

廃棄物埋立地盤に関する研究 (その1)

——実験槽に埋立てた家庭可燃ごみの5年間の性状——

喜田大三 川地 武 守屋正裕
久保 博 漆原知則

Studies on Waste-Filled Ground (Part 1)

——Five-Year Properties of Inflammable Domestic Wastes
Filled into Testing Tanks——

Daizo Kita Takeshi Kawachi Masahiro Moriya
Hiroshi Kubo Kazunori Urushibara

Abstract

Two testing tanks 2 meters in diameter and 4 meters in height were filled with inflammable domestic wastes in order to investigate properties of ground filled with such wastes. One of the tanks was kept in a condition where it was filled with water, and was called the anaerobic tank. The other tank was kept in a condition where it was drained from a bottom cock, and was called the aerobic tank.

(1) The concentrations of BOD, T-N, and Cl^- in the water varied little in the anaerobic tank, but decreased remarkably with elapse of time because of leaching action. (2) The settlement speed of the surcharge plate after 40 days of loading was higher at the aerobic tank than the anaerobic tank. K-values were about 1 kgf/cm^2 and varied little at the anaerobic tank, but increased from 1 kgf/cm^2 to 2.5 kgf/cm^2 after 3 years at the aerobic tank. (3) The corrosion rate of steel buried in the wastes was 0.06 mm/yr on average in the aerobic tank. This rate is much higher than in ordinary soils. The rate in the anaerobic tank was double that in the aerobic tank.

概 要

家庭の可燃ごみを埋立てた地盤の性状を把握するため、内径2m、高さ4mの実験槽に可燃ごみを充填し、槽内に水を満たしたままの嫌気槽と、槽内の水を槽底部から常に排水した好気槽を設置して、浸出水の水質、力学特性、鋼材の腐食などを5年間調査した。(1) 浸出水のBOD、T-N、 Cl^- などの濃度は、嫌気槽では、経時的にほとんど変化しなかったが、好気槽では、溶脱作用などによって、経時的に大きく減少した。(2) 載荷開始(40日目)以降の載荷板の沈下速度は、嫌気槽よりも好気槽の方が大きかった。K値は、嫌気槽では約 1 kgf/cm^2 でほとんど変化しなかったが、好気槽では、初期の約 1 kgf/cm^2 から3年後には約 2.5 kgf/cm^2 に増大した。(3) 鋼材の年間腐食率は、好気槽で平均 0.06 mm/yr と、一般の土中の年間腐食率に比べてかなり大きな値を示した。さらに、嫌気槽では好気槽の約2倍の年間腐食率を示した。

1. はじめに

廃棄物には、一般廃棄物と産業廃棄物がある。前者は、家庭の可燃ごみ、不燃ごみおよび尿などである。また、後者は各種事業活動によって発生する廃棄物である。

一般廃棄物のうち、家庭ごみ(可燃、不燃)の発生量は、生活水準とともに増大し、近年1人当たり平均約1kg

/日であり、その大部分は可燃ごみである。可燃ごみは、衛生面、処分地の効率的な利用などの理由から積極的に焼却されている。しかし、その割合は全体の70%程度であり、そのまま埋立てられている量も依然として多い。焼却されずに埋立てられた地盤は、多量の有機物を含有しているため、①地盤沈下が大きい、②地耐力が不足する、③汚水が浸出する、④ガスが発生する、⑤鋼材が腐食す

るなどの問題があり、公園などに利用されているにすぎない。しかし、都市周辺では、各種の利用が望まれており、そのためには、上記の問題を解決する必要がある。

ところで、可燃ごみの埋立地盤の性状は、嫌気条件と好気条件で大きく異なるといわれている。嫌気条件とは、埋立地盤内の水を排水しない条件をいい、好気条件とは、埋立地盤内の水を積極的に排水する条件をいう。しかし、嫌気・好気条件が地盤の力学特性や鋼材の腐食などに及ぼす影響について不明な点が多い。

