

環境研究総合推進費補助金  
循環型社会形成推進研究事業  
総合研究報告書

災害廃棄物由来の分別土有効利用における  
木くず等有機炭素含有量の評価  
(3K152005)

平成 27 年度～平成 28 年度

Evaluation of Organic Content in Recovered Soil Materials  
Derived from Disaster Waste

平成 29 年 5 月

国立研究開発法人 国立環境研究所 遠藤 和人

災害廃棄物由来の分別土有効利用における  
木くず等有機炭素含有量の評価  
(3K152005)

|                   |          |
|-------------------|----------|
| I. 成果の概要          | ..... i  |
| 1. はじめに (研究背景等)   |          |
| 2. 研究目的           |          |
| 3. 研究方法           |          |
| 4. 結果及び考察         |          |
| 5. 本研究により得られた主な成果 |          |
| 6. 研究成果の主な発表状況    |          |
| 7. 研究者略歴          |          |
| II. 成果の詳細         |          |
| 要旨                | ..... 1  |
| 1. はじめに           | ..... 1  |
| 2. 研究目的           | ..... 4  |
| 3. 研究方法           | ..... 6  |
| 4. 結果及び考察         | ..... 19 |
| 5. 本研究により得られた成果   | ..... 83 |
| 6. 国際共同研究等の状況     | ..... 84 |
| 7. 研究成果の発表状況      | ..... 84 |
| 8. 引用文献           | ..... 85 |
| 研究概要図             | ..... 86 |
| 英文概要              | ..... 87 |

**補助事業名** 環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業  
(平成 27 年度～平成 28 年度)

**所管** 環境省

**研究課題名** 災害廃棄物由来の分別土有効利用における木くず等有機炭素含有量の評価

**課題番号** 3K152005

**研究代表者名** 遠藤和人 (国立環境研究所)

**国庫補助金** 42,986,000 円 (うち平成 28 年度: 20,942,000 円)

**研究期間** 平成 27 年 4 月 1 日～平成 29 年 3 月 31 日

**本研究のキーワード** 有機炭素含有量、強熱減量、強熱温度、災害廃棄物由来分別土、自然発火

**研究分担者** 石森洋行 (国立環境研究所)  
朝倉 宏 (長崎大学)  
小林 潤 (工学院大学)  
安藤生大 (千葉科学大学)

## 研究概要

### 1. はじめに (研究背景等)

東日本大震災の災害廃棄物や津波堆積物由来の分別土には木くずや微少粒径の有機物が混入しており、その腐敗性等の理由から有効利用の妨げになっていた。また、復興資材である分別土の利用において、強熱減量 (熱しゃく減量) による判定があったことも原因の一つである。廃棄物資源循環学会が発出した「津波堆積物処理指針 (案)」では、安定型最終処分上に対する工作物由来の廃棄物埋立基準である熱しゃく 5% 以下が例示されていた。ただし、土砂由来の熱しゃく減量があるので、留意する旨の注記もあったが、運用上では熱しゃく減量の値のみが議論されていた。林野庁治山課は一時的ではあるものの「海岸防災林造成に当たっての災害廃棄物由来の再生資材の取扱について (事務連絡)」を発出しており、強熱減量で概ね 10% 以下という表現が用いられていた。熱しゃく減量は、強熱温度 600℃ 減量値にて有機炭素含有量が判定されており、土の強熱減量試験 (JIS 規格) では、強熱温度 750℃ が採用されているが、600℃ や 750℃ の強熱減量では有機物の他に土壌や石膏、カルシウム系化合物の結合水や結晶水も同時に揮発してしまうため、有機炭素含有量を過大評価することになり、結果的に有効利用の妨げになる可能性が高い。そもそも、強熱減量が大きく、木くず等の有機炭素が土砂分に混入することを避ける理由は、ガスが発生したり、将来、沈下したり、浸透水水質が悪化したりするためである。そこで、災害廃棄物の処理物である分別土の適正かつ合理的な有効利用を推進し、復興資材として利用される出口戦略を明確化するのであれば、正確・簡便かつ迅速に有機炭素含有量を把握すると同時に、含有有機物による環境影響を把握した上で、利用上許容される有機炭素含有量の閾値を決めることが求められる。同時に、環境保全の視点から、分別土浸透水の汚濁成分や発生ガス量、沈下挙動等を指標として有機炭素含有量の上限值についても検討することが必要である。さらに、多量の有機物を含有する場合、自然発火危険性も考慮する必要がある。どの程度の有機物が含有することで自然発火危険性を有するのか簡易に判定できる手法があれば、現場管理において有用となると考えられる。

## 2. 研究開発目的

災害廃棄物や津波堆積物由来の分別土には木くずや微小粒径の有機物が混入しており、その腐敗性等の理由から有効利用の妨げになっていた。600℃の強熱減量では有機物の他に土壌や石膏、カルシウム系化合物の結合水や結晶水も同時に揮発してしまう為、有機炭素含有量を過大評価している。災害廃棄物の処理物である分別土の適正かつ合理的な有効利用を推進し、復興資材として利用される出口戦略を明確化するため、正確・簡便かつ迅速に有機炭素含有量を把握すると同時に、閾値を求めるため、分別土浸透水の汚濁成分や発生ガス量、沈下挙動等を指標として有機炭素含有量の上限值についても検討する。更に多量の有機物を含有する場合、自然発火危険性も考慮する必要があるため、どの程度の有機物含有が危険であるか簡易に判定できる手法があれば現場管理において有用となる。そのための実大模擬試験も本研究で実施することで蓄熱発火に至るメカニズムについても評価する。

## 3. 研究方法

### (1) 実験に用いた試料

本研究では、実際の災害廃棄物由来の分別土として「分別土 A 種（夾雑物混じり津波堆積物由来）、分別土 B 種（無機系混合災害廃棄物由来）、分別土砂（宮城県内災害廃棄物由来）」の 3 種類、平常時の廃棄物として「中間処理残さ（建廃処理の篩下）」の 1 種類、自然土壌として「有機質土（北海道）、関東ローム（静岡県）、川砂（茨城県）、まさ土（茨城県）」の 4 種類、人為的に精製された粘土と人工的に混合した土壌として「木節粘土 100%、木節粘土 10% + まさ土 90%、木節粘土 30% + まさ土 70%、ドロマイト 100%、ドロマイト 10% + まさ土 90%、ドロマイト 30% + まさ土 70%、実証試験土槽木くず 100%（赤松）、実証試験土槽混合土（木くず 3% + まさ土 97%）、おがくず 100%（赤松）、おがくず 10% + まさ土 90%、おがくず 30% + まさ土 70%、おがくず 50% + まさ土 50%、おがくず 30% + プラスチック 10% + まさ土 70%、おがくず 50% + プラスチック 50%、おがくず 10% + 廃石膏粉 5% + まさ土 85%、おがくず 10% + 廃石膏粉 10% + まさ土 80%、おがくず 10% + 廃石膏粉 20% + まさ土 70%、おがくず 5% + 木節粘土 5% + ドロマイト 5% + まさ土 85%」の 18 種類、合計 26 種の土壌を用いて実験を行った。

### (2) 強熱減量に及ぼす温度と時間の影響

有機物を含む土砂に対する有機物含有量の評価方法として強熱減量があるが、JIS A1226（750℃：1 時間）や衛環 22 号通達（600℃：3 時間、熱しゃく減量と呼ばれる試験）など、複数の条件が規定されており、対象物に対する適切な条件が明確にされていない。また、温度条件によっては結晶水の脱離や脱炭酸化反応による重量減少も同時に観測されるため、正確に有機物量のみを評価する方法としての妥当性について検討する必要がある。そこで、強熱時における試料重量の経時変化を直接測定することで、強熱温度と強熱時間が熱しゃく減量に与える影響について実験的に明らかにし、有機物量の評価として適切と考えられる条件について有用な知見を得ることを本研究の目的とする。

実験的評価では、強熱試験方法に準拠しながら強熱温度と時間を変化させた試験（バッチ強熱試験）と、マッフル炉中の強熱試料に対して連続的に重量減少を評価する（シーケンシャル強熱試験）の 2 つの方法を採用した。バッチ強熱試験では、強熱温度を 8 種類（150℃、250℃、350℃、375℃、400℃、450℃、600℃、750℃）、を適宜組み合わせ、それぞれの強熱温度に対して 6 種の強熱時間（10 分、20 分、30 分、60 分、120 分、360 分）について試験を行った。また、120 分強熱後の試料、ならびに強熱前の元試料を対象に、CHN の含有量分析を JIS M 8819(1997)を準用し、CHN コーダーにより行った。シーケンシャル強熱試験は、上部に穴が開いている電気マッフル炉を用い、その穴からワイヤーで炉内に試料皿を設置し、それを電子天秤に接続することで常時電気炉内の試料重量を測定することが可能な装置を作製し、強熱時における試料重量の経時変化を測定した。天秤の精度は 100 分の 1 グラムであり、1 秒～10 秒程度のインターバルで連続的に重量を測定し PC に取り込むことが出来る。実験条件は、

7種の強熱温度（150℃、250℃、350℃、400℃、450℃、600℃、750℃）で行い、連続強熱時間は6時間（360分）以上とした。試料重量は概ね10gとしたが、かさ密度が小さい試料（木くず100%など）については、数グラム程度としている。なお、試料を入れる容器として、今回は磁性平皿を用いているが、これは空気（酸素）の拡散の影響を抑えるためである。

### （3）木くず等の含有が汚濁成分の溶出に及ぼす影響

500 mL容のポリ瓶を8個用意し、それぞれに試料を40g入れて、続いて蒸留水を400 mL（液固比10）添加した。ポリ瓶を密栓し振とう機にセットした後、水平反復を200 rpmの条件で24時間振とうした。振とう操作後、ポリ瓶は遠心分離装置に2000 rpmで20分間供して、上澄み液をろ過無しの溶出液として保存し、一方で上澄み液を孔径0.45 μmのメンブレンフィルターで濾過したものをろ過有りの溶出液とした。得られた検液についてpHと電気伝導度EC、および紫外線吸光度E260を測定するとともに、ろ過なしの検液はさらに生物化学的酸素要求量BOD、化学的酸素要求量COD、全有機炭素量TOC、溶存性全有機炭素量DOC、および浮遊物質質量SSを測定した。

### （4）木くず等の含有が分解ガス発生に及ぼす影響

木くずからの有機炭素溶出：木水固液比（木質重量/水量，g-木/cm<sup>3</sup>-水）と木くず粒径を複数設定して混合・振とうし、時間経過ごとに溶出液を採水，ろ過し，有機炭素（全有機炭素，TOCとする）溶出量を測定した。嫌氣的雰囲気形成：有機物源の量を5種類設定し，密閉容器内に入れ，その内部間隙ガスの圧力変化から7日間の酸素消費量を測定し，酸素消費速度に換算した。木くず抽出有機炭素溶液からのメタンガス発生：有機炭素濃度を複数設定した木質抽出液，嫌気性菌，栄養塩を密閉容器内に入れ，設定経過時間ごとにガス濃度を測定した。分別土など実試料からのガス発生：分別土などを嫌気状態の密閉した容器に入れ，培養温度を35℃とし，28日後の濃度のメタンガス濃度を測定した。

### （5）発火危険性に関する熱分析

火災・爆発危険性の側面からリスク評価を行うため、消防庁が示した再生資源燃料の標準的な試験方法に準じて行う。本試験方法は、2003年、三重県で起きたRDF爆発事故を契機に提案されたもので、主として再生資源燃料が大量にあった場合の微生物発酵等の微小発熱による蓄熱発火危険性に注目して行うものである。

火災・爆発危険性の試験方法としては、熱分析試験とガス発生試験の2つから構成される。熱分析試験では、TG-DTA試験（昇温速度：2 K/min）、C80（昇温速度：0.1 K/min）、TAM（等温：50℃）を実施した。試料の条件は、自然含水比ならびに重量比で20%の水を添加した試料を用いた。酸素雰囲気については、空気中と窒素中での試験を行った。なお、今回の試験では、SIT（自然発火試験）、ワイヤーバスケット試験（国際連合・危険物輸送勧告書）は、SITが製造中止等の理由で実験の装置のサポートが切れていること、後者は、多量の試料量が必要なことから行っていない。ガス発生試験では、消防庁が示した試験方法に準じて、10日間の養生期間後にガスクロマトグラフ（TCD検出器）を用いて分析を行った。

### （6）屋外模擬土槽による実証試験

発火危険性が疑われる試料とそうでない試料の2種類を選定し、屋外模擬土槽を用いた実証試験を行うことで発火に至るまでの発熱ならびに蓄熱挙動について評価を行った。屋外模擬土槽は、千葉科学大学マリーナキャンパス内の一画に設置し、A槽には赤松から作成したかんな屑を100%、B槽には重量比でかんな屑3%とまさ土97%の混合物を充填した。充填密度は、乾燥質量でA槽が0.095 Mg/m<sup>3</sup>、B槽が1.06 Mg/m<sup>3</sup>とした。模擬土槽の製作工程を図3.1に示す。



図 3.1 屋外模擬土槽の製作工程

## 4. 結果及び考察

### （1）強熱減量に及ぼす温度と時間の影響

横軸を強熱時間、縦軸に強熱減量値（LOI）とし、各温度毎にプロットした図、ならびに、強熱時間 120 分の各温度毎の強熱後試料に対して CHN 分析を実施した結果を図 4.1～4.4 に示す。CHN 分析はその精度の関係から 1% 以下になれば強熱によって熱分解したと判断した。

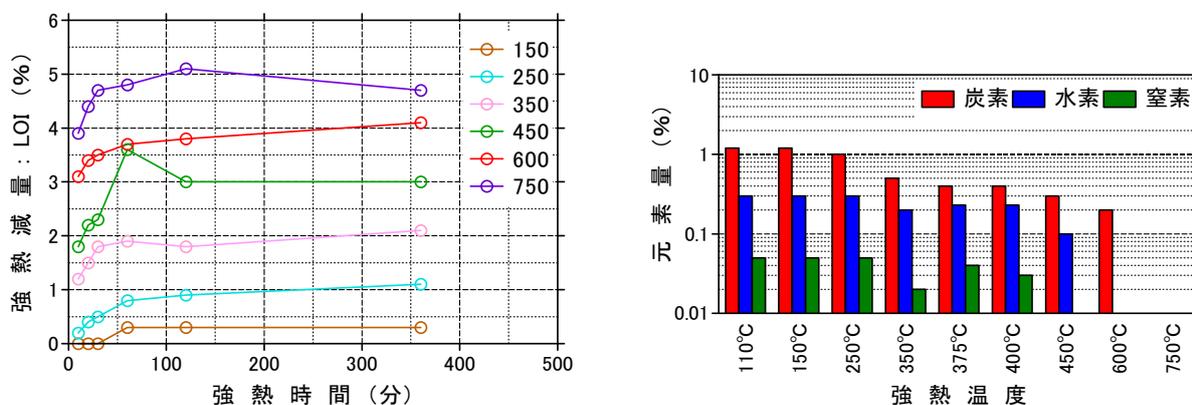


図 4.1 バッチ強熱試験と CHN 分析結果（分別土 A 種）

分別土 A 種では、強熱温度の上昇に伴って強熱減量（LOI）も増加しており、強熱時間に対しては低い温度では約 60 分程度で安定しているが、比較的高温で強熱する場合には少なくとも 120 分程度の強熱時間が必要となる結果となった。炭素量をみると、350°C で 1% を下回っており有機炭素の燃焼温度と一致した。ただし、450°C で消失する窒素分が確認されることから、木質系が残存している可能性も示唆された。450°C よりも高温側でも炭素のみが残存しているが、750°C で消失していることから、炭酸塩由来の無機炭素と推察される。

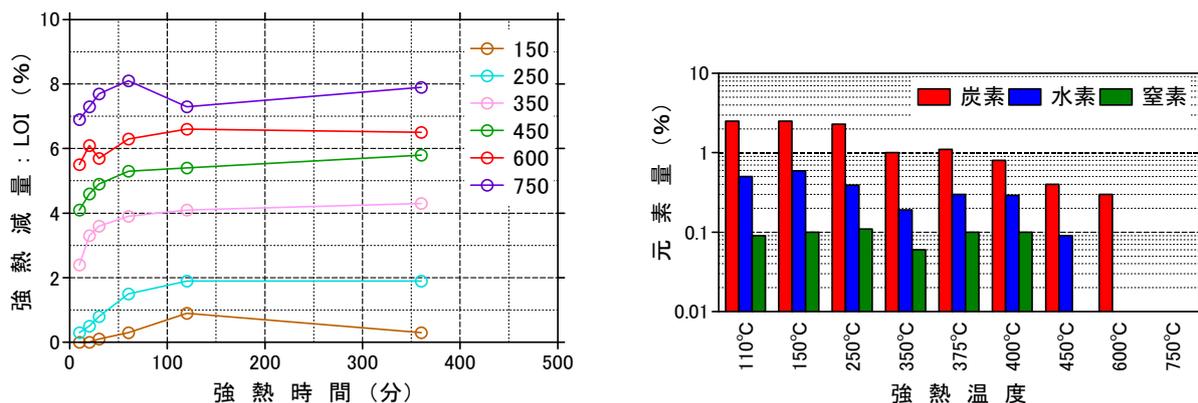


図 4.2 バッチ強熱試験と CHN 分析結果（分別土 B 種）

分別土 B 種でも、分別土 A 種と同様に、強熱温度が上昇すると LOI も上昇する傾向が確認される。強熱時間に対する LOI の変化をみると、低い温度でも 60 分以上の強熱時間が必要であり、少なくとも 120 分以上の強熱時間が必要であることがわかる。炭素量は、分別土 A 種と同様に 350°C で 1% を下回っており、450°C 以降も残存しているが、やはり 750°C で消失することから、炭酸塩由来であると推察される。

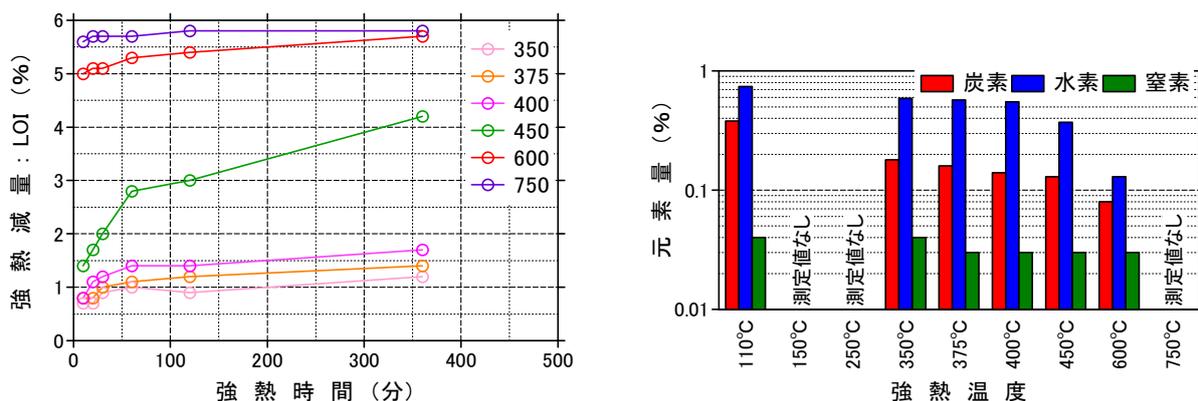


図 4.3 バッチ強熱試験と CHN 分析結果（木節粘土）

木節粘土は炭素を含まないカオリナイト ( $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ) を主成分とする精製粘土であるため、LOI の値が数% あったとしても、炭素量としては 1% 以下となっている。しかしながら、カオリナイトは 550°C 付近で結晶体の OH 構造が崩壊して急激に重量が減少するため、600°C 以上と 400°C 以下の強熱温度で LOI の値が大きくことなる。450°C 域ではその中間体に位置していると考えられる。このことは、水素量からも推察でき、450°C 以上で水素量の減少が始まっている。カオリナイトは日本にも比較的広く分布しており、古いローム層に含まれるハロイサイトもほぼ同様の挙動を示す。

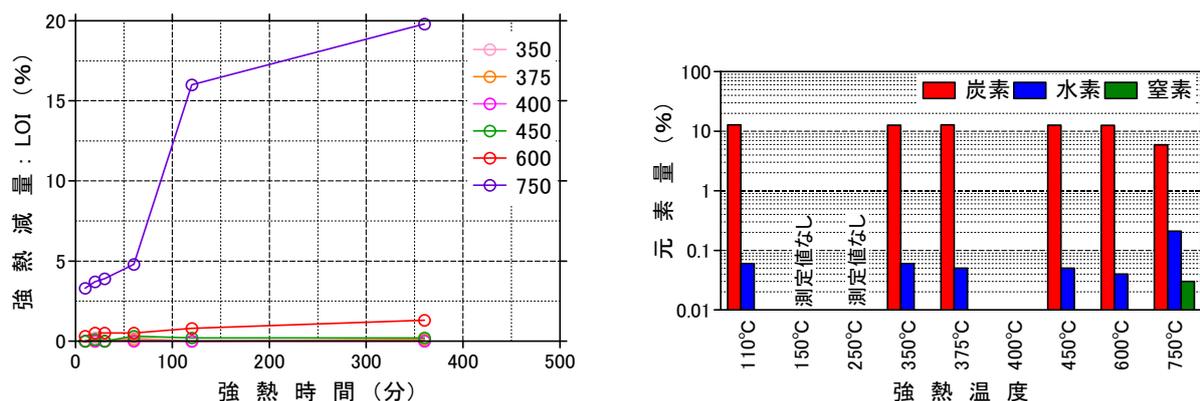


図 4.4 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (ドロマイト)

ドロマイトは、鉱物内に炭素（炭酸）を含んでおり、化学式は  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  であり、苦土、苦灰石とも呼ばれる。炭酸カルシウムの脱炭酸は  $650\sim 900^\circ\text{C}$  で生じるため、 $600^\circ\text{C}$  強熱までの大きな変化は無いが、 $750^\circ\text{C}$  強熱で LOI が突出して大きくなることが読み取れる。炭素量をみても  $600^\circ\text{C}$  まで変化が無いことから、無機炭素として存在しており、それが炭酸由来であることも容易に想像される。ドロマイト質が混入している場合、熱しゃく減量には影響しないが、JIS 規格の強熱減量試験には誤差として大きく影響することになる。

有機物含有量を評価するためには概ね  $400^\circ\text{C}$  前後以上の加熱条件が必要であることが明らかとなったので、当該条件下における重量減少挙動の詳細を明らかにするため、 $350^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$  における木くず含有試料の重量減少挙動をまとめた結果を図 4.5 に示す。

全体的に、重量変化が認められなくなるまでに要する時間は木くず含有量の増加に伴い若干長くなる傾向が見られるが、各温度条件における重量減少完了時間は、 $350^\circ\text{C}$  の場合 300 分以上であるのに対し、 $400^\circ\text{C}$  では概ね 90 分程度であることが本結果から読み取ることが出来る。粘土質からの結晶水の脱離を考慮すると、 $400^\circ\text{C}$  前後で 1 時間半から 2 時間程度熱処理することで、木質由来の有機物含有量を比較的正確に評価することが可能となると考えられる。

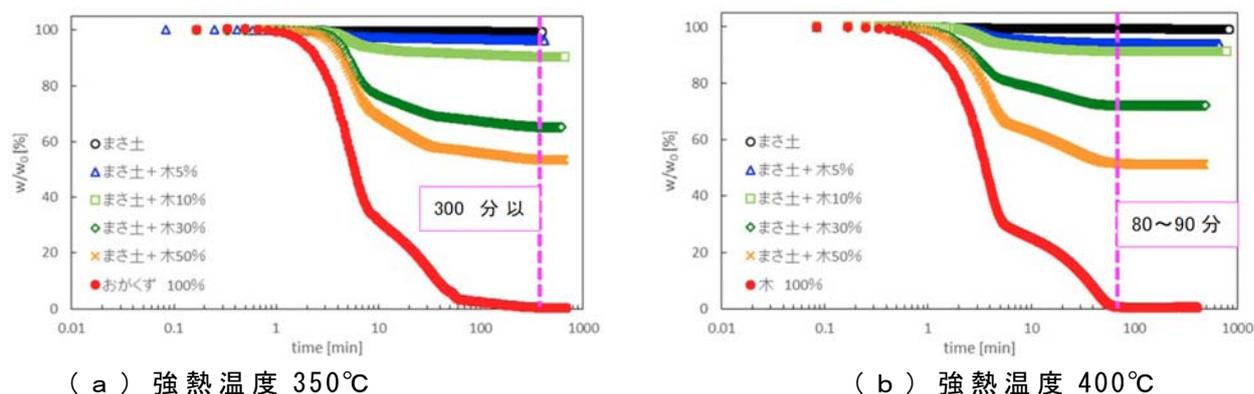


図 4.5 木くず混合まさ土の重量変化挙動

木くず添加量が既知の人工試料を対象に、混合した有機物重量と強熱減量の比較を図 4.6 に示す。本図は、強熱時間は 120 分間のみを対象とし、比較的有機物含有量が少ない領域として 10% 以下のみを拡大した図である。図中の 45 度線に近いほど木くず含有量を予測可能な強熱温度となる。 $250^\circ\text{C}$  では添加量に対して LOI がかなり小さい値となっており、予測できているとはいえないが、 $350^\circ\text{C}$  以上になると 45 度線に近い値が得られていることがわかる。 $300^\circ\text{C}$  や  $750^\circ\text{C}$  で  $45^\circ\text{C}$  線から解離した LOI が散見されるが、本図からでは定量的な評価ができないことから、ターゲットとなる添加した木くず量（有機物量）を基準として相対誤差を求め、温度毎で平均相対誤差を計算した結果を図 4.7 に示す。本図より、 $350^\circ\text{C}$  での平均相対誤差が大

きく、375℃が最も小さい誤差であることがわかる。強熱温度が上昇する毎に平均相対誤差も増加する傾向が確認できる。これより、375℃が最も適した強熱温度であるといえる。しかしながら、強熱試験は一般的にターゲット温度に対して±25℃程度の幅を持たせるのが一般的である。これは、マッフル炉の性能等の関係から必要な振れ幅となっている。仮に、375℃をターゲットにするとマイナス25℃である350℃強熱も許容されることになるが、350℃になると平均相対誤差が大きくなり、結果として、LOIの値が木くず等の有機物含有量と異なる値となる可能性を含んでしまう。375℃に対して、温度が低くなると急激に誤差が大きくなるが、温度が高くなる場合には、誤差範囲はある程度小さい範囲に収まる。そこで、本研究から得られる強熱温度としては、400℃±25℃が最も誤差が小さく、至適強熱温度であると結論付けられる。

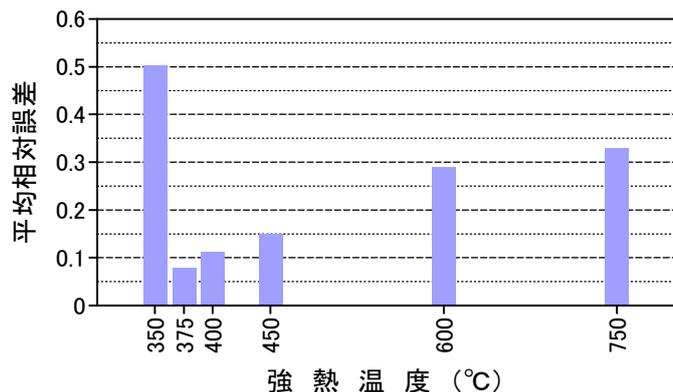
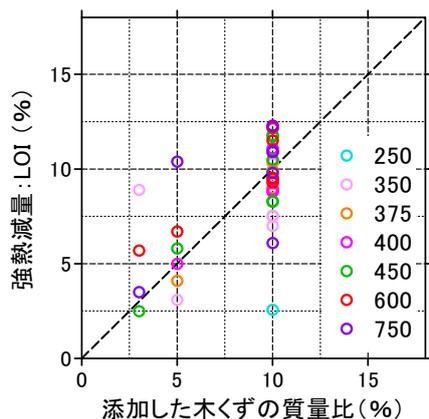


図 4.6 添加有機物量と強熱減量（10%以下のみ） 図 4.7 強熱温度毎の平均相対誤差

各強熱温度における減量値と CN コーダーで測定した全炭素含有量の関係を図 4.8 に示す。試料は、図 4.6 に示した木くずを人工的に添加した試料と、分別土 A 種、B 種、分別土砂等である。図中の近似直線は切片をゼロとし、350～450℃までの 4 本のみを記した。有機炭素の理論的燃焼温度である 330℃は、250℃と 350℃の間に位置しており、強熱減量値が大きく変化する範囲内にあることから、試料量や微妙な強熱温度の違いによって強熱減量値が不安定になる可能性がある。375℃と 400℃の近似曲線はほぼ同じであり、350℃よりも 400℃±25℃の範囲で安定した強熱減量値を得られることがわかる。

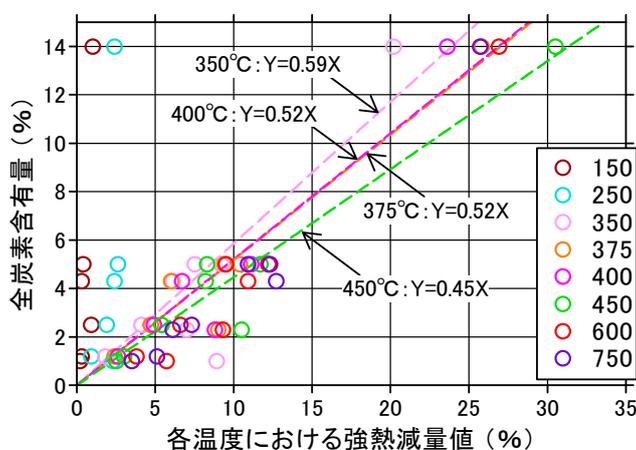


図 4.8 各強熱温度における減量値と全炭素含有量の関係

強熱減量試験を分析期間で実施する場合、基本的には JIS A 1226 : 2009 にしたがって実施させる。そこで、JIS 規格に準じて、強熱温度を 350℃、375℃、400℃とし、強熱時間を 2 時

間に限定した試験を4機関に依頼した。試料は、分別土A種、有機質土、おがくず10%+まさ土90%の3試料である。その結果、分別土A種には大きなばらつきはなかったが、有機質土とおがくず10+まさ土90%の試料では試験機関毎にばらつきが生じた。その原因の一つとして、試料量が挙げられる。図4.9に初期試料量と強熱減量の関係を示す。JIS規格では試料量は2~10gとされているので、その範囲では試験者の裁量によって初期試料量を調整可能であるが、有機質土では試料量が多い3g程度で誤差が大きく、おがくず10%+まさ土90%では試料量が少なくなるにしたがって強熱減量値が小さくなっていることがわかる。おがくず10%を混合しているのに、強熱減量も10%になるべきであるが、初期試料量が7~8gの試験結果のみが10%程度の値となっている。このことから、分別土に含まれるような有機炭素含有量を測定する場合には、7~10g程度が適当な試料量であるといえる。

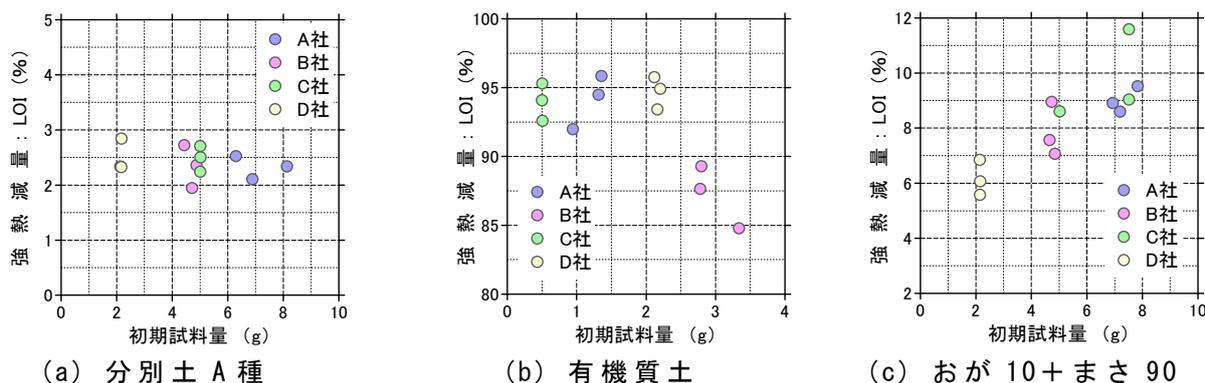


図 4.9 初期試料量と強熱減量の関係

(2) 木くず等の含有が汚濁成分の溶出に及ぼす影響

溶出試験結果を図4.10に示す。仮に、判定基準を安定型処分場浸透水基準であるBOD<20mg/LとCOD<40mg/Lとすれば、基準を満たさなかった試料は、おがくず10%以上の混合土と、処理残渣、および有機質土であった。一方で、分別土A種、分別土B種、分別土砂、かんなくず3%混合土(実証実験土槽混合土)については基準値を満たす結果となった。また、BODやCODの実験を災害後の復興期に実施するのは労力的、時間的に困難な場合も想定されるため、より簡易に求められるTOC(もしくはDOC)によって推定する方法について検討した結果、BODの推定は難しいが、分別土を対象としたCODの値であれば、TOCから予測できる可能性が示唆された。

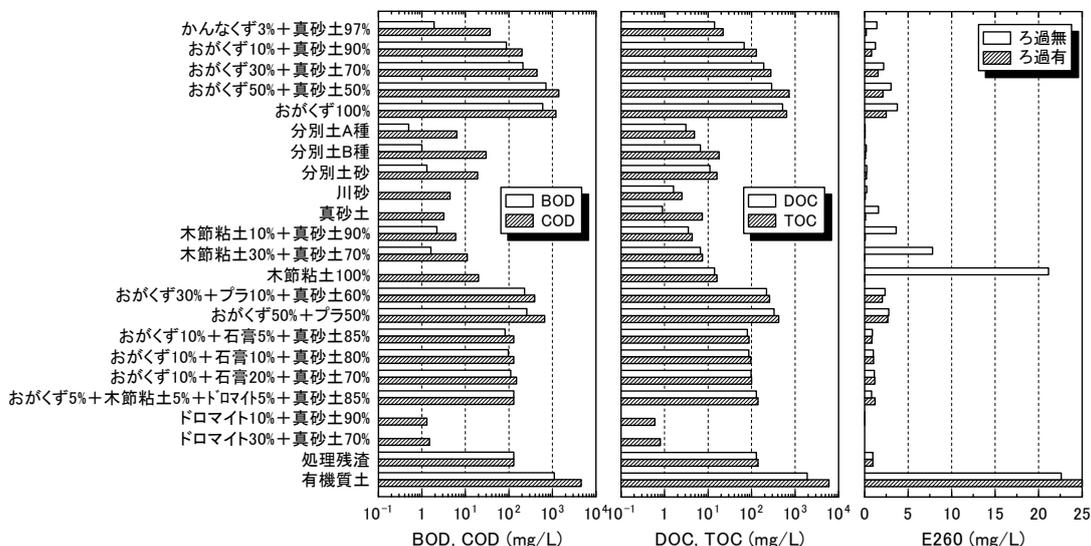


図 4.10 溶出液のBOD、COD、DOC、TOCおよびE260

### (3) 木くず等の含有が分解ガス発生に及ぼす影響

木くずからの有機炭素溶出：固体からの成分の溶出は、固体表面積が大きいほど（粒径が小さいほど）、また固体と液体との比率において固体が多いほど（固液比が大きいほど）、強度が大きかった。木質の粒径と固液比を与えたときの、経過時間ごとの溶出有機炭素濃度を予測できるモデルを構築した。固液比ごとのシミュレーション結果を図 4.11 に示す。

嫌氣的雰囲気形成：木くず抽出液の TOC と酸素消費速度に正の相関があることから、TOC を与えれば、酸素消費速度が予測できる。好気ゾーンとなる酸素進入深さは、酸素消費速度などから計算できる。初期 TOC と酸素進入深さの関係を算出できる。

木くず抽出有機炭素溶液からのメタンガス発生：全ての試料において発生したメタンガスは極めて低濃度であり、許容濃度上限値 1% はどの試料からも発生しなかった。初期 TOC とメタンガス発生強度の関係性を探った（図 4.12）。実験開始前は右上がりのグラフになると想定していたが、実際は右上がりの後に頭打ちになり、さらに右下がりとなった。この理由として、木質自体に抗菌・殺菌作用があったこと等が考えられる。

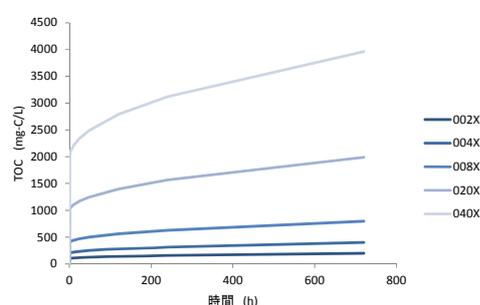


図 4.10 経過時間と有機炭素濃度シミュレーション結果

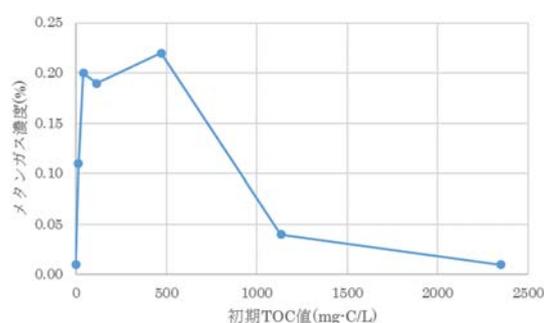


図 4.12 初期 TOC とメタンガス発生強度の関係

分別土など実試料からのガス発生：全ての試料において発生したメタンガスは極めて低濃度であり、許容濃度上限値 1% はどの試料からも発生しなかった。また、ガス発生強度と有機炭素濃度の間には明確な関係が見られなかった。強熱減量と酸素進入深さおよびメタンガス濃度の間を探った結果、強熱減量とメタンガス濃度の関係が明確でないものの、木くず重量割合 1w%、つまり強熱減量 5% 弱の場合は、2 m 堆積しても嫌気ゾーンは生じない。

