘉男：フィルタ性能の経時変化，エアロゾル研究，Vol.4, No.4, pp. 14-22. 1989.
- 12) Ellenbecker, M. J., Leith D. : Dust removal characteristics of fabrics used in pulse-jet filters. *Powder Technology*. 36 (1), pp. 13–19. 1983.
- 13) Saleem, M., Khan, R. U., Tahir, M. S., Krammer, G. : Experimental study of cake formation on heat treated and membrane coated needle felts in a pilot scale pulse jet bag filter using optical in-situ cake height measurement. *Powder Technology*. 214 (3), pp. 388–399. 2011.

第2章 焼却炉内へのリン酸噴霧が与える短期的・長期的な影響分析

2.1 はじめに

ある産業廃棄物焼却施設において、処理物として受け入れたリン酸廃液を焼却炉内へ噴霧し焼却処理した際に、バグフィルター差圧が低下したと報告があった。バグフィルター差圧は、廃棄物焼却における排ガス処理システムの全圧力損失の半分以上を占めるといわれている。このため、バグフィルター差圧を低下させることは、廃棄物焼却施設全体でのエネルギー消費量やコストの削減につながる。

リン酸廃液をバグフィルター差圧の低減物質として用いるためには、短期的な影響と考えられるバグフィルター差圧低減現象の再現性とリン酸廃液噴霧条件とバグフィルター差圧低減に関する量的な関係を調べる必要がある。さらに、長期的影響として、バグフィルター差圧がリン酸廃液噴霧後にどのような変化を示すのかを知ることが必要となる。そこで本章では、実際の産業廃棄物焼却施設の運転データを用いて、リン酸廃液噴霧がバグフィルター差圧に与える効果を短期的影響と長期的影響のそれぞれについて明らかにすることとした。

2.2 調査対象とした産業廃棄物焼却施設の概略

本章で取り上げる産業廃棄物焼却施設は、2009年8月に運転を開始した。一日当たりの処理する産業廃棄物量は約87.9t/dでおおむね一定である。内訳としてはwetベースで、紙とプラスチックが55%、汚泥が22%、廃酸・廃アルカリを含む廃液が22%、残り1%が感染性廃棄物となっている。

図2-1にこの産業廃棄物焼却施設の設備フローを示す。焼却炉は、ストーカ式焼却炉とロータリーキルンが併設されたものであり、主に固形の廃棄物はストーカ炉に、液状の廃棄物はロータリーキルンに投入される。ロータリーキルンで処理された後、ストーカ炉で合流する仕組みとなっている。排ガスは、ボイラで熱回収されたのち、ガス冷却塔で水噴霧を行い冷却される。その後、消石灰を煙道に吹込み排ガス中の酸性物質を中和させる。ダストは1段目のバグハウス（BF1）で捕集除去される。その後、排ガス中にダイオキシン類の除去のために活性炭と酸性物質のさらなる除去のために消石灰を吹込み、2段目のバグハウス（BF2）でそれらを捕集除去する。BF1とBF2にはそれぞれPTFE製のろ布が378本ずつ設置されている（9本/列×42列）。それぞれの列は圧縮空気によって150秒間隔で付着ダストの払い落としがなされる。払い落とし間隔は、BF1の圧力損失が1.5kPaを超えた場合には、30秒間隔になるよう自動制御されている。誘引通風機がBF2の後段に設けられており、焼却炉内を負圧に保つために、その回転数は自動制御されている。排ガスはこれらの処理を経た後、煙突から排出される。

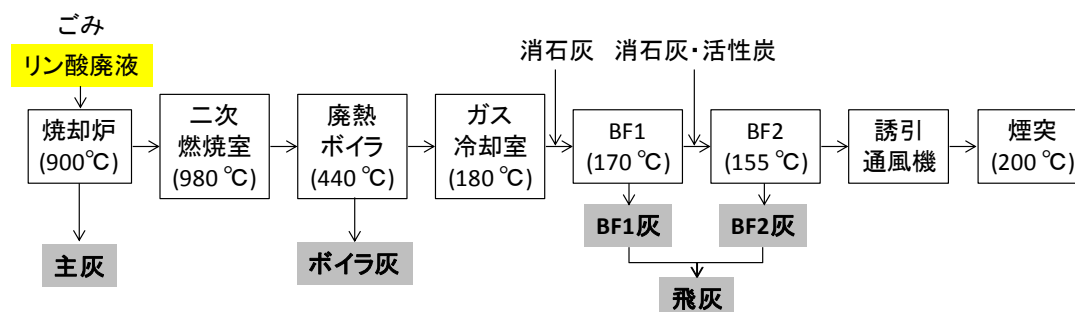


図 2-1 産業廃棄物焼却処理施設の設備フロー

リン酸廃液の焼却処理は 2011 年 4 月から始まった。リン酸廃液は、廃アルカリをリン酸で中和処理したものであり、電子部品製造工場から排出されたものである。9700 ± 300kg のリン酸廃液が、ほぼ毎月一度持ち込まれ、この産業廃棄物焼却処理施設の廃液保管タンクにおいて他の廃液と混合され保管される。表 3-1 に、保管タンクに投入前に採取されたリン酸廃液の特性値を示す。T-C, I-C, T-N は TOC-TN 分析計（TOC-V, 島津製作所）、リンはマイクロウェーブで分解処理しモリブデン青法、それ以外の元素は ICP-AES（ICPE-9000, 島津製作所）を用いてそれぞれ分析した。リンの分析法については後の章でくわしく説明する。持ち込まれた日にちは異なるが、リン酸廃液中の全炭素、窒素、リンの濃度はほぼ等しかった。また重金属類も分析したが、その値は低いか検出下限以下であった。

表 2-1 リン酸廃液の特性値

		持ち込み日	
		2013年4月19日	2013年5月15日
pH	[-]	6.58	6.43
Density	[kg/m ³]	1105	1119
T-C	[g/L]	186	198
I-C	[mg/L]	< 1	< 1
T-N	[g/L]	38	43
P	[g/L]	72.0	82.6
Al	[mg/L]	1.2	3.8
Ca	[mg/L]	7.4	8.6
Fe	[mg/L]	6.1	7.0
Cd	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Cr	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Cu	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Fe	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Mn	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Ni	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Pb	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Sb	[mg/L]	< 0.05	< 0.05
Zn	[mg/L]	< 0.05	< 0.05

表 2-2 運転データの区分

セクション	月数	期間	リン酸廃液噴霧回数	短期的影響の番号	長期的影響としての番号
A	19	2009年9月～2011年3月	None		1-17
B	19	2011年4月～2012年10月	14	1-14	1-14
C	12	2012年11月～2013年10月	8	15-22	1-10
D	8	2013年11月～2014年6月	2	23-24	1-6

表 2-2 に示すように、運転データの調査分析期間をリン酸廃液の処理開始とろ布の交換を契機として、4つのセクション（セクション A～D）に分類した。セクション A はリン酸廃液噴霧なしの期間である。リン酸廃液噴霧はセクション B, C, D でなされ、それぞれのセクションの間でろ布の全数交換がなされた。交換されたろ布は PTFE 製ではあるが、運転開始時に用いていたろ布のメーカーとは異なる。

本章では、BF1 の圧力損失におけるリン酸廃液噴霧の短期的・長期的効果を調査した。リン酸廃液噴霧の短期的効果は、リン酸廃液が焼却炉内へ噴霧されている期間の圧力損失における影響と定義した。それぞれのリン酸廃液噴霧を個別事例として取り上げた。リン酸廃液噴霧の長期的効果は、運転期間すべてを対象とし、期間をブロックに分けて分析した。この産業廃棄物焼却処理施設から得られた運転データは、BF1 と BF2 の入口圧力と出口圧力の差、排ガス流量、焼却から排ガス処理プロセスに至る各プロセスにおける圧力などがある。以後、BF1 における圧力損失と排ガス流量はそれぞれ ΔP , Q と表記する。これらに加えて、リン酸廃液中のリン酸濃度、リン酸廃液の噴霧量、リン酸廃液の噴霧期間、処理された産業廃棄物量との関係について分析した。ここで、BF2 の圧力損失は小さく、変化もほとんどなかったので分析は行わなかった。

2.3 リン酸廃液噴霧による短期的影響

図 2-2 にリン酸廃液噴霧中に ΔP の低下があった一つの事例を示す。焼却炉内にリン酸廃液が噴霧されるとすぐに、 ΔP が低下し始めた。リン酸廃液噴霧開始時と終了時の ΔP の値をそれぞれ、 ΔP_i , ΔP_f と表記した。リン酸廃液噴霧中の ΔP の最小値を $\Delta P_{\min}$ とした。これらの値を用いて、リン酸廃液噴霧中に生じた差圧低下幅を ΔP_i と $\Delta P_{\min}$ の差 ($\Delta P_i - \Delta P_{\min}$) と定義した。リン酸廃液の噴霧時間 (t_s) と ΔP が最小値となるまでにかかった時間 ($t_{\min}$) も決定した。加えて、復帰時間 (t_r) を、リン酸廃液噴霧終了後から ΔP が上昇し安定するまでにかかった時間として定義した。リン酸廃液噴霧開始時と噴霧終了時の排ガス流量をそれぞれ Q_i , Q_f とした。 ΔP の減少とリン酸噴霧条件との量的関係を理解するために、リン酸濃度、噴霧速度、リン酸廃液の噴霧継続時間などを決定した。ろ布の交換からの経過時間（すなわちろ布の使用期間）も調査対象とした。

表 2-3 に調査期間における 24 回のリン酸廃液噴霧事例を示す。廃棄物送り速度の平均値とリン酸廃液の噴霧速度はそれぞれ、 $2.7 \pm 0.4 \text{ t/h}$, $0.7 \pm 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。廃棄物量に対するリン酸廃液の重量割合はおおむね 1 : 4 であり、どの Run でもほとんど一定

であった。リン酸廃液が噴霧され始めたとき、 ΔP_i と Q_i はそれぞれ 1.3 ± 0.4 kPa, 26.4 ± 5.6 km³N/h であった。全ての Run において、 $\Delta P_i - \Delta P_{\min}$ の値で示されたように、リン酸廃液噴霧によって BF1 の圧力損失 ΔP が低下したことがわかる。

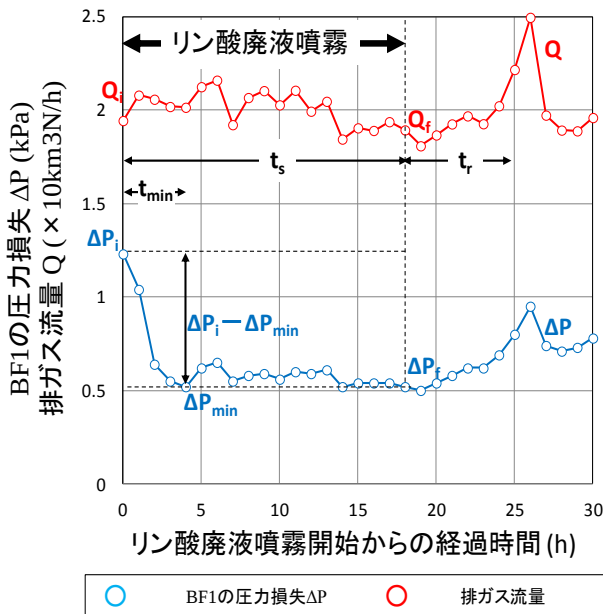


図 2-2 リン酸廃液噴霧時のバグフィルター差圧と排ガス流量の変化の例 (Run No. 11)

表 2-3 リン酸廃液噴霧による短期的効果を分析するために用いたデータ

Section	Spray No.	日付	ろ布 使用期間	廃棄物 送り速度	リン酸	リン酸	リン酸	リン酸	BF1の圧力損失				排ガス流量		最小値	復帰時間
					廃液 噴霧速度	廃液中の リン酸濃度	噴霧速度	廃液 噴霧時間	噴霧時	最小値	噴霧 終了時	$\Delta P_i - \Delta P_{min}$	噴霧時	噴霧 終了時	到達までの 経過時間	
			[months]	[t/h]	[m³/h]	[kg/m³]	[kg-H ₃ PO ₄ /h]	t_i [h]	ΔP_i [kPa]	ΔP_{min} [kPa]	ΔP_f [kPa]		Q_i [km³/h]	Q_f [km³/h]	t_{min} [h]	t_r [h]
B	1	2011/4/7	20	3.0	0.75	186	139	16	0.55	0.22	0.28	0.33	26.4	25.1	4	3
	2	2011/4/20	20	2.4	0.79	219	172	12	1.29	0.38	0.43	0.91	28.0	25.7	8	17
	3	2011/5/2	21	2.5	0.70	236	164	12	1.01	0.29	0.28	0.72	25.8	25.9	3	11
	4	2011/5/21	21	1.9	0.90	187	168	7	1.42	0.34	0.34	1.08	22.9	24.1	4	no-data
	5	2011/7/1	23	2.0	0.74	182	134	17	1.49	1.02	1.47	0.47	22.9	20.3	3	5
	6	2011/8/25	24	2.1	1.01	187	188	11	1.38	0.51	0.44	0.87	22.6	21.5	3	22
	7	2011/9/30	25	2.6	0.59	181	106	11	1.44	0.44	0.69	1.00	20.9	20.2	3	44
	8	2011/10/17	26	2.9	0.54	177	95	22	1.33	0.55	0.69	0.78	22.3	21.2	4	4
	9	2011/12/4	28	2.3	0.66	180	119	19	1.39	0.64	0.51	0.75	18.2	20.6	7	13
	10	2011/12/13	28	3.1	0.73	259	188	14	1.57	0.44	0.47	1.13	22.4	21.1	4	14
	11	2012/2/3	30	2.6	0.67	186	125	18	1.23	0.55	0.54	0.68	19.4	20.2	4	8
	12	2012/2/18	30	2.7	0.63	200	126	19	1.16	0.60	0.67	0.56	20.1	19.2	5	38
	13	2012/3/17	31	2.8	0.69	176	121	18	1.15	0.70	0.77	0.45	18.9	21.2	4	20
	14	2012/4/3	32	2.3	0.73	182	134	16	1.46	0.86	0.76	0.60	21.2	21.5	6	16
C	15	2012/12/23	2	2.8	0.45	175	79	27	0.94	0.27	0.34	0.67	32.3	33.0	3	34
	16	2013/4/11	6	2.6	0.76	155	118	3	1.49	0.33	0.33	1.16	33.9	32.4	3	20
	17	2013/4/20	6	3.1	0.70	195	137	16	1.25	0.87	0.91	0.38	31.8	28.8	15	4
	18	2013/6/5	8	2.7	0.57	161	91	3	1.68	0.44	0.44	1.24	31.7	29.1	3	11
	19	2013/6/6	8	3.2	0.84	113	94	5	1.27	0.39	0.4	0.88	33.4	30.8	3	19
	20	2013/6/11	8	2.9	0.93	177	164	13	1.74	0.95	1.03	0.79	35.3	30.6	12	7
	21	2013/7/29	9	3.0	0.55	281	155	14	1.22	0.88	0.9	0.34	29.7	29.3	4	14
	22	2013/10/22	12	3.0	0.82	183	150	13	2.65	0.87	0.81	1.78	30.3	28.6	8	26
D	23	2013/12/18	2	3.4	0.77	184	142	13	0.97	0.65	0.63	0.32	33.8	31.9	9	22
	24	2014/2/6	4	2.6	0.42	164	69	4	0.67	0.13	0.16	0.54	29.5	30.1	3	18
			Min	1.9	0.4	112.9	69.2	3.0	0.6	0.1	0.2	0.3	18.2	19.2	3.0	
			Max	3.4	1.0	281.4	188.4	27.0	2.7	1.0	1.5	1.8	35.3	33.0	15.0	
			Average	2.7	0.7	188.5	132.5	13.5	1.3	0.6	0.6	0.8	26.4	25.5	5.2	
			Stdev	0.4	0.1	33.7	32.9	6.0	0.4	0.3	0.3	0.3	5.6	4.7	3.2	
			CV [%]	14	20	18	25	45	30	45	50	45	21	18	61	

ΔP の低下がリン酸の噴霧量に依存するのかを明らかにするために、 $\Delta P_i - \Delta P_f$ で求めた ΔP の低下幅と噴霧されたリン酸の総量とを比較した。その結果を図 2-3(a)に示す。噴霧されたリン酸の総量は、リン酸廃液噴霧速度 (m^3/h) $\times$ リン酸廃液噴霧継続時間 (h) $\times$ リン酸廃液中のリン酸濃度 (kg/m^3) で求めた。各 Run に噴霧されたリン酸の量は、おもに 2000~2500kg の幅であった。 $\Delta P_i - \Delta P_f$ の値は一つの事例 (Run No. 22) を除いて、0.3~1.2kPa の範囲であった。圧力損失の低下幅はリン酸の噴霧総量には比例しなかった。すなわち、多量のリン酸を噴霧しても、さらなる圧力損失低下効果にはつながらないことがわかった。

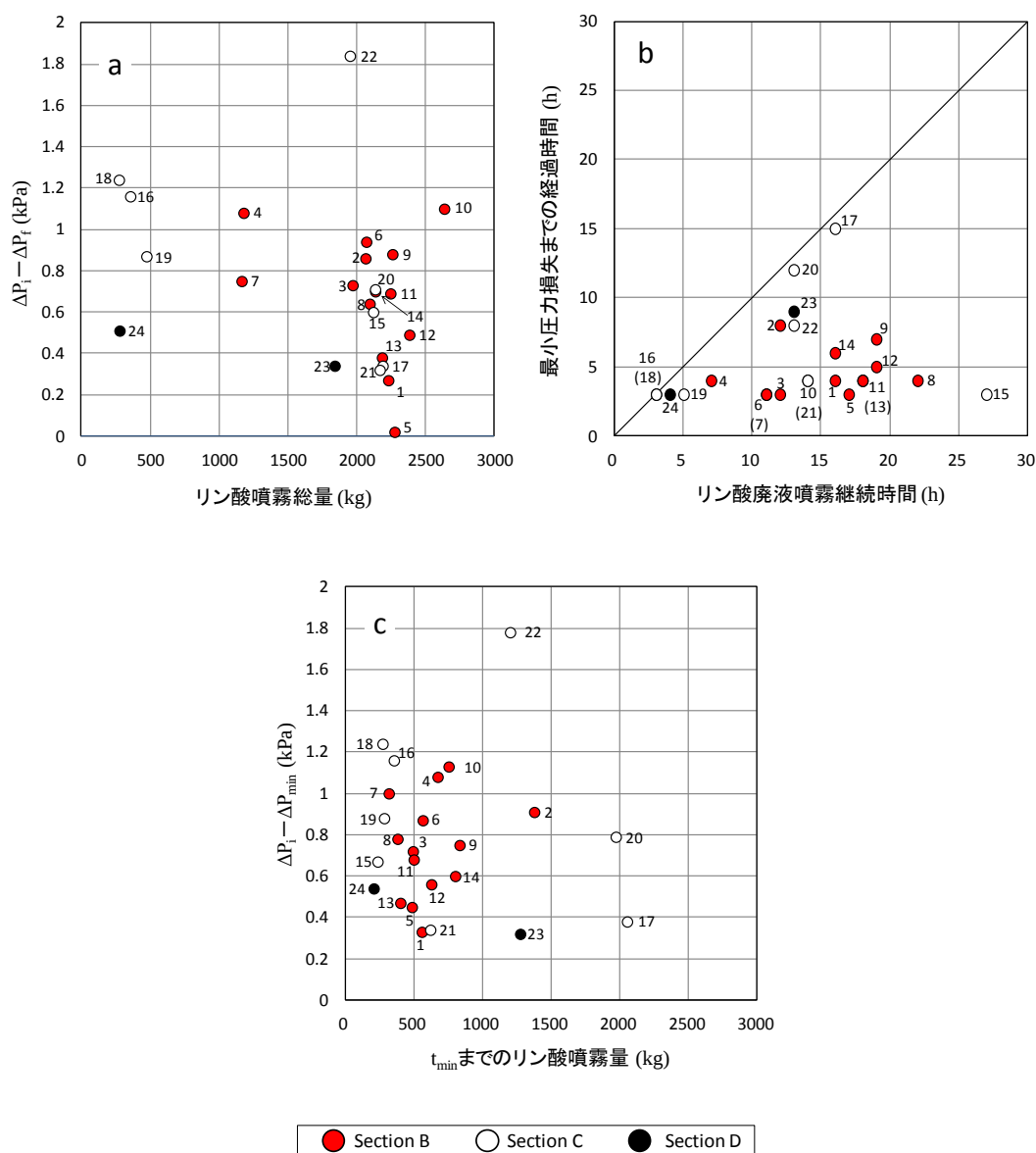


図 2-3 リン酸噴霧とバグフィルター差圧低下の量的関係
(数字は Run No., () はプロットの重複を表す)

図 2-3(b)にリン酸廃液噴霧時間 (t_s) と圧力損失が最小値に到達するまでの時間 (t_{min}) の関係を示す。ほとんどの Run において、 t_{min} は t_s よりも短く、圧力損失は約 5 時間以内に ΔP_{min} に達することがわかった。これらの結果から当時の噴霧条件と比較して、より少ないリン酸の噴霧量で圧力損失低下効果が得られると考えられる。

図 2-3(c)に $\Delta P_i - \Delta P_{min}$ と t_{min} までに噴霧されたリン酸量との関係を示す。これは噴霧されたリン酸量が BH1 の圧力損失の最小値 ΔP_{min} とどのように関係しているのかを示すものである。 ΔP_{min} に達するまでに噴霧されたリン酸量は、約 200～800kg であった。 $\Delta P_i - \Delta P_{min}$ は 0.3～1.2kPa の範囲であり、 $\Delta P_i - \Delta P_f$ の値とほとんど一致した。すなわち、リン酸の噴霧総量の 20～32% が圧力損失の低下 ($\Delta P_i - \Delta P_{min}$) に寄与したと示唆された。噴霧されたリン酸の中で、圧力損失低下に寄与しなかった残りのものは、圧力損失が低い値を維持する役割を果たしたと考えられる。噴霧されたリン酸の総量と復帰時間 t_r との関係も調べたが、関係性はみられなかった。

表 2-3 に示すように、復帰時間 t_r の値はリン酸の噴霧総量に関係なく、3～44 時間の幅であった。

図 2-4 にろ布の使用期間と圧力損失低下幅の関係を示す。セクション B でのろ布の使用期間は、セクション C とセクション D よりも長かったが、 $\Delta P_i - \Delta P_{min}$ における顕著な違いはみられなかった。このことから、リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低下はろ布の使用期間とは独立していると考えられる。

2.4 リン酸廃液噴霧による長期的影響

リン酸廃液噴霧後の数カ月にわたる通常運転において、BF1 の圧力損失がどのように変化するかを知るために長期的影響分析を行った。ここで、リン酸噴霧による短期的

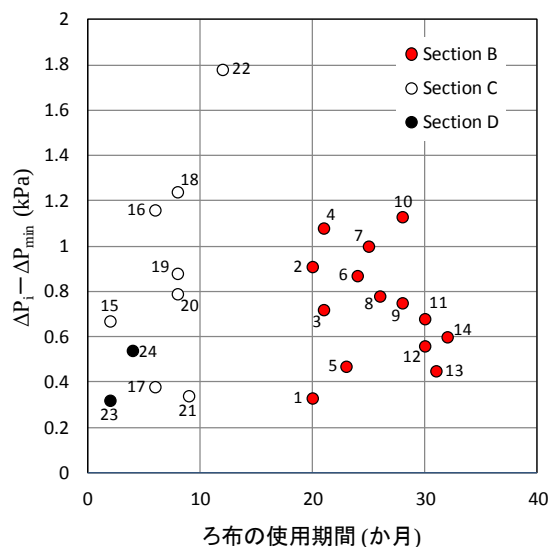


図 2-4 ろ布使用期間とバグフィルター差圧低下低下幅の関係

かつ劇的な圧力損失の低下と、休炉期間中は分析対象から除外した。

図 2-5 に 2012 年 1 月 1 日から同年 2 月 29 日までの BF1 の入り口圧力, BF1 の圧力損失 (ΔP), 排ガス流量および BF1 の圧力損失と排ガス流量の比 ($\Delta P/Q$) の変化を示す。

$\Delta P/Q$ はダルシー則を式 (2-1) のように変形すると次式となる。

$$\frac{\Delta P}{Q} = \frac{1}{k} \times \frac{\Delta x}{A} \quad (2-1)$$

ここで, ΔP : BF1 の圧力損失 (kPa), Q : 排ガス流量 ($\text{km}^3\text{N/h}$), k : 透気係数 ($\text{kPa} \cdot \text{h/m}^2$) Δx : ろ布と集塵灰層の合計の厚さ (m), A : ろ布の集塵面積 (m^2) である。ろ布と集塵灰層の合計の厚さはほぼ一定と考えられる。それゆえに, $\Delta P/Q$ はろ布と集塵灰層の排ガスの通気性に影響する抵抗と考えられ, $1/k$ に比例する。

図 2-5 において黒の破線で囲まれた Block B-9, B-10, B-11 は長期的影響を考察するために用いる期間を表している。B-9 と B-11 において灰色の線で示された ΔP はほぼ一定で推移している。一方, B-10 では黒色の線で示したように ΔP が直線的に増加したことがわかる。 ΔP が一定値で推移する傾向なのか, ΔP が直線的に増加する傾向なのかを判断基準として, それぞれの Block をどちらかのパターンに分類した。 ΔP_s と ΔP_e は Block の開始時と終了時における ΔP の値であり, 表 2-4 に示したように, Block の区間内で小さな変動がみられた。この施設の休炉期間 (6900 時間), リン酸廃液噴霧による短期的変動期間 (4399 時間), データなしの期間 (3977 時間) を除き, 分析対象とした運転期間は 26844 時間 (約 37 カ月) であった。セクション A が最も長く, なおかつ最も多くの Block を有していた。

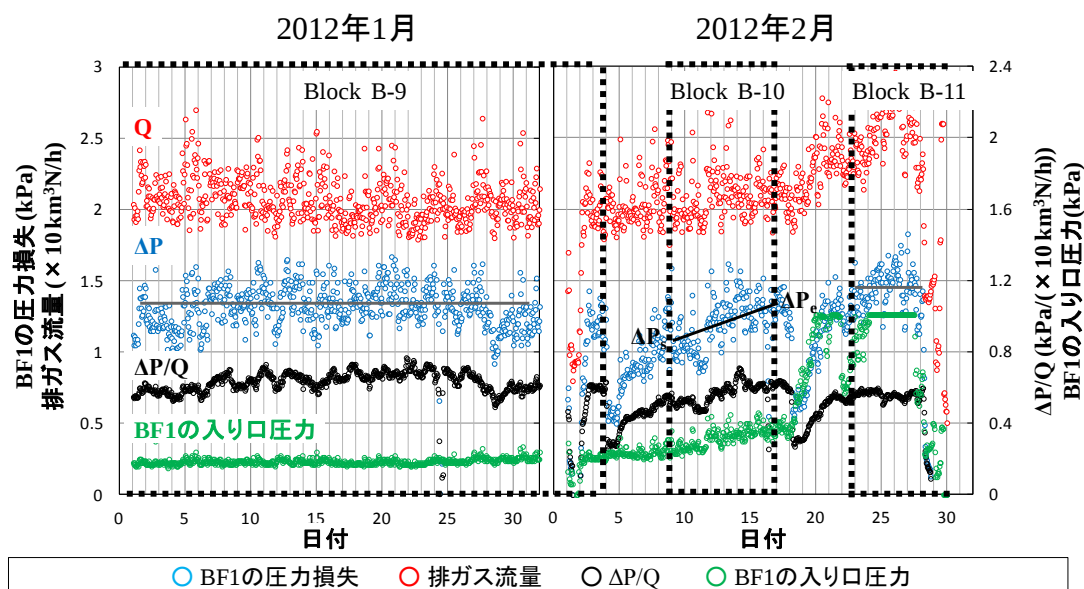


図 2-5 運転データの例 (2012 年 1 月 1 日～2 月末日)

表 2-4 リン酸廃液噴霧による長期的影響分析に用いたデータ

Section	Block No.	日付	ブロック開始前におけるリン酸廃液噴霧の有無*	時間 [hour]	BF1の圧力損失 [kPa]		排ガス流量 [km ³ N/h]		排ガス流量に対する圧力損失比 [×10 ⁻² kPa/(km ³ N/h)]		
		Start	End		ΔP _s	ΔP _e	Q _s	Q _e	ΔP _s /Q _s	ΔP _e /Q _e	
A	1	2/9/2009	30/9/2009	0	337	0.25	0.95	28.0	28.0	0.9	3.4
	2	1/10/2009	2/11/2009	0	415	0.46	0.65	26.0	26.0	1.8	2.5
	3	3/11/2009	30/11/2009	0	315	0.65	0.89	27.0	27.0	2.4	3.3
	4	1/12/2009	8/12/2009	0	192	0.89	0.62	28.7	28.7	3.1	2.2
	5	9/12/2009	19/7/2010	0	2543	1.10	1.30	28.2	29.2	3.9	4.5
	6	20/7/2010	22/8/2010	0	465	0.81	0.80	26.3	25.8	3.1	3.1
	7	23/8/2010	16/9/2010	0	408	1.20	0.50	25.8	26.0	4.7	1.9
	8	17/9/2010	22/9/2010	0	138	0.85	0.70	26.0	26.0	3.3	2.7
	9	23/9/2010	7/12/2010	0	1394	0.58	0.68	26.0	28.6	2.2	2.4
	10	8/12/2010	23/12/2010	0	382	0.77	0.55	28.6	27.3	2.7	2.0
	11	24/12/2010	16/1/2011	0	334	0.70	0.70	28.0	28.0	2.5	2.5
	12	17/1/2011	22/1/2011	0	144	0.94	0.97	28.0	28.0	3.4	3.5
	13	23/1/2011	4/2/2011	0	221	0.51	0.59	23.7	23.7	2.2	2.5
	14	5/2/2011	9/3/2011	0	789	0.69	0.72	25.0	26.8	2.8	2.7
	15	10/3/2011	18/3/2011	0	126	0.72	1.50	26.8	30.5	2.7	4.9
	16	19/3/2011	31/3/2011	0	286	0.68	1.23	27.8	27.8	2.4	4.4
	17	1/4/2011	3/4/2011	0	72	1.23	0.68	30.5	25.0	4.0	2.7
B	1	11/4/2011	20/4/2011	1	240	1.23	1.23	28.0	26.0	4.4	4.7
	2	30/4/2011	2/5/2011	1	72	1.23	1.55	27.0	25.5	4.6	6.1
	3	5/5/2011	21/5/2011	1	314	1.36	1.38	25.0	24.0	5.4	5.8
	4	14/6/2011	1/7/2011	1	432	1.31	1.45	24.5	22.9	5.3	6.3
	5	2/7/2011	25/8/2011	1	1115	1.40	1.21	22.9	21.7	6.1	5.6
	6	30/8/2011	30/9/2011	1	768	1.21	1.40	21.2	21.9	5.7	6.4
	7	5/10/2011	17/10/2011	1	211	1.35	1.35	21.9	22.1	6.2	6.1
	8	1/11/2011	4/12/2011	1	816	1.50	1.50	22.1	20.0	6.8	7.5
	9	25/12/2011	3/2/2012	1	959	1.35	1.40	20.0	20.5	6.8	6.8
	10	9/2/2012	17/2/2012	1	216	1.38	1.30	21.0	20.5	6.6	6.3
	11	23/2/2012	17/3/2012	1	488	1.05	1.35	20.0	21.5	5.3	6.3
	12	22/3/2012	3/4/2012	1	312	1.38	1.32	24.0	21.0	5.8	6.3
	13	15/4/2012	23/5/2012	1	551	1.31	1.31	23.0	23.0	5.7	5.7
	14	24/5/2012	20/6/2012	0	648	1.31	1.82	19.5	25.2	6.7	7.2
C	1	19/11/2012	22/12/2012	0	816	0.81	0.82	32.3	33.0	2.5	2.5
	2	11/1/2013	31/1/2013	1	504	1.45	1.45	32.2	33.0	4.5	4.4
	3	8/2/2013	11/4/2013	1	1389	1.50	1.50	32.4	32.5	4.6	4.6
	4	23/4/2013	27/5/2013	1	724	1.40	1.85	32.6	32.6	4.3	5.7
	5	17/6/2013	30/6/2013	1	279	1.86	2.30	32.1	31.8	5.8	7.2
	6	1/7/2013	29/7/2013	0	532	2.30	2.25	31.0	31.9	7.4	7.1
	7	1/8/2013	24/8/2013	1	576	1.75	2.65	32.0	32.3	5.5	8.2
	8	25/8/2013	22/10/2013	0	1224	2.65	2.60	32.3	30.0	8.2	8.7
	9	26/10/2013	7/11/2013	1	312	1.84	1.96	29.0	29.0	6.3	6.8
	10	8/11/2013	16/11/2013	0	216	2.38	2.38	29.0	29.0	8.2	8.2
D	1	27/11/2013	18/12/2013	0	528	1.00	1.00	33.0	31.3	3.0	3.2
	2	22/12/2013	5/2/2014	1	1104	1.52	1.50	32.0	32.0	4.8	4.7
	3	10/2/2014	25/2/2014	1	384	1.56	1.55	32.6	24.9	4.8	6.2
	4	26/2/2014	5/5/2014	0	1656	1.88	1.50	28.7	22.1	6.6	6.8
	5	18/5/2014	12/6/2014	0	624	1.88	1.88	28.6	28.6	6.6	6.6
	6	13/6/2014	23/6/2014	0	264	1.88	1.88	28.6	28.6	6.6	6.6

*: 噴霧なし :0, 噴霧あり:1
s: 開始時
e: 終了時

図 2-6 に施設の積算運転時間に対する ΔP, Q, ΔP/Q の変化を示す。これは表 2-4 に示した Block の開始時と終了時値をプロットしたものである。色つきのマーカーは、Block の前でリン酸廃液噴霧がなされたということを表している。リン酸廃液噴霧がなされなかったセクション A では、ΔP と Q がそれぞれ 0.5～1.0kPa, 25～30km³N/h の変動幅内であった。排ガス流量が増加したときに圧力損失も上昇したが、ΔP/Q は 0.01～0.05kPa/(km³N/h)の範囲内で維持していた。

セクション B の期間では、最後の Block を除いて、全ての Block の前でリン酸廃液噴霧がなされていた。ろ布はセクション A で使われていたものが継続使用されていた。セクション B におけるろ布の透気係数は、長期間にわたってろ布が使用されていたため、セクション A よりも低かったと考えられる。図 2-6 の I に示したように、ΔP の上昇が初回のリン酸廃液噴霧直後の Block の開始時に観察された。その後の ΔP の変化は顕著なものではなく、おおむに 1.5kPa で維持していた。しかし、Q の値が 30km³N/h か

ら $20\text{km}^3\text{N/h}$ に徐々に下げられており、このことが圧力損失の上昇を抑制したと考えられる。セクション B の期間中、 $\Delta P/Q$ は $0.01\sim 0.05\text{kPa}/(\text{km}^3\text{N/h})$ の範囲で維持していたが、平均的にはセクション A よりも高い値を示していた。

セクション C の期間中では、図 2-6 中の II に示したように、初回のリン酸廃液噴霧後すぐに ΔP が 0.8kPa から 1.5kPa に上昇した。これはろ布の全数交換から 2 カ月以内に起こった。 Q の値がほとんど一定であるため、 ΔP の上昇に伴って $\Delta P/Q$ の値も上昇した。リン酸廃液噴霧が直前になされていない Block の期間中では ΔP はほとんど変化しなかった。その一方で、リン酸廃液噴霧がなされた直後の Block では ΔP が上昇した。セクション A とセクション B と比較すると、セクション C の期間中全体にわたって、 $\Delta P/Q$ の値が短期間のうちに急に上昇した。

セクション D でも図 2-6 中の III に示したように、セクション B やセクション C と同様に、初回のリン酸廃液噴霧後の Block で ΔP が上昇した。しかし、その後は排ガス流量を減少させたため、圧力損失の上昇は抑制された。またセクション C 同様、セクション D でもリン酸廃液が噴霧されなかった Block では ΔP はほとんど変化しなかった。

以上の結果から、リン酸廃液が噴霧されなかった場合であるセクション A において、 ΔP と $\Delta P/Q$ が最も低い値であることが示された。 ΔP はリン酸廃液噴霧後に上昇し、特

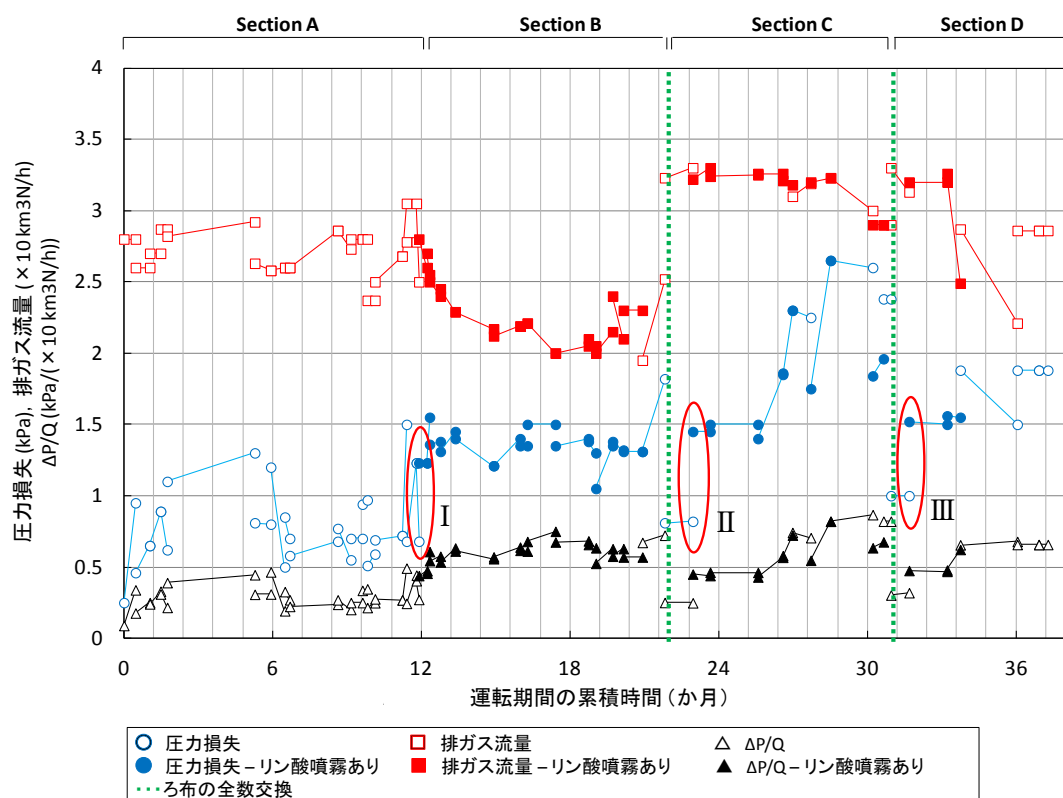


図 2-6 累積運転時間によるバグフィルター差圧 (ΔP), 排ガス流量 (Q), $\Delta P/Q$ の変化

に初回のリン酸廃液噴霧後で ΔP の上昇が顕著であることがわかった。この現象は、セクション B、セクション C、セクション D で共通して起こった現象であった。 $\Delta P/Q$ もリン酸廃液噴霧後に上昇し、このことはセクション A と比較してリン酸廃液噴霧後に透気係数が低下したことを示すものであった。

2.5 結論

リン酸廃液噴霧中には、バグフィルター差圧が急激に下がり、その後は低い値を維持することがわかった。圧力損失の低減に着目すると、圧力損失低減に寄与するリン酸量は、噴霧されたリン酸の総量よりも少ないことがわかった。さらに、ろ布の製造会社や使用期間に関わらず、リン酸噴霧開始からおよそ 5 時間以内に圧力損失が低下し最小値にまで達することも明らかとなった。圧力損失が、リン酸噴霧終了後から 2 日以内に噴霧前の値に復帰する場合があった。しかしながら、長期的観点からみると、リン酸噴霧なしに比べて、リン酸噴霧後には圧力損失が上昇することが示された。この影響は初回のリン酸廃液噴霧に顕著にみられるものであった。

リン酸廃液噴霧中の圧力損失低減は、短期的な効果として、集塵灰層の通気性の改善やパルスジェットによる集塵灰の払い落とし量の増加によるものと考えられる。リン酸廃液噴霧後における圧力損失の長期的な上昇は、リンを含むダストが、パルスジェットによる払い落とし除去がされにくい凝集体となり、ろ布の表面から内側に入り込んだことによって起こったと考えられる。しかしながら、この産業廃棄物焼却処理施設の目的はリン酸廃液を焼却処理することである。したがって、リン酸廃液の噴霧速度のような運転条件を変更することは容易ではない。バグフィルター差圧をリン酸廃液を用いて低下させることを考えると、長期的な観点からバグフィルター差圧を上昇させないための適切なリン酸濃度といった適切なリン酸廃液の噴霧条件を決めることが必要である。

今回観察された圧力損失の短期的・長期的効果は、リン酸廃液噴霧によってダスト粒子が物理的・化学的な特性が変化したことによることが考えられる。圧力損失の低下と上昇のメカニズムを調べるために、ダスト粒子の粒度分布、集塵灰層のリン含有量、リン化合物の形態などを詳しく分析する必要がある。

本章に関連する発表

- 1) Shigetoshi Takahashi, In-Hee Hwang, Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto: Short-term and Long-term Effects of spraying phosphoric acid wastewater on pressure drop of fabric filter in solid waste incinerator, The 2nd 3R International Scientific Conference, Korea, 2015.
- 2) 高橋 滋敏、黄 仁姫、松藤 敏彦、角田 芳忠：P-001 リン酸廃液の焼却炉内噴霧によるバグフィルター差圧への短期的・長期的影響、平成 27 年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会 ポスター発表プログラム、2015.

