

家庭用焼却炉を用いたダイオキシン類の生成要因の検討

辰市 祐久 早福 正孝 古明地 哲人 岩崎 好陽

要 旨

紙類、材木、ベニヤ板、枯れ葉、ポリ塩化ビニルを混合した材木、それらの混合物等を家庭用焼却炉を用いて焼却したときの、ダイオキシン類の発生状況と、その生成要因を検討した。

家庭用焼却炉の炉温は平均400℃～600℃であり、排ガスの平均CO濃度は1%以上の高濃度の場合があり、変動が大きかった。材木にポリ塩化ビニルを約0.1～5.0%混入した場合の排ガス中のダイオキシン類濃度は、3.2～1100ng-TEQ/m³Nとなり、ポリ塩化ビニルの混入率が多くなるにつれて、ダイオキシン類濃度は急激に増加した。ポリ塩化ビニル混入率と排ガス中のダイオキシン類濃度との関係は、

$$Y=140X^{1.4}$$

X：ポリ塩化ビニル混入率 %

Y：ダイオキシン類濃度 ng-TEQ/m³N

となった。

また、ポリ塩化ビニルを1g焼却すると約140ng-TEQのダイオキシン類が生成した。焼却灰中のダイオキシン類濃度も同様に、ポリ塩化ビニルの混入率が多くなるにつれて増加した。排ガスのダイオキシン類をポリ塩化ジベンゾ-P-ジオキシン (PCDDs)、ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDFs)、コプラナ-PCB (Co-PCB) に分けたとき、大部分の焼却対象物でPCDFsが67%前後を示していた。

キーワード: ダイオキシン類、家庭用焼却炉、排ガス、ポリ塩化ビニル

1 はじめに

我が国におけるダイオキシン類の一般大気環境濃度は、欧米に比し高く、その発生源として一般廃棄物焼却、産業廃棄物焼却が主な原因¹⁾と考えられている。

大気汚染防止法及び廃棄物処理法の改正で、新設や既設の焼却炉でも規制が強化された。そのため、規制対象になる連続式の焼却炉については、焼却炉の炉温を850℃以上の高温に保ち、滞留時間を2秒以上とし、一酸化炭素濃度を100ppm以下にして燃焼する。さらに、排ガスを200℃以下に冷却して、バグフィルターでダストを除去する等の排出抑制対策^{2～6)}が実施に移されてきた。さらに2000年にはダイオキシン類対策特別措置法が施行され、幅広く排出抑制対策が進められることになった。

しかし、バッチ式の小型炉では炉の立ち上げ、立ち

下げ時にダイオキシン類が生成しやすいと考えられており、とくに家庭用焼却炉の場合、バッチ式で炉温が低く、完全燃焼しにくく、排ガス処理装置が設置されていないため、ダイオキシン類生成の可能性が高いと考えられた。

家庭用焼却炉を用いてダイオキシン類の生成を調査した例は、板橋区の報告⁷⁾など、その報告例は少ない。そこで、一般の家庭用焼却炉を用いて、家庭で廃棄されると想定される各種の廃棄物について焼却実験を行い、排ガス中及び焼却灰中のダイオキシン類の生成について調査して、焼却物別の原単位を求めた。さらに、ポリ塩化ビニルの混入率を変化させて焼却し、ダイオキシン類の生成要因について検討した。

平成10年度の東京都内における家庭用焼却炉の台数は6万台程度と推定され、原単位を用いることにより、

都内からの家庭用焼却炉より発生するダイオキシン類排出量が推計された。

2 実験方法

(1) 家庭用焼却炉

焼却実験は図1に示すステンレス製で円筒形の炉内容積80ℓ、火格子面積0.13m²の一般家庭用焼却炉を用いた。排ガスの採取と炉温度の測定は、家庭用焼却炉に直接備えられていた煙突の途中で行った。煙突からの排ガス対策としてフィルター付き排ガス水洗浄装置を設置し、排ガスの粉塵を処理した。