### (4) 発火危険性に関する熱分析

分別土 A 種、分別土 B 種、おがくず 30% + まさ土 70%、木節粘土、川砂を対象にし、消防庁の提案した発火危険性判定を行った結果、発熱性ならびにガス発生両面からみても、再生資源燃料に比べて遙かに安全といえ、発火危険性が最も小さい部類に分類されることが判った。

### (5) 屋外模擬土槽による実証試験

外気温と屋外模擬土槽内の温度は、ほぼ同様に变化し、赤松のみの A 槽では、実験初期は槽内部温度が最高気温よりも高い傾向にあったが、継続的な発熱傾向は確認できなかった。これより、土槽 A、B とともに蓄熱よりも放熱が卓越している可能性が高く、本土槽の条件（規模や断熱仕様、資材の充填方法等）では蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。このことは、槽内ガス濃度分析からも同様の結論を得ることができている。また、排水の化学、生物学的指標の変化は、雨水、模擬廃棄物、微生物の活動に強く影響されていると考えられるが、現状では、特質すべき挙動は発見されなかった。

## (6) 災害廃棄物由来の分別土における木くず等含有量試験の提案

本研究の目的の一つは、災害廃棄物由来の分別土における木くず等含有量試験の提案である。従来の JIS 規格による強熱減量試験方法を改善し、分別土に含まれる数%程度の木くず等有機炭素の含有量を測定する試験方法を提案する。本試験方法は、有機質土や建廃由来の中間処理残さ等の有機物含有量を求めることは対象としていない。

---

### 災害廃棄物由来の分別土における有機炭素含有量試験方法

Test method for organic carbon content of recovered soils  
derived from disaster wastes

#### 1 適用範囲

この試験方法は、分別土の木くず等の有機炭素含有量試験方法について記す。なお、本試験方法は、災害廃棄物、特に津波堆積物を含む災害廃棄物や夾雑物混じり津波堆積物を中間処理して生成された分別土に適用できる。

#### 2 引用規格

次に掲げる規格は、この試験方法に引用されることによって、本試験方法の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

JIS A 1201 土質試験のための乱した土の試料調整方法

JIS R 1301 科学分析用磁器るつぼ

JIS R 3503 科学分析用ガラス器具

JIS Z 8801-1 試験用ふるい—第1部：金属製網ふるい

#### 3 用語及び定義

##### 分別土の有機炭素含有量

(110±5)℃で一定質量になるまで炉乾燥した分別土を、(400±25)℃に強熱したときの減少質量を炉乾燥分別土の質量に対する百分率で表したものを。

#### 4 試験器具

試験器具は、次による。

##### 4.1 高温乾燥炉

高温乾燥炉は、温度を(110±5)℃に保持できるもの。

##### 4.2 電気マッフル炉

700℃以上に加熱可能な炉で、温度制御が±25℃の範囲でできるもの。

##### 4.3 はかり

0.001 g まではかることができるもの。

##### 4.4 るつぼ

JIS R 1301 に規定するふた付きの容量 30 mL~50 mL のもので、強熱によって質量の変化を生じないもの。るつぼの容量は、木くず等の有機炭素含有量が 50% 程度を超えると想定される場合には 50 mL のもの、それ以外の分別土では 30 mL のもの。

##### 4.5 ふるい

JIS Z 8801-1 に規定する金属製網ふるい目開き 9.5 mm、2 mm のもの。

##### 4.6 デシケーター

デシケーターは、JIS R 3503 に規定するもの又はこれと同等の機能をもつ容器で、シリカゲル、塩化カルシウムなどの吸湿剤を入れたもの。

##### 4.7 その他の器具

###### a) るつぼばさみ

b) 炉乾燥容器 容量は 100 mL 以上のもので、対象となる分別土の粒径が大きく、不均質な場合には、500 mL など大きな容器のもの。

c) 試料粉碎机 氷を碎けるようなミキサーのようなもの。

#### 5 試料

試料は、次によること。

a) JIS A 1201 によって得られたものを用い、ときほぐしやすい程度まで空気乾燥する。

- b) 粉碎困難な 9.5 mm 以上の無機質粒子をふるい等を用いて可能な範囲で取り除いた後、ミキサーで粉碎して、目開き 2 mm のふるいを通過させる。なお、目開き 2 mm のふるいに残留する粉碎が困難な粒子等は取り除く。また、粉碎時に過度に発熱することを抑制するよう、粉碎時間等を調整すること。
- c) 目開き 2 mm のふるいを通過した分別土を高温乾燥炉に入れ、(110±5) °C で一定質量になるまで炉乾燥する。
- d) 炉乾燥後、デシケータでほぼ室温になるまで冷ましたものを試料とする。なお、空気乾燥のみでは破碎が困難な場合、空気乾燥ではなく、炉乾燥を行ってもよい。
- e) 試料の量は、容量 50 mL のるつぼを用いるとき（木くず等の有機炭素含有量が 50% 程度を越えると想定される場合）は 2~5 g 程度、容量 30 mL のるつぼを用いるときは 7~10 g とする。

## 6 試験方法

試験方法は、次による。

- a) るつぼの質量  $m_c$  (g) をはかる。
- b) 炉乾燥試料をるつぼに入れ、全質量  $m_a$  (g) をはかる。  
**注記 1** 炉乾燥後の分別土は、多種の材料が混在しており、その比重の違いによって不均一試料となっていて可能性が高いので、十分に混合したものをるつぼに入れること。
- c) るつぼを電気マッフル炉に入れ、徐々に加熱する。  
**注記 2** るつぼにはふたを斜めにかぶせること。特に、通気口の無い電気マッフル炉を用いる場合には、るつぼ内が無酸素状態とならないように、ふたを斜めにかぶせることが重要となる。
- d) 温度を (400±25) °C に保持し、設定温度に到達してから、2 時間強熱する。なお、あらかじめ温度を (400±25) °C に設定した電気マッフル炉を用いてもよい。  
**注記 3** 温度が極めて高温ではないが、あらかじめ昇温したマッフル炉にるつぼを入れる時には、長めのるつぼさみを用い、十分に注意すること。
- e) 強熱停止後、るつぼをデシケータに移し、ほぼ室温になるまで冷ました後、全質量  $m_b$  (g) をはかる。  
**注記 4** 通常、強熱停止後 10 分程度電気マッフル炉を解放した後、るつぼさみを用いて、るつぼを炉内から取り出し、室温で数分間放置した後にデシケータに移すことが多い。  
**注記 5** 室温で数分間放置せず、恒温炉乾燥炉を 110°C 程度に設定しておき、るつぼを恒温炉乾燥炉に入れて数十分間放置した後にデシケータに移してもよい。

## 7 計算

木くず等の有機炭素含有量は、次の式によって算出する。

$$LOI = (m_a - m_b) / (m_a - m_c) \times 100$$

ここに、LOI：木くず等有機炭素含有量 (%)

$m_a$ ：炉乾燥試料及びるつぼの質量 (g)

$m_b$ ：強熱後の試料及びるつぼの質量 (g)

$m_c$ ：るつぼの質量 (g)

## 8 報告

試験結果には、次の事項を報告する。

- a) 強熱時間
- b) 木くず等の有機炭素含有量 (%)
- c) この試験方法と異なる方法を用いた場合には、その内容
- d) 実施試料の概観
- e) その他報告事項

以上が、本研究で提案する「木くず等の有機炭素含有量」の試験方法である。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

強熱減量の結果が有機物含有量に相当する、という考え方は、研究者も含み、実務者の間で広く浸透している。しかしながら、地盤工学会の実験解説書や、農学系の実験図書のいずれを読んでも、強熱減量を有機物としてよいのは有機質土を対象にした時のみであり、概ね 30~50% 以上の有機物含有量がある場合に適用可能となっている。対象土を限定せずに、強熱減量値が有機物含有量であるとして、強熱減量が数% オーダーの土や分別土にも適用することは、有機物含有量を過大評価し、本来の試験方法の目的に合致しない適用外利用であるといえる。土木、農業、材料、環境の各分野で、強熱減量の温度や時間に差異があり、その測定に対する目的も異なる。従前の研究の多くは、材料中に含まれる無機炭素定量や、土壤に含まれる貝殻の遺骸量など、炭酸カルシ

ウムの脱炭酸量を正確に求めるための研究が多い。数%オーダーの有機物含有量を正確に求めるための強熱試験方法については、規格というよりも、大学単位で独自に実験方法を規定しているケースが多い。その多くは、強熱温度 350~375°C の範囲にあり、理論的な有機炭素の熱分解温度を採用し、TG-DTA 分析等によって理論付けを行っている。本研究で提案する 400±25°C : 2 時間強熱法は、試験機関や試験者が異なっても、分別土の有機炭素含有量を比較的正確に求める事を優先しており、小数点以下の精度よりも、測定誤差の最小化を優先している。そのため、電気マッフル炉の性能も含め、従前の強熱温度よりも高い温度に設定した。

土壌よりも雑多な物質で構成されている災害廃棄物由来の分別土に対し、従前の強熱減量試験方法の強熱温度と時間を変化させるだけで、有機炭素含有量（無機炭素は揮発させない）を測定可能な方法を提案したことは、科学的、特に、工学的側面での意義が大きいと考えられる。

## (2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

東日本大震災では、災害廃棄物や津波堆積物を処理することで分別土 A 種（津波堆積物由来）、分別土 B 種（可燃性混合廃棄物由来）、分別土砂（宮城県内処理物）などの土質材料が作られたが、木くず等の有機物が混入していることから、復興資材利用が進まない状況があった。これは、土壌混入の木くず等有機物含有量の評価法として、強熱温度が 600°C 以上の熱しゃく減量や JIS 規格の強熱減量を適用したことも原因の一つと考えられる。本来、熱しゃく減量は焼却灰の燃え残りを評価するための試験方法であり、その試験方法を建設系混合廃棄物のふるい下残さにも適用し、安定型処分場への埋立判断基準にも援用したものである。そのため、土壌成分を含む材料に適用されるべき基準ではない。JIS 規格の強熱減量試験は土のためのものであるが、その減量率を有機物量として評価してよいのは、亜泥炭や泥炭などの有機質土壌に限定されている。しかしながら、代替できる有機物判定方法が無いため、復興資材にも援用され、有機物含有量を過大評価してしまったと考えられる。本研究で提案する 400°C : 2 時間強熱方法は、有機物含有量を過大評価せずに、従来の強熱試験方法の温度と時間を調整するのみで、災害廃棄物由来の分別土に含まれる有機物量を迅速に測定するものである。本方法は、災害復興時のような混乱期であったとしても、多くの分析機関（土質試験所等も含む）で実施可能であり、復興資材の有効利用を時間的に妨げる可能性も低い。

400°C : 2 時間強熱の強熱減量が少なくとも 8% 以下であれば、有機汚濁成分の継続的な溶出や、メタンガスの発生を抑制することが可能であることも実験的に確認した。また、熱分析や高さ 1.5 m 程度の屋外土槽実験によって、蓄熱による自然発火危険性を判定した結果、危険性が極めて低い分類に属することも明らかとなった。復興資材となる分別土は、処理されてから利用されるまでの期間、ストックヤードに保管されることになるが、400°C 2 : 2 時間強熱の強熱減量が少なくとも 8% 以下の分別土であれば、堆積高さを混合廃棄物を対象とした高さ制限 5 m を超えてストックすることも可能と判断される。本研究成果は、望まずとも発生するであろう将来の巨大災害時の災害廃棄物処理を円滑に進め、仮置場のみならず、ストックヤードの適正管理、復興資材の品質管理にも適用できると考えられる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) 古積 博・村沢直治：災害廃棄物の自然発火とその対策，熱測定，43(1)，pp. 25-31 (2016)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) 遠藤和人・竹崎 聡・高井敦史・勝見 武：災害廃棄物由来の分別土を用いた試験盛土の観測（1 年目），第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 105-112 (2015)
- 2) 竹崎 聡・遠藤和人・中川美加子：土壌中の有機物（木くず）含有量評価，第 51 回地盤工学研究発表会講演要旨集，岡山，in CD-ROM (2016)

## 7. 研究者略歴

研究代表者：遠藤 和人

京都大学大学院工学研究科修了、工学博士、現在、国立環境研究所主任研究員

研究分担者

1) 小林 潤

名古屋大学大学院工学研究科修了、現在、工学院大学工学部准教授

2) 朝倉 宏

北海道大学大学院工学研究科修了、現在、長崎大学大学院准教授

3) 石森洋行

立命館大学大学院修了、現在、立命館大学理工学部講師

4) 安藤生大

早稲田大学工学研究科修了、現在、千葉科学大学危機管理学部教授

## 3K152005 災害廃棄物由来の分別土有効利用における木くず等有機炭素含有量の評価

## [要旨]

津波災害時には、発生した混合廃棄物や夾雑物混じり津波堆積物などを中間処理して分別土が生成される。この分別土は、多少の有機物（有機炭素成分）が残留することになるが、この残留した有機物が、将来的な沈下や、ガス発生、汚濁成分の溶出などの原因となる可能性があるため、復興資材としての有効利用の妨げの一つとなる。また、有機物の含有量は強熱試験で実施されるが、規格の強熱温度は 600℃以上であり、有機物以外の無機物や水分等の重量も測定し、有機物含有量を過大評価して、正確な有機物含有量を測定することができない。そこで、分別土を対象として、木くず等有機炭素含有量を強熱試験で求める方法について検討を行った。また、本提案方法によって求められる強熱減量が、水質汚濁成分やガス発生に及ぼす影響についても検討を行った。さらに、分別土を復興資材として有効利用する際のストックヤードの適切な管理を目的に、堆積物の蓄熱発火に関する熱分析と土槽実験を行い、発火危険性の判定を行った。

種々の粒状体試料を用い、種々の強熱温度と強熱時間で従来のバッチ式強熱減量試験を網羅的に実施し、強熱後の炭素含有量等を加味して検討した結果、至適強熱温度は 400±25℃であることが明らかとなった。強熱試験中の試料の重量変化を連続的に把握するためのシーケンシャル式強熱試験を実施し、強熱温度 400℃に着目して評価した結果、至適強熱時間は 2 時間であることを示した。有機汚濁成分の溶出特性と 400℃：2 時間強熱減量を評価した結果、一般土壌であっても BOD や COD の溶出濃度が高く、土壌に対して BOD や COD の規制をかけるべきではなく、参考値とすることが妥当であると判断された。また、BOD 代替として TOC 等を用いることは難しいが、COD 代替として TOC 濃度が利用出来る可能性が示唆された。メタンガスの発生濃度の観点から、400℃：2 時間強熱減量（LOI<sub>400</sub>）が 8%程度の分別土は安全に利用できることが明らかとなった。また、酸素消費速度から、嫌気的な領域を作らない堆積高さの指標についても示した。

熱分析による発火危険性の判定、ならびに 3%の新材木くずが混入した土壌を用いた土槽試験より、LOI<sub>400</sub> が 8%程度までの分別土の発火危険性は極めて小さいことが明らかとなった。

## 1. はじめに

## (1) 研究の背景

東日本大震災の災害廃棄物や津波堆積物由来の分別土には木くずや微少粒径の有機物が混入しており、その腐敗性等の理由から有効利用の妨げになっていた。また、復興資材である分別土の利用において、強熱減量（熱しゃく減量）による判定があったことも原因の一つである。廃棄物資源循環学会が発出した「津波堆積物処理指針（案）」では、安定型最終処分上に対する工作物由来の廃棄物埋立基準である熱しゃく 5%以下が例示されていた。ただし、土砂由来の熱しゃく減量があるので、留意する旨の注記もあったが、運用上では熱しゃく減量の値のみが議論されていた。林野庁治山課は一時的ではあるものの「海岸防災林造成に当たっての災害廃棄物由来の再生資材の取扱について（事務連絡）」を発出しており、強熱減量で概ね 10%以下という表現が用いられていた。熱しゃく減量は、強熱温度 600℃減量値にて有機炭素含有量が判定されており、土の強熱減量試験（JIS 規格）では、強熱温度 750℃が採用されているが、600℃や 750℃の強熱減量では有機物の他に土壌や石膏、カルシウム系化合物の結合水や結晶水も同時に揮発してしまうため、有機炭素含有量を過大評価することになり、結果的に有効利用の妨げになる可能性が高い。そもそも、強熱減量が大きく、木くず等の有機炭素が土砂分に混入することを避ける理由は、ガスが発生したり、将来、

沈下したり、浸透水水質が悪化したりするためである。そこで、災害廃棄物の処理物である分別土の適正かつ合理的な有効利用を推進し、復興資材として利用される出口戦略を明確化するのであれば、正確・簡便かつ迅速に有機炭素含有量を把握すると同時に、含有有機物による環境影響を把握した上で、利用上許容される有機炭素含有量の閾値を決めることが求められる。同時に、環境保全の視点から、分別土浸透水の汚濁成分や発生ガス量、沈下挙動等を指標として有機炭素含有量の上限值についても検討することが必要である。さらに、多量の有機物を含有する場合、自然発火危険性も考慮する必要が出てくる。どの程度の有機物が含有することで自然発火危険性を有するのか簡易に判定できる手法があれば、現場管理において有用となると考えられる。研究開発課題の全体像を図 1.1 に示す。

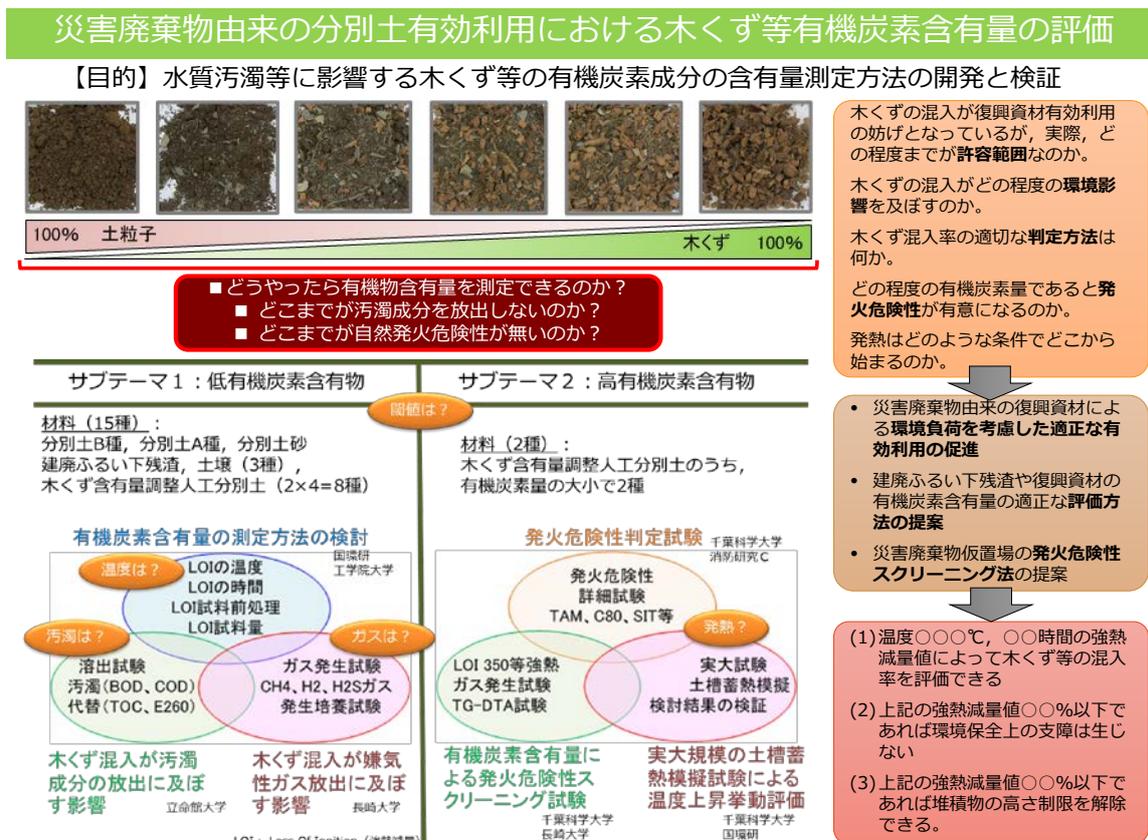


図 1.1 研究課題の全体像

## (2) 様々な強熱減量試験方法

表 1.1 に分野毎の強熱温度と時間の違いを示す。地盤工学会基準でもある JIS A 1226 : 2009 法には、強熱試験によって土壤中の揮発成分である有機物と結晶水、結合水の減量を測定することが目的とされている<sup>1)</sup>。分野によって名称も異なり、強熱減量、熱しゃく減量、強熱残留物等となっている。セメントに対する強熱減量の主な揮発成分については、表 1.2 に示す見解があり、主にはセメント中の不純物含有量を測定することを目的とした方法である。

表 1.1 分野毎の強熱減量

| 分野と規格                  | 分析方法と目的   |
|------------------------|---|
| 地盤工学会<br>(JIS A 1226)  | 750±50℃で1時間強熱。恒量になるまで1時間強熱を繰り返す。主に土壌中の揮発成分（有機物と結晶水、結合水が対象）を測定することが目的。   |
| セメント関連<br>(JIS R 5210) | 975±25℃で強熱。高炉セメントの場合には700±25℃。不純物含有量（クリンカーや水和物等からの脱水、石灰石の脱炭酸、石こう結晶水の脱水が主な揮発成分で最大4.78%の減量値）を測定することが目的。             |
| 廃棄物<br>(環整 95 号)       | 600±50℃で3時間強熱。名称は「熱しゃく減量」。焼却残さの未燃分を評価することが目的。埋立基準は熱しゃく減量15%。平成10年の環境庁告示34号にて工作物の新築、解体由来の安定型産業廃棄物の埋立基準5%の方法としても利用。 |
| 工業廃水<br>(JIS K 0102)   | 600±25℃で30分間強熱。名称は「強熱残留物」。工業廃水中の強熱による非揮発性残留物量（無機物）を測定することが目的。   |
| 石灰石<br>(JIS M 8850)    | 1050±50℃で1時間強熱。恒量になるまで1時間強熱を繰り返すが、一般的には1時間とされている。有機物を含む場合には500～600℃で強熱したものを使用する、という注記がある。                         |
| 底質調査方法<br>(環水管 127 号)  | 600℃±25℃で1時間強熱。水質汚濁等に係る底質中の化学物質等の濃度を把握する試験方法の内、一般項目の一つとして挙げられている。   |

表 1.2 セメントの強熱減量値の主な要因

| 強熱減量の主な要因   | 想定最大減量値                            |
|---|------------------------------------|
| セメントの風化によるもの①クリンカーや遊離石灰水和物からの脱水②二酸化炭素吸収由来の炭酸塩からの脱炭酸 | 試料による差異があるものの1.0%前後と見積もれる          |
| 少量混合成分として混同した石灰石の脱炭酸                                | 少量混合成分として5%の石灰石が混合しているとすると2.2%となる。 |
| 石こうの結晶水   | 三酸化硫黄が二水石こうに忌諱すると仮定して1.85%         |
| 以上の3要因を合計すると  | 4.78%                              |

## 2. 研究目的

### (1) 研究全体の目的

災害廃棄物や津波堆積物由来の分別土には木くずや微小粒径の有機物が混入しており、その腐敗性等の理由から有効利用の妨げになっていた。600℃の強熱減量では有機物の他に土壌や石膏、カルシウム系化合物の結合水や結晶水も同時に揮発してしまう為、有機炭素含有量を過大評価している。災害廃棄物の処理物である分別土の適正かつ合理的な有効利用を推進し、復興資材として利用される出口戦略を明確化するため、正確・簡便かつ迅速に有機炭素含有量を把握すると同時に、閾値を求めるため、分別土浸透水の汚濁成分や発生ガス量、沈下挙動等を指標として有機炭素含有量の上限值についても検討する。更に多量の有機物を含有する場合、自然発火危険性も考慮する必要がある、どの程度の有機物含有が危険であるか簡易に判定できる手法があれば現場管理において有用となる。そのための実大模擬試験も本研究で実施することで蓄熱発火に至るメカニズムについても評価する。

### (2) 研究課題毎の目的

#### 1) 強熱減量に及ぼす強熱温度および強熱時間の影響

有機物を含む土砂に対する有機物含有量の評価方法として強熱減量があるが、JIS A1226 : 2009 (750℃ : 1時間) や平成2年の衛環22号通達 (600℃ : 3時間、熱しゃく減量と呼ばれる試験) など、複数の条件が規定されており、対象物に対する適切な条件が明確にされていない。また、温度条件によっては結晶水の脱離や脱炭酸化反応による重量減少も同時に観測されるため、正確に有機物量のみを評価する方法としての妥当性について検討する必要がある。そこで、強熱時における試料重量の経時変化を直接測定することで、強熱温度と強熱時間が熱しゃく減量に与える影響について実験的に明らかにし、有機物量の評価として適切と考えられる条件について有用な知見を得ることを本研究の目的とする。

なお、強熱試験時の詳細な重量減量挙動を把握するため、試料重量変化をシーケンシャルに測定することで、各強熱温度が強熱減量挙動に与える影響について実験的に明らかにし、有機物量の評価として適切と考えられる強熱温度および強熱時間を提案する。

#### 2) 木くず等の含有が汚濁成分の溶出に及ぼす影響

災害廃棄物由来の分別土有効利用において、木くず等混入廃棄物からの有機汚濁成分の溶出特性を明らかにし、仮置き/埋立/有効利用時の環境安全性を満たすための管理方法を検討する。溶出液中に含まれる有機汚濁成分は、生物化学的酸素要求量 BOD と化学的酸素要求量 COD を指標として表現されており、安定型処分場の浸透水基準では BOD を 20 mg/L 以下および COD を 40 mg/L 以下することが定められている。本研究では、土壌、木くず混入土壌、災害廃棄物由来の分別土等 23 試料を対象に、溶出試験を行い、溶出液中に含まれる BOD と COD を調べるとともに、測定が煩雑で長時間を要するこれらの指標に代わり、紫外線吸光度 E260 や全有機炭素量 TOC が代替指標に利用できないかを検討する。最終的には BOD と COD に及ぼす強熱減量の影響を調べることで、浸出水の BOD と COD が基準値以下を満たす要件として強熱減量の視点から管理できるかどうかを議論する。

#### 3) 木くず等の含有が分解ガス発生に及ぼす影響

災害廃棄物由来の分別土の土木資材として有効利用する際に、含有される木くずからの有機炭素溶出、酸素消費・嫌気化（嫌気ゾーンの形成）、メタンガス発生が順に起きることが考えられる。メタンガスの発生は爆発を引き起こす懸念がある。分別土を有効利用するためには、環境保全・安全確保の観点から許容有機炭素含有量上限を決定する必要がある。

メタンガスの爆発範囲は 5～15% であり、下限値 5% で爆発する。労働安全衛生規則第 389 条の 8 によると、「ずい道等の建設の作業を行う場合であって、当該ずい道などの内部における可燃ガスの濃度が爆発下限値の値の 30% 以上であることを認めるときは、直ちに、労働者を安全な場所に退避させ、及び火気その他火源となるおそれのあるものの使用を停止し、かつ、通風、換気等の措置を講じなければならない」と定められている。爆発下限値 30% とは、メタン濃度を 100% としたときに 1.5% を示す。メタンガス濃度が 1.5% 以上であれば爆発の危険がある。このため、メタンガスの許容濃度上限は 1～1.5% と考えられる。ここでは、メタンガス濃度の許容濃度上限値を 1% と仮定して考える。

本研究では、木くず量に対する、嫌気ゾーンのサイズおよびメタンガス発生濃度の関係に着目する。具体的に行う実験・考察を以下に示す。

- ・木くずからの有機炭素溶出：木質の固液比および粒径、経過時間と、溶出有機炭素濃度との関係を把握し、その結果から、有機炭素濃度の時間変化が予測できるモデルを構築する。
- ・嫌氣的雰囲気形成：溶出した有機炭素濃度と酸素消費速度の関係と、酸素消費速度と酸素進入深さの関係を把握する。
- ・木くず抽出有機炭素溶液からのメタンガス発生：嫌気条件下における溶液中有機炭素濃度とメタンガス発生強度との関係を把握し、その結果から規定するメタンガス発生強度を下回るための有機炭素濃度（有機炭素含有量の上限）を考察する。
- ・分別土など実試料からのガス発生：実際の分別土から溶出した有機炭素濃度とメタンガス発生との関係を把握する。

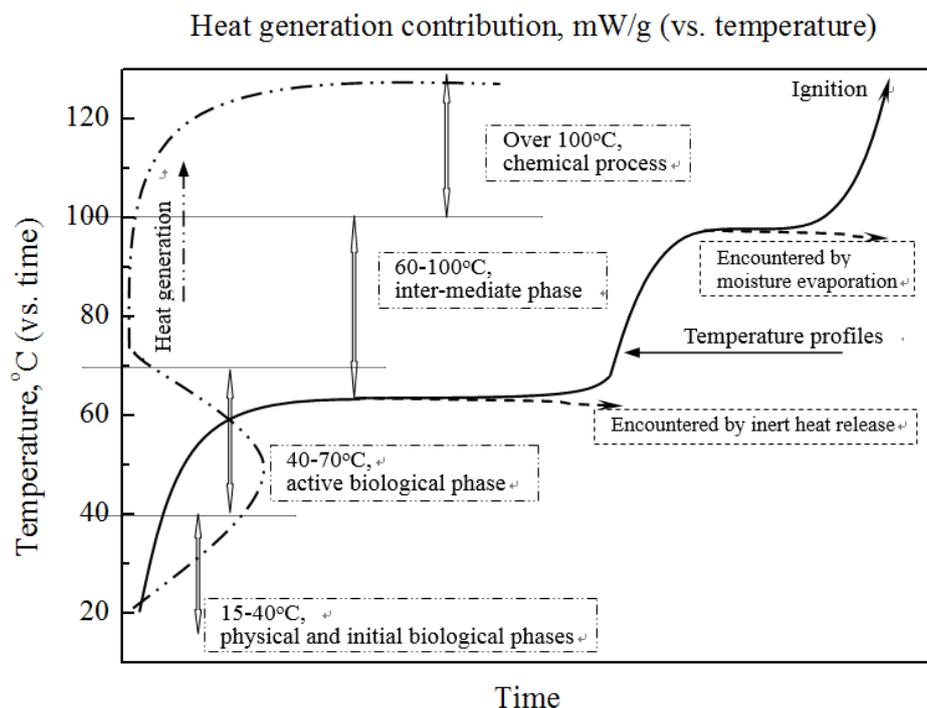


図 2.1 発火プロセス（可燃性物質の堆積物）

#### 4) 発火危険性に関する熱分析

大量に存在する可燃物の堆積物の発火危険性とプロセスは、図 2.1 のように進むと考えられている<sup>2)</sup>。即ち、室温～70℃位で起こるバクテリア発酵（好気性菌の活動に伴う微小発熱現象及び嫌気性菌による可燃性ガス発生）、60～100℃で起こる化学反応、100℃以上で起こるセルロース等の酸化・燃焼反応の3つの段階を踏む。本研究の目的は、第一段階の微小発熱、主として好気性発酵が進むかどうかを明らかにするものである。

提供された試料について、火災・爆発危険性の側面からリスク評価を行う。評価手法としては、消防庁が示した再生資源燃料の標準的な試験方法<sup>3)</sup>に準じて行う。本試験方法は、2003年、三重県で起きた RDF（=Refuse Derived Fuel）貯蔵タンクの爆発事故を契機に提案されたもので、主として再生資源燃料が大量にあった場合の微生物発酵等の微小発熱による蓄熱発火危険性に注目して行うものである。

#### 5) 屋外模擬土槽による実証試験

発火危険性のある固体試料であったとしても、堆積高さが低い場合には、発熱したとしても直ぐに放熱され、蓄熱されることは無い。このような挙動の蓄熱発火性については、熱分析によって材料としての評価を行うことで判定できる。一方で、堆積物自体のどこから発熱が始まり、どのように熱が伝達されて発火に至り、その過程でガス濃度がどのように変化するか、という構造体を対象とした発火メカニズムに対する知見は極めて少ない。そこで、発火危険性が疑われる試料とそうでない試料の2種類を選定し、屋外模擬土槽を用いた実証試験を行うことで発火に至るまでの発熱ならびに蓄熱挙動について評価を行った。

### 3. 研究方法

#### (1) 試験試料

実験に使用した試料の一覧を表 3.1 に示す。試料番号 20 までのものについては試料の写真も示す。おがくずは既に粉砕された状態であるため、有姿で利用したが、分別土 A 種、分別土 B 種、分別土砂やまさ土などの比較的粒径が大きな試料は写真 3.1 に示す Blendtec 社製の Total Blender を用いて粉砕したものをを用いた（表中の写真も、一部は粉砕後の写真となっている）。本装置は、本来はジェラート等を作るためのものであり、刃が金属製であるが、本研究では金属類の含有量や溶出を評価していないことから、本装置を用いて効率的に粉砕した。氷が砕けるようなミキサーであれば分別土やまさ土などはシルト分程度の粒径に粉砕することが可能であり、その時間も数分間を要するのみであった。同様の形状のジューサーミキサーでは、刃こぼれしてしまうため、十分に粉砕することができないため、氷等を砕けるミキサー等を利用することが水晶される。また、災害廃棄物由来の分別土のような雑多なものや木くず等の比較的柔らかいものまで幅広く粉砕することが可能であった。一例として、試料 No. 19 の木くず 30%+まさ土 70%の粉砕後の粒径加積曲線を図 3.1 に示す。Total Blender で粉砕すると発熱するため、発熱しない程度に間欠粉砕を数分間実施した結果である。

表 3.1 実験に使用した試料の一覧 (1/3)

|    |  |  |
|----|--|--|
| 01 | 分別土 A 種 (災害廃棄物由来)<br> | 分別土 B 種 (災害廃棄物由来)<br>  |
| 03 | 分別土砂 (災害廃棄物由来)<br>    | 中間処理残さ (建廃処理の篩下)<br>   |
| 05 | 有機質土 (北海道)<br>       | 関東ローム (静岡県)<br>       |
| 07 | 川砂 (茨城県)<br>        | まさ土 (茨城県)<br>        |
| 09 | 木節粘土 100%<br>       | 木節粘土 10%+まさ土 90%<br> |

表 3.1 実験に使用した試料の一覧 (2/3)

|    |   |    |   |
|----|---|----|---|
| 11 | 木節粘土 30%+まさ土 70%<br>     | 12 | ドロマイト 100%  |
| 13 | ドロマイト 10%+まさ土 90%<br>    | 14 | ドロマイト 30%+まさ土 70%<br>               |
| 15 | 実証試験土槽木くず 100% (赤松)<br> | 16 | 実証試験土槽混合土<br>(木くず 3%+まさ土 97%)<br> |
| 17 | おがくず 100% (赤松)<br>     | 18 | おがくず 10%+まさ土 90%<br>              |

表 3.1 実験に使用した試料の一覧 (3/3)

|    |   |    |  |
|----|---|----|--|
| 19 | おがくず 30%+まさ土 70%<br> | 20 | おがくず 50%+まさ土 50%<br> |
| 21 | おがくず 30%+プラスチック 10%<br>+まさ土 70%   | 22 | おがくず 50%+プラスチック 50%  |
| 23 | おがくず 10%+廃石膏粉 5%<br>+まさ土 85%  | 24 | おがくず 10%+廃石膏粉 10%<br>+まさ土 80%  |
| 25 | おがくず 10%+廃石膏粉 20%<br>+まさ土 70%   | 26 | おがくず 5%+木節粘土 5%<br>+ドロマイト 5%+まさ土 85%   |



写真 3.1 試料の粉碎に用いた装置

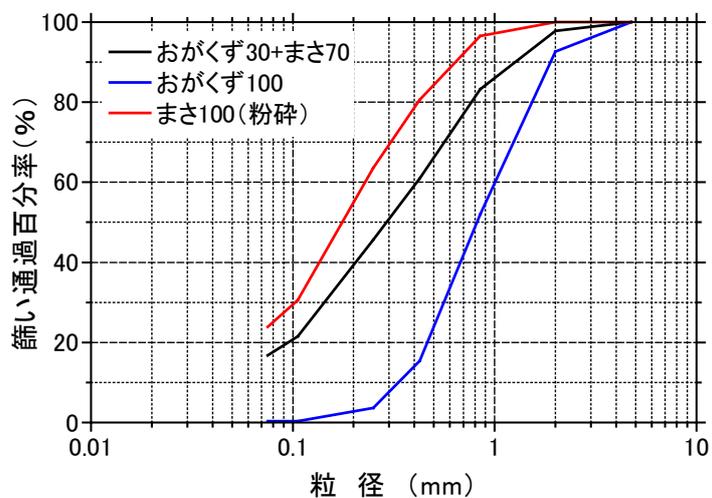


図 3.1 木くず 30%+まさ土 70% (No. 19) の粒径加積曲線

## (2) 試験方法

### 1) 強熱減量に及ぼす強熱温度および強熱時間の影響

#### a バッチ強熱試験

強熱減量試験は基本的には「土の強熱減量試験方法 (JIS A 1226 : 2009)」にしたがったバッチ式の試験を実施し、JIS で規定される強熱温度  $750 \pm 50^\circ\text{C}$  以外の強熱温度を与えて実施した。具体的には、 $150^\circ\text{C}$ 、 $250^\circ\text{C}$ 、 $350^\circ\text{C}$ 、 $375^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$ 、 $450^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$  である。また、JIS 規格の強熱時間は1時間以上とされており、“強熱後の試料が恒量になるまで実施する (1時間間隔で繰り返す)”とされているが、ここでは、10分、20分、30分、60分、120分、360分とした。以上の試験方法を、以後、“バッチ強熱試験”とする。