- 3) 高橋滋敏, 黄仁姫, 松藤敏彦: C2-5 リン酸廃液の焼却炉内噴霧によるバグフィルター差圧への短期的・長期的影響, 第 26 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 九州大学, 2015.
- 4) 高橋滋敏, 黄仁姫, 松藤敏彦, 角田芳忠: リン酸廃液の焼却炉内噴霧によるバグフィルター差圧への短期的・長期的影響, 第 23 回衛生工学シンポジウム (北大, フロンティア応用科学研究棟), 2015.
- 5) Shigetoshi Takahashi, In-Hee Hwang, Toshihiko Matsuto: Effects of phosphoric acid sprayed into an incinerator furnace on the flue gas pressure drop at fabric filters, Waste Management 52, 130-137, 2016.

第3章 産業廃棄物焼却施設におけるバグフィルター差圧低減の確認

3.1 はじめに

第2章から、ある産業廃棄物焼却処理施設（以下、A施設）の運転データ分析より、リン酸廃液の焼却炉内への噴霧によって、バグフィルター差圧が低下することが明らかとなった。しかし、A施設ではリン酸廃液を焼却処理することが目的であるため、バグフィルター差圧低減効果とリン酸廃液噴霧量の量的な関係やバグフィルター差圧低減メカニズムについては不明である。

本章では、リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低減メカニズムの解明を目的として、仮説を立て、A施設においてリン酸廃液噴霧試験を行い仮説の検証を行った。

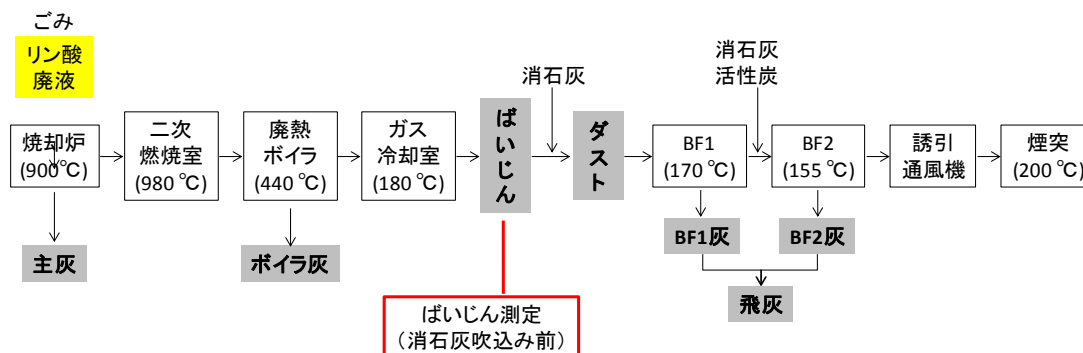
3.2 研究対象施設

3.2.1 施設概要

図3-1に実験を行ったA施設の設備フローを示す。設備の詳細は第2章に示した通りであるので省略する。本章ではBF1の圧力損失をBF1差圧と表記する。また図3-1に示したように、BF1に流入するばいじんと消石灰の混合物をダスト、BF1から排出される捕集灰のことをBF1灰と表記する。

3.2.2 BF差圧低下効果の原因物質

BF1差圧低下がリン酸による効果であることを確認するために、A施設で市販のリン酸水溶液を希釈し7.5%、3.8%、2.5%のリン酸水溶液を焼却炉内へ噴霧した実績があった。図3-2にリン酸水溶液噴霧開始からのBF1差圧と排ガス流量の経時変化を示す。7.5%と3.8%ではリン酸廃液と同様にBF1差圧低減効果がみられたものの、2.5%では効果がみられなかった。したがってリン酸廃液中のリン酸がバグフィルター差圧低減効果に関与していることがわかった。また、バグフィルター差圧低減効果にはリン酸濃度の依存



*()内の数字は各設備の平均出口温度、煙突のみ平均入口温度

図3-1 A施設の設備フロー

性があることも明らかとなった。

3.3 実験方法

3.3.1 バグフィルター差圧低下の仮説

リン酸廃液の炉内噴霧によるバグフィルター差圧低下については、以下の二つの仮説が考えられる。

仮説 H1：ろ布上に捕集された灰（捕集灰）が圧縮空気（パルス）によって払い落されやすくなったため、捕集灰層の厚さが薄くなりバグフィルター差圧が低下した。

仮説 H2：捕集灰の物性が変化し捕集灰層の透気係数が大きくなったため、バグフィルター差圧が低下した。

仮説 H1 のように、リン酸廃液噴霧時に捕集灰が払い落とされやすくなると、その結果 BF1 灰の払い落とし量（BF1 灰量）が増加すると考えられる。このため、リン酸廃液噴霧前と噴霧中の BF1 灰量の変化を調べることで検証できる。仮説 H2 については、リン酸廃液噴霧前と噴霧中の BF1 灰をサンプリングし、粒度分布などの物性変化を調べることで検証可能となる。

3.3.2 実験条件と測定項目

実験は RUN1 と RUN2 の 2 度行った。各 RUN での実験条件を表 3-1 に示す。RUN1 ではリン酸廃液噴霧を 3 回に分け、噴霧終了とともに実験を終了した。RUN2 ではリン酸廃液噴霧終了後も約 2 時間実験を続けた。測定項目については以下に示す。

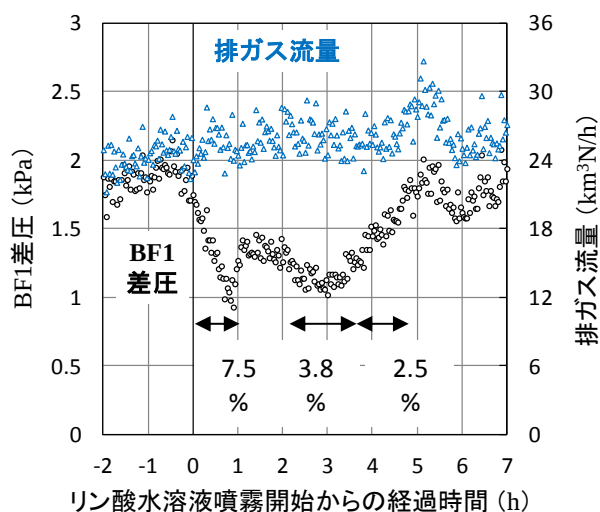


図 3-2 リン酸水溶液噴霧開始からの BF1 差圧と排ガス流量の経時変化

表 3-1 実験条件と測定項目

		RUN1		RUN2		
		噴霧前	噴霧中	噴霧前	噴霧中	噴霧後
実験継続時間[min]		227	348	75	150	125
投入物	廃棄物量[t-wet/h]	3.13	3.17	3.34	2.76	3.98
	リン酸廃液噴霧量[t/h]		0.70-0.75-0.67		0.95	
	リン酸濃度[wt%]		20		17	
	(as kg-P/h)		(44-47-42)*		(52)*	
	BF1消石灰吹込み量[kg/h]	16.5		5.5		
パルス条件	パルス圧[MPa]	0.35		0.52		
	パルス間隔[sec]	150		30		
ろ布使用期間		4ヵ月		8ヵ月		
測定結果としての運転条件	BF1温度[℃]	174		170		
	ろ過速度[m/min]	0.62		0.76		
	BF1入口ばいじん濃度[kg/h]	12.9	26.3			
測定項目		・ BF1入口でのばいじん濃度 ・ BF1灰量 ・ ばいじんとBF1灰中のリン含有量		・ BF1灰量 ・ BF1灰灰中のリン含有量 ・ BF1灰の物理特性 (粒度分布、凝集度、圧縮度)		

*リン酸廃液噴霧速度×リン酸濃度×リンの原子量/(リン酸の分子量×100)で算出

(1) 排ガス中のばいじん濃度

BF1 灰の元になるばいじんの流入速度を求めるために、RUN1 で排ガス中のばいじん濃度を測定した。JIS Z 8808¹⁾の円筒ろ紙法に従って BF1 入口で消石灰吹込み前の排ガスをおおむね 15 分間吸引し、排ガス中のばいじんをサンプリングした。この操作はリン酸廃液噴霧前と噴霧中にそれぞれ 3 回ずつ行った。BF1 へのばいじん流入速度は、排ガス中のばいじん濃度 (g/m³N) × 排ガス流量 (km³N/h) で求めた。なお、図 3-1 に示したように、BF1 へのばいじん流入速度に消石灰吹込み速度を足し、BF1 へのダスト流入速度とした。

(2) BF1 灰の排出量

リン酸廃液噴霧による BF1 差圧低下と BF1 灰の排出量の関係を明らかにするために、BF1 灰の計量を行った。BF1 灰搬出コンベヤーの下部にサンプリング口を設け、20L のステンレス容器で BF1 灰を採取し計量した。RUN1 のパルス間隔は 150 秒であり、BF1 灰の計量は、おおむねパルス 6 回分の 15 分間隔で行った。RUN2 ではリン酸廃液噴霧前の BF1 差圧が通常より高かったので、30 秒間隔でパルスを行い、パルス 1 周期 (30 秒/列×42 列=21 分) を少し上回る 25 分間隔で BF1 灰の計量を行った。そして BF1 灰量を採取時間で除し、BF1 灰排出速度を求めた。

一方、BF1 灰の計量後、約 1kg をサンプリングした。サンプリングした BF1 灰は、空気中の二酸化炭素や水分による影響を防ぐために、ポリビンに入れ窒素パージ後密封し保管した。

(3) ばいじんと BF1 灰中のリン濃度

噴霧したリン酸廃液中中のリンの挙動を知るために、RUN1 では BF1 に流入するばいじ

んと BF1 灰中のリン濃度を、RUN2 では BF1 灰中のリン濃度のみを調べた。また、BF1 へのリンの流入速度（＝ばいじん流入速度×ばいじん中のリン濃度）と BF1 からのリン排出速度（＝BF1 灰の排出速度×BF1 灰中のリン濃度）を求めた。

(4) BF1 灰の物理特性

リン酸廃液噴霧による灰の物性変化を確認するために、RUN2 のリン酸廃液噴霧前と噴霧中の BF1 灰を用いて粒度分布、凝集度、圧縮度を測定した。凝集度はリン酸廃液噴霧の有無による BF1 灰粒子の凝集度合いの変化を調べるために、圧縮度は粉体として BF1 灰の流動性の変化を知るために測定を行った。リン酸廃液噴霧前の BF1 灰としては、実験開始から 50~75 分間サンプリングした灰を、リン酸廃液噴霧中の BF1 灰としては、リン酸廃液噴霧開始から 125~150 分間サンプリングした灰を用いた。

(5) テスト中の運転データ

廃棄物送り速度、リン酸廃液の噴霧速度、BF1 差圧、排ガス流量、焼却炉と排ガス処理システムの各部位における温度、BF1 での消石灰吹込み速度、誘引通風機での消費電力などの運転データを中央制御室にて 1 分間隔データとして記録し受け取った。

3.3.3 分析方法

(1) リン分析

ばいじんのリン含有量は、ばいじん濃度測定のために円筒ろ紙でサンプリングしたばいじんのうち 0.5g を硝酸－過塩素酸分解法で分解・固液分離し、得られたろ液のリン濃度を ICP-AES (IRIS Advantage, 日本ジャーレルアッシュ社製) より測定し求めた。BF1 灰のリン含有量は、BF1 灰 0.1g に塩酸と硝酸を加え、マイクロウェーブ分解装置 (ETHOS, MILESTONE 社製) で分解し、分解液を 0.45μm のメンブレンを用いて固液分離したのちに得られたろ液を、吸光光度計 (U-1800, 日立製) を用いたモリブデン青法によりリン濃度を測定し求めた。ただし、ヒ素による妨害を防ぐために、JIS K 0101 および 0102 を参考にした。リン酸廃液は、60%硝酸と過塩素酸を加え、マイクロウェーブ分解装置で分解・固液分離し、モリブデン青法よりろ液のリン濃度を測定した。

(2) 粒度分布

レーザー回折・散乱法 (LMS-300, (株)セイシン企業製) で測定した。灰の前処理として 1mm ふるいでふるい分けを行い、1mm 以下の灰を測定に用いた。

(3) 凝集度⁴⁾⁵⁾

粉体物性測定機 (Multi Tester MT-1000, (株)セイシン企業製) を用いて測定した。上からふるい目が 250, 150, 75μm のふるいを重ね、試料を入れ 60 秒間振動させ、各ふ

るい上の残分から式(3-1)を用いて凝集度を求めた。

$$\text{凝集度}(\%) = \frac{(5 \times W_{250} + 3 \times W_{150} + W_{75}) \times 100}{5W} \quad (3-1)$$

ここで、 W ：分析量（g）， W_{250} ：250 μm ふるい上残分（g）， W_{150} ：150 μm ふるい上残分（g）， W_{75} ：75 μm ふるい上残分（g）である。凝集度は粉体が全くふるい下に落ちない場合は 100%，全てが最下層のふるい下となる場合は 0%となる。すなわち凝集度が 100%に近いほど塊がくずれにくく凝集力が強いと判断できる。

(4) 圧縮度⁶⁾

試料を 1mm のふるいを通して、体積が 100mL になるまで容器に充填し、重量を測定しかさ密度を求めた。次にこの灰を充填した容器を高さ 5cm でタッピング操作を 500 回行った。この操作の終了時の体積からかさ密度を求めた。この 2 種類の密度をそれぞれゆるめかさ密度、かためかさ密度と呼び、式(3-2)より圧縮度を求めた。また一つの試料につき 3 回ずつ行い、その平均値を求めた。

$$\text{圧縮度}[\%] = \frac{(\rho_h - \rho_s) \times 100}{\rho_h} \quad (3-2)$$

ここで、 ρ_h ：かためかさ密度（g/mL）， ρ_s ：ゆるめかさ密度（g/mL）である。圧縮度は流動性を示す指標の一つであるが、圧縮度によって粉体の流動性が一義的にあらわされるという報告がある⁷⁾ 圧縮度が高い粉体は流動性が悪く、ろ布表面で捕集されるため、パルスにより払い落される灰量が増加することが考えられる。

3.4 結果と考察

3.4.1 1 回目の実機試験の結果

(1) リン酸廃液噴霧による BF1 前後でのダスト収支

図 3-3(a)に BF1 へのばいじんおよびダスト流入速度、BF1 灰排出速度を示す。リン酸廃液噴霧によってダスト流入速度が噴霧前に比べ上昇したことがわかる。リン酸廃液がダスト流入速度を上昇させる原因であることを確認するために、ダストの内訳を推定することにした。

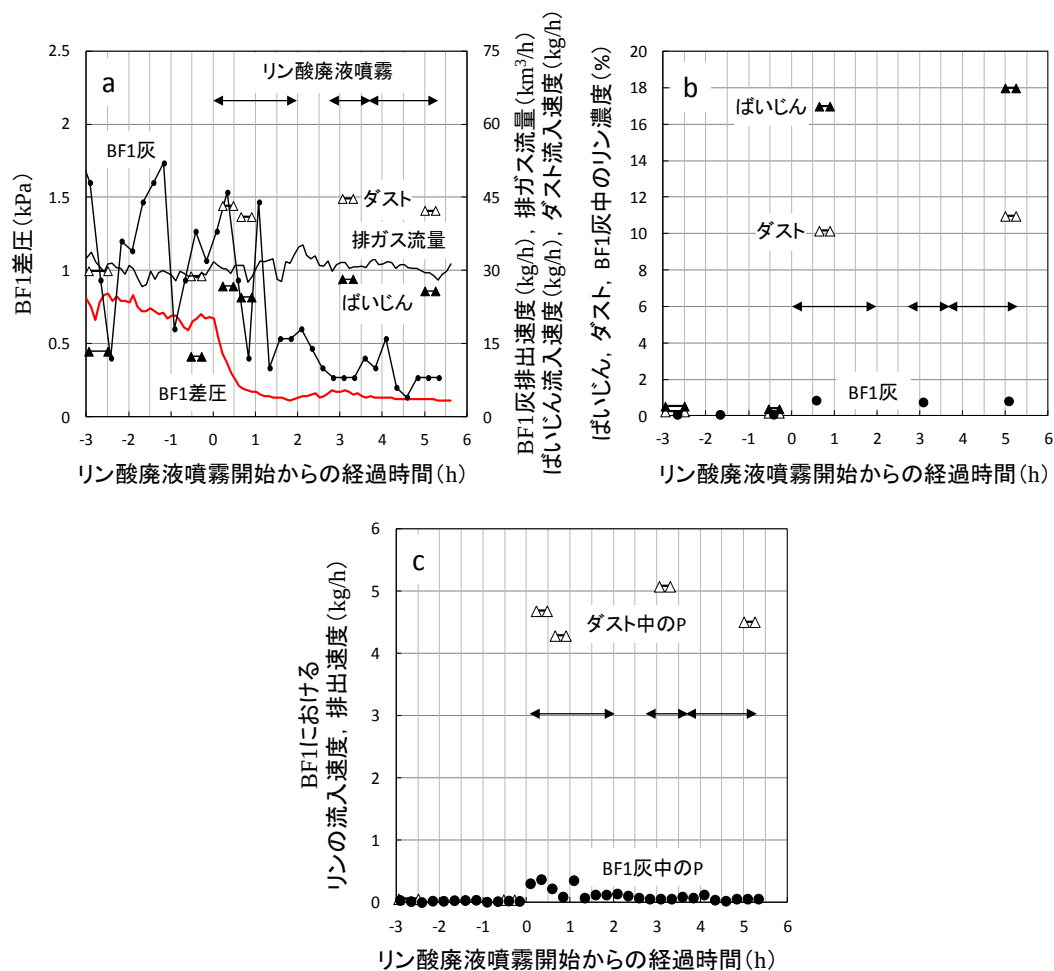


図 3-3 RUN1 における測定項目の経時変化

図 3-1 に示したように、ダストはばいじんと消石灰の合計となる。ばいじんは以下の三つから成り立つ (図 3-4)。

- ① 廃棄物由来のリン化合物
- ② その他の成分 (ばいじんからリン化合物を除いたもの)
- ③ リン酸廃液由来のリン化合物 (リン酸廃液噴霧時)

ここでリン化合物は、完全燃焼による酸化物として十酸化四リン (P_4O_{10}) として存在する場合と、ヒドロキシアパタイトのようなリン酸基 (PO_4) を持つ化合物として存

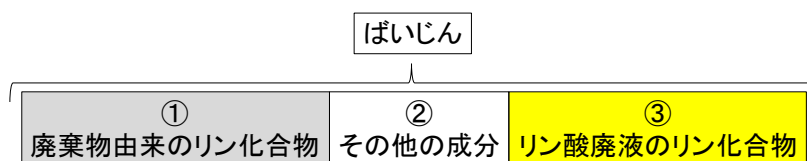


図 3-4 ばいじんの内訳

在する⁸⁾ 場合を仮定した。

①廃棄物由来のリン化合物の BF1 への流入速度 (P_0) は、図 3-3 (a)のリン酸廃液噴霧前のばいじん流入速度と図 3-3 (b)のばいじん中のリン濃度の測定値から式(3-3)を用いて推定できる。

$$P_0(\text{kg/h}) = \alpha \times C_{P0} \times D_0 \div 100 \quad (3-3)$$

ここで、 C_{P0} ：リン酸廃液噴霧前のばいじん中のリン濃度 (%) (=0.47%)、 D_0 ：リン酸廃液噴霧前のばいじん流入速度の平均値 (kg/h) (=12.9kg/h)、 α ：リン化合物中のリン重量比の逆数 (P_4O_{10} の場合=284/124、 PO_4 の場合=95/31) である。

②廃棄物由来のリン化合物を除いたばいじんの BF1 への流入速度は $D_0 - P_0$ である。したがって、リン酸廃液噴霧前のダスト流入速度は、(①+②の流入速度) + 消石灰吹込み速度= $P_0 + (D_0 - P_0) + 16.5\text{kg/h}$ から推定できる。

③リン酸廃液由来のリン化合物の BF1 への流入速度 (P) は、リン酸廃液噴霧中における図 3-3 (a)のばいじんの流入速度と図 3-3 (b)のばいじん中のリン濃度の測定値から、式(3-4)を用いて推定できる。

$$P(\text{kg/h}) = \alpha \times C_p \times D \div 100 - \beta \times P_0 \quad (3-4)$$

ここで、 C_p ：リン酸噴霧中のばいじん中のリン濃度 (%) (=17.5%)、 D ：リン酸廃液噴霧中のばいじん流入速度の平均値 (kg/h) (=26.3kg/h)、 β ：リン酸廃液噴霧中の廃棄物送り速度/リン酸廃液噴霧前の廃棄物送り速度 (-) (=3.17/3.13) である。

リン酸廃液噴霧前と噴霧中の廃棄物送り速度がほぼ同じであること(表 3-1)から、リン酸廃液噴霧中の廃棄物由来の灰流入速度($D_0 - P_0$)とリン化合物の流入速度 (P_0) は、リン酸廃液噴霧前と同じ値であると思われる。したがって、リン酸廃液噴霧中のダスト流入速度は、(①+②+③の流入速度) + 消石灰吹込み速度= $P_0 + (D_0 - P_0) + P + 16.5\text{kg/h}$ から推定できる。

図 3-5 にリン酸廃液噴霧前と噴霧中のダスト流入速度の測定値と推定値を示す。リン酸廃液噴霧中のダスト流入速度は、測定値とリン化合物の存在形態の異なるケースから得られた二つの推定値がほぼ一致していることがわかる。これらの結果から、リン酸廃液噴霧中のダスト流入速度の増加は、BF1 入口まで到達したリン酸廃液由来のリン化合物によるものとして説明できる。

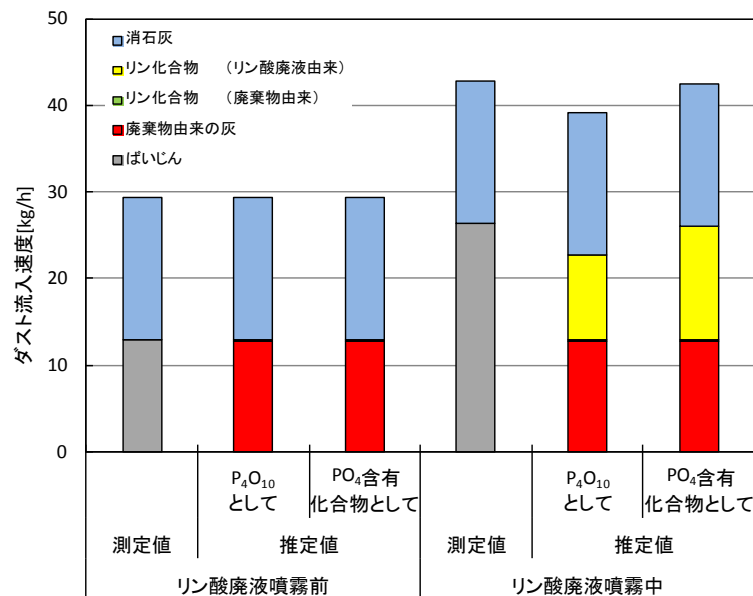


図 3-5 リン酸廃液噴霧による RUN1 の BF1 へのダスト流入速度の測定値と推定値

図 3-3 (a)に示したように、リン酸廃液噴霧前の BF1 灰の排出速度には変動があるものの平均すると 38.3kg/h であった。ダスト流入速度 29.4kg/h と若干差が生じたのは、消石灰が排ガス中の塩化水素と反応したことによる塩化カルシウムの生成と水和による重量増加などが原因として考えられる。BF1 へのダスト流入速度と BF1 灰排出速度が釣り合っており、ろ布上での捕集灰層の厚さは一定に保たれていたと考えられる。

一方、リン酸廃液噴霧開始から約 1 時間経過すると、BF1 灰排出速度は急激に低下し 10.6kg/h 程度となった。ダスト流入速度は 42.8kg/h であったことから BF1 に流入したダストの 24%程度しか払い落とされず、残りは BF1 に捕集されたまま蓄積した可能性があると考えられる。

(2) リンの挙動

図 3-3 (b)に、ばいじん、ダスト、BF1 灰のリン濃度の経時変化を示す。ダストのリン濃度は、ばいじん中のリン濃度×ばいじんの流入速度÷(ばいじんの流入速度+消石灰吹込み速度)で求めた。リン酸廃液噴霧によるダスト中のリン濃度の上昇に比べて、BF1 灰中のリン濃度はわずかしこ上昇しないことがわかった。ここで、ダストと BF1 灰中のリン濃度に図 3-3 (a)のダスト流入速度と BF1 灰排出速度を乗じることで、図 3-3 (c)の BF1 でのリンの流入速度と排出速度を求めた。リン酸廃液噴霧によって BF1 へのリンの流入速度が上昇したが、その一方で排出速度はほとんど変化がなかった。つまり、流入したリンは払い落とされず、BF1 に集塵されたまま蓄積していたと考えられる。リン酸廃液噴霧中の BF1 前後でのリン量を図 3-3 (c)のリンの流入・排出速度×経過時間の積分値から求めると、BF1 に到達したリンの総量では 21kg であるのに対し、排出量は

0.44kg しかなかった。

さらに噴霧されたリン酸廃液中のリンのうち BF1 に到達した割合を、表 3-1 と図 3-3 (a)，図 3-3 (b)の値と式(3-5)から求めた。

$$\text{BF1 に到達したリン割合(\%)} = (C_p \times D - C_{p0} \times D_0) \times 100 / P_s \quad (3-5)$$

ここで P_s : リン噴霧速度の平均値 (kg/h) (=44.5kg/h)である。

この結果，BF1 へ到達したリンの割合は，噴霧されたリン酸廃液中のリンのうち 10% 程度であることがわかった。また残りの 90%は，主灰として排出された可能性やボイラ水管等への付着した可能性が考えられる。

(3) BF1 差圧の挙動

リン酸廃液噴霧によりダストが BF1 で集塵され蓄積したにも関わらず，BF1 差圧はリン酸廃液噴霧開始直後から低下し，0.12kPa 程度で落ち着いた。ダストの蓄積は BF1 差圧上昇を引き起こすはずだったが，逆に BF1 差圧は低下した。リン酸廃液噴霧による BF 差圧低下に関する仮説から考えると，仮説 H2 の BF1 の捕集灰層の物性変化による透気係数の増加可能性が示唆される結果となった。

3.4.2 2 回目の実機試験の結果

図 3-6(a)より，BF1 差圧はリン酸廃液噴霧開始から 30 分間で急激に低下し約 0.7kPa まで減少したのち，緩やかに低下し続け，約 0.4kPa で落ち着いた。リン酸廃液噴霧を停止すると，BF1 差圧は若干上昇したが，0.6kPa で落ち着いた。ところが，BF1 灰排出速度は RUN1 と違って，リン酸廃液噴霧中に急激に増加し，リン酸廃液噴霧開始から 1.5 時間経過時にピークとなった。噴霧停止後も噴霧前の BF1 灰排出速度より高いレベルを維持した。

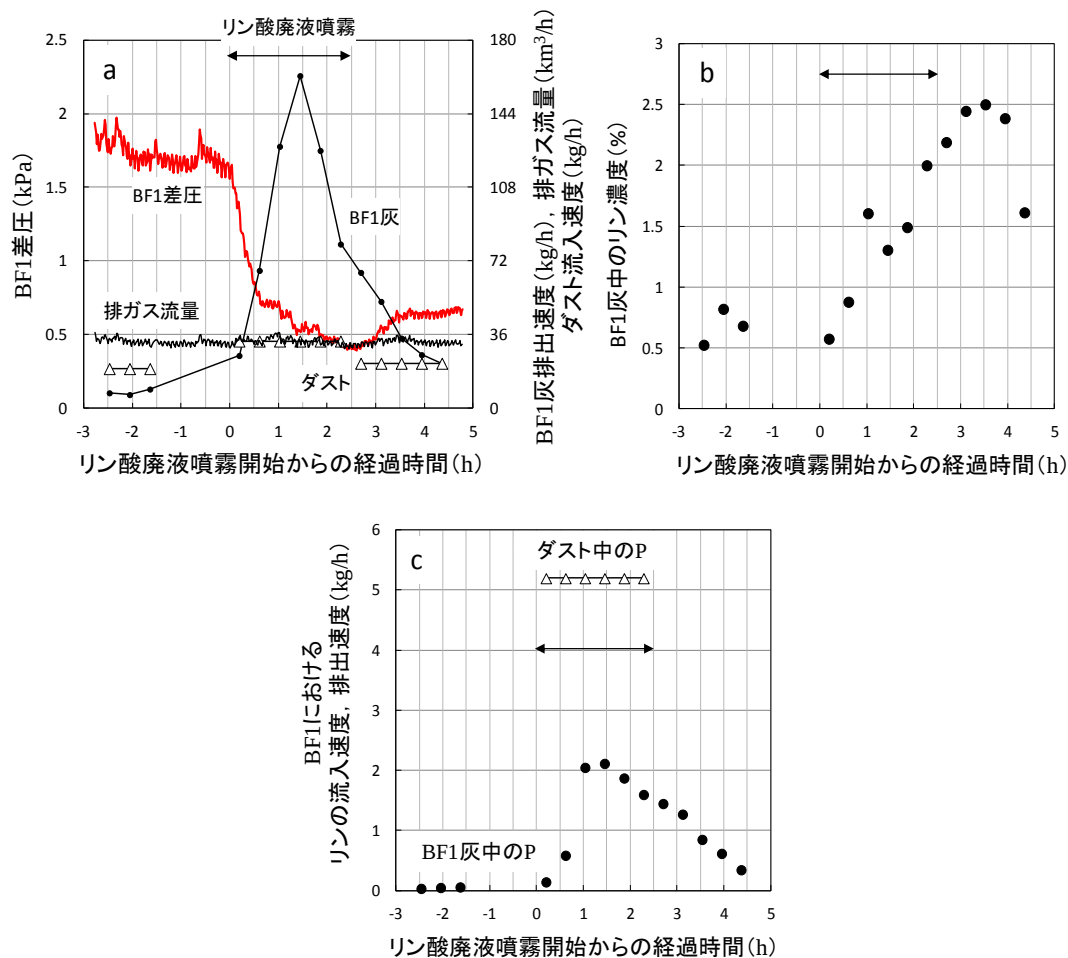


図 3-6 RUN2 における測定項目の経時変化

RUN2 では排ガス中のばいじん濃度を測定しなかったため、図 3-5(a)の BF1 へのダスト流入速度は、RUN1 での廃棄物 1t あたりの BF1 へのばいじん流入量を求めて推定した。表 3-1 と図 3-3(a)より、RUN1 でのリン酸廃液噴霧前の廃棄物 1t あたりのばいじんの流入量は BF1 へのばいじん流入速度÷廃棄物送り速度 $= (12.9\text{kg/h}) / (3.13\text{t/h}) = 4.12\text{kg/t}$ であった。RUN2 におけるリン酸廃液噴霧前と噴霧後のばいじん流入速度は、RUN2 の廃棄物送り速度×RUN1 の廃棄物 1t 当たりのばいじん流入速度から求めた。これに消石灰の吹込み速度 ($=5.5\text{kg/h}$) を加えダスト流入速度も求めた。リン酸廃液噴霧中のダスト流入速度は、RUN1 の結果から噴霧したリン酸廃液中のリンうち 10%が BF1 に到達し、リン酸基を持つリン化合物として存在すると仮定し以下のように求めた。リン酸廃液噴霧中の BF1 へのダスト流入速度 $= 4.12 \text{ (kg/t)} \times \text{ごみ送り速度 (t/h)} + \alpha \times \text{リンとしての噴霧速度 (kg/h)} \times 0.1 + \text{消石灰吹込み速度 (kg/h)}$ 。ここで $\alpha=95/31$ (PO_4 生成として) である。

上記の結果をプロットした図 3-6(a)から、噴霧中のダスト流入速度は噴霧前に比べ若

干増加したものの大きな変化はみられなかった。それにもかかわらず、BF1 灰の排出速度は何倍も増加したことになる。BF1 に蓄積していた既存の灰がリン酸廃液噴霧により払い落とされ、一緒に排出されたと推測できる。その結果、仮説 H1 のように BF 付着灰が払い落としやすくなり、捕集灰層の厚みが小さくなったと考えられる。

