

(50) 一般廃棄物焼却灰の粒子性状と生成過程に関する一考察

Properties and formation of bottom ash particles

大寺 泰輔*, 島岡 隆行**, 中山 裕文**

Taisuke Odera*, Takayuki Shimaoka**, Hirofumi Nakayama**

ABSTRACT; Recently, recycling of incineration residue has been required, because of shortage in capacity of landfilling. In order to utilize incineration residue safely and effectively, it is necessary to grasp the relationship between composition of waste for incineration and properties of bottom ash. The formation of bottom ash particle in incineration process was discussed to investigate the influence of municipal solid waste composition on properties of bottom ash. In addition, single particle crushing experiment was done to investigate the strength of bottom ash particle. As a result, it was concluded that the ratio of incombustible waste in municipal solid waste leads great influence on the properties of bottom ash such as a particle formation, the grain size distribution of bottom ash, and strength of an single particle.

KEYWORDS; Utilization of incineration residue, Solid waste composition, Bottom ash particle, Particle structure, Single particle crushing

1. はじめに

近年、一般廃棄物埋立地の残余容量が不足しており、最終処分される廃棄物の50%近くを占める¹⁾焼却残渣の有効利用が検討されている。現在のところ、焼却灰のセメント原料、道路路盤材、タイル・ブロックの材料等としての利用に向けた取り組みがなされている²⁾。焼却灰を土木資材として有効利用する場合、有効利用に伴う土木材料としての力学的特性や環境への影響評価が重要となる。欧米では既に焼却灰が道路路盤材として利用されており³⁾、湿式物理選別法により都市ごみ焼却灰から得られた処理焼却灰は、下層路盤材等として有効利用が可能であることが報告されている^{4)~6)}。我が国においても、土木資材としての焼却灰の有効利用は十分可能であると考えられる。しかし、今後リサイクルの促進によって排出される廃棄物の量や組成は大きく変化することが予想され、焼却処理に伴って発生する焼却残渣の性状も大きく変化すると考えられる。排出される廃棄物や焼却残渣の性状を予測することは、焼却灰の有効利用および将来の廃棄物処理における適正な燃焼制御という視点から重要な課題である。

リサイクルが促進されると、焼却の対象となる収集ごみの量、物理組成は変化し、焼却残渣の①発生量、②物理化学的組成、③地盤工学的特性、④有害物質の含有量や溶出特性等にも影響を及ぼすと考えられる。安定した有効利用に際しては、これらのことが重要である。リサイクルの促進に伴う発生量、有害な重金属の含有量の変化に伴う、ごみ物理組成からの予測手法の研究が行なわれており⁷⁾、また修正

* 九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻 Department of Urban and Environmental Engineering, Graduate School, Kyushu University

** 九州大学大学院工学研究院環境都市部門 Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University

CBR 試験等による力学的特性の調査も行われている⁸⁾。しかし、地盤工学的特性に影響を及ぼす焼却灰粒子の破碎性や粒子構造の視点から、焼却灰の有効利用性を検討した研究は見当たらない。本研究では、焼却灰の粒子に注目し、焼却灰の粒子構造と粒子の生成過程について検討した。さらに、単粒子破碎試験を行い、ごみ組成の変化が焼却灰の地盤工学的特性に及ぼす影響を考察した。

2. 焼却灰粒子の粒子構造について

K市H清掃工場（産廃一部受入、連続ストーカ炉、200t/日、）と、F市S清掃工場（連続ストーカ炉、250t/日）の燃さい押し装置通過後（水中に落下後）の焼却灰を用いた。焼却灰を骨材として利用する際には、焼却灰粒子の粒子構造の把握が重要である。そこで、水洗浄を行い、構造の把握を試みた。粒度別に篩い分け、水洗浄を行った結果、粒径が4.75mm以上の焼却灰粒子の約8割以上において、図-1に示すように、粒子内部に固形物の存在が確認された。そこで、粒子の断面および内部構造をSEMで確認するため、粒子を割裂（破碎）してみると、図-2に示すように焼却灰粒子の内部に核のような固形物が認められ、この固形物（以下、核と呼ぶ）を微細粒子が取巻いているという特異的な粒子構造を持つことが確認された。この特異的な粒子構造に注目し、焼却灰粒子の生成過程の検討および単粒子破碎試験（4.1節）を行った。なお、SEMの撮影には、分解能3.5nm、加速電圧0.5～30kVで、試料サイズ125mmまで全領域観察可能な装置を用いた。試料として、焼却灰粒子を炉乾燥後、割裂（破碎）したものを、割裂した粒子の破断面を上にして試料台に設置し、低加速電圧で、無蒸着観察を行なった。