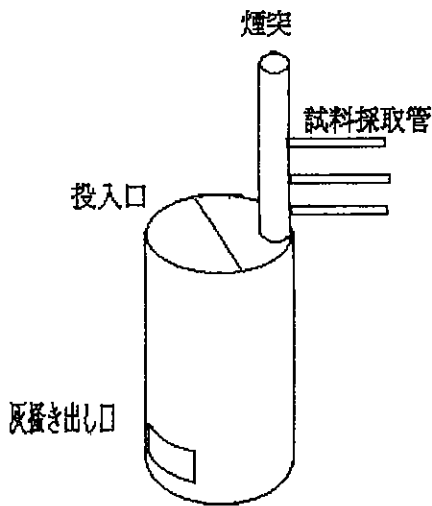


図1 家庭用焼却炉の概念図

焼却物の投入方法は、燃焼対象物の適当量を上部の投入口より投入した。焼却は燃焼対象物が燃え切らない内に、次の燃焼対象物を投入することによって、約3～10分間隔で行った。1回の実験は約10～20Kgの焼却対象物を約3～5時間かけて焼却した。燃焼時の空気の流入は灰掻き出し口の蓋を解放している状態の、自然流入とし、特別の補助燃料は加えなかった。

また、火格子より落下した焼却灰は適時掻き出し、冷却後重量を測定した。

(2) 焼却対象物

実験の焼却対象物を表1に示した。紙類は、漂白していない雑誌、表面加工されたコート紙と新聞折り込みの広告紙を用いた。材木は杉の角材を用い、ポリ塩化ビニルは建材用波板を小片にして、材木と設定した重量比(%)になるように併せて焼却した。混合物1

表1 家庭用焼却炉の焼却対象物

| 焼却対象物 | 内容 |
|-------|---|
| 紙類 | 再生紙(雑誌)、コート紙、広告紙 |
| 枯れ葉 | 寒ツバキ(枝付き)、ケヤキ、スダジイ、シラカシ |
| 木製品 | ベニヤ板(市販品)、材木(径3×4×40cmの杉角材) |
| 塩ビの混入 | 材木に0.1%、0.5%、2.0%、5.0%のポリ塩化ビニル |
| 混合物 | 混合物1(広告紙49%+枯れ葉49%+ポリエチレン2%) 混合物2(広告紙48%+枯れ葉48%+ポリエチレン2%+食塩0.2%) 混合物3(広告紙50%+枯れ葉46%+ポリエチレン2%+塩化ビニル2%) |

の広告紙、ケヤキの落ち葉、ポリエチレンフィルムは交互に投入し、混合物2の食塩は粒状でポリエチレンフィルムの中に入れて投入した。

焼却実験は同一条件の焼却対象物について、一部を除き2回以上行い、それぞれ排ガス中のダイオキシン類濃度等を分析し、焼却灰の分析はその実験のうち1回分の試料で行った。

(3) 分析方法

ダイオキシン類：厚生省「廃棄物処理におけるダイオキシン類標準測定分析マニュアル」(1997年2月)によった。家庭用焼却炉からの排ガスはタール分や粉塵が多いために、円筒濾紙をしばしば交換して採取した。また、一部はダストチューブを使用して採取した。

