

【特集：廃棄物管理と試験・検査法—研究委員会研究活動（廃棄物試験・検査法）—】

ごみの三成分，発熱量および元素組成について

渡 辺 信 久*

【要旨】 ごみの三成分（水分，灰分，可燃分），発熱量および元素組成の計測方法について概説した。まず，用語の定義を明らかにし，整理を行った。量と割合の区別をつけるために，用語に単位を付け加えることが必要である。本稿で紹介した項目別の三成分（%）および発熱量（kcal/kg）の経験値を用いると，ごみの物理組成データから，全体の三成分（%）と発熱量（kcal/kg）を推定することができる。水素・炭素の分析方法は既に確立されているが，塩素・硫黄の分析方法については，計測法により結果が異なるという問題があり，検討中である。

キーワード：ごみ質，発熱量，元素分析，塩素，硫黄

1. はじめに

ごみの三成分，発熱量および元素組成の計測は，「燃焼したときの灰，熱，排ガス（量および質）」を評価する方法として発展してきた。したがって，燃料分析・化学分析分野の方法を取り入れている。この様式の計測は，単に燃焼のみならず，たとえば埋め立てやコンポストあるいはリサイクル資源としてのごみの性状把握にも有用な情報を与えると考えられる。

わが国では，1950年代からごみの性状把握のための調査が，主として自治体によって独自に行われてきた。物理組成項目のみならず，単位操作（選別，乾燥，元素分析等）でも，同じ方法が用いられてきたわけではない。試験・検査法研究部会は，それらの比較と，合理的な分析方法の提案を行うことを目的としている。

本稿では，これまでの報告書¹⁻³⁾を元に，まず，用語の定義を明らかにし，三成分，発熱量の計測方法とともに既往データの経験値を紹介し，元素組成分析については原理の説明とごみ質分析特有の問題点を指摘するものである。

2. 用語と定義

たとえば，「厨芥類由来の水分は75gである」と「厨芥類の水分は75%であった」という表現はともに使用されているが，前者は水の量を表し，後者は水の量の厨芥類の重量に対する割合を表している。このように，「量」と「割合」の用語が混同されているので，その整理を図る必要がある。その一覧を表1に示す。曖昧さをなくすためには，(1)用語に単位を付す，(2)「量」，「率」，「単位重量あたりの」などの注釈的な用語を付す等の改善が考えられる。しかし，用語の厳密さを追求するあまり，文字数の増加を招き，煩雑になるので，現行の用語に単位を付け加えて表現することが現実的と考える。

英語による表記も，同時に，表1に記述した。英語表記でも，「量」，「割合」の曖昧さがある。英語表記で注意を促したいのは，「可燃分」(combustible (volatile) matter) と「可燃物」(combustibles) の区別である。また，「三成分」(three components) は，日本独自の表現方法であり，proximate analysis の用語のほうが適切であろう。

ごみマトリックスの概念を図1に示した。物理組成項目別に分割すると同時に灰分，水分および可燃分（三成分）別に分割することができる。水分は，風乾燥操作で除去される水分と残留する水分（しばしば，無視できる量として取り扱われる）に分けられる。可燃物も灰分を含んでおり，「ごみの灰分」は，不燃物の重量と可燃物