#### b CHN 元素含有量分析

強熱時間 120 分で各強熱温度で実施したバッチ強熱試験後、ならびに  $105^\circ\text{C}$  で 24 時間程度、炉乾燥した試料について、CHN の含有量分析を JIS M8819(1997) を準用し、CHN コーダーにより行った。

#### c シーケンシャル強熱試験

強熱試験課程の試験挙動を評価するため、上部に穴が空いている電気マuffle炉を用い、上部の穴からワイヤーで炉内に試料皿 (平皿) を設置し、これを電子天秤に接続することで常時電気炉内の試料重量を測定することが可能な装置を作製し、強熱時における試料重量の経時変化を測定した。図 3.2 に装置概略図を示す。天秤の精度は 100 分の 1 グラムであり、2 秒～10 秒のインターバルで連続的に重量を測定し、パソコンに取り込むことが出来る。実験条件は表 3.2 に示す通りである。なお、試料を入れる容器として、今回は磁性平皿を用いているが、これは空気 (酸素) の拡散の影響を抑えるためである。以上の試験方法を“シーケンシャル強熱試験”とする。

表 3.2 シーケンシャル強熱試験の実験条件

|                           |                                |
|---------------------------|--------------------------------|
| 乾燥条件 (前処理)                | $105^\circ\text{C}$ 以上、12 時間以上 |
| 強熱温度 [ $^\circ\text{C}$ ] | 150、250、350、400、450、600、750    |
| 強熱時間                      | 6 時間以上                         |
| 試料重量                      | 0.5～1 g                        |
| 重量測定インターバル [sec]          | 10, 10, 10, 5, 5, 2, 2         |

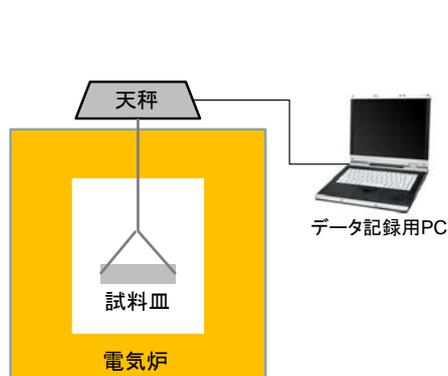


図 3.2 シーケンシャル強熱減量試験

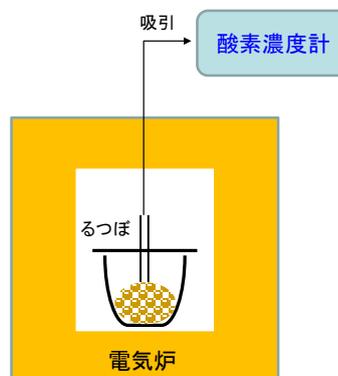


図 3.3 雰囲気測定方法の概念図

#### d 強熱試験中の雰囲気測定

シーケンシャル強熱試験で用いた電気炉を用い、SUS製の蓋を貫通したステンレスパイプを上部の穴から導入し、るつぼに載せた状態で吸引ポンプを作動させ、サンプリングバッグに生成ガスを採取しTCDクロマトグラフにより分析を行った（図3.3参照）。当該実験を行う場合には、試料は平皿ではなくある程度深さのある壺を使用した。なお、酸素濃度を測定する際は燃焼排ガス測定用の酸素濃度計を用いた。

#### 2) 木くずの含有が汚濁成分の溶出に及ぼす影響

500 mL容のポリ瓶を8個用意し、それぞれに試料を40 g入れて、続いて蒸留水を400 mL（液固比10）添加した。ポリ瓶を密栓し振とう機にセットした後、水平反復を200 rpmの条件で24時間振とうした。振とう操作後、ポリ瓶は遠心分離装置に2000 rpmで20分間供して、上澄み液をろ過無しの溶出液として保存し、一方で上澄み液を孔径0.45 μmのメンブレンフィルターで濾過したものをろ過有りの溶出液とした。得られた検液についてpHと電気伝導度EC、および紫外線吸光度E260を測定するとともに、ろ過なしの検液はさらに生物化学的酸素要求量BOD、化学的酸素要求量COD、全有機炭素量TOC、溶解性全有機炭素量DOC、および浮遊物質量SSを測定した。

#### 3) 木くず等の含有が分解ガス発生に及ぼす影響

##### a 木くずからの有機炭素溶出

予備検討として、有機物源としてカラマツチップを粉砕した木くずを用いた。木水固液比（ $R_{ww}$ 、木質量/水量、 $g\text{-木}/\text{cm}^3\text{-水}$ ）と粒径を複数設定して混合・振とうし、時間経過ごとに溶出液を採水、ろ過し、有機炭素（全有機炭素、TOCとする）溶出量を測定した。木質の粒径と固液比および経過時間をパラメーターとして、得られる有機炭素濃度を一般化できる式を作成した。

表 3.3 木と水の固液比と水量、木くず量の関係

| 木水固液比 | 粒径        |    | 略式名称 | 木質量<br>g | 水量<br>mL |
|-------|-----------|----|------|----------|----------|
|       | -         | 名称 |      |          |          |
| 0.02  | 5-10mm    | X  | 002X | 1.4      | 70       |
|       | 1-5mm     | L  | 002L |          |          |
|       | 0.5-1mm   | M  | 002M |          |          |
|       | 0.1-0.5mm | S  | 002S |          |          |
| 0.04  | 5-10mm    | X  | 004X | 2.8      |          |
|       | 1-5mm     | L  | 004L |          |          |
|       | 0.5-1mm   | M  | 004M |          |          |
|       | 0.1-0.5mm | S  | 004S |          |          |
| 0.08  | 5-10mm    | X  | 008X | 5.6      |          |
|       | 1-5mm     | L  | 008L |          |          |
|       | 0.5-1mm   | M  | 008M |          |          |
|       | 0.1-0.5mm | S  | 008S |          |          |
| 0.20  | 5-10mm    | X  | 020X | 14       |          |
|       | 1-5mm     | L  | 020L |          |          |
| 0.40  | 5-10mm    | X  | 040X | 28       |          |
|       | 1-5mm     | L  | 040L |          |          |



写真 3.2 木くずと純水投入後のポリ瓶の様子 (30 日経過後)

木くずを、粒径 5~10 mm、1~5 mm、0.5~1 mm および 0.1~0.5 mm に調整し、それぞれ、X、L、M および S と略称する。設定する固液比と粒径の組み合わせごとに設定条件に略式名称をつけた。すなわち、Rww が 0.02 で、粒径 L ならば、略式名称を 002L とした。なお、Rww 0.20 および 0.40 の粒径 0.5~1 mm および 0.1~0.5 mm は小粒径の木くずによる水分吸収が大きく、溶液が得られなかったため省略したため、設定条件は 16 パターンである。木水固液比、粒径、木質量、水量を表 3.3 に示す。純水をポリビンに設定量 (70 mL) 入れた。Rww 020 および 040 の 4 試料については木質投入量が多いため 500 mL ポリビンを、その他は 100 mL ポリビンを用いた。写真 3.2 は木くずと純水を混合した後、30 日が経過した後の様子である。

#### b 嫌氣的雰囲気形成実験

木くずの抽出液をろ過して有機炭素含有溶液を作成し、培養温度を 2 種類 (35°C と 20°C)、有機炭素濃度を 5 種類 (抽出液 : TOC 367、184、73、37、17 mg-C/L、粉碎木質は省略) 設定し、密閉容器内に入れ、その内部間隙ガスの圧力変化から 7 日間の酸素消費量を測定し、酸素消費速度に換算した。

酸素消費速度測定では、WTW 社製 OxiTop OC110 (以下、OxiTop) を使用した。OxiTop は、微生物が有機物を分解するために密閉容器内に堆積している酸素を消費し、発生した二酸化炭素を水酸化ナトリウムに吸収させることで、容器内圧力を経時的に測定することができる。密閉容器には蓋として OxiTop-C 測定ヘッド (以下、測定ヘッド) を備え付ける (写真 3.3 参照)。測定ヘッドには、圧力センサーが付いているため、容器内の圧力変化を経時的に測定できる。測定ヘッドの下には水酸化ナトリウムを入れることで、微生物が発生させた二酸化炭素を吸収させる。よって、容器内の圧力変化が起きるということは、微生物によって酸素を消費していることを表す。測定された圧力差を酸素消費量に変換する式は、理想気体の状態方程式式 3.1 から導くことができる。

$$n = pV/RT \quad (\text{式 3.1})$$

ここで、 $n$ : 吸収された二酸化炭素物質質量 [mol]、 $p$ : 圧力差 [Pa]、 $V$ : 容器内体積 [ $\text{m}^3$ ]、 $R$ : 気体定数 (8.314 J/mol·K)、 $T$ : 培養温度 [K] である。

なお、本研究では  $n$  を mmol、 $p$  を圧力増加速度として hPa/h、体積を mL の条件で実験を行ったため、

$$n = (p \times 100) \cdot (V/1000)/(8.314(273 + T)) \quad (\text{式 3.2})$$

となる。 $n$ : 酸素消費速度 [mmol- $\text{O}_2$  /h]、 $p$ : 圧力増加速度 [hPa/h]、 $V$ : 容器内体積 [mL] である。式 3.2 で得た吸収された二酸化炭素物質質量を容器内の液量  $X$  [L] で割ると、液体 1 L の単位時間当たりの酸素消費速度  $C$  [mmol- $\text{O}_2$  /L·h] が算出される (式 3.3)。

$$C = n/X \quad (\text{式 3.3})$$



写真 3.3 酸素消費速度を求めるための試験器具

### c 木くず抽出有機炭素溶液からのメタンガス発生試験

溶液中有機炭素濃度とメタンガス発生濃度の関係を把握するために、複数の有機炭素濃度を設定し、密閉容器に封入し、メタンガス発生濃度を測定した。なお、水素および硫化水素も同時に測定した。有機炭素含有溶液は、カラムツチップからの抽出液ろ液を用いた。ろ液原液を希釈（原液(1倍)、2倍、5倍、10倍、20倍、50倍、100倍、純水(0倍)）することで有機炭素濃度を変化させた。メタンガスは微生物の嫌氣的分解によって発生するため、嫌気性菌を植種し、また栄養塩を添加してバイアル瓶で密閉し、設定経過時間（0、7、14、28日）まで35℃のインキュベータ内で静置した。嫌気性菌として下水汚泥（重力濃縮汚泥）を用いた。汚泥採取後は、ガス発生によりビンが破損することを防ぐためにポリビンからポリ袋に移し、水没させて空気中の酸素を遮断するようにした。また、できる限り新鮮な汚泥を使用することを考慮し、汚泥の保存期間は一週間程度とした。写真 3.4 に使用した下水汚泥を、写真 3.5 に溶液などを封入したバイアル瓶を示す。



写真 3.4 下水汚泥

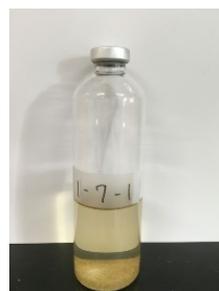


写真 3.5 バイアル瓶

### d 分別土などの実試料からのガス発生

試料として災害廃棄物由来の分別土等を用いて、酸素消費速度とガス発生強度を測定した。酸素消費速度実験では密閉容器内に含水率 60% に設定した分別土等を入れた。酸素消費は微生物の好氣的分解によるため、好気性菌を植種し、また栄養塩を添加した。密閉容器内の酸素消費による圧力低下を圧力センサーで測定した。圧力低下から酸素消費量を換算し、そこから酸素消費速度を求めた。ガス発生実験も密閉容器内に分別土等を入れて行った。メタンガスは嫌気性状態において微生物の嫌氣的分解によるため、窒素でバブリングをし、下水汚泥を植種、また栄養塩を添加し、水を加えて水没させた。容器内のメタンガス、

二酸化炭素、水素、酸素、窒素をガスクロマトグラフで測定した。表 3.4 に分別土等の種類を、写真 3.6 に試料を封入したバイアルを示す。

表 3.4 分別土等の種類と試料名称

| 試料名称   | 試料の内容         |
|--------|---------------|
| SSA    | 分別土A種         |
| SSB    | 分別土B種         |
| SSC    | 分別土砂          |
| CDW    | 処理残さ          |
| RVS    | 川砂            |
| IMS    | 茨城まさ土         |
| KBC    | 木節粘土          |
| KBCM10 | 木節粘土10+まさ土90  |
| KBCM30 | 木節粘土30+まさ土70  |
| ドロ10   | ドロマイト10+まさ土90 |
| ドロ30   | ドロマイト30+まさ土70 |
| PWD    | 実証試験木くず       |
| PWDS3  | 実証試験木くず混合土    |
| SWD    | おがくず          |
| SWDM10 | おがくず10+まさ土90  |
| SWDM30 | おがくず30+まさ土70  |
| SWDM50 | おがくず50+まさ土50  |



写真 3.6 バイアル瓶 (左から、分別土 A 種、分別土 B 種、分別土砂)

#### 4) 発火危険性に関する熱分析

##### a 試料準備

試料には、01\_分別土 A 種、02\_分別土 B 種、07\_川砂 100%、08\_まさ土 100%、09\_木節粘土 100%、17\_おがくず 100%、18\_おがくず 10%+まさ土 90%、19\_おがくず 30%+まさ土 70%、20\_おがくず 50%+まさ土 50%の 9 種も用いた。それぞれの試料について、自然含水比状態 (必要に応じて風乾する)、ならびに純水を重量比で 20% 添加した試料の 2 種類の操作を行って供試体とした。

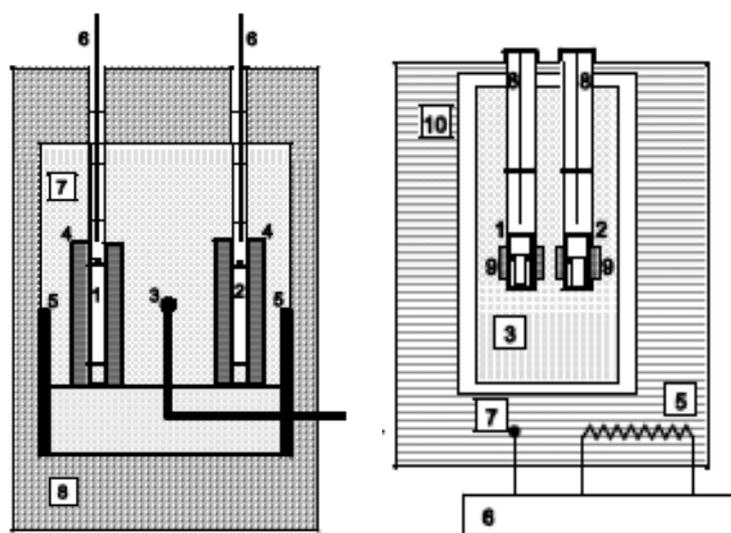
##### b 熱分析方法

熱分析には、

- TG-DTA (昇温速度 : 2 K/min)

- C80 (昇温速度 : 0.1K/min)
- TAM (等温、50°C、図 3.4 参照)
- MS80 (昇温速度 : 0.01 K/min)

の4種の機器を用いた。TG-DTAは、理学電機製TG-8120を使用した。測定温度範囲は室温から600°C、昇温速度は2 K/minとした。開放容器を使用、試料量が約50 mg程度と少ないため、微細化して均一化を図った。C80は、フランスSetaram社製で双子型高感度熱量計と呼ばれ、DSCの数10倍の感度を有する熱量測定装置で、試料量はグラムオーダー、高压容器を使用している。最近、化学物質の熱危険性評価に広く使われている。MS80もフランスSetaram社製でC80の10倍程度(原理はC80と同じ)の高感度で測定範囲：室温~200°C、試料量が多い(数グラムオーダー)、また、試料容器は高压容器で水の沸騰の影響が避けられるといった特徴を有するが、操作が難しく手軽に使用できないため世界的にもほとんど使われていない(図3.4参照)。本研究では、両装置とも昇温モードで使用した。TAMは、スウェーデンThermometric社製TAM-IIIを使用した。試料を一定温度(50°C)に保つ等温実験を行い、そのための発熱、吸熱の状況を測定するものである。試料量はグラムオーダーが多い。市販されている汎用型熱分析機器としては、最も高感度なものでMS80と比べても高感度である。なお、今回の試験では、SIT(自然発火試験)、ワイヤーバスケット試験(国際連合・危険物輸送勧告書)は、SITがメーカーである島津製作所の製造中止等の理由で実験の装置のサポートが切れているため、後者は、リトルオーダーの試料が必要なため、共に実施していない。



(Left: 1. reference vessel; 2. sample vessel; 3. calorimetric block; 4. oil bath; 5. heater; 6. thermostat;  
7. temperature sensor; 8. tube introducers; 9. heat-flow detectors; 10. heat-flow detecting unit;  
Right: 1. reference vessel; 2. sample vessel; 3. thermostat; 4. heat-flow detectors; 5. heaters;  
6. tube introducers; 7. calorimetric block; 8. insulating material.)

図 3.4 TAM-III (左) と MS80 (右) の概要図

### c ガス発生試験

消防庁が示した試験方法<sup>2)</sup>に準じて、試料約 50 g を 1 リットル容のガラス容器内で温度 25～27℃、10 日間保管したのち、容器内のガスをガスクロマトグラフ (TCD) によって分析した (図 3.5 参照)。また、微量ガスの存在確認には、北川式検知管を使用した。ガスクロマトグラフ (TCD) の測定条件は、カラムに SHINCARBON、検出器は TCD で 200℃、キャリアガスにアルゴン、カラム温度は 40～150℃ (昇温) とした。このほか、分別土 A 種と B 種については長期間 (最大 30 日まで) 保管した場合のガス発生状況について調べた。方法は、試料約 50 mL を 1 L 容器に入れ、容器内のガス濃度を分析した。

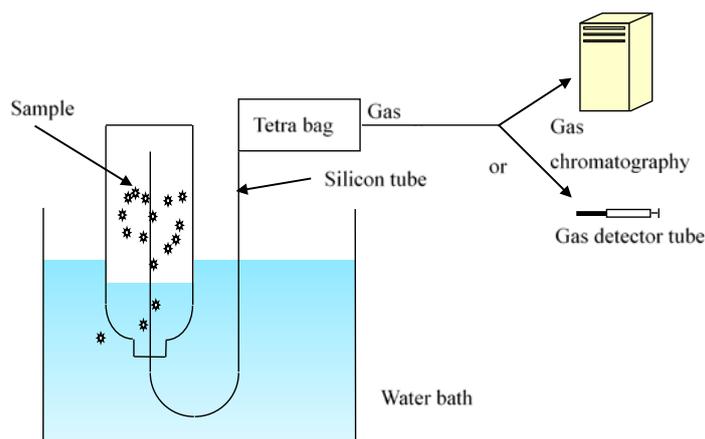


図 3.5 ガス発生試験とガス採取の模式図

## 5) 屋外模擬土槽による実証試験

### a 屋外模擬土槽の設置

屋外模擬土槽は、図 3.6 に示される千葉科学大学マリーナキャンパス内の一画に設置し、A 槽には赤松から作成したかな屑を 100% (試料 No. 15 : 実証試験土槽木くず 100% (赤松))、B 槽には重量比でかな屑 3% とまさ土 97% の混合物 (試料 No. 16 : 実証試験土槽混合土 (木くず 3% + まさ土 97%)) を充填した。充填密度は、乾燥質量で A 槽が 0.095 Mg/m<sup>3</sup>、B 槽が 1.06 Mg/m<sup>3</sup> とした。模擬土槽の製作工程を図 3.7 に示す。屋外で実施することから、降雨量や気温の影響を受けるため、写真 3.7 に示す気象ステーション (DAVIS INSTRUMENTS 社製) を設置し、外気温、湿度、風向、風速、降雨量等の常時モニタリングを実施した。また、図中右側の装置は、万が一に発火した際に、現場の状況等を把握するための遠隔カメラ装置である。

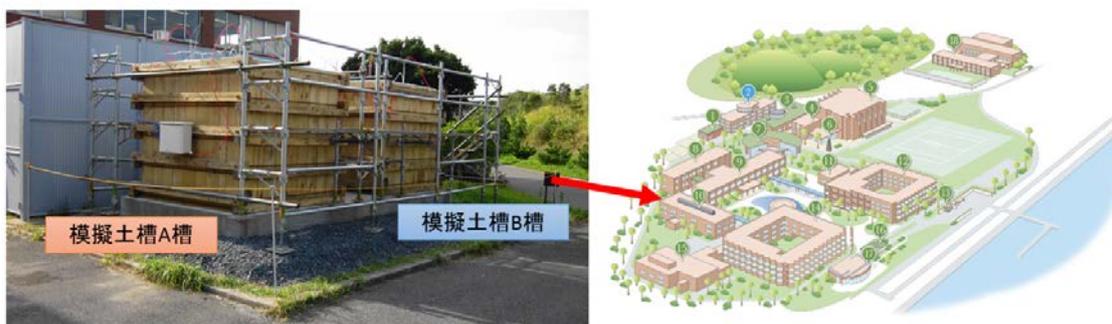


図 3.6 屋外模擬土槽完成時の外観と設置場所



① 土槽用のマウンド構築



④ 土槽枠組（木材）の構築



⑦ 土槽枠組の完成



② 土槽基礎部分の配筋と型枠



⑤ 下部遮水シート敷設（集水用）



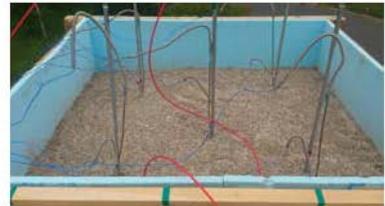
⑧ 試料の充填（B槽）



③ 基礎部分への生コン打設と均し



⑥ 断熱材（スタイロフォーム）設置



⑨ センサーの設置状況

図 3.7 屋外模擬土槽の製作工程



写真 3.7 気象ステーションの外観

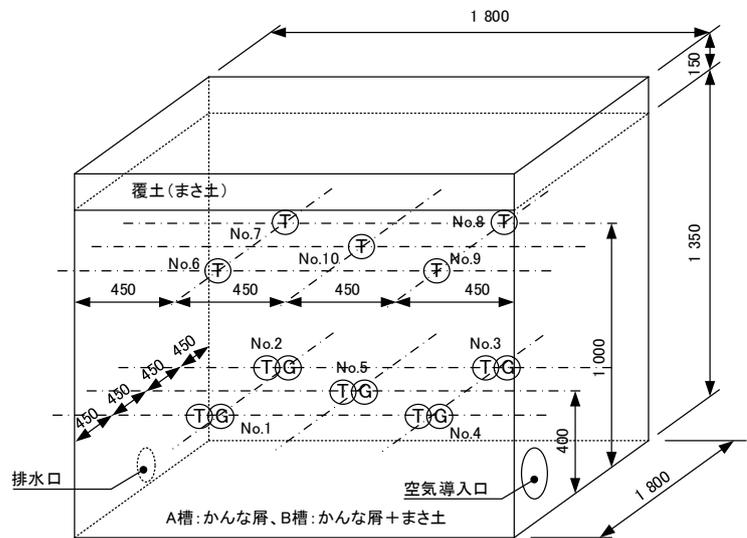


図 3.8 温度（図中T）とガス（図中G）のサンプリング位置図

本実証試験では、発熱温度、発熱速度、発熱部位、発熱に伴うガス濃度の変化を把握することを目的としているため、土槽内には、温度計（シー式K型熱電対）を10カ所、ガスサンプリング管を5本設置した。設置位置を図3.8に示す。図中のTが温度計、Gがガス採取のサンプリング位置を示している。図中のNoはサンプリング番号であり、A槽の場合にはA1、B槽の場合にはB1等とする。

## b 土槽の沈下計測

有機物の分解や降雨浸透による自重増加等によって堆積物は徐々に沈下することが予測されるため、実証実験土槽でも沈下量の測定を行った。土槽の構造上、測量を行うことが困難であるため、レーザー式距離計（測定範囲 0.05～250m、測定単位 0.1mm）を用いた。写真 3.8 にレーザー距離計による測定状況を示す。写真 3.9 に示す模擬土槽内に設置した 4 点のターゲット（ボルト）に、レーザー距離計を合わせて距離を測定した。データ測定は、週 1 回の間隔で実施した。



写真 3.8 沈下量の測定状況

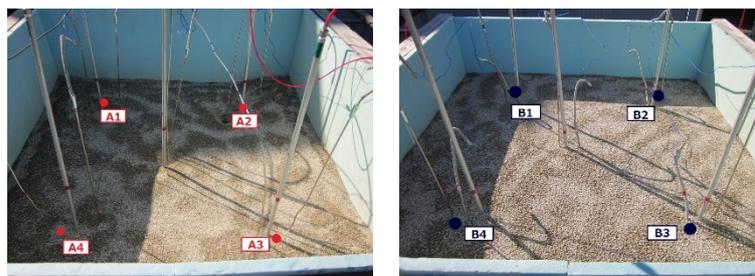


写真 3.9 沈下量の測定点 (左: A 槽、右: B 槽)

## c 槽内温度、槽内ガスの測定

熱電対 (K 型) によって測定された温度は、データロガー (日置電機株式会社製: LR5021) によってインターバル 1 時間で記録した。本データロガーは、1 つで 2 チャンネルしか有していないため、A 槽の 10 点測温に対して 5 個、B 槽でも 5 個のデータロガーを設置した。

ガスの採取は週に 1 回行い、その日のうちに分析した。ガス抜き管の底部は複数の穴が空いており、そこを通して実験槽内部で発生したガスを直接採取可能な構造となっている。採取は 120 mL 容のシリンジとアルミ製テトラパックを用い、A 槽、B 槽の各 5 箇所から 3 回空抜きをして、管内に溜まったガスを排出した後、槽内ガスを 500 mL 程度採取した。採取したガスの分析には、ガスクロマトグラフィ (島津製作所製: GC-2014) を用い、検出器: TCD、キャリアガス: アルゴン、カラム流量: 20.0 mL/min、カラム: シンカーボン ST 50-80、ガラスカラム: サンパック S 80-100、カラム温度: 150°C、検出器温度 200°C、注入量: 0.5 mL の条件とした。また、同時に検知管 (GASTEC 社製) も用いており、CO は No. 1M、H<sub>2</sub>S は No. 4M、O<sub>2</sub> は No. 31B を用いた。

## d 排水の測定

各模擬土槽はコンクリート製の基礎の上に作られており、この基礎にはロート状の「水たまり」があり、配管内も合わせて約 5 L の排水が溜まる構造となっている。降水が多い場合等、これを超えた場合にはオーバーフローする構造となっている。排水の採水手順を以下に示す。

手順 1: 最初に排水口から排水を 2 L バケツに受け (写真 3.10)、分析項目毎に用意した容器 (11 プラスチック製ボトル、250ml プラスチック製ボトル、500ml ショットボトル、11 プラスチック製ボトル、21 プラスチック製ボトル) をそれぞれ共洗いする。

手順 2: 共洗いした容器に排水を採水する。このとき、空気の混入が少なくなるように注意する。

手順 3: 採水後、速やかに実験室に持ち帰り pH、電気伝導度、溶存酸素量、酸化還元電位の 4 つの項目について測定を行う。

手順 4: 次に、その他分析項目について、順次、分析を実施する。外注する分析項目については、クーラーボックスに入れて送付する。

pHについては、Lutron 製マルチ水質チェッカーPH-230SD を、電気伝導率についてはLutron 製マルチ水質チェッカーWA-2017SD、溶存酸素量はLutron 製マルチ水質チェッカーWA-2017SD、酸化還元電位は東亜 DKK 製ポータブル ORP 計 RM-30P をそれぞれ用いて分析した。

#### 4. 結果及び考察

##### 1) 強熱減量に及ぼす強熱温度および強熱時間の影響

###### a バッチ強熱試験

###### i 強熱温度と強熱時間の影響

横軸を強熱時間、縦軸に強熱減量値 (LOI) とし、各温度毎にプロットした図、ならびに、強熱時間 120 分の各温度毎の強熱後試料に対して CHN 分析を実施した結果を図 4. 1. 1～4. 1. 20 に示す。CHN 分析はその精度の関係から 1%以下になれば強熱によって熱分解したと判断した。

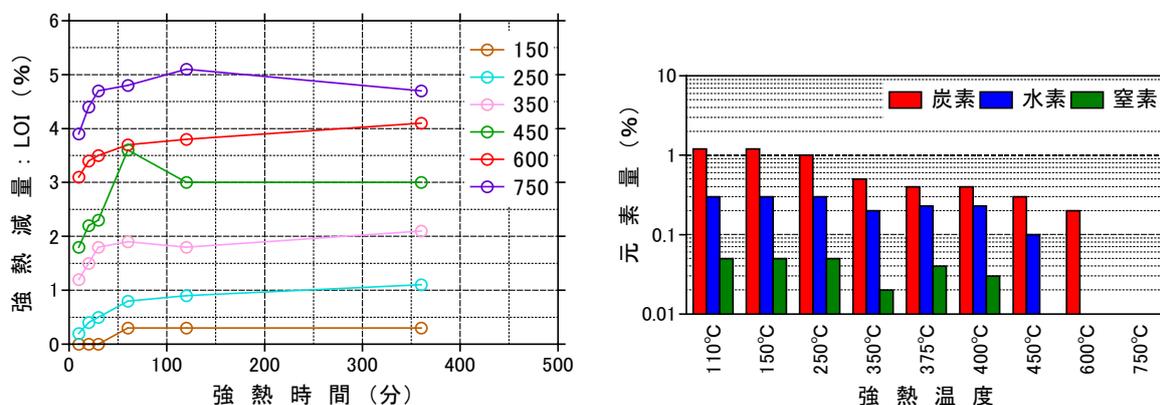


図 4. 1. 1 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (01\_分別土 A 種)

分別土 A 種では、強熱温度の上昇に伴って強熱減量 (LOI) も増加しており、強熱時間に対しては低い温度では約 60 分程度で安定しているが、比較的高温で強熱する場合には少なくとも 120 分程度の強熱時間が必要となる結果となった。炭素量を見ると、350°Cで 1%を下回っており有機炭素の燃焼温度と一致した。ただし、450°Cで消失する窒素分が確認されることから、木質系が残存している可能性も示唆された。450°Cよりも高温側でも炭素のみが残存しているが、750°Cで消失していることから、炭酸塩由来の無機炭素と推察される。

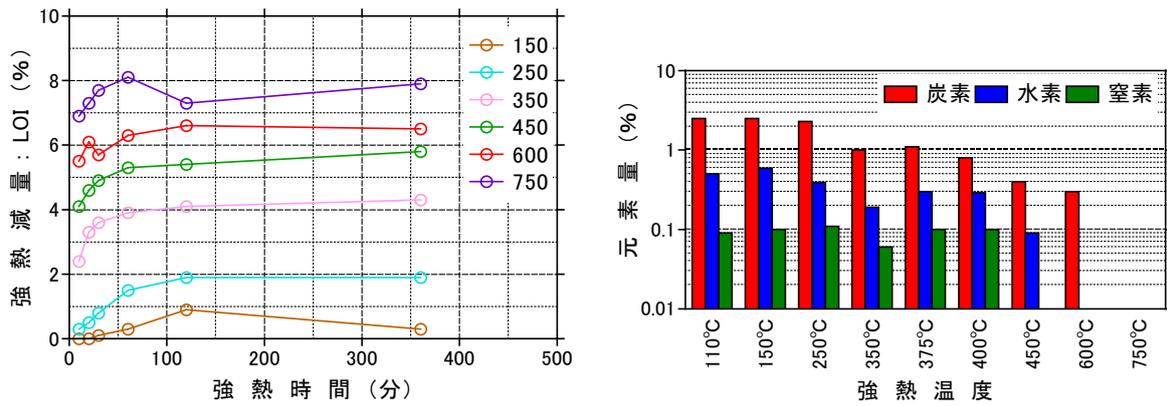


図 4.1.2 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (02\_分別土 B 種)

分別土 B 種でも、分別土 A 種と同様に、強熱温度が上昇すると LOI も上昇する傾向が確認される。強熱時間に対する LOI の変化をみると、低い温度でも 60 分以上の強熱時間が必要であり、少なくとも 120 分以上の強熱時間が必要であることがわかる。炭素量は、分別土 A 種と同様に 350°C で 1% を下回っており、450°C 以降も残存しているが、やはり 750°C で消失することから、炭酸塩由来であると推察される。

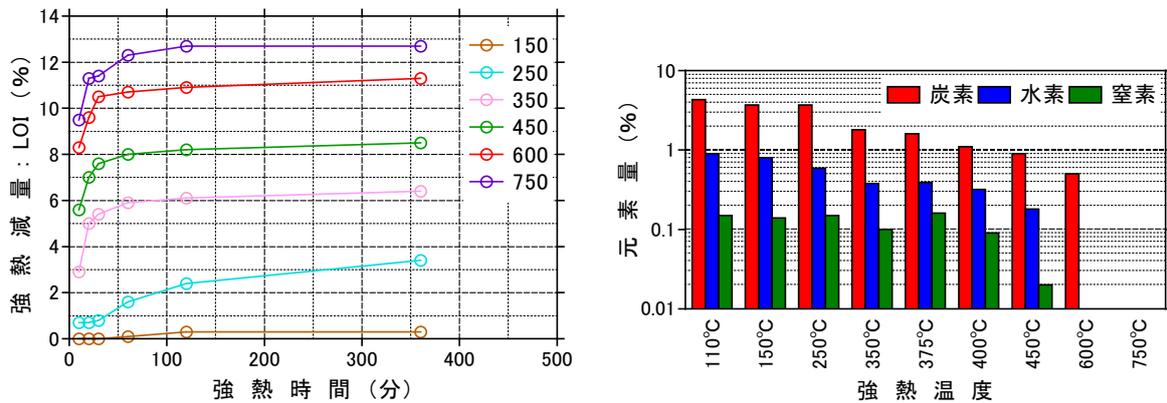


図 4.1.3 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (03\_分別土砂)

分別土砂も、分別土 A 種、B 種と同様に強熱温度が上昇すると LOI が上昇する傾向が確認される。強熱時間をみると、分別土 A 種や B 種に比較して、強熱時間が長くなるにしたがって、やや LOI が上昇する傾向が確認される。特に 250°C 強熱では、その傾向が顕著である。分別土砂は分別土 A 種や B 種と産出地がことなるため、津波堆積物等の土質性状が影響していることも考えられる。また、炭素量をみると、350°C でも 1% 以上存在していることが確認でき、450°C でも窒素分が残存している。このことから、強熱による熱分解にやや時間を要する試料である可能性が示唆された。

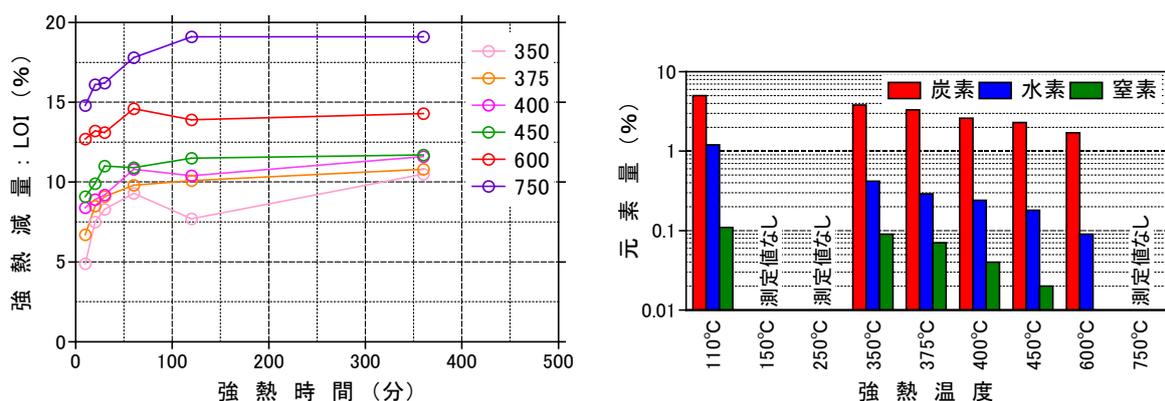


図 4.1.4 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (04\_中間処理残さ)

中間処理残さのケースでは、全て 350℃以上の強熱温度とし、150℃、250℃の代わりに 375℃、400℃で強熱試験を実施した。本試料でも強熱温度を上昇させると LOI が増加する傾向が確認できる。強熱時間として、400℃以下の強熱温度の場合には 120 分以降もやや LOI が増加しているが、450℃以上では約 120 分の強熱時間で恒量となっている。炭素量をみると、600℃まで 1%以上存在していることが確認できるが、110℃や 350℃での炭素量と 600℃での炭素量が概ね同じであることから、やはり炭酸塩由来の無機炭素であると判断される。本試料は、建設系廃棄物の篩下残さであることから、コンクリート微粉等が多く含有している可能性が高く、炭酸塩が存在している可能性は高い。また、本試料は、熱しやく減量である  $LOI_{600}$  (600℃での強熱減量) が 5%以下であれば、安定型処分場に埋立可能となるが、本試験結果では 14%程度となることから、管理型相当の廃棄物という取り扱いになる。