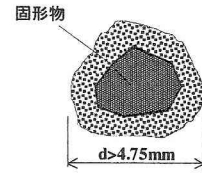


図-1 焼却灰粒子構造の模式図

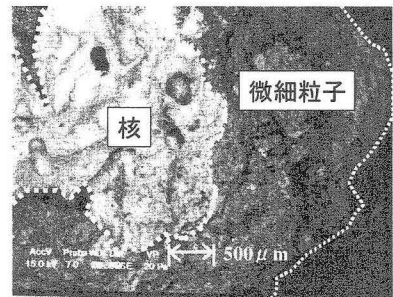


図-2 焼却灰粒子の断面SEM写真

3. 焼却灰粒子生成過程について

前述した粒子構造に基づき、粒子の生成要因の把握と、実際に採取した焼却灰の外見および粒子構造の確認により、焼却灰粒子の生成過程について検討を行った。

3.1 焼却灰粒子の生成要因

廃棄物焼却に伴うダイオキシンの発生を削減するための規制措置がとられ、既設の都市ごみ焼却炉の燃焼温度は850℃以上が望ましいとされている。この燃焼温度を踏まえ、焼却灰粒子の生成要因を整理すると、以下の様になる。

(1) 物質の発火点・融点

焼却対象ごみとして燃焼される物質の発火点・融点^{9),10)}を図-3に示す。温度の上昇に伴い、可燃性ごみの中でも発火点の低い易燃性物質の紙類、繊維類、ゴム類、プラスチック類から燃焼が始まり、融点の高い不燃性ごみの溶融へ移る。

(2) 焼却炉内の構造、温度

F市の清掃工場（300t/日、連続ストーカ炉）において、炉内の観察による調査と、管理者へのヒアリング調査を行った。得られた知見を以下に示す。

〔炉内の観察による調査〕

- ・ 燃焼温度の計測点は3点で、計測点のうち最も高い温度は1100℃であった。
- ・ 中央制御室のモニターで炉内の燃焼の様子を確認した結果、火格子の運動により焼却灰が攪拌されている様子はあまり観察できなかった。燃え切り点は明確に確認することができた。

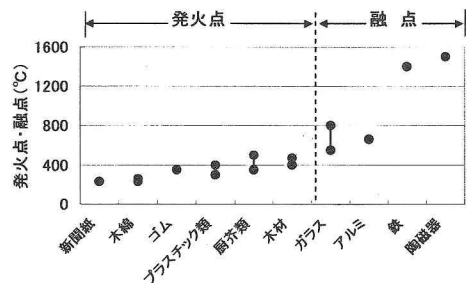


図-3 物質の発火点・融点

- ・連続ストーカ炉は、乾燥工程（約200℃）、燃焼工程（約850℃）、後燃焼工程の3工程によりなっており、燃焼されたごみは火格子の運動により徐々に下流部へ移送されていた。

〔管理者へのヒアリング調査〕

- ・温度計の耐久性の問題があり、ごみ層内には温度計が設置できないため、炉内温度の計測点は炉壁から10～50cm離れたところであり、廃棄物の燃焼が行なわれている部位（ごみ層）の温度は計測温度より高い値であると考えられる。
- ・火格子上に付着している溶融物を調べると酸化鉄の溶融物があり、酸化鉄の融点は1380℃付近であることから、1300℃以上に達する部分も存在すると思われる。
- ・非常に緩速的な燃焼ごみの移動であり、炉内燃焼滞留時間は4時間程度であった。

(3) 水中への投入

燃焼中に、焼却炉下流部にある点検口から炉内の燃焼の様子を観察した。火格子の運動は非常に緩速的な運動で、焼却灰の攪拌に相当する運動は起こっていなかった。燃焼の最終段階である後燃焼工程を経て、焼却灰は埋火および灰ビットへの安定供給（粉塵対策）のため水中に投入される。その後、燃さい押出装置により押出され、半湿灰が排出される。