原稿受付 2000.10.16

* 大阪市立環境科学研究所

連絡先：〒543-0026 大阪市天王寺区東上町8-34

表1 ごみ質分析に関わる用語の整理

| 和 | 通例用いられる用語 | | 厳密に表現する場合に適切な表現 | | 単 位 | 意 味 |
|-------------|---|---------------|--|-----------------|-----------------|---|
| | 英 | 和 | 英 | 和 | | |
| 三成分 | three components | 工業分析 | proximate analysis | % | % | 水分、灰分、可燃分の百分率割合 |
| 水分 | moisture (water) | 水分量 | moisture (water) | g | g | 水の量を表す |
| | | 水分率 | moisture (water) content (percentage) | % | % | ある量に対する水の量の百分率 |
| 灰分 | ash, residue | 灰分量 | ash | g | g | 灰の量を表す |
| | | 灰分率 | ash content (percentage) | % | % | ある量に対する灰の量の百分率 |
| 可燃分 | combustible (volatile) matter | 可燃分量 | combustible (volatile) matter | g | g | 可燃分の量を表す |
| | | 可燃分率 | combustible (volatile) matter content (percentage) | % | % | ある量に対する可燃分の量の百分率 |
| 物理組成 | physical composition (analysis) | | | | | |
| 物理組成項目 | physical component | | | | | |
| 可燃物 | combustibles | | | | | |
| 不燃物 | incombustibles | | | | | |
| 発熱量 | calory, calorific value, heat, heat value | 熱量, エネルギー | heat (calory, energy) | kJ, kcal | kJ, kcal | 熱あるいはエネルギーの量を表す。 |
| | | 単位重量あたりの発熱量 | heat (calorific) value | kJ/kg, kcal/kg | kJ/kg, kcal/kg | 単位重量あたりの熱の量を表す。 |
| 高位発熱量 | high heat (calory), Ho* | 単位重量あたりの高位発熱量 | total (high, gross) heat value | kJ/kg, kcal/kg | kJ/kg, kcal/kg | 単位重量あたりの高位(総)発熱量 |
| 低位発熱量 | low heat (calory), Hu* | 単位重量あたりの低位発熱量 | available (low, net) heat value | kJ/kg, kcal/kg | kJ/kg, kcal/kg | 単位重量あたりの高位(総)発熱量から水分蒸発に伴う潜熱を差し引いた値 |
| 元素組成 (元素分析) | elemental composition (analysis) | 元素組成 (元素分析) | elemental (ultimate) composition (analysis) | %, g/kg | %, g/kg | 有機元素(水素・炭素・硫黄・窒素・塩素・酸素)の含有率, 他の元素を指すこともある |
| 水素分 | hydrogen | 水素分量 水素分率 | hydrogen | g, mol | g, mol | 水素の量を表す(水由来は除く) |
| | | | hydrogen content (percentage) | g/kg, mol/kg, % | g/kg, mol/kg, % | ある量に対する水素の量の百分率 |

*高位発熱量: Ho, 低位発熱量: Hu の語源は, それぞれ oberer Hitzwert, unterer Hitzwert (独語) である。

三成分(proximate analysis)

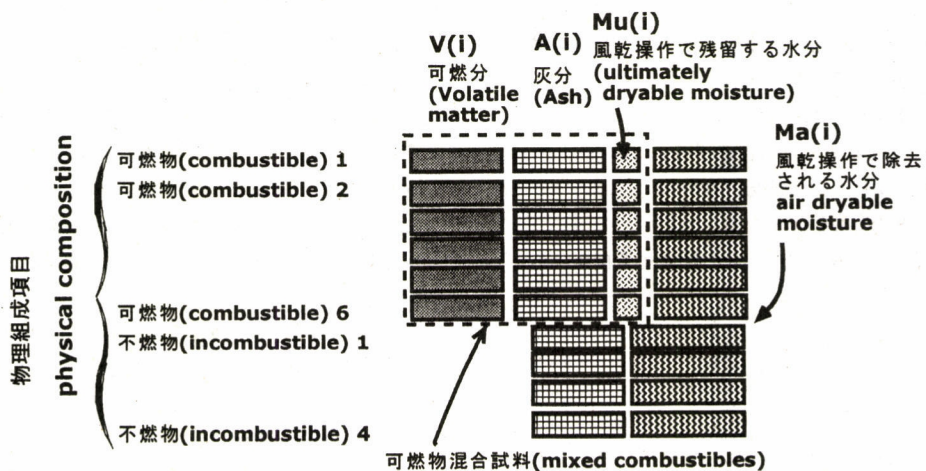


図1 ごみマトリックスの概念

由来の灰分の重量を和である。

「乾ベース/湿ベース」の違いは、ごみの物理組成毎の選別を行う前に乾燥するのか、あるいは、乾燥させずに選別するのかの違いであるが、報告値の意味は異なる。風乾燥操作で除去される水分 (air dryable moisture) を取り除いた後の各物理組成項目の重量比 (総和は100%になる) を報告したものが、「乾ベース」である。一方、水分を含んだ状態で、各物理組成項目の重量比を報告するのが「湿ベース」である。

