

B-14 地球温暖化防止対策技術の評価及び評価手法の開発に関する研究

(4) 民生・生活関連分野の温室効果ガスアナリシス, 対策技術探索, 個別技術評価に関する研究

② 微量温室効果ガスの発生アナリシス, 対策技術探索, 評価に関する研究

研究代表者

国立公衆衛生院

渡辺征夫

厚生省

国立公衆衛生院

地域環境衛生学部

環境評価室

渡辺征夫

環境健康影響室

後藤純雄

廃棄物工学部

田中 勝

宮崎正信

廃棄物処理工学室

松澤 裕

平成2～5年度合計予算額 20,212千円

(平成5年度予算額 5,736千円)

[要旨]

廃棄物焼却などの燃焼排ガスや廃棄物埋立地の発生ガスなどの分解ガスに伴い放出される二酸化炭素(CO₂), メタン(CH₄), 亜酸化窒素(N₂O), 一酸化炭素(CO), 低級炭化水素類, ハロゲン化炭化水素類などの地球温暖化関連の化合物のために, 簡便で高精度な試料採取法や分析手法を開発した。

廃棄物処理に伴い発生する温室効果ガスの発生因子を総合解析し, まず, それらに係わるデータベースの整備・解析, さらに焼却, 埋立, し尿処理などの各プロセスから放出される温室効果ガスの実態調査を行った。そして, 焼却プロセスから放出される温室効果ガスの発生総量, さらに他の固定燃焼施設を含めたメタンの排出総量を国内, 国外について推定した。

また, 廃棄物処理に伴い発生する利用可能エネルギー量や, それらの処理で現在消費しているエネルギー量などについても推算をした。

[キーワード; 温室効果ガス, 調査, 廃棄物処理, 都市ごみ焼却, ごみ埋立地, し尿処理施設]

1. 序

地球温暖化に関連して, 大気中のCO₂などの幾つかの温室効果ガスが問題とされているが, 本研究で主な対象成分としているCH₄, N₂O, フロン類などの微量温室効果ガスは, それらを含めた温室効果が1980年代以降ではCO₂よりも大きく, 今後一層増大すると予測されている。しかし, これらの化合物の発生状態は, CO₂に較べると著しく複雑で不明な点が多く, これらの発生要因が明確になれば, その排出抑制はCO₂よりも容易な場合もあり, 地球温暖化の防止に果たす役割は大きいと推察される。

そこで, 本研究では, これらの微量温室効果ガスの民生・生活関連分野(特に, 廃棄物処理)を中心とした排出実態を調査し, さらに排出抑制技術の探索, さらにその有効性の評価などについて研究することを目的とした。また, 廃棄物処理については, 対策を立案する基礎となる処理実態についても不明の点が多いので, それらの統計数値の整備も研究の中に含めて考え, それらの処理に伴い発生, あるいは消費されるエネルギー量の推定も, 最終的な温室効果ガスの発生抑制に寄与するので, 本研究の一環として扱った。

2. 温室効果ガスおよび関連化合物の試料採取法および分析法の開発

2. 1 はじめに

地球温暖化に関連しては、CO₂、CH₄、N₂Oなどの温室効果ガスの他に、それらの寿命に影響するCOなどの関連化合物の発生が問題とされている。本研究では、それら化合物の試料採取法や分析法についての以下のような検討を行った。

2. 2 試料採取法

試料採取に際し、試料保存時にSO₂、NO_x、水分が共存すると採取容器内でN₂Oが生成して、実際の排ガス中の濃度が増加すること¹⁾²⁾から、それらを除くためのいくつかの吸収剤を検討した。その結果、0℃に冷却したときに固着しない、あるいはCO₂がほぼ100%通過するなどから、1規定のNa₂CO₃水溶液が現時点では最適と考えられた。

排ガス採取の場合には、その溶液の20mlを氷冷したトラップ（内容量；約120ml）に入れ、その後〈グラスウールを入れたミスト除去トラップ、両端にテフロン製ニードルバルブのあるパイレックスガラス製の試料採取容器（1.0-1.5L）、吸引ポンプ〉の順にテフロン管（3mmO.D.）で接続した。なお、埋立地の発生ガスのようなSO₂濃度が低い場合には吸収トラップを除いた。試料ガスはポンプで約1L/minの流量で約10-15分間吸引され、採取容器の容積の10倍以上が流され、試料ガスで容器内部を完全に置換して採取された。

同様な目的に、ソーダライムなどの吸収剤と充填した管を用いた事例も報告されている³⁾が、ここで採用した吸収液の方が調製が容易で、使用後の処理も簡単であるなどの利点が認められた。

2. 3 GC分析法

本研究で対象としている化合物は、古くから頻繁に分析されてきたものであり、従来のGC（ガスクロマトグラフ）方法を踏襲することにしたが、特に、短時間に多数の試料を分析する必要があることから、以下に述べるような簡便で高精度な方法に改良した。

器材を準備する上では、分離カラムや検出器が共有できることが望ましい。そこで、N₂、O₂、CO、CO₂は、共通のカラム（モキータ社製75A、40/60 mesh, SUS, 1.8m(L)*0.3mm(O.D.))で、カラム温度をCO₂は250℃で、それ以外は80℃、検出器を低濃度のCOはメタンに変えてFIDで、それ以外はTCDで分析することにした。また、分離カラムの入口と出口を4方バルブに取り付けてバックフラッシュ流路とし、必要に応じて、流路を逆流させ、内部に残留している成分を払い出してベースラインを早期に安定化できるようにした。

N₂O分析の際に、試料中に共存するCO₂や酸素が分析を妨害するのが認められた。すなわち、CO₂が5%以上の濃度で共存するとN₂Oの見かけの濃度が約3倍増加した。そこで、微量(0.3ml/min)のCO₂をキャリアーガス中に混入する排ガス分析法を考えた。これにより、CO₂や酸素の影響がほとんど無視できるようになり、さらに感度も最大5倍程度高くなった。

また、N₂Oの分析は多くの場合ECDを用いるが、この検出器は放射線源を有するので設置や利用に多くの制約がある。そこで、非放射線源を有するECD（NR-ECD）を用いて、N₂Oの分析を試みた。その結果、感度は幾分悪く大気中のN₂Oの測定は誤差が多いが、ppmオーダーの排ガスの測定には問題なく利用できることが分かった。