一方、図 3-6(b)より BF1 灰のリン濃度は、リン酸廃液噴霧開始直後から上昇し始め、噴霧を停止して 1 時間後に最大値となった。図 3-6(c)に図 3-6(a)および図 3-6(b)の結果をかけて求めた BF1 へのリン流入速度と排出速度を示す。これより RUN2 での BF1 へのリン流入速度は 5.2kg/h となり、リン酸廃液噴霧中にリンの排出速度が上昇し、流入したリンの一部が排出されたことがわかった。次に、総量として BF1 に蓄積したリン割合求めるために、図 3-6(c)のデータを積分しリンの流入量と排出量をそれぞれ求めた。リン排出量は、リン酸廃液噴霧中から噴霧後までの排出量の合計値からリン酸廃液以外の廃棄物由来のものを引いて求めた。その結果、リン流入量は 13kg、排出量は 5.1kg であった。これより BF1 に到達したリンのうち約 60% ($= (13 - 5.1) \times 100 / 13$) が蓄積していることがわかった。

3.4.3 バグフィルターから排出された灰 (BF1 灰) の物性変化

図 3-7 に RUN2 でのリン酸廃液噴霧前と噴霧中の BF1 灰の粒度分布を示す。また表 3-2 に噴霧前と噴霧中の BF1 灰の物性変化の比較として 10%通過粒子径 D_{10} 、50%通過粒子径 D_{50} 、90%通過粒子径 D_{90} 、粒径別の存在割合、凝集度、かさ密度および圧縮度を示す。

全体的にリン酸廃液噴霧前より噴霧中に BF1 灰の粒径が大きくなり、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} も増加した。特に、噴霧中の BF1 灰は噴霧前と比べて、10 μm 以下のものが少なく、90 μm 以上のものが多かった。凝集度は、噴霧前が 90.8%、噴霧中が 92.2%であり、やや増加した。圧縮度は、噴霧前が $47.2 \pm 0.5\%$ 、噴霧中が $49.7 \pm 5.0\%$ であり、大きな差はみられなかった。

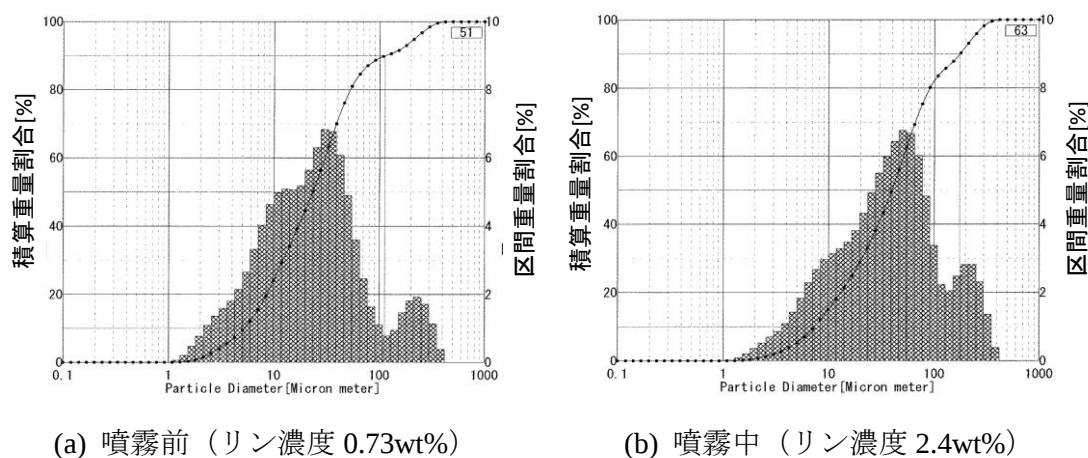


図 3-7 RUN2 で採取した BF1 灰の粒度分布

表 3-2 リン酸廃液噴霧前と噴霧中の BF1 灰の物性変化の比較

		噴霧前	噴霧中
D ₁₀ [μm]		5.2	7.4
D ₅₀ [μm]		23.2	39.4
D ₉₀ [μm]		112.2	176.5
粒径別の 存在割合 [%]	～9.95μm	24.1	15.0
	9.95～91.09μm	64.6	65.2
	91.09μm～	11.3	19.8
凝集度 [%]		90.8	92.2
ゆるめかさ密度 [g/mL]		0.23±0.01	0.21±0.01
かためかさ密度 [g/mL]		0.44±0.02	0.42±0.05
圧縮度 [%]		47.2±0.5	49.7±5.0

3.4.4 実験結果からの仮説の検証

RUN1 と RUN2 とともに、過去の運転実績と同じくリン酸廃液噴霧直後から BF 差圧が低下した。RUN1 では、リン酸廃液噴霧時に BF1 へのばいじん流入速度が上昇した反面、BF1 灰の排出速度は低下した。これは、ろ布にばいじんが蓄積し、噴霧前より捕集灰層が厚くなった可能性があるにもかかわらず、BF1 差圧が低下したことを意味する。仮説 H2 のように、捕集灰の物性変化により灰層の通気性が良くなったのが差圧低下の原因として考えられる。

RUN2 では、リン酸廃液噴霧中に BF1 灰の排出量が多く増加した。これは仮説 H1 のように、払い落とし量の増加により捕集灰層の厚みが減少した結果、BF1 差圧が低下したことを示唆する。一方、リン酸噴霧前に比べてリン酸廃液噴霧中にサンプリングした BF1 灰の粒径が大きくなり、凝集度もやや増加したことから、灰の大粒径化・凝集も確認された。

以上の結果から、リン酸廃液噴霧による BF 差圧低下現象は、仮説 H1 と仮説 H2 の片方に限られることなく、どちらも関与している可能性が示された。各仮説での灰層の通気性向上や灰の払い落とし促進効果は、リン酸による灰の大粒径化・凝集といった物性変化によって得られた可能性がある。なお、今回の仮説では想定しなかったが、リン酸噴霧時にろ布への捕集灰量が増加する可能性も示唆された。

各 RUN でリン酸噴霧時に BF1 灰の排出挙動が大きく異なったことについては、二つの点が原因として考えられる。一つは、実験時のろ布に堆積していた捕集灰量が RUN1 よりも RUN2 の方が多かった可能性である。表 3-1 に示したように、RUN1 と RUN2 でのろ布の全数交換からの経過時間が、各々 4 カ月、8 カ月であり、リン酸廃液噴霧前の BF1 差圧も 0.8kPa、1.6kPa であり、RUN2 のリン酸廃液噴霧前の BF1 差圧が RUN1 より高かったのがその裏付けとして考えられる。二つ目は、RUN1 では通常のパルス条件 (0.35MPa, 150 秒間隔) で払い落としが行われていたが、RUN2 では BF1 差圧が高かったため通常のパルスより過酷な条件 (0.52MPa, 30 秒間隔) で払い落としが行われていた。リン酸噴霧により灰粒子が凝集しろ布への付着性が大きくなったとしたら、より過酷な条件でパルスを行っていた RUN2 が灰の払い落としに有利な条件であったと推測される。

3.4.5 消費電力の考察

図 3-8 に誘引通風機消費電力の経時変化を示す。RUN1 と RUN2 でリン酸廃液噴霧開始直後から、BF1 差圧と同様に誘引通風機での消費電力が低下した。RUN1 に比べ、RUN2 の方がリン酸廃液噴霧前の BF1 差圧が高く、またリン酸廃液噴霧による BF1 差圧の低下幅が大きかったために消費電力の低下幅も大きくなった。消費電力の削減幅は少なくとも 50kW であり、この効果を 6 時間持続すると一世帯当たりの 1 カ月の消費電力量の 300kWh に相当する⁹⁾。

一方で、リン酸噴霧によるボイラ水管への灰付着量の増加や、これに起因してボイラでの吸収熱量の低下 (ボイラ蒸発量の低下) が懸念される。別途、RUN2 ではボイラ灰の計量を行った結果、噴霧前のボイラ灰排出速度は 38kg/h であったのが、噴霧中では 55kg/h と増加した。ボイラ入口でのダスト量を測定していないが、仮にボイラ水管への灰付着量が増加したとしても、その増加分が排出されていたと考えられる。しかし RUN1 ではボイラ灰の計量を行っていないため、リン酸廃液噴霧によるボイラ水管への灰付着や払い落としに関しては不明な点が多いため、今後長期的な検証が必要である。また、運転データよりボイラ蒸発量の平均値は、RUN1 の噴霧前・噴霧中に $7.74 \pm 0.42 \text{ t/h}$, $7.37 \pm 0.52 \text{ t/h}$ に対して、RUN2 ではそれぞれ $8.87 \pm 0.41 \text{ t/h}$, $9.27 \pm 0.62 \text{ t/h}$ であったことから、実験中にリン酸噴霧によるボイラ吸収熱量への影響はほぼなかったと考えられる。

さらに、ボイラでの熱吸収による排ガスの減温が不十分となれば、ガス冷却塔での水噴射量の増加が考えられる。水噴射量の増加はろ布上でのダストの潮解につながり、ろ布交換を早めるので、コスト増加の一因となりうる。しかし、ガス冷却塔での時間当た

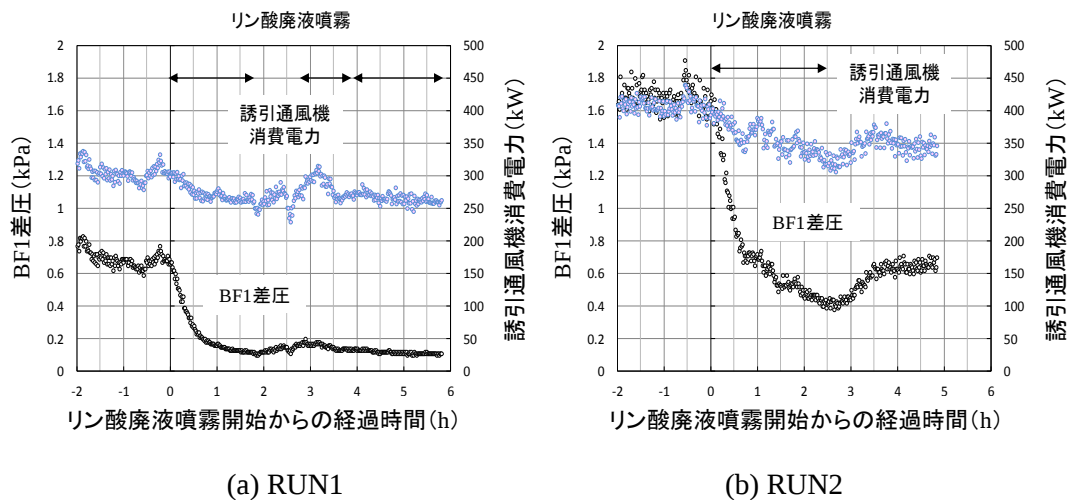


図 3-8 誘引通風機消費電力の経時変化

りの水噴射量の平均値は、RUN1 の噴霧前・噴霧中に $2.70 \pm 0.25 \text{ m}^3/\text{h}$, $2.51 \pm 0.33 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、RUN2 ではそれぞれ $2.51 \pm 0.21 \text{ m}^3/\text{h}$, $2.58 \pm 0.06 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。この結果から、リン酸廃液噴霧を行っても水噴射量はほとんど変わらないことも確認した。

したがってリン酸廃液噴霧による BF 差圧低減効果として、誘引通風機での消費電力も低下し、焼却施設におけるエネルギー消費量やコストの削減が可能となることが示された。

3.5 結論

本章では焼却炉内へのリン酸廃液噴霧によってバグフィルター差圧が低下するメカニズムを解明するために、産業廃棄物焼却処理施設においてリン酸廃液噴霧実験を行った。

純物質のリン酸を用いても同様に BF 差圧が低下したことから、その原因物質がリン酸であることが示された。リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低下時に、仮説であったろ布上に集塵された灰の払い落とし促進（仮説 H1）と灰の物性変化による捕集灰層の透気係数の増加（仮説 H2）が両方とも起きていたことがわかった。ここには、リン酸廃液噴霧による灰の大粒径化、凝集などが絡んでいると考えられる。またリン酸廃液噴霧時にバグフィルター差圧の低下とともに、誘引通風機での消費電力量も低下することが実証された。このことから、リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低減効果で、廃棄物焼却施設の運転コストの削減可能性が示された。しかし炉内に噴霧されたリンの大部分がバグフィルターまで到達していないことから、主灰とともに排出されロスした可能性や、ボイラ水管等に付着した可能性が考えられる。そこで今後、リン酸をバグフィルター差圧低減薬剤として使用する場合には、噴霧場所をよりバグフィルターに近い場所で噴霧するなどの対策も必要である。

今回の実機試験では、実際のろ布表面を確認することができなかった。今後の課題として、リン酸によるろ布表面での捕集灰層の形状変化、パルスによる払落し挙動などについてより詳しく調べる必要がある。

本章に関連する発表

- 1) In-Hee Hwang, Shigetoshi Takahashi, Kazuaki Mukaiyama, Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto, Masaharu Ohue, Masaya Tanaka, Yoshitada Kakuta: Effect of phosphoric acid wastewater incineration on the decrease of pressure loss in fabric filter of flue gas treatment system. 18th Korea-Japan Joint International Session, The 2014 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management, 2014.
- 2) 高橋滋敏、黄仁姫、向山和晃、松尾孝之、松藤敏彦、大上雅彦、田中真弥、角田芳忠：ごみ焼却施設におけるバグフィルター差圧のリン酸吹込みによる低下原因、平成 26 年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会、2014.
- 3) 高橋 滋敏、黄 仁姫、松尾 孝之、松藤 敏彦、大上 雅晴、角田 芳忠：ごみ焼却施設におけるリン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減に関する研究、第 25 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、2014.
- 4) Shigetoshi Takahashi, In-Hee Hwang, Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto, Masaharu Ohue, Yoshitada Kakuta: OTH-17 Study on reduction of pressure drop in fabric filter by spraying phosphoric acid at incinerator, 8th i-CIPEC, 2014.
- 5) 黄 仁姫、高橋 滋敏、向山 和晃、松尾 孝之、松藤 敏彦、角田 芳忠：リン酸吹き込みによるごみ焼却排ガス処理施設のバグフィルター差圧低減に関する研究、第 22 回衛生工学シンポジウム 2014.
- 6) 高橋 滋敏、黄 仁姫、松尾 孝之、松藤 敏彦、角田 芳忠：廃棄物焼却施設におけるリン酸廃液の炉内噴霧によるバグフィルター差圧低減に関する研究、廃棄物資源循環学会誌, Vol.26, pp.38-48, 2015.
- 7) In-Hee Hwang, Shigetoshi Takahashi, Toshihiko Matsuto, Takayuki Matsuo, Yoshitada Kakuta: D3-183 Effect of Spraying Phosphoric Acid Containing Wastewater to Incinerator on Decrease of Pressure Loss in Fabric Filter, 2nd Symposium of Asian Regional Brance of International Waste Working Group, 2015.

参考文献

- 1) JIS Z 8808 : 2013 排ガス中のダスト濃度の測定方法
- 2) JIS K 0101 : 1998 工場排水試験方法
- 3) JIS K 0102 : 2013 工場排水試験方法
- 4) 早川宗八郎：粉体物性測定法，朝倉書店，p.113(1973)

- 5) R.L.Carr : Evaluating Flow Properties of Solids, Chemical Engineering, Jan. , 72 (2), pp.163-168(1965)
- 6) 早川宗八郎：粉体物性測定法，朝倉書店， pp.109-112(1973)
- 7) 坂下攝：改訂増補入門粉体トラブル工学，工業調査会， p.48(1998)
- 8) Kazuaki Mukaiyama, In-Hee Hwang, Shigetoshi Takahashi, Toshihiko Matsuto, Takayuki Matsuo, Yasumasa Tojo : Estimation of phosphorus compound formed by spraying phosphoric acid to solid waste incinerator and its effect on pressure loss of bag filter, Korea-Japan International Symposium, pp.115-118(2014)
- 9) 電気事業連合会 HP（閲覧日：2015/02/14）：
http://www.fepec.or.jp/enterprise/jigyuu/japan/sw_index_04/

第4章 ベンチスケール装置における灰収支を考慮した差圧変化と捕集灰層の変化

4.1 はじめに

第3章から、リン酸廃液の焼却炉内噴霧によるバグフィルター差圧の低下が明らかとなったが、捕集灰の排出量の面では増加する場合と減少する場合の相反する結果となった。実機試験の結果から、バグフィルター差圧はリン酸による捕集灰の物性変化により、図4-1の仮説H1、仮説H2の片方ではなく、両方が同時に起こった結果であると考えられる。しかし、実機試験において以下の問題点が明らかとなった。

- ① 実機試験時に焼却炉内への廃棄物投入量を一定としたが、その組成が異なるため、ばいじんの発生量が一定とは言えず、また発生量自体も不明であった。
- ② リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧は低下したが、捕集灰の蓄積量変化を直接測定できなかった。
- ③ 払い落された捕集灰量を測定したが、通常運転時（リン酸廃液噴霧なし）の捕集灰の蓄積量が不明であり、リン酸廃液噴霧によって捕集灰層の厚さがどの程度小さくなったのかが不明。
- ④ 捕集灰と非捕集灰（ろ布状に捕集されずに排出されたダスト）の分離ができなかった。

これらの点を踏まえ、本章では焼却炉からバグフィルターまでを模擬したベンチスケールの実験装置を用い、投入物を廃棄物から飛灰（実際の一般廃棄物焼却施設から排出された捕集灰）とし、組成の違いによる影響をなくした。またダストの排出量の連続測定を行い、飛灰バランスから捕集灰の堆積量を求めるとともに、ろ布表面に堆積した捕集灰層の厚さを実際に測定できる構造とした。

図4-1に示した二つの仮説をもとに、リン酸噴霧とバグフィルター差圧低下の関係を明らかにすることを目的としてベンチスケール試験を行った。仮説の検証としては、リン酸噴霧による捕集灰の払い落とし量の変化（仮説H1）と払い落としに及ぼす影響因子である堆積量とパルス圧の関係を調べた。また捕集灰の堆積量とバグフィルター差圧の関係を直接調べることで、リン酸噴霧の有無による捕集灰層の通気性の変化（透気係数の変化）（仮説H2）を求めた。

また、本章を含め後の章では、各実験で用いた試料や得られた試料の名称を統一するため、図4-2に示したように名称の定義を行った。投入試料は飛灰とリン酸化合物であり、これらは煙道において混合状態となる。そこで、この混合物をダストと呼ぶ。ダストはバグハウスにおいて、ガス流れによってろ布に捕集されるものと、捕集されずに落ちるものがある。前者を捕集灰、後者を非捕集灰と定義する。ただし、飛灰についてのみ、単に灰と呼ぶこともある。

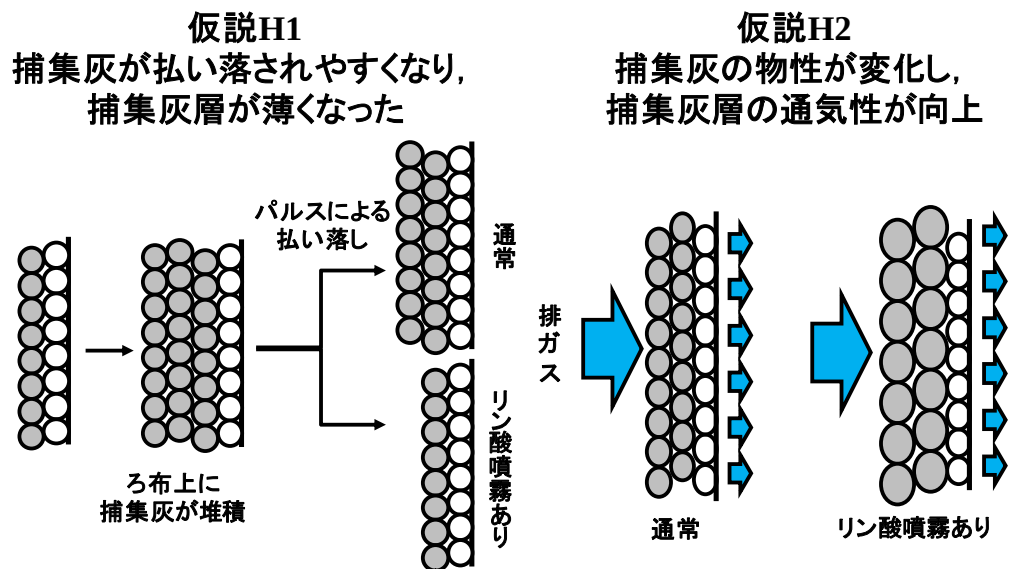


図 4-1 リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低下の仮説

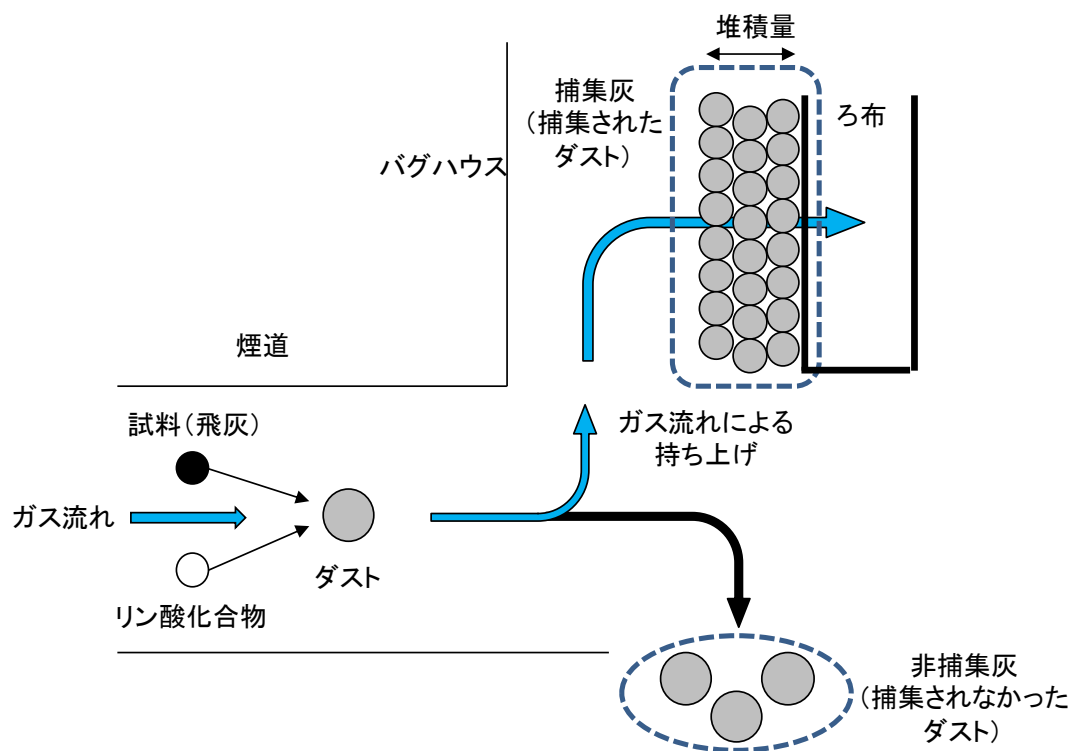


図 4-2 実験における試料の定義

4.2 実験方法

4.2.1 実験装置と測定項目

図 4-3 にベンチスケール実験装置と温度、圧力、差圧、排ガス流量の測定個所を、表 4-1 に各測定個所における測定項目の詳細を示す。これらの測定値を、実験期間中にデータロガーに 1 分間隔データとして記録保存した。

装置は主に焼却炉に相当する一次燃焼室と二次燃焼室、廃熱ボイラを想定した輻射冷却部、煙道、集塵のためのバグハウスから構成されている。灰は図 4-2 中①で示した二次燃焼室上部より、スクリーフフィーダーを用いて一定速度で投入された。投入された飛灰をバグフィルターで捕集し、集塵過程におけるバグフィルター差圧の変化を記録した。

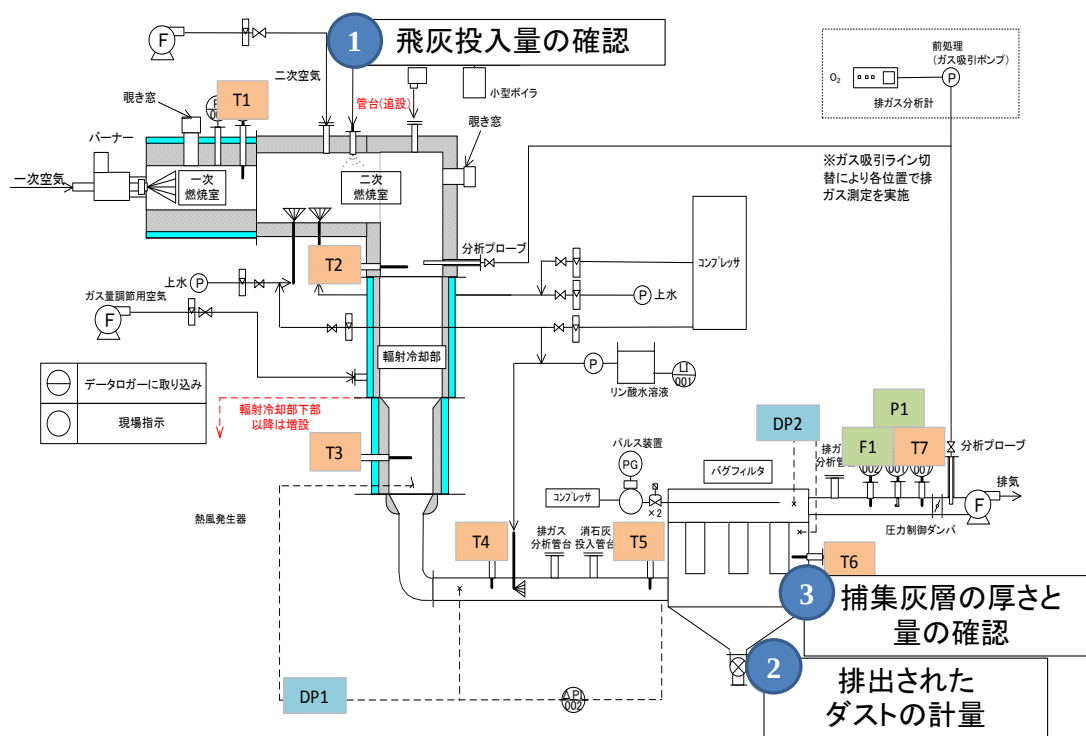


図 4-3 ベンチスケール実験装置と測定項目・測定点

表 4-1 測定項目の詳細

記号	測定項目	単位
T1	一次燃焼室温度	°C
T2	二次燃焼室温度	°C
T3	熱交換部入口温度	°C
T4	熱交換部出口温度	°C
T5	BF入口温度	°C
T6	BF内部温度	°C
T7	IDF入口温度	°C
DP1	熱交換部差圧	kPa
DP2	BF差圧	kPa
P1	IDF入口圧力	kPa
F1	BF出口ガス流量	m ³ /h

バグハウスには PTFE のろ布（直径 0.164m、長さ 1.35m のもの）が 6 本設置され、3 本×2 系列となっている。リン酸は煙道の中ほど（図中 T4 測定個所の直後）でガス流れ方向に一定速度で噴霧した。リン酸を噴霧しないときは水を噴霧した。捕集灰の払い落しは 1 系列ずつパルスによって行われる。バグハウス正面には観察用の窓があり、窓から見て左側から順に払い落としがなされる。バグハウスの下部にはドラムフィーダーがあり、ダストを経時的に排出する仕組みとなっている。このため、ここにダスト回収用のトレイと計量用の秤を置き、図 4-2 中②の排出されたダストの計量を行った。さらに、バグハウス側面には 3 本のろ布それぞれを観察可能な点検口があり、図 4-2 中③での捕集灰の厚さはここからノギスを用いて測定した。ガスはバグハウス後段の誘引通風機によって、装置上流から下流へ引き込むようになっており、装置内全てが負圧になるよう制御されている。

4.2.2 ベンチスケール試験手順

以下に試験の開始から終了までの手順を示す。

(1) 装置の立ち上げ

装置全体を昇温させるためにバーナーに着火した。その後、炉内温度制御のために着火と同時に水噴射を開始した。次に、水平煙道におけるガス冷却のため、循環式水冷装置を起動した。循環水は煙道における結露を防ぐため、80°Cに加温したものを循環させた。

前日の運転後に灰供給装置のホッパーが冷却され、結露が生じる。この結露によって投入試料の灰が濡れ固まり、灰供給速度が変化してしまう。灰供給速度を一定に保つために、灰供給装置内を温風で乾燥させた。

(2) 灰供給

各部位での温度が安定したことと目視により水平煙道内に水が無いことを確認した

後に、灰供給開始した。このとき排出されるダストの計量計測も開始した。灰供給装置内の灰量が減少すると、灰供給速度が低下する。そこで、供給装置内の灰の高さを一定レベル以上保つため、間欠的に飛灰を灰供給装置に投入した。

(3) 圧縮空気（パルス）による捕集灰の払い落とし

バグフィルター差圧が 0.6～1.0kPa になった後、パルスによる捕集灰の払い落としを開始した。本試験でのパルスによる払い落とし方法は以下の 2 通りであり、払い落としが行われるろ布は前述の通り 1 系列ずつであった。

1. 一定時間間隔で定期的にパルスによって捕集灰を払い落とす。
2. 一度払い落した後、バグフィルター差圧が 1.0～1.1kPa 程度まで復帰したときにパルスによって捕集灰を払い落とす。

(4) リン酸噴霧

リン酸タンクに 75%リン酸と水を加え、所定濃度のリン酸溶液を調整した。運転が安定したことを確認した後に、灰供給速度に対して一定のリン濃度になるようにリン酸溶液を噴霧した。ガス流れ方向に沿ってリン酸溶液を噴霧した。

(5) リン酸、パルス、灰供給の停止

リン酸噴霧とパルスによる払い落としを一定時間繰り返し行った後、パルスとリン酸噴霧を停止した。その後、灰供給装置内に飛灰がなくなっただけを確認し、灰供給装置を停止した。排出されるダストの重量変化がないことを確認し、試験終了とした。

バグハウス内が冷却されることによって捕集灰が固化することを防ぐため、水平煙道からバグハウスまでの間を回路状にし、250℃の空気を循環させ、保温した。最後に、水噴射を停止させた後にバーナーを消火し、立ち下げ完了とした。

4.2.3 灰投入量とダスト排出量の測定

ろ布上の捕集灰量を求めるため、試験中に以下の飛灰量とダスト量を測定した。

飛灰投入量；100℃で乾燥させた飛灰（第 2 章の A 施設から排出された BF1 灰）を計量し、ホッパーに入れ、スクリューフイーダーより炉内に投入した。日投入灰量（g）を投入時間（min）で除し、灰投入速度（g/min）を求めた。

ダスト排出量：バグハウスのドラムフィーダーの下に設置した秤と重量データの連続取り込み装置により、1 分間隔のダスト排出量を求めた。

上記、二つの排出物量の測定値より、ある時刻における捕集灰量を式（4-1）より算出した。

$$\text{捕集灰量(g)} = \text{灰投入速度}\left(\frac{\text{g}}{\text{min}}\right) \times \text{灰投入時間(min)} - \text{ダスト排出量累積値(g)} \quad (4-1)$$

4.2.4 実験条件

実験条件を表 4-2 に示す。実験は Run1 から Run37 まで行ったが、安定した条件で実験が行えた Run22 から Run37 を分析対象とした。Run1 から Run21 までは運転上のトラブルや装置の改造があり、安定した条件で実験が行えなかったため分析対象から除外した。

実験終了後に全ての捕集灰を払い落とす操作がなされた。表 4-2 でダスト排出量は、実験中に排出されたダスト量と実験終了後に払い落とされたダスト量の合計値を示している。Run25 と Run27 では捕集灰の払い落としがうまくいかなかったため、途中で圧力を上げて払い落としを行った。Run30 以降では、バグフィルター差圧が所定の値に達した時に、手動で払い落としを行ったため、間隔が「手動」となっている。リン酸噴霧について同一 Run でも異なる灰に対するリン割合となっているのは、Run の途中で灰に対するリンの割合を上げるものがあったためである。

4.2.5 連続測定データ

図 4-3 に連続測定データの例として Run23 と Run31 の結果を示す。データは 3 段で 1 セットとなっており、上段は熱交換部差圧 (DP1)、バグフィルター差圧 (DP2)、IDF 入り口圧力の絶対値 (P1)、バグハウス出口ガス流量 (F1) の経時変化である。中段は飛灰投入量とダスト排出量 (図中では落下量と表示)、投入量－排出量で求めた捕集灰の累積堆積量の経時変化であり、下段はパルスタイミング、パルス圧、リン酸噴霧期間と灰に対するリン割合 (リン/灰, wt%) を示している。

表 4-2 各 Run の実験条件

Run No.	日付	飛灰・ダスト				パルス		リン酸噴霧
		飛灰投入量 [g]	ダスト排出量 [g]	投入時間 [min]	供給速度 [g/min]	圧力 [MPa]	間隔 [分]	リン/飛灰 [wt%]
22	11月24日	14,400	5,668	540	26.67			0
23	11月25日	28,800	36,494	789	28.60	0.21	4	0, 4.5, 9
	つづき			218				
24	11月27日	9,600	8,318	538	17.84	0.18	15	0
25	11月28日	11,200	10,493	652	17.18	0.16～0.18	15	0
26	11月29日	9,642	10,195	432	22.32	0.18	15	4.5
27	12月5日	10,400	8,073	505	20.59	0.23～0.24	15	0, 1, 3
28	12月6日	8,000	9,014	475	16.84	0.26	15	0, 1
29	12月9日	9,200	8,391	457	20.13	0.24	15	0, 3
30	12月10日	9,600	9,254	517	18.57	0.27	手動	0
31	12月11日	12,600	12,165	655	19.24	0.27	手動	1
32	12月12日	10,800	10,394	521	20.73	0.27	手動	3
33	12月19日	10,200	9,076	516	19.77	0.27	手動	0
34	12月26日	9,300	9,239.1	482	19.29	0.27	手動	9
35	1月7日	8,000	8,334	499	16.03	0.27	手動	1
36	1月9日	10,400	10,300	565	18.41	0.27	手動	3
37	1月14日	7,800	7,397.3	451	17.29	0.27	手動	6

4.2.6 ろ布上に捕集された捕集灰の厚さ測定と推定

ろ布上の捕集灰の堆積量，ろ布面積と捕集灰層の密度を用い，式（4-2）から捕集灰の堆積層厚さを求めることができる。

$$\text{捕集灰堆積層厚さ(mm)} = \frac{\text{捕集灰堆積量(g)}}{\text{ろ布面積(m}^2\text{)}} \div \text{捕集灰層密度}\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \quad (4-2)$$

ここで，ろ布面積は 4.3m^2 （直径 0.164m ，長さ 1.35m のろ布 6 本の合計面積）である。

捕集灰層の密度は以下の方法で求めた。まず，バグハウス側面の点検口側のろ布において，観察可能な部分の上部と下部の 2 個所でノギスを用い捕集灰層の厚さを測定。これを 3 個所の点検口全てで実施し，全てで 6 点の厚さを測定した。次に，直径 2.63cm の円筒形ダスト吸引・捕集装置を用いて，ろ布表面の 1 か所から捕集灰を吸引し，フィルターに捕集された捕集灰の重さを計測した。これを 3 本のろ布全てで行った。この捕集灰層の厚さと吸引面積当たりの捕集灰量から捕集灰層密度を式（4-3）から求めた。

$$\text{捕集灰層密度}\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = \frac{\text{吸引した捕集灰の重さ(g)}}{\text{吸引面積(m}^2\text{)} \times \text{捕集灰層厚さ(mm)}} \quad (4-3)$$

ここで，吸引面積は $5.4 \times 10^{-4}\text{m}^2$ である。表 4-3 に 6 点の厚さ測定の結果と捕集灰の吸引採取した重さ，捕集灰層密度を示す。同一の Run であっても，ろ布によっても，測定