焼却灰は5mmメッシュの篩を通過後の試料について測定した。

コプラナー-PCB：環境庁「ダイオキシン類に係わる底質調査暫定マニュアル」(1998年7月)により、ダイオキシン用試料から分取して測定を行った。

ダスト：JIS Z8808 円筒濾紙法

窒素酸化物：化学発光方式による連続測定

一酸化炭素：赤外線吸収方式による連続測定であり、

今回使用した測定器では最大測定範囲が5000ppm程度であったため、空気による希釈によって数%程度まで測定範囲を拡大して使用した。

酸素：ジルコニア方式による連続測定

クロロベンゼン、クロロフェノール：n-ヘキサン吸収後、ガスクロマトグラフ-マススペクトル法による測定

温度：白金-白金ロジウムによる熱電対法による連続測定

なお、今回の調査結果のダイオキシン類は、PCDDs、PCDFs、Co-PCBの合算値とし、等価毒性係数(TEF)は1998年に発表されたWHO⁸⁾の値を用

いた。

3 結果及び考察

(1) 燃焼温度及び排ガスの成分

各焼却対象物の焼却温度及び排ガス成分を表2に示した。平均の排ガス温度は、400℃～600℃であり、材木に塩化ビニルが混入した焼却物ではほとんどが500℃を越えていた。連続測定をした排ガス温度は焼却対象物の投入後から上昇し、短時間に燃え尽きるために下降するという波形を繰り返していた。

表2 排ガス温度と排ガス成分の濃度

| 焼却対象物 | 焼却温度 ℃ | 排ガス | | | |
|--------------|-----------|---------------------------|---------------------|-------------|--|
| | | ダスト g/m ³ N | O ₂ % | CO % | NO _x ppm O ₂ 12% |
| 再生紙 | 550 | 0.10 | 10.3 | 0.35 | - |
| コート紙 | 433 | 0.42 | 10.8 | 0.24 | - |
| 広告紙 | 446~517 | 0.26~0.59 | 8.8~10.2 | 0.041~0.094 | 52 |
| 葉ツバキ(核付き) | 394 | 2 | 10.2 | 0.46 | - |
| ケヤキの枯れ葉 | 394~412 | 0.92~1.7 | 9.2~11.7 | 0.27~2.0 | 100~150 |
| スダジイの枯れ葉 | 541 | - | 7.8 | 1.1 | 65 |
| シラカシの枯れ葉 | 498 | - | 10 | 1.6 | 63 |
| ベニヤ板 | 517 | 0.20 | 9.7 | 0.43 | - |
| 材木 | 443~484 | 0.06~0.23 | 9.1~10.6 | 0.08 | - |
| 材木+PVC(0.1%) | 515 | 0.039 | 10.3 | 0.33 | - |
| 材木+PVC(0.5%) | 504~550 | 0.054~0.28 | 4.6~10.1 | 0.32~0.70 | 28~35 |
| 材木+PVC(2.0%) | 499~600 | 0.31~0.39 | 5.0~6.0 | 0.45~0.60 | 31~33 |
| 材木+PVC(5.0%) | 524~528 | 0.41~0.52 | 4.6~5.7 | 0.74~0.80 | 26~52 |
| 混合物1 | 480~486 | 0.58~0.92 | 8.1~9.2 | 1.4~1.7 | 69~77 |
| 混合物2 | 487~506 | 0.70~0.97 | 8.1~8.9 | 0.90~1.40 | 82~84 |
| 混合物3 | 498~501 | 1.1~1.7 | 5.3~5.4 | 1.6~1.8 | 69 |

排ガスのダスト濃度は、枯れ葉あるいは枯れ葉を混合した焼却物を除き、1g/m³N以下であった。排ガスの平均酸素濃度は5～10%前後であり、塩化ビニル混入率が増加したとき5%前後の低い値であった。

一酸化炭素濃度の連続測定結果では、焼却物の投入後に急激に濃度が上昇し、焼却対象物が順調に燃焼し始めると、大きく低下していた。一酸化炭素濃度の平均値は、材木、広告紙で0.1%以下で、他の焼却物では0.2%～1.8%を示し、特に枯れ葉や混合物では1%以上となった。

排ガス中の窒素酸化物濃度(O₂12%換算値)の平均値は、炉温が600℃以下のため、枯れ葉を除き多くは90ppm以下を示していた。

(2) ダイオキシン類の分析結果

図2は排ガス中のダイオキシン類濃度を焼却物ごとに平均して、対数表示で示し、その平均値を図中に示した。排ガス中のダイオキシン類濃度(O₂12%換算値)は、材木、ベニヤ板からは1.3ng-TEQ/m³N以下であり、紙類については、0.85～4.4ng-TEQ/m³Nの値で、広告紙でやや高い値が見られた。枯れ葉のダイオキシン