そこで、この実験では、可燃ごみを実験槽に充填し、嫌気・好気条件の2つの実験ケースを設け、浸出水の水質、埋立地盤の力学特性（沈下、強度）および鋼材の腐食状況を調べた。

2. 実験方法

2.1. 実験槽

実験槽としては、嫌気槽と好気槽の2槽を設けた。槽はいずれも内径2m、高さ4mの鋼製のもので、その概略を図-1、2に示す。両槽には、同図に示すように、採水口を取付け、通気用の有孔管ならびに横方向地盤載荷試験用塩ビ管、腐食試験用の鋼材を設置した。

2.2. 可燃ごみおよび焼却灰の性状

可燃ごみは、家庭から某清掃工場に収集、搬入されたもので、埋立処分されている平均的なものである。その組成は、表-1に示すように、紙や厨芥類で約70%を占めていた。また、焼却灰も同清掃工場から入手したもので、可燃ごみを焼却した灰であるが、若干の金属片、ガラス片も含まれていた。これらの化学的性状を表-2に示す。可燃ごみは、有機物を主体にしており、強熱減量が約85%であった。また、焼却灰は未燃焼の有機物を含むため、強熱減量が約10%であった。

2.3. 実験槽への充填方法

嫌気槽および好気槽とも、図-1に示す層構成とした。まず、下部に砂利を敷き、その上に焼却灰と可燃ごみを交互に充填した。その際、可燃ごみは、ほとんどがビニールや紙の小袋に入れられていたため、開袋し、混合・均一化をはかったのち充填した。上部の可燃ごみを充填したのち、山砂を覆土し、載荷板を設置した。可燃ごみ、焼却灰、山砂の充填に際しては、約20cmごとに転圧した。充填量と厚さから計算される充填完了時の密度は、可燃ごみが0.45t/m³、焼却灰が1.8t/m³、山砂が1.6t/m³であった。そして、表層覆土の荷重を想定して、両槽とも充填から40日後に、3本の油圧ジャッキで約1.6t/m²（覆土1mに相当）の荷重を行なった。

2.4. 充填後の嫌気・好気条件の設定方法

嫌気条件および好気条件は、排水条件と通気条件によ

って設定した。嫌気槽では充填後に水を満たし、水位を載荷板上約20cmで維持した。一方、好気槽では、雨水以外には水を入れず、底部の排水口を常に開放して排水した。さらに、図-1、2に示すように、4本の有孔管（φ80mm）を設置し、通気性を高めるとともに、雨水などを速やかに排水できる条件とした。

2.5. 試験項目と方法

(1) 水質試験 嫌気槽では、上部および下部の可燃ごみ層の中央付近の採水口から採水し、それぞれ同量ずつを混合して分析に供した。また、好気槽では、槽底部から排出される浸出水を貯留し、分析に供した。分析項目は、pH、BOD、全窒素、硫酸イオンおよび塩素イオンの5項目である。

(2) 力学試験 力学試験としては、沈下量の測定、および横方向地盤載荷試験を行なった。沈下量は、載荷板の沈下量から求めた。横方向地盤載荷試験は、槽内に設置した塩ビ管（φ86mm）を