また、低濃度のCOの分析では、COをCH₄に変えて、検出したが、そのためにNi触媒（GLサイエンス社製）の充填管（SUS管：17cm*6mmOD.*4mmI.D.）を用いた。触媒管は、窒素気流（50ml/min）中で600℃下で1晩焼きだして、活性化させた。当初の変換効率は85%以上あるが、数カ月利用すると60%以下に低下するので、その時点で交換するようにした。

CH₄と非メタン炭化水素(NMHCs)を同時に分析できるように、分離カラムを4方のバルブに取り付けバックフラッシュできるように改善した。C₂炭化水素のエタン、エチレン、アセチレンの分離にはPorapak-N（100/120 mesh）をSUS管（3m*3mmO.D.）に充填したカラムを用いた。また、C₃以上の炭化水素には、Dimethyl sulfolane 10% on C-22(40/60), SUS;1100cm*3mmO.D.を用いた。

また、フロン等の温室効果を有するハロゲン化炭化水素類の分析法を検討し、カラム [10%Na₂SO₄ on Polasil-A (80/100), 2m×1.5mm], カラム温度 [100°C(1min-2.0°C/min-138°C(20min))], キャリヤガス [N₂:29ml/min], 検出器 [ECD, ⁶³Ni, 10Ci, 320°C] とした。

これらのGC分析条件を表1に要約した。

表1 ガス成分の分析条件

化合物	導入法	分離カラム	GC分析条件
N ₂ , O ₂	計量管法	Mo. Si. 5A, 1.8m	80°C, He:40ml/min, TCD
CO ₂	計量管法	上に同じ	250°C, He:40ml/min, TCD
CO	計量管法	上に同じ	80°C, He:40, H ₂ :40, FID
N ₂ O-1	計量管法	Porapak Q, 3m	36°C, N ₂ :47, CO ₂ :0.4, ECD
N ₂ O-2	計量管法	Porapak Q, 3m	40°C, pureHe:30, NR-ECD(pureHe:135, CO ₂ :3)
SO ₂	シリンジ法	10%TCP/C545, 2m	80°C, N ₂ :43ml/min, FPD
CH ₄ , NMHCs	計量管法	Porapak N, 3m	60°C, N ₂ :25ml/min, FID
C ₂ ・HCs	液酸濃縮法	Porapak N, 3m	70°C, N ₂ :25ml/min, FID
C ₃ -C ₅ ・HCs	液酸濃縮法	10%DMS/C22, 11m	0°C, N ₂ :40ml/min, FID
Halo. HC	計量管法	10%Na ₂ SO ₄ , 2m	100-138°C, N ₂ :40ml/min, ECD

また、試料の導入には、計量管法と液体酸素冷却濃縮法を用いた。分析精度と試料の利用効率を上げるために、計量管法では管内と試料採取容器までの接続部を真空ポンプで引いて、試料ガスの必要分だけを取るようにした。こうすることにより、ガスタイトシリンジで導入したときには分析精度が相対標準偏差でN₂は10%であったものが、2%と向上した。

2. 4 携帯型GCによる現地分析法

マイクロセンサ・ガス分析計(日本タリソ製)による、調査地点での現地測定の可能性とそれに必要なハンドリング技術や周辺ソフトを開発した。すなわち、国外の廃棄物埋立地の発生ガスを対象として、現地までの輸送方法、現地での設置方法・器材点検方法、また、試料ガスの採取法と分析機への導入法、検量法等を検討し、N₂, O₂, CO₂, CH₄, N₂Oなどの一斉分析を実現した。具体的には、埋立地における試料採取は、1m×1m×高さ30cmの箱型の容器と、直径10cm, 長さ70-300cmの円筒で、発生してくるガスを集めて、そのガスを冷却トラップで水分を除いた後、テドラバッグにポンプか注射筒で取って分析に供した。ガス分析計の分析条件は、カラム;Molec. S. 5A・PLOT10m, 90°C, 20psi, カラム;PoraQ・PLOT8m, 40°C, 20psiとし、キャリヤには高純度ヘリウムガス(0.999999以上)を用いた。本方法のCH₄とN₂Oの検出限界は、それぞれ約5と1ppmであった。また、大量に現地で取ったデータの効率的な解析法についても検討した。利用事例は、4.3.2(2)に示す。

3 有機性廃棄物の生物分解に伴い発生するガス量の自動計測法

3. 1 はじめに

発生ガス量の計測には、様々な方式が考えられ、特に、最近では熱式質量流量計が自動記録・自動制御になじみ易い事もあって普及してきた。しかし、その方式は、生物分解ガスのように組成が変化したり、腐食性の成分が発生する場合には使用できない欠点を有する。そこで、本研究では、このような欠点を補い、1台で広い流量範囲を自記計測できる方式の開発を検討した。

3. 2 実験装置

湿式ガスメータ（WTM，1回転，0.5ℓ）：品川精機製WNKDa-0.5A型，WK-0.5C型，乾式ガスメータ：同DP-1B-1型，瞬時流量指示計：品川精機製AZP-1DⅡ型，パソコン：NEC-PC8801，レコーダ：横河電気製3046型—を用いた。尚，瞬時流量指示計はパルス発信器付きのWTMから発信されるパルス（50回/1回転，または500回/1回転）を受けて，その頻度から流量を計算し表示する機器である。

3.3 結果と考察

WTMは，各種流量計校正のための2次標準器として利用されるなど，安定した正確さを有する機器である。また，ガス組成の変化の影響を受け難く，耐腐食でもある。そのようなWTMの利点を生かした自記式流量計が，数年前に開発された⁴⁾が，それには基本的な制約があることが判明した。すなわち，一定流量でガスを流しても，積算を行うパルスの数を少なくすると見かけの値は大きく変動し，WTMが1回転する体積以上が流れないと使用できず，実用的な利用範囲は1.0L/min以上に限定された。この原因を2種のWTMで調べた結果，構造に由来する回転ムラに起因し，装置の改良だけでは，その欠点を完全に除くことは，困難であることが分かった。