3. 2 焼却灰粒子の生成過程

前述した粒子の構造、およびa)物質の発火点・融点、b)焼却炉内の構造、温度分布、c)燃さい押出装置の水中への投入方法の影響を考慮すると、焼却灰粒子の生成は図-4および以下に示す過程（第1段階～最終段階）によるものと考えられる。

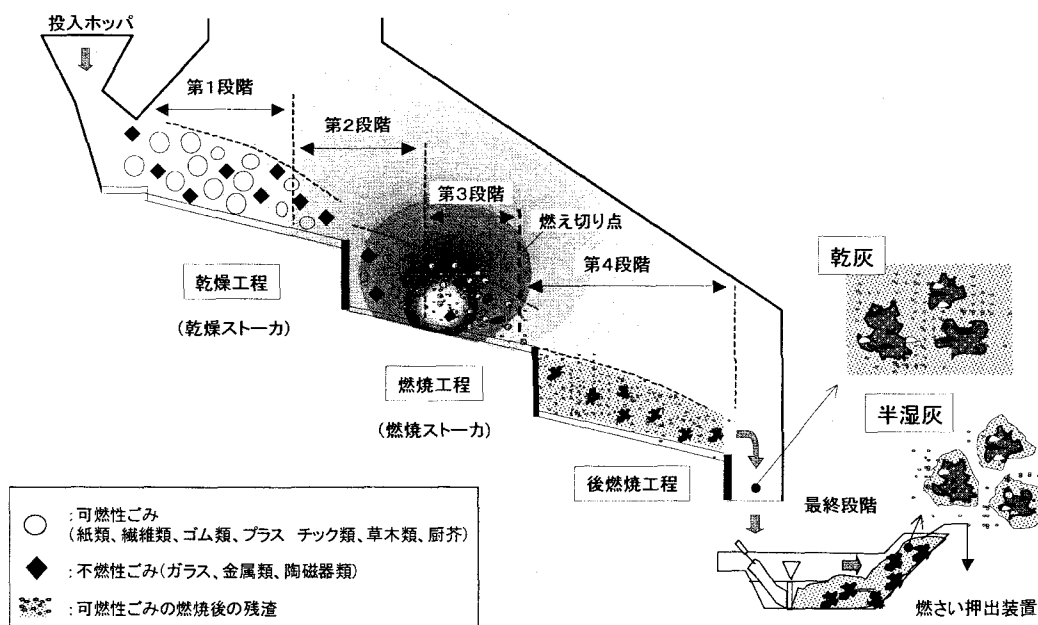


図-4 ストーカ炉における焼却灰粒子の生成過程

〔第1段階〕ごみの乾燥

投入ホッパから投入されたごみは、まず乾燥スーカで乾燥（ガス化と水分の蒸発を促進）される。紙類、繊維類、ゴム・プラスチック類、草木類、厨芥の可燃性ごみの中でも発火点の低い易燃性物質の紙類、繊維類、ゴム類、プラスチック類の一部は燃焼が始まる¹¹⁾。投入された可燃性ごみの保有水分量が多ければ乾燥が不十分となり、可燃性ごみが未燃物として焼却灰中に残存する。

〔第2段階〕可燃性ごみの燃焼

次に燃焼ストーカで燃焼される。紙類、ゴム類、プラスチック類、厨芥等の可燃性ごみが燃焼され、ガラス、金属類、陶磁器類等の不燃物およびクリンカ等の固形物とともに火格子の運動によりほぐされながら下流部へ移送される¹¹⁾。投入されたごみ中にゴム類、プラスチック類等の高分子類の割合が増加すると、発熱量が高くなり、より高温履歴の焼却灰が排出される。

〔第3段階〕不燃性ごみの一部又は表面の溶融

可燃性ごみは燃焼されて焼却残渣となり、不燃性ごみの中でも融点の低いガラス、アルミの周囲（表面）がまず溶融する。

〔第4段階〕完全燃焼及び溶融物の固化

連続的な燃焼とほぐしにより後燃焼ストーカに移送されたごみは、約1時間の後燃焼工程で未燃分がほぼ完全燃焼される。また、燃焼工程において一部850℃以上の溶融温度を越えるような高温を示す箇所においてガラス、金属類の表面が溶融したものが固化し、焼却灰粒子の核になる。