ケヤキの

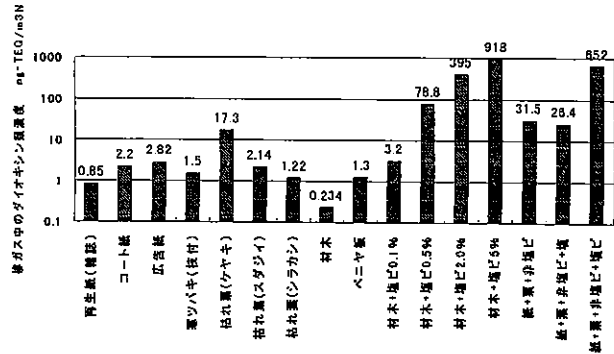


図2 焼却物別の排ガス中のダイオキシン類濃度

濃度は、8～26ng-TEQ/m³Nを示し、紙類よりやや高い値であった。材木にポリ塩化ビニルを0.1～5.0%混入した場合の排ガス中のダイオキシン類濃度は、3.2～1100ng-TEQ/m³Nで顕著に高くなっていた。また、混合物3において葉と紙にポリ塩化ビニルが2%混入した場合の焼却物も、490～810ng-TEQ/m³Nの高いダイオキシン濃度を示していた。

焼却灰中のダイオキシン類濃度は、材木、広告紙からは1pg-TEQ/g以下であり、材木にポリ塩化ビニルを0.1～5.0%混合した場合の濃度は、2.7～150pg-TEQ/gの高い値を示した。また、都市ごみ焼却炉と家庭用焼却炉の焼却灰のダイオキシン濃度を比較した場合、家庭用焼却炉が1桁ないし2桁低かった。

(3) ポリ塩化ビニル混入率と排ガス中のダイオキシン類濃度との関係

杉角材に硬質ポリ塩化ビニルを、0%、0.1%、0.5%、2%、5%程度混合して焼却した場合の排ガス中のダイオキシン類濃度を測定した。その結果を両対数表示で図3に示した。図3からポリ塩化ビニル混入率を増加させると、排ガス中のダイオキシン類濃度も混入率に応じて増加していた。

図3のポリ塩化ビニル混入率(X)%と排ガス中のダイオキシン濃度(Y)ng-TEQ/m³Nとの関係を計算したとき、

$$Y = 140 X^{1.4}$$

となり、相関係数R²は0.98(n=9)となった。

なお、既設焼却炉のダイオキシン排ガス抑制基準値である80ng-TEQ/m³Nに対応するポリ塩化ビニル混入率は約0.4%に相当していた。

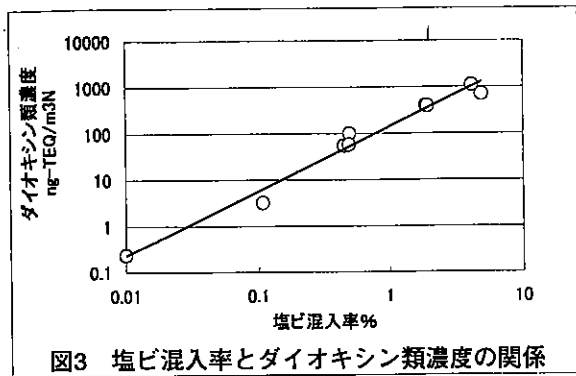


図3 塩ビ混入率とダイオキシン類濃度の関係

(4) 焼却灰中のダイオキシン類濃度及びポリ塩化ビニルとの関係

図4はポリ塩化ビニルの混入率と焼却灰中のダイオキシン類濃度との関係を示した。図4から、焼却灰中のダイオキシン類濃度も排ガスの場合の様にポリ塩化ビニルの混入率が高まると、焼却灰中のダイオキシン類濃度も上昇していた。