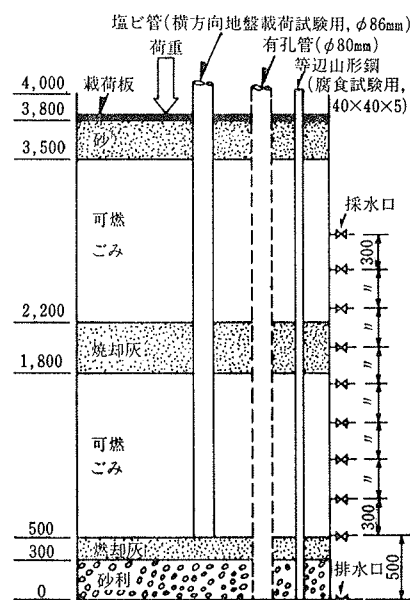


図-1 実験槽の模式断面図

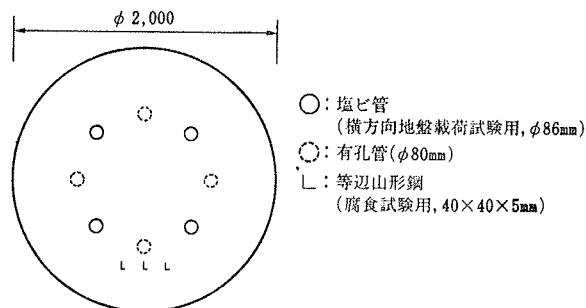


図-2 実験槽の模式平面図

紙類	厨芥類	プラスチック類	繊維類	木類	不燃物
36.8%	33.9%	12.8%	3.5%	6.7%	6.3%

表-1 可燃ごみの組成

項目	含水比 (%)	強熱減量 (%)	COD _{mn} (mg/乾物g)	BOD (mg/乾物g)	全炭素 (乾物%)	全窒素 (乾物%)
可燃ごみ	85.2	84.7	25.9	143	55.2	10.6
焼却灰	40.6	10.4	7.4	10.4	3.2	0.1

表-2 可燃ごみおよび焼却灰の化学的性状

引抜き、その孔に試験機を挿入して行なった。

(3) 鋼材の腐食試験 図-1, 2 に示すように、両槽に設置した等辺山形鋼 (40×40×5 t mm, JIS G 3912) を5年後に引抜き、外観および肉厚欠損状況を調査した。

