

# ごみの元素分析値と発熱量に関する考察

## Investigation of elemental analysis of refuse for calorific values

羽 染 久\* 佐 藤 幸 世\* 中 田 清 志\* 野 村 寛\*

Hisashi Hazome, Kosei Sato, Kiyoshi Nakata and Hiroshi Nomura

### 1 結 言

ごみの成分分析値から発熱量を算出する場合、多くの実験式が提示されているが、特に元素分析値からの発熱量算出式に関しては、ごみによく当てはまる実験式が確立されていないのが現状である。

そこで筆者らは過去昭和51年から昭和53年までに測定したごみの元素分析値と、同試料のボンブの熱量計から求めた発熱量の関係についてデータを統計的に解析し、ごみによく当てはまる実験式について検討した。

### 2 測 定 方 法

#### 1) 分析方法

ごみの分析は、主に厚生省環境整備課課長通知第95号(昭和52年11月4日)に従い約200kgのごみから四分法にて約10kg採取し、恒量まで乾燥して水分測定後、紙・布類、木・竹類、合成樹脂類、ちゅう芥類、その他、不燃物の6種類に種類分けし、組成分析を行った。これらを各組成ごとに破碎し下記の機器を使用して元素分析(各組成の乾物元素分析値、乾物可燃分元素分析値、湿物可燃分元素分析値)、発熱量分析(各組成の乾物発熱量、乾物可燃分発熱量、湿物高位発熱量)、可燃分、灰分分析(800°C, 2時間)を行った。

#### 2) 分析機器

- (1) 元素分析装置: Perkin-Elmer 社製240型(測定精度0.3%以内)
- (2) 電子式精密自動天秤: Perkin-Elmer 社製 AD-2 Z 型(実感量0.001mg)
- (3) YM 改良 B 型熱研式熱量計: 吉田製作所(株)製  
YM 熱研式デジタル熱量計: 吉田製作所(株)製
- (4) 電気炉: 最大使用温度1150°C 大和科学(株)製

\* 日本環境衛生センター衛生工学部一般廃棄物三課  
Department of Sanitary Engineering, Japan  
Environmental Sanitation Center

### 3 試料の性状

元素分析、発熱量の測定に供した、ごみ50検体の理化学的性状(水分、可燃分、灰分、種類組成)は表1のとおりである。平均値は水分58.1%、総灰分9.6%、可燃分32.3%で、種類組成は、紙・布類41.8%、木・竹類6.0%、合成樹脂類13.1%、ちゅう芥類22.6%、その他6.9%、不燃9.6%であった。

### 4 従来の発熱量算出式と酸素の結合型比率

ごみの元素分析値から発熱量を算出する場合、これまで他の分野で使用されている式が使われており、以下の三式が代表的なものである。

Dulong の式:

$$Hh = 81C + 342.5 \left( h - \frac{O}{8} \right) + 22.5S \text{ (kcal/kg)} \quad \textcircled{1}$$

Steuer の式:

$$Hh = 81 \left( C - \frac{3}{8}O \right) + 345 \left( h - \frac{O}{16} \right) + 25S + 57 \times \frac{3}{8}O \text{ (kcal/kg)} \quad \textcircled{2}$$

Scheurer-Kestner の式:

$$Hh = 81 \left( C - \frac{3}{4}O \right) + 342.5h + 22.5S + 57 \times \frac{3}{4}O \text{ (kcal/kg)} \quad \textcircled{3}$$

ここでは、水の蒸発潜熱を考慮した低位発熱量は、試料の水分値で変わるので高位発熱量(Hh)で比較検討した。

上記の三式は、一部結合エネルギー値が違っているものの本質的な違いは、可燃分中の酸素の取扱いが異なるだけである。すなわち Dulong 式の場合、酸素はすべて H<sub>2</sub>O の形であるとし、Steuer の式の場合は、半分が H<sub>2</sub>O、残り半分が CO の形であるとし、Scheurer-Kestner の式は全てが CO の形であると考えて算出している。Dulong の式は石炭やコークスなどのように炭