また、家庭用焼却炉の焼却灰のダイオキシン類濃度は東京都の都市ごみ焼却炉からの焼却灰の濃度⁹⁾(320pg-TEQ/g)より1桁以上低かった。

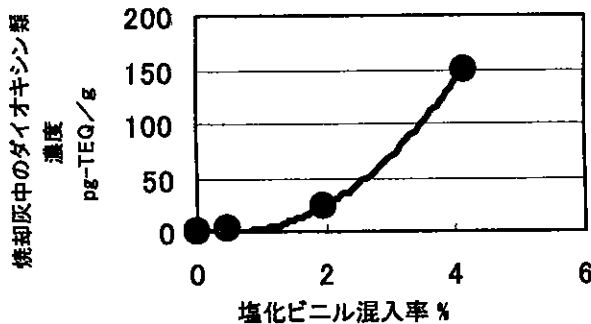


図4 塩ビ混入率と焼却灰中ダイオキシン類濃度の関係

(5) ダイオキシン類発生量の原単位

今回の実験から、焼却対象物ごとの排ガスのダイオキシン類発生量の原単位を全排ガス量、ダイオキシン類濃度と焼却物重量から算出し、焼却灰の原単位を灰のダイオキシン類濃度、焼却灰量と焼却物重量から算出した。焼却対象物として、広告紙、材木、枯れ葉(ケヤキ)、ポリ塩化ビニル、混合物1、混合物3を取り上げた。計算された家庭用焼却炉における焼却対象物1gあたりのダイオキシン発生量の原単位を表3に示した。

表3 ダイオキシン類発生量の原単位

| 焼却対象物 | 排ガス (ng-TEQ/g) | 焼却灰 (pg-TEQ/g) |
|----------|----------------|----------------|
| 広告紙 | 0.017 | 0.0021 |
| 材木 | 0.0019 | 0.0037 |
| ケヤキの枯れ葉 | 0.17 | 0.28 |
| スダジイの枯れ葉 | 0.015 | 0.26 |
| シラカシの枯れ葉 | 0.0074 | 0.90 |
| PVC | 140 | 10 |
| 混合物1 | 0.28 | 0.63 |
| 混合物3 | 5.6 | 11 |

表3から、排ガス中におけるポリ塩化ビニルの原単位が他の焼却対象物に比べて数桁高く、少量のポリ塩化ビニルの混入でもダイオキシン類が多く発生することが示された。また、ポリ塩化ビニルが2.0%の混合物3では、排ガスの原単位が塩化ビニルから想定される2.8ng-TEQ/g以上に検出されていた。この理由としてはWurts¹⁰⁾の結果のようにポリエチレンを混入したため、不完全燃焼などの理由からダイオキシン類の生成が多くなったと考えられた。

焼却灰のダイオキシン類原単位は、ポリ塩化ビニルでも10pg-TEQ/gであり、排ガス中に比べ3桁程度低く、焼却によって生成したダイオキシン類の大部分は排ガスとして出ている。

また、平成12年3月東京都環境保全局は、平成10年度に都内の家庭用焼却炉から発生したダイオキシン類排出量が、今回の排ガスの原単位等を用いて1.8g-TEQと推測した。これは都内の全排出量の3.4%に当たるとした。

(6) 焼却対象物別のダイオキシンの構成比の比較

排ガス中のダイオキシン類の4~8塩素数別構成パターンについて、PCDDsは図5に示し、PCDFsは図6に示した。図5と図6より、排ガス中の濃度は、PCDFsがPCDDsより一桁程度多く検出していた。塩素数別に分けた場合、八塩化物から四塩化物の順で高く生成される傾向を示していた。これらのPCDFsが高く、塩素数別ではT₄CDFsが高い傾向を示したのは、安原¹¹⁾らの小型焼却炉や長田¹²⁾らの都市ごみ焼却炉の結果とも一致していた。