そこで，そのムラをデータ処理過程で補正することを考えた。すなわち，予め各パルスの間を10ml(=500ml/50P)または1ml(=500ml/500P)セルと見なし，実測値からそれぞれのセルの体積補正係数を求め，その値をパソコンに入力しておく。測定時，WTMから発信されたパルスを瞬間流量指示計で流量に換算し，パソコンに転送し，そこで補正流量に変換し，表示，保存する—といった手法である。補正後の流量の測定誤差は，変動係数で3%以内であり，通常の計測には十分な精度であると判断された。

この方式を用いれば，流量が5L/minの大流量から，1ml/min以下の微小流量までの広い範囲を正確，簡便に計測できるようになり，従来では困難であった厨房廃棄物などの分解により生じる微量の発生ガスをモニターすることが可能となった。

4 民生・生活関連分野からの温室効果ガスの発生状態の解析

4.1 廃棄物処理に伴い発生する温室効果ガスの発生因子および総合評価

廃棄物処理は，民生・生活分野の中でもメタン等の微量温室効果ガスに係わる可能性の高い分野であるので，本研究ではその分野を重点的に取り上げてた。

4.1.1 関連する因子

○全般に係わるもの

廃棄物の発生総量； M_0 ，廃棄物の焼却比率； R_{com} ，廃棄物の埋立比率； R_{lf} ，
ごみ中の有機炭素比率； C_{org}

○焼却処理に係わるもの

未燃炭素の残存比率； R_{res} ，メタンの排出係数； F_{ch4} ，亜酸化窒素の排出係数；
 F_{n2o} ，廃棄物中のフロン等の存在比率； R_{ffc} ，廃棄物中のフロン等の分解比率；
 B_{ffc} ，焼却エネルギーの利用による実質二酸化炭素低減化率； D_{co2}

○埋立処理に係わるもの

ごみ中の埋立期間中に生物分解を受ける炭素の比率； C_{deg} ，埋立中に分解されて
ガスとして放出される比率； R_{gas} ，その放出ガス中のメタンの平均比率； R_{ch4}
放出メタンの焼却率； R_{ch4b} ，埋立期間中に自然発火等で燃焼する炭素分の比率；
 $R_{com\#}$ ，未燃炭素の残存比率； $R_{res\#}$ ，メタンの排出係数； $F_{ch4\#}$ ，
亜酸化窒素の排出係数； $F_{n2o\#}$ ，

*排水系から除かれる炭素分は分解して二酸化炭素になると考える。

*放出メタンの焼却エネルギーの利用による二酸化炭素低減化は無視する。

*埋立地からの亜酸化窒素の発生は無視できるとする。

○温暖化指数

二酸化炭素；G_{co2}，メタン；G_{ch4}，亜酸化窒素；G_{n2o}，フロン；G_{ffc}

4. 1. 2 総合評価のための温室効果度合い（E_{co2}，二酸化炭素換算単位）の推算式

○焼却処理

$$E_{co2} = M_o \cdot R_{com} [C_{org}(1-R_{res})G_{co2} + F_{ch4} \cdot G_{ch4} + F_{n2o} \cdot G_{n2o} - R_{ffc} \cdot B_{ffc} \cdot G_{ffc}] - D_{co2} \cdot G_{co2}$$

○埋立処理

$$E_{co2} = M_o \cdot R_{if} \cdot C_{org}(1-R_{com})C_{deg} \cdot R_{gas} [R_{ch4}(1-R_{ch4b})G_{ch4} + (1-R_{ch4})G_{co2}] + M_o \cdot R_{if} \cdot C_{org} \cdot R_{com} (F_{ch4} \cdot G_{ch4} + F_{n2o} \cdot G_{n2o})$$

4. 2 日本における廃棄物処理の現状の解析

都市ごみの処理は大きく分けると、焼却と埋立である。埋立処分は、日本において1975年当時には処理量の46%ほど占めていたのが、以後漸減してきて、1988年度では、1081万ton（23%）となっている。国内の都市ごみ焼却施設やし尿処理施設における年間処理量や稼働日数などのデータはデータブック⁵⁾として刊行されているが、集計した数値はまとめられていなかった。そこで、我々は、dBASE-III PL

表2 炉種ごとの焼却処理量（昭和62年度）

焼却炉の種類	施設数 ヶ所	処理能力 万ton/年	処理量 万ton/年	処理量 比率,%
全連続燃焼式	409	4,241	2,263	69.4
准連続燃焼式	230	642	249	7.6
機械化バッチ式	970	990	523	16.0
固定バッチ式	284	90	47	1.4
その他, 不明			180	5.5
高速堆肥化	29	23	?	?
合計	1,922	5,986	3,262	

US及びLotus-1, 2, 3(R2. 2J)を用いてデータベースを作成し、都市ごみ焼却施設及びし尿処理施設の型式別の年間処理量を求めた。結果を表2と表3に示す。都市ごみの焼却では、全国409ヶ所の連続式炉が約70%の都市ごみを処理していることが分かった。また、国内のし尿処理施設における処理量は、嫌気型>好気型>標脱型>高負荷型の順にあり、メタンの生成が多い嫌気型の占める比率がもっとも多く、約35%であった。

表3 方式別のし尿処理能力および処理量，単位:万kl/年，（1989年度）

施設種類 処理法	総処理能力 (比率,%)	し尿処理量 (比率,%)	汚泥処理量 (比率,%)	処理量合計 (比率,%)
嫌気性	1,318 (32)	805 (36)	270 (29)	1,076 (34)
好気性	967 (24)	518 (23)	226 (25)	744 (23)
標脱	873 (21)	480 (21)	227 (25)	707 (22)
高負荷	167 (4)	105 (5)	33 (4)	138 (4)
他, 不明	783 (19)	352 (16)	165 (18)	517 (16)
合計	4,108	2,261	921	3,182

4. 3 温室効果ガスの排出実態調査

4. 3. 1 都市ごみ焼却炉

調査施設として、現在、国内で稼働している代表的な焼却方式を選んだ。それらは、全連続燃焼式（5施設，8炉），准連続式（2施設，3炉），機械化バッチ式（2施設，2炉，2日*2回）などである。固定化バッチ式も用いられているが、処理量は全体の1~2%と少ないので、ここ