3. 結果と考察

3.1. 浸出水の水質

嫌気槽および好気槽の浸出水の pH, BOD, 全窒素(T-N), 塩素イオン (Cl⁻) および硫酸イオン (SO₄²⁻) の経時変化を図-3 に示す。

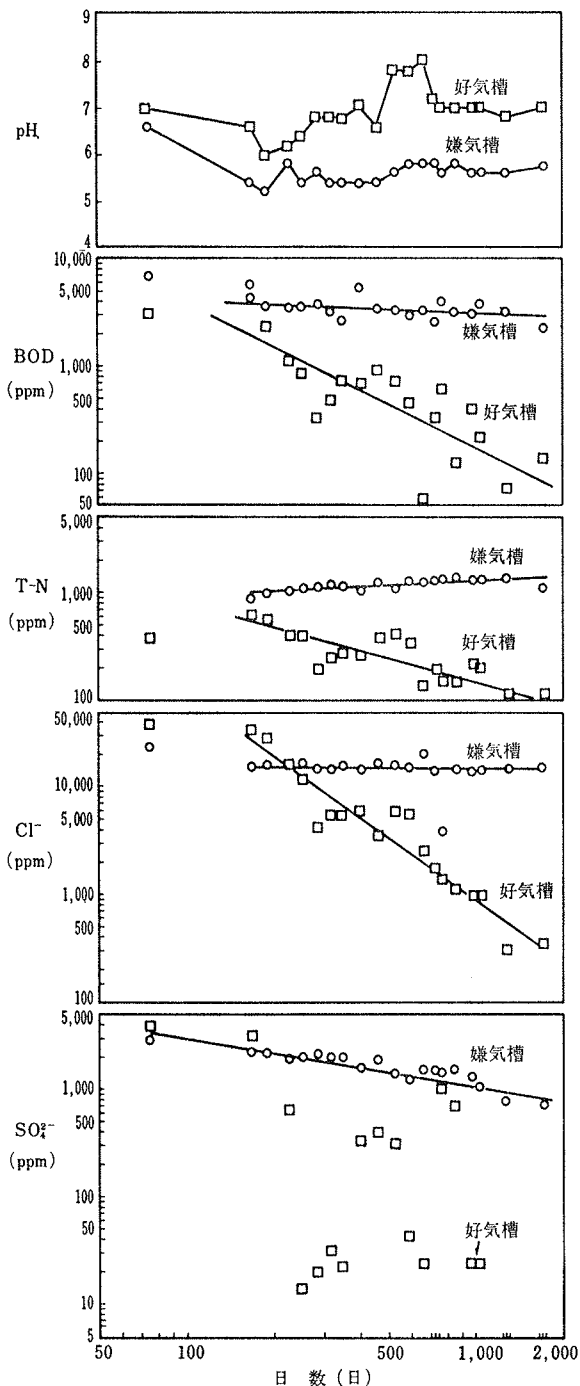


図-3 浸出水の水質

(1) 嫌気槽 pH は、5~6 と弱酸性を示し、経時変化はほとんどみられなかった。この弱酸性の原因としては、ごみの嫌気分解によって生じた有機酸や硫化水素酸などによるものと考えられる。また、BOD, T-N, Cl⁻ および SO₄²⁻ は、いずれも顕著な経時変化はみられないが、BOD および SO₄²⁻ はやや減少する傾向が、T-N はやや増大する傾向がそれぞれみられた。BOD の減少は、微生物による分解が進んでいるためである。また、SO₄²⁻ の減少は、SO₄²⁻ の一部が硫化物 (S²⁻) に変化したためと考えられる。一方、T-N は、ごみの分解によって、ごみに含まれる窒素が徐々に水に溶け出して増大しているものと考えられる。なお、Cl⁻ は、5年間ほぼ一定の値を示している。これは、Cl⁻ の大部分がごみ中に易溶性の塩などとして存在し、槽に水を満したのちに、ほぼ全量が速やかに溶解したためと考えられる。

(2) 好気槽 pH は、6~8 とほぼ中性付近で推移した。BOD, T-N, Cl⁻ および SO₄²⁻ は、いずれも経時的に減少した。そして、BOD, T-N および Cl⁻ は、約 200~約 1,800 日までの時間の対数目盛との関係において、ほぼ直線的に減少した。これらの減少は、主に雨水による溶脱のためと考えられる。その際、Cl⁻ の減少程度に比べて、T-N の減少程度は非常に小さく、BOD の減少程度はそれらの中間であった。このことは、ごみの分解が関与していると考えられる。なお、SO₄²⁻ が著しくばらついたのは、好気槽では SO₄²⁻→S²⁻ の反応と、その逆の反応(還元・酸化)が複雑に起きたためと考えられる。

以上のように、水質は嫌気槽と好気槽で大きく異なった。この傾向は、類似の実験による花嶋ら¹⁾の報告ともよく一致している。

3.2. 力学性

(1) 沈下 経過日数と沈下量の関係を図-4 に示す。0~40日(油圧ジャッキによる載荷前)の沈下量は、両槽とも約 40 cm とかなり大きかった。そして、40日後の載荷(荷重 1.6 t/m²)開始から、50日後までの沈下量は、両槽とも約 10 cm であった。沈下速度は、50日以降ゆるやかになり、約 5年(約 1,800日)まで時間の対数目盛との間で、直約的な関係を示した。そして、50~1,800日の沈下量は、嫌気槽で約 20 cm, 好気槽で約 50 cm と、好気槽の方が2倍以上大きかった。このように、ある程度長期になってからの沈下速度は、好気槽の方が明らかに大きかった。この理由としては、好気槽の方が有効荷重が大きいこと(嫌気槽では水の浮力をうける)、ごみの分解が速いことなどが考えられる。