次に、表4に排ガス中のダイオキシン類に占める、PCDDs、PCDFs、Co-PCBの割合をTEQ換算した値で示した。また、表4では排ガス中について示しているが、焼却灰については全体的に濃度が低く、検出限界

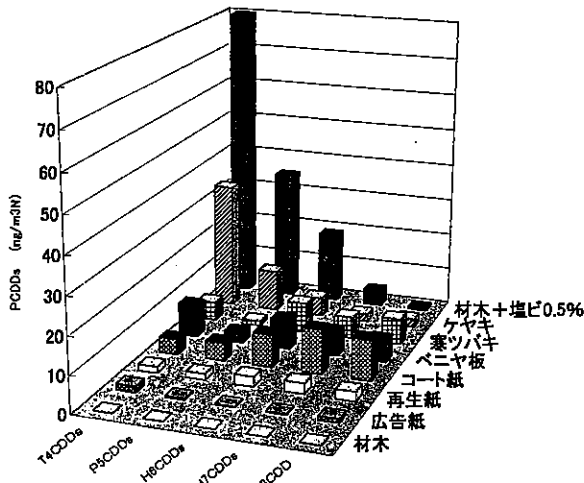


図5 排ガス中のPCDDs

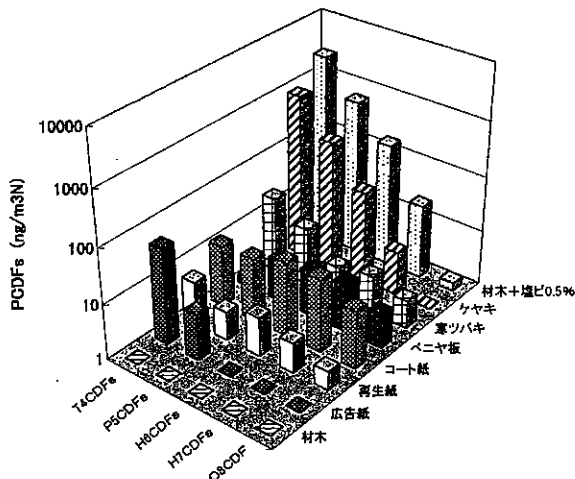


図6 排ガス中のPCDFs

表4 ダイオキシン類の構成成分の比率 (%)

| 焼却対象物 | 排ガス中のダイオキシン類 | | |
|-----------------|--------------|-------|---------|
| | PCDDs | PCDFs | Co-PCBs |
| 広告紙 | 26 | 68 | 6 |
| ケヤキの枯れ葉 | 25 | 70 | 5 |
| 材木 | 30 | 66 | 4 |
| 材木 + PVC (0.5%) | 31 | 66 | 3 |
| 材木 + PVC (2.0%) | 28 | 69 | 3 |
| 材木 + PVC (5.0%) | 31 | 66 | 3 |

未満のデータも多いため、記載していない。

表4からも明らかなおお焼却排ガスについては、Co-PCBの占める割合は低く、どの燃焼排ガスでも数%のレベルであり、10%を越えることはなかった。また、各焼却物ともPCDDsは約30%程度であり、残りの67%前後はPCDFsが占めていた。

(7) 焼却物中の食塩によるダイオキシンの生成

ダイオキシンの生成に及ぼす食塩の影響を調べるため、燃焼対象物（紙、枯れ葉など）に食塩を0.2%を添加した混合物2の場合と、混合物1の食塩を添加しない場合とのダイオキシン類濃度を比較した。

それぞれ2回の実験を行ったところ、食塩を添加した場合25~28ngTEQ/m³Nであり、しない場合のダイオキシン類濃度25~40ngTEQ/m³Nより低く、食塩の添加によるダイオキシンの生成の有意差は認められなかった。

なお、安原ら¹¹⁾は食塩水に新聞を浸し、乾燥後に小型焼却炉で焼却した場合、食塩によるダイオキシン類生成の影響が比較的大きいことを報告していた。この相違の原因として、実験に用いた小型焼却炉の保温力が高いことや再燃焼装置が付設され、排ガス温度が比較的高かったことなどがあげられる。