では、機械化バッチ式と同じと見なし調査対象には入れていない。また、試料採取は、全連続式および准連続式では定常状態のとき、機械化バッチ式では、早朝の点火から、定常、立ち下げ、深夜の燃え切りまで、の各過程で試料の採取を行った。

排出係数は、排ガス中のCO₂濃度から算出する方法を用いた。すなわち、排ガス中のCO₂濃度をC_{co2}(%)、吸気ガスおよび排ガス中の成分(n)の濃度をC_o(ppm)およびC_n(ppm)、分子量をM_w、ごみ中の炭素の割合をR_cとすれば、成分(n)の重量当りの排出係数(E F_n, g/ton)は；

$$E F_n = [C_n - C_o] (\text{ppm}) \cdot M_w \cdot R_c \cdot 100 / C_{co_2} (\%) / 12 \quad \text{--- (1)}$$

この方法では、試料採取時の排ガス量や燃焼ごみ量が不明の場合でも、排出係数が求められる利点を有している。すなわち、従来の排ガス中の成分濃度(C_n)、排ガス量(V)、燃焼ごみ量(W)とから、 $E F_n = C \cdot V / W$ として求める方法では、ごみ投入や強制送気のまったく無い埋火のような場合には排出係数の算出が困難であるが、(1)式の方法では可能である。

上式中のR_cは、4つの大都市の報告書と345箇所の中小都市所属の調査データから独自に推定した値〔大都市圏では0.24(全連続炉用)、中小都市では0.21(その他の炉用)〕を用いた。

全連式及び准連式では、ほぼ排出状態が長時間安定しているの見なし、測定値を単純平均して施設の排出係数を求めた。しかし、機械化バッチ式では、立ち上げ、定常、立ち下げ、埋火などの一日の処理行程の違いにより排出状態が変わる。そこで、一日の全行程を積算した排出量とごみ処理量から排出係数を求めた。結果は表4に推定排出量と共に示す。

4. 3. 2 廃棄物埋立地

(1) 国内の廃棄物埋立地での調査

調査施設としてA、Bの2ヶ所の準好気性方式の埋立地を選び、そのガス抜き管及び覆土を通して放出してくるガスを対象とした。A埋立地でのガス発生量はほとんどのガス抜き管で0.2L/分以下であった。B埋立地でも、管からの噴出圧は低く発生量も少なく、0.2-20L/分の範囲で、埋立地全体で約240L/分と見積もれた。また、B埋立地で地面から直接噴出してくるガス流量を噴出口ごとに測定したところ、最大1.5L/分、平均的な噴出口で、約0.2L/分で、B埋立地全体では250L/分以上あり、ガス抜き管よりも大きいことが予想された。

発生ガスの分析の結果、A埋立地では、CH₄はすべて0.1%以下で埋立地としては低い値であったが、N₂Oは数ppm存在していた。組成が空気に近いこと、発生ガス量が少ないことから、層内に空気が浸入し好気的な分解が僅かずつ進んでいるものと推定された。しかし、B埋立地ではガス抜き管で平均CH₄濃度が12.1%、地表からの噴出ガスで38%と嫌気的な分解が進んでいた。

炭素を含むガス成分としては、CO₂とCH₄以外は通常無視できるので、気体状の炭素のマスバランスを考える際にはこの2種を問題にすればよい。今回のB埋立地のガス抜き管の結果と以前に我々が行った東京湾の埋立地の結果を基に、酸素とメタン比率[CH₄/(CO₂+CH₄)・100]との関係を求めた。前回の東京湾の結果では、酸素が2%以下の条件ではメタン比率が約60%、それ以上では約50%と、明確に区別できたが、今回はほぼ全域で55%程度であった。この差は、前回の埋立地が海面埋立で10年以上経過しているのに、B埋立地は準好気的条件で3年以内ということに起因すると予想された。

B埋立地の地表面からの発生ガス中の酸素濃度はガス抜き管よりも低く、またN₂Oは検出限界(0.1ppm)以下で、覆土を抜ける際に分解される可能性を示唆していた。B埋立地のガス抜き管試料のN₂Oと酸素濃度との関係では、相対的にN₂Oが高濃度になるのは、酸素が3-7%の領域であった。

(2) 国外の廃棄物埋立地での調査

対象地としては、タイ、バンコック市の最終処分場[ON NUT, 平地積上・無覆土方式, 埋立面積; 20万m²(高さ10~20m), 埋立期間; 1985~現在]を選び、1992年8月4~5日(予備調査), 12月15

日～18日(本調査)の2回の調査を行った。箱型容器によるガス採取は、調査の期間中2箇所継続的に行い、埋立層から発生するガス(CH₄)量の測定を試みたが、容器と埋立面との隙間を無くすることができず、正確なガス発生量を求めることができなかった。しかし、幾つかの仮定を置くと、CH₄として、A地点で、最低で5、最大30L/(min・m²)以上、B地点で最低で8、最大50L/(min・m²)以上と推定できた。また、円筒容器による21箇所のガス採取から、CH₄の発生状態は、層が厚いほど多くなる傾向が見られたが顕著ではなく、5～10mの隣接地でもCH₄の発生は大きく異なることが分かった。また、N₂Oとして最大35ppmの濃度が観測されたが、多くは10ppm以下で発生源として重要ではないと見なせた。同一の地点での調査期間内(3日)での試料濃度の変動は、CH₄、N₂Oとも少く、安定した排出が想定された。

また、今回の測定値からメタン比率 $[\text{CH}_4 / (\text{CH}_4 + \text{CO}_2 - 0.03) * 100]$ と CH₄濃度との関係を見ると、CH₄の濃度が低い時には、メタン比率は10%程度まで低下するが、CH₄の濃度が上がると55～60%となった。このことから、本埋立地での有機物が分解して発生するCH₄は、分解の少ない初期を除けば55～60%と考えてよいことが分かる。この値は、上記の国内の埋立地で求めたメタン比率とほぼ同じであり、本埋立地は覆土をしていないが、内部ではかなり嫌気的な条件で有機物が分解していることを示唆していた。