(2) 横方向地盤反力係数 嫌気槽および好気槽の横方向地盤反力係数(K値)の経時変化を図-5 に示す。なお、値は上部・下部の可燃ごみ層の平均値である。

充填20日後のK値は、両槽とも 1 kgf/cm^3 程度でほぼ一致していた。そして、嫌気槽のK値は、5年間ほとんど変化しなかった。一方、好気槽のK値は、経時的に増大し、1,000日後で約 2.8 kgf/cm^3 と2倍以上に増大した。好気槽での、強度増大には、沈下量の増大、ごみの分解による骨格の強化などが影響し

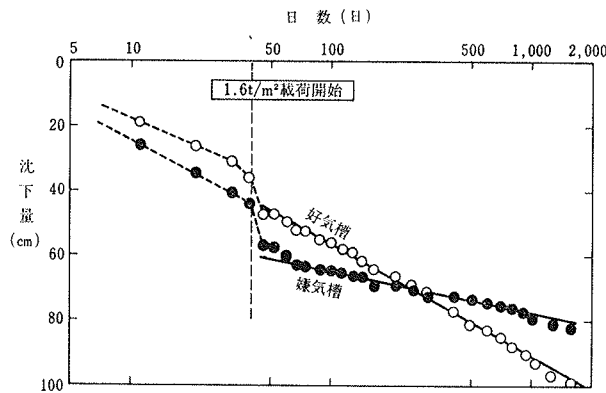


図-4 嫌気槽および好気槽の沈下量

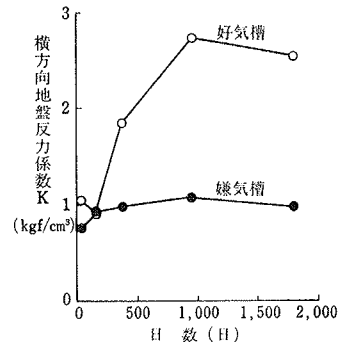


図-5 K値の経時変化

ていると考えられる。なお、嫌気槽でも、前述のようにかなりの沈下があったにもかかわらず、その強度がほとんど増大しなかった理由は明らかでない。

3.3. 鋼材の腐食

(1) 外観調査結果 実験槽から引抜いた試験材の外観は次のようであった。

嫌気槽の試験材：図-6の展開図に示すように、部分的に肉厚が完全に欠損している箇所が認められ、予想した以上に激しい腐食状況であった。腐食が比較的軽微な部位は、表面に黒色の硫化鉄皮膜が厚く形成していた。

好気槽の場合：肉厚欠損部分の面積は、嫌気槽の場合よりもかなり少なく、一見して嫌気槽よりも腐食程度は軽微であると判定された。硫化鉄の皮膜は嫌気槽の試験材と同様に比較的厚く表面を覆っており、腐食が著しい部位には硫化鉄の被膜が生成していない。硫化鉄皮膜の厚さを電磁式膜厚計で測定したところ、嫌気槽の試験材では $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 、好気槽のそれは $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 程度であった。

(2) 腐食量調査結果 図-6の斜線部で、肉厚を測定した。なお、局部腐食で断面が欠損している箇所は測定せず別途に評価した。測定要領は次のようである。

試験材の測定箇所を切り出し、腐食抑制剤を添加した塩酸溶液に浸漬してサビや硫化鉄を除去し、水洗、乾燥した。このサンプル1片につき任意の20ポイントで、ポ

イントマイクロメータを用いて残存肉厚を測定した。

初期の試験材厚さを 5.0 mm として、残存肉厚の測定値を減じ、腐食量（両面からの腐食厚さ）を求め図-7、表-3に示した。

なお、表-3には、片面からの年間腐食率（腐食厚さ/経過年数 $\times 0.5$ ）も併記した。

これらの図、表から明らかのように、嫌気槽の方が好気槽よりも腐食量が大きく、欠損部を除く平均値で比較すると約2倍である。

(3) 局部腐食の原因検討 嫌気槽、好気槽の両試験材ともに、部分的に肉厚が完全に欠損するほどの激しい局部腐食が認められた。年間腐食率に換算すると、 0.5 mm/yr 以上である。この局部腐食の原因について以下に若干の検討を加える。