〔最終段階〕焼却灰粒子の生成

燃焼工程において不燃性ごみが溶融したものの表面に、後燃焼工程で微細粒子が固着する現象は認められず、燃焼の最終段階である後燃焼工程において、焼却灰粒子の生成は確認できなかった。それは図-5に示すように、焼却灰が燃さい押出装置に落ちる前の乾灰と、燃さい押出装置に落ちた後の半湿灰は外見上、全く異質なものである。乾灰は金属、ガラス等に代表される不燃物および溶融物と微細粒子が明確に分かれているが、半湿灰は核

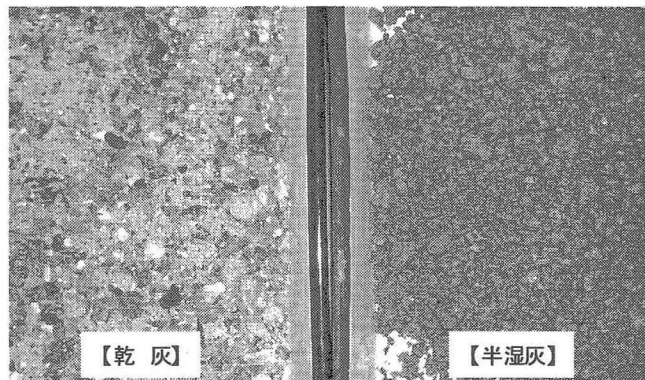


図-5 乾灰および半湿灰

と微細粒子からなる粒子構造を形成しており、粒子の大きさに差はあるものの、個々の粒子の外見上の差異は明確ではなかった。つまり、主として、燃さい押出装置における加水および押出運動によって、破碎された溶融物および不燃物を粒子の核として周囲に微細粒子が固着し、焼却灰粒子が生成される。しかし、一部は微細粒子となる部分が核よりも高い溶融温度を有し、炉内で一部溶融に近い状態で核の周囲に融着する。また、炉内温度が完全に溶融する状態でなければ、焼結の状態であったとも考えられる。

以上の焼却灰粒子の生成過程から判断すると、リサイクルの促進により、ガラス、金属類、陶磁器類等の不燃物の回収率が上がると、粒子の核となり得る物質が減少するため、核を持たない焼却灰粒子の数が増加し、さらに焼却灰の粒度分布がより細かい粒径へ移行する可能性が示唆される。また、容器包装リサイクルおよび食品リサイクルが促進されると、プラスチック等の溶解物および単位水分量の多い厨芥の減少により、細粒の焼却残渣が排出されると考えられる。

4. 焼却灰粒子の物理的・土質学的性質について

4. 1 実験概要

試料は、K市のH清掃工場とF市のS清掃工場から採取したH焼却灰とS焼却灰を用いた。表-1に試料の性質を示す。実験概要を以下に示す。

(1) 粒子の分類

単粒子破碎試験装置を用い、焼却灰粒子を破碎し、核の有無を

表-1 試料の物理特性

項目	H焼却灰	S焼却灰
密度(g/cm ³)	2.26	2.43
初期含水比(%)	17.6	11.2
最大粒径(mm)	13.0	13.0
均等係数 $U_c(-)$	6.45	6.36
曲率係数 $U_c(-)$	0.91	0.88

判別した。さらに、目視により粒子の分類を行った。

(2) 単粒子および核の質量の計測

焼却灰の単粒子の全質量を計測し、核と微細粒子を水洗浄によって分離するために、ポリ容器中の水に入れ十分に攪拌し、ろ過するという作業を2回程度行った後、炉乾燥させて核のみの重量を計測した。粒子全体質量に占める核の質量比を算出した。4.75-9.5mmと9.5-13mmの2つの粒径区分について行った。