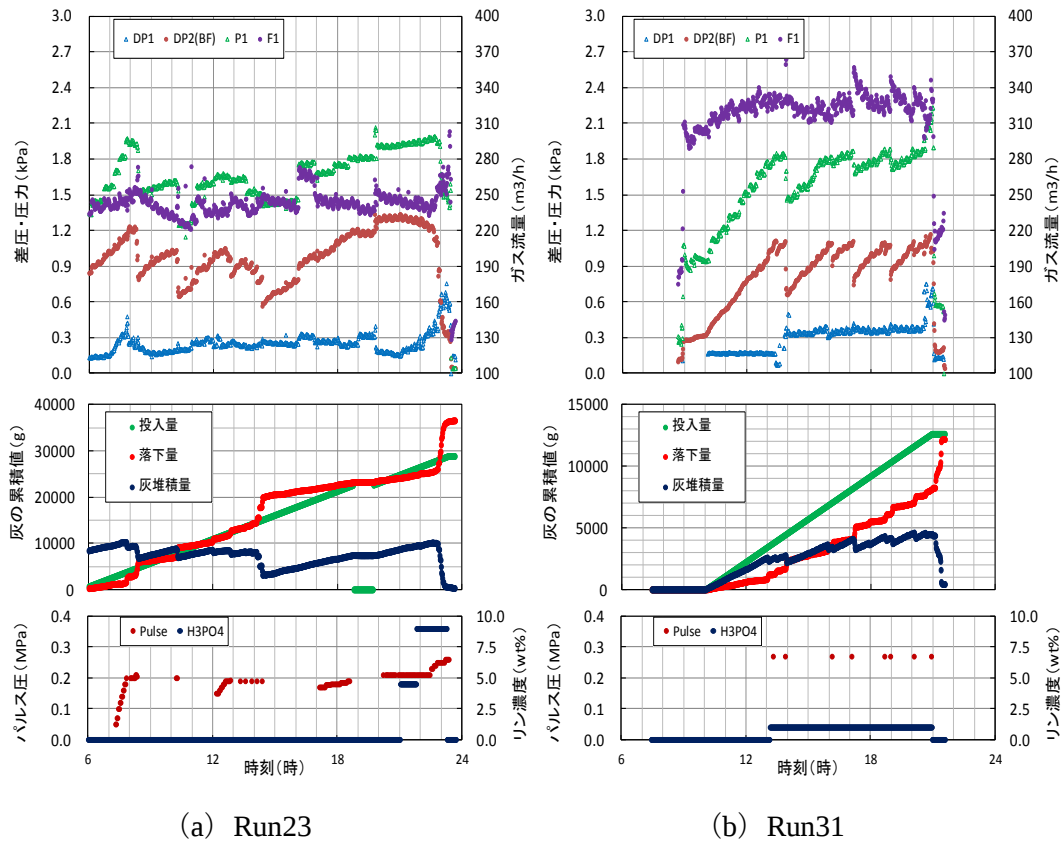


図 4-3 連続測定データの例

表 4-3 捕集灰層厚さ，吸引採取した捕集灰量，捕集灰層密度

	Run No.	左上	左下	中上	中下	右上	右下	平均
捕集灰層厚さ (mm)	18	10.8	12.4	11.0	9.0	6.6	-	9.95
	19	14.7	12.8	12.2	11.8	9.7	11.7	12.14
	20	13.8	7.4	16.9	14.8	14.5	13.7	13.52
	21	10.8	9.9	20.6	18.2	11.7	19.6	15.11
吸引採取した 捕集灰量(g)	21	4.9		4.0		1.3	1.3	2.9
捕集灰層密度(kg/m ³)	21	842		361		205	127	384

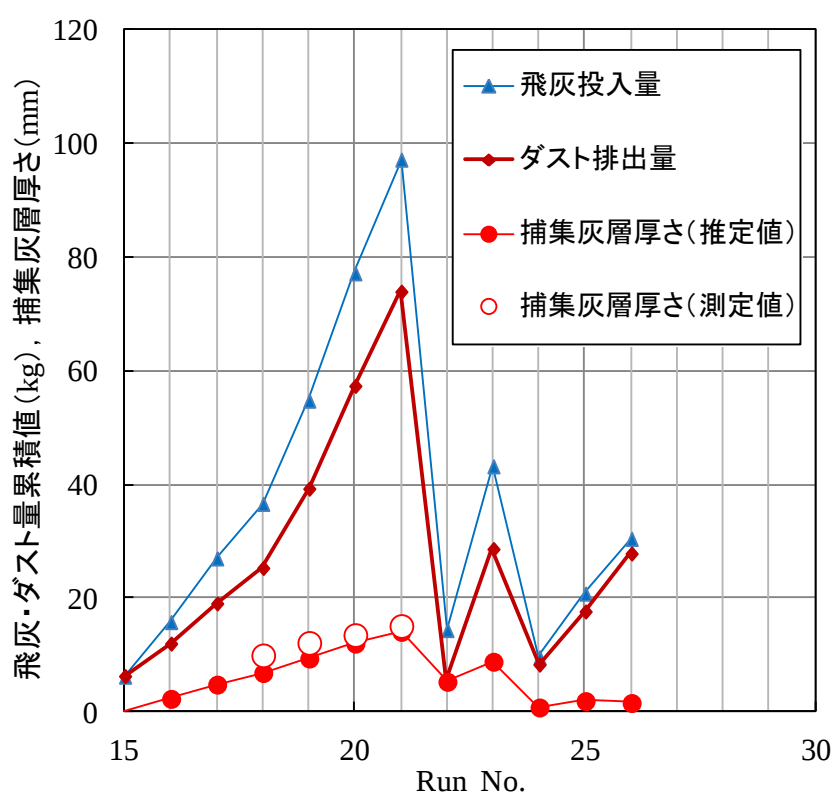


図 4-4 飛灰投入量とダスト排出量，捕集灰層の厚さの推定値および実測値

個所によっても値にばらつきがあった。

図 4-4 に Run15 から Run26 までの飛灰投入量とダスト排出量，式 (4-2) から求めた捕集灰層の厚さの推定値および実測値（表 4-3）を示す。ただしプロットは表 3 中の平均値を用いた。

Run18 から Run21 の結果から，捕集灰層厚さの推定値と実測値はおおむね一致した。したがって，式 (4-2) と表 4-3 の捕集灰層密度の平均値 (384kg/m³) を用い，捕集灰層厚さを推定することとした。ただし，Run31 以降では新たに求めた密度 (155kg/m³) を用いて厚さの推定を行った。

4.3 リン酸噴霧による払い落とし挙動解析のためのデータ作成

4.3.1 パルス払い落とし条件の分類

各 Run において、パルスによる捕集灰の払い落としは様々な条件下で行われた。そこでパルスなしの場合を除き、パルス間隔とパルス圧によって以下のように4つのカテゴリー（条件 A～条件 D）を設定し、各 Run を分類した。

条件 A：パルス間隔一定（15 分）、パルス圧一定

条件 B：パルス間隔不定（手動）、パルス圧一定

条件 C：パルス間隔一定（1～5 分）、パルス圧一定

条件 D：パルス間隔一定（1～5 分）、パルス圧上昇

条件 B は、バグフィルター差圧が一定値となった時に手動で払い落としを行うもので、パルス間隔は1～174 分であった。条件 D は、条件 A のパルス圧を決めるために、徐々にパルス圧を変化させたもので、パルス間隔は1～5 分と短かった。条件 C は、試験終了時に集塵灰をろ布から全量除去するためにパルスによる払い落としを行ったものであり、パルス圧は一定であり間隔は短かった。

以上のように、4つの条件に分類したものの中で、条件 A と条件 B のデータ分析を行った。条件 C は清掃のため、条件 D は条件決定のためであるので、分析対象から除外した。表 4-4 に各 Run を分類したものを示す。

表 4-4 各 Run の払い落とし区間のパルス間隔とパルス圧による分類

Run No.	条件A パルス間隔 一定(15分) パルス圧 一定	条件B パルス間隔 不等 パルス圧 一定	条件C パルス間隔 一定(小) パルス圧 一定	条件D パルス間隔 一定(小) パルス圧 上昇	パルス圧 [MPa]	パルス間隔 [分]	リン添加率 [wt%]
23				D1	0.05→0.205	2	4.5
			C1		0.2	3	9
	A1			D2	0.15→0.1925	3	
					0.19	15	
				D3	0.17→0.19	3	
			C2		0.21	4	
24				D4	0.23→0.26	4	
	A2				0.18	15	
					0.2		
25				D5	0.1→0.16	2	
	A3				0.16→0.17	15	
			C3		0.18	2	
	A4				0.18	15	
				D6	0.2→0.22	5	
26	A5				0.18	15	4.5
				D7	0.2→0.26	2	
27				D8	0.15→0.23	2	1
	A6				0.23	15	0, 1, 3
					0.24	15	
28				D9	0.18→0.24	2	1
				D10	0.25→0.27	2	
	A7				0.28	15	0, 1
					0.26	15	
				D11	0.28→0.34	1	
29				D12	0.2→0.24	2	3
	A8				0.24	15	0, 3
			C4		0.27	1	
30		B1			0.27	手動	0
31		B2			0.27	手動	1
32		B3			0.27	手動	3
33		B4			0.27	手動	0
34		B5			0.27	手動	9
35		B6			0.27	手動	1
36		B7			0.27	手動	3
37		B8			0.27	手動	6

4.3.2 パルスによる捕集灰の払い落とし量，パルス前の捕集灰堆積量，バグフィルター差圧データの作成

(1) ダストの排出パターンとパルスによる捕集灰の払い落とし量の決定

データロガーに取り込んだ1分間隔のダスト排出量の累積値から，1分間ごとのダスト排出量を求めた。条件Aのデータを表4-5に示す。パルスからの経過時間0は，パルスによる払い落としを行った時刻であり，数値は1分ごとのダスト排出量がパルス間（15分間）の排出量の合計値の中で占める重量割合である。その重量割合が40%よりも高いものを緑で，20%以上40%以下のものを赤で色分けを行った。

パルス後に、規則的あるいは不規則的にダストが排出された。A4 における排出は一定時間間隔で起こっているが、バグハウス下部に振動を与えるエアノッカーにより、バグハウス下部の傾斜面にたまっていたダストがドラムフィーダーに落ち排出されたと判断した。A5～A7 などの不規則的なダストの排出は、水平ダクトの閉塞防止のために行ったハンマリングの影響で水平ダクトにたまったダストが排出されたと考えられる。しかし、それらは塊状であり、目視の結果排出されたダストの中で占める割合は小さく、大部分はろ布からの不定期な排出と考えた。またろ布に捕集されずに排出される可能性もあるが、表 4-5 においてダストの排出が一定ではないことから、この仮定は否定される。

パルスによる払い落とし量を決定するために、パルス前後 2 分間の排出量がパルス間に排出された全ダスト量に占める割合を調べた。結果を図 4-5 に示す。データは全部で 82 個あり、パルス前後 2 分の排出量がパルス間の全排出量の 50% を占めるものが 52 個、全データの 63% であった。また排出量が 100g 以上であるものは 40 個で、全データの半分ほどであった。以上の結果から、パルスによる払い落とし量を「パルス前後 2 分間の排出量」として定義した。また以下では、排出されたダストを、①パルスにより払い落とし落されたもの、②パルス以外による排出に分けて考える。

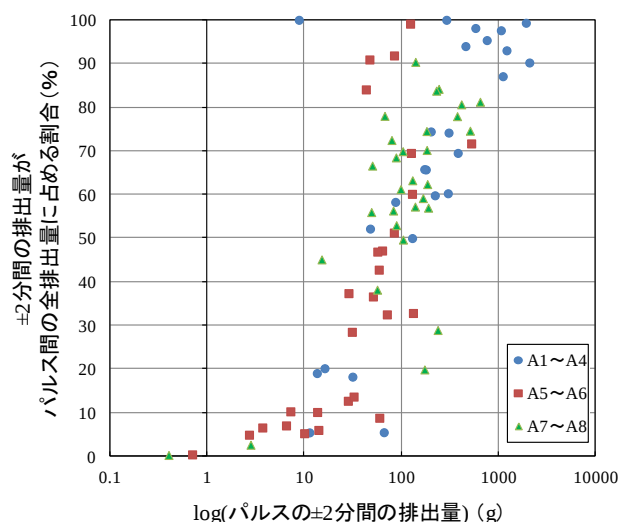


図 4-5 パルス前後 2 分間の排出量が、パルス間の全排出量に占める割合

表 4-5 条件 A における 1 分ごとのダスト排出量の重量割合

Type	Pulse No	パルスからの経過時間 (分)																	パルス間の 排出量合計 値 (g)	パルス前後2 分間の排出量 合計値 (g)	
		-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15
A1	1	4	4	3	4	3	42	3	5	4	5	4	4	4	6	5	0	0	0	173	31
	2	2	55	1	1	2	2	2	2	2	2	2	17	4	1	2	2	1	502	302	
	3	58	9	0	1	1	1	19	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	550	382	
	4	5	71	10	1	0	0	0	0	0	4	0	0	1	6	1	0	0	1,277	1,112	
A2	5	0	50	40	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	2,314	2,088	
	1	11	1	85	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	591	580	
	2	0	3	82	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,937	1,924	
	3	0	0	79	14	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	1,307	1,216	
A3	4	0	0	97	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	291	291	
	1	2	1	0	0	2	2	62	10	5	6	2	2	2	2	2	0	0	209	11	
	2	4	4	5	4	3	3	4	45	3	4	4	4	3	3	3	4	0	81	16	
	3	3	5	3	4	3	3	34	26	3	3	3	3	2	3	2	0	0	71	14	
A4	4	20	22	20	23	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	
	1	42	44	0	8	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	798	761	
	2	77	0	0	16	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	488	459	
	3	88	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,090	1,064	
	4	73	0	0	0	0	15	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	415	307	
	5	56	0	1	1	1	2	24	1	3	1	2	3	1	1	1	0	0	371	222	
	6	42	1	2	2	2	2	2	28	2	1	2	1	2	8	2	0	0	259	129	
	7	60	1	1	2	2	2	2	1	25	1	1	0	0	1	2	0	0	273	179	
	8	59	2	1	3	1	1	1	1	1	26	1	1	1	1	1	0	0	263	173	
	9	71	2	0	0	1	1	0	0	0	0	22	1	0	1	1	0	0	271	202	
	10	53	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	24	9	0	1	0	0	149	87	
	11	49	1	0	0	2	3	1	0	2	1	2	1	36	2	0	0	0	92	48	
12	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	36	30	0	0	0	1,212	66		
A5	1	4	0	8	1	0	60	2	1	3	20	0	0	0	0	0	0	0	223	28	
	2	0	21	43	8	0	0	0	0	9	11	4	0	0	1	2	0	0	734	526	
	3	0	14	19	0	0	0	0	0	6	46	11	3	1	0	0	0	0	403	132	
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	53	11	1	0	0	0	188	1	
	5	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	65	1	1	0	0	0	219	71	
	6	0	0	8	0	0	0	0	0	0	53	22	10	2	1	2	0	0	678	59	
	7	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	44	0	49	0	0	191	10	
	8	19	0	10	1	30	2	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	215	129	
	9	0	0	6	0	0	0	27	26	8	0	0	0	0	0	32	0	0	234	14	
	10	0	0	36	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	59	0	0	77	29	
	11	10	0	3	0	0	0	0	0	0	23	30	32	0	0	0	0	0	237	32	
	12	51	0	38	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	92	84	
	13	0	62	34	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	125	123	
A6	1	1	1	65	2	1	9	16	2	0	1	0	1	1	1	1	0	0	181	126	
	2	1	25	11	4	1	2	1	2	2	3	3	3	36	2	2	0	0	137	59	
	3	3	3	19	2	2	2	3	3	42	3	4	3	3	3	7	0	0	109	31	
	4	4	3	3	2	35	2	2	2	2	2	2	3	2	9	25	0	0	135	64	
	5	1	4	2	2	1	1	1	1	1	25	2	1	1	1	51	2	0	135	14	
	6	4	2	2	72	4	2	1	1	2	2	2	2	3	0	0	0	0	51	43	
	7	1	28	5	1	1	2	2	2	2	2	2	1	34	4	13	0	0	140	51	
	8	2	1	2	1	2	2	5	66	4	3	2	3	2	2	3	1	0	93	6	
	9	11	3	35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40	0	0	0	164	84	
	10	3	3	2	2	1	2	3	1	1	73	2	2	1	2	1	0	0	70	7	
	11	1	1	1	1	1	85	3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	55	3	
	12	1	0	45	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	42	6	1	0	121	57	
	13	1	1	2	1	1	0	0	0	86	2	1	2	1	1	1	0	0	57	4	
	14	1	1	3	2	83	3	1	1	1	1	2	1	0	0	0	0	0	52	47	

表 4-5 条件 A における 1 分ごとのダスト排出量の重量割合（続き）

Type	Pulse No	パルスからの経過時間（分）																		パルス間の排出量合計値（g）	パルス前後 ² 分間の排出量合計値（g）
		-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
A7	1	2	2	24	2	3	2	3	3	2	2	4	3	0	0	0	100	18	0	293	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	100	60	0	846	8
	3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	69	0	964	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	87	0	2,403	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	90	0	4,411	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	98	0	1,175	0
	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	99	0	3,876	0
	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	93	0	2,544	0
	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0	585	0
	10	0	1	1	30	5	2	3	1	1	1	1	1	0	0	0	100	5	0	317	0
	11	5	4	4	5	56	4	5	4	5	4	4	4	4	0	0	100	20	0	184	0
	12	6	4	4	47	36	5	4	4	4	2	4	3	0	0	0	100	19	0	173	0
	13	258	168	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0	55	0
	14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	95	0	1,572	0
	15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	94	0	969	0
A8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	98	0	2,165	0
	2	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	74	0	748	0
	3	0	0	1	6	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	100	60	0	636	0
	4	1	1	1	1	11	1	1	1	1	1	3	1	0	0	0	100	50	0	442	0
	5	1	1	1	1	1	9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	100	66	0	490	0
	6	1	0	0	1	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	100	66	0	473	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	100	74	0	499	0
	8	1	1	1	1	1	1	1	1	16	6	0	0	0	0	0	100	58	0	279	0
	9	0	2	3	1	0	2	1	2	1	39	3	0	0	0	0	100	52	0	189	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	2	0	0	0	0	100	5	0	1,373	0
	11	0	0	27	1	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	100	13	0	339	0
	12	1	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	100	72	0	1,295	0
	13	0	0	0	0	0	2	11	3	1	0	0	0	0	0	0	100	33	0	602	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	19	28	6	0	0	0	0	0	100	0	0	289	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	100	32	0	358	0

条件 B についても、同様にダスト排出量をまとめた。バグフィルター差圧が約 1kPa となったときにパルスによる払い落としを行ったため、パルス間隔が数分から数時間の場合があった。数時間の排出量を分母にすると、パルスによる排出量の割合が小さくなるので、条件 A と算出方法をそろえるため、パルスによる払い落としから 10 分まで（10 分未満の場合は次のパルス直前まで）のダスト排出量合計値に対するパルスによる払い落とし量の割合を算出した。表 4-6 に結果を示す。重量割合が 40%以上のものを着色した。

表 4-6 条件 B における 1 分ごとのダスト排出量の重量割合

Type	Pulse No	パルスからの経過時間 (分)											パルス間の排出量合計値 (g)	パルス時から4分までの排出量 (g)
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
B1	1	0.5	2.0	93.6	0.5	1.6	0.2	0.0	0.0	0.7	0.8	0.2	130	127
	2	2.0	64.0	28.2	4.7	0.4	0.3	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	711	692
	3	3.3	5.8	37.2	53.7								76	74
	4	0.8	0.5	14.8	16.7	63.4	1.2	1.7	0.2	0.0	0.3	0.4	266	254
	5	6.4	0.5	0.5	6.9	81.2	2.8	0.4	1.0	0.2	0.0	0.2	422	375
	6	0.7	19.3	1.3	0.1	7.1	31.8	36.6	2.4	0.2	0.3	0.1	353	98
	7	1.6	1.8	37.8	10.1	7.9	8.4	32.4					285	164
	8	0.3	2.3	1.1	13.4	3.3	3.8	2.9	70.4	1.6	0.3	0.6	395	80
	9	1.0	0.8	15.5	0.5	24.8	2.5	3.6	5.2	44.7	1.1	0.2	181	76
	10	0.1	0.2	0.6	0.5	1.1	1.2	3.4	20.1	65.1	6.9	0.6	232	6
B2	1	0.7	9.7	0.4	0.3	0.3	0.2	18.9	31.0	9.8	6.0	22.6	290	31
	2	0.1	2.1	34.4	58.7	4.3	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	654	651
	3	0.6	22.9	5.3	68.8	1.6	0.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	286	282
	4	12.4	1.4	3.4	28.8	35.8	17.0	1.0	0.1	0.0	0.1	0.0	972	674
	5	0.3	0.1	47.7	10.3	5.0	35.4	0.7	0.2	0.2	0.1	0.0	428	271
	6	1.2	0.2	10.9	2.8	5.0	23.5	54.0	2.2	0.1	0.1	0.1	560	106
	7	0.1	36.3	23.2	1.6	37.0	1.2	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	545	534
	8	7.9	2.0	9.6	0.7	67.4	10.9	1.0	0.2	0.2	0.0	0.0	163	130
B3	1	5.1	67.0	3.5	0.2	6.6	4.5	10.9	0.5	0.1	0.1	1.4	355	275
	2	1.0	2.6	41.8	34.0	8.7	1.5	0.0	0.1	0.8	3.3	6.1	947	825
	3	5.8	80.4	2.0	0.0	0.1	0.0	0.0	11.6	0.2	0.0	0.0	123	101
	4	1.6	19.2	43.7	34.4	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	916	897
B4	1	0.0	1.3	93.3	4.8	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	261	260
	2	3.7	2.5	32.7	47.6	13.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	981	939
	3	27.9	7.5	55.1	8.0	0.2	0.7	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0	226	160
	4	3.3	16.4	19.5	56.6	3.6	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	405	390
	5	40.9	5.8	3.5	45.4	3.3	0.0	0.2	0.6	0.2	0.0	0.1	358	207
	6	1.0	6.4	7.4	77.1	7.0	0.2	0.6	0.2	0.0	0.1	0.0	297	291
	7	29.9	11.5	16.9	41.8								105	74
	8	0.4	3.9	5.3	64.0	24.5	0.1	0.1	1.2	0.2	0.1	0.1	146	143
	9	18.3	3.0	11.0	47.1	19.0	1.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	185	148
	10	11.0	13.1	4.7	55.3	15.7	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	236	210
B5	1	25.6	5.7	55.7	8.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	1.4	3.0	515	359
	2	9.5	22.9	58.8	5.5	0.1	0.2	0.0	0.0	2.8	0.2	0.0	581	506
B6	1	0.3	83.6	13.0	0.3	0.0	1.0	0.1	0.1	1.2	0.2	0.2	238	231
	2	3.4	3.6	70.5	14.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	7.0	491	437
	3	34.7	13.8	47.7	3.9								55	36
	4	6.7	12.1	77.0	0.6	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	3.0	0.1	248	223
	5	6.4	18.0	49.3	12.7	13.5							98	92
	6	8.3	4.6	54.3	28.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	2.6	1.8	282	246
	7	7.2	12.3	37.7	0.1	12.0	15.7	14.9					75	47
	8	0.4	70.1	24.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	215	203
B7	1	9.7	12.1	53.9	23.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	239	215
	2	8.2	26.4	43.6	20.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	996	905
	3	0.2	5.2	75.6	14.0	2.9	0.0	0.1	0.0	0.0	1.8	0.1	313	306
	4	1.8	1.2	22.7	32.7	32.9	8.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	850	761
B8	1	26.0	4.9	18.3	29.5	1.4	19.9						169	92
	2	1.8	1.4	1.8	41.5	43.0	10.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	1,156	1,014

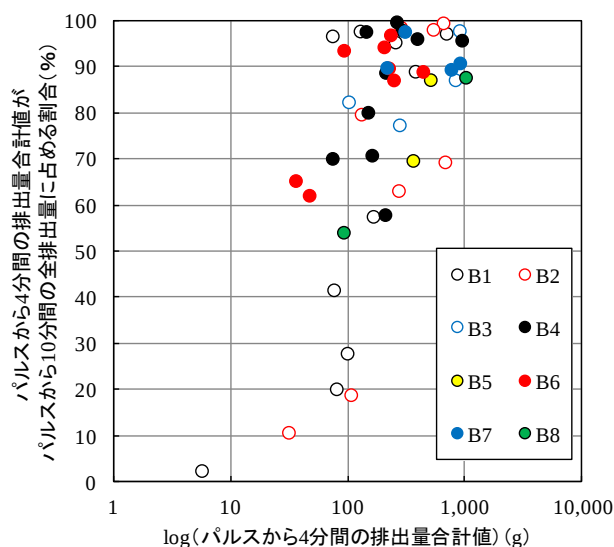
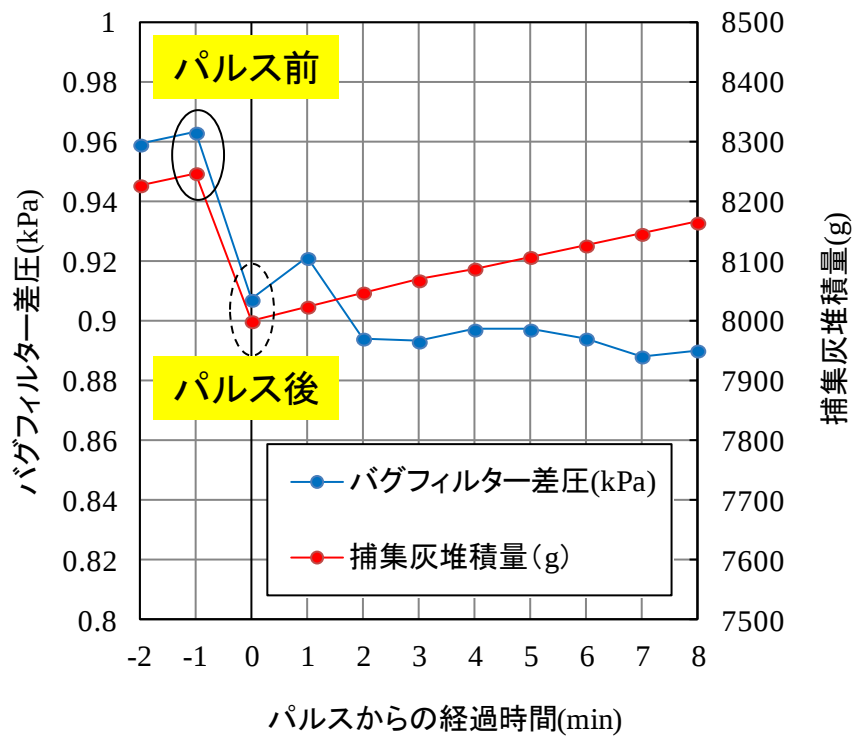


図 4-6 パルスから 4 分間の排出量が，パルスから 10 分間の排出量に占める割合

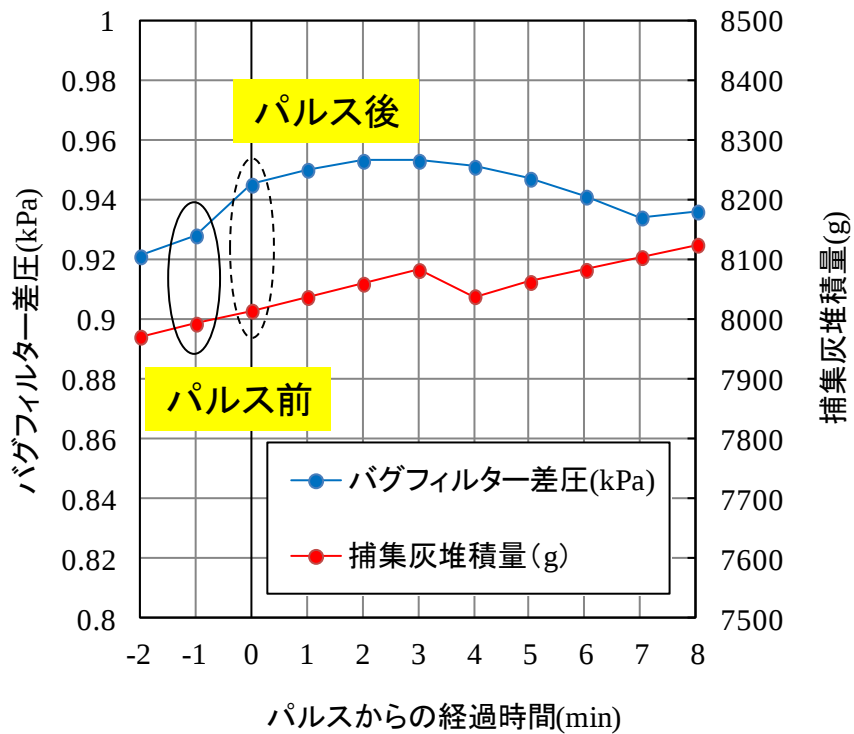
パルス時から 4 分までに，1 分ごとの排出量が 10 分間の合計値の 40%以上となるものは，全 48 個のデータの中で 38 個あった。次に，パルス時から 4 分間の排出量合計値がパルスから 10 分間の全排出量に占める割合を調べた。結果を図 4-6 に示す。パルス時から 4 分間の排出量がパルスから 10 分間に排出されたダストの合計値の 50%以上となったものは，全データ 48 個中 42 個であった。このため，パルスによって払い落されたダスト量を，パルス時から経過時間 4 分までの合計値（それよりも短いものは設定時間全ての合計値）とした。

(2) パルス前後の集塵灰堆積量とバグフィルター差圧の決定

図 4-7 にパルス前後のバグフィルター差圧と集塵灰堆積量の変化例を示す。



(a) A1 の 1 回目



(b) A1 の 2 回目

図 4-7 パルス前後のバグフィルター差圧と捕集灰堆積量の変化例

X 軸の時間“0”がパルスタイミングである。図 4-7 (a) のようにパルスによるバグフィルター差圧と捕集灰堆積量の変化が明確にみえる場合と、図 4-7 (b) のようにその変化がほとんどみえない場合があった。図 4-7 (a) のように変化が著しい場合は、バグフィルター差圧と捕集灰堆積量が下がる前のデータを「パルス前」(実線で囲んだ点)とし、その後を「パルス後」(破線で囲んだ点)とした。図 4-7 (b) のようにバグフィルター差圧と捕集灰堆積量に変化がみられない場合は、パルス 1 分前のデータを「パルス前」(実線で囲んだ点)、パルスタイミングのデータを「パルス後」(破線で囲んだ点)とした。以上の手順で、パルス前後のバグフィルター差圧とパルス前の捕集灰堆積量を求めた。

1)、2)の手順で表 4-7 と表 4-8 のように、以降のデータ解析に用いるデータとして、条件 A と条件 B のガス流量、リンの添加割合、パルス圧、パルス間隔、パルス前後のバグフィルター差圧、パルス前までの飛灰投入量、パルス間の全排出量、パルス前の捕集灰堆積量、パルスによる払い落とし量、パルス以外による排出量をまとめた。ただし、B5 と B8 は 2 回しか払い落としを行っていないため、分析対象からは除外した。

表 4-7 条件 A における払い落とし前後のバグフィルター差圧変化データ

Type	Pulse No.	ガス流量 (m ³ /h)	飛灰に対するリン比率 (wt%)	パルス圧 (MPa)	バグフィルター差圧 パルス前 パルス後 (kPa)		パルス前までの飛灰投入量 (g)	パルス前の捕集灰堆積量 (g)	パルス間の全排出量 (g)	パルスによる払い落とし量 (g)	パルス以外の排出量 (g)
A1	1	226	0	0.19	0.928	0.945	13,213	7,992	173	31	141
	2	227	0	0.19	0.963	0.907	13,642	8,247	502	302	199
	3	222	0	0.19	0.934	0.852	14,157	8,240	550	382	168
	4	227	0	0.19	0.900	0.768	14,586	8,083	1,277	1,112	165
	5	229	0	0.19	0.815	0.569	15,015	5,151	2,314	2,088	227
A2	1	223	0	0.18	0.734	0.613	8,315	4,717	591	580	11
	2	225	0	0.18	0.629	0.416	8,583	4,402	1,937	1,924	13
	3	218	0	0.18	0.435	0.336	8,851	2,791	1,307	1,216	91
	4	217	0	0.18	0.362	0.326	9,118	1,753	291	291	0
A3	1	228	0	0.16	0.771	0.762	4,690	3,590	209	11	198
	2	227	0	0.16	0.810	0.798	4,947	3,639	81	16	64
	3	225	0	0.17	0.819	0.810	5,222	3,834	71	14	58
	4	223	0	0.17	0.846	0.836	5,480	4,022	9	9	0
A4	1	237	0	0.18	0.834	0.700	8,280	5,141	798	761	37
	2	243	0	0.18	0.763	0.693	8,555	4,618	488	459	29
	3	249	0	0.18	0.713	0.606	8,812	4,388	1,090	1,063	27
	4	241	0	0.18	0.610	0.582	9,070	3,556	415	307	107
	5	241	0	0.18	0.597	0.561	9,328	3,399	371	222	149
	6	239	0	0.18	0.588	0.569	9,585	3,286	259	129	130
	7	239	0	0.18	0.587	0.549	9,843	3,284	273	179	94
	8	239	0	0.18	0.570	0.548	10,101	3,269	263	173	90
	9	236	0	0.18	0.564	0.517	10,358	3,264	271	202	69
	10	236	0	0.18	0.540	0.523	10,616	3,251	149	87	62
	11	237	0	0.18	0.539	0.522	10,874	3,360	92	47	44
	12	236	0	0.18	0.534	0.523	11,200	3,482	1,212	66	1,146

表 4-7 条件 A における払い落とし前後のバグフィルター差圧変化データ (続き)

Type	Pulse No.	ガス流量 (m ³ /h)	飛灰に対するリン比率 (wt%)	パルス圧 (MPa)	バグフィルター差圧 パルス前 パルス後 (kPa)		パルス 前 までの飛 灰投入量 (g)	パルス 前 の捕集灰 堆積量 (g)	パルス 間の 全排出量 (g)	パルスに よる払い 落とし量 (g)	パルス 以外の 排出量 (g)
A5	1	224	4.5	0.18	0.876	0.852	5,446	3,924	223	28	195
	2	223	4.5	0.18	0.890	0.760	5,781	4,042	734	526	208
	3	229	4.5	0.18	0.796	0.741	6,138	3,668	403	132	271
	4	229	4.5	0.18	0.774	0.759	6,473	3,600	188	1	188
	5	231	4.5	0.18	0.786	0.741	6,807	3,769	219	71	148
	6	230	4.5	0.18	0.760	0.733	7,142	3,862	678	59	618
	7	233	4.5	0.18	0.773	0.759	7,477	3,520	191	10	181
	8	233	4.5	0.18	0.767	0.747	7,812	3,624	215	129	86
	9	234	4.5	0.18	0.753	0.742	8,147	3,783	234	14	220
	10	237	4.5	0.18	0.750	0.732	8,481	3,884	77	29	48
	11	238	4.5	0.18	0.740	0.735	8,816	4,121	237	32	205
	12	239	4.5	0.18	0.737	0.714	9,151	4,195	92	84	7
	13	245	4.5	0.18	0.723	0.708	9,486	4,484	125	123	1
A6	1	303	0	0.23	1.086	1.002	6,219	3,877	181	126	55
	2	300	0	0.23	1.061	1.061	6,528	3,985	137	59	79
	3	294	0	0.23	1.127	1.122	6,837	4,155	109	31	78
	4	296	0	0.23	1.182	1.185	7,146	4,353	135	64	71
	5	296	0	0.24	1.272	1.263	7,476	4,551	135	14	121
	6	291	1	0.24	1.314	1.311	7,826	4,766	51	43	8
	7	294	1	0.24	1.346	1.354	8,093	4,982	140	51	89
	8	292	1	0.24	1.392	1.413	8,402	5,152	93	6	86
	9	295	1	0.24	1.490	1.483	8,732	5,387	164	84	80
	10	291	1	0.24	1.506	1.513	9,020	5,513	70	7	63
	11	298	3	0.24	1.595	1.593	9,329	5,752	55	3	53
	12	307	3	0.24	1.679	1.674	9,617	5,985	121	57	64
	13	306	3	0.24	1.686	1.683	9,947	6,194	57	4	53
	14	300	3	0.24	1.680	1.653	10,256	6,446	52	47	5
A7	1	325	0	0.28	1.106	0.752	4,345	2,644	516	416	100
	2	322	0	0.28	0.836	0.563	4,598	2,384	798	648	150
	3	320	0	0.26	0.645	0.501	4,851	1,770	685	511	174
	4	315	1	0.26	0.610	0.525	5,103	1,400	874	173	700
	5	327	1	0.26	0.624	0.528	5,356	761	821	237	584
	6	327	1	0.26	0.560	0.494	5,608	723	244	182	62
	7	318	1	0.26	0.528	0.502	5,878	770	161	99	63
	8	316	1	0.26	0.582	0.529	6,131	858	297	185	112
	9	316	1	0.26	0.597	0.529	6,383	810	483	376	107
	10	315	1	0.26	0.610	0.552	6,636	584	206	130	76
	11	322	1	0.26	0.591	0.533	6,888	632	333	189	143
	12	317	1	0.26	0.579	0.544	7,141	553	129	88	41
	13	323	1	0.26	0.567	0.527	7,394	677	242	139	104
	14	322	1	0.26	0.560	0.527	7,646	685	88	49	39
	15	324	1	0.26	0.542	0.508	7,899	816	155	140	15
A8	1	315	0	0.24	0.855	0.704	4,550	1,674	289	243	46
	2	314	0	0.24	0.812	0.721	4,872	1,714	274	229	45
	3	311	0	0.24	0.807	0.732	5,194	1,736	261	183	78
	4	309	0	0.24	0.796	0.774	5,516	1,827	110	79	30
	5	310	0	0.24	0.838	0.781	5,838	2,039	210	104	106
	6	311	0	0.24	0.875	0.842	6,140	2,116	168	89	79
	7	302	0	0.24	0.945	0.887	6,462	2,296	148	104	45
	8	299	3	0.24	0.971	0.963	6,784	2,446	148	56	91
	9	294	3	0.24	1.010	0.987	7,106	2,634	75	50	25
	10	298	3	0.24	1.038	1.038	7,408	2,837	86	67	19
	11	298	3	0.24	1.047	1.049	7,730	3,097	169	0	168
	12	297	3	0.24	1.089	1.087	8,053	3,270	108	3	105
	13	304	3	0.24	1.142	1.142	8,375	3,444	283	167	116
	14	304	3	0.24	1.166	1.166	8,697	3,501	147	82	64
	15	304	3	0.24	1.170	1.171	9,019	3,666	34	15	19