欠損部に限らず、腐食が比較的著しい部分では、表面に硫化鉄皮膜の生成がない。硫化鉄は、廃棄物の分解過程で発生する硫化水素の腐食作用によって生じた一種の腐食生成物（サビ）である。

腐食過程で、この硫化鉄皮膜が比較的厚く、ち密に形成された部分は、その皮膜が次第に保護作用を示し、腐食を抑制するように機能した可能性がある。何等かの理由で、硫化鉄皮膜が十分に形成されなかった部分では、腐食速度が相対的に大きくなっていったものと考えられる。さらに、硫化鉄皮膜の有無による表面状態の違いに

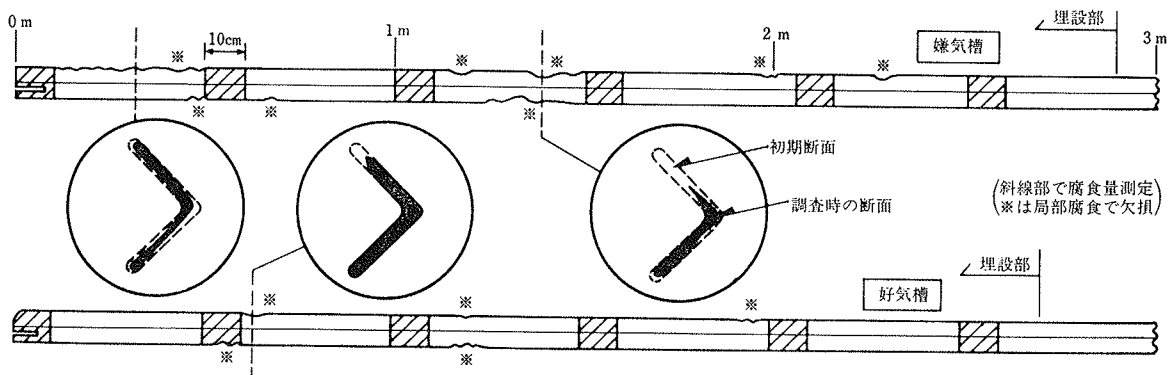


図-6 試験材の外観（5年経過）

よって、局部電池が形成され、皮膜の無い部分の腐食を一層促進した可能性もある。図一8は、試験材の一部を切り出して水中で表面の自然電位を測定した結果であり、電池形成の兆候が認められている。

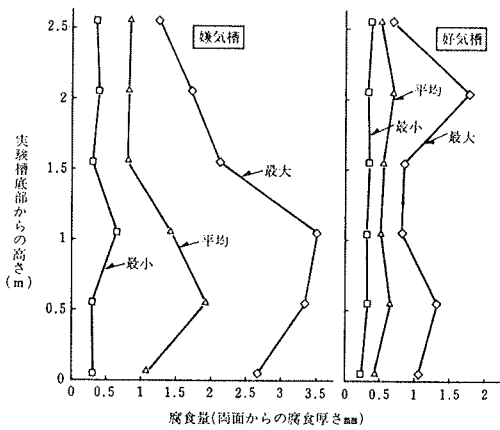
(4) 腐食環境の検討 浸出液の分析結果によると、pHは、嫌気槽が5~6の弱酸性で推移し、好気槽が6~8の中性付近で推移してきている。一般に、鋼材の腐食に対するpHの影響は、およそ6以下で促進作用が認められ、4以下で強烈となる。また、6~10ではpHの影響を受けない。嫌気槽の場合、明らかに酸性雰囲気による腐食促進作用があったものと判定される。腐食性のあるCl⁻およびSO₄²⁻は、嫌気槽では経時的な濃度変化が少なく、両イオンとも非常に高濃度で、ほぼ海水中の濃