3. 三 成 分

水分 (moisture) は、採取したごみ試料を乾燥させ、その前後の重量を計測することで得られる。乾ベース分析では、ごみ全体での水分がわかるのみであるが、湿ベース分析では、各物理組成項目毎の水分を知ることができる。

なお、乾燥工程は80~85℃で行われている¹⁾ので、厳密には風乾水分(湿分)を求めていることになる。80~85℃で乾燥する理由は、プラスチック類の変形・溶着を避けるためである。

灰分 (ash) は、可燃物 (combustibles) 中の灰分量と不燃物量の和を、全重量で除した百分率である。可燃物中の灰分率は、試料を破碎後、電気炉で800℃ (もしくは600℃) で熱灼してその減量を秤量して求める。


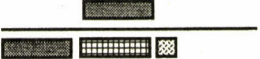

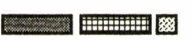

可燃分 (combustible (volatile) matter) は、100 - 水分(%) - 灰分(%) で求められ、これら三成分の総和は、常に100になる。

ごみの三成分は、分析の度に計測するものであるが、各物理組成項目毎の湿ベース水分、乾ベース水分、乾ベース灰分 (これらの定義を表2に説明する) については経験的な値が得られており、その一覧を、表3に示す³⁾。乾ベース灰分は、湿ベース分析より乾ベース分析のほうが、高めの値になっている。これは、湿ベース分析では集合状態にある土砂類が、乾燥によってバラバラになり、他の項目に付着するためであると考えられる。

これらの経験値は、ごみの物理組成データから三成分を推定するのに利用できる。計算例1の場合、水分40%、乾ベース不燃物が10% (湿ごみ1,000g中に400gの水分と60g (= (1,000-400) × 0.1) の不燃物が存在する) という情報に加え、可燃物由来の灰分 (たとえば紙類では16.8g) を足し合わせると、灰分の合計は148.5g (14.9%) になる。なお、計算例1では、乾ベースの物理組成データをもとにしたので、三成分に関する経験値は、表3の乾ベース分析に基づくものを適用した。湿ベース物理組成データから同様の推定を行う際には、湿ベース分析に基づくものを適用するほうがよいであろう。

湿ベース水分の経験値は、湿ベースでのごみ組成データから三成分を推定するのに利用できる。なお、表3中の湿ベース水分は、家庭ごみ調査をもとに得られたものであり、厨芥類からの他の項目への水分の移行に強く影響されるので、家庭ごみ以外のごみに適用するときは注意が必要である。

表2 項目別経験値の意味

| 項目別経験値 | 数式による表現 | 図による表現 |
|----------------------|--|--|
| 項目別湿ベース水分 (%) | $\frac{Ma(i)}{V(i) + A(i) + Mu(i) + Ma(i)} \times 100$ |  |
| 項目別乾ベース灰分 (%) | $\frac{V(i)}{V(i) + A(i) + Mu(i)} \times 100$ |  |
| 項目別乾ベース水分 (%) | $\frac{Mu(i)}{V(i) + A(i) + Mu(i)} \times 100$ |  |
| 項目別乾ベース発熱量 (kcal/kg) | 試料 : V(i) + A(i) + Mu(i) |  単位重量あたり発熱量 |
| 項目別乾ベース炭素・水素 (%) | 試料 : V(i) + A(i) + Mu(i) |  単位重量あたり炭素・水素分 |