4 まとめ

今回の実験の結果、以下のことが明らかになった。

1) 家庭用焼却炉の排ガス温度は、400℃~600℃程度で、一酸化炭素の平均濃度は材木、広告紙で低かったが、枯れ葉や、ポリ塩化ビニルを混入した混合物で1%以上の高濃度を示した。

2) 排ガス中のダイオキシン類濃度は、材木、ベニヤ板からは1ng-TEQ/m³N程度以下であり、紙類については、0.85~4.4ng-TEQ/m³Nの値を示した。ケヤキの枯れ葉からは8~26ng-TEQ/m³Nで、特にケヤキの葉は比較的高い値が検出された。

3) 材木にポリ塩化ビニルを0.1~5.0%混入した場合の排ガス中のダイオキシン類濃度は、3.2~1100ng-TEQ/m³Nとなり、ポリ塩化ビニルの添加量が高くなるにつれて、ダイオキシン類濃度が増加していた。ポリ塩化ビニル混入率 (X:%) と排ガス中のダイオキシン濃度 (Y:ng-TEQ/m³N) との関係は、

$$Y = 140 X^{1.4}$$

となり、相関係数 R²は0.98 (n=9) となった。

4) 材木に塩化ビニルを0.1~5.0%混入した場合の焼却灰ダイオキシン濃度は、2.7~150pg-TEQ/gで、ポリ塩化ビニルの混入率が高くなるにつれて増加していた。

5) 今回の調査からダイオキシン類発生原単位を算出した。その結果、家庭用焼却炉でポリ塩化ビニル1gを焼却すると排ガス中に約140ng-TEQのダイオキシン類が発生した。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、(旧)東京都環境保全局大気規制課の多大なる協力を得ましたことをここに深く感謝いたします。

文 献

- 1) 環境庁：ダイオキシン排出抑制対策検討会第二次報告書、1999.
- 2) 小林義男：ごみ焼却におけるHCL除去とダイオキシン排出量の抑制，廃棄物学会誌，10, 86-87 (1999)
- 3) 長田容，鈴木実，藤井聡，青木丈彦，横山隆：ストーカ炉におけるダイオキシン等低減化技術，NKK技報，159, 1-5 (1997).
- 4) 佐々木信，池永康博，川上亨，塚本輝彰，佐藤誉司，二村修：ダイオキシン対応のストーカ式ごみ焼却施設の設計事例，エバラ時報，177, 24-29 (1997).
- 5) 木村哲雄：ごみ焼却炉におけるダイオキシン対策技術，大気環境学会年会講演要旨集，38th，240-241 (1997).
- 6) 吉川昌宏，三樹真，芝川重博，石川龍一，小瀬公利，坪井晴人，村川忠夫：ごみ処理に係るダイオキシン類の削減対策 焼却施設の具体的なダイオキシン対策について，都市清掃，50,218, 245-271 (1997).
- 7) 板橋区：焼却炉実態調査（ダイオキシン測定実験編）報告書（平成10年9月），1998
- 8) WHO：Executive Summary, Assessment of the health risk of dioxins : re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI), 1998.
- 9) 東京都清掃局：区部の清掃工場における焼却灰のダイオキシン類濃度測定結果（平成11年9月現在），1999.
- 10) M.Wirts,W.Lorenz,m.Bahadir: Does co-combustion of PVC and other plastics lead to enhanced formation of PCDD/F?. Chemosphere., 37, 8, 1489-1550(1998)
- 11) 安原昭夫,形見武男,安田 裕,宮崎 徹 :小型焼却炉におけるダイオキシン類の生成実態，第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集，805-807(1999).
- 12) 長田 容,鮎川 将,横山 隆,バグフィルタ高温使用時のダイオキシン類挙動，第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，662-664(1998).