度に匹敵する。一方、好気槽では、溶脱作用によって両イオンとも経時的に濃度が低下している。このデータからも嫌気槽の方が腐食作用が大きいと判定される。

ところで、一般に、土中における鋼材の腐食は、カソード反応に関与する酸素の供給が腐食速度に大きく影響し、地下水面下の嫌気性環境においては、腐食速度が意外に小さい。しかし、廃棄物地盤をモデル化した当実験槽においては、酸素の代わりに硫化水素がカソード反応に関与し、その結果、嫌気性環境でも腐食が進行しやすい条件になったものと考えられる。

(5) 腐食速度の評価 一般の土中における鋼材の年間腐食率は、両面で0.03 mm/yr程度²⁾で、鋼管ぐいの設計においては、通常、腐食しろとして0.05 mm/yrを見込む例が多い。これらの値と比較して、両槽での年間腐食率は、腐食の著しい欠損部を除外して評価してもかなり大きい。まして、局部腐食は、0.5 mm/yr以上と非常に大きい。したがって、当実験モデルのような地盤においては、グレードの高い被膜防食や電気防食処置を考慮する必要がある。

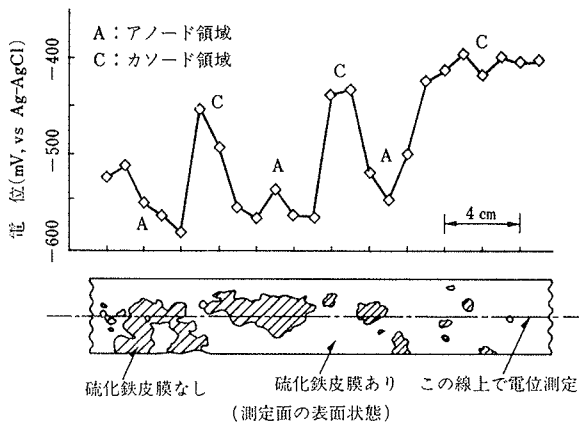
なお、好気槽のように、極力浸出水を排水すれば、水質がかなり改善されるので、腐食性は大きく軽減される。



図一7 腐食量測定結果 (局部腐食による欠損部は除外)

	嫌気槽の試験材		好気槽の試験材	
	腐食量 mm	年間腐食率 mm/yr	腐食量 mm	年間腐食率 mm/yr
最大	3.35	0.34	1.77	0.18
最小	0.30	0.03	0.25	0.03
平均	1.16	0.12	0.55	0.06

表一3 腐食量と年間腐食率 (局部腐食による欠損部は除外)



図一8 試験材表面の電位分布測定結果

4. まとめ

家庭の可燃ごみを内径2 m、高さ4 mの槽に充填し、槽内に水を満たしたままの嫌気槽と、槽内の水を槽底部から常に排水する好気槽を設置した。そして、浸出水の水質、埋立地盤の力学特性、鋼材の腐食などを5年間調査した。

その結果、浸出水のBOD、T-N、Cl⁻などの濃度は、嫌気槽では、ほとんど変化しなかったが、好気槽では溶脱作用によって、経時的に大きく減少した。また、載荷開始(40日目)以降の載荷板の沈下速度は、嫌気槽よりも好気槽の方が大きかった。K値は、嫌気槽では、約1 kgf/cm³でほとんど変化しなかったが、好気槽では、初期の約1 kgf/cm³から3年後には約2.5 kgf/cm³に増大した。そして、鋼材の年間腐食率は、好気槽でも一般の土中に比べてかなり大きく、さらに嫌気槽では好気槽の約2倍であった。

参考文献

- 1) 花嶋, 他: 現場スケールによる好気性埋立, 第27回廃棄物処理対策全国大会講演集, (1976), pp. 51~56
- 2) 大崎: 鋼ぐいの腐食, (社)鋼材倶楽部, (昭和55.9), p. 147