(3) 単粒子破碎試験

一軸圧縮試験装置を改良した、下盤可動式の荷重装置を用い、単粒子破碎試験を行った。ロードセルおよび変位計により、荷重、変位の計測を行った。実験条件は表-2に示す。測定は試料間の変動が大きいことから、H焼却灰およびS焼却灰の粒径4.75-9.5mmの各60個の単粒子について行った。これは、250gの焼却灰試料を用いた場合、粒径4.75-9.5mmの粒子数の約4分の1に相当する個数である。

4. 2 実験結果および考察

(1) 粒子の分類

単粒子破碎試験の結果より、焼却灰粒子を核の有無、核の種類によって、図-6のように分類した。

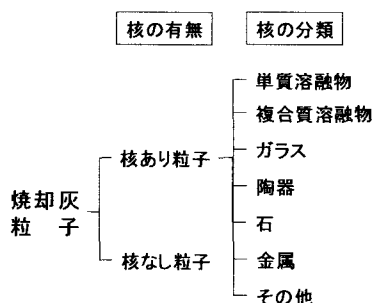


図-6 焼却灰粒子の分類樹形図

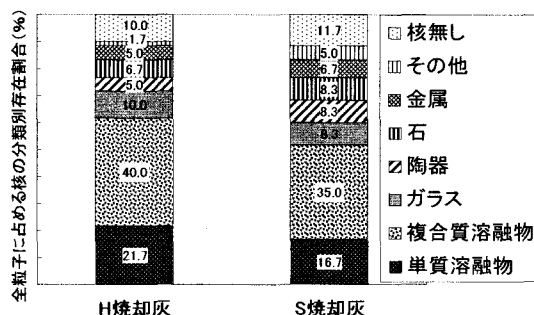


図-7 焼却灰粒子の核分類別存在割合

核の溶融物を、単質溶融物は主に黒色の単質な溶融物、複合質溶融物は明確に分類できない小さな物質が多数含まれる溶融物として目視による分類をした。図-7に破碎した焼却灰粒子の分類別の存在割合を示す。溶融物が全体の約半数を占め、複合質溶融物の存在割合が最も多く、金属、ガラス、陶磁器等のいわゆる不燃物も約2割存在していた。この結果より、溶融物の存在割合が焼却灰の粒子生成に大きく影響することが考えられるため、ガラスの分別収集等により、溶融温度の低いガラス等の混入割合が減少し、ごみの発熱量も減少した場合、溶融物の生成割合が減少することにより、核の生成が抑制されることが考えられる。

(2) 焼却灰粒子の質量計測

図-8に、質量比(単粒子重量に占める核の質量比)の粒径別度数分布表を示す。粒径9.5-13mmの方が4.75~9.5mmと比較して全体に占める核の質量比が小さい傾向にあることが分かる。また、核の存在しない焼却灰粒子の存在も確認され、粒径が9.5mm以上の方が4.75~9.5mmと比較して核のない粒子が多く存在する傾向にある。この実験結果からも、3.2節での考察と同様に、焼却処理の対象となるごみ中に焼却灰粒子の核になると考えられ

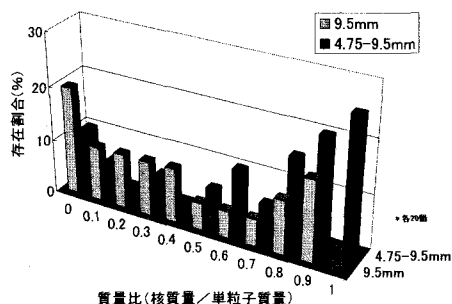


図-8 質量比の粒径別度数分布表

る不燃物等の混入割合が減少すると、核のない焼却灰粒子の数が増加し、焼却灰の粒度分布がより細かい粒径へ移行することが示唆される。

(3) 粒子の破碎形態

図-9に核を有する焼却灰粒子の応力-ひずみ曲線と破碎形態模式図を示す。地盤材料の単粒子破碎特性に関する報告では、破碎性を有する粒子は単粒子破碎試験において最大のピーク荷重 F (N)を示す前に、小さな荷重のピークを数回繰り返すとされている¹²⁾。焼却灰粒子についても、同様の現象が確認された。