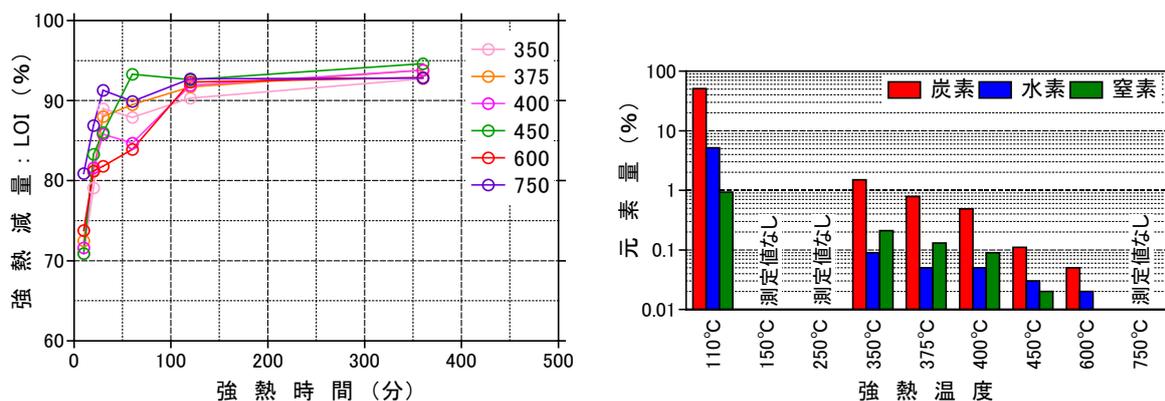


図 4.1.5 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (05\_有機質土)

有機質土 (北海道の泥炭) の場合、強熱温度が上昇すると LOI が顕著に上昇する傾向は確認できず、375℃以上の強熱温度で概ね同じ LOI となっている。また、全ての温度において、強熱時間 120 分以降も徐々に LOI が増加する傾向が確認される。そのため、有機質土の場合には、比較的長時間の強熱時間が必要であるか、試料調整方法、るつぼの選定等に留意する必要があると思われる。炭素量をみると、375℃で 1%以下となっており、有機炭素の燃焼温度で概ね消失するものの、一方で、強熱温度の上昇と共に炭素分が減少

する傾向も確認されるため、炭素量からみても比較的高温の強熱が相応しいといえる。JIS規格である750℃強熱も、本来はこのような有機質土を対象としていることから、LOIが90%を超過するような有機質土の場合には、やはり、高温での強熱が要求されると判断出来る。

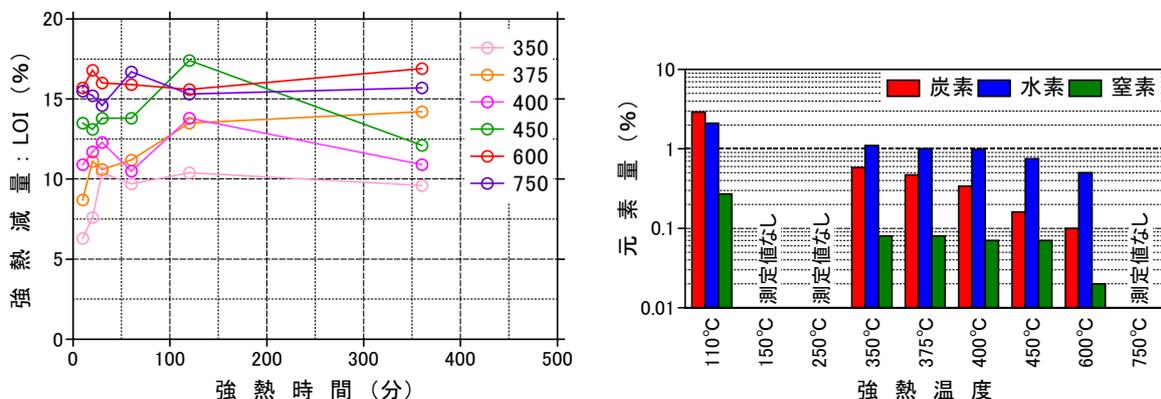


図 4.1.6 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (06\_関東ローム)

関東ロームでは、120分以降のLOIにバラツキがみられ、強熱温度にしたがったLOIとならない傾向が見える。また、375℃以下の強熱温度では、60分強熱までのLOIが大きく異なっているのに対し、400℃以上では比較的短時間でLOIの値が安定する傾向がある。炭素量は、350℃で1%以下となっているが、他の試料に比較して水素量が多い。恐らく、これは関東ロームの主要粘土鉱物であるアロフェンに起因していると思われる。特に、本試料は、非晶質粘土鉱物（アロフェン等）を50%質量比で含んでいるため、粘土鉱物の影響が大きく現れたと考えられる。

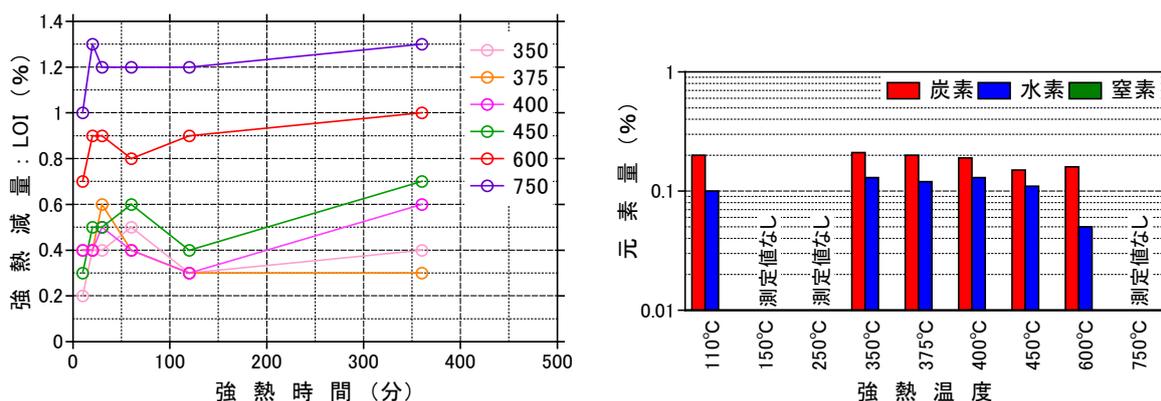


図 4.1.7 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (07\_川砂)

川砂は、LOIの値自体が1%程度であり他の試料に比較すると極端にLOIが小さい試料である。そのため、減量率としてカウントされているLOIの殆どは結晶構造由来であると考えられる。このことは、炭素量からも読み取れ、600℃までの炭素量に変化が無い。LOIでも600℃以上で値が大きくなっているが、これは水素が減少したためと思われる、結晶水の揮散に起因していると考えられる。

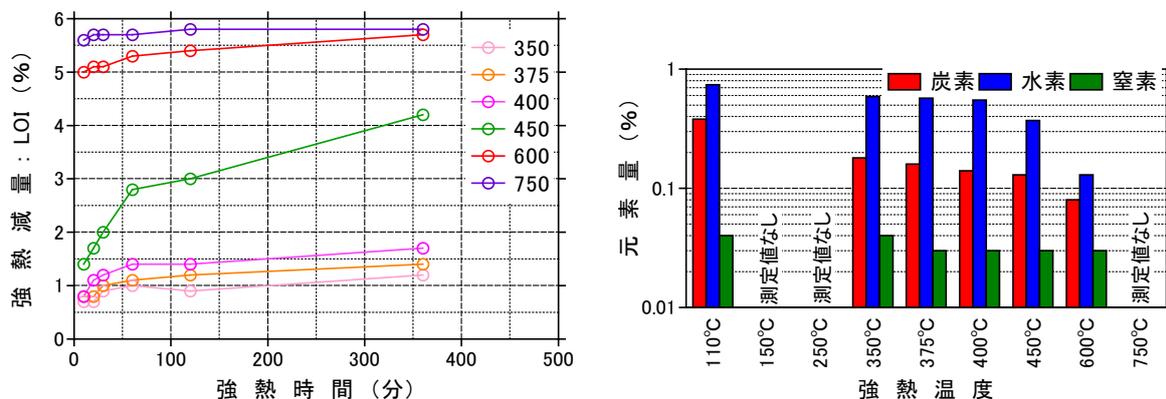


図 4.1.8 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (09\_木節粘土)

木節粘土は炭素を含まないカオリナイト ( $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ) を主成分とする精製粘土であるため、LOI の値が数%あったとしても、炭素量としては1%以下となっている。しかしながら、カオリナイトは550°C付近で結晶体のOH構造が崩壊して急激に重量が減少するため<sup>4)</sup>、600°C以上と400°C以下の強熱温度でLOIの値が大きくことなる。450°C域ではその中間体に位置していると考えられる。このことは、水素量からも推察でき、450°C以上で水素量の減少が始まっている。カオリナイトは日本にも比較的広く分布しており、古いローム層に含まれるハロイサイトもほぼ同様の挙動を示す<sup>5)</sup>。

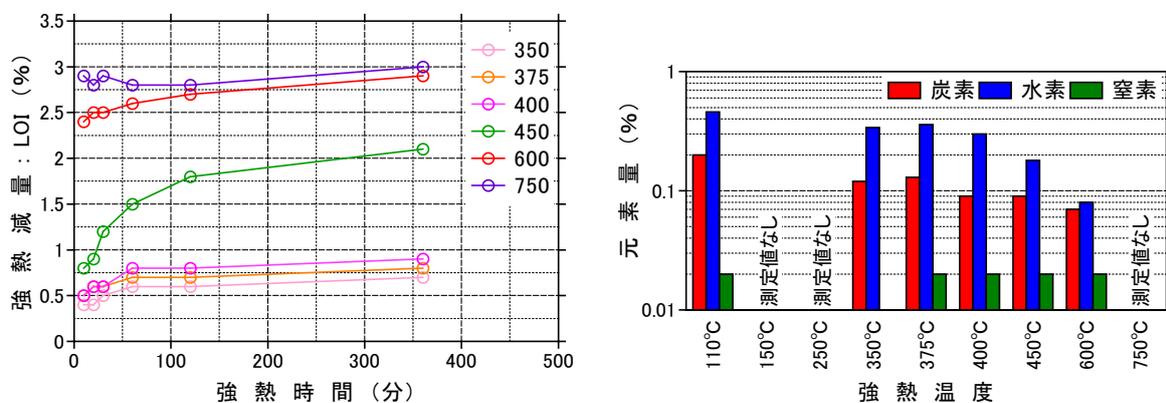


図 4.1.9 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (11\_木節 30%+まさ土 70%)

木節粘土 30%とまさ土 70%を質量比で人工的に混合した試料では、木節粘土の絶対量が木節粘土 100%と比較して少ないため、LOI の値は小さくなっているものの、400°C以下と600°C以上でのLOIの差異が生じることに変化は無く、水素量についても450°C以上で減少する傾向も同様となっている。70%混合したまさ土では、炭素量も水素量も極めて小さいことから、CHN分析において木節粘土の影響が観察されたと考えられる。

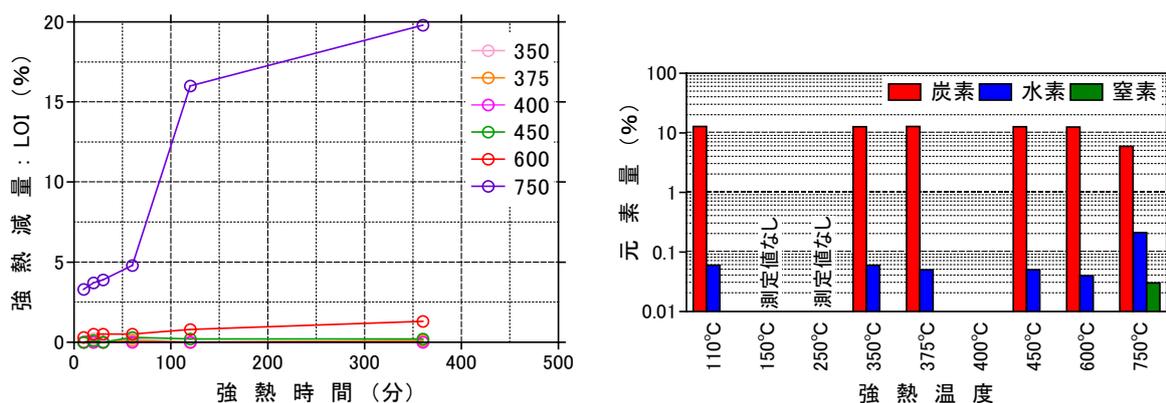


図 4.1.10 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (12\_ドロマイト)

ドロマイトは、鉱物内に炭素（炭酸）を含んでおり、化学式は  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  であり、苦土、苦灰石とも呼ばれる。炭酸カルシウムの脱炭酸は  $650\sim 900^\circ\text{C}$  で生じるため、 $600^\circ\text{C}$  強熱までの大きな変化は無いが、 $750^\circ\text{C}$  強熱で LOI が突出して大きくなることが読み取れる。炭素量をみても  $600^\circ\text{C}$  まで変化が無いことから、無機炭素として存在しており、それが炭酸由来であることも容易に想像される。ドロマイト質が混入している場合、熱しゃく減量には影響しないが、JIS 規格の強熱減量試験には誤差として大きく影響することになる。

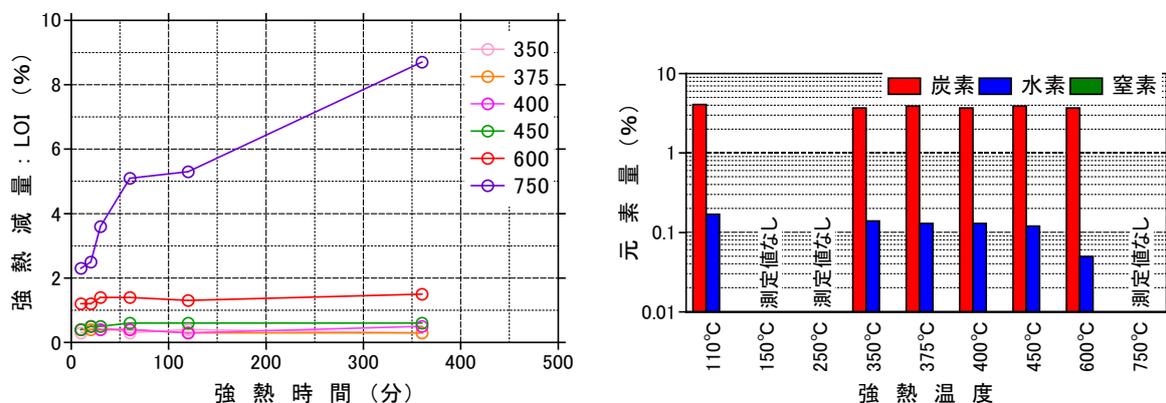


図 4.1.11 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (14\_ドロ 30%+まさ土 70%)

ドロマイト 30%とまさ土 70%を人工的に混合した試料の強熱試験結果でも、 $600^\circ\text{C}$  までの LOI の変化は微少であり、 $750^\circ\text{C}$  強熱で LOI が急激に上昇する傾向が確認される。ドロマイト単体での強熱試験結果と同様であるが、120 分を超えて  $750^\circ\text{C}$  で強熱した際、時間と共に LOI が増加する傾向にある。JIS 規格では、強熱後に恒量になるまで試験を繰り返すことになっているが、ドロマイト質が混入している場合には、恒量になるまでに多くの時間を要する可能性が高いので注意が必要である。

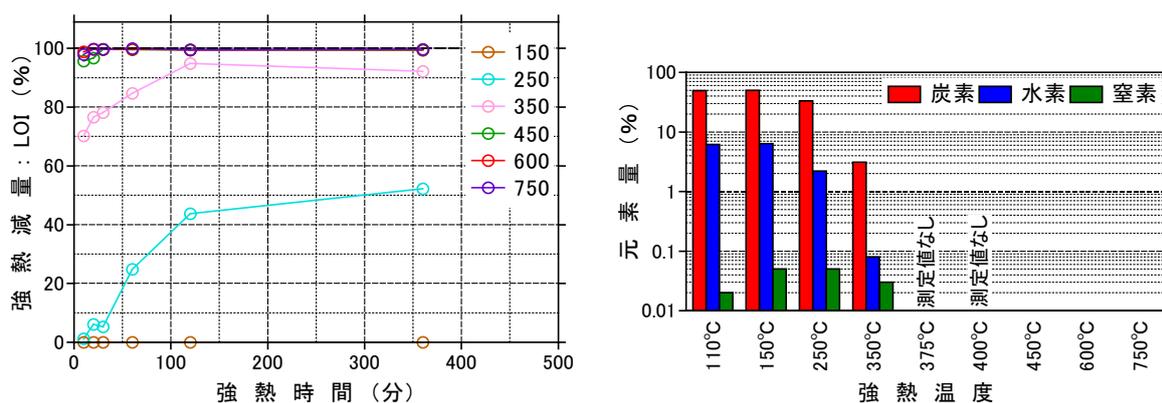


図 4.1.12 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (15\_実証実験土槽木くず)

実証実験に用いた木くず試料は、赤松のかんな屑であり、100%木質であることから、450°C以上の強熱温度ではほぼ全量が熱分解したことが確認できる。250°Cであったとしても、時間の経過とともに重量が減少しているが、250°CのCHN元素はあまり減少していないことから、CHN以外の成分が揮散していることになる。また、350°CではLOIも100%となっておらず、炭素量も残存しているが、450°C以上ではCHNの全てが消失していることも確認される。

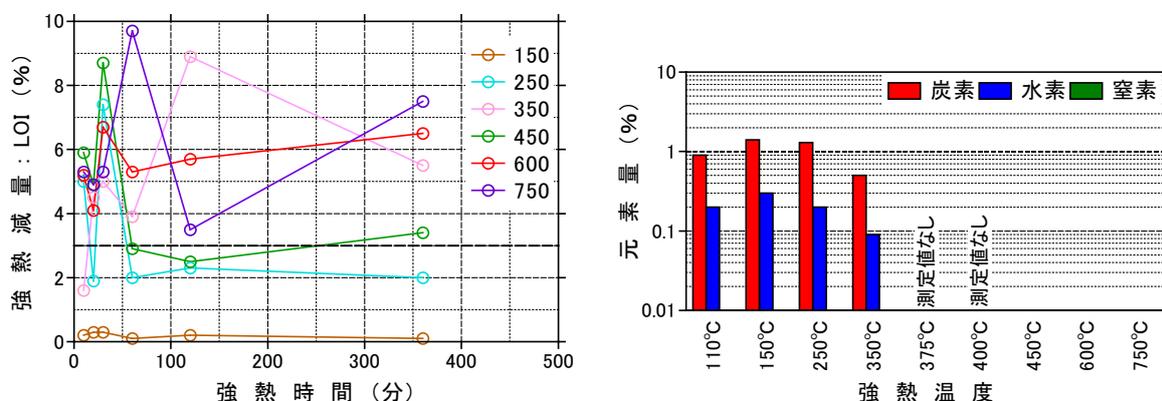


図 4.1.13 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (16\_実証実験土槽混合土)

実証実験土槽の混合土は、B槽に充填した資材であり、まさ土を母材として重量比で3%の木くず(かんな屑)を混合した人工試料である。図中のLOI = 3%が強熱試験でターゲットとなるLOIとなるため、図中に点線を記した。3%に近いのは250°Cと450°Cであり、中間の350°Cは大きく異なっている。これは、粉碎したとはいえ、3%混合した木くずが均等になるつぼ容器に入れることができず、強熱減量試験に供した試料のバラツキに依存していると考えられる。炭素量をみると350°Cで1%以下となっており、450°C以上は消失していると判断されるが、その解釈とLOIが整合していない。これも試料が均一で無かったことが原因と思われる。

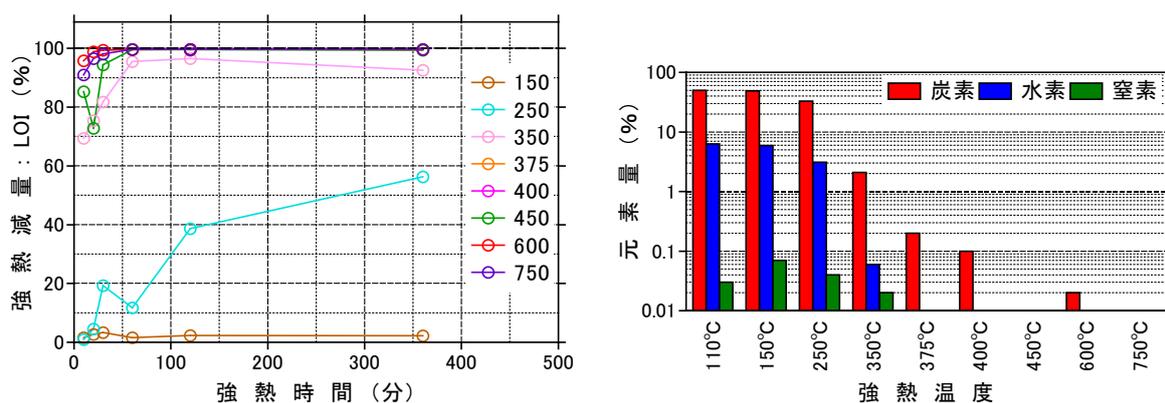


図 4.1.14 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (17\_おがくず)

おがくずは、先述した実証実験土槽木くずと同じ赤松であり、おがくず状の細粒になったものを用いた。粒度分布は図 3.1 に示した通りである。350°Cでは LOI が 100%に至っていないものの、375°Cで 100%の LOI となっていることが確認できる。炭素量をみても、375°Cで 1%以下となっており、炭化物の燃焼としては 375°Cの燃焼温度が必要であるといえる。450°C強熱の強熱時間が 60 分以下では、熱分解が十分に進んでいない状況も確認されることから、木質試料のみであっても、少なくとも 60 分以上の加熱時間が必要であることといえる。

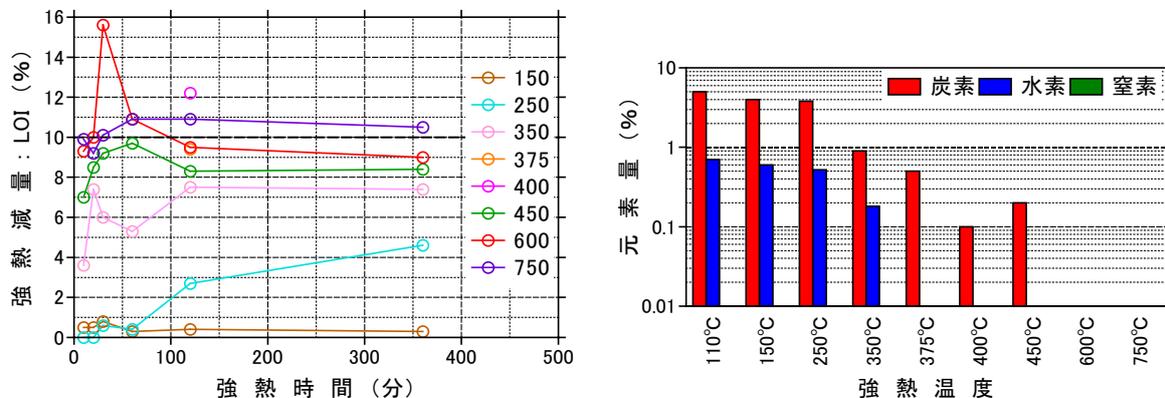


図 4.1.15 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (18\_おがくず 10%+まさ土 90%)

まさ土を母材としておがくずを重量比で 10%混合した試料では、強熱時間が 120 分以上になると、250°C強熱を除いて、LOI の値がほぼ一定になることが確認される。同様の少量の木くず混合試料である実証実験土槽混合土では、強熱温度毎にばらつきが大きかったが、おがくずにすることで、比較的均等な試料となり、LOI の値が安定したと思われる。炭素量は 350°Cで 1%を下回っており、おがくずのみの値とはことなるが、これは、おがくずの含有量を少ないためであり、水素量は 375°Cで消失する結果となっている。

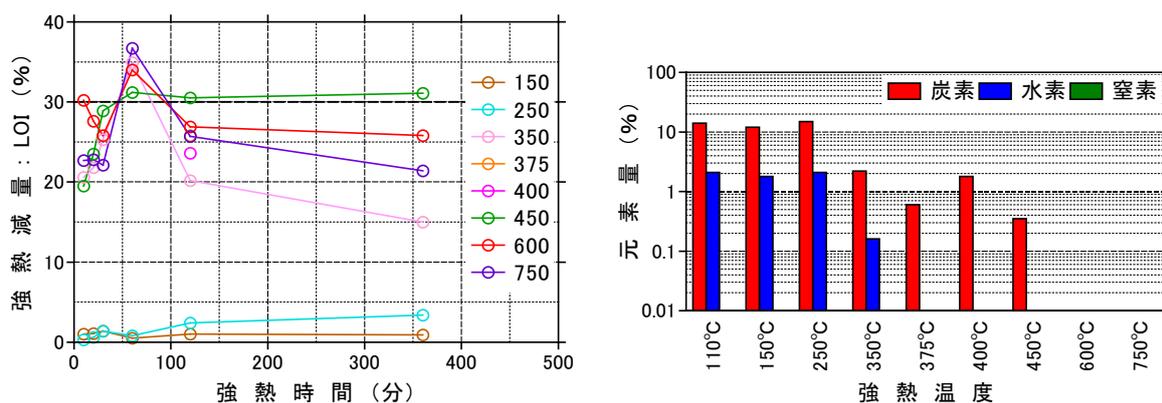


図 4.1.16 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (19\_おがくず 30%+まさ土 70%)

先と同様に、まさ土を母材としておがくずを重量比で 30%添加した試料では、強熱時間 60 分に特異点が発生する結果となったが、これは、天秤等の不具合や試料が不均一であったことが原因と考えられ、実験ミスが原因と判断される。10%添加では、比較的安定していた 120 分以降のデータを見ると、750°C、350°C で減少傾向が確認され、LOI の値が一定にならない挙動となった。これについても、試料が不均一であった可能性が高い。炉乾燥したおがくずとまさ土を混合すると、その比重の違いによって試料が均一にならない傾向があり、サンプリングに十分に注意を払っていても、ある程度の不均一性が生じてしまう。ターゲットである LOI = 30%に最も近い強熱温度は 450°Cであった。

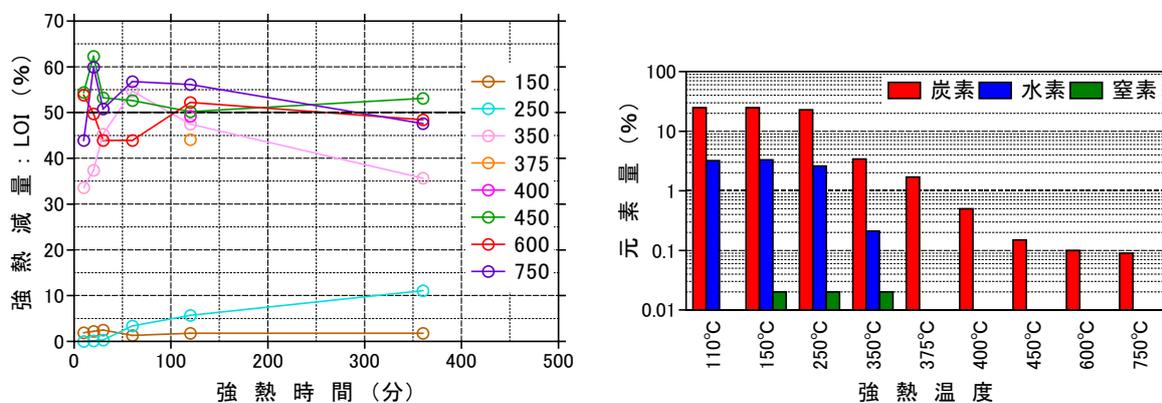


図 4.1.17 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (20\_おがくず 50%+まさ土 50%)

まさ土を母材として重量比で 50%のおがくずを混合した試料でも、350°Cと 750°Cの強熱試験のみ、120 分以降、LOI が低下する傾向が確認される。先述の 30%混合試料と同様の傾向となっており、試験実施日のことを考えると試料の不均一性が原因であると考えられる。ターゲットである LOI = 50%に近いのは、400°Cと 450°Cの試料であった。窒素量と水素量を見ると、完全に消失した温度は 375°Cとなっており、炭素量では、450°C強熱まで継続的に減少しており、1%を下回ったのは 400°C強熱のデータであった。

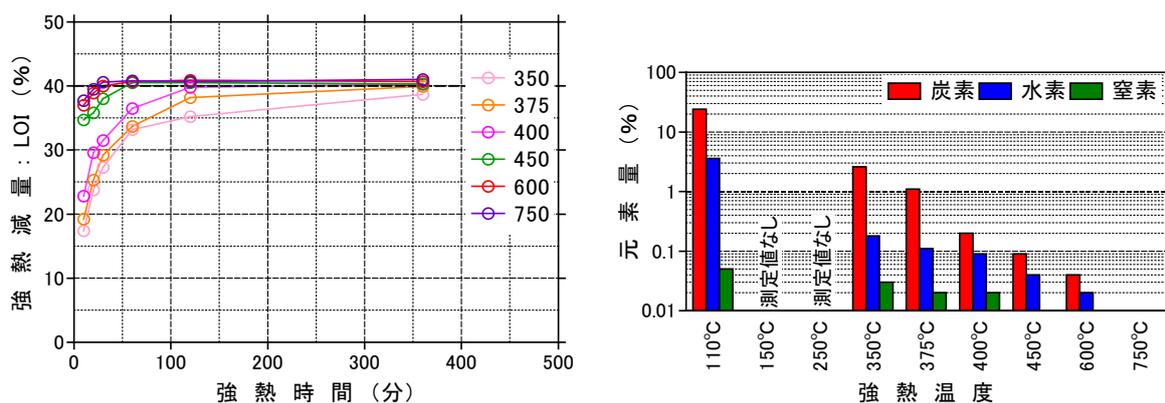


図 4.1.18 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (21\_おが 30%+プラ 10%+まさ土 90%)

災害廃棄物由来の分別土等の土砂分の場合、木くず等が混入する以外に、プラスチック類も混入している可能性があるため、木くず 30%に加えて、プラスチックが 10%程度混入しているケースを評価するため、まさ土を母材とする混合試料を人工的に作成した。375°C以上の強熱温度であれば、約 120 分程度の強熱時間でターゲットである LOI = 40%となることが確認できる。しかしながら、この結果は、プラスチックが混入していると、LOI にプラ分の重量が加算され、木くず含有量を大きく見積もる結果であるといえる。ただし、実際の分別土を考えると、中間処理後の篩下残さとなることから、プラ分が 10%も混合している可能性は無く、実用上は問題無いと判断される。

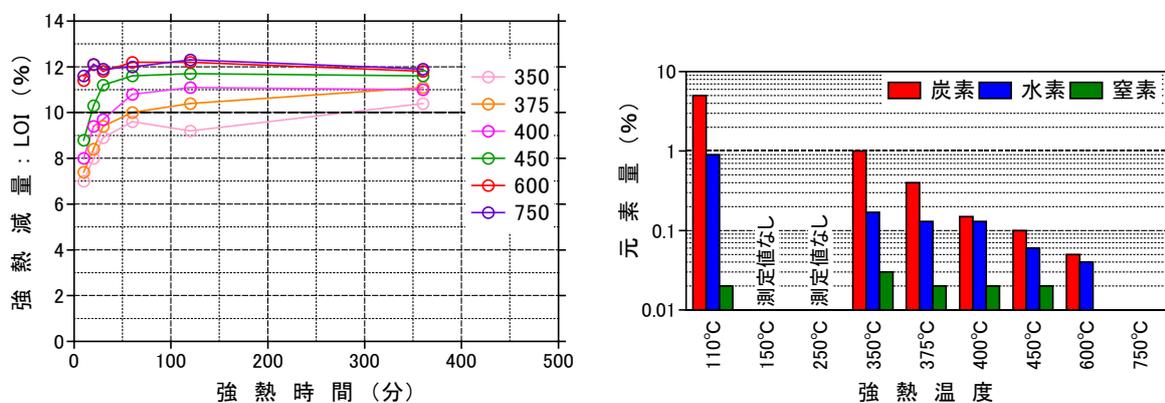


図 4.1.19 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (24\_おがくず 10%+廃石膏 10%+まさ土 80%)

災害廃棄物由来の分別土等の土砂分の場合、プラスチック以外にも廃石膏ボードの粉が混入する可能性がある。そこで、まさ土を母材として、おがくず以外に廃石膏を 10%混合した人工試料を作成した。強熱温度 375°C以下であると、120 分後も徐々に LOI が上昇する結果となった。400°C以上では 120 分の強熱時間で LOI が安定するが、その値はターゲットである 10%よりもやや高く、400°Cで約 1%、600°C以上で約 2%、木くず含有量を多く見積もることになる。これらは、二水石膏である廃石膏の結晶水が揮散したことが原因と考えられ、石膏の結晶が半水化したことや、550°C以上で無水化したことが原因と思われる。

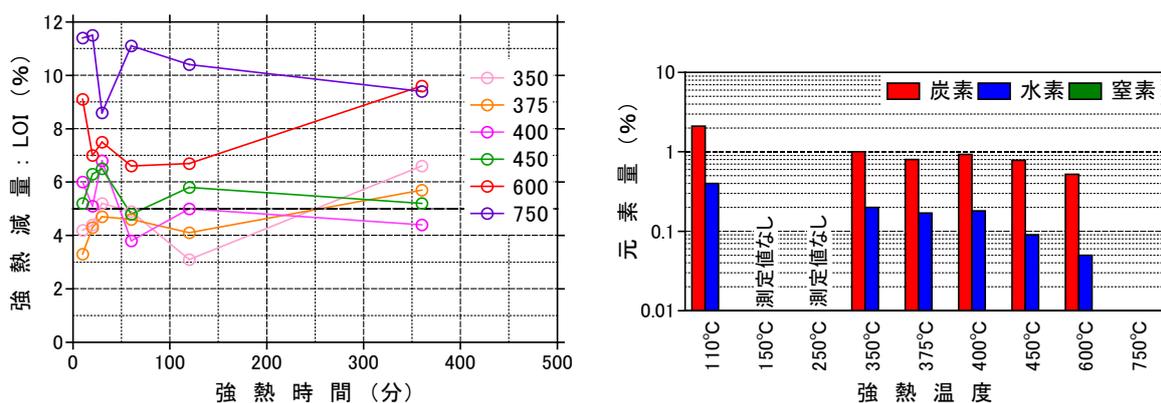


図 4.1.20 バッチ強熱試験と CHN 分析結果 (26\_おが 5%+木節 5%+ドロ 5%+まさ土 85%)

まさ土を母材として、おがくず 5%、木節粘土 5%、ドロマイト 5%を重量比で混合した人工試料では、ややバラツキはあるものの、375°C、400°C、450°Cの LOI は 60 分以降で安定する結果となった。600°C 以上の場合、先述したカオリナイトやドロマイトの影響で LOI の値が著しく大きくなる傾向が確認でき、熱しやく減量や JIS 規格の強熱試験を実施すると、木くず含有量を過大評価する可能性が示唆された。ターゲットである LOI = 5% にもっとも近い強熱温度は 400°C であり、強熱時間には少なくとも 120 分程度が必要であるといえる。

ii 機関毎の測定誤差

強熱減量試験を分析機関で実施する場合、基本的には JIS A 1226 : 2009 にしたがって実施される。そこで、JIS 規格に準じて、強熱温度のみを変更して 350°C、375°C、400°C とし、強熱時間を連続で 2 時間とする試験を 4 機関に依頼した。マッフル炉に試料を投入する際、マッフル炉自体の温度が設定温度に達していることを条件とした。試料は、分別土 A 種、有機質土、おがくず 10%+まさ土 90%の 3 種類とした。測定結果を図 4.1.21~4.1.23 に示す。

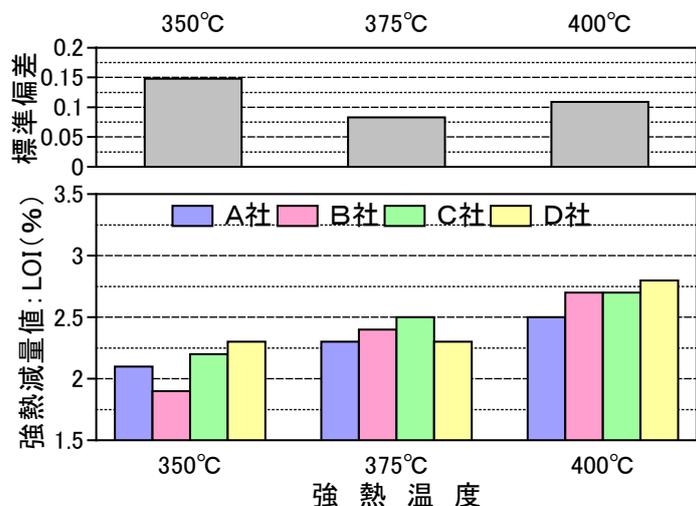


図 4.1.21 分析機関毎の強熱減量の違い (01\_分別土 A 種)