表 1 ごみの理化学的性状

	湿物基準			乾物基準					
	水分(%)	総固形分		種類組成					
		総灰分(%)	可燃分(%)	紙布(%)	木竹(%)	合成樹脂(%)	ちゅう芥(%)	その他(%)	不燃(%)
検体数	50	50	50	50	50	50	50	50	50
最大値	77.1	24.6	49.4	72.1	35.9	24.7	76.8	26.2	43.3
最小値	39.0	3.4	17.5	5.6	0.6	3.5	5.4	1.3	0.0
平均	58.1	9.6	32.3	41.8	6.0	13.1	22.6	6.9	9.6
分散	70.33	15.67	56.73	218.82	32.87	25.06	195.21	22.41	64.67
標準偏差	8.39	3.96	7.53	14.79	5.73	5.01	13.97	4.73	8.04

素を主成分とする物質ではよく実測値と合うとされている。化学成分値が同じであっても、元素の結合状態によって発熱量(燃焼熱)は異なってくる。従ってこれらの結合エネルギーを酸素の H<sub>2</sub>O と CO の化合型比率で表示し、実測値(元素分析値とポンプの発熱量)からごみによく当てはまる酸素の分配比率を求めることができる。(理論)

酸素の H<sub>2</sub>O 化合型比率を X, CO の化合型比率を 1-X とすれば、

$$\begin{aligned}
 Hh &= 81\left[C - \frac{3}{4}(1-X)O\right] + 345\left(h - \frac{1}{8} \times O\right) \\
 &\quad + 57 \times \frac{3}{4}(1-X)O + 25S \\
 &= 81C + 345h - (25.13X + 18.00)O + 25S \dots \textcircled{4} \\
 \therefore X &= \frac{81C + 345h - Hh + 25S}{25.13O} - 0.716 \dots \textcircled{5}
 \end{aligned}$$

## 5 結果および考察

### 1) ごみの元素分析値と発熱量

50検体(一部欠測あり)の元素分析を行い、その値を用いて上記の三式(①, ②, ③)に代入して求めた発熱量値およびポンプの熱量計から発熱量値を求めた。これらの試料は乾物基準で各組成(紙・布類, 木・竹類, 合成樹脂類, ちゅう芥類, その他)ごとに測定し、可燃分組成を乗じ湿物基準値を求めた。これらの結果を表2、

3, 4, 5, 6, 7に示す。これらの表には、検体数, 最大値, 最小値, 平均値, 分散, 標準偏差を示した。

これらの結果をポンプの発熱量との平均値で比べると, Dulongの式は, 紙・布類, 木・竹類, ちゅう芥類, 湿物可燃分で低めに出ており, 合成樹脂, その他が高めにでている。さらに Steuerの式は全てに関してポンプの発熱量より高めに, Scheurer-Kestnerの式は全ての種類に関してより高めにでている。

### 2) 相関・回帰と平均値の差の検定

そこでさらに深く検討するために全データについてポンプの発熱量と三つの式から求めた値との相関係数を求めた。これらの結果を表8に示す。r表より r(40, 0.01) = 0.393であり, ちゅう芥類を除いて有意であるから相関ありと認め, 一次回帰を求めてみた。これらの結果を表8に示す。またポンプの発熱量と三式から求めた発熱量の平均値の差の検定を行って見た。これらの結果も合わせて表8に示す。正規分布表から F(0.05) = 1.96であるからちゅう芥類の Dulongの式, および湿物可燃分の Dulongの式, Steuerの式から求めた平均値は有意差水準5%で有意差なし, つまり平均値に差があるとは言えない。換言すればちゅう芥類には Dulongの式, 湿物可燃分には Dulongの式と Steuerの式で計算してもポンプから求めた発熱量とに差があるとは言えないが, 他の種類に関しては, 上記三式(①, ②, ③)