ピークの出現回数を見ると、多様な物質が複合した溶融固化物(複合質溶融物)を核とする粒子が最もピークの出現回数が多く、これに対して単質な物質である溶

融固化物(単質溶融物)を核とする粒子はピークの出現回数が少なくなっている。複合質溶融物は、内部に空洞を有するものも確認され、角の欠けるような破碎や粒子の核の内部にクラックを引き起こしやすい複雑な核の構造および粒子構造を有していると判断できる。また、核のない粒子も他の分類と比較するとピークの出現回数が多く、核のない粒子も微細粒子の集合体であるため複雑な粒子構造を有していると考えられる。表-3には、粒子の分類別に、荷重が最大値を示すまでのピーク出現の平均回数 N (回)、荷重方向の粒子高さ d_0 (mm)、平均破碎強度 σ_f (N/mm)を示す。ただし、 σ_f は $\sigma_f = F/d_0^2$ により算出した。平均破碎強度については、複合質溶融物を核とする粒子と核のない粒子の平均破碎強度が低い値となっている。ピーク出現回数と比較すると、ピーク出現回数が多い粒子分類において平均破碎強度が小さいことが分かった。金属、ガラスに代表される不燃物を核とする粒子は溶融物と比較して破碎強度の値が大きく、また、核のない粒子は他の粒子分類と比較して平均破碎強度の値が大幅に低いことから、核の周囲を取巻く微細粒子の強度は小さく、焼却灰粒子の単粒子強度の発現は、核の存在および核の種類によって大きく異なると考えられる。

以上より、焼却灰を地盤骨材として有効利用することを考えた場合、焼却灰粒子の核の有無および核の分類、つまりごみ組成の影響が地盤強度に大きく影響する可能性が示唆された。よって、破碎強度の値が大きい、金属、ガラスに代表される不燃物の回収率が上昇すると、核の存在割合が減少し、核のない粒子の数が増加することが予想されるため、焼却灰粒子の単粒子強度の発現が損なわれることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、焼却残渣の性状に及ぼすごみ組成の影響を明らかにすることを目的とした。まず、焼却灰の粒子(粒径4.75~9.5mm)に注目して、焼却灰の粒子構造および生成過程について考察した。次に、単粒子破碎試験を行い、焼却灰の粒子構造および生成過程を踏まえ、焼却灰の地盤工学的特性とそれに及ぼすごみ組成の影響について考察した。得られた結論を以下に示す。

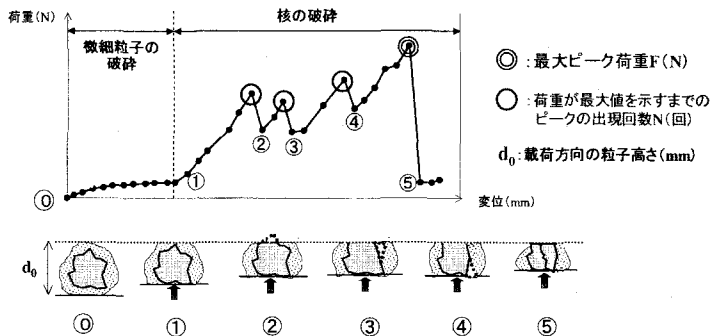


図-9 核を有する焼却灰粒子の応力-ひずみ曲線と破碎形態模式図

表-3 粒子分類別の単粒子破碎試験結果

粒子分類	ピーク出現 平均*回数 N (回)		平均*粒子高さ d_0 (mm)		平均*破碎強度 σ_f (N/mm ²)	
	H焼却灰	S焼却灰	H焼却灰	S焼却灰	H焼却灰	S焼却灰
	H焼却灰	S焼却灰	H焼却灰	S焼却灰	H焼却灰	S焼却灰
核あり粒子						
単質溶融物	1.8	2.6	6.66	6.22	3.45	4.09
複合質溶融物	4.9	4.0	6.21	6.62	2.82	2.67
ガラス	2.3	0.6	5.42	5.46	5.29	4.08
陶器	2.0	1.4	5.17	5.06	7.31	4.49
石	2.8	0.8	6.75	6.50	4.86	1.61
金属	0.0	0.8	5.80	7.70	7.13	3.82
その他	0.0	1.3	—	—	—	—
核なし粒子	3.3	3.3	6.77	6.28	0.33	0.39