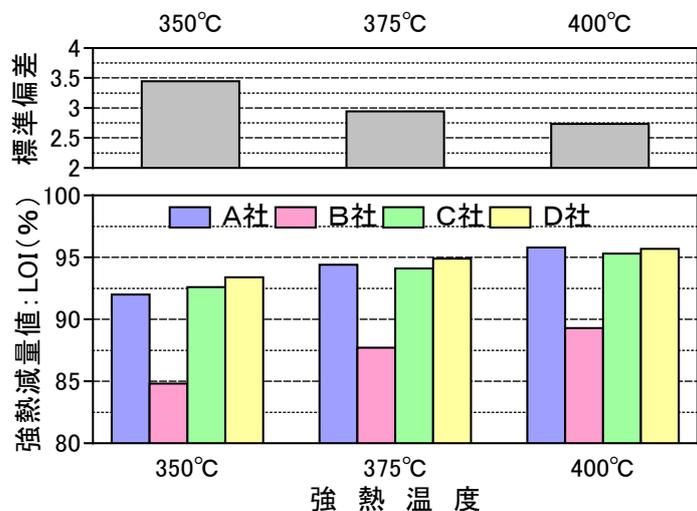


図 4.1.22 分析機関毎の強熱減量の違い (05\_有機質土)

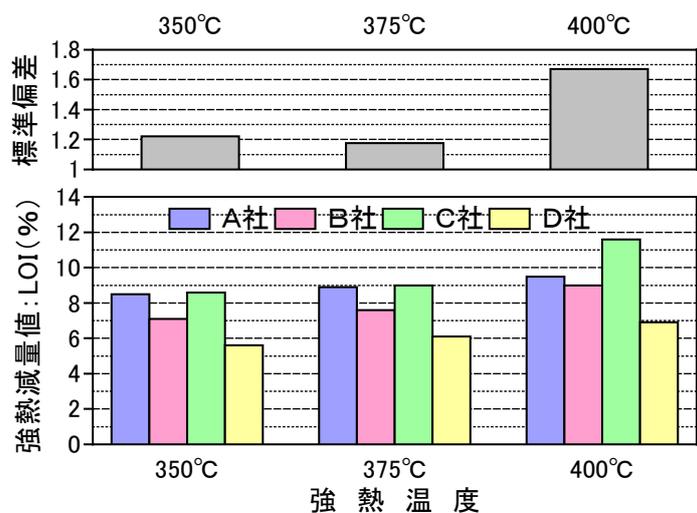


図 4.1.23 分析機関毎の強熱減量の違い (18\_おがくず 10%+まさ土 90%)

分別土 A 種では、強熱温度が増加するとともに各社共に LOI が増加していることが確認される。各社の強熱温度毎のバラツキに一貫性はなく、各強熱温度でバラツキが異なっている。標準偏差で判断すると 375°C が最も小さく、350°C が大きい傾向となった。有機質土の場合、各温度で大きな違いはなく、350°C 強熱の LOI が小さいものの、375°C と 400°C では、ほぼ同様の値となった。B 社の LOI は全ての強熱温度で他社の LOI よりも小さい傾向となったことから、B 社の測定方法が他社と異なる可能性が考えられる。また、標準偏差をみると 400°C におけるおがくず 10%+まさ土 90% 試料では、350°C と 375°C の LOI がほぼ等しく、400°C

で若干LOIが増加する結果が得られた。本試料の場合、D社のLOIだけが他社の値よりも小さくなっており、どの強熱温度でも小さいLOIとなっている。標準偏差からバラツキの最も少ない強熱温度は375℃になった。

特異的にLOIが小さくなる原因を評価するため、強熱試験時の試料量に着目した。マッフル炉の性能を満足していて、試料自体が粉碎されていることを考えると、試料量が最も誤差を生じさせると考えた。図4.1.24～4.1.26に初期試料量と強熱減量の関係を示す。どの強熱温度でも同じ傾向が確認されたことから、温度では分類せず、分析会社の違いで評価した。分別土A種については、各社間のバラツキが小さかったことから、本図においてもLOIの違いは無いが、各社によって試料量が異なっていることがわかる。JIS規格では、試料量を2～10gと規定しているため、分別土A種ではその範囲で測定されていると判断できる。また、2～10gの範囲であれば、分別土A種については初期試料量がLOIに及ぼす影響は小さいといえる。図4.1.25の有機質土をみると、LOIの値が小さかったB社のみ試料量が多い。重量比で9割が有機物になるような有機質土では、試料量が大きいとLOIが小さくなる傾向があるといえ、るつぽに2g程度までが一定したLOIを得られると判断される。これは、比重の小さい有機質土であると、嵩が増えるために2時間では全てが熱分解しないためと考えられる。図4.1.26はおがくず10%+まさ土90%の人工試料であるが、この場合、試料量が少ないほどLOIも小さくなっており、ターゲットであるLOI = 10%からの解離が大きい。そのため、比重が土壌と同じ程度であり、目視確認できる有機物量が10%程度含まれている試料に対しては、るつぽ投入重量を少なくとも8g以上にする必要があるといえる。

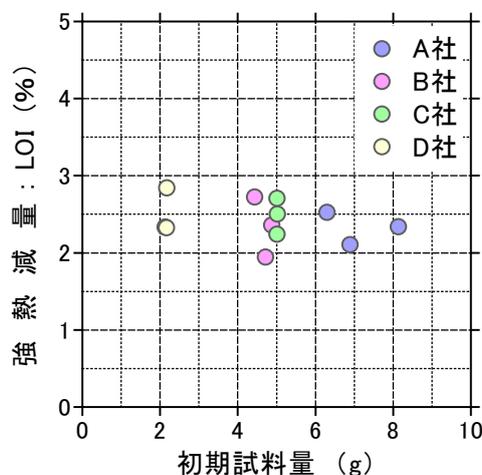


図 4.1.24 初期試料量と強熱減量の関係 (01\_分別土 A 種)

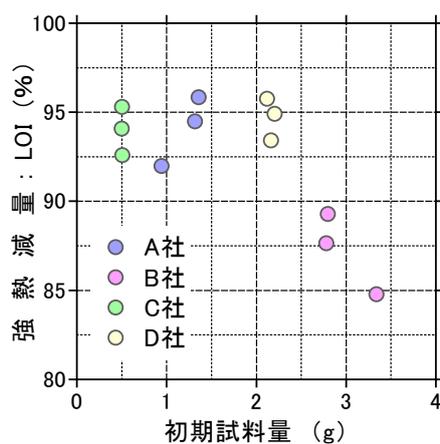


図 4.1.25 初期試料量と強熱減量の関係 (05\_有機質土)

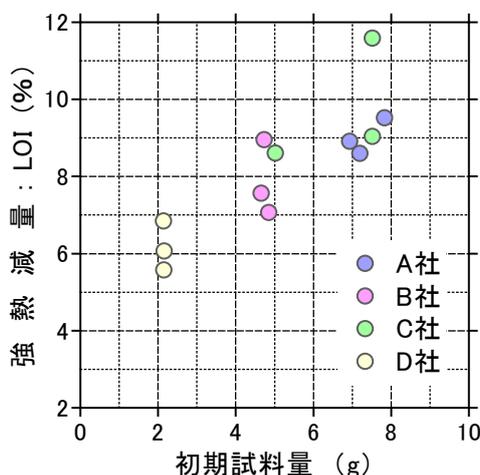


図 4.1.26 初期試料量と強熱減量の関係 (18\_おがくす 10+まさ土 90)

### iii 木くず含有量と強熱減量の比較

木くず添加量が既知の人工試料を対象に、混合した有機物重量と強熱減量の比較を図 4.1.27 に示す。強熱時間は 120 分間のみを対象とした。図中の 45 度線に近いほど木くず含有量を予測可能な強熱温度となる。図 4.1.28 には、本研究の対象となる比較的有機物含有量が少ない領域として 10% 以下のみを拡大した図を示している。全範囲の図より、250°C では添加量に対して LOI がかなり小さい値となっており、予測できているとはいえないが、350°C 以上になると 45 度線に近い値が得られていることがわかる。10% 以下を拡大した図をみると、300°C や 750°C で 45°C 線から解離した LOI が散見されるが、本図からは定量的な評価ができないことから、ターゲットとなる添加した木くず量（有機物量）を基準として相対誤差を求め、温度毎で平均相対誤差を計算した結果を図 4.1.29 に示す。計算には拡大図で示した添加量 10% 以下のみを対象とし、解離が大きい 250°C は除外した。本図より、350°C での平均相対誤差が大きく、375°C が最も小さい誤差であることがわかる。強熱温度が上昇する毎に平均相対誤差も増加する傾向が確認できる。これより、375°C が最も適した強熱温度であるといえる。しかしながら、強熱試験は一般的にターゲット温度に対して

±25°C程度の幅を持たせるのが一般的である。これは、マッフル炉の性能等の関係から必要な振れ幅となっている。仮に、375°Cをターゲットにするとマイナス25°Cである350°C強熱も許容されることになるが、350°Cになると平均相対誤差が大きくなり、結果として、LOIの値が木くず等の有機物含有量と異なる値となる可能性を含んでしまう。375°Cに対して、温度が低くなると急激に誤差が大きくなるが、温度が高くなる場合には、誤差範囲はある程度小さい範囲に収まる。そこで、本研究から得られる強熱温度としては、400°C±25°Cが最も誤差が小さく、至適強熱温度であると結論付けられる。

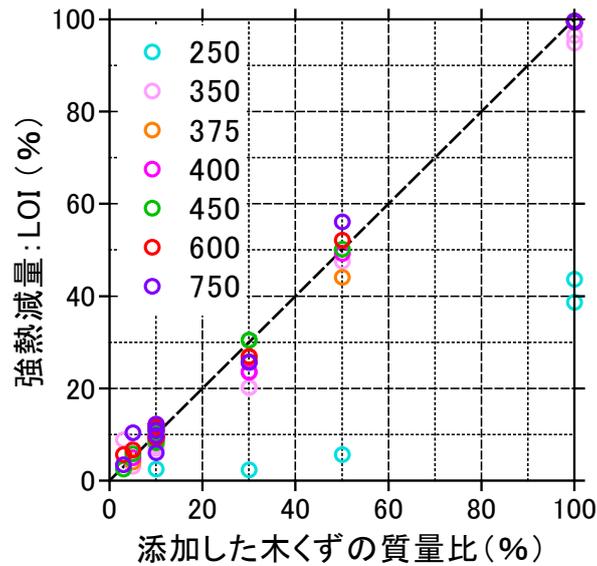


図 4.1.27 添加した有機物量と強熱減量の比較（全範囲）

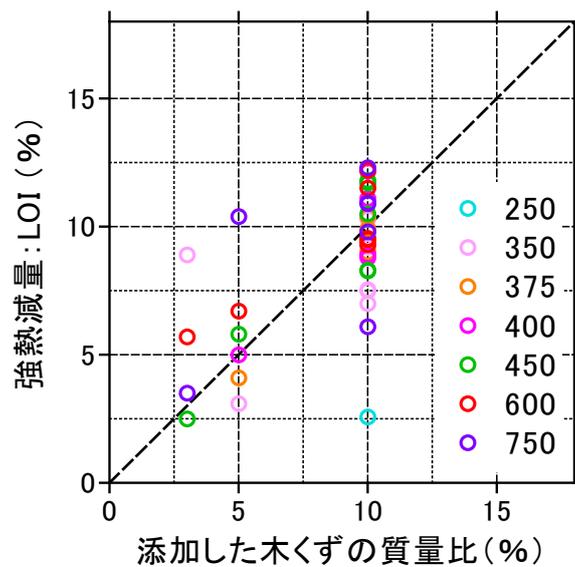


図 4.1.28 添加した有機物量と強熱減量の比較（10%以下の拡大図）

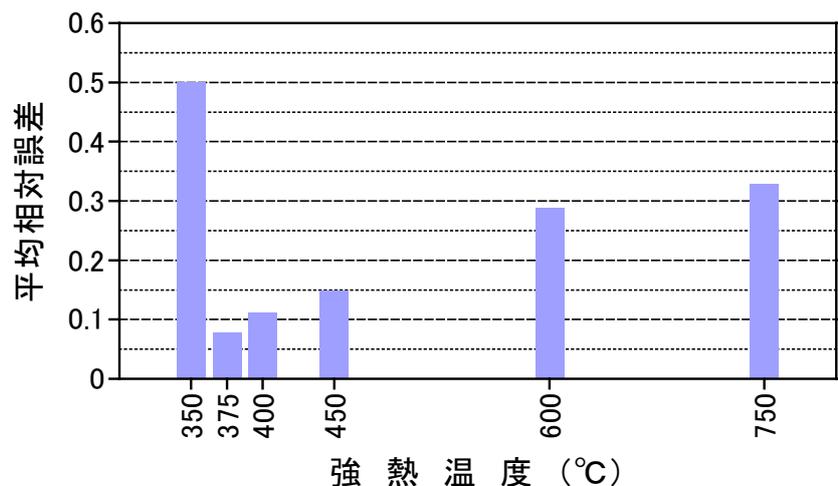


図 4.1.29 強熱温度毎の平均相対誤差

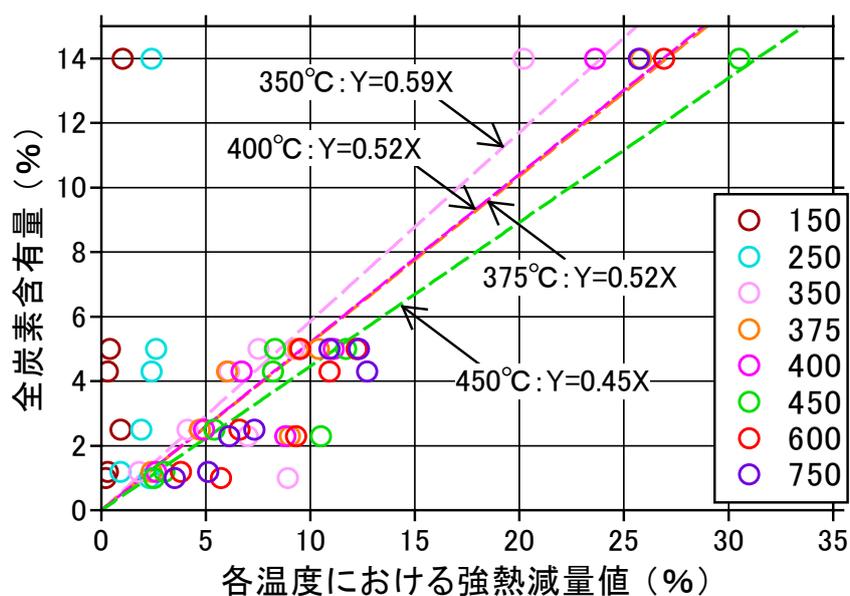


図 4.1.30 強熱減量値と全炭素含有量の関係

木くずを人工的に混合した試料、分別土 A 種、B 種、分別土砂など、有機炭素を含むことが明らかな試料のみを用いて、各温度における強熱減量値と CN コーダーによって求めた全炭素含有量の関係を図 4.1.30 に示す。強熱温度が 150 や 250°C のデータは、全炭素含有量にかかわらず強熱減量値が数%以下となっており、炭素が焼失していないことが確認できる。250°C と 350°C の間には大きな変化点があり、その間の温度で炭素が焼失していることが本図からも確認できる。言い換えると、250~350°C の間には変曲点があるため、微妙な温度の違いや、サンプル重量等によって強熱減量の値が大きく変化してしまい、安定した値を得られない可能性が考えられる。一方、350°C と 400°C の近似直線は、ほぼ同様の直線となっていることか

ら、375 や 400°C では安定した強熱減量値を得られる可能性が高い。前述した平均相対誤差も含め、安定した強熱減量値を得つつ、有機物含有量を把握するためには 375~400°C の範囲が至適温度といえる。なお、切片をゼロとした近似曲線の傾きが 0.52 であり、木質系バイオマスに含有される炭素量である 50% に近い値が得られていることも、定性的ではあるが、有機炭素含有量の測定温度としては適しているといえる。

## b シーケンシャル強熱試験

### i 各種土壌の重量変化挙動

試料の内、土壌に分類される 08\_まさ土、07\_川砂、06\_関東ローム、09\_木節粘土、05\_有機質土のシーケンシャル強熱減量試験結果を図 4.1.31~4.1.35 にそれぞれ示す。

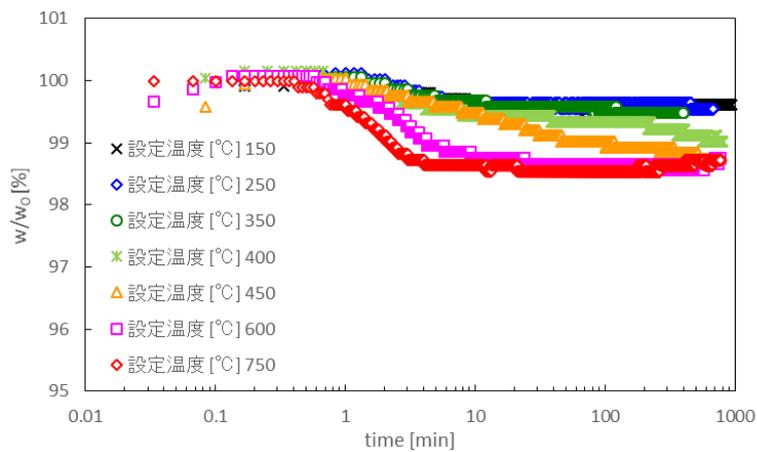


図 4.1.31 強熱試験時のまさ土の重量経時変化

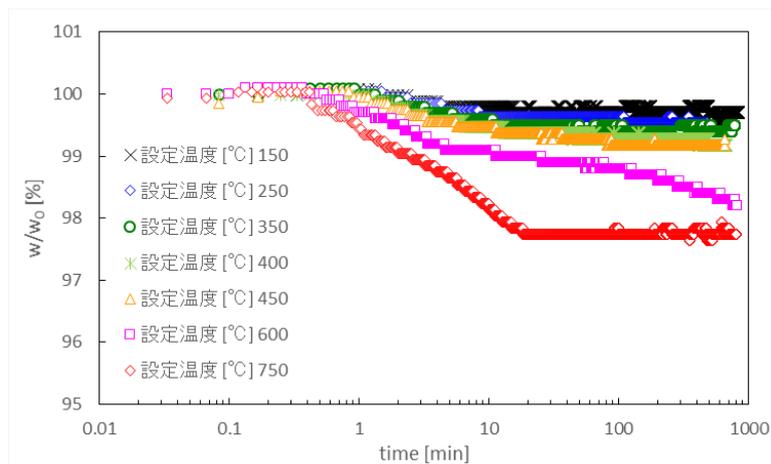


図 4.1.32 強熱試験時の川砂の重量経時変化

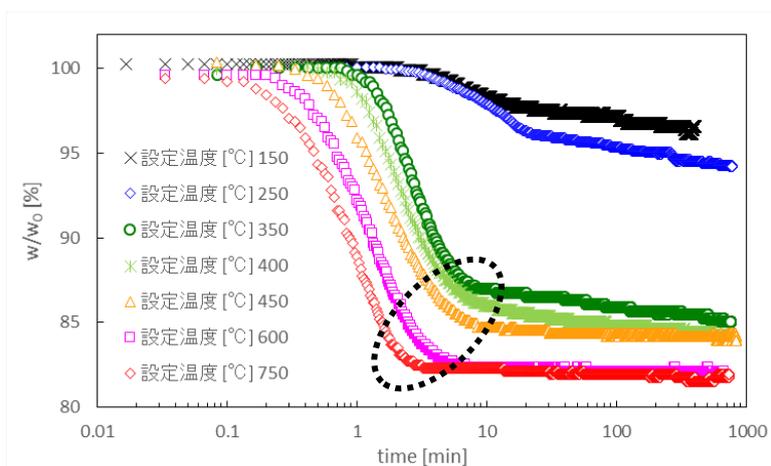


図 4. 1. 33 強熱試験時の関東ロームの重量経時変化

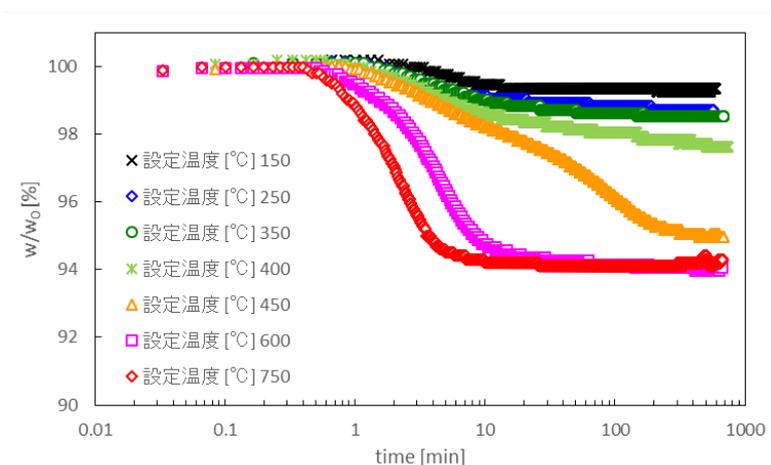


図 4. 1. 34 強熱試験時の木節粘土の重量経時変化

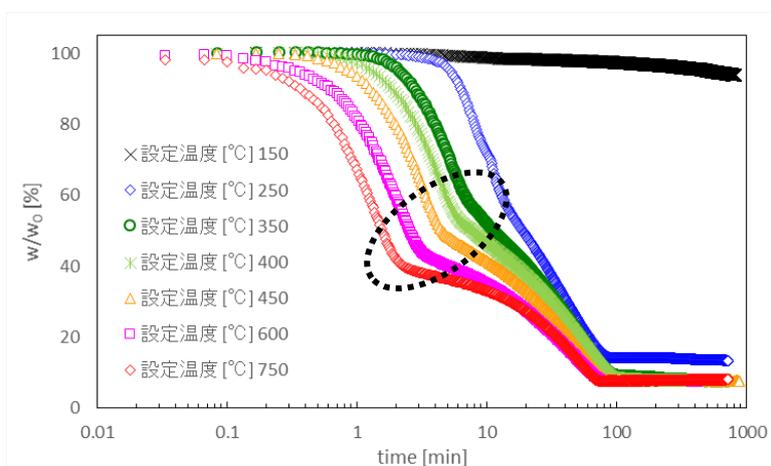


図 4. 1. 35 強熱試験時の有機質土の重量経時変化

まさ土および木節粘土については、重量減少量は異なるが 350℃～450℃における重量減少挙動が比較的類似していることが、図 4.1.31 及び 4.1.34 より見て取れる。木節粘土がカオリナイトを含んでいる点を考慮すると、カオリナイトの結晶水の脱離が概ね 500℃程度で生じることから当該温度域での重量減少挙動は粘度系物質の結晶水の脱離によるものと推察される。また、川砂における 600℃および 750℃の重量減少挙動については、後述のドロマイトのそれに酷似していること、試料内に貝殻と思われる粒子が散見されたこと等を勘案すると、炭酸カルシウムの脱炭酸化による重量減少であると予想される。一方、有機質土の重量減少挙動については、図 4.1.35 の破線部分が後述の木質系バイオマスの挙動とほぼ同様の挙動を示すことから、揮発分および固定炭素分に分類される有機物を含有しているものと推察される。

なお、関東ロームについては、250℃と 350℃の間に非常に大きな相違がある点が他の重量減少挙動と大きく異なる。また、重量減少速度が極端に低下する領域（図 4.1.33 の破線部分）の挙動が若干バイオマスの挙動に類似しているようにも見受けられるため、若干の有機物の混入が予想されるが、大半が吸着水、構造水の脱離によるものであると予想される。

このように重量減少をシーケンシャルに評価することによって、含有成分をある程度類推することが可能となると考えられる。以下、人為的に各成分の含有量を調整した人工試料に対する強熱減量実験の結果を示す。

#### ii 木くず等有機物混合試料の重量変化挙動

以下に木くず及びプラスチック+まさ土混合試料の強熱減量実験の結果を示す。

木くずのみを用いた場合と木くずにプラスチック（ポリエチレンペレット）が含まれる場合について実験した結果を図 4.1.36 および 4.1.37 に示す。両図を比較すると、450℃以上ではそれほど大きな変化は確認されなかったが、250～400℃の間で重量減少挙動が異なり、プラスチックを含有することにより重量減少が遅くなる傾向を示した。また、実験開始後 60 分間のみを拡大した結果を図 4.1.38 および 4.1.39 に示すと、250～400℃の結果が大きく異なることが明確になるが、400℃の場合は 15 分を経過して以降の重量減少が比較的早く進行するため、重量減少がほぼ終了するまでに要する時間は木くずのみを用いた場合と殆ど同じであることが分かる。これは、使用したプラスチックが熱可塑性でありほぼ 100%揮発分であるため全体としては反応速度が最も遅い固定炭素分が木くず 100%の場合よりも半減したため、反応初期段階における反応速度の低下を相殺したものと考えられる。なお、木くずおよびプラスチックの燃焼反応における見かけの反応速度は、概ね「木質バイオマスの揮発分」>「プラスチック」>「木質バイオマスの固定炭素分」の順に早いように見受けられるが、これは使用したプラスチックの形状が直径 3 ミリ程度のペレット状であり、バイオマスの比表面積と比較してかなり小さいことが少なからず影響していると考えられる。

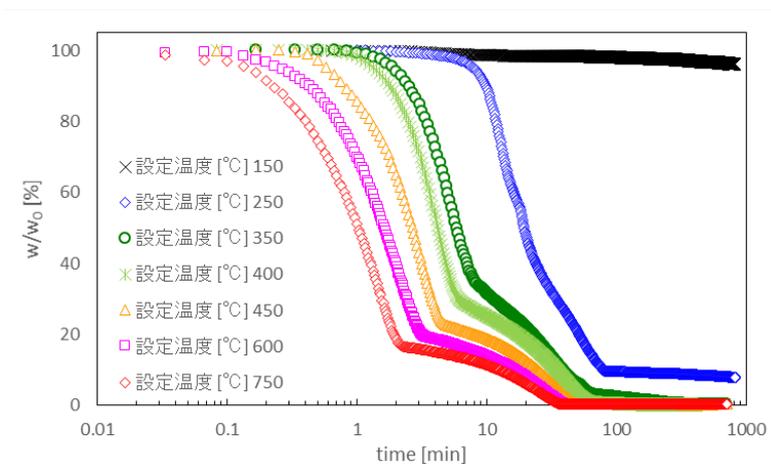


図 4. 1. 36 強熱試験時の木くずの重量経時変化

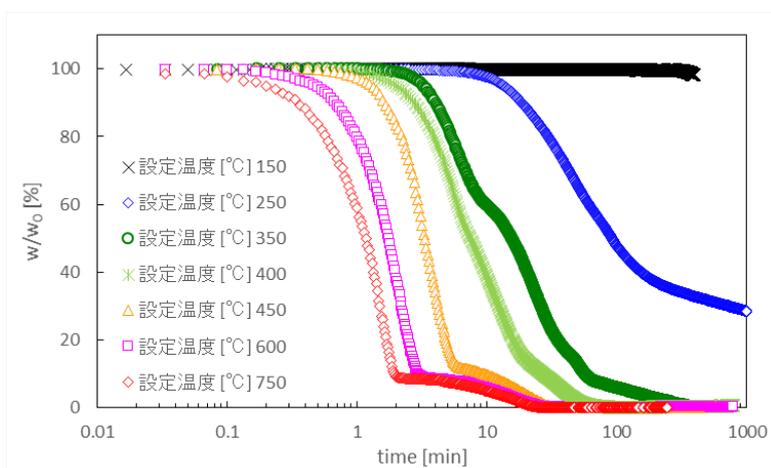


図 4. 1. 37 強熱試験時の木くず 50%+プラ 50%試料の重量経時変化

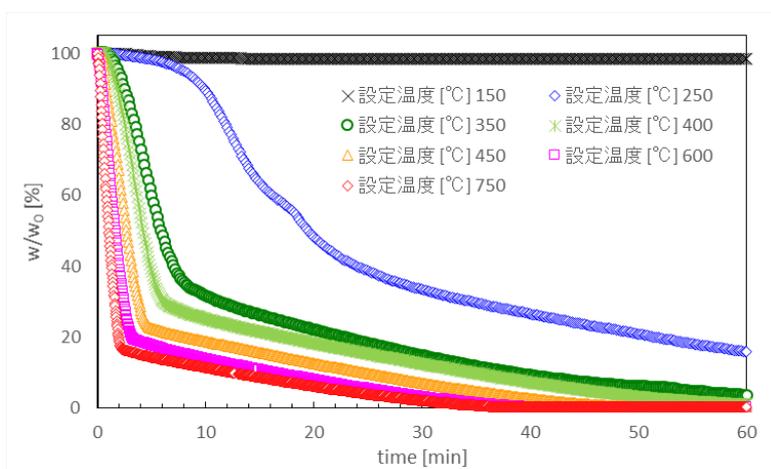


図 4. 1. 38 強熱開始後 1 時間に着目した木くずの重量経時変化

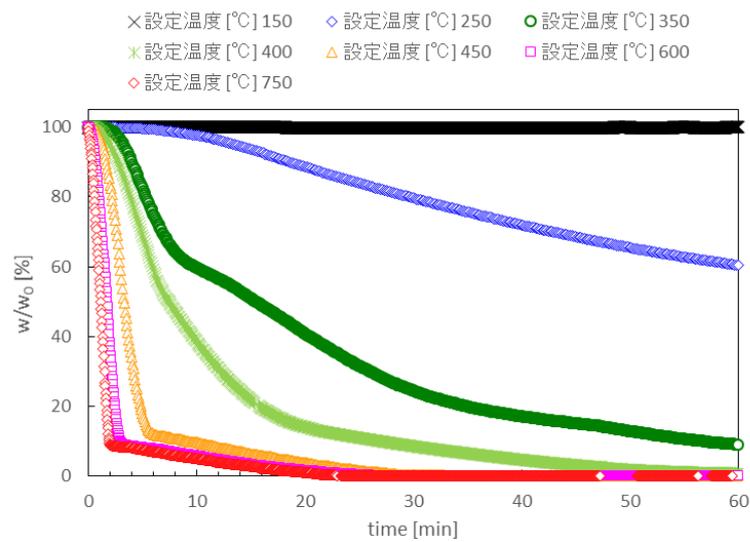


図 4. 1. 39 強熱開始後 1 時間に着目した木くず 50%+プラ 50%試料の重量経時変化

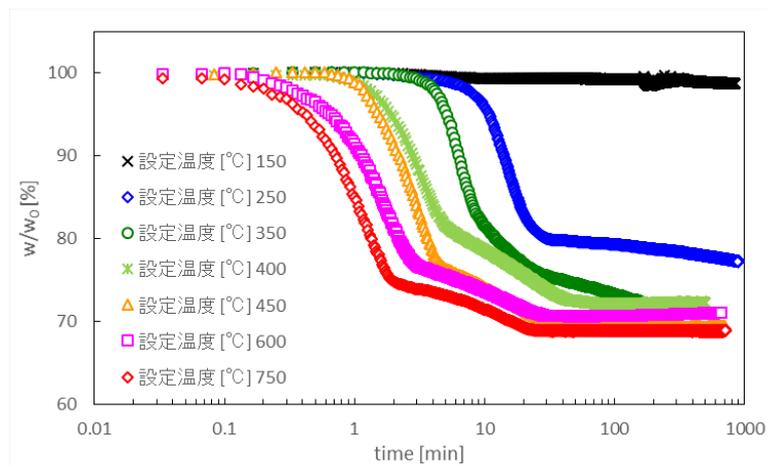


図 4. 1. 40 強熱試験時の木くず 30%+まさ土 70%試料の重量経時変化

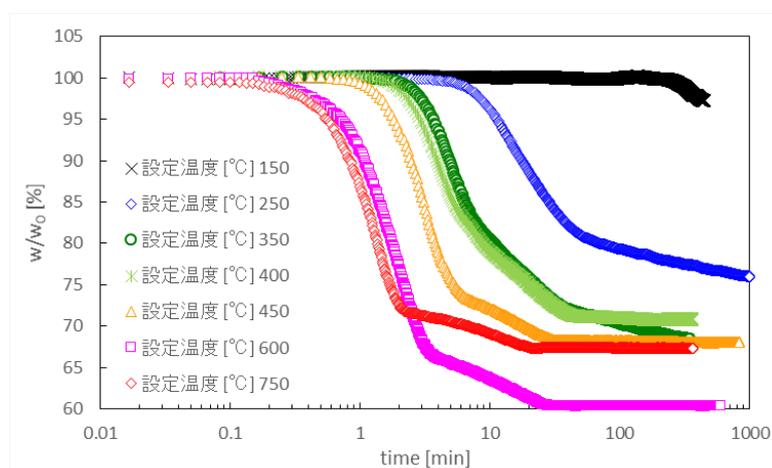


図 4. 1. 41 強熱試験時の木くず 30%+プラ 10%+まさ土 60%試料の重量経時変化

木くずおよびおプラスチックをまさ土に混合した場合の重量減少挙動については、有機系成分のみを用いた場合と比較して大きな差は認められなかったが、試料混合のばらつきの影響が大きく出てしまい、この点について十分注意する必要がある。

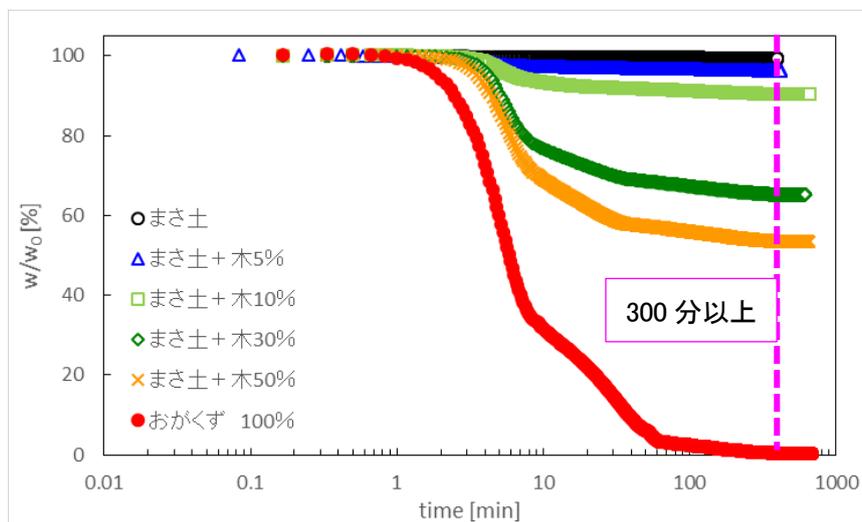


図 4.1.42 強熱温度 350°Cにおける木くず混合まさ土の重量変化挙動

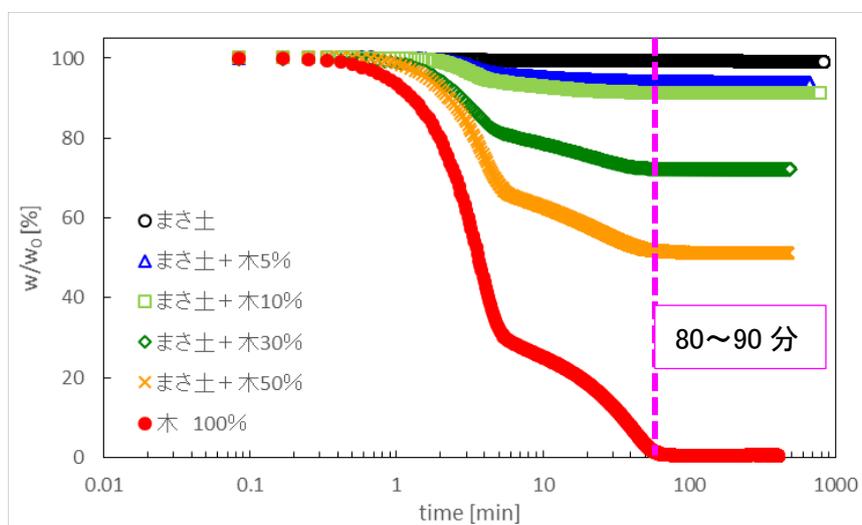


図 4.1.43 強熱温度 400°Cにおける木くず混合まさ土の重量変化挙動

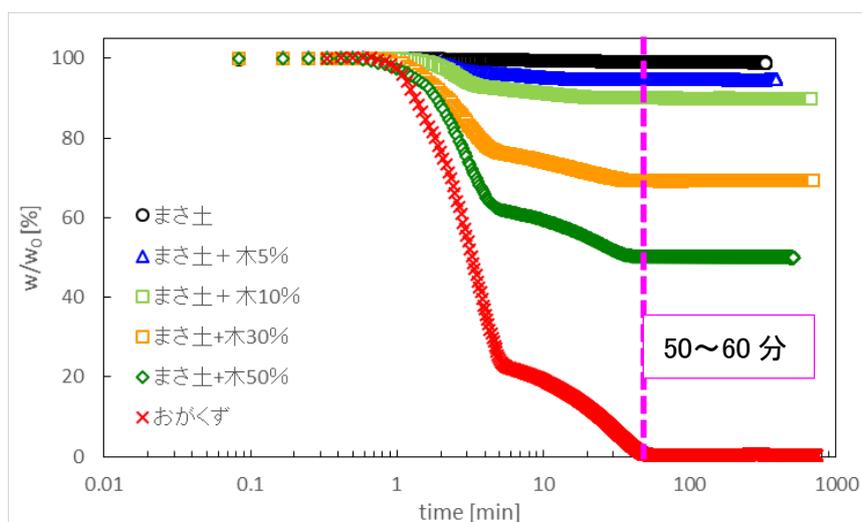


図 4.1.44 強熱温度 450°Cにおける木くず混合まさ土の重量変化挙動

上述の結果より、有機物含有量を評価するためには概ね 400°C前後以上の加熱条件が必要であることが明らかとなったので、当該条件下における重量減少挙動の詳細を明らかにするため、350～450°Cにおける木くず含有試料の重量減少挙動をまとめた結果を図 4.1.42～4.1.44 に示す。