表 2 紙・布類の元素分析値と発熱量

	N(%)	C(%)	H(%)	O(%)	S(%)	合計(%)	Dulong*	Steuer*	Scheurer-Kestner*	Bomb*
検体数	50	50	50	50	50	50	50	50	50	44
最大	2.87	49.82	6.87	46.78	1.82	95.52	4,810	5,260	5,700	4,930
最小	0.00	35.14	5.28	28.71	0.00	74.41	3,020	3,560	4,090	3,410
平均値	0.69	42.76	5.98	38.65	0.32	88.41	3,870	4,350	4,820	4,180
分散	0.3566	5.9348	0.1173	13.3136	0.0968	20.3953	118,856	104,892	93,828	100,075
標準偏差	0.5972	2.4361	0.3427	3.6488	0.3111	4.5161	344.76	323.87	306.31	316.35

\* 発熱量: Kcal/kg

表 3 木・竹類の元素分析値と発熱量

	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	合計 (%)	Dulong*	Steuer*	Scheurer-Kestner*	Bomb*
検体数	49	49	49	49	49	49	49	49	49	43
最大	3.05	49.30	6.86	41.08	1.29	99.08	4,780	5,200	5,600	5,580
最小	0.44	30.82	4.14	23.10	0.00	70.80	2,440	2,870	3,300	3,470
平均値	1.23	44.90	5.93	36.77	0.29	89.13	4,100	4,570	5,010	4,390
分散	0.3024	12.6244	0.2542	8.7627	0.061	32.9982	176,388	179,138	182,635	130,373
標準偏差	0.5499	3.5530	0.5041	2.9602	0.2470	5.7444	419.96	423.25	427.36	361.07

\* 発熱量 : kcal/kg

表 4 合成樹脂類の元素分析値と発熱量

	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	合計 (%)	Dulong*	Steuer*	Scheurer-Kestner*	Bomb*
検体数	50	50	50	50	50	50	50	50	50	44
最大	3.22	83.15	13.69	20.24	0.82	100.00	11,010	11,070	11,150	10,340
最小	0.00	52.17	7.97	2.76	0.00	71.77	6,520	6,790	7,020	6,800
平均値	0.56	72.31	11.02	9.22	0.16	93.27	9,240	9,380	9,470	8,580
分散	0.4553	46.4709	2.2891	14.7280	0.0494	48.1777	1,168,359	1,122,569	1,061,883	939,042
標準偏差	0.6748	6.8170	1.5130	3.8377	0.2222	6.9410	1,080.9	1,059.5	1,030.5	969.04

\* 発熱量 : kcal/kg

表 5 ちゅう芥類の元素分析値と発熱量

	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	合計 (%)	Dulong*	Steuer*	Scheurer-Kestner*	Bomb*
検体数	47	50	50	50	50	50	50	50	50	44
最大	6.06	66.14	13.23	53.85	1.25	100.00	8,100	8,250	8,330	7,870
最小	0.00	29.91	4.55	9.52	0.00	63.95	2,810	3,160	3,500	2,800
平均値	2.90	43.54	6.24	33.09	0.52	86.16	4,230	4,660	5,070	4,240
分散	1.2438	25.8607	1.3140	43.9423	0.0859	88.3615	615,788	555,268	506,102	552,934
標準偏差	1.1153	5.0853	1.1463	6.6289	0.2930	9.4001	784.72	745.16	711.41	743.60

\* 発熱量 : kcal/kg

表 6 その他の元素分析値と発熱量

	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	合計 (%)	Dulong*	Steuer*	Scheurer-Kestner*	Bomb*
検体数	50	50	50	50	50	50	50	50	50	44
最大	6.31	55.77	6.24	48.59	1.44	100.00	5,280	5,670	6,040	4,320
最小	0.09	11.73	1.07	14.10	0.00	44.23	32	405	782	1,540
平均値	2.29	34.74	4.71	29.02	0.41	71.17	3,190	3,560	3,910	3,090
分散	1.2408	69.0905	1.3621	32.2969	0.0864	150.12	1,089,867	1,088,263	1,084,978	339,976
標準偏差	1.1139	8.3121	1.1671	5.6830	0.2940	12.2521	1,044.2	1,043.2	1,041.6	583.07