4. 3. 3 し尿処理施設

本研究では、合併浄化槽方式；1ヶ所、標準脱窒素処理方式；1ヶ所、高負荷脱窒素膜分離方式；2ヶ所*2回、について調査した。その結果、合併浄化槽では、濃度としては比較的高いメタンやN₂Oの発生が認められた。また、標準脱窒素型のI工場では、攪拌層で高濃度のメタンが検出されたが、排ガス量が少ないので発生量としては多くないと推察された。また、N₂Oも多くはなく、標準脱窒素型施設での温室効果ガスの発生量は全体として少ないと推定された。

しかし、高負荷型のNセンターの硝化・脱窒過程から数千ppmのN₂O発生が認められ、気体で除かれる窒素の20%程度がN₂Oとして放出されていたと予想された。ただし、同じ高負荷型でもKセンターでのN₂Oの発生は少なく、N₂Oの発生が構造や運転の差により大きく影響を受けると推察された。そこで、両施設での、し尿と汚泥の比率、処理量、反応槽の容積と深さ、反応槽のサイクル時間、反応槽のpH・温度・ORP・DOなどの相違の解析から、酸化状態の差がN₂Oの発生に関与していると推定した。

4. 4 排出総量の推定

4. 4. 1 ごみ焼却に伴い排出される二酸化炭素量の推計

4. 4. 1. 1 はじめに

ごみは極めて多様性に富み、量や組成は地域や時期により著しく変わり、それらを表わす個々のデータが、どの程度の代表性を有するかが問題となることが多いが、それらを基に推計をせざるを得ない。そこで、本報告では、まず、二酸化炭素の量を推計する3種の異なる方法を考え、相互比較により推計値の妥当性を検証できるようにした。さらに、各方法に実際の数値を当てはめて、国内の清掃工場におけるごみ焼却に伴い排出される二酸化炭素量を推計した。

4. 4. 1. 2 推計法の概要と特徴

(1) 元素分析値からの推計法(元素法)

燃焼で二酸化炭素として放出される炭素量(C_i)は、ごみ量をM₀、残渣量をM_r、ごみ中の炭素割合をC₀、残渣中の未燃分の比率をR_r、未燃分中の炭素割合をC_rとすれば、(1)式から算出することができる。

$$C_i = M_0 \times C_0 - M_r \times R_r \times C_r \quad \text{----- (1)}$$

なお、ここで、これらの値としては、実際に計測される値がほとんど湿ベースであるので、湿ベース基準の値を用いることにする。

また、残渣中の未燃物質が炭化していると仮定すれば、 $C_r = 1$ とおけて、(2)式が成り立つ。

$$C_i = M_o \times C_o - M_r \times R_r \quad \text{----- (2)}$$

(2) ごみの組成値からの推計法(組成法)

二酸化炭素として放出される炭素量(C_i)は、ごみの各組成項目の比率を S_n 、各組成項目の含有炭素の割合を C_n とし、他の要因は上記の(2)式に同じであるとすれば、次の(3)式から算出することができる[ここで、 n は各組成項目を示す]。

$$C_i = M_o \sum (S_n \times C_n) - M_r \times R_r \times C_r \quad \text{----- (3)}$$

C_n の値は、かなり広く適用できるはずであるので、ごみの組成分析値(S_n)があれば、その時の二酸化炭素排出量の算出が可能である。

(3) 排ガス中の二酸化炭素濃度からの推計法(排ガス法)

この場合の二酸化炭素として放出される炭素量(C_i)は、排ガスを V 、その中の二酸化炭素濃度を C_g とすれば、次の(4)式から算出できる。

$$C_i = V \times C_g / k \quad \text{----- (4)}$$

(ここで、 k は二酸化炭素量()から炭素量(g)に換算するための係数)

総排ガス量のデータがない場合には、ごみ単位量当りの排ガス量(V_r)と燃焼ごみ総量から(5)式で求めることもできる。

$$V = M_o \times V_r \quad \text{----- (5)}$$

(4)、(5)式から

$$C_i = M_o \times V_r \times C_g / k \quad \text{----- (6)}$$

4. 4. 1. 3 二酸化炭素排出量の推計

上記の3種の方法に、最近のデータを適用して二酸化炭素の排出量を推計した。尚、計算の基になるごみの焼却処理総量は、厚生省の報告値⁶⁾から、93,552ton/日(34.1Mton/年)[1988年]とした。

(1) 元素分析法による推計値

日本環境衛生センターとの共同研究から；可燃分：36.9% (試料数=164)，焼却残渣中の未燃分：1.1% (湿物基準，試料数=231)，ごみ中の炭素割合；24.1% (試料数=26) ー ーなどの値が得られた。これらの値を未燃分がすべて炭素であるとして、(2)式に代入すると8.2Mton-C、また、未燃分中の炭素の比率がごみと同じ24.1%であったとすると、(1)式から、8.16Mton となる。いずれにしても、未燃分が少ないので差は小さい。

(2) 組成法による推計値

ごみの組成は、ほとんどの自治体で継続的に測定している。そのうちで、各組成項目に該当する数値が乾燥ベースで示されてされていて、1年に6回以上の測定を行っている、仙台市、東京都、横浜、大阪市の値を基に全国のごみの平均組成を求めた。しかし、ごみの各組成項目に含まれる炭素割合の信頼できる報告値はほとんどない。そこで、これまでの資料⁷⁾と各項目の化学組成を基に、いくつかの前提を置いて、ごみ質の各組成項目の炭素割合を独自に推算し、各組成項目ごとの炭素排出割合を算出した。

本方法で求めた炭素割合は、24.2% となり、実測値とたいへんによい一致を示した。この値を用い、未燃分がすべて炭素であったとして、(2)式に従い二酸化炭素排出量を求めると、8.19 Mton-C が得られた。

(3) 排ガス法による推計値

日本環境衛生センターによる昭和63年度の152の二酸化炭素測定結果を、単位時間当りの排ガス量の重み付けをして算出した。その結果、排ガス中の二酸化炭素濃度および乾き排ガス量として、それぞれ、5.57%、7.58L/g という値が得られた。これらの値を(6)式に代入し、二酸化炭素排