全体的に、重量変化が認められなくなるまでに要する時間は木くず含有量の増加に伴い若干長くなる傾向が見られるが、各温度条件における重量減少完了時間は、350°Cの場合 300 分以上であるのに対し、400°Cでは概ね 90 分、450°Cでは概ね 60 分程度であることが本結果から読み取ることが出来る。粘土質からの結晶水の脱離を考慮すると、400°C前後で 1 時間半から 2 時間程度熱処理することで、木質由来の有機物含有量を比較的正確に評価することが可能となると考えられる。

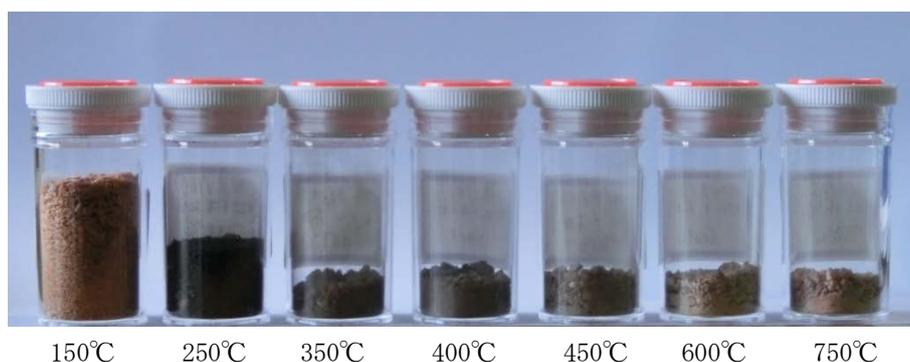


写真 4.1.1 木くず 30%+まさ土 70%試料の強熱減量後の外観

一例として木くずを 30%含む試料の強熱減量後の外観写真を写真 4.1.1 に示す。150°Cでは外観上乾燥後の試料と殆ど差がなく、250°Cではかなりの炭化物が残留していることが明らかとなった。350°C以上では体積はほぼ同程度となったが、試料の色を比較すると温度が低い方がやや黒ずんでおり 600°C以上になると概ね褐色の粉体となった。このことから、外観上では 600°C以上で炭素に由来する黒色が消失することが示唆されるが、体積としては 350°C以上でほぼ変化が見られず、図 4.1.40 の重量変化挙動と概ね合致する結果となった。

### iii ドロマイト混合試料の重量変化挙動

ドロマイト（炭酸マグネシウム・炭酸カルシウム）を含む試料の強熱減量実験を行った結果を図 4.1.45 および 4.1.46 に示す。炭酸マグネシウムおよび炭酸カルシウムの反応平衡を考慮するとより低温で脱炭酸化が起こることが予想されたが、本実験では 600℃以上で脱炭酸化反応が進行することが確認された。また、750℃では 1 時間半程度の加熱によりほぼ脱炭酸化が完了することが重量減少率からも確認された。なお、脱炭酸化反応の反応速度は、有機物の燃焼速度や結晶水の脱離速度と比較すると非常に遅く、600℃で強熱減量を行った直後の試料を観察したところ、充填された粉体試料の表層部分（雰囲気界面近傍）のみが反応しており、充填層内部は未反応な状態であることを目視で確認している。カルシウムおよびマグネシウムの炭酸化・脱炭酸化反応の平衡は炭酸ガス濃度にも依存することが知られており、脱炭酸化により発生した二酸化炭素の拡散が反応生成物（酸化物）固体により阻害されるため、見かけの反応速度がさらに低下する要因となっている可能性が示唆された。

以上のことから、450℃以下であれば速度論的にはほぼ脱炭酸化反応が進行しないことが確認され、脱炭酸化による重量減少と有機物の燃焼による重量減少を区別することが可能であることが示された。

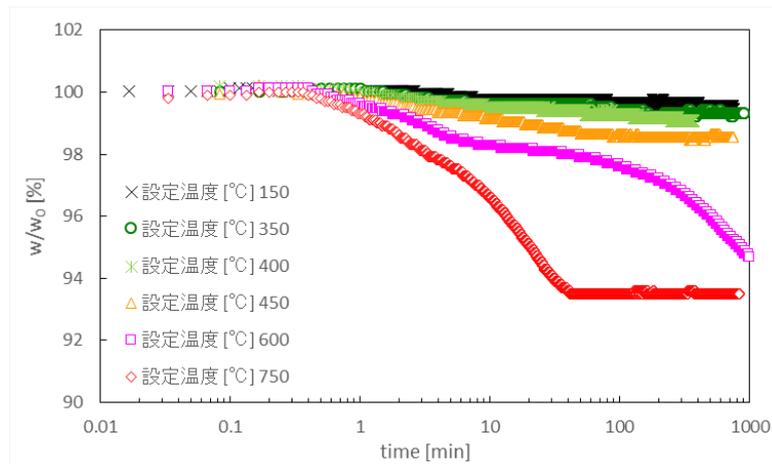


図 4.1.45 強熱試験時のドロ 10%+まさ土 90%0%試料の重量経時変化

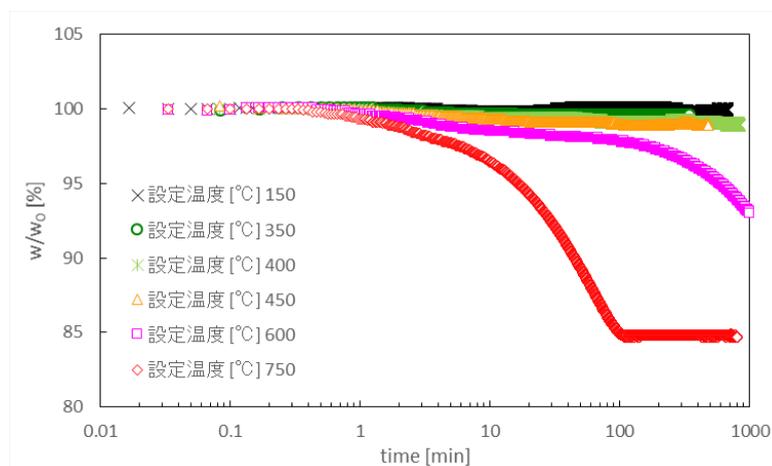


図 4.1.46 強熱試験時のドロ 30%+まさ土 70%0%試料の重量経時変化

#### iv 3種類以上の成分を含む混合試料の重量変化挙動

上述の検討結果を踏まえ、有機物（木くず）を混合した土壌（まさ土）に結晶水を含む物質（石膏、木節粘土）を加えた場合、さらに炭酸化物（ドロマイト）を加えた場合の相互影響について明らかにするため、当該混合試料に対して強熱減量実験を行った結果を以下に示す。

図 4. 1. 47～49 はまさ土に 10%の木くずを加えた混合土壌に石膏を 5～20%加えた試料の強熱減量挙動である。石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ :二水石膏)は 160～170℃程度で加熱することで結晶水の一部が脱離し半水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ )となり、さらに 200℃以上に加熱することで無水石膏 ( $\text{CaSO}_4$ ) となることが知られているが、本実験条件下では結晶水の脱離を明確に確認することは出来ず、結果的に石膏の共存の影響は殆どないことが示唆された。なお、事前処理として 110±5℃で 12 時間以上乾燥させているが、このときの含水率が石膏の含有率の増加に伴い 1～2%程度上昇していることが明らかとなっており、乾燥過程において結晶水の一部が既に脱離してしまっていたため、結果として影響を及ぼさなかった可能性がある。この点については、石膏単独での評価を行った上で判断する必要があると思われる。

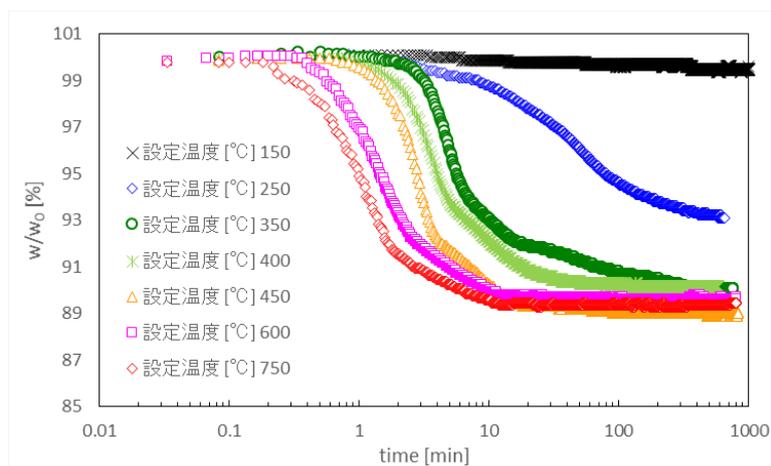


図 4. 1. 47 強熱試験時の木くず 10%+石膏 5%+まさ土 85%試料の重量経時変化

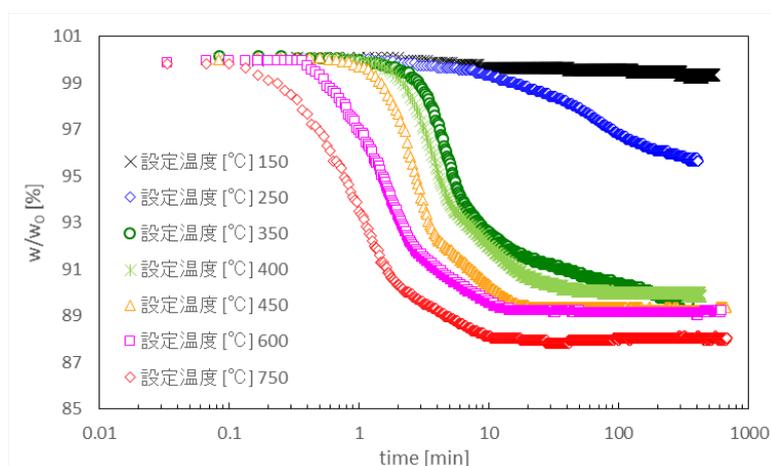


図 4. 1. 48 強熱試験時の木くず 10%+石膏 10%+まさ土 80%試料の重量経時変化

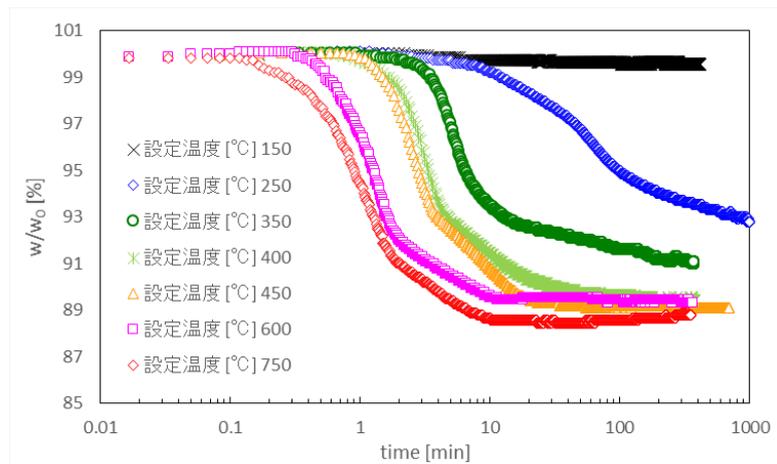


図 4.1.49 強熱試験時の木くず 10%+石膏 20%+まさ土 70%試料の重量経時変化

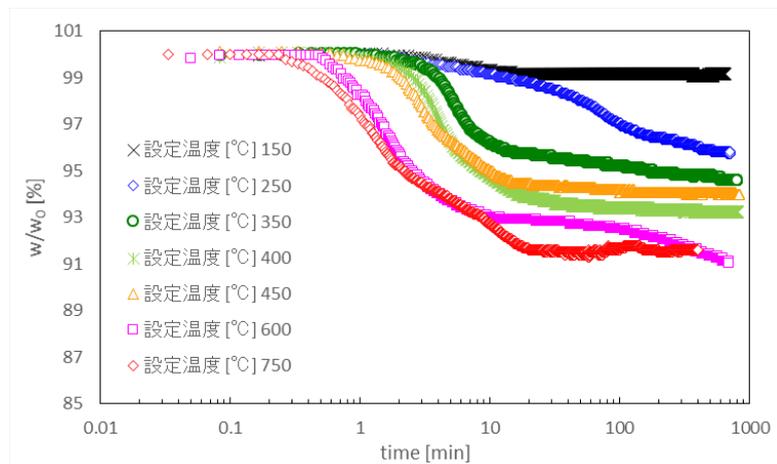


図 4.1.50 強熱試験時の木くず 5%+ドロ 5%+木節 5%+まさ土 85%試料の重量経時変化

まさ土に木くず、木節粘土およびドロマイトを 5%ずつ加えた試料の強熱減量挙動については、図 4.1.50 の通り、ドロマイトに起因する重量減少が 600°Cの結果から読み取ることが出来るが、木節粘土の影響については元々全量の 6%程度の重量減少率であることからその影響を読み取ることが殆ど出来ないことが明らかとなった。上記の結果から、先に提案した通り 400°C前後で 1 時間半から 2 時間程度強熱することで有機物含有量（概ね 5%）を評価することが可能であることが改めて示された。

#### v 実試料の重量変化挙動

様々な現場で採取された分別土および処理残渣を用いて、その強熱減量挙動を明らかにし有機物含有量の推定を行った。以下にその結果を示す。

分別土 A 種では 350~450°Cの間で 1%弱の変動があり、400°Cにおける強熱減量は概ね 2.6%であった。また、600°Cの強熱減量の結果から炭酸化物によるものと思われる重量減少も確認されており、600°C以上で長時間加熱する方法では有機物の含有率を過大に評価する恐れがあることが示唆された。

分別土 B 種においても A 種と同様の結果が得られ、400°Cにおける強熱減量は概ね 5.8%程度であり、350~450°Cの範囲で 1%前後のばらつきがあるものの概ね一致する結果となった。

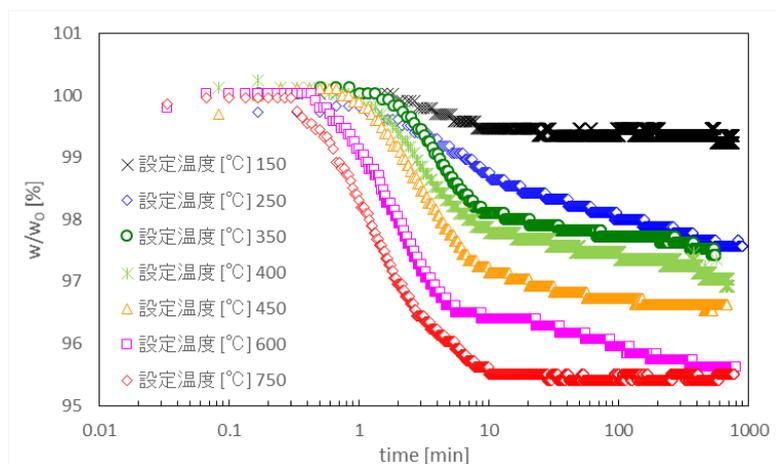


図 4.1.51 強熱試験時の分別土 A 種の重量経時変化

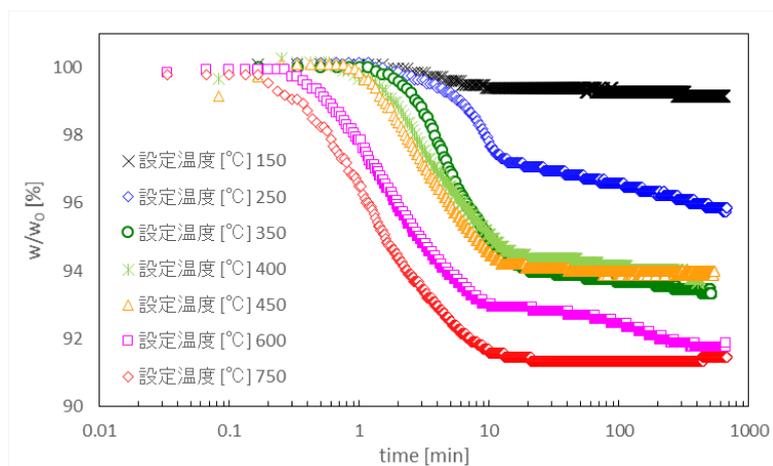


図 4.1.52 強熱試験時の分別土 B 種の重量経時変化

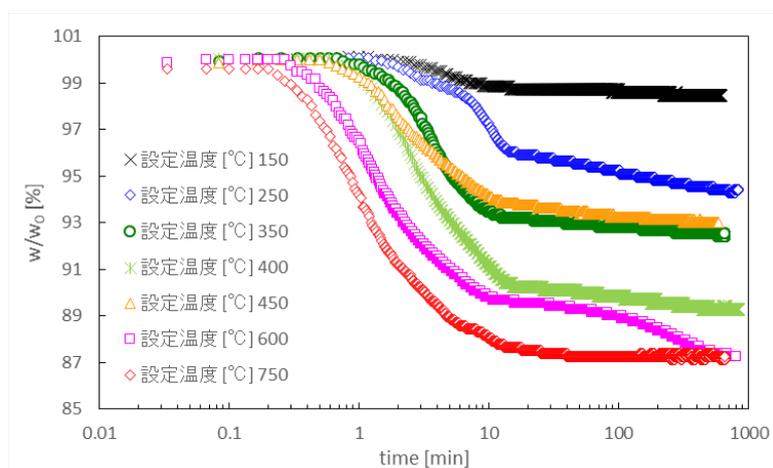


図 4.1.53 強熱試験時の分別土砂の重量経時変化

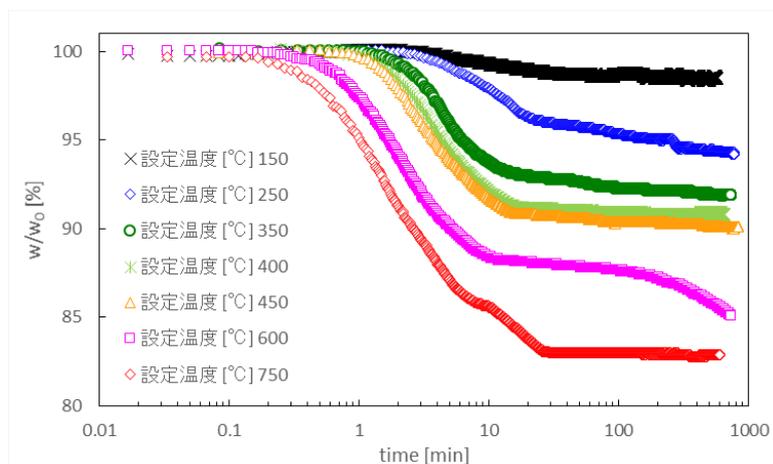


図 4.1.54 強熱試験時の中間処理残さの重量経時変化

分別土砂については、粘土質の混在のためかなり強い凝集体となっていたため均一な試料採取が困難であったため測定結果にばらつきが生じているが、強熱減量挙動は分別土B種に酷似しており、400°Cにおける強熱減量は概ね10%となった。

また、処理残渣についても上述の試料と同様の強熱減量挙動を示し、400 および 450°Cにおける重量減少挙動が比較的一致する結果となった。強熱減量は400°Cで概ね7.8%となった。

#### vi 強熱試験時におけるるつぼ内の雰囲気

強熱減量時に試料近傍の雰囲気には十分な酸素が存在することを確認するため、加熱下におけるるつぼ内の雰囲気を採取し分析を行った結果を図4.1.55に示す。分別土A種およびB種を用いて実験を行った結果、加熱開始直後に二酸化炭素濃度が僅かに上昇することが確認されたが、高くても0.3%程度であることが明らかとなった。一方、酸素濃度については加熱開始直後から20%前後で推移することが確認されており、有機物含有量が10%未満の試料であれば特に雰囲気の影響を考慮する必要がないことが明らかとなった。

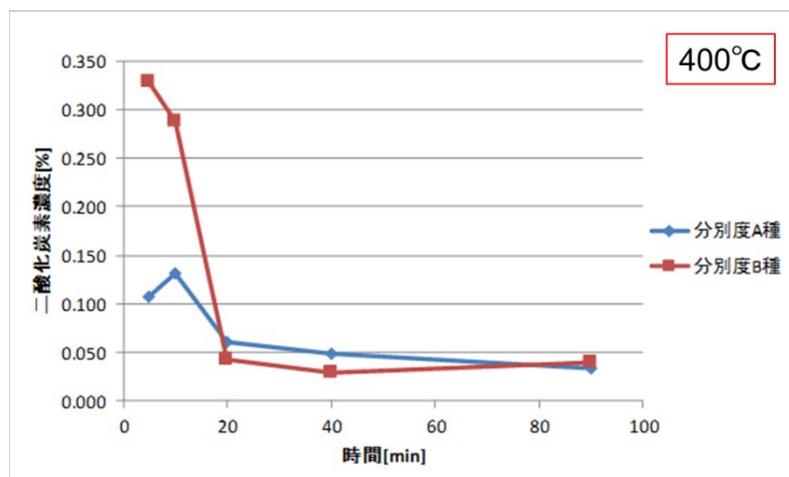


図 4.1.55 強熱試験時におけるるつぼ内の雰囲気の経時変化

2) 木くずの含有が汚濁成分の溶出に及ぼす影響

溶出試験結果を図 4.2.1 と図 4.2.2 に示す。安定型処分場浸透水基準の BOD < 20 mg/L と COD < 40 mg/L を満たさなかった試料は、おがくず 10%以上の混合土と、処理残渣、および有機質土であった。一方で、分別土 A 種、分別土 B 種、分別土砂、かんなくず 3%混合土（実証実験土槽混合土）については基準値を満たした。次に、基準値を満たすか否かの判別を BOD や COD 以外の指標で代替可能であるかを検討するために、比較的簡便な操作で評価可能な DOC、TOC、E260、SS との相関性を調べた。

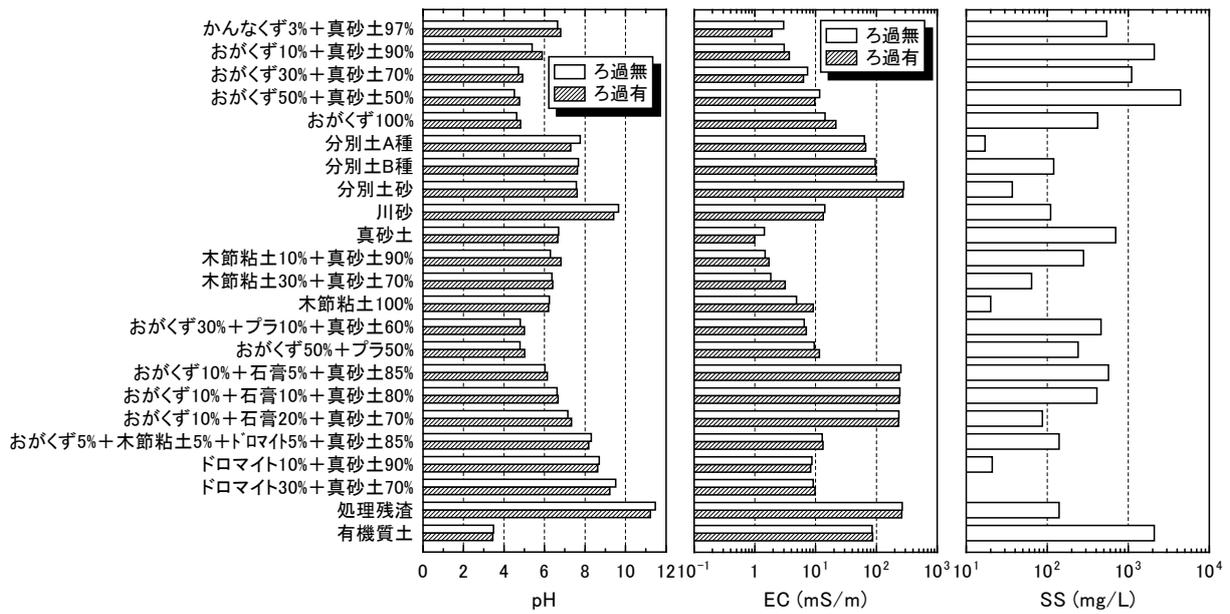


図 4.2.1 溶出液の pH と EC、および SS 濃度

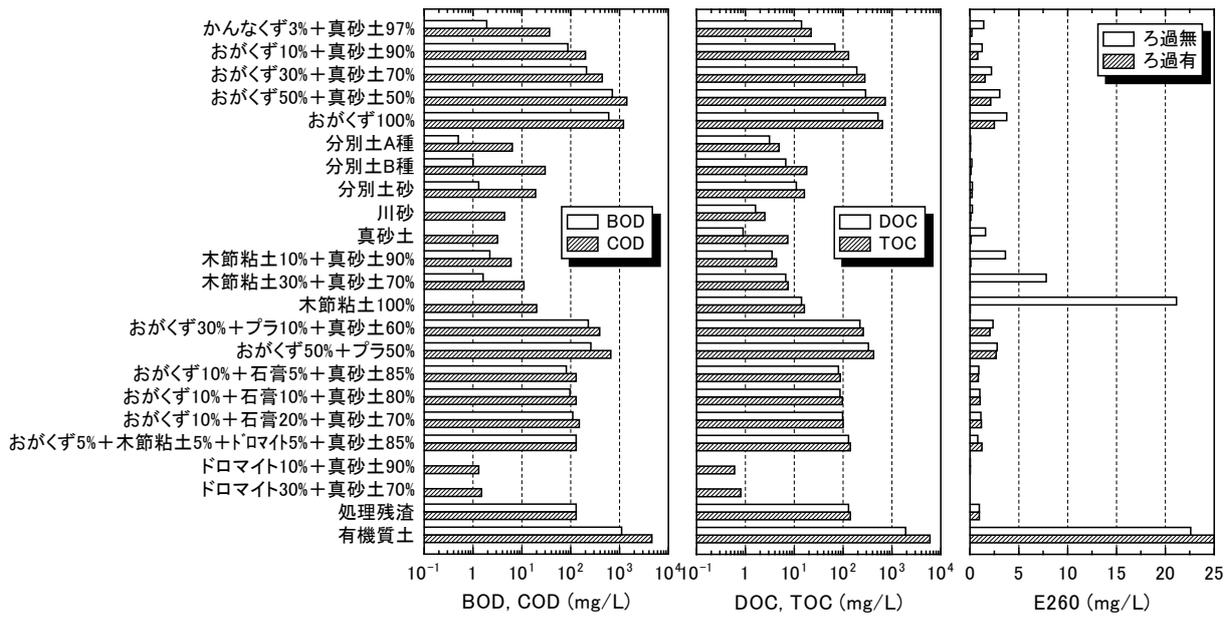


図 4. 2. 2 溶出液の BOD、COD、DOC、TOC および E260

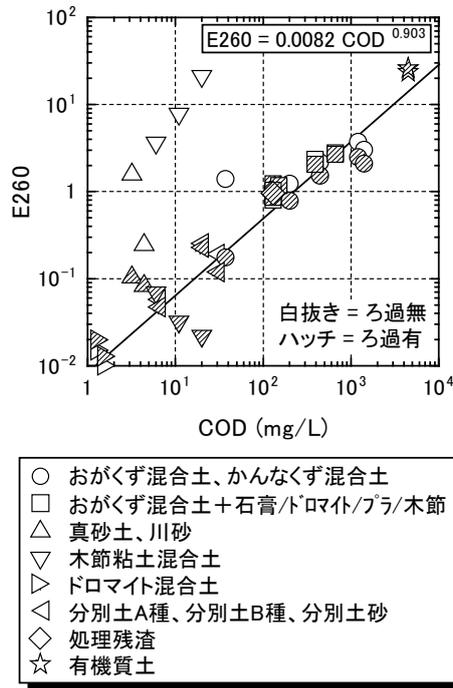


図 4. 2. 3 E260 と COD の関係

図 4. 2. 3 に COD と E260 の関係を示す。白抜きのプロットは溶出液をろ過しないで E260 を測定した場合であり、ハッチのプロットはろ過して E260 を測定した結果を表わす。COD と E260 の関係は概ね右肩上がりの傾向を示すが、真砂土や川砂、木節粘土混合土の溶出液において、特にろ過しない場合においてその傾向から大きく外れる。これは、E260 が有機汚濁成分のみならず浮遊物質にも影響を受けるためだと考えら

れる。溶出液をろ過して浮遊物質を除いた検液の E260 は、有機汚濁成分に支配的に影響を受けると考えられる。したがって、ろ過した検液には COD と E260 に一意的な関係があり、

$$E260 = 0.0082 \cdot \text{COD}^{0.903} \quad (4.2.1)$$

が得られた。ただしこの関係は、おがくず、またはかんなくず混合物や、処理残渣、有機質土に対しては有意な相関であるものの、有機汚濁成分の少ない真砂土や川砂、木節粘土混合物、ドロマイト混合物に対してはこの相関から外れる恐れがある。本研究では、概ね E260 が 0.2 を超える液体に対しては式 4.2.1 から COD を予測できる可能性が示唆された。

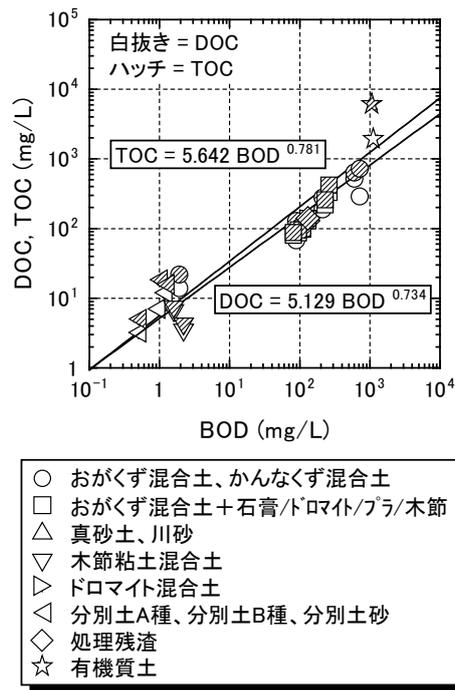


図 4.2.4 DOC、TOC と BOD の関係

図 4.2.4 に DOC、TOC と BOD の関係を示す。おがくず、またはかんなくず混合土、および処理残渣に対しては右肩上がりの直線性が認められ、

$$\text{DOC} = 5.129 \cdot \text{BOD}^{0.734} \quad (4.2.2)$$

$$\text{TOC} = 5.642 \cdot \text{BOD}^{0.781} \quad (4.2.3)$$

の回帰式を得た。しかし、本回帰式においても、有機汚濁成分の少ない真砂土や川砂、木節粘土混合物、ドロマイト混合物に対してはこの相関から外れる恐れがある。また有機質土のように COD に比して BOD が少ない液体 (有機質土 BOD/COD = 0.24) に対しては、測定された DOC または TOC から式 4.2.2 または式 4.2.3 を用いて予測すると BOD を過大に見積もることになるので注意が必要である。これは回帰式を、おがくずやかんなくず混合土 (BOD/COD = 0.34~1)、および処理残渣 (BOD/COD = 1) のように、分解性有機物質質量に対して易分解性有機物質質量の割合が比較的多い場合の溶出試験結果から得ているためである。

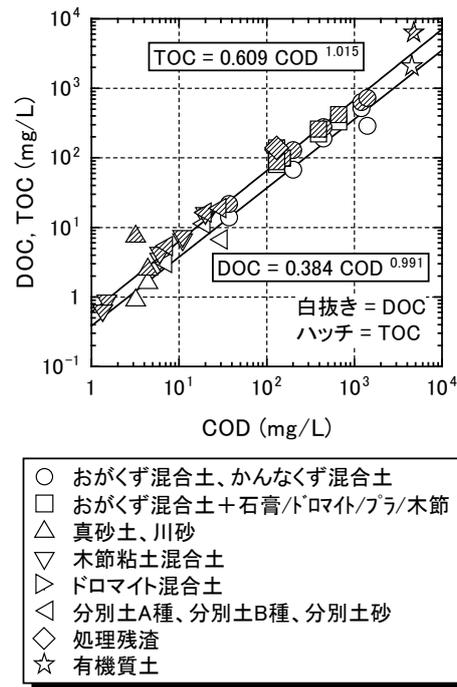


図 4.2.3 DOC、TOC と COD の関係

図 4.2.5 に DOC、TOC と COD の関係を示す。いずれの試料に対しても共通した一意的な関係が認められ、

$$\text{DOC} = 0.384 \cdot \text{COD}^{0.991} \quad (4.2.4)$$

$$\text{TOC} = 0.609 \cdot \text{COD}^{1.015} \quad (4.2.5)$$

の回帰式を得た。これらを用いることで、比較的簡単な試験操作で測定できる DOC や TOC から COD を見積ることができると考えられる。

図 4.2.6 に試料の 2 時間強熱減量値と溶出液の COD の関係を示す。COD と強熱減量の両者に強い相関関係を得るためには、試料中の有機汚濁成分量を適切に測定可能な強熱温度を見出す必要がある。有機汚濁成分の多いおがくずやかんなくず混合土に着目すると、強熱温度が 350～400℃ の範囲では、昇温とともに強熱減量値が増加する（プロットが右の方へシフトする）ので、強熱温度は高い方が望ましいと言える。一方で強熱温度が 450～750℃ の範囲ではおがくずやかんなくず混合土の強熱減量は昇温に対してほぼ不変になる。また有機汚濁成分の少ない真砂土や川砂、木節粘土混合試料、ドロマイト混合試料は強熱温度が 450～750℃ の範囲で昇温とともに強熱減量が増加し始める。これは試料中の鉱物が高温度域において脱炭酸し減量するためだと考えられる。したがって、有機汚濁成分量を強熱減量から評価するためには、有機汚濁成分量と相関の強い強熱温度を 350～400℃ として、その範囲内でより温度を高くするのが望ましいといえる。本研究で実施した試料に関しては、強熱温度 375℃ と 400℃ の場合でプロットに顕著な違いは認められなかったため、より高い相関係数となった 375℃ で

$$\text{COD} = (\text{LOI}_{375}^{120\text{min}})^{1.057} \quad (4.2.6)$$

によって回帰式を得た。ここで、 $\text{LOI}_{375}^{120\text{min}}$  は強熱温度 375℃ : 強熱 120 分間の強熱減量 (%) を示す。この回帰式に従えば、溶出液の COD が所定値を満たす強熱減量を見積もることができ、例えば安定型処分場の浸透水基準となる  $\text{COD} < 40 \text{ mg/L}$  を満たすためには 375℃ : 2 時間強熱減量値 2.74% 以下となる廃棄物が受入条件となる。ただし、図 4.2.6(a) に示すように、本回帰式から外れる実験値もあるため、全実験値を

包絡する回帰式から安全側で評価すると 375℃ : 2 時間強熱減量値 1.0%以下が COD < 40 mg/L を満たす受入条件として見出すことができる。

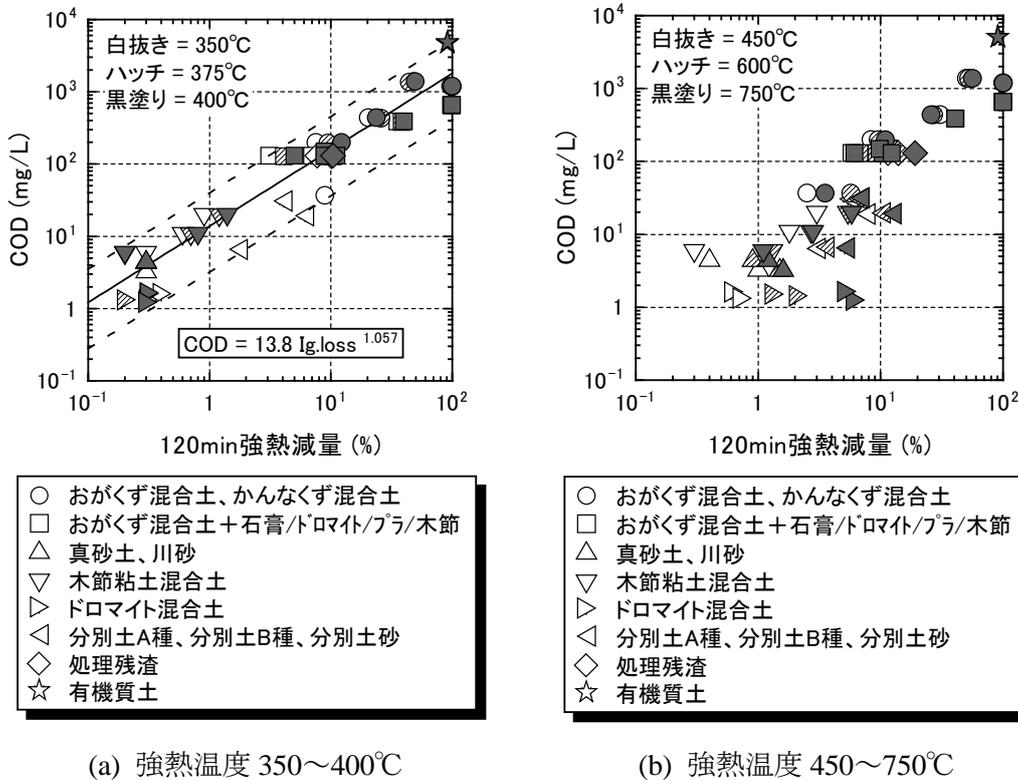


図 4. 2. 6 COD と 2 時間強熱減量の関係

### 3) 木くず等の含有が分解ガス発生に及ぼす影響

#### a 木くずからの有機炭素溶出

木質からの有機炭素溶出濃度測定結果の一例（粒径統一、固液比変化のグラフ）を図 4. 3. 1 に示す。固液比を変化させたときの結果の一例（粒径変化、固液比統一のグラフ）を図 4. 3. 2 に示す。これらのグラフから固液比と粒径および有機炭素溶出量の関係が読み取れる。同じ粒径であれば固液比が大きいほど最終到達濃度が高く、同じ固液比であれば粒径が小さいほど濃度増加速度が大きかった。図 4. 3. 2 を例にとると、040X の系統は 0~50 時間付近で濃度増加速度が最も大きく、100 時間付近から緩やかになり 200 時間以降では、ほぼ増加していないことが見て取れる。30 日後の濃度を用いて、固液比と有機炭素濃度の関係を調べた（図 4. 3. 3）。粒径が異なっても、有機炭素濃度には大きな差がなかった。固液比と有機炭素濃度には相関があり、

$$\text{有機炭素溶出濃度(mg - C/L)} = 14667 \times \text{固液比} \dots\dots\dots (4. 3. 1)$$