表 4-8 条件 B における払い落とし前後のバグフィルター差圧変化データ

Type	Pulse No.	ガス 流量 (m ³ /h)	灰に対する リン比率 (wt%)	パルス圧 (MPa)	パルス 間隔 (min)	バグフィルター差圧 パルス前 パルス後 (kPa)		パルス前 までの飛 灰投入量 (g)	パルス前 の捕集灰 堆積量 (g)	パルス間の 全排出量 (g)	パルスに よる払い 落とし量 (g)	パルス 以外の 排出量 (g)
B1	1	308	0	0.27	25	1.11	0.97	3,769	2,349	369	128	241
	2	302	0	0.27	107	1.09	0.67	4,252	2,434	1,514	706	808
	3	300	0	0.27	3	1.12	1.09	6,258	2,951	76	76	0
	4	303	0	0.27	26	1.13	0.94	6,332	2,936	417	256	162
	5	303	0	0.27	45	1.09	0.86	6,833	3,003	571	402	169
	6	304	0	0.27	35	1.09	0.87	7,687	3,302	566	101	465
	7	307	0	0.27	6	1.13	1.05	8,356	3,389	285	169	117
	8	305	0	0.27	38	1.12	0.91	8,486	3,251	520	81	439
	9	301	0	0.27	11	1.11	1.04	9,210	3,455	182	77	104
	10	319	0	0.27	14	1.10	0.94	9,433	3,498	235	6	229
B2	1	302	1	0.27	25	1.11	1.01	3,790	2,494	389	33	356
	2	295	1	0.27	134	1.11	0.71	4,463	2,767	1,894	651	1,243
	3	300	1	0.27	61	1.10	0.91	7,041	3,463	543	284	259
	4	304	1	0.27	89	1.12	0.75	8,118	4,096	1,538	795	742
	5	301	1	0.27	16	1.10	1.01	9,984	4,326	472	272	200
	6	302	1	0.27	67	1.08	0.79	10,292	4,145	881	112	769
	7	294	1	0.27	48	1.11	1.00	11,600	4,610	1,064	535	529
	8	309	1	0.27	12	1.17	1.02	12,542	4,453	163	143	20
B3	1	311	3	0.27	76	1.11	0.91	3,918	2,289	1,061	293	767
	2	312	3	0.27	164	1.12	0.71	5,514	2,829	2,776	835	1,941
	3	318	3	0.27	40	1.10	1.05	8,934	3,480	487	108	379
	4	326	3	0.27	22	1.10	0.78	9,784	3,835	974	912	63
B4	1	302	0	0.27	30	1.11	0.93	4,210	2,737	490	260	230
	2	301	0	0.27	99	1.12	0.69	4,803	2,801	1,614	976	638
	3	303	0	0.27	17	1.13	1.01	6,800	3,146	260	223	37
	4	306	0	0.27	48	1.12	0.85	7,156	3,288	546	403	143
	5	304	0	0.27	15	1.12	1.00	8,124	3,577	493	354	139
	6	307	0	0.27	31	1.12	0.93	8,441	3,544	440	294	146
	7	306	0	0.27	3	1.13	1.10	9,073	3,708	105	105	0
	8	305	0	0.27	23	1.13	1.01	9,152	3,713	210	143	67
	9	304	0	0.27	12	1.12	1.02	9,627	3,944	185	182	3
	10	337	0	0.27	18	1.11	0.98	9,884	4,024	259	236	23
B5	1	316	9	0.27	293	1.119	0.882		2,484	3252.8	359.2	2893.6
	2	322	9	0.27	30	1.077	0.958		3,845	580.2	506.3	73.9
B6	1	310	1	0.27	43	1.13	0.96	3,832	2,614	575	232	343
	2	309	1	0.27	81	1.11	0.86	4,553	2,727	1,071	454	618
	3	305	1	0.27	3	1.16	1.13	5,884	2,978	55	55	0
	4	309	1	0.27	41	1.14	0.96	5,916	2,967	498	239	259
	5	309	1	0.27	4	1.15	1.12	6,605	3,165	98	98	0
	6	303	1	0.27	43	1.13	0.96	6,685	3,134	559	269	290
	7	299	1	0.27	6	1.13	1.10	7,279	3,183	75	52	23
	8	301	1	0.27	39	1.09	0.97	7,375	3,225	323	204	119
B7	1	310	3	0.27	47	1.12	0.99	4,123	2,260	748	238	511
	2	309	3	0.27	174	1.11	0.72	4,988	2,347	2,819	986	1,833
	3	312	3	0.27	74	1.12	1.00	8,210	2,832	779	307	472
	4	315	3	0.27	44	1.12	0.81	9,608	3,425	913	776	137
B8	1	297	6	0.27	5	1.142	1.079		3,186	125.1	91.5	33.6
	2	292	6	0.27	125	1.103	0.651		3,144	1983.9	1013.8	970.1

4.4 ろ布上に捕集された捕集灰層の透気係数

4.4.1 パルスによる捕集灰堆積量とバグフィルター差圧の変化

図 4-8 に定期的なパルスによる捕集灰堆積量とバグフィルター差圧の変化パターンを示す。(a) は 1~4 回目のパルスによる払い落とし効果が明確にみえる。しかし、その後にはパルスによる払い落としを行っても、捕集灰堆積量が減少する(集塵灰層が薄くなる)ことはなく、払い落とし効果が得られなくなった。(b) は、他と比べて捕集灰堆積量が多いため、複数回払い落としを行い続けることで、払い落とし効果がみられたケースである。

(c) は、パルスによる払い落とし効果がみられない（ろ布への捕集灰堆積量＝払い落し量）。(d) は、パルスによる払い落としを行っているにもかかわらず、捕集堆積量が増加し続け、バグフィルター差圧も上昇し続けるケースである。このパターンでは、他の要因として、表 4-7 に示したようにガス流量を増やしたことやパルス圧が不十分で払い落とし効果が得られなかった可能性がある。

4.4.2 捕集灰層の透気係数の計算

図 4-9 に A1～A8 におけるパルス前の捕集灰堆積量とパルス前のバグフィルター差圧の関係を示す。捕集灰堆積量とバグフィルター差圧の間に線形関係が成り立っている。

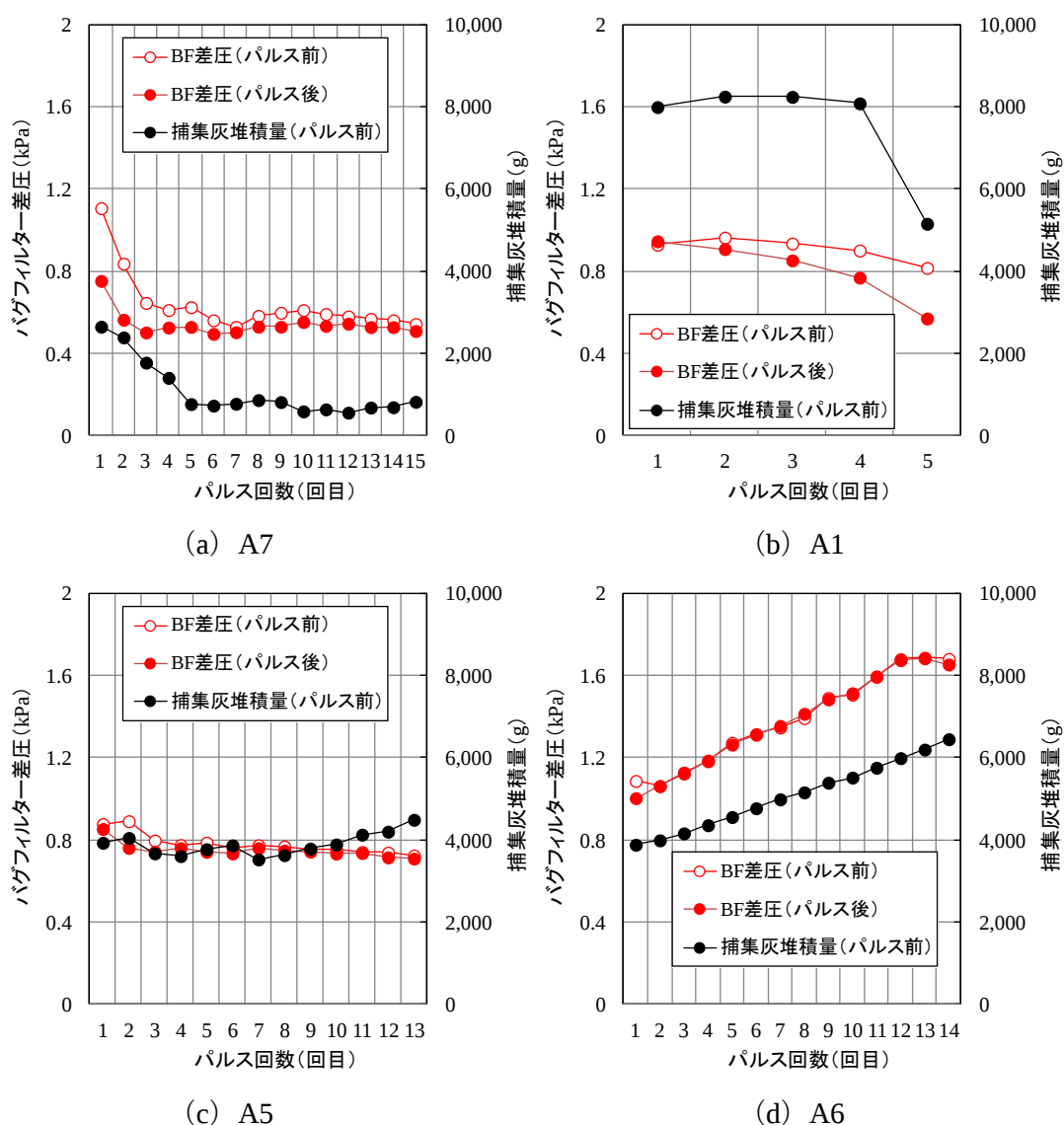


図 4-8 定期的なパルスによる捕集灰堆積量とバグフィルター差圧の変化例

定期的にパルスによる払い落としを行うことで、捕集灰堆積量とバグフィルター差圧が減少する左下がりのプロットとなっている。A6 と A8 のみ、捕集灰が払い落されず堆積量が増加し、バグフィルター差圧が上昇する右上がりのプロットとなった。A1～A8 は、本来同一直線上に乗るはずだが、A1～A5 と A6～A8 のグループに分けられ一致しなかった。これは、この二つのグループにおいて、実験時のガス流量に違いがあったためと考えられる。

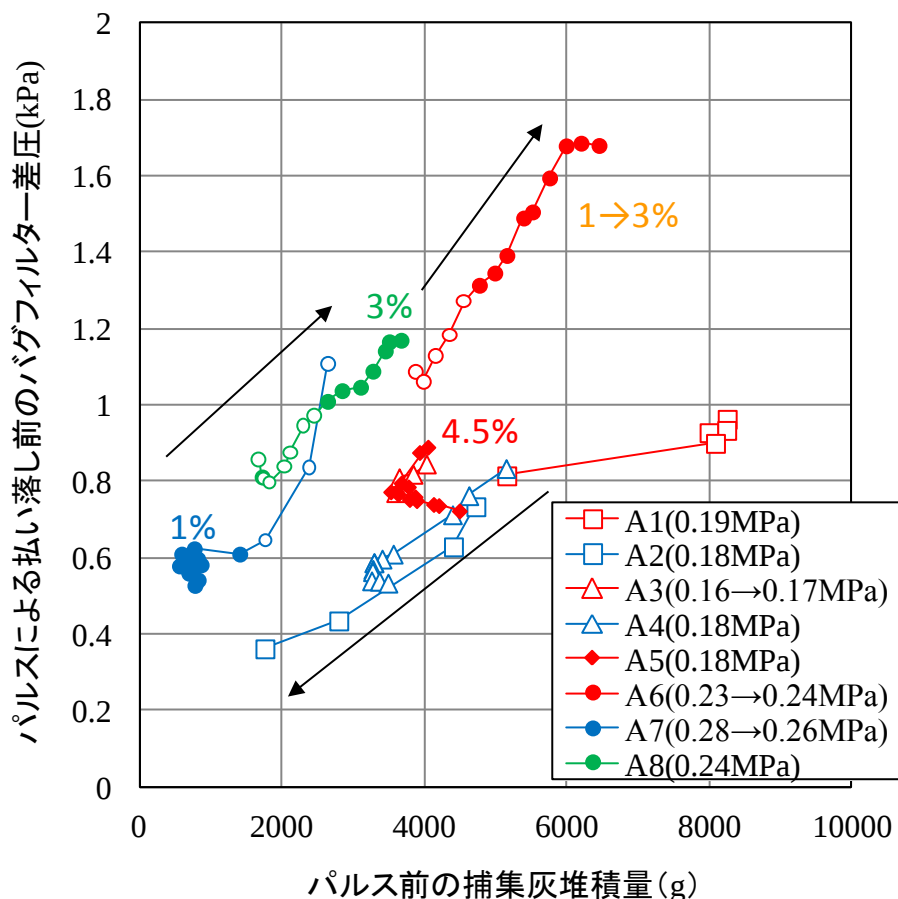


図 4-9 パルスによる払い落とし前の捕集灰堆積量とバグフィルター差圧の関係
 白抜き：リン酸噴霧なし，塗りつぶし：リン酸噴霧あり，→：プロットの進行方向，
 凡例内の ()：パルス圧，図中数字：飛灰に対するリン割合

図 4-10 に捕集灰層厚さとバグフィルター差圧の関係，A2 と A8 の近似直線の例を示す。A8 のプロットと近似直線の関係より，リン酸噴霧なしとありでプロットが同一直線上にあることがわかった。表 4-9 に A1～A8 の各近似直線の傾きから求めた透気係数を示す。透気係数を比較すると，リン酸噴霧を行っても係数の桁数が変わるほどではなかった。表 4-10 に示した土壌粒子の透気係数と比較すると，捕集灰層は極微粒砂と同程度であることがわかった。

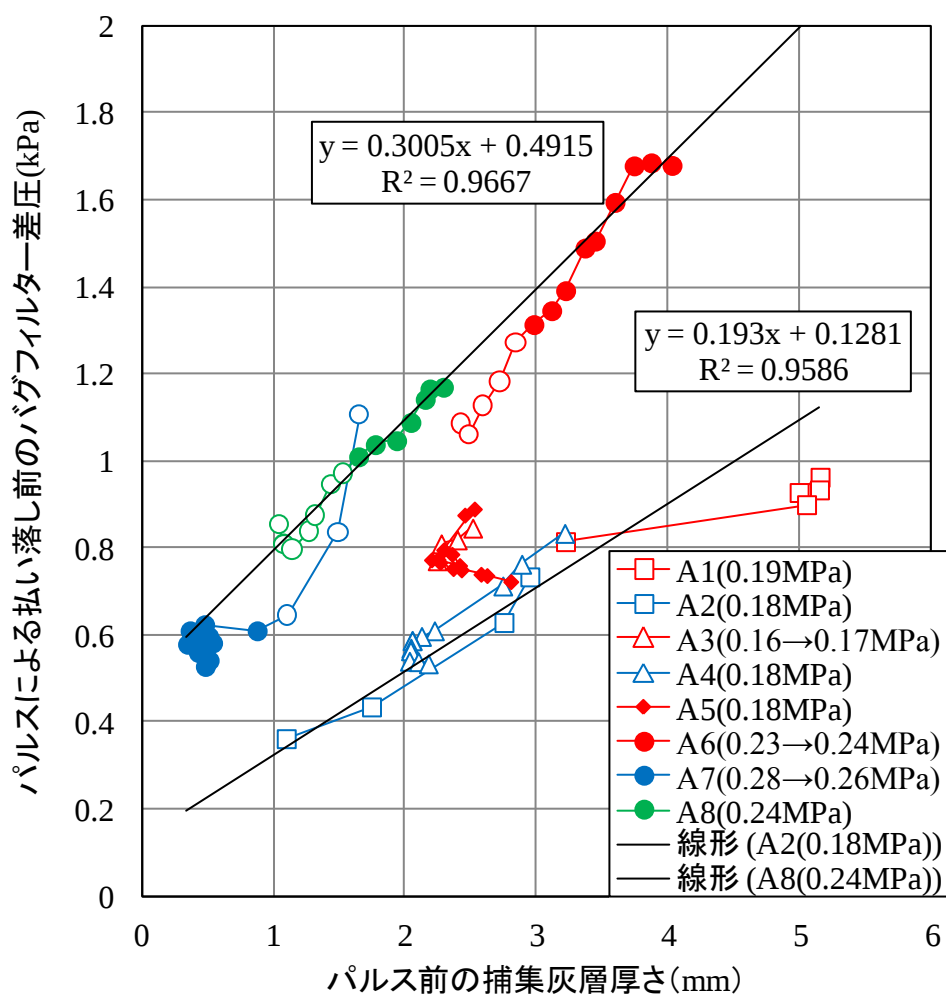


図 4-10 パルスによる払い落とし前の捕集灰層厚さとバグフィルター差圧の関係
 白抜き；リン酸噴霧なし，塗りつぶし：リン酸噴霧あり，凡例内の ()：パルス圧，

表 4-9 捕集灰層の透気係数

Type	灰に対するリン割合 (wt%)	透気係数 ($\times 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{sec})$)
A1	0	24.0
A2	0	7.6
A3	0	6.6
A4	0	6.8
A5	4.5	(3.0)
A6	0→1→3	4.6
A7	0→1	6.8
A8	0→3	6.7

表 4-10 土壌粒子の透気係数

	透気係数 ($\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{sec})$)
粗粒粘土	2.8.E-10
粗粒シルト	2.2.E-09
極微粒砂	2.6.E-08
微粒砂	1.5.E-07
中粒砂	4.2.E-06
粗粒砂	6.2.E-06
細礫	1.0.E-04

4.4.3 捕集灰層表面の変化

透気係数の計算結果，リン酸噴霧による大きな値の変化は見られなかった。しかし，実際の集塵灰層の表面を観察するとリン酸噴霧の有無により違いがみられた。図 4-11 (a) にリン酸噴霧なしの，図 4-11 (b) にリン酸噴霧ありの捕集灰層表面の写真を示す。

リン酸噴霧なしでは，表面が滑らかであった。しかしリン酸噴霧ありでは，表面に凹凸が多く滑らかな様子ではなくなった。これは，リン酸噴霧によって灰粒子の物性が変化したためと考えられる。具体的には，粒子径が大粒径化し，ばたつきをもって堆積した可能性がある。そして，この捕集灰層の変化がバグフィルター差圧の低下の原因となったと推察される。また，透気係数は捕集灰層が均質な厚さであるとしているため，値に大きな違いがみられなかったが，実際には表面性状が異なるため，単純に厚さのみでの比較は難しいと考えられる。表面性状の定量的な評価を行うことが必要となるが，本試験では6本設置したろ布全てからのサンプリングが難しいことと，ろ布ごとに捕集灰の堆積と払い落としについての挙動が異なるため，表面性状の分析を断念した。



(a) リン酸噴霧なし

(b) リン酸噴霧あり

図 4-11 捕集灰層表面の写真

4.5 リン酸噴霧による払い落とし量の変化

4.5.1 払い落とし量への影響因子

図 4-12 にパルス圧，パルス前の捕集灰堆積量，払い落とし量との関係を示す。パルス圧によって二つのグループに分けた。各プロット中で，白抜きはリン酸噴霧なしを、塗りつぶしはリン酸噴霧ありを示し，矢印は実験の進行方向を表している。

(a) と (b) を比べると，(b) の A6～A8 の方がパルス圧は高いにもかかわらず，(a) よりも払い落とし量が少なかった。これは，ろ布上に堆積した集塵灰の量が少なかったことが原因として考えられる。捕集灰堆積量がほとんど同じところでは，パルス圧が高いほど払い落とし量が増加した。しかし，複数回払い落としを行うと，次第に捕集灰堆積量と払い落とし量の両方が減少し，収束していくことが分かった。

リン酸噴霧の払い落とし量への影響は，第 3 章で行った実機試験とは異なる結果となった。初期の捕集灰堆積量がほぼ同じであり，払い落とし時のパルス圧も 0.18MPa で同じ条件で実験を行った A2，A4，A5 を比較すると，リン酸噴霧が行われた A5 の払い落とし量が少なかった。A6，A7，A8 においても，リン酸噴霧なしと比べて，リン酸噴霧時に払い落とし量が減少した。加えて，払い落としを行っているのも関わらず，捕集灰堆積量が増加する減少もあった (A6，A8)

パルスによる払い落としが手動で行われた条件 B (図 4-12 (c) ～ (e)) では，払い落とし操作の奇数回目と偶数回目で払い落とし量に差が生じた。パルスの噴射口の広さ，パルス圧，ろ布の素材は同じであるので，差が生じた理由は不明である。しかし，左右 2 列のろ布に対しパルスによる払い落とし効果に差があることが分かった。

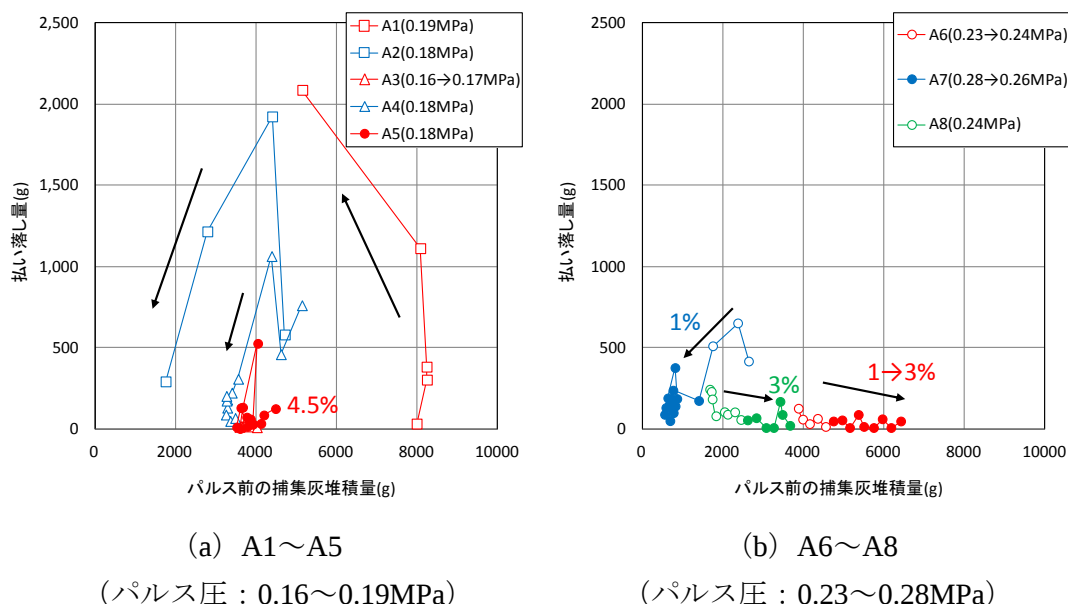
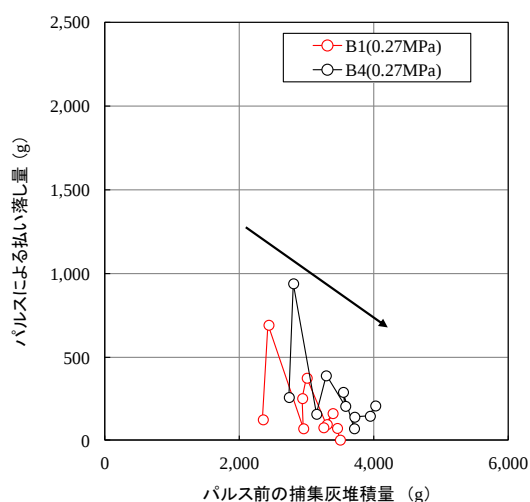


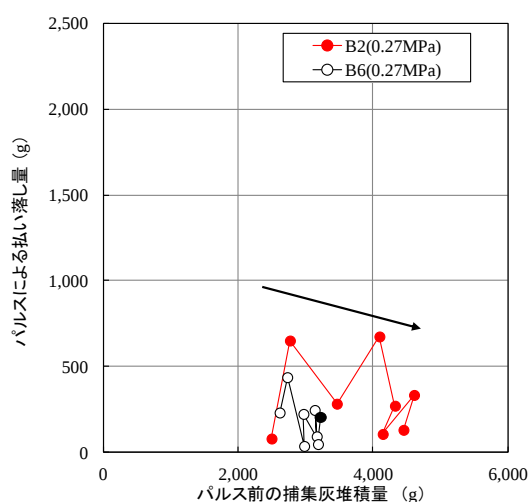
図 4-12 パルス圧，パルス前の集塵灰堆積量，払い落とし量の関係
(白抜き：リン酸噴霧なし，塗りつぶし：リン酸噴霧あり，矢印：実験の進行方向)

各実験で、効果的に払い落としがなされているもの（左右どちらかで払い落とし量が多いもの）を基準にすると、飛灰に対するリン比率が高くなるほど、1回の払い落としで払い落される捕集灰の量が多くなることがわかった。図 4-13 に B4, B6, B7 の連続データを示す。(a) のリン酸噴霧なしの B4 の差圧の変化に比べ、(b) → (c) とリン比率を上げた場合に、1度に多くの捕集灰が払い落されるため、払い落とし前の差圧値に戻るまでにより長い時間がかかったことがわかる。



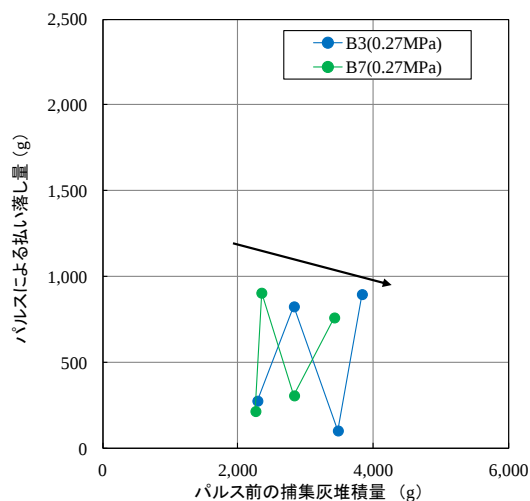
(c) B1, B4

(パルス圧 : 0.27 MPa, P : 0%)



(d) B2, B6

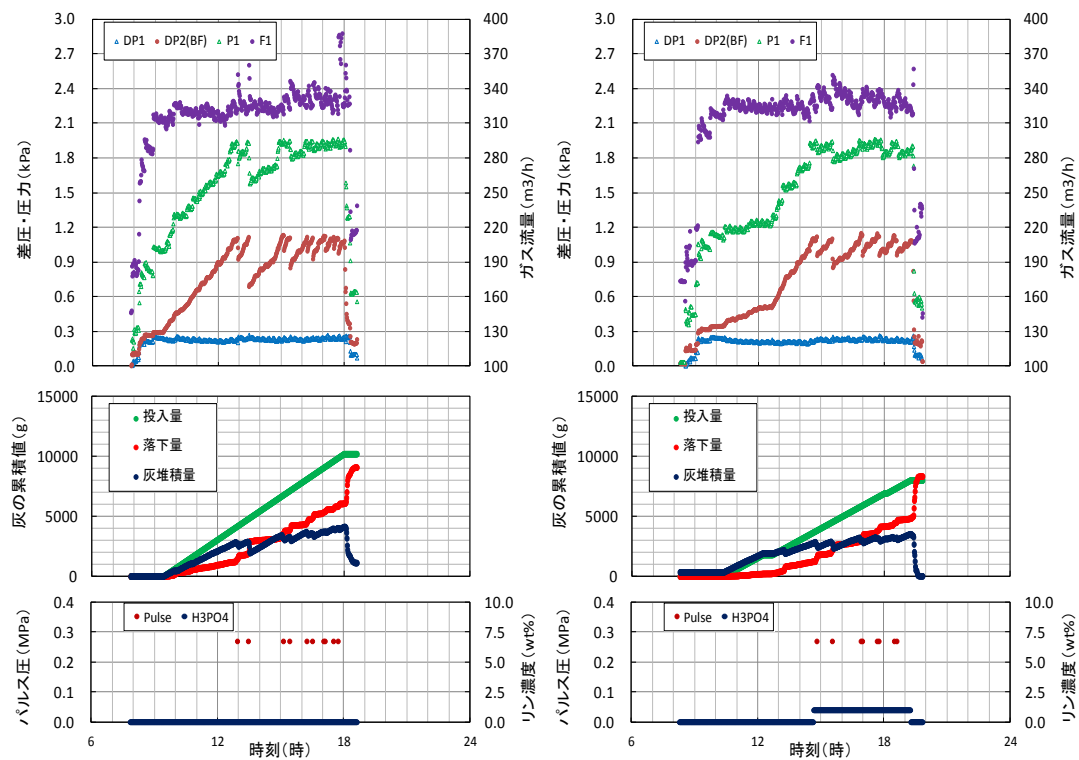
(パルス圧 : 0.27 MPa , P : 1%)



(e) B3, B7

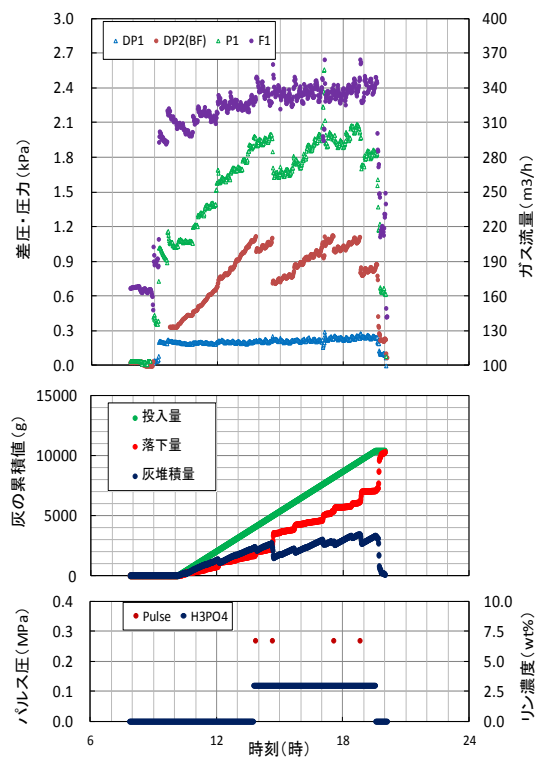
(パルス圧 : 0.27 MPa, P : 3%)

図 4-12 パルス圧, パルス前の捕集灰堆積量, 払い落とし量の関係 (続き)
(白抜き : リン酸噴霧なし, 塗りつぶし : リン酸噴霧あり, 矢印 : 実験の進行方向)



(a) B4 (P : 0%)

(b) B6 (P : 1%)



(c) B7 (P : 3%)

図 4-13 条件 B の連続データ

4.5.2 パルスによる払い落とし以外のリン酸噴霧のダスト排出量への影響

条件 B1～B4, B6, B7 (灰に対するリン比率 0, 1, 3%) では, 図 4-13 にも示したように, リン割合が高くなるほどバグフィルター差圧の上昇速度が小さくなった。図 4-1 に示した仮説 H1 に基づいて考えると, バグフィルター差圧低下はパルスによる払い落とし以外で排出されるダスト (非捕集灰) が増加によっても生じると考えられる。ここで, 条件 A と条件 B での 113 個と 44 個のパルスによる払い落とし区間について, 払い落とし前の捕集灰堆積量とパルスによる払い落とし以外のダスト排出速度関係を図 4-14 にプロットした。条件 A と条件 B のパルス間隔が異なるため, パルスによる払い落とし以外で排出された灰については, 時間当たりの排出速度とした。

結果をみると, パルスによる払い落とし以外のダスト排出速度はおおむね 20g/分であった。しかし, 条件 A の飛灰に対するリン割合 4.5%での排出速度が大きくなった。また, リン酸噴霧時で排出速度が大きいところに位置した。しかし, リン割合を上げたことによる明確な違いは見られなかった。

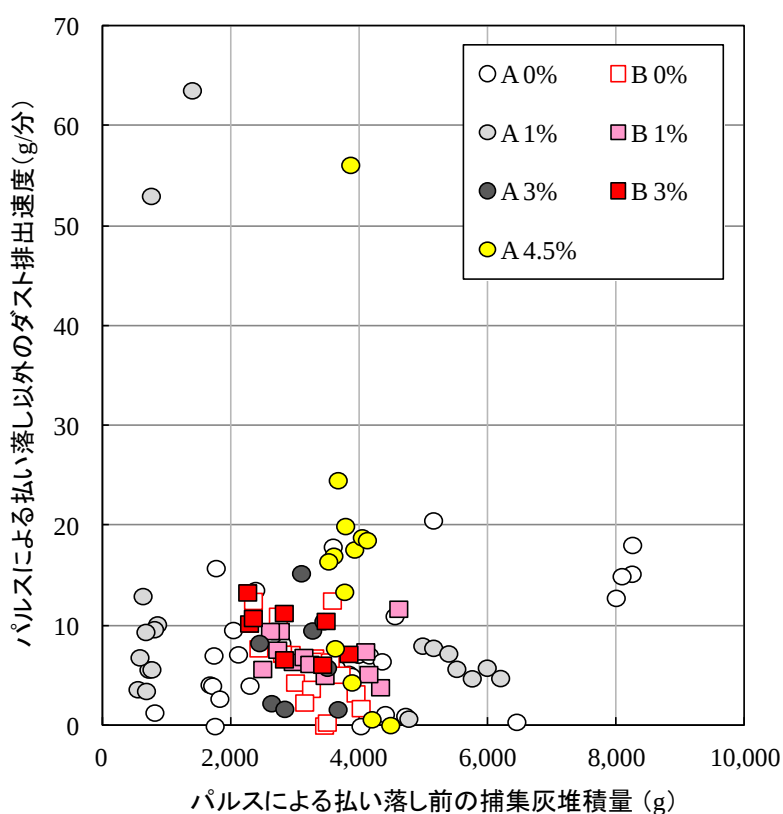


図 4-14 払い落とし前の集塵灰堆積量と払い落とし以外で排出された灰の排出速度

4.6 結論

仮説 H2 について、リン酸噴霧の有無によって捕集灰層の透気係数が異なるという結果は得られなかった。このため、リン酸噴霧によって捕集灰の粒子サイズが大きくなり、排ガスの通気性が向上したとは必ずしもいないものであった。しかし、捕集灰層表面の観察より、リン酸噴霧によって性状が変化したことはわかった。したがって、本試験では明らかにできなかったが、この捕集灰層の表面性状変化がバグフィルター差圧低下に関係していると考えられる。

一方、実機試験では、リン酸廃液噴霧時に通常運転時（リン酸廃液噴霧なし）よりも 20 倍以上の捕集灰が払い落された。にもかかわらず、本章のベンチスケール試験においてはリン酸噴霧による払い落とし量の著しい増加とそれによるバグフィルター差圧の低下は確認できなかった。加えて、条件 A と条件 B によっても、リン酸噴霧による払い落とし量に関し異なる結果となった。パルスによる払い落とし量は、パルス圧、払い落とし操作前の捕集灰堆積量などの影響を受けていたと考えられる。

本章に関連する発表

- 1) 黄仁姫, 倉田昌明, 須藤航, 高橋滋敏, 松尾孝之, 松藤敏彦, 前田典生, 角田芳忠 :
C2-6 ベンチスケール実験装置を用いたリン酸吹込みによるバグフィルタ差圧低減に関する研究, 第 26 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 九州大学, 2015. 9. 2-4.