出量として、7.71 Mton-C が求められた。

(4) 3種の推計値の比較

これらの3種の方法で、比較すると現時点で最も精度が高い値が得られるのは排ガス法である。しかし、元素法はごみ中の可燃分、組成法は組成分析値が入手できれば算出できる利点を有している。特に、組成法は、特殊な分析装置は必要なく、目視と天秤だけでよいので、排出量の概数を推算する方法として、発展途上国を含めたいろいろな所で利用されると期待できる。

4.4.1.4 他の推計値

「平成3年版 環境白書」⁸⁾では、「……、廃棄物の焼却による排出の見積りは困難であるが、一般廃棄物の焼却からは1998年度に約800万トン程度の排出があったと推定され、産業廃棄物の焼却による排出を合わせるとおよそ1,000万トン程度の大きさと考えられる。……」——と述べられている。また、「環境庁昭和63年度 (財)日本環境衛生センター委託報告書」⁹⁾では、1985年の二酸化炭素排出量として、6.43Mton-C なる値が示されている。ごみ量だけが変化し、他の係数は85年と同じであったとして、1988年度の値を求めると、7.48 Mton-C となり、本研究の値に近い値となった。

4.4.2 都市ごみ焼却で排出されるメタン、亜酸化窒素、ハロゲン化炭化水素の総量の推定

国内の炉種別のごみ処理量は、表1の昭和62年度の値を基に、同じ比率で変化したと考えて、昭和63年度の値に換算し求めた。その値と各化合物の排出係数の値から炉種ごとの排出量を求めて、合計して各化合物の国内排出量とした。なお、4種以外の炉や型式が不明なものが約5.5%あったが、それは案分して各方式に振り分けた。

世界での発生量の推定も試みているが、焼却量の正確な値が得られたのはOECD諸国だけであったので、それらの国々についてのみ、すべて全連続炉で、ごみ質も日本と同じと見なして推算した。結果を表4に示す。全世界での発生量の推定には、東欧、日本以外の東アジアなども入れる必要が有るが現時点ではその比率は多くはなく、OECD諸国だけでも全体の傾向は十分に把握できると考えた。

表4 都市ごみ焼却に伴い排出されるN₂OおよびCH₄の排出量の算出

焼却施設の 型式	推定ごみ焼却量 (万ton/year)	排出係数, g/ton		排出量, Mg/year	
		N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄
日本					
全連続式	2,507	144	29.7	3,606	744
准連続式	276	128	61.7	352	1,701
機械化バッチ式	579	115	74.2	667	4,300
固定化バッチ式	52	115 ¹⁾	74.2 ¹⁾	60	386
計	3,414			4,685	7,131
OECD(除;日本)	4,280	144 ²⁾	29.7 ²⁾	6,156	1,270
全OECD	7,694			10,841	8,401

注; 1), 機械化バッチ式と同程度と見込む。 2)全連続式と同程度と見込む。

本研究から、ごみの焼却に伴い排出されるCH₄およびN₂Oとして、それぞれ、OECD諸国(および国内)について、8.4 Gg(7.1)および10.8 Gg(4.7)なる値が得られた。これらの値は、少ない実態調査例を基に算出したため、測定精度が十分とは言えない。特に、メタンの排出は微妙な排出条件の差で著しく異なるので正確な推算は困難で、おおよその値を示すものである。全世界にお

けるCH₄およびN₂Oの各種発生源からの総排出量は、それぞれ、約500 Tgおよび約10 Tg と推定されている。本研究の結果とこれらの値から、都市ごみの焼却に伴い排出される温室効果ガスの比率は全世界の発生量に対して僅かであることが分かった。また、単位重量当たりでも埋立に比較し著しく低いことが分かり、焼却処分が温暖化を低減するのに効果的であることが実証された。

また、ハロゲン化炭化水素についても、幾つかの焼却施設での調査結果から全国の排出量を推算したが、それぞれ、7011; 4ton/年、7012; 5.6, 70113; 4.8—程度で、発生源としては重要でないことが分かった。都市ごみには、それ自身が発泡剤やスプレーなどで701類を含んでいると考えられ、ごみピットでも高濃度の701濃度が観測されることがあり、焼却炉はSOURCEよりむしろSINKと考えられる。

4. 4. 3 固定燃焼施設からのメタン排出量の推計

4. 4. 3. 1 はじめに

ここでは、正確な推定がこれまでに行われていない大型の燃焼施設（固定発生源）を取り上げ、国内で発表された報告書のデータを基に、メタンの発生量の推計を行った。

4. 4. 3. 2 推定の方法

各種固定発生源の排ガス中の濃度、排ガス量、燃料の種類と使用量から、使用燃料量と発熱量を基礎にした排出係数を、施設、燃料の種類ごとに算出した。この際、燃焼に係わる空気すでに1.8ppmのメタンが存在していると仮定した。それ故、排出濃度がそれ以下であると排出係数はマイナスとなる。

また、火力発電では発電量と発熱量の関係、製鉄では各施設での生産量と燃料使用量との関係を、統計資料や成書から求めた。それらと日本、世界の生産統計を基に、排出量を概算した。

4. 4. 3. 3 推定結果

排出濃度は、メタンでも、他の炭化水素でも、施設付近の環境濃度よりも低い場合が多く見られた。すなわち、ボイラー、加熱炉、などでは、排出係数はマイナスになった。原油、重油、LPG、LNGなどの燃料の違いによる明確な差は認められないことが多く、排出係数はそれら個別事例の係数を平均して求めた。

表5 火力発電および製鉄関連の施設で排出（除去）されるメタン推定量

	日 本		世 界	
	発電量 (100万KWH)	除去量 (キカグラム)	発電量 (100万KWH)	除去量 (キカグラム)
火力発電 石炭	360,000	1.0	2,550,000	4.4
	63,000	0.04	3,830,000	13.5
製鉄関連 コークス炉 焼結炉	製造量 (千ト)	排出量 (キカグラム)	製造量 (千ト)	排出量 (キカグラム)
	49,000 93,000	13 6.5	360,000 380,000	95.6 26.3
計		19.5		122