V(i), A(i), Mu(i), Ma(i) の定義については、図1を参照

↑ ↑ ↑ ↑
V(i) A(i) Mu(i) Ma(i)

表3 項目別経験値

| 選別方法 | | 紙類 | 厨芥類 | 木・草類 | 繊維類 | プラスチック類・ (ゴム・皮革)* | ゴム・ 皮革 | 5 mm フルイ下 |
|-------|---------------|------|-------|-------|-------|----------------------|-----------|--------------|
| 湿ベース | 水分 (%) | 湿ベース | 15.69 | 75.38 | 42.63 | 16.14 | 16.25 | 8.57 |
| 風乾ベース | 灰分 (%) | 湿ベース | 9.70 | 14.72 | 13.40 | 2.57 | 4.55 | 12.29 |
| | | 乾ベース | 11.23 | 18.50 | 6.59 | 6.90 | 9.46 | 41.82 |
| | 水分 (%) | 乾ベース | 4.41 | 7.54 | 5.39 | 3.25 | 1.54 | 3.98 |
| | 発熱量 (kcal/kg) | 湿ベース | 4,074 | 4,270 | 4,188 | 4,875 | 8,127 | 6,179 |
| | | 乾ベース | 3,949 | 3,982 | 4,347 | 4,709 | 7,641 | 2,931 |
| | 炭素分 (%) | 湿ベース | 40.4 | 41.0 | 41.5 | 47.9 | 68.9 | 54.8 |
| | 水素分 (%) | 湿ベース | 5.88 | 5.81 | 5.40 | 6.27 | 9.81 | 6.91 |

*湿ベース選別では「プラスチック類」、乾ベース選別では「プラスチック類・ゴム・皮革」
1985年から1999年までのデータの平均値

4. 発 熱 量

各項目別の可燃物試料もしくは可燃物混合試料の発熱量は、カロリーメーターで実測する。

各物理組成項目別の発熱量(高位発熱量)の実測値については、経験的な値が得られている(表3)³⁾。湿ベース分析と乾ベース分析で、灰分に違いが見られるのに呼応して、発熱量にもわずかに差異が見られる。

水素分・炭素分の経験値も同様に得られている。各項目別の発熱量と併せて、水素分の経験値を用いると、物理組成データから低位発熱量の推定を行うことができる。表4の計算例1の場合、高位発熱量2,534 kcal/kg、低位発熱量2,093 kcal/kgを得た。なお、水分の計算を厳

密に行う(風乾試料中の水分を加味する)と、水分量が、400 gから423 gになるが、水素分由来の水分が311 gであることを鑑みると、風乾試料中水分は無視できる誤差と考えてもよい。

5. 元 素 分 析

5.1 水素・炭素

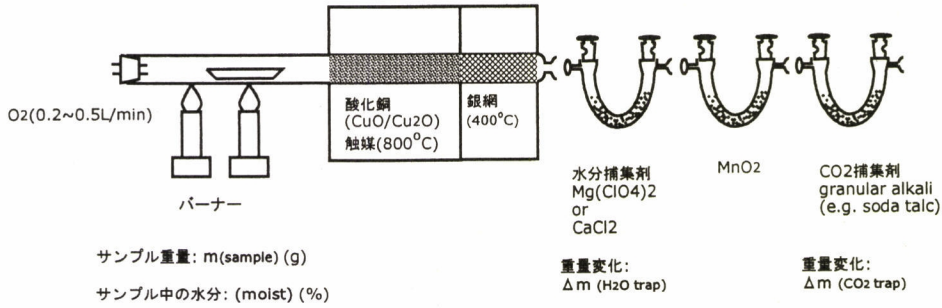
水素・炭素の計測は、「水素と炭素は、燃やすと水と二酸化炭素に変化する」という原理に基づくものである。方法の一例を図2に示す。ここで注意を要するのは、風乾試料が持ち込む試料中水分により、水素分の計測値が過大見積もりされる可能性があることである。図2中の