である。ただし、振とうして抽出している場合において成り立つことに注意する必要がある。

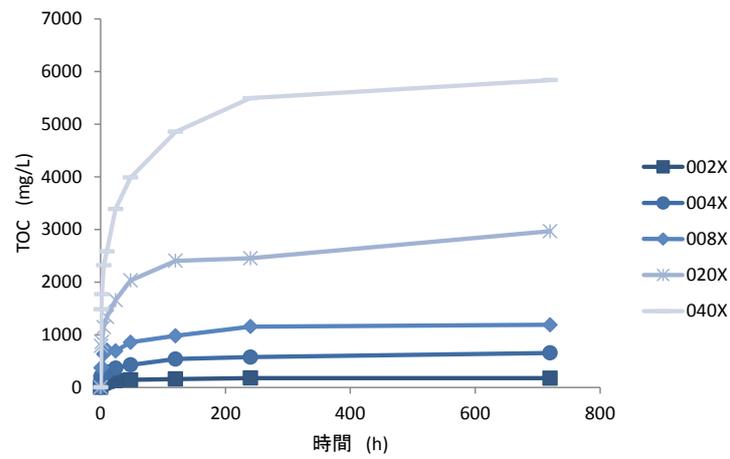


図 4.3.1 粒径 X で固液比を変化させたときの溶出 TOC の経時変化

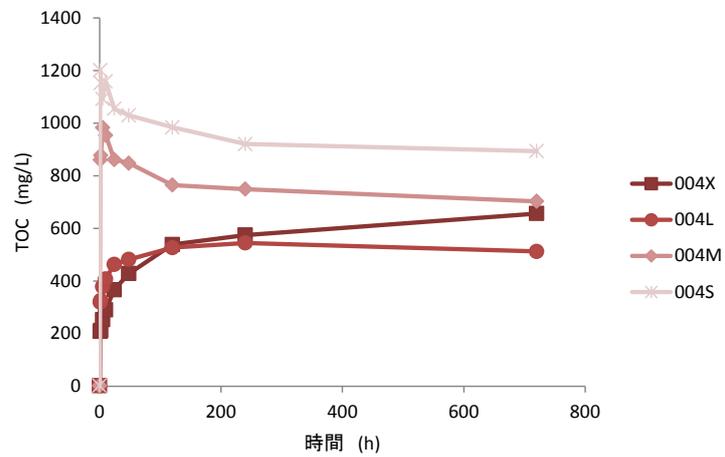


図 4.3.2 Rww0.04 で粒径を変化させたときの溶出 TOC の経時変化

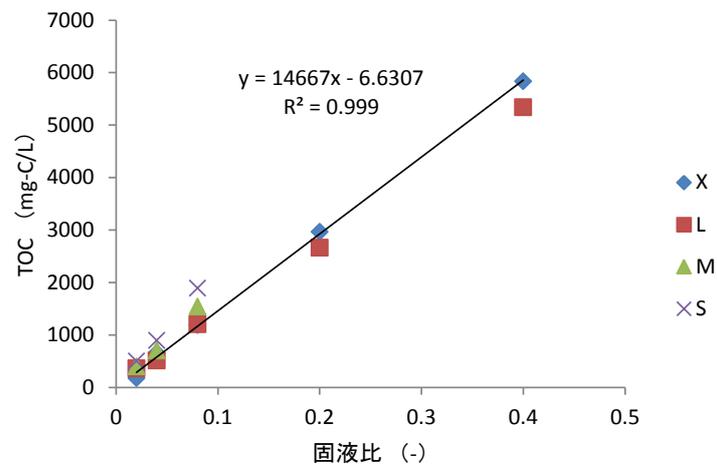


図 4.3.3 30 日後の固液比と有機炭素濃度の関係

前述のように、同じ粒径であれば固液比が大きいほど最終到達濃度が高く、同じ固液比であれば粒径が小さいほど濃度増加速度が大きかった。最終到達濃度と濃度増加速度が、木質の粒径と固液比によって決定されると仮定する。このとき、分別土中の木質と水分で形成される土中の木質粒径および固液比を入力すると、経過時間ごとの分別土間隙水中の有機炭素濃度の時間変化が予測できる。以下では、これら木質の粒径と固液比および経過時間をパラメーターとして、得られる有機炭素濃度を一般化する。

有機炭素の固層から液相への物質移動、すなわち溶出を表現する場合、表面流出と内部拡散溶出の二つの現象を別々に考慮したモデルを構築する。前者は初期に多量に溶出される成分であり、後者は長時間をかけて徐々に溶出する現象である。これらは、図 4.3.1 の 040X に見られる溶出挙動が典型的であり、初期（数 h まで）に見られる短時間の濃度急上昇とそれ以降の穏やかな最終到達濃度への漸近は、表面流出と内部拡散溶出で説明しうる。

まず、表面流出について、分別土中木質である固層表面からの流出可能量の変化がその残存量に比例すると仮定すると、有機炭素の表面流出フラックス  $J_w$  は、

$$J_w = k_w \cdot m_w \cdot \exp(-k_w \cdot t) \cdots \cdots \cdots \text{(式 4.3.2)}$$

$$[\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}) = 1/\text{h} \cdot \text{mg}/\text{cm}^2 \cdot (1/\text{h} \cdot \text{h})]$$

と表現される。ここに  $k_w$  は有機炭素に対する表面流出を表す時定数 (1/h)、 $m_w$  は表面流出可能量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )、 $t$  は時間 (h) である。次に、内部拡散について、浸透説にしたがって有機炭素のフラックス  $J_D$  を求めると、

$$J_D = (D_s/t)^{0.5} \cdot (C_{\text{sat}} - C) \cdots \cdots \cdots \text{(式 4.3.3)}$$

となる。ここで、 $D_s$  は固層の内部拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{h}$ )、 $C_{\text{sat}}$  は、木質内部の有機炭素濃度 ( $\text{mg-C}/\text{cm}^3\text{-水}$ )、 $C$  は液相中の有機炭素濃度 ( $\text{mg-C}/\text{cm}^3\text{-水}$ ) である。

$$J_a = J_w + J_D \cdots \cdots \cdots \text{(式 4.3.4)}$$

となる。式 4.3.4 はフラックスであり、固層の単位面積あたりからの溶出量を示している。累積溶出量を  $M$  ( $\text{mg-C}/\text{cm}^2\text{-木}$ ) とすると、

$$M = \int J_T dt \cdots \cdots \cdots \text{(式 4.3.5)}$$

となる。累積溶出量  $M$  を用いて有機炭素濃度  $C$  を求めると、

$$C = M \cdot R_{ww} \cdot S \cdots \cdots \cdots \text{(式 4.3.6)}$$

$$[\text{mg-C}/\text{cm}^3\text{-水} = \text{mg-C}/\text{cm}^2\text{-木} \cdot \text{g-木}/\text{cm}^3\text{-水} \cdot \text{cm}^2\text{-木}/\text{g-木}]$$

となる。ここで、 $R_{ww}$  は固液比 ( $\text{g-木}/\text{cm}^3\text{-水}$ )、 $S$  は比表面積 ( $\text{cm}^2\text{-木}/\text{g-木}$ ) である。

式 4.3.6 の左辺の  $C$  を求める際に、右辺  $M$  の中に積分形の  $C$  がある。本研究では式 4.3.5 の解析解を求めず、オイラー法で  $\Delta t$  後の  $M$  を求めた。

ここで、求めるパラメーターは  $k_w$ 、 $m_w$ 、 $D_s$ 、 $C_{\text{sat}}$  である。実測濃度と計算濃度の誤差を求め、この誤差を最小化するようなパラメーターを、エクセルのソルバー機能を用いて探索した。まず、抽出 2 時間までで表面流出が完了すると想定し、2 時間までのデータを用いて  $k_w$ 、 $m_w$  を求めた。次に、得られた  $k_w$ 、 $m_w$  を用いて、720 時間までのデータを用いて  $D_s$ 、 $C_{\text{sat}}$  を求めた。得られたパラメーターは、 $k_w = 4 \text{ 1/h}$ 、 $m_w = 0.75 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、 $D_s = 2.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{h}$ 、 $C_{\text{sat}} = 164 \text{ mg-C}/\text{cm}^3\text{-水}$  である。求めたパラメーターを用いた、実測濃度に対する計算濃度のカーブフィッティングの結果を図 4.3.4 に示す。以上のように木質の粒径と固液比を与えたときの、経過時間ごとの溶出有機炭素濃度を予測できるモデルを構築した。固液比ごとのシミュレーション結果を図 4.3.5 に示す。

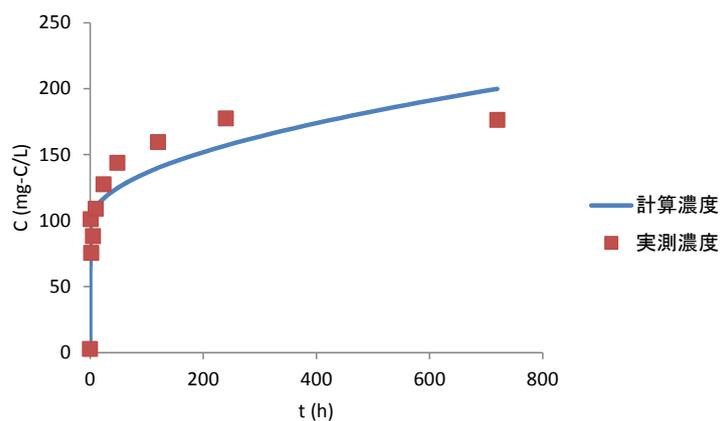


図 4.3.4 実測—計算濃度のフィッティング

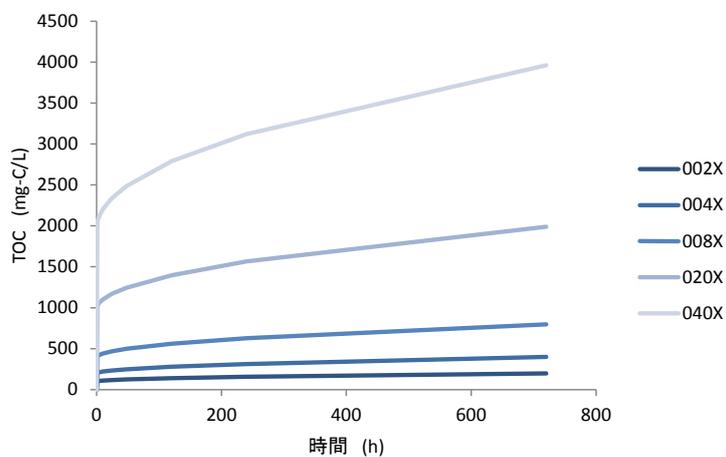


図 4.3.5 経過時間と TOC 濃度シミュレーション結果

## b 嫌氣的雰囲気形成

酸素消費速度の測定の一例として、抽出ろ液（35℃、TOC 濃度 367 mg-C/L）の圧力経時変化を図 4.3.6 に示す。圧力が減少していることから、微生物が酸素消費していることが分かる。抽出ろ液の酸素消費速度においては、有機炭素濃度が高いほど、微生物による酸素消費速度も大きかった。粉碎木質の酸素消費速度においては、粉碎木質が大きくかつ木質量が多いほど微生物による酸素を消費する速度も大きかった。どちらにおいても温度による速度の差は見られなかった。

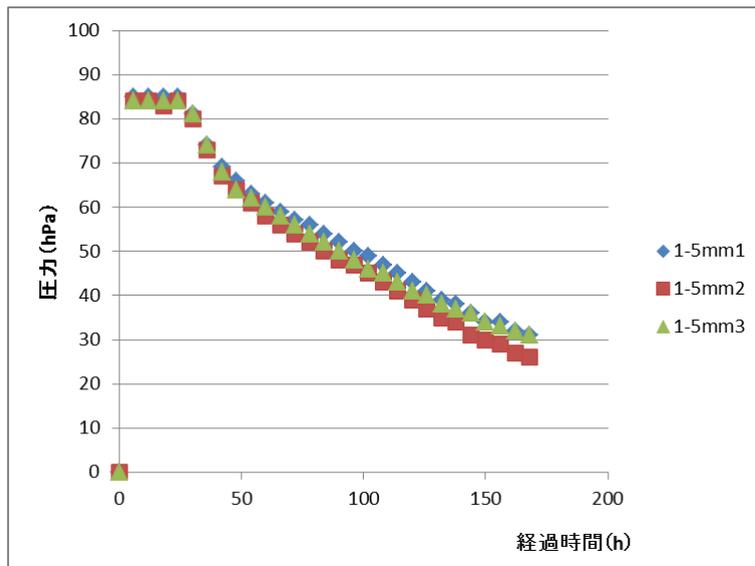


図 4.3.6 圧力の経時変化の一例

図 4.3.7 に木くず抽出ろ液の初期 TOC と酸素消費速度の近似式を示す。正の相関があることから、TOC を与えれば、酸素消費速度が予測できる。

$$y = 1.35 \times 10^{-4}x + 3.56 \times 10^{-3} \dots\dots\dots \text{(式 4.3.7)}$$

ここで、 $x$  : TOC[mg-C/L]、 $y$  : 酸素消費速度  $R_{O_2}$  [mmol- $O_2$ /(L · h)]である。

酸素侵入深さは、外気の酸素が地層内へ移流・拡散進入し、好氣的分解によって酸素が消費されて酸素量が0となるまでの距離(ここまで好気ゾーン)であり、それ以深が嫌気ゾーンとなる。酸素侵入深さ  $L$  [m] は、酸素消費速度などから計算できる<sup>6)</sup>。

$$L = (0.42/\beta)^{0.5} \dots\dots\dots \text{(式 4.3.8)}$$

ただし、

$$\beta = (\xi/\epsilon) \cdot (RT/P) \cdot (1/D_{ki} + 0.21/D_{12} + 0.79/D_{13}) \cdot (-R_1) \dots\dots \text{(式 4.3.9)}$$

ここで、 $-R_1$  : 酸素消費速度 [mol/( $m^3 \cdot s$ )]、下添え字 1:  $O_2$ 、2:  $CO_2$ 、3:  $N_2+Ar$ 、 $D_{ij}$  : 2成分分子拡散係数 [ $m^2/s$ ]、 $D_{ki}$  : クヌーセン拡散係数、 $P$  : 全圧 [Pa]、 $R$  : 気体定数= 8.314 [ $m^3 \cdot Pa/(mol \cdot K)$ ]、 $T$  : 温度 [K]である。

以上から、初期 TOC と酸素進入深さの関係を算出できる。この結果から、嫌気ゾーン形成を回避するための、初期 TOC を与えたときの許容分別土堆積厚さ、または、希望分別土堆積厚さを与えたときの許容初期 TOC が提案できる。

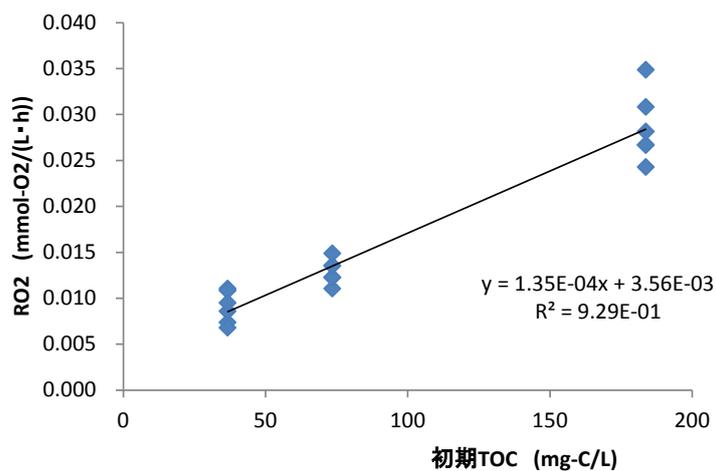


図 4.3.7 初期 TOC と酸素消費速度の関係

#### c 木くず抽出有機炭素溶液からのガス発生

木質抽出ろ液のガス発生強度測定におけるメタンガス濃度の測定結果例を図 4.3.8 (3 系統測定した内の中央値) に示す。なお、以下のグラフは 3 系統測定した値をそれぞれ直線で結んだ。そのため、1 系統目を①、2 系統目を②、3 系統目を③とした。なお、原液の TOC は 2300 mg-C/L であった。

すべての試料において、0 日目および 7 日目は定量下限値である 0.01% 以下のメタンガスしか発生しなかったが、それ以降はそれぞれ変化が見られた。しかし、本研究で基準とした許容濃度上限値である 1% のメタンガスはどの試料からも発生しなかった。木質抽出ろ液のガス発生強度測定における水素ガス濃度および硫化水素濃度の測定結果 (3 系統測定した内の中央値) を、それぞれ表 4.3.1 および表 4.3.2 に示す。

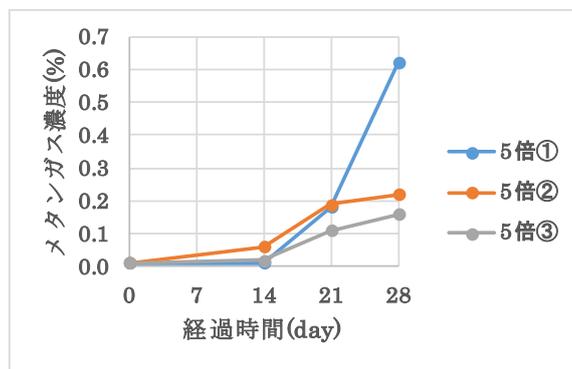


図 4.3.8 5 倍希釈試料のメタンガス濃度

表 4.3.1 木質抽出ろ液における各試料の水素ガス発生強度 (%)

| 経過時間<br>サンプル名 | 0    | 7    | 14   | 21   | 28   |
|---------------|------|------|------|------|------|
| 原液(1倍)        | 0.01 | 2.57 | 4.02 | 3.03 | 2.08 |
| 2倍            | 0.01 | 1.36 | 2.44 | 1.45 | 1.86 |
| 5倍            | 0.01 | 0.58 | 1.15 | 0.39 | 0.17 |
| 10倍           | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 20倍           | 0.01 | 0.01 | 0.66 | 2.94 | 0.41 |
| 50倍           | 0.01 | 0.01 | 0.23 | 1.74 | 0.35 |
| 100倍          | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 1.60 | 0.01 |
| 純水(0倍)        | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.51 | 0.01 |

※定量下限値は0.01%とする。

表 4.3.2 木質抽出液における各試料の硫化水素はッ製強度

| 経過時間<br>サンプル名 | 0  | 7   | 14   | 21  | 28   |
|---------------|----|-----|------|-----|------|
| 原液(1倍)        | 10 | 440 | 620  | 300 | 930  |
| 2倍            | 10 | 300 | 1340 | 210 | 1060 |
| 5倍            | 10 | 220 | 1160 | 160 | 640  |
| 10倍           | 10 | 180 | 960  | 160 | 340  |
| 20倍           | 10 | 160 | 270  | 260 | 380  |
| 50倍           | 10 | 130 | 280  | 510 | 160  |
| 100倍          | 10 | 120 | 220  | 470 | 160  |
| 純水(0倍)        | 10 | 10  | 10   | 10  | 10   |

※定量下限値は10 ppmとする。

木質抽出液における全有機炭素（TOC）と各ガス発生量の関係性を探ることにより、ガス発生強度の評価を行う。TOCについては0日目に測定した値（以下、初期TOCとする）、ガス発生量については28日目に測定した値を用いてグラフを作成した。図4.3.9に初期TOCとメタンガス発生濃度の関係を示す。ただし、初期TOC値230 mg-C/Lの試料については他と値が大きく外れている部分があったため除外してグラフを作成した。なお、値に関しては3系統測定した内の中央値を用いた。

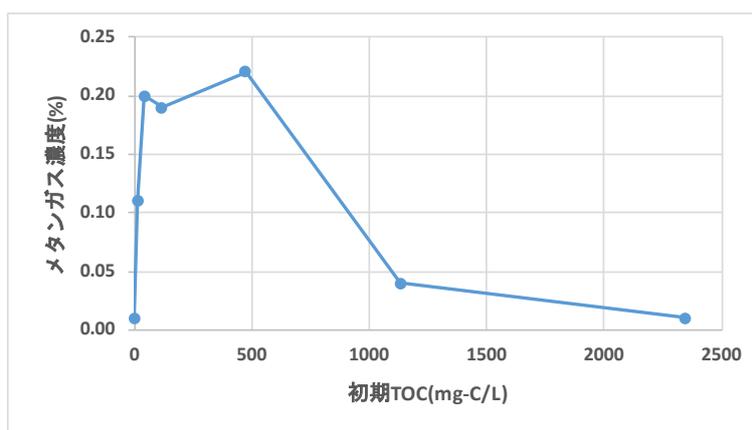


図 4.3.9 初期 TOC とメタンガス発生強度

(外れ値：初期 TOC 値=230 mg-C/L、メタンガス濃度 0.18%)

メタンガスについては、最初の3点（初期 TOC 値 0～41 mg-C/L まで）は相関関係が見られ、その後一度

メタンガス濃度が頭打ちとなり、初期 TOC 値 472 mg-C/L 以降は値が減少する結果となった。初期 TOC 値が高くなれば高くなるほど高濃度のメタンガスが発生すると想定していたため、当初の見通しとは異なる結果となった。以下に、メタンガス濃度が想定通りに上昇しなかった理由を考察する。まず、値が一度頭打ちとなった理由として、微生物の数に制限があったことが挙げられる。有機炭素量が増えたとしても、それを分解する微生物の数に限りがあったため、思うようにメタンガスが発生しなかったと考えられる。次に、初期 TOC 値 472 mg-C/L 以降に値が大きく減少していった理由として、木質に抗菌作用および殺菌作用があったことが考えられる。有機炭素量が多すぎる（TOC 値が高すぎる）と、木質の抗菌作用および殺菌作用により、微生物の活動が弱まったのではないかと考えられる。

#### d 分別土など実試料からのガス発生

分別土等の基礎物性、分別土等のガス発生強度の一覧をそれぞれ、表 4.3.3、表 4.3.4 に示す。35℃での分別土等の酸素消費速度測定における各試料の圧力の経時変化の一例を図 4.3.10 に示す。各試料は 3 系統とも温度変化によって圧力が一度上がった後に、一定の圧力変化が起きている。はじめに圧力が上がる理由は、温度が低温（準備時の室温）から高温（インキュベーター内の温度）に変化したことで起きた容器内空気圧および水の蒸気圧の上昇によるものである。

表 4.3.3 分別土等の基礎物性一覧

| 試料名    | 試料詳細              | 含水率<br>% | 湿潤密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 乾燥密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 強熱減量<br>% | 真密度<br>g/cm <sup>3</sup> | TOC<br>% | C<br>% | N<br>% | H<br>% |
|--------|-------------------|----------|---------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|----------|--------|--------|--------|
| SSA    | 分別土 A 種           | 7.0      | 1.81                      | 1.18                      | 3.9       | 2.650                    | 1.08     | 1.2    | 0.1    | 0.4    |
| SSB    | 分別土 B 種           | 13.2     | 1.73                      | 1.5                       | 6.8       | 2.647                    | 2.63     | 2.6    | 0.1    | 0.6    |
| SSC    | 分別土砂              | 22.2     | 2.00                      | 1.56                      | 8.6       | 2.552                    | 2.91     | 3.0    | 0.1    | 0.8    |
| CDW    | 処理残さ              | 6.5      | 1.35                      | 1.26                      | 10.8      | 2.667                    | 2.54     | 6.2    | 0.2    | 1.0    |
| RVS    | 川砂                | 1.4      | 1.72                      | 1.72                      | 1.1       | 2.728                    | 0.00     | 0.2    | 0.0    | 0.1    |
| IMS    | 茨城まさ土             | 0.9      | 1.90                      | 1.89                      | 1.1       | 2.613                    | 0.02     | 0.0    | 0.0    | 0.2    |
| KBC    | 木節粘土              | 2.4      | 1.53                      | 1.49                      | 4.9       | 2.598                    | 0.37     | 0.4    | 0.0    | 0.8    |
| KBCM10 | 木節 10<br>+まさ 90   | 1.3      | 1.90                      | 1.88                      | 1.8       | 2.648                    | 0.05     | 0.1    | 0.0    | 0.3    |
| KBCM30 | 木節 30<br>+まさ 70   | 1.4      | 1.84                      | 1.82                      | 2.6       | 2.626                    | 0.12     | 0.1    | 0.0    | 0.3    |
| DLMM10 | ドロマイト<br>10+まさ 90 | 0.9      | 2.05                      | 2.04                      | 1.4       | 2.665                    | 0.00     | 1.2    | 0.0    | 0.2    |
| DLMM30 | ドロ 30<br>+まさ 70   | 0.7      | 2.13                      | 2.12                      | 1.6       | 2.693                    | 0.00     | 3.8    | 0.0    | 0.2    |
| PWD    | 実証実験土<br>槽木くず     | 12.5     | 0.24                      | 0.21                      | 99.7      | 1.501                    | 50.02    | 49.0   | 0.1    | 6.2    |
| PWDS3  | 実証実験土<br>槽混合土     | 7.0      | 1.54                      | 1.43                      | 3.9       | 2.552                    | 0.85     | 1.2    | 0.0    | 0.3    |
| SWD    | おがくず              | 9.0      | 0.34                      | 0.31                      | 99.7      | 1.480                    | 50.97    | 48.8   | 0.0    | 6.3    |
| SWDM10 | おが 10<br>+まさ 90   | 1.7      | 1.33                      | 1.33                      | 22.4      | 2.440                    | 5.77     | 3.2    | 0.0    | 0.6    |
| SWDM30 | おが 30<br>+まさ 70   | 3.6      | 0.89                      | 0.86                      | 27.3      | 2.180                    | 11.34    | 11.5   | 0.0    | 1.6    |
| SWDM50 | おが 50<br>+まさ 50   | 6.0      | 0.56                      | 0.52                      | 46.3      | 1.900                    | 28.61    | 23.8   | 0.1    | 3.0    |

表 4.3.4 分別土等のガス発生強度一覧

| 試料名    | 試料詳細              | 酸素消費速度                      | メタン最終濃度 | メタン発生速度  | 水素最終濃度 | 水素発生速度   | 硫化水素最終濃度 | 硫化水素発生速度 |
|--------|-------------------|-----------------------------|---------|----------|--------|----------|----------|----------|
|        |                   | mmol-O <sub>2</sub> /(h·kg) | vol%    | ppmv/day | vol%   | ppmv/day | ppmv     | ppmv/day |
| SSA    | 分別土A種             | 0.093                       | 0.01    | 3.57     | 0.45   | 142.9    | 10       | 0.36     |
| SSB    | 分別土B種             | 0.057                       | 0.01    | 0.00     | 0.21   | 75.0     | 10       | 0.36     |
| SSC    | 分別土砂              | 0.125                       | 0.01    | 3.57     | 0.20   | 64.3     | 10       | 0.36     |
| CDW    | 処理残さ              | 0.029                       | 0.01    | 3.57     | 0.24   | 71.4     | 10       | 0.36     |
| RVS    | 川砂                | 0.006                       | 0.01    | 0.00     | 0.09   | 46.4     | 10       | 0.36     |
| IMS    | 茨城まさ土             | 0.000                       | 0.01    | 3.57     | 0.01   | 3.6      | 10       | 0.36     |
| KBC    | 木節粘土              | 0.022                       | 0.01    | 3.57     | 0.01   | 3.6      | 10       | 0.36     |
| KBCM10 | 木節 10<br>+まさ 90   | 0.030                       | 0.01    | 3.57     | 0.01   | 3.6      | 10       | 0.36     |
| KBCM30 | 木節 30<br>+まさ 70   | 0.034                       | 0.01    | 3.57     | 0.01   | 3.6      | 10       | 0.36     |
| DLMM10 | ドロマイト<br>10+まさ 90 | 0.009                       | 0.01    | 3.57     | 0.01   | 3.6      | 10       | 0.36     |
| DLMM30 | ドロ 30<br>+まさ 70   | 0.021                       | 0.01    | 3.57     | 0.01   | 3.6      | 10       | 0.36     |
| PWD    | 実証実験土<br>槽木くず     | 1.740                       | 0.01    | 0.00     | 1.20   | 414.3    | 1.4      | 5.00     |
| PWDS3  | 実証実験土<br>槽混合土     | 0.013                       | 0.07    | 28.57    | 0.01   | 3.6      | 10       | 0.36     |
| SWD    | おがくず              | 2.598                       | 0.01    | 3.57     | 1.05   | 246.4    | 180      | 6.43     |
| SWDM10 | おが 10<br>+まさ 90   | 0.101                       | 0.01    | 3.57     | 0.10   | 35.7     | 10       | 0.36     |
| SWDM30 | おが 30<br>+まさ 70   | 0.392                       | 0.01    | 3.57     | 0.04   | 21.4     | 10       | 0.36     |
| SWDM50 | おが 50<br>+まさ 50   | 1.248                       | 0.01    | 3.57     | 0.49   | 3.6      | 10       | 0.36     |

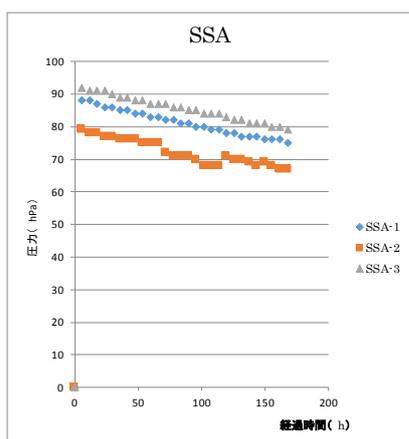


図 4.3.10 圧力の経時変化 (サンプル : SSA)

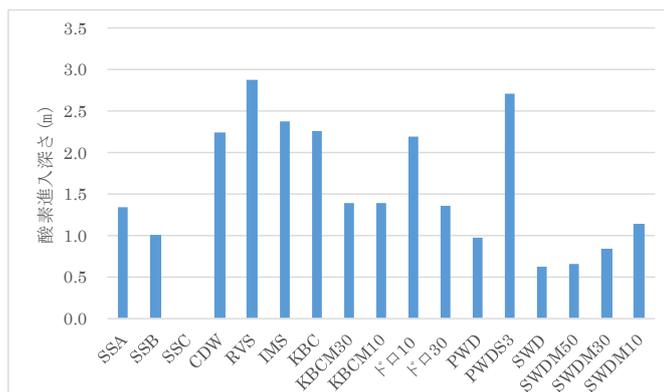


図 4.3.11 試料毎の酸素侵入深さ

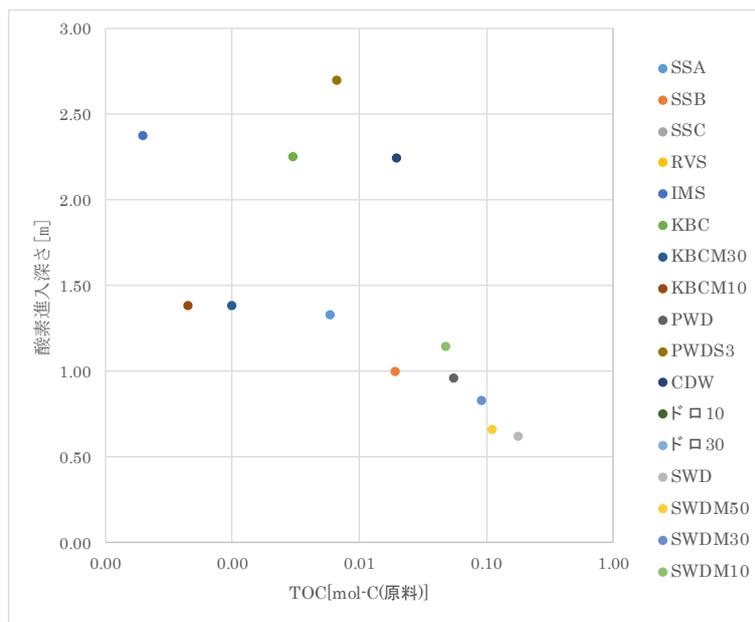


図 4.3.12 分別土等の TOC と酸素侵入深さの関係

圧力経時変化から酸素消費速度に換算した。さらに、酸素消費速度、含水率、透気係数、空隙率等を用いて酸素侵入深さを計算した。酸素消費速度から算出した酸素侵入深さを図 4.3.11 に、試料の固体 TOC と酸素進入深さを比較したものを図 4.3.12 に示す。図 4.3.11 において、SSC の酸素侵入深さが計算できないのは、試料そのものの含水率が大きく空隙率が極端に小さくなったためである。図 4.3.12 において、TOC が大きいものほど酸素進入深さが小さい傾向がみられる。有機炭素濃度が大きいほど好気性菌の活動は活発であるから、酸素消費速度が大きくなったためであると考えられる。分別土等の酸素消費速度においては、木くずやおがくずを含む試料が他の試料より比較的大きかった。

分別土等の測定 28 日目のメタンガスの最終濃度を図 4.3.13 に示す。本研究で基準とした許容濃度上限値である 1% のメタンガスはどの試料からも発生しなかった。PWDS3 は 0.08% まで発生したが、それ以外の試料からは発生しなかった。

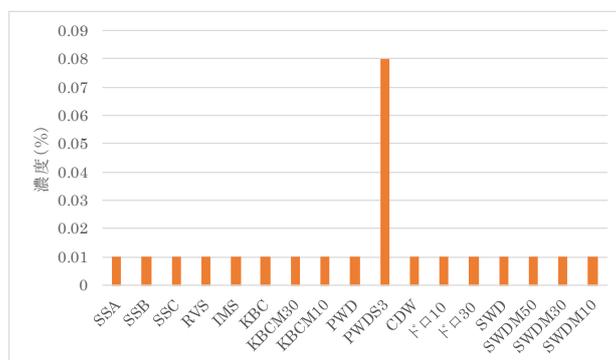


図 4.3.13 メタンガス最終濃度 (28 日目)

#### e 堆積した分別土等の強熱減量と酸素侵入深さ・メタンガス濃度の関係

以上の結果を用いて、仮置き時や地盤利用を想定し、分別土等を堆積した場合の強熱減量と酸素侵入深

さおよびメタンガス濃度の関係を考察する。

分別土として分別土 A 種を想定する。真密度  $2.65 \text{ g/cm}^3$ 、見かけ密度  $1.18 \text{ g/cm}^3$ 、空隙率  $0.55 \text{ m}^3$ -空間/ $\text{m}^3$ -見かけ体積、強熱減量  $3.9\%$ である。重力脱水時の体積含水率を測定してないので、 $0.3 \text{ m}^3$ -水/ $\text{m}^3$ -見かけ体積と仮定する。この分別土に、木くず（真密度  $1.50 \text{ g/m}^3$ 、強熱減量  $99.7\%$ ）を添加し、強熱減量値を変化させる。

分別土の強熱減量と酸素侵入深さ・メタンガス濃度の関係を表 4.3.5 に示す。まず、木くずの重量割合を変化させ、増加する強熱減量を計算した。次に、木くずと水量の比（固液比）から、TOC を算出した（式 4.3.1）。また、TOC から酸素消費速度（式 4.3.7）、酸素進入深さ（式 4.3.8）を計算した。得られた酸素進入深さから、例えば分別土を  $2 \text{ m}$  堆積した場合に嫌気ゾーンが生じるかどうか判定した。最後に、不完全ではあるものの、TOC とメタンガス発生濃度の関係（図 4.3.9）を用いてメタンガス濃度を予測した。強熱減量と TOC および酸素消費速度の関係を図 4.3.14 に、強熱減量と酸素進入深さおよびメタンガス濃度の関係を図 4.3.15 に示す。強熱減量とメタンガス濃度の関係が明確でないものの、木くず重量割合  $1\%$ 、つまり強熱減量  $5\%$  弱の場合は、 $2 \text{ m}$  堆積しても嫌気ゾーンは生じない。