表5には、メタンの年間の推定量の一部を示す。ここでは、世界各国で日本と同じ排出係数が適用できると仮定した。明確な統計数値が得られた施設だけからでも、製鉄関連で約120Gg/年の排出が予測された。この値は、世界で最も高効率の日本の施設の定常運転時をもとにしているので最小値と見なせ、実際には、この数倍が発生している可能性は高い。自然界を含めたメタンの年間発生量は約500Tgと予測されており、石灰焼成炉や製鋼施設も含めると製鉄関連の排出が、全

発生量の%オーダーになる可能性は有り得る。

発電用のボイラーでは、メタンを含む炭化水素は排出よりもむしろ消滅過程が優先しており、そこで除去される量は最大18Gg/年と推定された。この量は地球上の発生量全体からみれば僅かであるが、整った施設で高度に管理された条件下では、SOURCE が SINK に成り得る象徴的な事例を示している。廃棄物焼却炉は、施設による差が大きく、効率のよい燃焼をしているときには大気の 1/4以下になるが、十倍を越える濃度も観測されている。

5 廃棄物処理に係わるエネルギー量

5.1 廃棄物の適正処理により回収可能なエネルギー量の推算

この推算には、ごみの組成の全国的な集計データが不可欠であるが、それらは公式には収集されていない。民間調査機関が行っている全国の中小都市の345例のデータを独自に整理し、物理組成、発熱量などの平均的な値を得た。また、主要な大都市では、自治体自身が年に4～6回、ごみ組成の調査を行っている。それらの結果をもとに整理し、以下の推算に用いた。

ごみの質では、大都市は中小都市に比べ、可燃分が多く水分は少ないという特徴を有していた。元素分析は、特殊な装置や技術が必要であるので、測定値を発表している自治体は少ない。ここでは、東京都の昭和60年度から平成元年度までの5年間の17回の分析結果から組成ごとの元素組成値を求めた。

ごみ中の含水量が多いと水分を気化するのに熱量が消費され発熱量は小さくなる。成分ごとの含水量は、東京都の10年間の336件の各組成分析の湿ベース値と乾ベース値¹⁰⁾を用いて算出した。その結果、紙類がもっとも水分が少なく11%、逆に厨芥は約85%となった。

各成分の元素分析値から高発熱量を推定するには、Scheurer-Kestnerの式（紙類、厨芥類、繊維類、わら・木材類）と Dulongの式（プラスチック類、ゴム・革類）を用いた⁷⁾。低発熱量は、その値から含水量と燃焼で生成する水分量に600kcal/kgの係数をかけた値を差し引いて求めた。低発熱量を見ると厨芥は高い含水率のために乾燥状態で有する熱量の14%しか利用できないことが分かった。また、厨芥が入ることにより、ごみ全体の水分量が増加し、いっそう効率を低下させる要因になる。

組成成分の発熱量とごみの中の組成比率とから、大都市型と中小都市型で、ごみ1kg中の各組成の発熱量の比率を求めた。いずれの場合も、紙類とプラスチック類が50%、30%を越える寄与をしており、ごみの焼却熱がこの2成分に大きく依存していることを示していた。低発熱量の合計は、大都市型と中小都市型、それぞれで、1125kcal/kgと938kcal/kgであった。実際に上記調査機関が344施設で求めた低発熱量は、中小都市型で1580kcal/kgであり、計算値と大きな差が見られた。

そこで、元素分析値でなく、物理組成値により発熱量を推定する方式¹¹⁾を試みたが、それでも、大きな差があったので、中小都市型の値としては実測値(1580kcal/kg)を、そして、大都市型の低発熱量は、元素分析値から求めた数値を中小都市型と同じ比で補正して、1895kcal/kgとした。これらの数値を、それぞれ、連続燃焼式、とその他の方式の処理量に適用すると、約41Pcal/年及び約13Pcal/年が得られ、合計すると焼却で発生する熱量は51Pcal/年と見込まれた。

し尿の嫌気的処理でのメタンの排出係数として、環境庁の報告書¹²⁾では7.6kL・CH₄/KL(し尿)としている。この値を表3に示した嫌気型での処理量に適用すると、メタン量として約60GL、それが持つ熱量として約500Tcalが得られた。この量は多くはないが、気体燃料として直ちに利用できる形態であるので利用価値が高く、すでに現在でも施設の管理などに利用されている。

今回の推定から、都市ごみ焼却およびし尿処理に伴い発生する熱量として、それぞれ、54Pcal/年、500Tcal/年なる値が得られた。これらは、現在、原油（昭和63年度で約2.1億kL、通産統計、1990）から得られる熱量（約1950Pcal/年）の2.75%となる。

5. 2 廃棄物焼却処理施設, し尿処理施設で運転等で外部から取り入れているエネルギー量

これらの処理施設では, 施設の管理・運転のために外部から電力, 重油・灯油, ガスなどのエネルギーを取り入れている。この量は, 厚生省が各自治体から収集し, 管理している台帳⁵⁾には記載されているが, その量について詳細に解析されたことはない。そこで, 全国の廃棄物焼却処理施設の約1700カ所およびし尿処理施設の約1250カ所について, それらの数値をコンピュータに入力しdBaseⅢPlusやLOTUS1・2・3で, その概要を解析した。

その結果を要約すると, 全国の廃棄物焼却処理施設(1987年度)およびし尿処理施設(1988年度)で年間の総使用量は, 電気(10^9 kwh); 1.46, 1.40, 重油・灯油等(10^6 L); 345, 183, プロパン(10^9 g); 1.24, 0.17, 都市ガス(10^6 m³); 1.91, 0.79, --であった。熱量換算値で見ると, 総使用量は, 焼却処理施設, し尿処理施設で, それぞれ, 4.5Pcal, 2.9Pcalとなった。その中で, 重油・灯油等が占める比率がもっとも大きく, それぞれ, 71%, 57%で, ついで電気で, 28%, 41%, プロパンや都市ガスは無視できる程度であった。元のデータに1年の差があるし, また, 明らかにデータ送付側の記載ミスと思われるものもあって, 厳密な比較は困難であるが, 両種の施設では焼却炉が1.5倍ほど多くのエネルギーを消費しており, 熱量換算では, いずれの施設群でも重油がもっとも大きな比率を占めていた。