表4 計算例：乾ベース物理組成からの発熱量・三成分の推定

| 物理組成 | ごみ1kg 中の重量 (g) | 灰分量の推定 | | 高位発熱量の推定 | | 水分量の推定 | | | | |
|----------------|----------------------|------------|------------|----------------------------------|---------------|-------------|--------------|------------|------------|------|
| | | 灰分率 (%) | 灰分量 (g) | 単位重量 あたりの 発熱量 (kcal/kg) | 発熱量 (kcal) | 水素分由来 | | 予め存在する水 | | |
| | | | | | | 水素分率 (%) | 水素量 (g) | 水分率 (%) | 水分量 (g) | |
| 水分 (%) | 40 | | 400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 400 | |
| 乾ベース (%) | | | | | | | | | | |
| 紙類 | 25 | 150 | 11.23 | 16.8 | 3,949 | 592 | 5.88 | 8.82 | 4.41 | 6.62 |
| 厨芥類 | 15 | 90 | 18.50 | 16.6 | 3,982 | 358 | 5.81 | 5.23 | 7.54 | 6.79 |
| 木・草類 | 10 | 60 | 6.59 | 4.0 | 4,347 | 261 | 5.40 | 3.24 | 5.39 | 3.23 |
| 繊維類 | 5 | 30 | 6.90 | 2.1 | 4,709 | 141 | 6.27 | 1.88 | 3.25 | 0.98 |
| プラスチック類・ゴム・皮革* | 20 | 120 | 9.46 | 11.3 | 7,641 | 917 | 9.81 | 11.78 | 1.54 | 1.85 |
| 雑物(5mmフルイ下) | 15 | 90 | 41.82 | 37.6 | 2,931 | 264 | 4.00* | 3.60 | 3.98 | 3.58 |
| 不燃物 | 10 | 60 | 100 | 60.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合 計 | 1,000 | | 148 | | 2,534 | | 34.6 | | 423 | |
| | | | (A) | | (B) | | | | (D) | |
| | | | | | | | ↓ × (18/2) | | | |
| | | | | | | | 311 ← 水分量(g) | | (C) | |

灰分率 = (A) / 10 = 14.8
 高位発熱量 = (B) = 2,534
 低位発熱量 = (B) - 0.6 ((C) + (D)) = 2,093

*雑物(5mmフルイ下)の水素分率の経験値は得られていないが、発熱量から推測して、4%と設定した
 斜体数字は、物理組成実測値
 太字数字は、項目別経験値(表3)



$$H \text{ (mg/g)} = (\Delta m \text{ (H}_2\text{O trap)} - \frac{\text{(moist)}}{100} m(\text{sample})) \times (2/18) / m(\text{sample})$$

$$C \text{ (mg/g)} = (\Delta m \text{ (CO}_2\text{ trap)}) \times (12/44) / m(\text{sample})$$

図2 水素・炭素の計測法の一例

計算式は、試料中水分を考慮したものである。

5.2 塩素・硫黄

塩素・硫黄の計測は、「燃やすと塩化水素 (HCl) と硫黄酸化物 (SO_x) に変化する」という原理に基づくものであり、燃焼ガスを吸収液に溶解後、吸収液中の Cl⁻ と SO₄²⁻ を定量して元の試料中の塩素分と硫黄分を求めようというものである。燃焼分解—ガス吸収の方法として、ポンプ法 (図3(a)) と燃焼管法 (図3(b)) の2種類が廃棄物固形化燃料中の全塩素分試験方法 (JIS Z 7302-6) に採用された。

しかし、2種類の方法で計測値が異なるという問題がある³⁾。その原因は、ナトリウム (Na) やカルシウム (Ca) などのアルカリ (土類) 金属が共存すると、塩素、硫黄は、NaCl や CaSO₄ を生成して灰中に残留し、その全量がガス中に移行しないからである。ポンプ法の場合、灰を吸収液中に洗いこむので、燃焼管法より高めの値を示すことが多い。したがって、燃焼管法での計測値は、「燃焼性」もしくは「揮発性」と表現されることが多い。