\* 発熱量 : kcal/kg

表 7 (湿物)可燃分の元素分析値と発熱量

	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	合計 (%)	Dulong*	Steuer*	Scheurer-Kestner*	Bomb*
検体数	50	50	50	50	50	50	50	50	50	44
最大	1.43	27.30	3.65	19.17	0.43	49.89	2,610	2,820	3,020	2,900
最小	0.06	9.30	1.30	5.41	0.02	17.30	920	1,000	1,080	1,010
平均値	0.49	17.47	2.44	11.87	0.13	32.41	1,760	1,910	2,050	1,810
分散	0.0620	17.7802	0.3876	9.0285	0.0054	58.3631	193,068	219,643	248,195	221,594
標準偏差	0.2490	4.2167	0.6225	3.0047	0.0737	7.6396	439.39	468.66	498.19	470.74

\* 発熱量 : kcal/kg

表 8 ポンプの発熱量と元素分析値からの計算発熱量値との関係

	紙・布類			木・竹類			合成樹脂類			ちゅう芥類			その他			(湿物)可燃分		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
相関・ 回帰係数 $\gamma^*$	0.392	0.431	0.468	0.452	0.456	0.431	0.720	0.709	0.697	0.142	0.133	0.119	0.446	0.421	0.452	0.970	0.970	0.978
A*	0.371	0.438	0.508	0.366	0.367	0.327	0.654	0.661	0.671	0.127	0.135	0.117	0.239	0.226	0.243	0.985	0.916	0.866
B*	2,760	2,289	1,747	2,886	2,713	2,758	2,488	2,332	2,184	3,699	3,654	3,643	3,366	2,301	2,156	82.9	71.6	45.5
平均値の 差の検定  Z **	4.55	2.57	9.93	3.56	2.20	7.54	3.12	3.82	4.31	0.06	2.73	5.51	2.74	2.74	4.78	0.53	1.02	2.40

\*  $\gamma$ : 相関係数  $\gamma$ 表より  $\gamma(40, 0.01) = 0.393$   
 A, B: 回帰式係数  $y = Ax + B$   
 ①  $\frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}}$  ただし  $N_1, N_2$ : 検体数  $F(0.05) = 1.96$   
 \*\*  $Z = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}$   $\bar{X}_1, \bar{X}_2$ : 標本平均値  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$ : 分散

- ① Dulong の試算式
- ② Steuer の試算式
- ③ Scheurer-Kestner の試算式

表 9 可燃分中酸素の H<sub>2</sub>O 化合型比率

	紙・布類	木・竹類	合成樹脂類	ちゅう芥類	その他	湿物可燃分
最大	0.974	0.999	15.156	0.990	5.554	0.984
最小	0.056	0.178	-4.282	0.325	-0.795	0.066
平均値	0.563	0.636	4.279	0.741	1.164	0.606
分散	0.063	0.043	15.260	0.044	1.543	0.065
標準偏差	0.251	0.208	3.906	0.210	1.242	0.255

表 10 発熱量算出式

		H <sub>2</sub> O 型	CO 型	算出式
日 際 セ ン タ ー	紙・布類	0.56	0.44	Hh = 81c + 345h - 32.1o + 25s
	木・竹類	0.64	0.36	Hh = 81c + 345h - 34.1o + 25s
	合成樹脂類	4.28	-3.28	Hh = 81c + 345h - 125.6o + 25s
	ちゅう芥類	0.74	0.26	Hh = 81c + 345h - 36.6o + 25s
	その他	1.16	-0.16	Hh = 81c + 345h - 47.2o + 25s
	(湿物)可燃分(**)	0.61	0.39	Hh = 81c + 345h - 33.3o + 25s
Dulong の式(**)		1.0	0	Hh = 81c + 342.5h - 42.8o
Steuer の式(**)		0.5	0.5	Hh = 81c + 345h - 30.6o
Scheurer-Kestner の式(**)		0	1.5	Hh = 81c + 342.5h - 18.0o
東京都ごみ発熱量算出式(**)		0.61	0.39	Hh = 81c + 345h - 33.3o