第 5 章 ラボスケール装置を用いたリン酸化合物形態の影響と捕集灰の特性変化分析

5.1 はじめに

第 4 章で行ったベンチスケール試験では、リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低下の仮説の検証はできなかった。しかし、飛灰に対するリン割合を増すほど、捕集灰の払い落とし操作後に元の差圧に復帰するまでにかかる時間が長くなることがわかった。また、ろ布上の捕集灰層表面もリン酸噴霧によって凹凸の多いものとなった。捕集灰層の凹凸がガスの通気性に関わっているとすれば、それは仮説 H2 の証明になりうる。

一方で、これまでは液体のリン酸に着目してきたが、リン酸以外のリン酸化合物でもバグフィルター差圧低減効果を示すものがあるのかについても検討が必要である。向山¹⁾らは、産業廃棄物施設における搬入ごみの組成とリン酸をインプットとして熱力学平衡計算を行ったところ、リン酸カルシウムが生成すると報告した。実際の焼却施設でバグフィルター差圧低減薬剤として使用する際、液体よりも固体の方が扱いやすい。

そこで本章では、リン酸化合物形態の違いに着目し、リン酸とリン酸カルシウムによるバグフィルター差圧低減効果について明らかにすることを目的とし、ラボスケール試験を行った。また、リン酸噴霧によって、バグフィルター差圧低減メカニズムと実際に起こっているリン酸との反応を明らかにするために、第 4 章で明らかにできなかったリン酸噴霧による捕集灰の特性変化分析も行った。

5.2 実験方法

5.2.1 試料, 実験装置, 測定項目

ラボスケール実験では、ある一般廃棄物焼却施設から排出された消石灰吹き込み済みの飛灰と、別の一般廃棄物焼却処理施設から排出された消石灰吹き込みなしの飛灰を用いた。一般的に排ガス中の酸性ガス除去のために消石灰の吹き込みがなされている。このため、飛灰中の消石灰によるバグフィルター差圧低減に影響があるのかを調べるために、消石灰吹き込みなしの飛灰も用いた。消石灰吹き込みありの飛灰は採取日が異なるため、FA1, FA2 と名付け、消石灰吹き込みなしの飛灰を FA3 と名付けた。カルシウムとリン酸が反応することから、飛灰に含まれるカルシウムとリンは実験結果に影響を与える重要な元素である。そのため、あらかじめ FA1, FA2, FA3 中のカルシウム含有量とリン含有量を測定した。カルシウムは、FA1 で 21.2wt%, FA2 で 21.7wt%でほとんど同じ割合であり、FA3 では 15.5wt%であった。FA3 より FA1 と FA2 でカルシウムの割合が高いのは、排ガス中の酸性ガスの中和処理のために吹き込まれた消石灰によると考えられ、FA3 中のカルシウムは廃棄物由来と考えられる。リンは、FA1 で 0.01wt%, FA2 で 0.04wt%, FA3 で 0.01wt%であった。後述する実験条件に関わることはあるが、実験では飛灰に対するリンの添加割合を 1~18%としたので、リンの初期含有量は添加割

合に比べて十分低く、ほぼ無視できる程度であった。

リン酸化合物は、第一リン酸カルシウム（粉体：試薬特級，和光純薬）と 85%リン酸（液体：試薬特級，和光純薬）を用いた。飛灰と第一リン酸カルシウムは、装置の閉塞を防ぐために、あらかじめ 150℃で乾燥させてから用いた。

図 5-1 に廃棄物焼却施設の排ガス処理システムにおける煙道，バグフィルター，誘引通風機を模擬した実験装置を示す。

装置は主に 1) 熱風発生器，2) 定量ポンプと蒸発チャンバー，3) 灰フィーダー，4) バグハウス，5) 誘引通風機の 5 つの部分から構成されている。熱風発生器の温度をバグハウス内の温度が 150～160℃となるように制御した。このバグハウスの温度は、実際の廃棄物焼却施設のバグハウスの温度と同じである。約 200℃に設定した蒸発チャンバーに、定量ポンプ（VSP-2050，EYELA）を用いて流量 1.3L/h の蒸留水を噴霧した。これは、実際の排ガス中に水分が含まれており、それを模擬するために蒸留水を噴霧した。FA を 1.5g/min の速度で灰フィーダーから装置に投入した。リン酸化合物については、リン酸を噴霧した系では上記の噴霧水に所定量のリン酸を混ぜ、リン酸水溶液として蒸発チャンバーに噴霧した。第一リン酸カルシウムでは、あらかじめ FA と混合し、混合物を灰フィーダーから投入した。バグハウスには PTFE 製のろ布（直径：130mm，長さ：1000mm）を 1 本設置し、集塵を行った。煙道に投入したものをまとめてダストと定義し、ろ布上に捕集されたものを“捕集灰”，捕集されずにダストトレイに落ちたものを“非捕集灰”とした。誘引通風機は、図 5-1 中の測定点 V で測定されるガス流速が約 7.2m/sec（ガス流量 $Q=15\text{m}^3\text{N/h}$ ）となるように調整した。図 5-1 に示したように、圧力（P1，P2），温度（T1～T3），ガス流速（V），バグフィルター差圧（ ΔP ）を 1 分間隔でデータロガーに記録した。温度，ガス流速（ガス流量），ガス中のダスト濃度は、

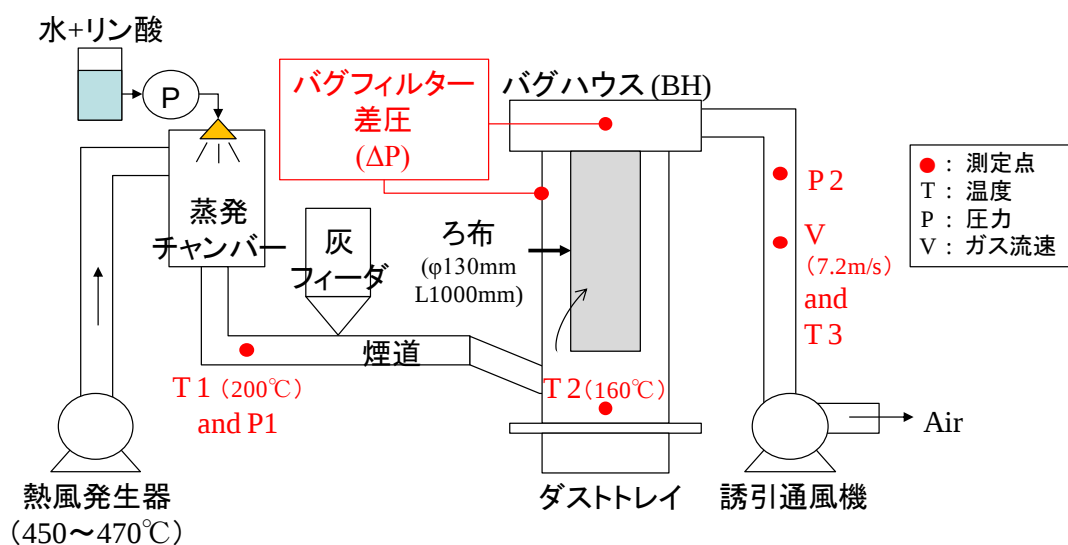


図 5-1 実験装置と測定項目，測定点

実際の焼却施設における排ガス処理条件を参照した。

5.2.2 実験条件と手順

表 5-1 に実験条件を示す。主なパラメーターは、リン酸化合物の形態、投入する飛灰に対するリン割合、そして消石灰の有無である。投入する飛灰に対するリン割合は 0 (blank) ～18wt%とした。

表 5-1 に示したように、4 種類の実験（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ）を行った。実験Ⅰでは、リン酸化合物形態の違いによる ΔP の挙動について調べた。再現性を調べるために、それぞれの実験を 3 回ずつ行った。実験Ⅱでは、投入する飛灰に対するリン割合を変え、リンによる ΔP 低下に対する依存性を調べた。実験Ⅲでは、飛灰中の消石灰の有無が ΔP 低減効果に影響するのかを調べた。実験Ⅰ～実験Ⅲでは捕集灰層が薄く、分析用の捕集

表 5-1 実験条件

Experiment	ID	飛灰に対する リン割合 (wt%-P)	飛灰 投入時間 (hr)	投入物の内訳 (g)					合計
				FA1	FA2	FA3	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	H ₃ PO ₄	
Ⅰ	B-1	0	6.3	300			-	-	300
	B-2	0	5.7	300			-	-	300
	B-3	0	6.8	300			-	-	300
	S3-1	3	7.5	300			34 (9.0)	-	334
	S3-2	3	6.0	300			34 (9.0)	-	334
	S3-3	3	5.4	300			34 (9.0)	-	334
	L3-1	3	5.7	300			-	24 (7.6)	324
	L3-2	3	5.5	300			-	24 (7.6)	324
Ⅱ	B-4	0	4.8		445		-	-	445
	B-5	0	5.0		414		-	-	414
	S1	1	4.0		397		17 (4.5)	-	414
	S4	4	6.1		364		50 (13)	-	414
	S18	18	2.7		246		168 (45)	-	414
	L1	1	3.9		410		-	12 (3.8)	422
	L3-3	3	4.3		414		-	37 (11)	451
	L3-4	3	4.7		414		-	39 (12)	453
	L10	10	3.0		259		-	43 (13)	302
Ⅲ	N-1	0	5.9			300	-	0	300
	N-2	0	4.5			300	-	0	300
	N-3	0	5.2			300	-	0	300
	N1-1	1	4.2			300	-	3.4 (1.1)	303
	N1-2	1	4.6			300	-	3.7 (1.2)	304
	N1.5-1	1.5	4.4			247	-	9.0 (2.9)	256
	N1.5-2	1.5	5.9			300	-	14 (4.5)	314
	N1.5-3	1.5	4.3			300	-	8.8 (2.8)	309
	N3-1	3	4.9			300	-	20 (6.4)	320
	N3-2	3	4.6			300	-	19 (5.9)	319
	N3-3	3	4.8			300	-	19 (6.2)	319
Ⅳ	B-A	0	10.4	510			-	-	510
	L3-A	3	11.6	510			-	*	*

ー: 添加なし

*: 集塵灰層断片分析のためデータなし

() : リンとしての量

灰層断片の採取ができなかったため、捕集灰層断片を採取するために実験Ⅳを行った。

リン酸化合物、飛灰に対するリン割合、実験の繰り返し回数を用いてそれぞれの Run に ID を付けた。B, S, L はそれぞれ、添加なし (Blank), 第一リン酸カルシウム, リン酸を示す。消石灰吹き込みなしの Run では添加物はリン酸のみであったので, N とした。S, L, N の後ろに続く数字は、飛灰に対するリン割合を示す。ただし, Blank は添加なしなので、数字なしである。そして、最後の数字は実験の繰り返し回数を表す。

以下に実験の手順を示す。

(1) 装置立ち上げ前の確認

前の実験の影響を排除するために、ろ布とダストトレイをきれいな（余分なダストがない）状態にした。

(2) 実験装置の立ち上げ

熱風発生器から熱風を送り、各装置全体の昇温を開始した。初めは 360℃に設定し、各部が温まったことを確認した後に 450～470℃に変更した。実験装置を昇温させている間に、飛灰（第一リン酸カルシウムのときは混合物）をあらかじめポリ容器に 30g ずつ入れた。実験 Run ごとに用意した本数は異なっていた。

T2 が 150℃程度、T3 が 80℃程度になったのを確認した後に、水噴霧を開始した。このとき、データロガーによる記録も開始した。

(3) 飛灰とリン酸化合物投入による実験開始

ポリ容器から灰フィーダーに飛灰（第一リン酸カルシウムのときは混合物）を投入し、実験を開始した。リン酸噴霧の際には、飛灰投入とほぼ同時に噴霧用の水からリン酸水溶液に切り替え、装置内にリン酸水溶液を噴霧した。

(4) 飛灰とリン酸化合物の投入終了

用意した飛灰（第一リン酸カルシウムのときは混合物）を全て投入し終わった時点を実験終了とした。リン酸噴霧の場合には、噴霧用のリン酸水溶液がまだ残っている段階でも、リン酸水溶液を水へ切り替え、それ以上リン酸水溶液を噴霧しなかった。

(5) 装置の冷却

熱風発生器から送る熱風の温度を 160℃とした。水を噴霧したままでは、装置内が余計に冷やされ、集塵灰の固結や装置内に結露が発生する。これを防ぐために、各部の温度を確認しながら、適宜水噴霧を止めた。

T2 の表示温度が十分下がったのを確認し、熱風を停止した。

(6) ダストの回収

ダストトレイを開け、非捕集灰 (M_n) の回収と計量を行った。計量後、一部サンプリングし、ポリ瓶に保存した。

ダストトレイを戻し、BH 横の点検窓を開け、捕集灰をろ布から直接サンプリングし、ポリ瓶に保存した。その後点検窓を閉めた。

パルス圧 0.43MPa のパルスで捕集灰の払い落としを行った。目視で払い落としがなくなるのを確認するまで行った。このとき蒸発チャンバーを開け、掃除機を使って逆流してきた払い落された捕集灰を吸い込んだ。これは、捕集灰が逆流し熱風発生器に入り込み、熱風発生器が故障するのを防ぐためである。

再びダストトレイを開け、捕集灰の回収と計量を行った。計量後、一部サンプリングし、ポリ瓶に入れ保存した。

ダストトレイ内を掃除機できれいにしたのち、戻し、次の実験を行った。

5.2.3 分析項目

(1) ダスト中のリン含有量測定

リン酸化合物による ΔP 低下とダスト中のリン濃度関係、リン収支、リンによるダストの物性変化を調べるために、ダスト中のリン量を分析した。以下にダスト中のリン分析方法を示す。

ダスト 0.1g に、69%硝酸（試薬特級，和光純薬）3mL と塩酸（試薬特級，和光純薬）9mL を加え、マイクロウェーブで分解した。分解液を 0.45 μ m のメンブレンを用いてろ過した。ろ液全量を 100mL のメスフラスコに移し、ヒ素による妨害を防ぐために、1M 硫酸 4mL と 7.65g/L のチオ硫酸ナトリウム 2mL を加えた。それから標線まで蒸留水を加え、よく振り混ぜて 10 分以上静置し、最後にポリ容器に移した。これを分析用試料とした。

分析用試料を適宜希釈し、885nm の波長で分光光度計（U-1800，日立製作所）を用いモリブデン青法により測定した。検量線の濃度範囲は、0, 0.3, 0.5, 1.0, 3.0mg/L とした。

(2) 捕集灰中のリンとカルシウムの化合物（Ca-P 化合物）分析

Ca-P 化合物は、リン酸水溶液噴霧による反応生成物を知るため、XRD (RINT-2000/PC, リガク) を用いて測定した。純物質の第一リン酸カルシウム，第二リン酸カルシウム，第三リン酸カルシウム，消石灰のピークパターンを用い、ピーク解析ソフト (MATCH!3, CRYSTAL IMPACT) による測定結果のピーク解析を行った。また、ピークの強度比較をするために、内部標準物質として酸化ニッケル (NiO) を重量比 20% で試料に添加した。どの試料，メノウ乳鉢を用い粉碎したのちに分析した。

(3) 捕集灰の物性分析

捕集灰粒子の物性におけるリン酸化合物の効果を調べるために、1)一定体積(=3mm³)中の粒子数、2)平均粒径、3)円形度を分析項目とした。単位体積当たりの粒子数の減少は、捕集灰粒子の大粒径化を示すと考えられる。円形度は、 $4 \times \pi \times \text{粒子の面積} / \text{周囲長}^2$ で算出され、凝集度の一つの指標として測定した。凝集度が1であれば、粒子が完全な円形であることを示す。そして、凝集度が1から小さくなればなるほど、粒子が円形でなくなり、インターロッキング効果により粒子同士が容易に凝集しやすくなったと考えられる。これら3つの項目は、乾式粒子画像測定装置(Morphologi G3, Malvern)を用いて測定を行った。

リン酸化合物添加による捕集灰層表面性状の変化を観察するために、捕集灰層から断片を採取し、3Dレーザ顕微鏡(VK-X100K, キーエンス)を用いて、断片表面の3D画像の撮影と表面粗さ(JIS B 0601:2013(J))を測定した。表面粗さは式(5-1)より求めた。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (5-1)$$

ここで、Ra:断片表面の粗さ(μm)、L:測定幅(μm)、Z(x):基準面からの高さ関数である。Raの値が大きくなるほど、捕集灰層表面に凹凸が多いことを意味し、ガスの通気性に影響を与えていると考えられる。分析した捕集灰層断片の大きさは、約100mm²とした。

5.3 結果と考察

5.3.1 リン酸化合物の形態の違いによる影響

表5-2に各Runにおける得られたデータ結果を示す。(a)のガス流速は、図5-1中Vで測定した値である。飛灰投入開始から投入終了までの値から平均値±標準偏差で求めたものである。どのRunにおいても、ほぼ一定に制御されていることから、ΔPの上昇は集塵過程によるものと判断できる。表5-2(b)のバグフィルター差圧で、ΔP_sとΔP_eはそれぞれ、飛灰投入開始時と投入終了時の値である。またこれらの差から、ダストの捕集過程におけるΔPの上昇量を求めた。ダストバランスとダスト中のリン濃度、ηについては後述する。

表 5-2 各 Run で得られたデータ

Experiment	ID	(a) ガス流速	(b) バグフィルター差圧			(c) ダストバランス				(d) ダスト中のリン濃度	
		V	ΔP_s	ΔP_e	$\Delta P_e - \Delta P_s$	供給量	非捕集灰	ダクト	捕集灰	非捕集灰	捕集灰
		(m/s)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	M_s (g)	M_n (g)	M_d (g)	M_a^* (g)	(wt%-P)	(wt%-P)
I	B-1	7.23±0.26	0.08	0.60	0.52	300	178	-	122	< 0.01	< 0.01
	B-2	7.23±0.21	0.07	0.64	0.58	300	150	-	150	< 0.01	< 0.01
	B-3	7.24±0.25	0.09	0.74	0.65	300	198	-	102	< 0.01	< 0.01
	S3-1	7.16±0.24	0.12	0.57	0.46	334	178	-	156	3.55	1.38
	S3-2	7.18±0.22	0.08	0.73	0.65	334	191	-	143	3.18	1.26
	S3-3	7.23±0.26	0.08	0.63	0.56	334	195	-	139	3.67	1.28
	L3-1	7.16±0.23	0.10	0.42	0.32	324	165	-	159	0.73	2.19
	L3-2	7.15±0.25	0.08	0.47	0.38	324	149	-	175	0.80	2.42
II	B-4	7.19±0.31	0.11	0.97	0.86	445	137	-	308	0.48	0.49
	B-5	7.08±0.27	0.12	1.21	1.09	414	129	-	285	0.58	0.60
	S1	7.24±0.26	0.11	0.92	0.82	414	139	-	275	2.46	0.62
	S4	7.24±0.34	0.12	0.93	0.82	414	154	-	260	6.06	1.00
	S18	-	0.12	0.54	0.43	414	225	-	189	14.88	2.37
	L1	7.25±0.30	0.12	0.64	0.52	422	164	-	258	0.50	0.94
	L3-3	7.23±0.34	0.10	0.47	0.37	451	203	-	248	0.77	2.54
	L3-4	7.25±0.32	0.12	0.56	0.44	453	155	13	298	0.92	2.34
	L10	7.19±0.26	0.11	0.21	0.10	302	157	19	145	2.42	5.33
	N-1	7.24±0.22	0.06	0.24	0.18	300	184	-	116	-	0.00
III	N-2	7.26±0.18	0.05	0.19	0.13	300	192	-	108	-	0.00
	N-3	7.21±0.21	0.07	0.29	0.22	300	182	-	118	-	0.00
	N1-1	7.15±0.23	0.07	0.14	0.07	303	216	-	87	-	1.80
	N1-2	7.17±0.22	0.06	0.15	0.09	304	223	-	81	-	1.69
	N1.5-1	7.30±0.26	0.12	0.18	0.06	256	189	-	67	-	2.83
	N1.5-2	7.21±0.23	0.04	0.08	0.04	314	230	-	84	-	4.50
	N1.5-3	7.22±0.23	0.07	0.14	0.07	309	204	-	105	-	2.16
	N3-1	7.25±0.21	0.06	0.12	0.05	320	210	-	110	-	3.02
	N3-2	7.26±0.23	0.06	0.11	0.05	319	216	-	103	-	3.20
	N3-3	7.19±0.23	0.06	0.14	0.08	319	212	-	107	-	3.25
IV	B-A	7.26±0.22	0.06	1.11	1.05	510	-	-	-	-	< 0.01
	L3-A	7.11±0.23	0.07	0.72	0.65	510	-	-	-	-	1.34

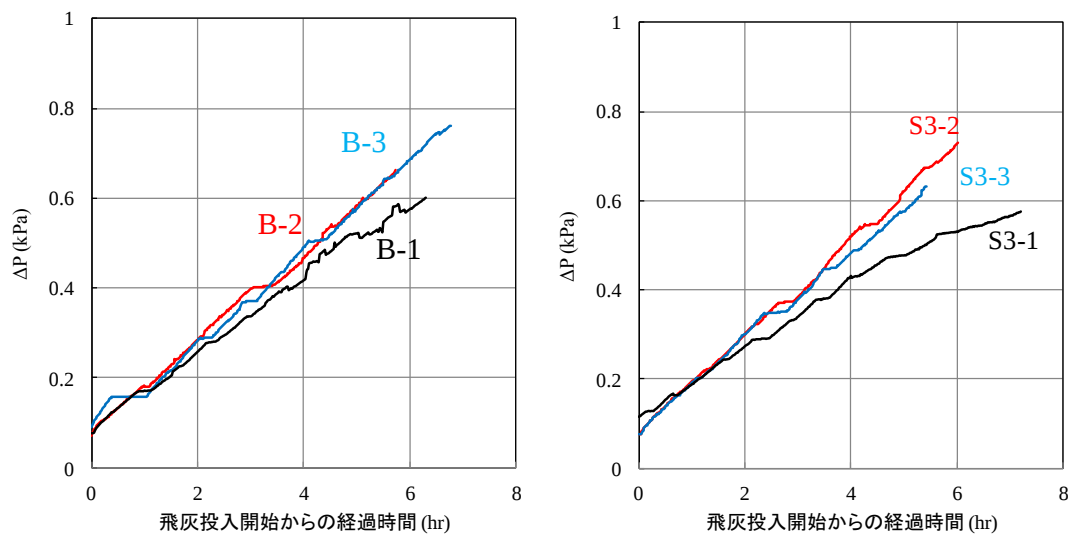
-: no data

*: $M_s - M_n$ (式(5-3))より算出

図 5-2 (a) に blank, 図 5-2 (b) に第一リン酸カルシウム添加, 図 5-2 (c) にリン酸水溶液噴霧 (飛灰に対するリン割合 3%) における飛灰投入開始からの ΔP の経時変化を示す。

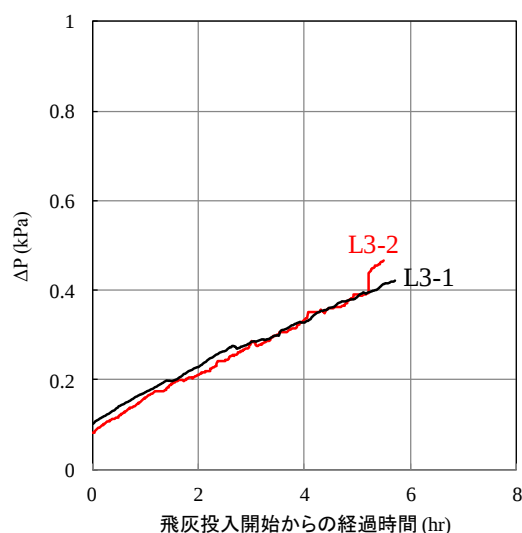
それぞれの条件で 2 回または 3 回実験を繰り返し行った。 ΔP_e の値は, blank で 0.45 ~ 0.75kPa, 第一リン酸カルシウム添加で 0.39 ~ 0.54kPa, リン酸水溶液噴霧で 0.27 ~ 0.39kPa であった。それぞれの Run でばらつきがみられたものの, ダストの捕集操作による ΔP の上昇はリン酸水溶液噴霧が最も低かった。blank と比べて, リン酸水溶液噴霧では ΔP_e が下がったにもかかわらず, 第一リン酸カルシウム添加ではリン割合が同じ 3% であっても ΔP_e が下がる効果はみられなかった。しかし, それぞれの Run でダストの捕集灰量が異なっていたことが考えられた。そこで捕集灰量と ΔP の関係を比較するために, まず式 (5-2) を用いて捕集灰量を推定した。

$$M_a = M_s - M_n - M_d \quad (5-2)$$



(a) blank

(b) 第一リン酸カルシウム



(c) リン酸水溶液

図 5-2 飛灰供給開始からの ΔP の経時変化

ここで、 M_a : 捕集灰量 (g), M_s : 供給量としての飛灰と添加物の合計 (g), M_n : 非捕集灰量 (g), M_d : 煙道 (ダクト) における損失 (g) である。

M_d がどのくらいあるのかを調べるために、L3-2 と L10 の実験終了後に煙道を外し、煙道にたまったダストを回収計量した。表 5-2 (c) に示したように、 M_d はほとんどなく、供給量の 3.8% 程度であったため、無視できるものと判断した。そこで、捕集灰量 M_a を式 (5-3) で求めた。計算結果を表 5-2 (c) に示した。

$$M_a = M_s - M_n \quad (5-3)$$

それぞれの Run で捕集灰量が異なるため、リン酸化合物による ΔP 低減効果について

は、単純に ΔP_e の比較では判断できない。そこで、捕集灰量あたりの ΔP 上昇量 η を式 (5-4) から求め、比較した。

$$\eta = \frac{\Delta P_e - \Delta P_s}{M_a} \times 10^3 \quad (5-4)$$

ここで、 η ：捕集灰量あたりの ΔP 上昇量 (kPa/kg) である。計算結果を表 5-2 に示す。 η で比較しても、Run ごとにばらつきはみられるが、リン酸水溶液噴霧条件が最も低かった。第一リン酸カルシウム添加条件では、blank とほぼ同じ値であり、 ΔP 効果は見られなかった。

5.3.2 捕集灰と非捕集灰におけるリンの分配

ΔP 低減効果がリン酸化合物形態によって異なる結果であった。しかし、この結果の違いは、加えたリンの挙動が Run によって異なっていたためと考えられる。そこで捕集灰と非捕集灰に含まれるリン濃度を調べ、リン収支をとることで、リンと ΔP 低減効果についての関係を分析した。表 5-2 (d) に捕集灰と非捕集灰中のリン濃度を示す。

Run S3 と Run L3 のどちらも、飛灰に対するリンの割合が重量で 3% となるようにリン酸化合物を添加した。ダスト中のリン濃度はこれよりも低くなることは明らかであるが、捕集灰中のリン濃度が S3 では 1.26~1.38wt%，L3 では 2.19~2.42wt% ととても低い値となった。しかし、両者を比べると、およそ 2 倍の違いがあった。捕集灰中のリンが ΔP 低減効果に寄与していると考え、リン酸水溶液噴霧条件と第一リン酸カルシウム添加条件で効果に違いがみられたことが説明可能となる。

図 5-3 に S3 と L3 におけるリンバランスを示す。リンとしての供給量は表 5-1 に示した通りである、捕集灰と非捕集灰中のリン量は、表 5-2 (c) と (d) の値から計算した。

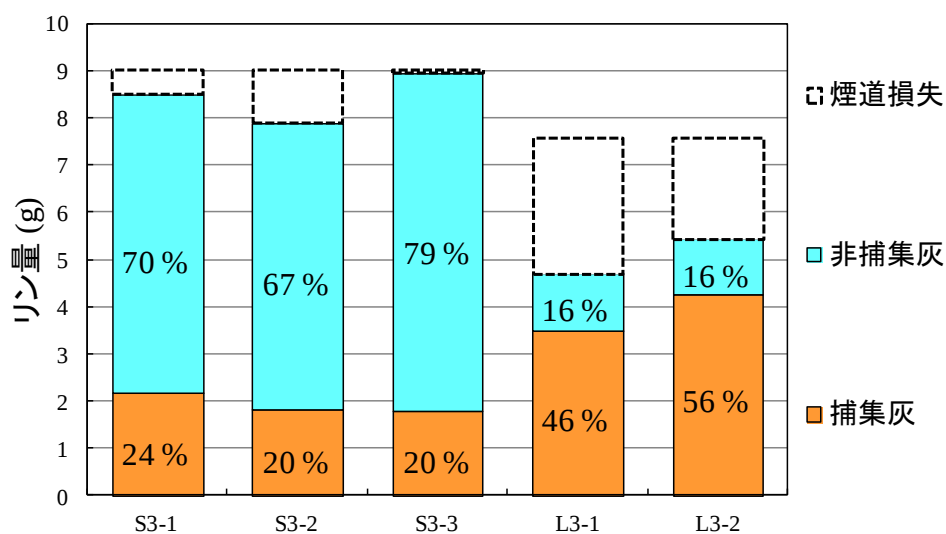


図 5-3 リンバランス

投入量に対する捕集灰としてろ布上に保持されたリンの割合は、S3 で 20～24%，L3 で 46～56%であった。リン酸水溶液噴霧条件では、投入量の半分程度がろ布上に保持されていたが、第一リン酸カルシウム添加条件ではリン酸の半分しか保持されていなかったことがわかった。一方、非捕集灰として排出されたリンは、リン酸水溶液噴霧条件では 16%であったのに対し、第一リン酸カルシウム添加条件では 67～79%であった。したがって、図 5-2 (b) で第一リン酸カルシウム添加条件が ΔP 効果を示さなかったのは、捕集灰としてろ布にリンが保持されず、非捕集灰として大部分が排出されたためと考えられる。

このような結果から、第一リン酸カルシウムの捕集灰としての保持量を増やすために、その粒径を小さくするなどの工夫が必要と考える。L3 では、捕集灰としてリンの保持量が多く ΔP 低減効果があったが、同時に煙道損失も顕著に多かった。したがって、より効率的にリン酸を用いて ΔP 低減効果を発揮させるために、噴霧位置をよりろ布に近づけるなどの工夫が重要である。

5.3.3 捕集灰中リン濃度の依存性

前述のように、捕集灰中のリン濃度が ΔP 低減効果に影響を与える重要な要因である。そこで表 5-1 II に示したように、飛灰に対するリン割合を変えて実験を行い、リン条件（リン酸化合物形態、リン割合）による ΔP 低減効果をしらべた。 ΔP 低減効果を捕集灰中のリン濃度と η から評価した。結果を図 5-4 に示す。

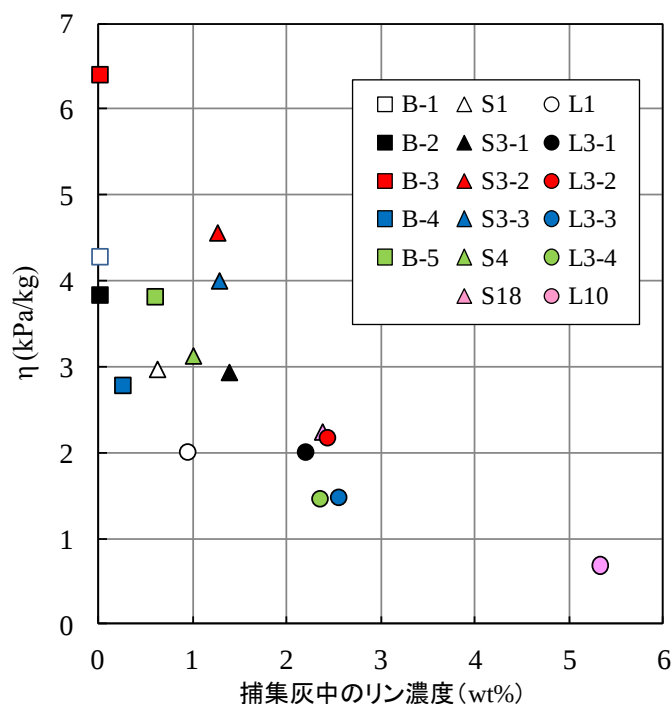


図 5-4 捕集灰中のリン濃度と捕集灰量当たりの ΔP 上昇量 η の関係

η の値はリン化合物形態によらず、捕集灰中のリン濃度が高くなれば高くなるほど小さくなる傾向を示した。 η の平均値は、捕集灰中のリン濃度が 0~2wt% で $3.7 \pm 1.1 \text{ kPa/kg}$, 2~5wt% で $1.9 \pm 0.4 \text{ kPa/kg}$, 5.3wt% で 0.7 kPa/kg であった。ここで、ろ布上の集塵灰が均一な層を形成していると仮定すると、式 (5-5) を用いることでダルシー式は式 (5-6) のように変形可能である。

$$M_a = \rho \times \Delta x \times A \quad (5-5)$$

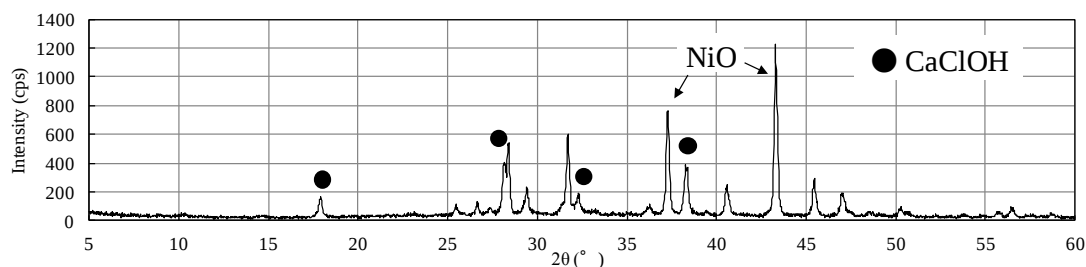
$$\begin{aligned} v &= k \times \frac{\Delta P}{\Delta x} = k \times \rho \times A \times \frac{(\Delta P_e - \Delta P_s)}{M_a} \\ &= k \times \rho \times A \times \eta \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (5-6)$$

ここで、 v : ろ過速度 (m/s), k : 透気係数 ($\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{sec})$), Δx : 捕集灰層の厚さ (mm), ρ : 捕集灰の密度 (kg/m^3), A : ろ過面積 (m^2) である。

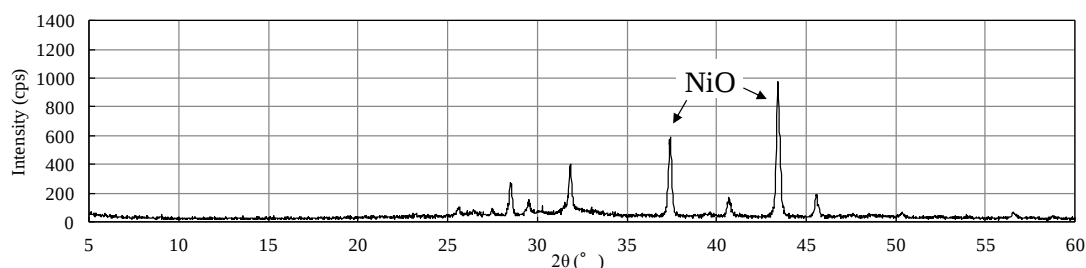
表 5-2 に示したように、ガス流速 V がほぼ一定であった。このため、ろ過速度 v もほぼ一定であるといえる。使用しているろ布が同じものであるので、 A は不変である。 ρ もほとんど変わらず一定とみなすと、 η の値は透気係数 k の逆数に比例する ($\eta \propto 1/k$)。したがって、 η の値は捕集灰層による通気性の抵抗値とみなすことが可能となる。この結果から、捕集灰中のリン濃度が 0~2wt% の η の値と比較すると、2~5wt% では 2 倍、5.3wt% では 5 倍通気性が向上したことがわかった。

5.3.4 捕集灰の物理的・化学的特性変化

図 5-5 に B-4 と L10 に採取した捕集灰の XRD 回折パターンを示す。



(a) B-4



(b) L10

図 5-5 採取試料の XRD 回折パターン

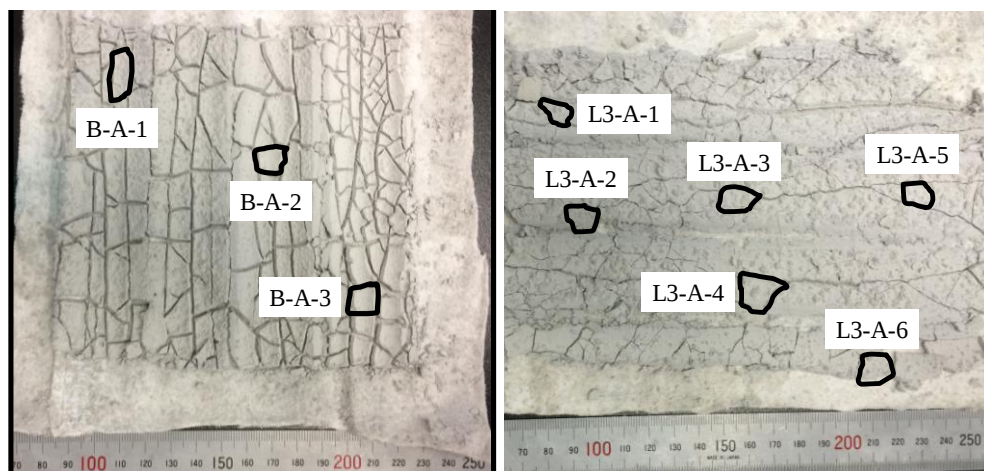
NiO と比較したときの CaClOH の相対強度 ($I_{\text{CaClOH at } 2\theta=17.9^\circ}/I_{\text{NiO at } 2\theta=43.3^\circ}$) は, B-4 で 0.136, L10 で 0.038 であった。この結果は, リン酸が飛灰中の CaClOH などのカルシウム化合物と反応したことを示す。しかし, L10 の試料から Ca-P 化合物のピークを同定することはできなかった。Ca-P 化合物を検出できなかった理由には二つの可能性がある。一つは, 捕集灰中で Ca-P 化合物の濃度が低すぎていたため, 検出できなかったというものである。表 5-2 にも示したように, 捕集灰中のリン濃度は 5.6wt% であり, これは形態を無視した全リンの濃度である。反応生成物が 1 種類であれば検出できたかもしれないが, 数種類であれば捕集灰中での存在割合も十分低いと考えられる。もう一方は, 捕集灰中で Ca-P 化合物がアモルファス (非晶質) の形態で存在していたことである。XRD は結晶質を検出するものなので, もしアモルファスであれば検出不可能である。

表 5-3 に異なるリン濃度の捕集灰の物性を示す。blank の B-5 と比較して, リン酸水溶液噴霧条件では単位体積当たりの粒子数が減少した。また, 平均粒径も B-5 では $9.4\mu\text{m}$ であったものが, リン酸水溶液を噴霧した試料ではおよそ $13\mu\text{m}$ と大きくなったことがわかった。一方で, 平均円形度はリン酸水溶液噴霧によってわずかに小さい値となった。これらの結果から, リン酸水溶液噴霧により, ダスト粒子が大きくなり, 粒子同士も凝集しやすくなったといえる。