6. 引用文献

- 1) L.J.Muzio, J.C. Kramlich: An artifact in the measurement of N₂O from combustion sources, Geophys. Res. Lett., 15, 1369-1372, 1988.
- 2) L.J.Muzio et al.: Error in Grab Sample Measurements of N₂O from Combustion Sources, J. Air Pollut. Cont. Assoc., 39, 287-293, 1989.
- 3) 平木隆年, 玉置元則: 固定発生源からの燃焼排気中のN₂O測定法, 日本化学会誌, 1991巻, 410-415, 1991.
- 4) 品川精機(株)カタログ, "AZP-1DⅡ型指示計"
- 5) 厚生省水道環境部環境整備課編, 昭和63 DATABOOK廃棄物処理施設, 環境産業新聞社, 1998.
- 6) 厚生省水道環境部環境整備課編, 日本の廃棄物'91, 全国都市清掃会議, 1991.
- 7) 岩井重久監修: 都市ごみ処理ガイドブック, 理工新社, p.174-236, 1979.
- 8) 環境庁, 平成3年版 環境白書, 大蔵省印刷局, 1992.
- 9) 昭和63年度環境庁委託: 地球温暖化問題への対策に関するスクリーニング調査結果報告書, 日本環境衛生センター(1989)
- 10) 浦辺真郎他: 環境技術, 14, p.42-47, 1985.
- 11) 大沢利昭: 都市清掃, 41, p.233-241, 1988.
- 12) 平成元年度環境庁委託: メタン等排出量分析調査結果報告書, 日本環境センター, p.54, 1990.

7. 本研究により得られた成果

- (1) 渡辺征夫, 松浦章良: 地球温暖化・関連の炭化水素に対する固定発生源の役割, 日本化学会第59春季年会講演要旨集, p864, 1990.
- (2) 渡辺征夫: 広い流量域に利用できる多目的・自動記録式・流量計測手法の開発, 第31回大気汚染学会講演要旨集, p324, 1990.
- (3) 渡辺征夫, 庄司成敬, 高橋哲也, 宮崎正信, 田中勝: 廃棄物焼却により排出される温室効果ガスおよび関連化合物の分析手法および測定事例, 日本化学会第61春季年会講演要旨集 1巻, p76, 1991.

- (4) 渡辺征夫, 宮崎正信, 大塚康治, 高橋哲也, 庄司成敬, 田中勝 : 廃棄物焼却炉からの温室効果化合物の一次推定, 第2回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 361-364, 1991.
- (5) 渡辺征夫, 宮崎正信, 田中勝, 大塚康治 : 国内のごみ焼却に伴い排出される二酸化炭素量の推計, 第32回大気汚染学会講演要旨集, p326, 1991.
- (6) 渡辺征夫, 上原伸二, 佐藤誠, 石井忠浩 : 廃棄物焼却炉から排出されるハロゲン化炭化水素の分析, 第32回大気汚染学会講演要旨集, p334, 1991.
- (7) 渡辺征夫, 奥山隆一, 石井忠浩 : 燃烧排ガス中のCO₂, CO, CH₄の一斉連続測定手法の開発, 第32回大気汚染学会講演要旨集, p456, 1991.
- (8) 渡辺征夫, 佐藤誠, 上原伸二, 石井忠浩 : 燃烧ガス中の亜酸化窒素のキャリアーガス・ドーピング・GC法による分析, 第32回大気汚染学会講演要旨集, p468, 1991.
- (9) 渡辺征夫, 宮崎正信, 田中勝 : 地球温暖化と廃棄物処理, 廃棄物学会誌, 3巻(1), p27-38 1992.
- (10) 渡辺征夫, 宮崎正信, 田中勝, 奥山隆一 : 廃棄物から回収可能なエネルギーの一次推定, エネルギー・資源学会 第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, p191-194, 1992.
- (11) 渡辺征夫, 岡本有香, 大迫政浩, 宮崎正信, 田中勝 : 有機性廃棄物の生物分解に伴い発生する温室効果ガスの一次スクリーニング, 第13回全国都市清掃研究発表会講演論文集, p63-65, 1992.
- (12) 渡辺征夫, 佐藤誠, 宮崎正信, 田中勝 : 廃棄物焼却炉からの温室効果関連化合物の排出量の推定, 第3回廃棄物学会研究発表会講演論文集, p259-263, 1992.
- (13) 渡辺征夫 : 固定燃焼施設から排出されるメタン量の推定, 資源環境対策, 29巻(1), p47-58, 1993.
- (14) 渡辺征夫, 手塚和人, 小阪修一, 松澤裕, 大迫政浩, 井上雄三, 田中勝 : し尿処理施設からの温室効果ガスの排出実態調査, 第14回全国都市清掃研究発表会講演論文集, p19-21, 1993.
- (15) 渡辺征夫, 松澤裕, 田中勝, 赤石修 : 熱帯地域の都市ごみ埋立地から排出される温室効果ガスの分析, 第34回大気汚染学会講演要旨集, p297, 1993.
- (16) 渡辺征夫, 嶋津誠, 上原伸二, 田中勝, 石井忠浩 : 都市ごみ焼却炉からの低級ハロゲン化炭化水素類の排出量の推定, 第34回大気汚染学会講演要旨集, p298, 1993.
- (17) 渡辺征夫, 手塚和人, 松澤裕, 大迫政浩, 井上雄三, 田中勝 : 高負荷型し尿処理施設から排出される亜酸化窒素, 大気汚染学会誌, 29巻4号(掲載予定), 1994.

(国外での発表)

- (1) T. Ikeguchi, I. Watanabe: Behaviour of trace components in gases generated from municipal solid waste landfills, Environmental Technology, V. 12, p947-952, 1991.
- (2) I. Watanabe, A. Matsuura: Estimates of methane emission from large stationary combustion sources, Environmental International, V. 18, p271-281, 1992.
- (3) I. Watanabe, M. Sato, M. Miyazaki, M. Tanaka: Emission rate of N₂O from municipal solid waste incinerators, Proc. 5th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions, p. 123-131, 1992.