(\*\*) これらの式はすべて湿物可燃分基準である

式) があまり適当でないと思われる。

3) 可燃分中の酸素の化合型比率

上記の式⑤より可燃分中の酸素の H<sub>2</sub>O 化合型比率を求めてみた。これらの結果を表 9 に示す。

これによると X の平均値は紙・布類 0.56, 木・竹類 0.64, 合成樹脂 4.28, ちゅう芥類 0.74, その他 1.16, 湿物可燃分 0.61 であった。合成樹脂類は大幅に 1 より大き

い値であった。この結果については以下のことが考えられる。

(1) 合成樹脂をポンプの熱量計で測定する場合、合成樹脂は急激に発熱する<sup>2,3)</sup>ためにバックマン温度計の読みの誤差が大きくなる。

(2) 合成樹脂を元素分析の試料として供する場合、試料重量が 2~3 mg のためサンプリング誤差が大き

い、従って元素分析値の誤差が大きくなる。

(3) 合成樹脂は、結合上酸素がほとんどなく酸素の結合型から算出式を求める理論に合わなくなる。なお、実測では、付着物の影響で酸素が9.22% (平均値) である。

#### 4) 発熱量算出式

表9の平均値を④式に代入し各種ごみに当てはまるごみの発熱量算出式を求めた。表10に結果を示す。これに東京都の結果を併記した。これらの式と東京都の結果を湿物可燃分のみでみると硫黄の項(25S)を無視すれば全く同じ式になり、 $Hh=81C+345h-33.3O+25S$  (湿物基準)の式はごみによく当てはまる発熱量実験式と思われる。

#### 5) 今後の問題

今後の問題として合成樹脂類とその他類のポンプの発熱量値、および元素分析値の再検討をし、より代表的な値を求める必要がある。また今回の元素分析値から発熱量を算出する式の出しかたはOにのみ着目して $H_2O$ 、CO型の結合状態から求めたが、元素分析値とポンプの発熱量値から直接C、H、O、Sの係数を定めた方がよりごみに当てはまる実験式が算出できるものと思われるので検討を加えていきたい。

### 6 ま と め

これまで元素分析値からごみの発熱量を算出する場合、他の分野で用いられている三つの式がごみに代用されてきた。これらの三式をごみの各種類組成ごとに検討したところいずれの式もあまり適当とは言えないことがわかった。そこで酸素の結合状態を算出しごみによく

当てはまる式： $Hh=81C+345h-33.3O+25S$  (湿物基準)を得た。

ただし、種類組成、水分、可燃分の割合に応じ発熱量は変化するので算出式も変化させなければならないことに注意しなければならない。

#### 参 考 文 献

- 1) 東京都清掃局：ごみ性状に関する調査報告書，p 23～26，1976。
- 2) 朝倉書店：プラスチックハンドブック，p 124～p 131。
- 3) 厚生省環境整備課：都市ごみ中のプラスチックの処理処分に関する研究—その4，都市と廃棄物，3(8)：p 52，1973。
- 4) 日本環境衛生センター：分析検査実技研修会テキスト—ごみ質—，1978。
- 5) 土橋・他：都市ごみの低位発熱量と水素成分の関係について，p 64，第21回全国環境衛生大会資料集，1977。

#### Summary

Three kinds of formula have been used to calculate a calorific value in refuse. However, these three formula do not always seem to be adequate for the calculation of calorific values of refuse. Thus, a new method was examined, calculating from oxygen elements bonding, and the following formula was recommended;  $Hh=81c+345h-33.3o+25s$  (wet base). It must be noted on the calculation that the value would be somewhat influenced by composition, water content, combustible characteristics etc.