図 5-6 (a) と図 5-6 (b) にろ布上から採取した捕集灰断片の採取個所と試料 ID を示す。blank として B-A では 3 つの断片, L3-A では 6 つの断片を採取し, 3D レーザー顕微鏡でそれぞれ分析を行った。

表 5-3 捕集灰の物性

ID	捕集灰中の リン濃度 (wt%-P)	単位体積当たりの 粒子数 $\times 10^4 (\text{No./mm}^3)$	平均粒径 (μm)	平均円形度 (-)
B-5	0.25	8.14	9.44	0.871
L1	0.94	7.09	12.65	0.847
L3-3	2.54	6.43	12.53	0.835
L3-4	2.34	5.92	12.93	0.841
L10	5.33	6.94	12.2	0.838



(a) B-A

(b) L3-A

図 5-6 ろ布上における捕集灰断片の採取個所と試料 ID

図 5-7 (a) ~ (c) に B-A の, (d) ~ (i) に L3-A の 3D 画像を示す。この画像において、赤い部分は基準面から高い位置であり、青い部分は低い位置である。B-A で、湾曲した断片 (B-A-1, B-A-2) が得られた。この湾曲はリテーナー (ろ布を固定するワイヤー) により捕集灰層が曲げられたためにできたと考えられる。この湾曲によって、断片の端が極端に高い位置として検出された。Ra を求める上で極端に高い部分による影響を避けるために、B-A-1 と B-A-2 では中心部分を分析範囲とした。それ以外の断片では、湾曲は確認されなかったため、ほとんど全面を分析範囲とした。

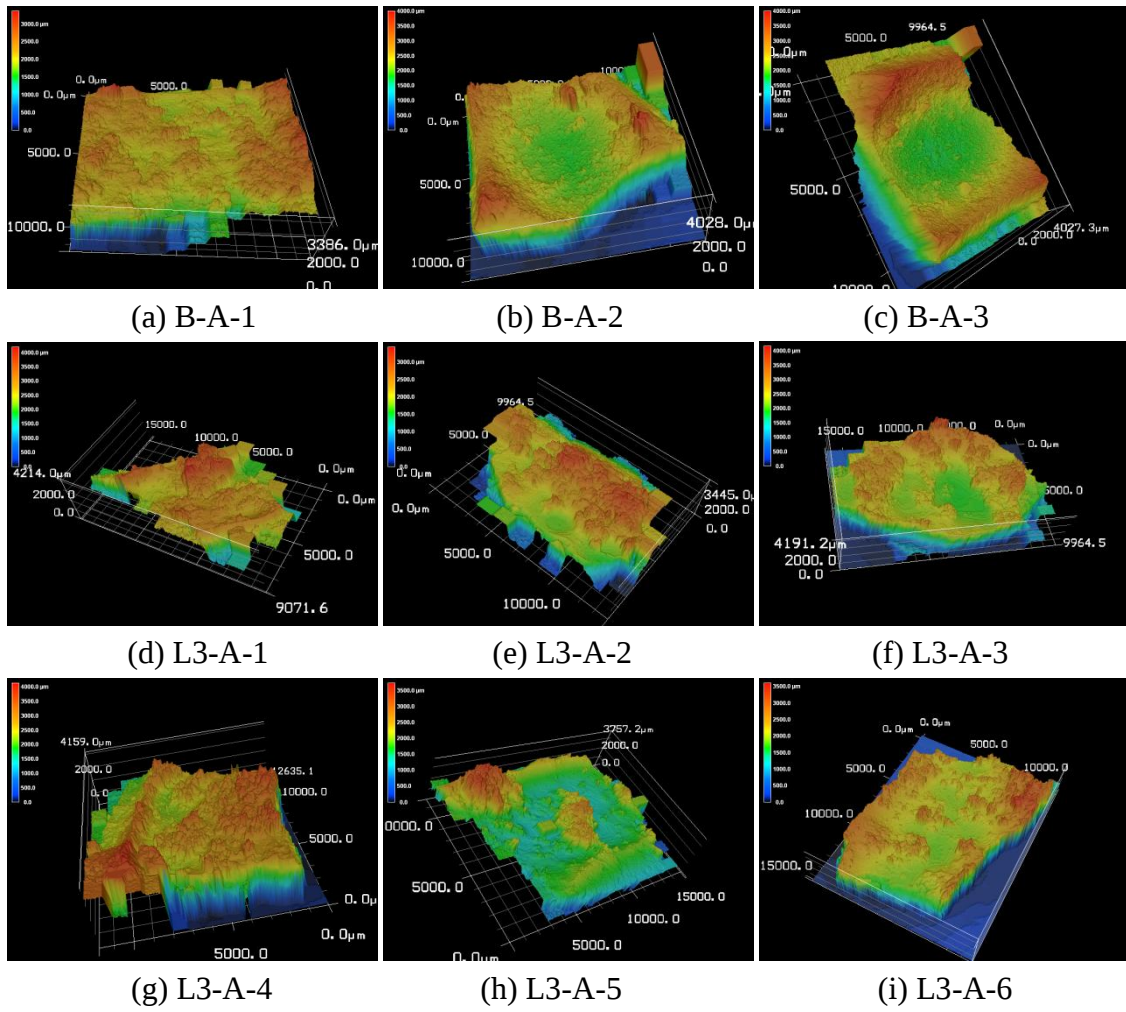


図 5-7 捕集灰断片の 3D 画像

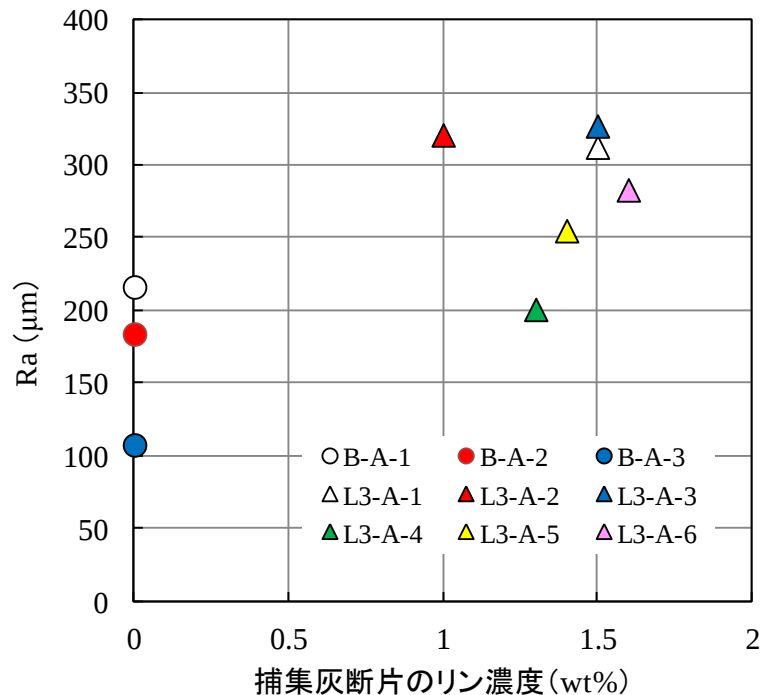


図 5-8 集塵灰断片のリン濃度と表面粗さの関係

図 5-8 に捕集灰断片のリン濃度と表面粗さの関係を示す。捕集灰断片のリン濃度は、表面分析を行った後、それぞれの断片を全量分解し測定した。B-A と L3-A の表面粗さはそれぞれ、100～220μm、200～320μm であった。B-A の断片と比べて、L3-A の断片の方がより凹凸が多いことがわかった。表 5-3 に示したように、リン酸水溶液噴霧によって大粒径化したダストが、捕集灰層表面の性状も変えたと考えられる。表 5-2 に示したように、ダスト収支をとっていないが、B-A と L3-A では ΔP_e は L3-A の方が低かった。したがって、リン酸によって捕集灰層全体だけではなく、捕集灰層表面もガスの通気性が良くなったことが ΔP 低下の要因であると

5.3.5 飛灰中の消石灰の影響

表 5-2 に示したように、消石灰吹き込みなしの飛灰を用いた Run では、消石灰吹き込みありの飛灰を用いた Run よりも ΔP_e が全体的に低かった。捕集灰量は blank では消石灰吹き込みありと同程度であった。一方、リン酸水溶液噴霧条件では同程度かそれよりも少ない量であった。吹き込まれた消石灰の粒子が小さいため、消石灰吹き込みありの飛灰はその影響を受け全体的に小さく、消石灰吹き込みなしの飛灰は消石灰がないために比較的大きな粒子であったと考えられる。これにより、飛灰が噴霧したリン酸水溶液と反応しより大きなダスト粒子となったために、ダストが気流によって持ち上げられず、非捕集灰として排出された量が多くなったと考えられる。

リン酸水溶液噴霧による ΔP 低減効果を調べるために、消石灰吹き込みありの Run と

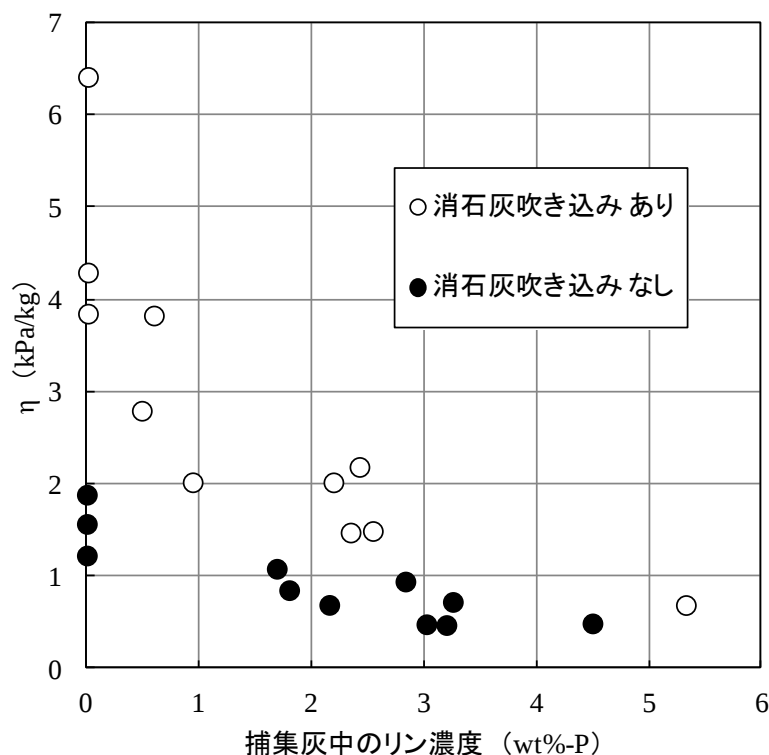


図 5-9 消石灰吹き込みの有無による η の比較

同様に捕集灰量当たりの ΔP 上昇量 η を調べた。結果を図 5-9 に示す。

白抜きが消石灰吹き込みあり，塗りつぶしが消石灰吹き込みなしのプロットである。消石灰吹き込みなしでは，blank でも η が低い値であったが，リン酸水溶液を噴霧するとさらに低下した。さらに，捕集灰中のリン濃度が増加するほど η が小さくなった。加えて，集塵灰中のリン濃度が 3wt%以上になると， η がほとんど変わらなかった。以上の結果より，飛灰中に消石灰がなくとも，リン酸水溶液噴霧による ΔP 低減効果があることがわかった。前述のように，消石灰吹き込みなしの飛灰であっても，カルシウムが十分に含まれているため，消石灰吹き込みありの飛灰と同様の結果になったと考えられる。

両者を比較すると，リン酸水溶液噴霧なしの blank でも，消石灰吹き込みなしの方が η は小さかった。すなわち，捕集灰層の抵抗が小さく，ガスが通りやすかったといえる。これは，もともとの飛灰の粒度分布に差があったためと考えられ。一方で，消石灰吹き込みありで捕集灰中のリン濃度が 5.6wt%のときの η と，消石灰吹き込みなしでの捕集灰中のリン濃度が 3wt%以上のときの η がほとんど同じ値であった。このことから，捕集灰中のリン濃度が 3wt%以上になると， ΔP 低減効果は頭打ちになる可能性があることが示された。

これまでの結果から，リン酸噴霧による ΔP 低減メカニズムは，前述の仮説 H2 の捕集灰層の通気性の向上であることは示された。一方で，消石灰吹き込みなしの飛灰を用

いた実験より、リン酸噴霧による ΔP 低減メカニズムに関して新たな仮説が生じた。それは、リン酸噴霧によって捕集灰が減ることによって、ろ布に対する飛灰負荷が小さくなるというものである。これを仮説 H3 とする。今後は仮説 H1 と仮説 H3 の検証が必要になる。

5.4 結論

第一リン酸カルシウムとリン酸というリン酸化合物添加による ΔP 低減効果、リン酸水溶液噴霧の有無による捕集灰層の変化による ΔP 低減効果、そして消石灰の吹き込みの有無による ΔP 低減効果、これらについて調べるためにラボスケール試験を行った。

リン酸化合物の形態、消石灰の吹き込みの有無によらず、捕集灰中のリン濃度が増加すると捕集灰量あたりの ΔP 上昇量 (η) が減少することがわかった。特に、捕集灰中のリン濃度が 2wt%以下での η と比べて、捕集灰中のリン濃度が約 2wt%以上では η が半分になった。これは、リン酸化合物によって捕集灰層のガスの通気性が向上したことを示す。

捕集灰の XRD 分析より、リン酸が飛灰中の CaClOH のようなカルシウム化合物と反応することがわかった。またリン酸噴霧によってダスト粒子同士が凝集し、より大きな粒子を形成すること、それによって捕集灰層表面の性状も変わることがわかった。このような捕集灰の物理化学的特性の変化が、捕集灰層の通気性をより向上させ、その結果 ΔP 低減が生じたと考えられる。

一方、リンバランスから、リン酸では煙道損失が多く、第一リン酸カルシウムでは非捕集灰としての排出による損失が多いことがわかった。それぞれの物質を ΔP 低減のためにより効果的に用いる工夫が必要である。具体的には、リン酸の場合は噴霧位置をよりろ布に近づけ、第一リン酸カルシウムでは粒子を細かくしより多く捕集灰に含まれるようにするといった改善策が考えられる。

以上の結果から、これまでに ΔP 低減メカニズムについての仮説の一つである仮説 H2 が示された。一方で、消石灰吹き込みなしの飛灰を用いた実験より、新たな仮説（非捕集灰の増加すなわちろ布への捕集灰負荷の低下）も生じた。今後は、これまでの仮説 H1（払い落とし量の増加）と仮説 H3（非捕集灰の増加）についての検討が必要である。

参考文献

- 1) Mukaiyama, K., Hwang, I.-H., Takahashi, S., Matsuto, T., Matsuo, T., Tojo, Y., Estimation of phosphorus compound formed by spraying phosphoric acid to solid waste incinerator and its effect on pressure loss of bag filter. Proceedings of 2014 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management, 18th Korea-Japan Joint International Session, 2014.

本章に関連する発表

- 1) Shigetoshi Takahashi, In-Hee Hwang, Takayuki Matsuo, Toshihiko Matsuto, Masaaki Kurata, Norio Maeda: Effect of phosphate compound on the reduction of pressure drop at a lab-scale of fabric filter, 9th i-CIPEC, 2016.
- 2) 高橋滋敏, 黄仁姫, 松尾孝之, 松藤敏彦, 倉田昌明, 前田典生: リン酸化合物によるバグフィルター差圧低減に関する研究, 第2回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 2015.

第6章 ラボスケール装置での払い落とし量と非捕集灰量の評価及び付加効果

6.1 はじめに

これまでリン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減メカニズムについて、実機試験、ベンチスケール試験、ラボスケール試験を行ってきた。実機試験より、リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減メカニズムについて、仮説 H1（払い落とし量の増加による捕集灰層厚さの減少）と仮説 H2（捕集灰層の通気性の向上）の二つの仮説がたてられ、その検証を行ってきた。第4章のベンチスケール試験では仮説の検証ができなかったが、第5章のラボスケール試験でリン酸噴霧による捕集灰の物性と捕集灰層の性状の変化により、捕集灰層の通気性の向上（仮説 H2 の検証）が示された。しかし、実際の焼却施設のように、ダストの捕集と払い落としを連続的に行っていないため、払い落とし量の増加は検証できていない。さらに、消石灰吹き込みなしの飛灰を用いた実験より、新たな仮説 H3（非捕集灰の増加すなわちろ布への捕集灰負荷低下）が生じた。加えて、これまではリン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減に注目してきたが、それ以外の効果や影響については調べてこなかった。既往の研究¹⁾によると、ヒドロキシアパタイトのようなリン酸化合物には重金属の溶出抑制効果があると報告されている。実際の焼却施設からは、リン酸廃液噴霧時に排ガス中の塩化水素濃度が上昇するという報告があった。これは排ガス中の塩化水素を消石灰で中和処理し生成した塩化カルシウムが、リン酸と反応し塩化水素を遊離させた可能性が考えられる。

そこで本章では、仮説 H2 と仮説 H3 の検証を目的として、ダストの捕集と払い落としを連続して行う。さらに、これまで調査しなかったリン酸化合物によるバグフィルター差圧低下以外の効果について調べることを目的として、リン酸化合物添加による重金属（Pb と Cd）の溶出抑制効果とリン酸化合物と塩化物による塩化水素発生の有無調査を行う。

6.2 払い落とし実験

6.2.1 実験方法と実験条件

表 6-1 に実験条件を示す。主なパラメーターは、投入する飛灰に対するリン割合である。投入する飛灰に対するリン割合は 0 (blank), 1, 1.5, 3wt%とした。実験装置、使用した薬品は第5章で用いたものと同じであるので、装置の説明は省略する。使用した飛灰試料は第5章で用いた消石灰吹き込みありの飛灰である。

表 6-1 に示したように飛灰に対するリン割合、実験の繰り返し回数を用いてそれぞれの Run に ID を付けた。B, P はそれぞれ、添加なし (Blank) リン酸水溶液噴霧を示す。P の後ろに続く数字は、飛灰に対するリン割合を示す。ただし、Blank は添加なしなので、数字なしである。そして、最後の数字は実験の繰り返し回数を表す。

表 6-1 実験条件

	飛灰に対する リン割合 (wt%-P)	実験 時間 (h)	投入量(g)		
			飛灰	リン酸 (リン)口	合計
B-1	0	7.0	270.0	-	270
B-2	0	6.1	270.0	-	270
P1-1	1	6.4	270.0	5.2 (1.7)	275
P1-2	1	7.2	270.0	5.1 (1.6)	275
P1.5-1	1.5	5.2	270.0	10.9 (3.5)	281
P1.5-2	1.5	4.5	270.0	9.6 (3.0)	280
P3-1	3	5.6	270.0	23.9 (7.6)	294
P3-2	3	5.7	270.0	24.9 (7.9)	295

-: 添加なし

(): リン量

以下に実験の手順を示す。

(1) 装置立ち上げ前の確認

前の実験の影響を排除するために、ろ布とダストトレイをきれいな（余分なダストがない）状態にした。

(2) 実験装置の立ち上げ

熱風発生器から熱風を送り、各装置全体の昇温を開始した。初めは 360℃に設定し、各部が温まったことを確認した後に 450～470℃に変更した。装置全単を昇温させている間に、飛灰をあらかじめポリ容器に 30g ずつ入れた。実験 Run ごとに用意した本数は同じで 9 本とした。

T2 が 150℃程度、T3 が 80℃程度になったのを確認した後に、水噴霧を開始した。このとき、データロガーによる記録も開始した。

(3) 飛灰とリン酸化合物投入による実験開始

ポリ容器から灰フィーダーに飛灰を入れ、実験を開始した。リン酸噴霧の際には、飛灰投入とほぼ同時に噴霧用の水からリン酸水溶液に切り替え、装置内にリン酸水溶液を噴霧した。

ポリ容器 1 本分の飛灰を投入完了するたびに、T1～T3, V, ΔP を記録した。

(4) 飛灰投入とリン酸水溶液の噴霧停止

飛灰を 90g（ポリ容器 3 本分）投入完了後、飛灰の供給を一時停止した。リン酸水溶液の場合には、リン酸水溶液を噴霧用の水へ切り替えた。

(5) 非捕集灰の回収とパルスによる払い落とし

気流を止めずに実験を行っており、外気に侵入による温度低下を防ぐために、ダストトレイ上部を封じ、ダストトレイを外し、非捕集灰を回収計量した。一部サンプリングし、バイアル瓶に入れ保存した。

ダストトレイを戻し、パルス圧 0.3MPa 、パルス噴射時間 0.2sec の条件でパルスによる払い落としを行った。払い落とし前後のバグフィルター差圧の変化も記録した。

ΔP が下がり切った後に、再びダストトレイを外し払い落された捕集灰の回収と計量を行った。一部サンプリングし、バイアル瓶に入れ保存した。

(6) 操作の繰り返し

(3)～(5)を繰り返し、飛灰投入量が 270g になったら実験終了とした。

(7) 次の実験の準備

3 セット目の払い落とされた捕集灰の回収後、リン酸水溶液（または水）噴霧を止め、熱風発生器の温度を 160°C にし装置の冷却を開始した。

温度が下がったのを確認し、ガスを止め、目視で確認しながら 0.43MPa のパルスで捕集灰の払い落としがされなくなるまで払い落とした。このとき蒸発チャンバーを開け、掃除機を使って逆流した捕集灰を吸い込んだ。これは、逆流した集塵灰が熱風発生器に入り込み、故障するのを防ぐためである。

最後にダストトレイを外し、払い落された捕集灰を処分し、ダストトレイをきれいにし装置に戻し、次の実験に備えた。

6.2.2 分析項目

払い落とし実験では、リン酸水溶液噴霧によるバグフィルター差圧低減メカニズムに関する仮説 H1（払い落とし量の増加）と仮説 H3（非捕集灰の増加）の検証が目的である。

仮説 H1 を検証するために、パルスによる払い落としごとに払い落された捕集灰の回収計量を行った。

仮説 H3 を明らかにするために、非捕集灰の回収計量と払い落とし灰量の回収計量を行った。手順にも示したように、非捕集灰と払い落された捕集灰の計量はパルスによる払い落とし操作ごとに行った。

6.2.3 リン酸噴霧と払い落とし量の関係

表 6-2 に各 Run によって得られた結果を示す。パルスによる払い落としは 3 回行ったので、それぞれのパルスの回数ごとに投入量、ダスト量、ダスト中のリン濃度、バグフィルター差圧を区切った。投入量は、噴霧したリン量も加えて合計値とした。n 回目の払い落とし前の捕集灰量は、第 5 章と同様に、煙道での損失は無視できると判断し、以下の

ように求めた。

$$M_a^n = M_a^{n-1} - D^{n-1} + M_s^n - M_n^n \quad (6-1)$$

ここで、 M_a^n : n 回目の払い落とし前の捕集灰量 (g)、 M_a^{n-1} : n-1 回目の払い落とし前の捕集灰量 (g)、 D^{n-1} : n-1 回目の払い落としにより排出された捕集灰量 (g)、 M_s^n : n-1 回目から n 回目の払い落としまでの飛灰とリン酸の投入量合計値 (g)、 M_n^n : n-1 回目から n 回目の払い落としまでの非捕集灰量 (g) である。

バグフィルター差圧は、払い落とし操作の前後とその差である。図 6-1 に払い落とし操作ごとの払い落とし量の変化を示す。

表 6-2 各 Run から得られた実験結果

パルス	実験 時間 (h)	投入量(g)			ダスト量(g)			リン酸度(wt%-P)		バグフィルター差圧 (kPa)				
		飛灰	リン酸	(リン)	合計	非集塵灰	集塵灰	払い落し	非付着	払い落し	前	後	減少幅	
B-1	1	2.0	90	0	0	90	27	63	2	0.00	0.00	0.163	0.156	0.007
	2	2.8	90	0	0	90	27	124	6	0.00	0.00	0.269	0.239	0.030
	3	2.3	90	0	0	90	31	177	7	0.00	0.00	0.341	0.301	0.040
B-2	1	2.2	90	0	0	90	34	56	2	0.00	0.00	0.168	0.160	0.008
	2	1.9	90	0	0	90	35	109	12	0.00	0.00	0.254	0.237	0.017
	3	2.0	90	0	0	90	36	151	31	0.00	0.00	0.354	0.326	0.028
P1-1	1	1.5	90	1.2	0.4	91	39	52	4	0.41	0.32	0.170	0.161	0.009
	2	3.1	90	2.5	0.8	93	54	87	5	0.40	0.42	0.275	0.249	0.026
	3	1.8	90	1.5	0.5	91	31	142	20	0.46	0.38	0.381	0.340	0.041
P1-2	1	2.2	90	1.5	0.5	92	33	59	2	0.63	0.45	0.132	0.128	0.004
	2	3.1	90	2.2	0.7	92	41	108	15	0.41	0.40	0.178	0.170	0.008
	3	1.9	90	1.4	0.4	91	61	123	20	0.43	0.65	0.227	0.214	0.013
P1.5-1	1	1.3	90	2.8	0.9	93	33	60	25	0.60	0.49	0.146	0.143	0.003
	2	1.8	90	3.8	1.2	94	36	93	2	0.50	0.70	0.199	0.192	0.007
	3	2.0	90	4.3	1.4	94	59	126	5	0.47	1.07	0.259	0.242	0.017
P1.5-2	1	1.2	90	2.6	0.8	93	41	52	9	0.47	0.42	0.122	0.120	0.002
	2	1.7	90	3.6	1.1	94	59	77	3	0.46	0.55	0.160	0.157	0.003
	3	1.6	90	3.3	1.1	93	56	112	4	0.45	0.87	0.195	0.185	0.010
P3-1	1	1.6	90	6.7	2.1	97	38	59	2	0.56	0.67	0.101	0.1	0.001
	2	1.8	90	7.5	2.4	98	50	104	19	0.57	0.62	0.126	0.124	0.002
	3	2.3	90	9.8	3.1	100	45	140	9	0.71	1.20	0.144	0.14	0.004
P3-2	1	1.6	90	7.0	2.2	97	48	49	9	0.91	0.85	0.1	0.099	0.001
	2	1.9	90	8.2	2.6	98	56	82	8	0.77	0.84	0.119	0.118	0.001
	3	2.2	90	9.7	3.1	100	63	111	3	0.75	1.53	0.138	0.135	0.003

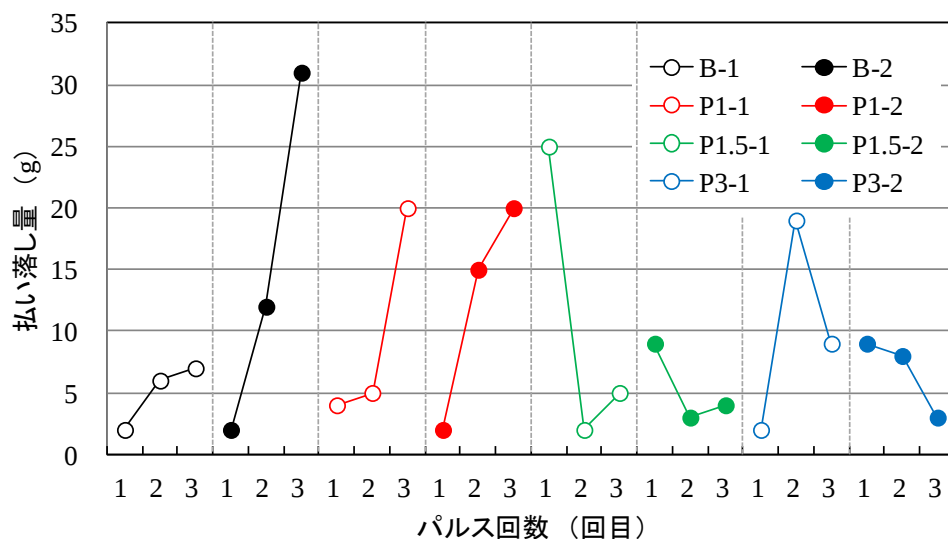


図 6-1 払い落とし操作ごとの払い落とし量の変化

払い落とし量はどの Run でも多くて 30g 程度であった。払い落とし量には、払い落としが進むにつれ、単調増加 (B-1, B-2, P1-1, P1-2)、減少から増加 (P1.5-1, P1.5-2)、増加から減少 (P3-1)、単調減少 (P3-2) の 4 つのパターンが見られた。しかし、払い落とし量は捕集灰量によって、その量が増減すると考えられる。そこで、払い落とし前の捕集灰量と払い落とし量の関係調べた。結果を図 6-2 に示す。白抜きが 1 回目、塗りつぶしが 2 回目の結果であり、四角が Blank、丸がリン酸水溶液噴霧の Run である。図 6-2 中の直線は、払い落とし前の捕集灰量＝払い落とし量の場合を示す。プロットがこの直線上に乗ったならば、捕集灰に全量が払い落されたことを意味する。

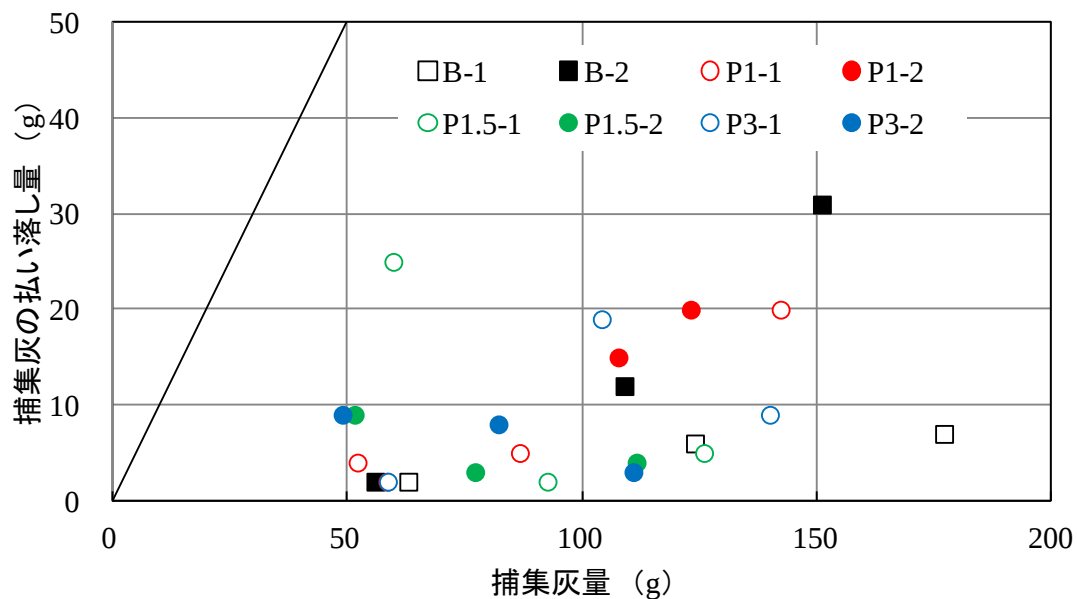


図 6-2 捕集灰量と捕集灰の払い落し量の関係

どの Run でもプロットは全て直線の下にあり，捕集灰量が単調に増加していることから，払い落とされたものは捕集灰の一部であることが分かった。払い落し量を比較すると，リン酸水溶液噴霧の Run と Blank ではほぼ同程度であった。

しかし，捕集灰量がプロットごとに異なり，単純に比較することが難しいと判断した。そこで，リン酸によって払い落し量が増加したのかを調べるために，払い落し操作ごとに捕集灰量に対する払い落し量の割合 δ を式 (6-2) より求めた。

$$\delta = \frac{D}{M_a} \times 100 \quad (6-2)$$

ここで， δ ：捕集灰量に対する払い落し量の割合（％）， M_a ：払い落とし前のほしゅう灰量（g）， D ：払い落し量（g）である。図 6-3 にリン酸水溶液の噴霧条件である飛灰に対するリン割合と払い落し操作ごとの δ の関係を示す。

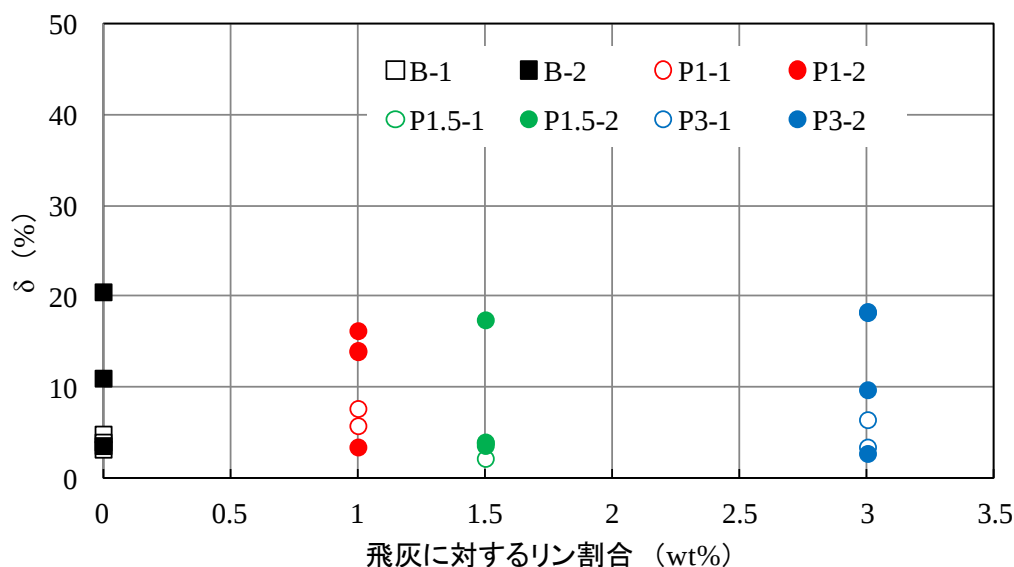


図 6-3 払い落とし操作ごとの δ の変化

払い落としごとに変動がみられるが、どの Run でも δ は 20%以下であった。リンの割合が増加しても δ の値が大きくなることはなかった。このことから、リン酸噴霧によって直接的に払い落とし量の増加にはならないことがわかった。つまり、リンを含む捕集灰が払い落されやすい性質をもつとはいえない。このことから、バグフィルター差圧低減は、捕集灰の払い落とし量増加によるものではないとわかった（仮説 H1 の否定）。

6.2.4 リン酸噴霧と非捕集塵灰量の関係

仮説 H3 を検証するために、リン酸水溶液噴霧による非捕集灰量の変化を調べた。図 6-4 に飛灰に対するリン割合と非捕集灰の合計量の関係を示す。非捕集灰の合計量は、Blank で 80～100g、リン 1wt%で 120～140g、リン 1.5wt%で 130～160g、リン 3wt%で 130～170g であった。リン酸水溶液噴霧時に非捕集灰が増加した。また、リン割合の増加に伴い、非捕集灰の量も増えた。

この結果より、第 5 章でリン酸水溶液噴霧時にダストの粒子が大きくなったことを合わせて考えると、反応生成したダストがバグハウス内で気流により持ち上げられず非捕集灰となったと考えられる。捕集灰としてろ布に捕集されるダスト量が少なくなったことが、バグフィルター差圧低減につながったと考えられる。したがって、仮説 H3 のリン酸噴霧による非捕集灰の増加が明らかとなった。

これらの結果から、リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低下メカニズムは、ダストの大粒径化によって、通気性のよい集塵灰層が形成されることと、非捕集灰の増加すなわちろ布へのダスト負荷低減によるものであるといえる。

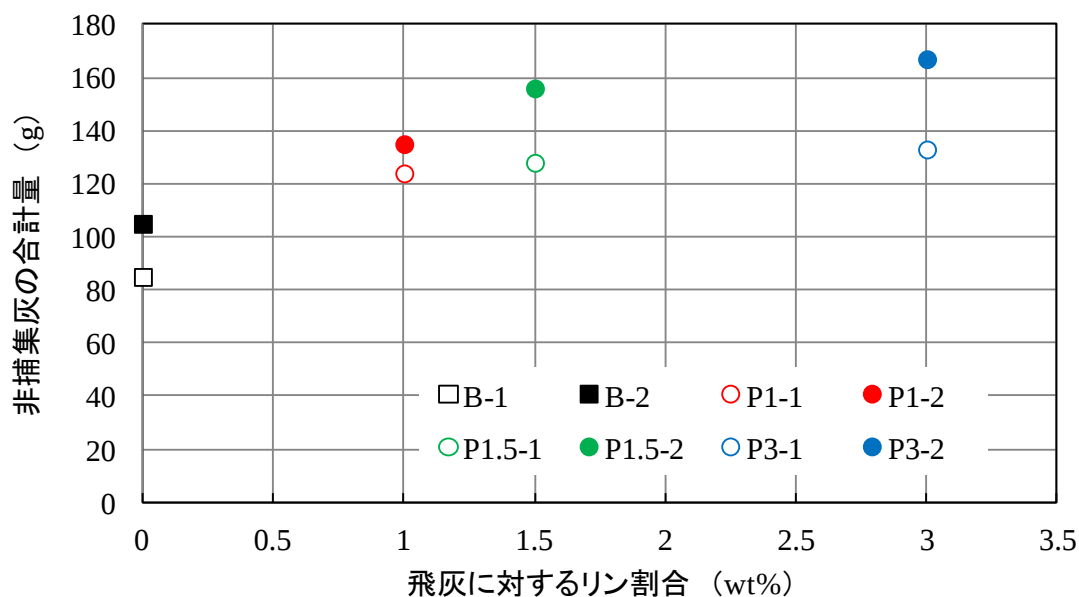


図 6-4 飛灰に対するリン割合と非集塵灰の合計量

6.3 リン酸化合物による集塵灰からの Pb, Cd 溶出抑制効果

6.3.1 試料

飛灰試料は第 5 章で用いたものと同じ施設から排出された飛灰であるが、採取日が異なる。試薬は第 5 章で用いたものに加え、リン酸化合物として第二リン酸カルシウム（粉末，無水，Alfa Aesar），第三リン酸カルシウム（粉末，化学用，和光純薬），ヒドロキシアパタイト（HAP）（生体材料研究用，和光純薬）を用いた。