一方、大過剰のアルカリ (土類) 金属を、試料と混合させて燃焼させると、HCl や SO_x を生成するよりも、金属の塩化物や硫酸塩を生成して、灰中にこれらがとどまるので、この性質を利用する方法 (エシュカ法, JIS Z 7302-6 の参考) もある (図3(c))。

いずれにしても、水素・炭素の分析に比べ、塩素、硫黄の分析は検討課題が多い。ちなみに、この方法のもとになった燃料分析の分野では、硫黄を蛍光 X 線分析方法で定量するのが常法となりつつあり、塩素分析についても、近い将来この方法が視野に入ると考えられる。

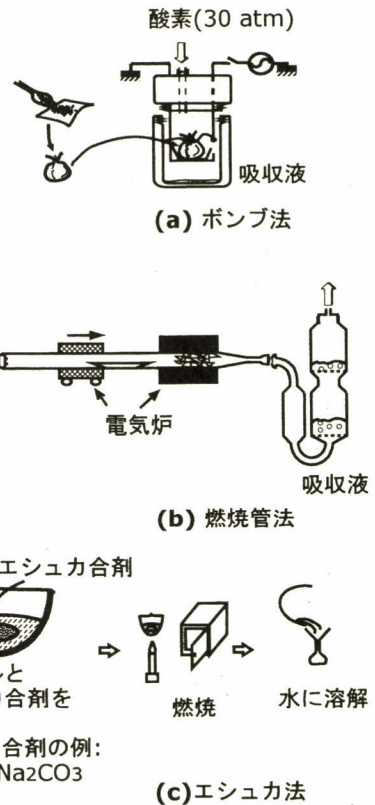


図3 塩素・硫黄の計測法

5.3 窒素

ケルダール法 (硫酸分解で窒素分をアンモニアに変換し、アンモニア量を定量する) と CHN コーダー (燃焼させて、ガス中の NO を計測する) による方法がある。

ごみ試料について、原理が異なるこれらの方法で、計測値が一致することが確かめられている⁴⁾。

活動が、廃棄物に関わる事象の解明の一助になり得るように努力を続けたい。

6. お わ り に

本稿では、ごみ分析の概観を示した。個々の単位操作の検討が、試験・検査法研究部会のベースであるが、「何を調べているのか」の全体像の明示と、合理的な方法の提案こそが、期待される成果であると考え。未だ、未解決の問題があることを白状しつつも、本研究部会の

参 考 文 献

- 1) 廃棄物学会 試験・検査法研究部会 1996年度報告書
- 2) 廃棄物学会 試験・検査法研究部会 1998年度報告書
- 3) 廃棄物学会 試験・検査法研究部会 1999年度報告書
- 4) 及川 智, 三森啓介, 谷川 昇: ごみの化学組成分析の効率化についての検討, 平成10年度東京都清掃研究所研究報告第28号, pp.70-75 (1999)

Proximate Analysis, Heat Measurement and Elemental Analysis of Waste

Nobuhisa Watanabe*

* Osaka City Institute of Public Health and Environmental Sciences
(8-34 Tohjoh-cho, Ten-nohji-ku, Osaka-city, 543-0026 Japan)

Abstract

The general aspect of waste composition analysis consisting of proximate analysis, heat measurement and elemental analysis has been presented. The definition and usage of terms was clarified, accordingly all terms should be combined with their respective units. Empirical data of proximate composition (%) and heat value (kcal/kg) for individual constituents were introduced, which made it possible to predict waste property from a simple physical composition. The method of analysis of hydrogen and carbon is well established, however, determination of chlorine and sulfur in the waste matrix is under current research, as the analytical result can differ depending on the employed method.

Key words: Waste composition, heat measurement, elemental analysis, chlorine, sulfur