*: 粒子60個の平均

- (1)焼却灰粒子は溶融物、ガラス等からなる核を持ち、周囲を微細粒子が取巻くという特異的な構造を有していた。核のない粒子も存在した。
- (2)焼却灰粒子の生成は、物質の発火点・融点、焼却炉内の構造、温度分布、水中への投入の影響を考慮すると、5段階の生成過程で起こっていると考えられる。
- (3)焼却灰粒子を核の有無、核の種類により8種類に分類した結果、溶融物を核とする粒子が全体の約半分、不燃物を核とする粒子が全体の約2割を占めていた。
- (4)核となる溶融物の存在割合が焼却灰の粒子生成に大きく影響することが考えられるため、溶融温度の低いガラス等の混入割合が減少し、ごみの発熱量も減少した場合、溶融物の生成割合、つまり焼却灰粒子の生成割合が減少すると考えられる。
- (5)破碎性を有する砂粒子の破碎形態と同様に、焼却灰粒子についても最大のピーク荷重を示す前に、小さな荷重のピークを数回繰り返すという現象が確認された。また、ピークの出現回数が多い複合質溶融物を核とする粒子分類においては平均破碎強度が小さく、金属、ガラスに代表される不燃物を核とする粒子は溶融物と比較して破碎強度が大きかった。また、核のない粒子は他の粒子分類と比較して平均破碎強度が大幅に小さかった。

以上のことより、焼却灰粒子の核となり得るガラス、金属類に代表されるごみ中の不燃物の混入割合が焼却灰の粒子形成、粒度分布、核の有無や種類に起因する焼却灰単粒子の強度等に大きな影響を及ぼすことが示唆された。よって、焼却灰を地盤骨材として有効利用することを考えた場合、微細粒子は強度が小さく破碎しやすいため、地盤強度の低下を引き起こす可能性があり、破碎強度の値が大きい、金属、ガラスに代表される不燃物の分別収集や回収が徹底されると、核の存在割合が減少し、核のない粒子の数が增加することが予想されるため、焼却灰粒子の単粒子強度の発現が損なわれることが考えられる。

【参考文献】

- 1)廃棄物年間2002年度版：環境産業新聞社(2002)
- 2)中村裕子，百瀬秀雄，加藤美一：横浜市における焼却灰有効利用事業－鶴見工場焼却灰再利用施設の運転について（2）－，第20回全国都市清掃研究発表会講演論文集，pp.122-124（1999）
- 3)花嶋正孝，島岡隆行，福田貞夫，矢代武基，平尾孝典：物理選別処理による一般廃棄物焼却灰の有効利用について－選別処理焼却灰の性状－，第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.410-412(1998)
- 4)花嶋正孝，島岡隆行，福田貞夫，矢代武基，平尾孝典：都市ごみ焼却灰の物理選別処理による有効利用について，第20回全国都市清掃研究発表会講演論文集，pp.116-118（1999）
- 5)花嶋正孝，島岡隆行，福田貞夫，矢代武基，平尾孝典：物理選別処理による一般廃棄物焼却灰の有効利用について（その2）－選別処理焼却灰の安全性－，第20回全国都市清掃研究発表会講演論文集，pp.116-118（1999）
- 6)権藤清路，佐藤研一，島岡隆行，花嶋正孝：一般廃棄物焼却残渣の有効利用，第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.485-487（2001）
- 7)大寺泰輔，中山裕文，島岡隆行：リサイクル促進に伴う収集廃棄物及び焼却残渣性状の変化予測，第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.25-27（2002）
- 8)平尾孝典，宮原健一，島岡隆行，花嶋正孝：粒度調整した処理焼却灰の力学的特性に関する研究，第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.479-481（2001）
- 9)化学データ集と食品の成分データ集 JR2BVB： <http://www4.ocn.ne.jp/~katonet/index.html>
- 10)千葉市の貝塚，備前焼： <http://www2u.biglobe.ne.jp/~KAIGUCCI/index.htm>
- 11)タクマ環境技術研究会編：ごみ焼却技術絵とき基本用語，オーム社(1998)
- 12)加登文学，中田幸男，兵動正幸，村田秀一：地盤材料の単粒子破碎特性，土木学会論文集 No.673/Ⅲ-54, pp.189-194（2001）