6.3.2 分析方法

図 6-5 に分析フローを示す。試薬として添加したリン酸化合物は、飛灰に対するリン割合として、図に示したように、0 (blank)，1，3，10wt%の割合で添加した。飛灰と試薬を十分に混合させるため、ブレンダーを用いて混合した。図 6-1 中¹消石灰吹き込みありの飛灰には塊があった。消石灰の分布の偏りをなくすため、飛灰を乳鉢で粗粉碎した。その後、両方の飛灰とも、植物性とみられる焼却残さのようなものがふくまれていたもので、ふるいで 1mm を通過したものを試料として用いた。図-1 中²リン酸の場合、デジタルピペットを用いて飛灰に 1 滴ずつ加え、全量添加した後にへらを使い十分混合した。図 6-1 中³加熱反応後、試料が塊になっていたのを粉末化させるため、再度ブレンダーを用いて粉碎し、分析試料を作成した。

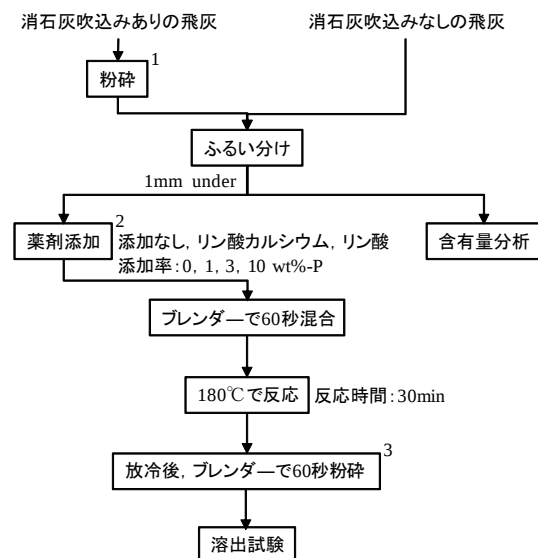


図 6-5 分析フロー

(1) 飛灰中の Ca, P, Pb, Cd 含有量分析

試料 0.1～0.5g に 69%硝酸 3mL と塩酸 9mL を順次加え、マイクロウェーブで分解し、分解液を 0.45 μ m のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ろ液を 250mL (Pb と Cd 分析時は 200mL) のメスフラスコに移し、蒸留水を標線まで加え分析用試料液とした。Ca, Pb, Cd 濃度は、原子吸光分光光度計 (AA-6800, 島津製作所) または ICP 発光分析装置 (ICPE-9000, 島津製作所) を用いた。P 濃度は吸光光度計 (U-1800, 日立製) を用いたモリブデン青法により測定した。

(2) 溶出試験

試料 10g をポリ容器に入れ、蒸留水 100mL を加えた後に、振とう機 (MULTI SHAKER MMS, EYELA) を用いて 200rpm で 6 時間連続振とうした。振とう終了後、0.45 μ m のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ろ過液またはその希釈液中の Pb と Cd 濃度は原子吸光分光光度計 (AA-6800, 島津製作所) または ICP 発光分析装置 (ICPE-9000, 島津製作所) を用いて測定した。

6.3.3 飛灰中の Ca, P, Pb, Cd の含有量

表 6-3 に消石灰吹き込みなしの飛灰と吹き込みありの飛灰に含まれる含有量分析結果を示す。消石灰吹き込みの有無で比較すると、消石灰吹き込みありの飛灰のほうが Ca 以外の含有量が少なかった。これは、吹き込まれた消石灰による希釈のためと考えられる。一方で、消石灰吹き込みなしでも Ca はおよそ 15%含まれていた。これは廃棄物由来のものと考えられる。

表 6-3 含有量分析結果

		消石灰吹き込みなし				消石灰吹き込みあり			
		Ca (mg/kg-ash)	P (mg/kg-ash)	Pb (mg/kg-ash)	Cd (mg/kg-ash)	Ca (mg/kg-ash)	P (mg/kg-ash)	Pb (mg/kg-ash)	Cd (mg/kg-ash)
1	1	173,670	6,072	23,080	119	227,705	314	8,656	79
	2	156,929	1,297	25,011	135	228,041	307	10,657	85
	3	150,352	6,028	24,921	129	226,093	294	6,684	80
2	1	142,702	1,382	27,016	134	230,887	364	10,647	85
	2	148,757	6,163	27,178	130	213,388	363	10,843	86
	3	150,829	6,328	22,960	129	216,314	401	8,798	86
3	1	142,702	1,615	25,036	124	205,336	592	8,779	86
	2	nd	nd	25,136	124	206,145	414	8,715	80
	3	173,260	5,888	25,046	129	203,392	450	6,721	80
平均		154,900	4,347	25,043	128	217,478	389	8,944	83
標準偏差		12,341	2,419	1,443	5	10,969	93	1,568	3
CV(%)		8	56	6	4	5	24	18	4

nd: no data

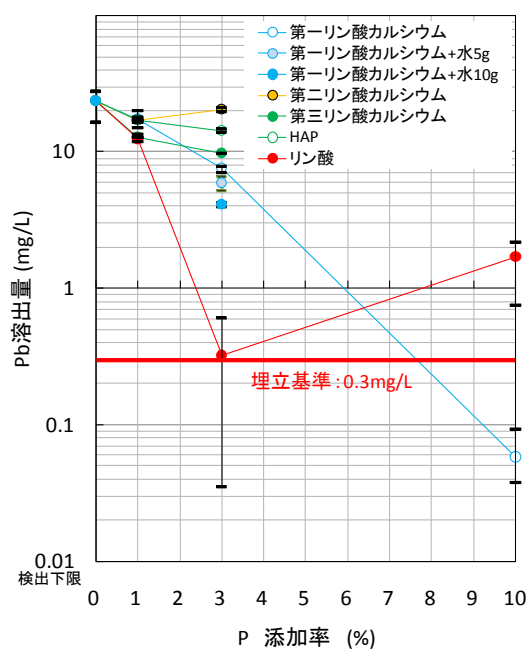
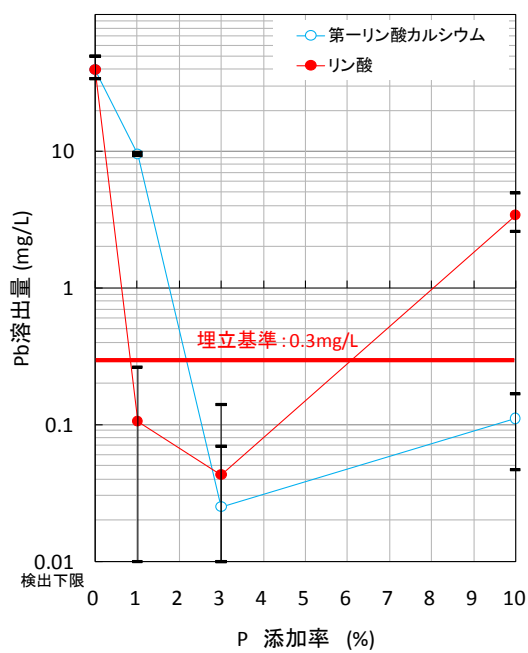
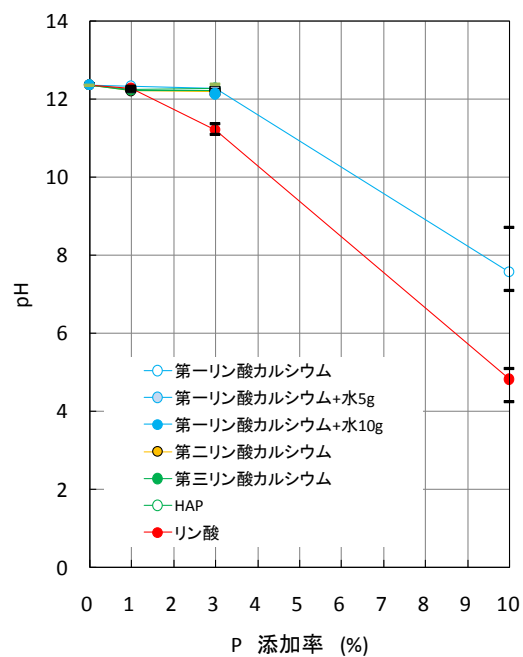
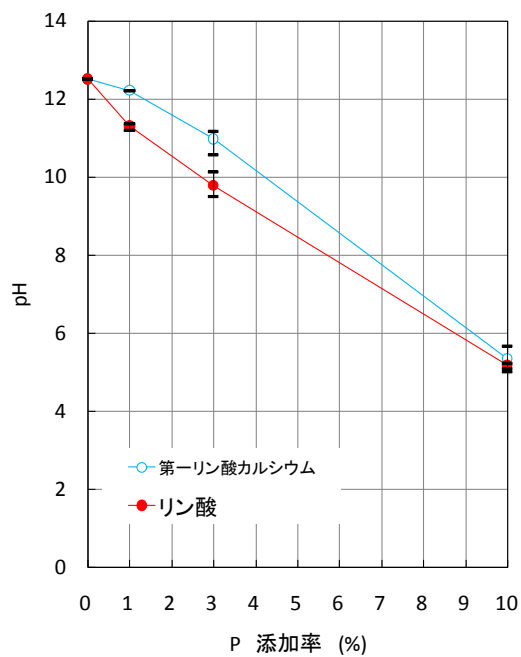
6.3.4 リン酸化合物の形態と添加率による Pb と Cd の溶出抑制効果

図 6-6 (a) に消石灰吹き込みなしの飛灰での pH, Pb, Cd の溶出量の変化を, 図 6-6 (b) に消石灰吹き込みありの飛灰での pH, Pb, Cd の溶出量の変化を示す。

リン酸化合物の添加率が高くなると pH は低下し酸側に近づいた。消石灰吹き込みありの飛灰は, P 添加率=1~3%では pH がほとんど低下しなかった。一方, 消石灰吹き込みなしでは P の添加率の上昇にしたがって pH が低下した。このことから, 消石灰の影響が pH 低下に影響を与えたと考えられる。

Pb は, リン酸化合物の添加量の増加 (pH 低下) に伴い溶出量が低下した。消石灰吹き込みなしの場合, リン酸の P 添加率=1 と 3%で, 第一リン酸カルシウムの P 添加率=3%で埋立基準値を満たした。しかし, P 添加率=10% (酸性域) になると, 再び溶出量が増加した。これは Pb が両性元素であるためと考えられる。一方, 消石灰吹き込みありの場合は, リン酸化合物の形態と添加率によらず埋立基準値を満たすことができなかった。また, リン酸に比べてリン酸カルシウム類の Pb 溶出抑制効果は小さかった。

Cd は, いずれも P 添加率=0~3% (アルカリ域) ではほとんど溶出しなかったが, P 添加率=10% (pH 低下) では埋立基準値を上回る結果となった。Cd は酸性に溶ける性質のためと考えられる。



(a) 消石灰吹込みなし

(b) 消石灰吹込みあり

図 6-6 リン酸化合物添加による溶出挙動

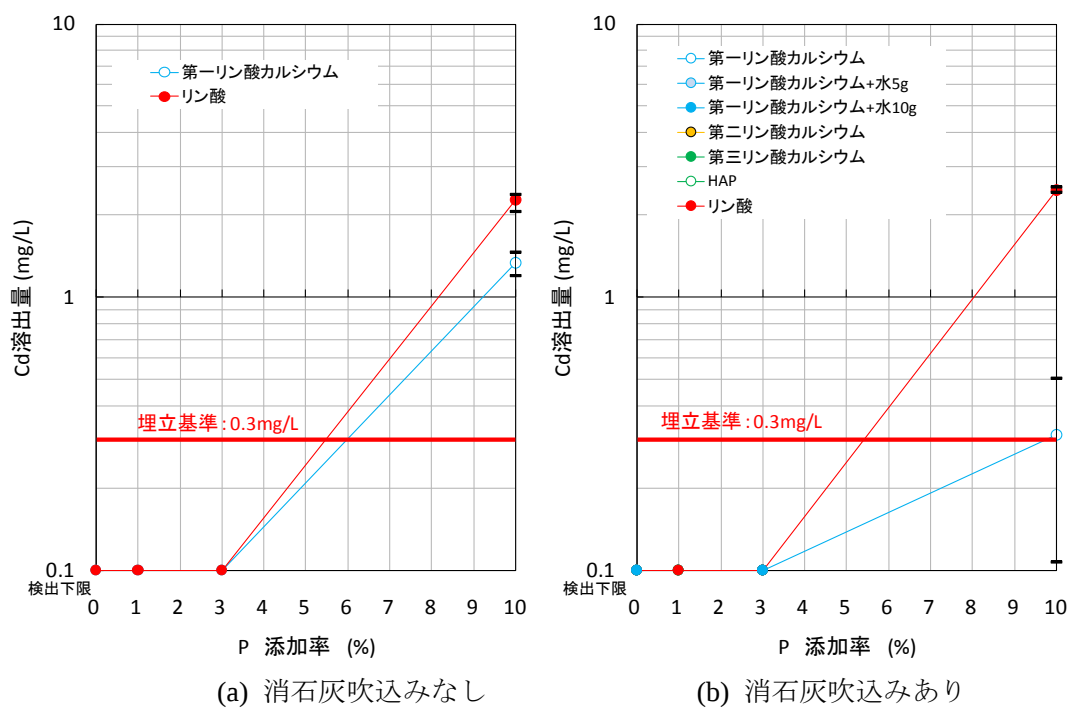


図 6-6 リン酸化合物添加による溶出挙動 (つづき)

第一リン酸カルシウムを薬剤として使用する際、水と混合しスラリー状で用いることを想定し溶出試験を行った。消石灰吹込みありの灰 50g に、第一リン酸カルシウムを P 添加率=3%となるよう添加し、さらに水を 5g または 10g 添加した。それ以降の操作は前述の溶出試験の方法と同じである。

図 6-7 に水添加の有無による結果の比較を示す。

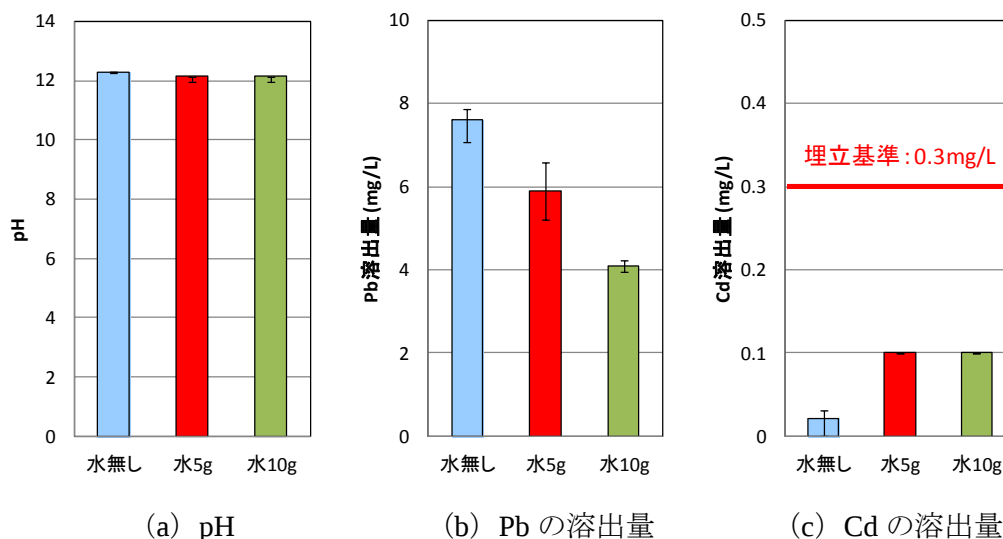


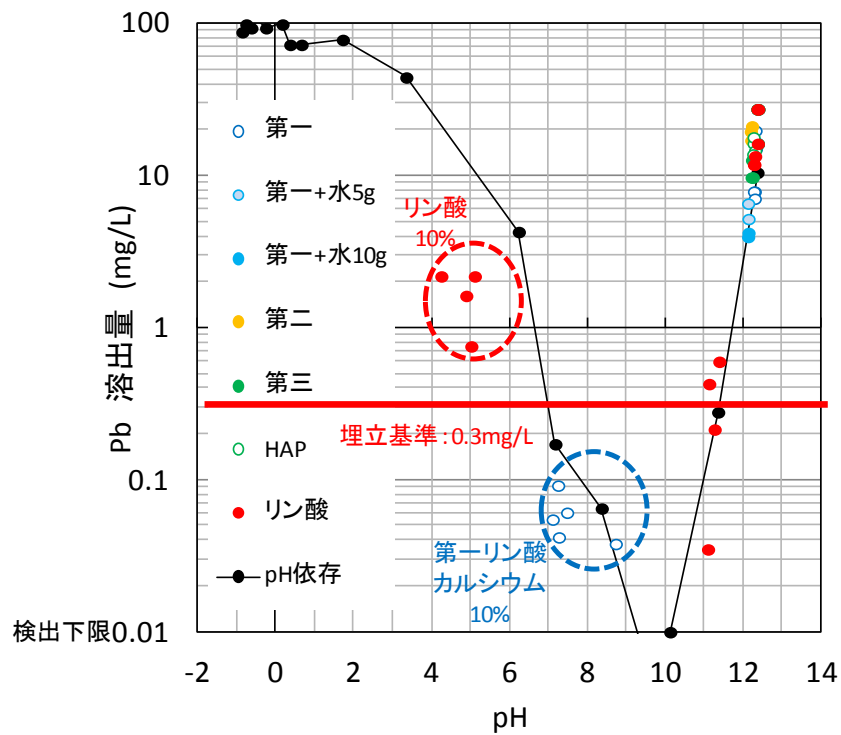
図 6-7 水添加による溶出試験結果 (灰 50g+水 5g or 10g+第一リン酸カルシウム)

pH はどの条件でもほぼ変化が無く 12 程度でありアルカリ性であった。Cd の溶出量もほとんど変わらず 0.1mg/L であり、埋め立て基準を満足していた。これは溶出液が高アルカリ性であったためと考えられる。一方で、Pb の溶出量には違いが見られた。水添加なしと比較すると、埋め立て基準の 0.3mg/L よりは高かったものの、水の添加量を増加させるほど Pb の溶出量が小さくなった。したがって、第一リン酸カルシウムを運用するにはスラリー状が効果的であるといえる。

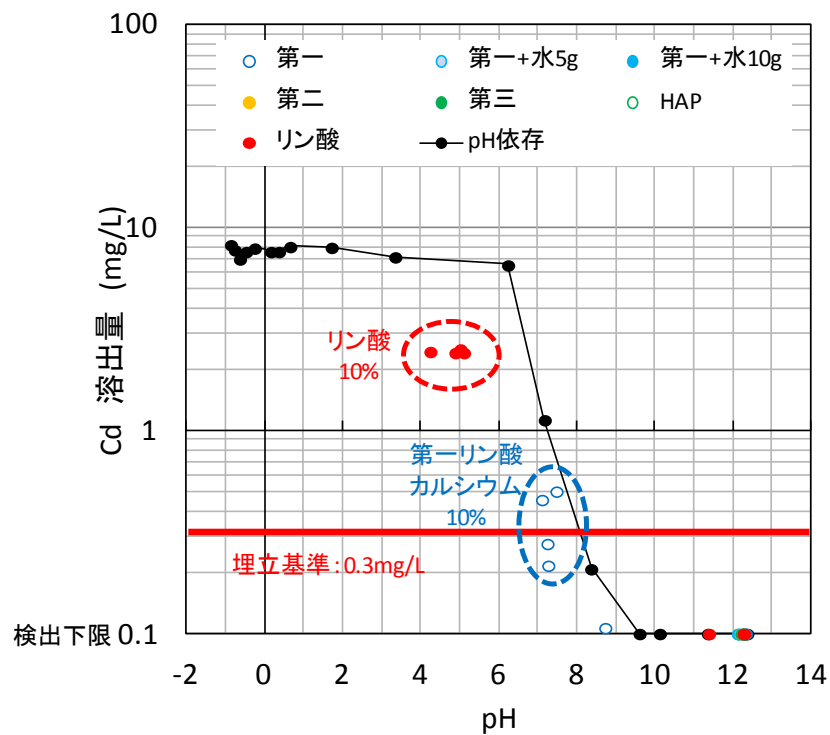
リン酸化合物による重金属抑制効果を明らかにするために、消石灰吹込みありの灰に水と 60%硝酸を添加し pH を変化させたときの溶出量と比較を行った。図 6-8(a)に Pb、図 6-8(b)に Cd の結果を示す。ただし、図中で第一リン酸カルシウムを単に第一と略記した。

pH は P 添加率=0~3%ではほとんど変化がなかったため、サンプル間のばらつきはあったものの、溶出抑制という結果にはならなかった。P 添加率=10%では pH は中性付近から酸性側になった。Pb・Cd の溶出抑制効果は、リン酸・第一リン酸カルシウムともに見られた。しかし第一リン酸カルシウムでは埋立基準を満足したものの、リン酸では満たせなかった。これはリン酸によって溶出液が酸性となり、Pb が溶出しやすくなったためと考えられる。

以上の結果から、リン酸化合物の添加率によって Pb は添加なしに比べて溶出抑制効果があるが、Cd は逆効果であることがわかった。



(a) Pb の溶出量



(b) Cd の溶出量

図 6-8 pH による溶出量の変化

6.4 リン酸化合物による塩化物からの塩化水素発生実験

6.4.1 実験方法

図 6-2 に実験装置を示す。排ガス処理プロセスにおいて生成する塩化物の中で代表的なものである NaCl と CaCl_2 である。そこで、 NaCl （和光一級，和光純薬）と CaCl_2 （試薬特級，和光純薬）を用いた。塩化物または塩化物と消石灰の混合物にリン酸化合物を混合し，反応器内に充填した。リン酸は，他の塩化物または塩化物と消石灰の混合物を充填した後に，デジタルピペットを用い反応器上部から注入した。注入後発生したガスを回収するために，すぐにシリコン栓をしポンプによる誘引を開始した。試薬の混合比（モル比として）は $\text{Cl} : \text{P} = 1 : 1$ ，または， $\text{Cl} : \text{Ca} : \text{P} = 1 : 3 : 1$ とした。バグハウス付近での反応を想定し，反応器を恒温層で 180°C に保持し，ポンプを用い誘引通気を 1 時間行った。発生したガスは蒸留水を 50mL 入れた吸収瓶を 2 本用意し吸収させた。このときガスを水に溶かすために，吸収瓶を水槽で冷却しながらガス吸収を行った。

塩化水素発生した場合，吸収瓶内で塩素は塩化物イオンとして存在するはずである。そこで塩化物とリン酸化合物によって発生したガスを吸収させた吸収液を全量回収し，陰イオンクロマトグラフィー（AS-8020，TOSOH）を用いて塩化物イオン濃度を測定した。

6.4.2 結果と考察

表 6-4 に実験結果を示す。 CaCl_2 とリン酸化合物では塩化水素が発生した。特に，リン酸を添加した場合，急激に反応が起こり，塩化物中の Cl はすべて HCl ガスに転換した。 CaCl_2 + 第一リン酸カルシウムでも投入 Cl の約 2% が HCl ガスとして発生した。

CaCl_2 + リン酸化合物 + 消石灰の場合には，リン酸を添加したときには塩化水素が発生したが，第一リン酸カルシウムでは発生しなかった。これは試料中の消石灰による中和効果のためと考えられる。あらかじめ消石灰とリン酸を混合（ P 添加

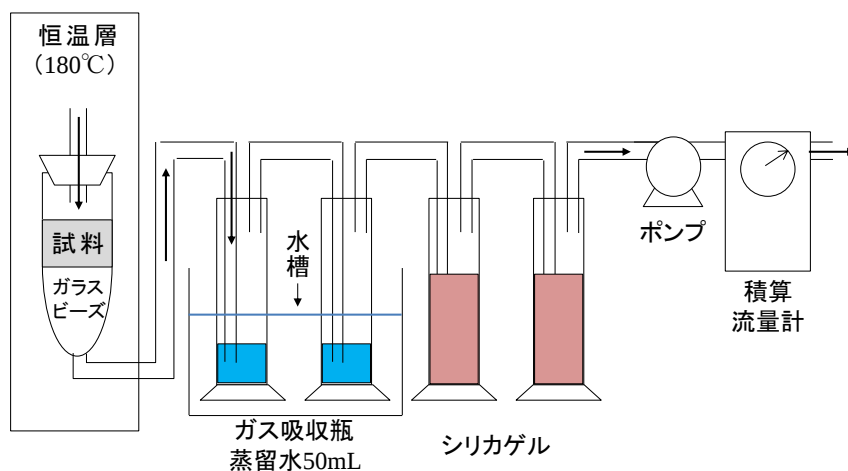


図 6-2 リン酸化合物と塩化物による塩化水素発生実験の装置

表 6-4 塩化水素発生実験結果

	塩化物 (mol)		消石灰 (mol)	リン酸化合物 (mol)				吸収液中の 塩化物イオン (mol)	投入Clモル数 あたりの 発生HClモル数 (-)
	CaCl ₂	NaCl	Ca(OH) ₂	リン酸 H ₃ PO ₄	第一リン酸 カルシウム Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	第二リン酸 カルシウム CaHPO ₄	第三リン酸 カルシウム Ca ₃ (PO ₄) ₂		
CaCl ₂ +リン酸化合物	0.05			0.10				0.111	1.11
	0.05				0.05			0.002	0.02
CaCl ₂ +消石灰 +リン酸化合物	0.025		0.15	0.05				0.001	0.01
	0.05		0.08		0.05			0.000	0.00
	0.03		0.15	P添加率＝ 消石灰の1%				0.000	0.000
NaCl +リン酸化合物		0.10		0.10				0.003	0.03
		0.10			0.05			0.000	0.00
		0.10				0.10		0.000	0.00
		0.10					0.05	0.000	0.00
NaCl +消石灰 +リン酸化合物		0.05	0.15	0.05				0.000	0.00
		0.05	0.15		0.025			0.000	0.00
		0.05	0.15			0.05		0.000	0.00
		0.05	0.15				0.025	0.000	0.00

モル比で塩素：リン＝1：1

または塩素：リン：消石灰＝1：1：3となるように混合した。

率＝1%) したものに CaCl₂ を加えた場合では塩化水素は発生しなかった。

NaCl の場合、リン酸添加のみ、投入 Cl の約 3%が HCl ガスとして発生した。しかし発生量は CaCl₂ より少ないため、反応性が低いことがわかった。

投入 Cl モル数の 3 倍分の消石灰により HCl ガスはほぼ中和されたが、CaCl₂+リン酸のように投入 Cl モル数の約 2%に該当する HCl が中和しきれずに排出されるケースもあった。

6.5 結論

リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減メカニズムの仮説 H1 (払い落とし量の増加) と仮説 H3 (非捕集灰の増加) について、実験を行った。その結果、捕集灰の払い落とし量はリン酸噴霧の有無によらずほとんど同じであることがわかった。このことから、バグフィルター差圧低減は、リン酸噴霧による払い落とし量の増加ではないことが示された。

一方で、リン酸水溶液噴霧によって、非捕集灰が増加した。また、飛灰に対するリン割合を増加させるほど、非捕集灰の量が増えた。これはバグフィルター差圧上昇につながるろ布へのダスト負荷が低減されたことを意味する。

本章および第 5 章より、バグフィルター差圧低減現象は、ダスト粒子の大粒径化による非捕集灰の増加 (ろ布へのダスト負荷低減) と、捕集灰層の通気性の向上であることが示された。実機試験で確認されたダスト排出量の増加量は、非捕集灰の増加だけが原因とは考えられない。バグフィルター差圧の低下により、ろ布上の捕集灰を保持する力

が弱くなったために、払い落されやすくなったと推測される。

Pb と Cd の溶出抑制効果については、Pb はリン酸化合物添加なしと比較して、リン酸化合物の添加率によって溶出抑制が見られた。Cd は添加によって溶出が促進された。これらは、リン酸化合物の添加によって、飛灰の pH が変動したためである。したがって、リン酸化合物によりも、飛灰の pH 制御が Pb と Cd の溶出抑制には効果的であることがわかった。

塩化水素発生実験より、リン酸化合物は塩化物と反応し、塩化水素を発生させることがわかった。しかし、消石灰の存在によって中和させ、塩化水素の発生量を低減させることが可能である。

参考文献

- 1) 貝掛勝也，関戸知雄，角森道人，土手裕：廃リン酸から合成したリン酸アルミニウムによる飛灰中の鉛不溶化メカニズム，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 24, No. 3, pp. 53 - 62, 2013

第7章 結論

現在、我が国では家庭から排出される一般廃棄物は焼却によって衛生的に処理されている。近年では、廃棄物処理施設は、単に廃棄物を処理する場という役割のみならず、廃棄物焼却によって発生した高温の排ガスからの熱回収により発電を行い、エネルギープラントの役割も担うようになってきた。このような状況に加え、国土の狭さに起因する埋立地の少なさ、新規埋立地の確保の困難さ、また新設の焼却炉が建設されている状況を考慮すると、廃棄物の焼却処理が今後も我が国の中心的な廃棄物処理方法となりうる。しかし、廃棄物の焼却処理は費用がかかるという欠点を有している。熱回収によるエネルギー回収量と運転にかかるエネルギー使用量の合計に占める回収量の割合を増やすためには、使用量を減らす必要がある。エネルギー使用量を減らすためには、廃棄物焼却処理プロセスにおけるさまざまな損失を減らさなければならない。

本研究では、廃棄物焼却処理における排ガス処理プロセスの圧力損失に着目した。排ガス処理プロセスの圧力損失の中で最も多く割合を占めるものは、バグフィルターを用いた微粒子の捕集によるバグフィルター差圧である。バグフィルター差圧を低減させることにより、下流の誘引通風機の消費電力を抑制させることができ、廃棄物焼却処理におけるコストを直接削減できる。そこで、リン酸噴霧によってバグフィルター差圧が低減することに注目し、その現象解明を行った。

以下に各章の内容をまとめる。

第1章では、本論文の研究背景として、廃棄物焼却処理の重要性と課題について述べるとともに、関連する既往の研究がほとんどないこと、そして研究目的と論文構成について述べた。

第2章では、バグフィルター差圧変化におけるリン酸噴霧による影響を調べるために、実際の産業廃棄物焼却処理施設の運転データを用い、短期的（噴霧時）と長期的（噴霧後の変化）な効果について解析を行った。短期的な効果としては、リン酸廃液噴霧開始直後からバグフィルター差圧が急激に低下しその後は低い値で維持されることが明らかとなった。また、リン酸廃液噴霧時は必ずバグフィルター差圧が低下することから、この現象は再現性があることが示された。そして、リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低下現象は、ろ布の使用期間によらず起こることを示した。長期的な影響としては、噴霧終了後にバグフィルター差圧が上昇傾向を示すことがわかった。特に初回噴霧後に、バグフィルター差圧上昇が顕著であった。施設ではリン酸廃液を処理することが目的であるため、バグフィルター差圧低減に必要なリン量よりも過剰に噴霧していたと考えられ、リン量とバグフィルター差圧の量的関係までは明らかにできなかった。

第3章では、第2章でデータを入手した施設において実機試験を行い、リン酸廃液噴霧によるバグフィルター差圧低減現象の確認を行った。2度の試験を行い、ともにリン酸廃液噴霧時にバグフィルター差圧の低下と誘引通風機での消費電力の低下が同時に

起こることを示した。このことから、リン酸廃液噴霧が運転コスト削減につながる事が明らかとなった。またバグハウスから排出される捕集灰の回収、計量、物性分析を行った。捕集灰収支では、1度目の実験ではリン酸廃液噴霧なしよりも、噴霧時で減少し、2度目の実験では噴霧なしよりも噴霧時で増加するという反対の結果となった。これは、それぞれの実験時のろ布の使用期間が違ったため捕集灰の残存量に違いがあったことと、払い落しに用いられる圧縮空気（パルス）の圧力（パルス圧）が違ったことが原因と考えられる。1度目の実験はろ布の全数交換から4か月、2度目は8か月であり、パルス圧も1度目が0.35MPa、2度目が0.52MPaであった。捕集灰の排出量に差があったものの、リン酸廃液噴霧時にバグフィルター差圧は低下した。このことから、リン酸廃液によるバグフィルター差圧低減現象は、捕集灰の払い落し量増加すなわちろ布上に捕集されている捕集灰が減ったことによる効果と、捕集灰の物性変化（灰粒子の大粒径化）による捕集灰層の通気性の向上による効果の両方によるものであると示唆された。

第4章では、第3章で明らかにできなかった灰収支とバグフィルター差圧低下の関係を明らかにするために、廃棄物焼却施設の排ガス処理システムを模擬したベンチスケール試験を行った。リン酸噴霧によってバグフィルター差圧が復帰する速度が遅くなり、それは捕集灰層の表面性状が変化したことによる可能性が示された。また、複数のろ布を用いたため、それぞれのろ布でダストの捕集と払い落しに差が生じることが明らかとなった。

第5章では、排ガス処理システムを模擬したラボスケールの装置にろ布を1本だけ設置し、ダストの捕集とダスト捕集過程におけるバグフィルター差圧の変化を調べる実験を行った。液体のリン酸と粉体のリン酸カルシウムを用いることにより、リン酸化合物の形態によるバグフィルター差圧低減効果について調べた。捕集灰量と捕集灰中のリン濃度分析から、捕集灰中のリン濃度が増加するほど捕集灰層の通気性が向上し、その効果はリン酸化合物の形態によらないことが明らかとなった。また、捕集灰の物性分析より、リン酸と飛灰中のカルシウムが反応すること、捕集灰が大粒径化することがわかった。捕集灰層の表面分析から、リン酸噴霧なしと比べて、リン酸噴霧時にはろ布上の捕集灰層が不均一な表面性状となる（凹凸が多い）ことを明らかにした。以上の結果から、リン酸噴霧時のバグフィルター差圧低下現象のメカニズムの一つは、リン酸によって通気性の良い捕集灰層が形成されるであることがわかった。さらに、消石灰吹き込みなしの飛灰を用いた実験でも、消石灰吹き込みありの飛灰と同様にバグフィルター差圧が低下した。このことから、飛灰中にカルシウムが存在することがバグフィルター差圧低減には重要な要因であることが明らかとなった。

第6章では、第5章と同じ装置を用い、バグフィルター差圧低下に関し、パルスによる捕集灰の払い落し量の変化、非捕集灰量の変化について調べた。また、リン酸化合物によるバグフィルター差圧低減効果以外の効果として、重金属類（PbとCd）の溶出抑制効果とリン酸化合物と塩化物（塩化カルシウムと塩化ナトリウム）の反応による塩化

水素の発生について調べた。その結果、リン酸噴霧の有無による捕集灰の払い落とし量の変化は確認されなかった。つまり、払い落とし量の増加がバグフィルター差圧低下の直接的原因ではないことが分かった。一方で、リン酸噴霧時に飛灰に対するリン割合を増すほど非捕集灰量が増加しすることが分かった。この結果は、リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減現象について、非捕集灰の増加すなわちろ布への捕集灰負荷の低下も要因の一つであることを意味する。Pb、Cd の溶出抑制効果については、リン酸化合物の添加により飛灰の pH が変化したことが影響した。Pb は両性元素であるため、リン酸化合物の添加量によって溶出は増減した。飛灰に対して 10wt% の添加率では、リン酸では pH が酸性となるため埋め立て基準を満足できないが、添加なしよりは低い溶出量であった。第一リン酸カルシウムでは pH が中性付近であり、溶出量も埋め立て基準を満足するものであった。したがって、Pb の溶出抑制効果があることがわかった。Cd については、添加率 10wt% ではどちらも溶出量が増加した。しかし、1wt% と 3wt% では溶出しなかったため、リン酸化合物の添加率が重要であることがわかった。塩化物とリン酸化合物の反応では、消石灰がなければ、塩化水素が必ず発生することがわかった。特に、塩化カルシウムとリン酸との反応は顕著で、試料中の塩素が全て塩化水素となった。一方で、消石灰が共存していれば、その放出を抑制できた。

以上の結果から、リン酸噴霧によるバグフィルター差圧低減現象は、非捕集灰の増加すなわちろ布への捕集灰の負荷低減、飛灰の大粒径化に伴う捕集灰層の通気性の向上によることが示された。