表 4.3.5 分別土の強熱減量と酸素侵入深さ・メタンガス濃度の関係

| 木くず重量割合<br>w% | 強熱減量<br>% | TOC<br>mg-C/L | 酸素消費速度<br>mmol-O <sub>2</sub> /(L·h) | 酸素進入深さ<br>m | 2m 積み | メタンガス<br>vol% |
|---------------|-----------|---------------|--------------------------------------|-------------|-------|---------------|
| 0.1           | 4.0       | 59            | 0.01                                 | 5.52        | 好気    | 0.2           |
| 0.2           | 4.1       | 118           | 0.02                                 | 4.24        | 好気    | 0.2           |
| 0.5           | 4.3       | 295           | 0.04                                 | 2.84        | 好気    | 0.2           |
| 1             | 4.8       | 593           | 0.08                                 | 2.05        | 好気    | 0.2           |
| 2             | 5.8       | 1197          | 0.17                                 | 1.46        | 嫌気    | 0.05          |
| 5             | 8.7       | 3088          | 0.42                                 | 0.91        | 嫌気    | 0.05          |
| 10            | 13.5      | 6519          | 0.88                                 | 0.63        | 嫌気    | 0.05          |

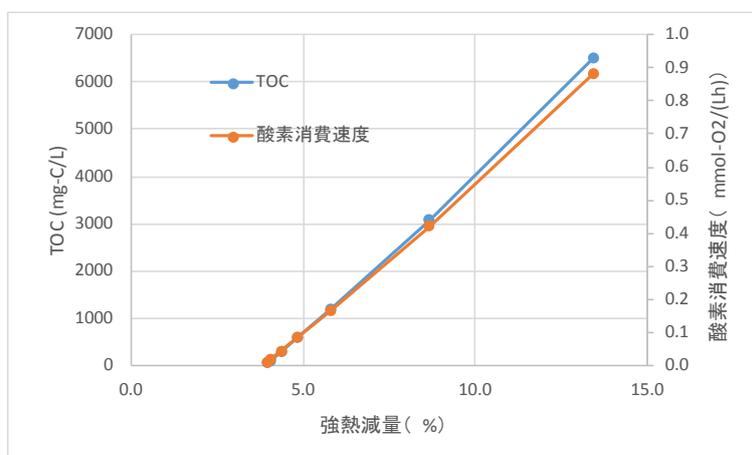


図 4.3.14 強熱減量と TOC および酸素消費速度の関係

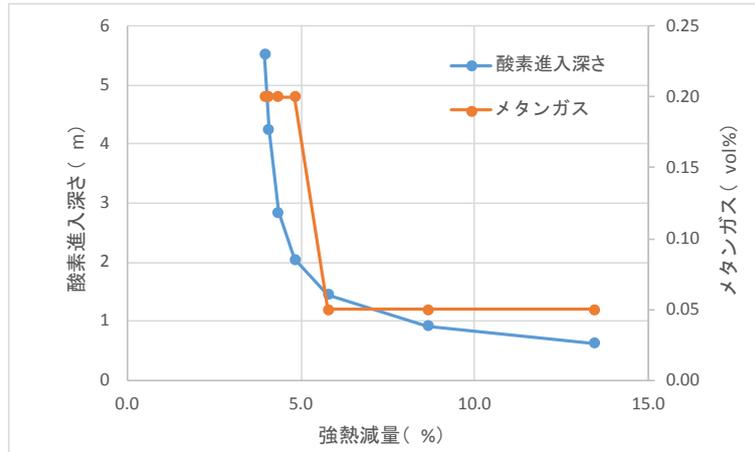


図 4.3.15 強熱減量と酸素侵入深さおよびメタンガス濃度の関係

#### 4) 発火危険性に関する熱分析

##### a TG-DTA 測定結果

試料の基本的な熱的性状を明らかにするため、提供されたすべての試料について測定を行った。試料は、一定条件（20℃程度）で保管、調整後、試験に供した。図 4.4.1、4.4.2 は分別土 A 種、B 種の測定結果の一例である。

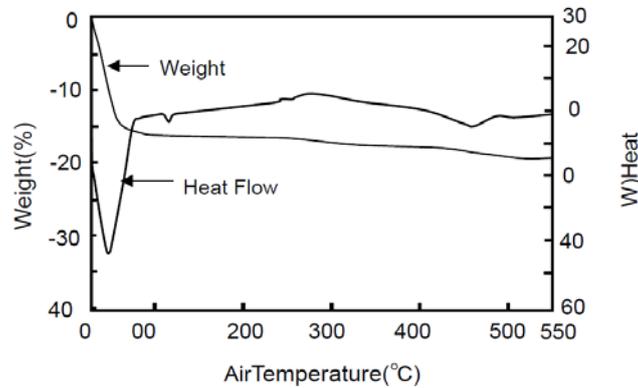


図 4.4.1 TG-DTA 測定結果 (分別土 A 種)

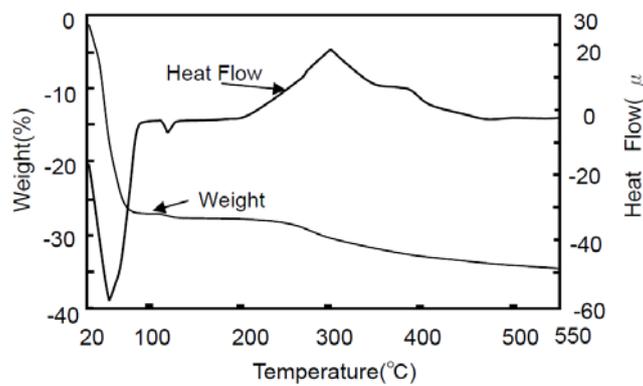


図 4.4.2 TG-DTA 測定結果 (分別土 B 種)

表 4.4.1 に TG、DTA の測定結果（100℃まで及び 480℃までの減量率）を示す。減量率のうち、前者は、試料中の水分、後者は、可燃性成分量に相当する。

表 4.4.1 TG、DTA 測定結果（単位：重量%）

|                    | 100℃までの減量率 | 480℃までの減量率 |
|--------------------|------------|------------|
| 分別土 A              | 16.0       | 3.24       |
| 分別土 B              | 27.3       | 6.67       |
| 真砂土 100%           | 0.74       | 1.06       |
| 真砂土 90% + おがくず 10% | 1.15       | 9.22       |
| 真砂土 70% + おがくず 30% | 2.39       | 27.12      |
| 真砂土 50% + おがくず 50% | 3.87       | 44.76      |
| おがくず 100%          | 7.38       | 88.16      |

300℃付近で発熱が観測されている。また、試料の重量減少も見られる。従って、この温度付近で発熱発火して燃焼があったと考えられる。RDF 等の再生資源燃料の発熱量（g 当り、W オーダー ～ 数10.mW）<sup>2)</sup> に比べて今回の試料は発熱量（マイクロオーダー）が極めて小さく、自然発火の可能性は再生資源燃料に比べて小さい。TG の結果から、おがくずは可燃物が多いため、重量減少も大きい（表 4.4.1）。他方、水を 20% 添加した場合には、発熱量はやや大きくなったが、それでも、再生資源燃料に比べて発熱量は小さい。窒素雰囲気での測定（嫌気状態）では、再生資源燃料に比べて発熱量がやや小さい。

#### b C80 測定結果

C80 は、DTA、DSC よりも数 10～100 倍の高感度であり、室温付近での発酵等による微小発熱を検知することが可能である。また、高圧試料容器を使うため、含水分の蒸発を抑えることで、蒸発に伴う吸熱を避けて、発熱現象を明らかにすることが可能である。発酵発熱の場合、水分が存在する方が発酵は進み、発熱が大きくなることが判っている。そこで、試料に水 20%（wt）添加して、同様の実験を行った。また、参考のために著者が過去に行った RDF の結果<sup>2)</sup>を同表に載せた（表 4.4.2）。

表 4.4.2 C80 測定結果：発熱量（おがくず 30%+まさ土 70%）

|           | 条件  |           |
|-----------|-----|-----------|
| 試料そのまま    | 空气中 | 発熱検出できず   |
| 試料+水 20%  | 空气中 | 0.569 J/g |
| 試料+水 20%  | 窒素中 | 0.536 J/g |
| 参考 RDF    | 空气中 | 19.5 J/g  |
| RDF+水 20% | 空气中 | 14.4 J/g  |

図 4.4.3 は木節粘土及び木節粘土+水の C80 データを示す。水の添加でやや発熱が見られる。しかしながら、RDF 等に比べると極めて小さい発熱で、このような発熱量では、内部温度の上昇に導くことは難しい。堆積物表面から放射、対流によって放熱がなされるが、発熱量に比べて大きな値となっている。C80 は、微小発熱測定装置として広く使われているが、木節粘土を含め多くの試料で提供試料そのままでは、その測定限界以下の発熱量である場合が多かった。そのため、より高感度な MS80 も使用した。

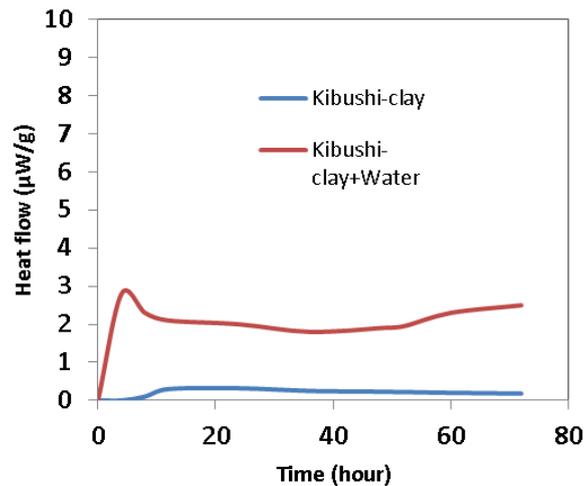


図 4.4.3 C80 測定結果（木節粘土）

#### c MS80 測定結果

図 4.4.4 は、おがくずの MS80 のデータである。80℃付近までほとんど発熱が見られない。著者らが過去に行った木材チップ等では大きな発熱が見られたが、今回の試料では C80、MS80 共にこの温度領域では発熱が見られず、同じ木材由来品といえども大きな違いがあることが判る。95℃付近での発熱後、100℃以上で吸熱が見られる。この吸熱は、水の蒸発がある程度あったとも考えられる（1520 hPa で水の沸点は 110℃）。

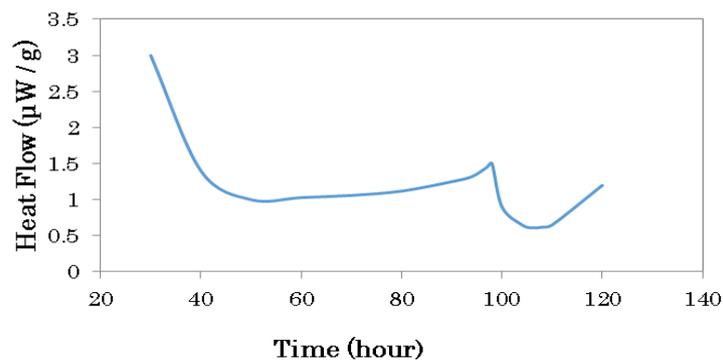


図 4.4.4 MS80 測定結果（おがくず 100%+水添加）

#### e TAM 測定結果

今回測定した物質は、発熱量が相対的に低いことが判る。水の添加で発熱量は増加している。水の添加によって、化学反応（例えば、酸塩基反応）や水合が起こる可能性もあり、その発熱が観測される。発酵発熱は、時間がある程度経過後に起こる場合が多い。これらの判断は、発熱状況から判断可能である。TAM は、C80 よりも更に高感度の測定装置であるため、一定の発熱量が確認できる場合もあった（図 4.4.5～4.4.6、表 4.4.3）。表 4.4.3 は、分別土、おがくず及び（真砂土 + おがくず）の測定結果である。おがくずは分別土と比較しても大差ない危険性であることが判る。

表 4. 4. 3 TAM 測定結果 (発熱量: J/g)

|                                | 0~24 時間 | 24~72 時間 | 0~72 時間 |
|--------------------------------|---------|----------|---------|
| 分別土                            | 0.305   | 0.487    | 0.792   |
| 分別土 A+水 20%                    | 5.557   | 5.990    | 11.547  |
| 分別土 A+水 20% (窒素中)              | 1.330   | 1.397    | 2.727   |
| 真砂土 70% + おがくず 30%+水 20%       | 0.932   | 1.047    | 1.980   |
| 真砂土 50% + おがくず 50%             | 1.813   | 1.881    | 3.670   |
| 真砂土 50% + おがくず 50%+水 20%       | 2.929   | 2.279    | 5.210   |
| 真砂土 50% + おがくず 30%+水 20% (窒素中) | 1.614   | 0.553    | 2.170   |
| おがくず                           | 0.864   | 1.049    | 1.910   |
| おがくず+水 20%                     | 5.076   | 2.534    | 7.610   |
| おがくず+水 20% (窒素中)               | 4.869   | 1.343    | 6.210   |

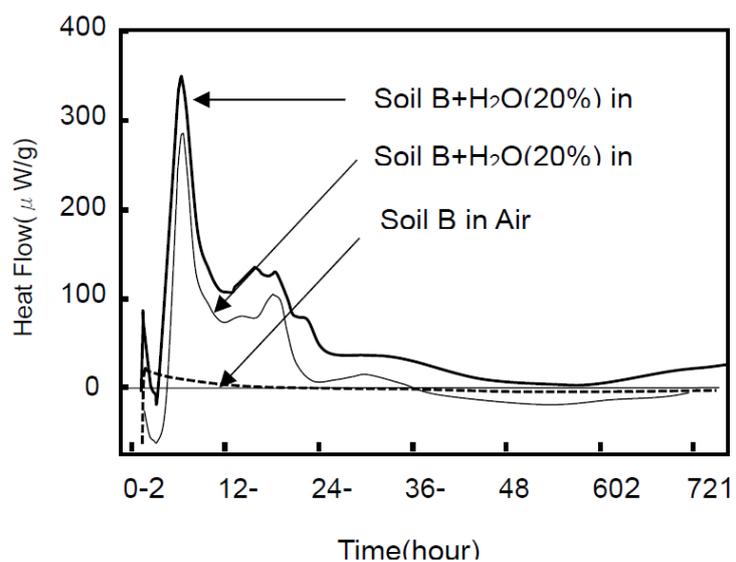


図 4. 4. 5 分別土 B 種の TAM 測定結果

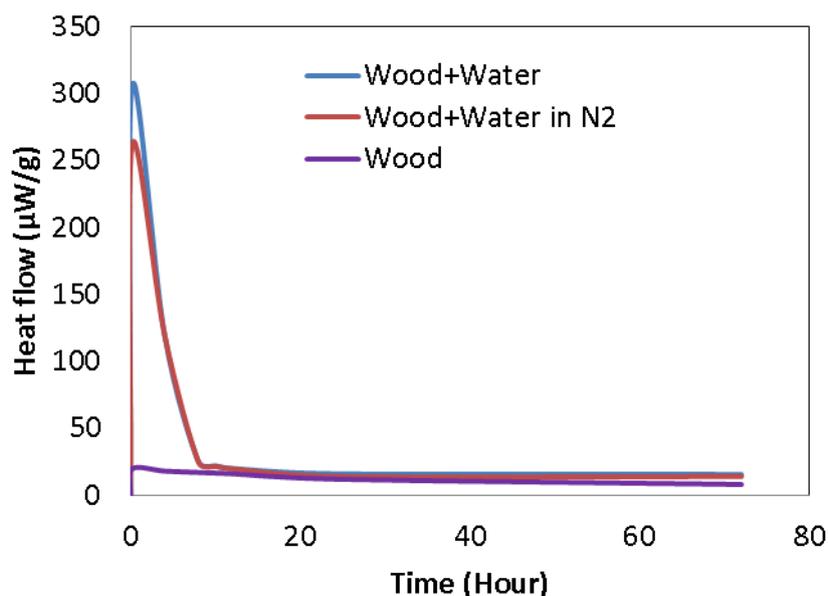
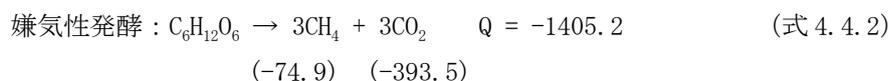
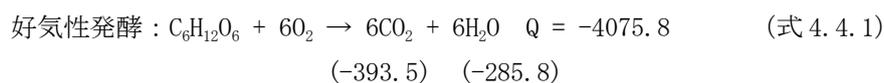


図 4.4.6 おがくず 100% の TAM 測定結果

嫌気性発酵による発熱量（単位時間当たり）は、好気性発酵の発熱量に比べて 10 分の 1 から 100 分の 1 である。これは、(式 4.4.1、4.4.2) では反応熱量はほぼ 3 分の 1 だが、嫌気性発酵は、より低温で起こること、反応速度も小さいためである。また、発熱のオーダーが小さいこと、一般に発酵発熱のピークは、測定開始後 10～20 時間後に起きていることから、おがくずの発熱は発酵発熱以外の発熱、例えば、水和熱、酸塩基反応によるものかもしれない。これらの確認には、別な手法が必要である。

おがくず、おがくず+水共に 10 時間経過後の発熱量は概ね同じである。これは、ほとんど発酵発熱が見られないことを意味する。MS80 の結果と同じような傾向にあるといえる。



#### d ガス分析結果

発酵現象では式 4.4.1、4.4.2 の化学反応に従ってガスが発生する（嫌気性発酵の場合は複数の反応が競合して進むと考えられる）。ここで、カッコ内の数字は、それぞれの標準生成エンタルピー（単位：kJ/mol）である。そこで、消防庁の方法<sup>2)</sup>に従って求めた結果の例を表 4.4.4、4.4.5 に示す。試料（木節粘土 10%+まさ土 90%、川砂）そのまま、水添加（空气中及び窒素中）の 3 つの条件で行った。メタン、水素と言った可燃性ガスは検出できなかった。窒素中での実験結果でもわずかに酸素が検出されたが、試料が空気（酸素）を吸着していたのが遊離したのか、あるいは測定誤差なのか別に検討を要する。

表 4.4.4 ガス分析結果 (木節粘土 10%+まさ土 90%)

|            | CO <sub>2</sub> % | CO % | CH <sub>4</sub> % | H <sub>2</sub> % | O <sub>2</sub> % |
|------------|-------------------|------|-------------------|------------------|------------------|
| 試料         | 0.099             | -    | -                 | -                | 20.53            |
| 試料+水 (空气中) | 0.100             | -    | -                 | -                | 20.00            |
| 試料+水 (窒素中) | 0.003             | -    | -                 | -                | 2.79             |

表 4.4.5 ガス分析結果 (川砂 100%)

|            | CO <sub>2</sub> % | CO % | CH <sub>4</sub> % | H <sub>2</sub> % | O <sub>2</sub> % |
|------------|-------------------|------|-------------------|------------------|------------------|
| 試料         | 0.204             | -    | -                 | -                | 19.48            |
| 試料+水 (空气中) | 0.248             | -    | -                 | -                | 20.61            |
| 試料+水 (窒素中) | 0.404             | -    | -                 | -                | 2.29             |

図 4.4.7、4.4.8 は、分別土について長期間保管した場合のガス発生（二酸化炭素及び酸素濃度の変化）を調べた結果である。1 か月保管しても酸素濃度は大きくは減少していないことから反応が極めて穏やかなものであることが判る。

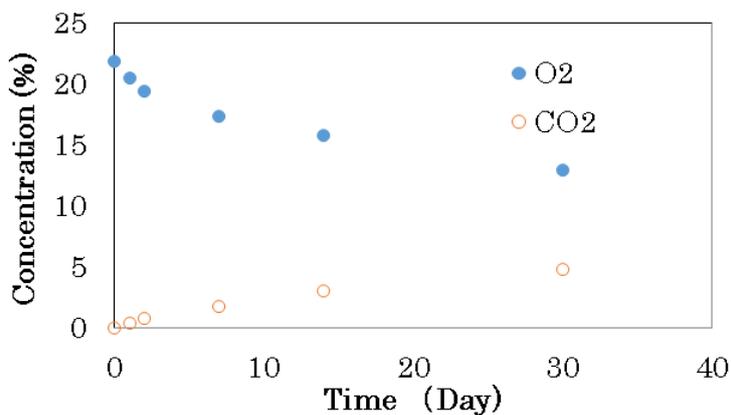


図 4.4.7 分別土 A 種のガス発生試験結果

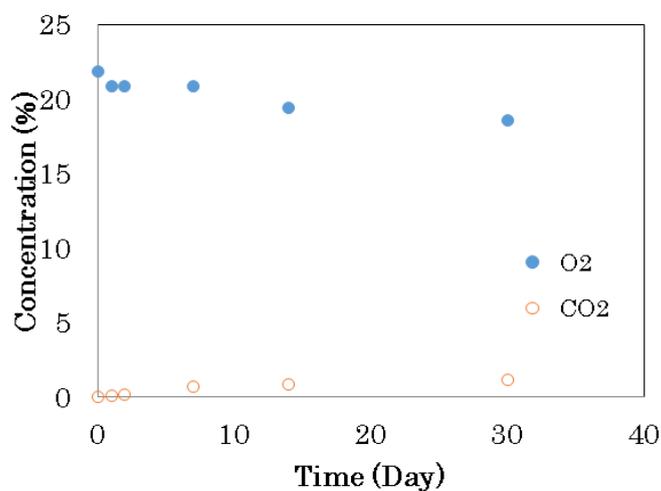


図 4.4.8 分別土 B 種のガス発生試験結果

## f 熱分析及びガス分析結果に基づく危険性評価

消防庁では物質の自然発火危険について単位容積（重量）あたり発生する微小発熱量及び可燃性ガス発生量から一定の評価を行ってきた<sup>2)</sup>。しかしながら、発熱の機構、時間面の要素を加えて微小発熱危険は検討すべきであろう。

今回の試料では、可燃性ガスは発生していないため、ガス爆発危険性は無しと判断される。TAMの測定結果では今回扱った試料では分別土、おがくずが最も危険性が高いが、おがくずも含めて、大部分の再生資源燃料<sup>2)</sup>に比べて発火危険性が小さいことが判った。

## 5) 屋外模擬土槽による実証試験

### a 沈下量の計測結果

槽内の沈下量の変化傾向を図 4.5.1 に示した。グラフは横軸が 2015 年の 11 月から 2016 年の 12 月までの期間、縦軸にレーザー距離計からターゲット（ボルト）までの距離を示した。A 槽に関しては、実験初期から約 8 cm の減少が確認できた。B 槽に関しては、実験期間を通して、ほぼ一定の値で推移した。A 槽の木くずのみ（かなな屑のみ）の土槽は、締固め度が小さかったため、自重によって沈下したと推察され、有機物等の分解が要因では無いと思われる。

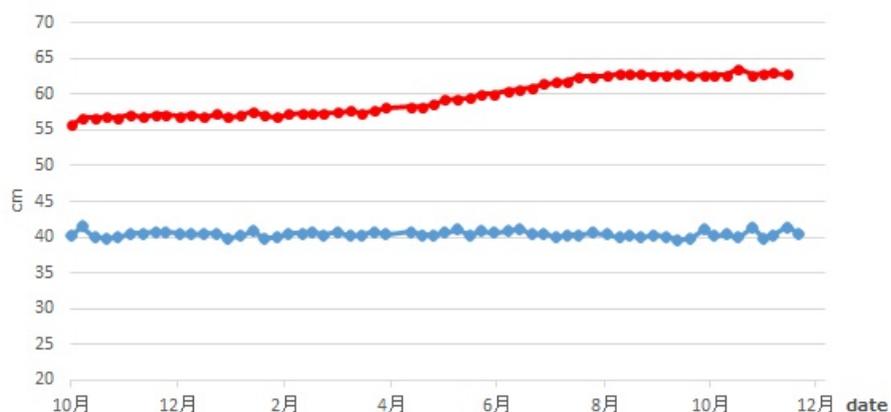


図 4.5.1 沈下量の計測結果（赤：A 槽、青：B 槽）

### b 気象データ

外気温の最高気温（オレンジ色）と最低気温（緑色）、降水量（灰色）の変化を図 4.5.2 に示した。グラフは横軸が 2015 年の 10 月から 2016 年の 12 月までの期間、第一縦軸（左側）に温度、第二縦軸（右側）に降水量を示した。温度データは、15 分毎に記録されたデータから、1 日の最高気温と最低気温を抽出した。降水量は、1 日の合計値を示した。

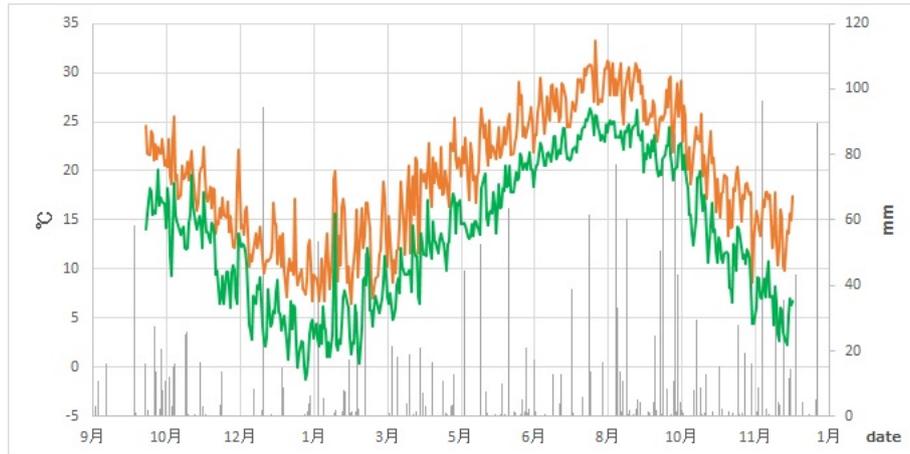


図 4.5.2 外気温と降水量の計測結果（オレンジ：日最高気温、緑：日最低気温、灰：日降水量）

実験当初の10月は最高気温 $24.6^{\circ}\text{C}$ 、最低気温 $14.0^{\circ}\text{C}$ の外気温があったが、冬に向かって徐々に下降傾向になった。2016年の1月には最低気温 $-1.4^{\circ}\text{C}$ を記録し、春以降に徐々に温度が上がり、夏に最高気温 $31.0^{\circ}\text{C}$ のピーク温度を記録した。しかし、2016年末にかけて再度低下した。

### c 槽内温度の測定結果

図 4.5.3 にA槽内の温度変化を示した。赤線はA槽上層の5点平均値、ピンク色の線はA槽下層の5点平均値とした。グラフは横軸が2015年の10月から2016年の12月までの期間、縦軸に温度を示した。特徴として見られるのは実験初期2015年10月から1月の時期、実験終期2016年10月～2016年12月の時期に関しては、上層の方が下層よりも高い傾向が見られた。しかし、それ以外は上層、下層ともほぼ同じような変化傾向を示した。図 4.5.4 にB槽内の温度変化を示した。青線はB槽上層の5点平均値、水色の線はB槽下層の5点平均値とした。グラフは横軸が2015年の10月から2016年の12月までの期間、縦軸に温度を示した。B槽では、上層、下層ともほぼ同じ変化傾向を示した。

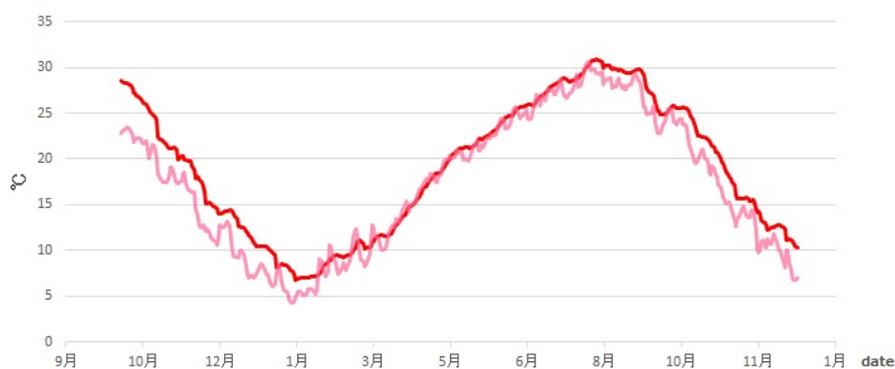


図 4.5.3 A槽内部温度の経時変化（赤：A槽上層平均、ピンク：A槽下層平均）



図 4.5.4 B 槽内部温度の経時変化（青：B 槽上層平均、水色：B 槽下層平均）

図 4.5.5 に、最高気温と最低気温の範囲（黒色）、A 槽の内部温度の変化傾向（赤線が上層の 5 点平均値、ピンク色の線が下層の 5 点平均値）、降水量（灰色）を示した。グラフは横軸が 2015 年の 10 月から 2016 年の 12 月までの期間、左縦軸に温度、右縦軸に降水量を示した。

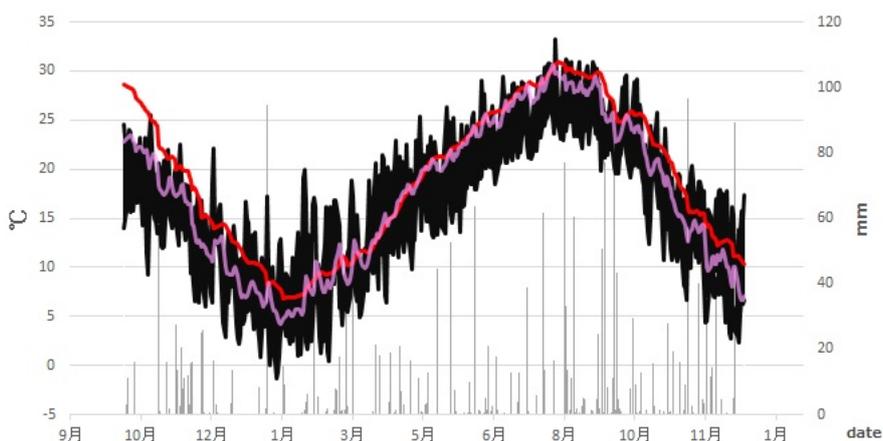


図 4.5.5 外気温、降水量、A 槽上層・上層平均温度の経時変化

（黒：最高気温と最低気温の範囲、赤：A 槽上層平均、ピンク：A 槽下層平均、灰：降水量）

実験初期（実験開始から 11 月頃まで）の槽内部温度は、外気温よりも高い傾向が確認できた。これは好気発酵にともなう発熱と解釈できる。それ以外に関しては、槽内部温度は外気温の間で推移した。

実験終期の A 槽上層が A 槽下層よりも高いのは、1) 日中の直射日光による昇温の影響、2) 実験槽内の熱が主に地面と空気導入口を介して放熱されたこと、の 2 点の理由が考えられる。上記の 2) 「実験槽内の熱が地面と空気導入口を介して放熱されたこと」を検証する目的で、A 槽の 10 カ所の温度変化傾向を図 4.5.6 に示した。グラフは横軸が 2015 年の 10 月 23 日から 2015 年の 12 月 12 日までの期間、第一縦軸に温度を示した。実験槽内の温度は、より高い温度を示す上層の 5 点と、比較的低温の下層の 5 点に分けられる。特に、図中に濃灰色で示した A 9 は常に最低温度を記録した。この A 9 は空気を取り入れ口付近の測定点である。このことから、上記の 2) 「実験槽内の熱が地面と空気導入口を介して放熱されたこと」は、証明された。つまり、実験槽内では、蓄熱よりも放熱が卓越し、特に、下層方向と空気取り込み口付近での放熱が顕著であることが明らかとなった。

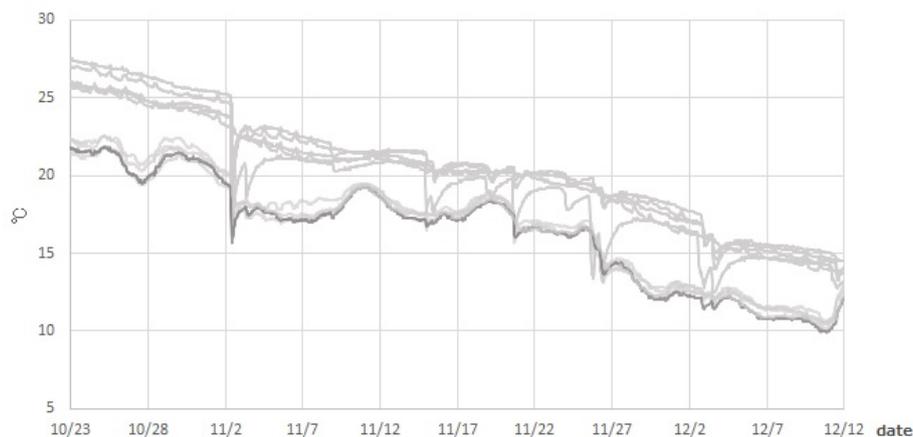


図 4.5.6 A 槽内部温度の変化傾向（濃灰色が A9）

次に、最高気温と最低気温（黒）、降水量（灰色）、B 槽内部温度の変化傾向を図 4.5.7 に示した。B 槽に関しては期間を通じて外気温と実験槽内部の温度はほぼ同じ傾向を示した。これに関しても、A 槽同様に、蓄熱よりも放熱が卓越しており、それが故に外気温と併に内部温度が変化したと考えられる。

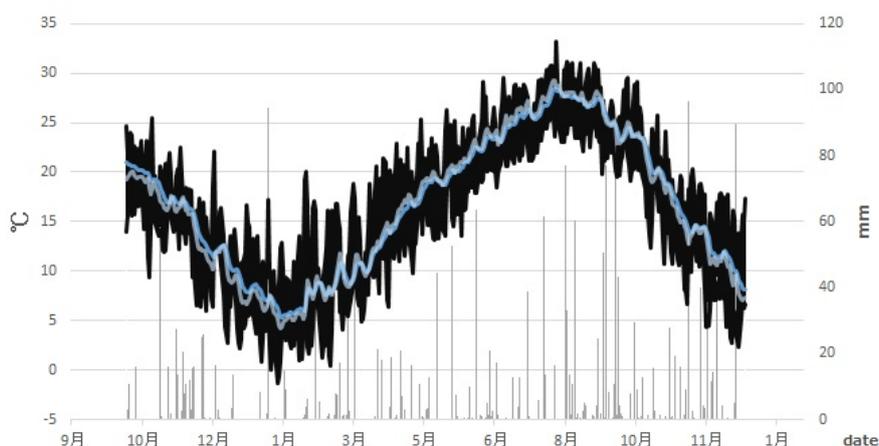


図 4.5.7 外気温、降水量、B 槽上層・上層平均温度の経時変化

（黒：最高気温と最低気温の範囲、灰：B 槽上層平均、青：B 槽下層平均、灰：降水量）

外気温と屋外模擬土槽内の温度は、ほぼ同様に变化した。赤松のみの A 槽に関して、実験初期は、槽内部温度が最高気温よりも高い傾向にあった。これについては、好気発酵にともなう発熱と解釈した。それ以外は顕著な発熱傾向は確認できなかった。以上より、屋外模擬土槽 A、B ともに、蓄熱よりも放熱が卓越している可能性が高く、それゆえ、本土槽の条件（規模や断熱仕様、資材の充填方法等）では蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。

#### d 発生ガスの測定結果

A 槽における  $O_2$  vol%、 $CO_2$  vol% の変化傾向を図 4.5.8 に示す。この図では、縦軸 vol%、横軸 日付とし

た。それぞれは、採取した5ヶ所のガス分析値の平均とした。O<sub>2</sub>の2016年の8月9日から2016年の9月21日までのデータは機器の不具合でデータがとれなかったため空白とした。O<sub>2</sub>は、実験初期に低い値(12 vol%)から上昇し高い値(17 vol%)が続いたあと、2016年の4月から減少傾向となり、8月頃には8 vol%程度にまで減少した。その後は年末にかけて上昇した。CO<sub>2</sub>は、実験初期(11月頃)に3 vol%程度のCO<sub>2</sub>が発生した。その後、4月頃では1 vol%程度の少ない状態が続いた。4月以降は上昇に転じ9月に8 vol%に達した。その後年末にかけて減少した。また、その他のガスは確認できなかった。

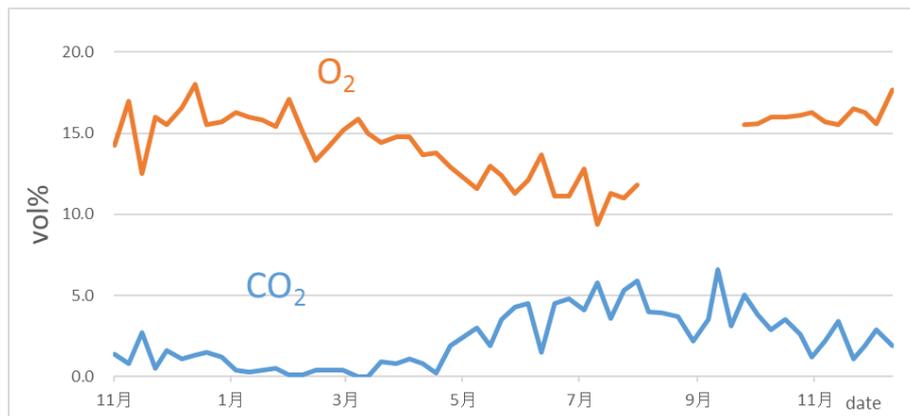


図 4.5.8 A 槽における酸素、二酸化炭素ガス濃度の平均値

B 槽における O<sub>2</sub> vol%、CO<sub>2</sub> vol% の変化傾向を図 4.5.9 に示す。この図では、縦軸 vol%、横軸 日付とした。それぞれは、採取した5ヶ所のガス分析時の平均とした。O<sub>2</sub>の2016年の8月9日から2016年の9月21日までのデータは機器の不具合でデータがとれなかったため空白とした。O<sub>2</sub>はA槽同様、実験初期に低い値(12 vol%)から上昇し高い値(17 vol%)が続いたあと、2016年4月からは減少傾向となり、8月頃から年末にかけて上昇した。CO<sub>2</sub>は、実験初期に高い値(3 vol%)を示した。また、A槽に比べ変化量は小さいが2016年の4月から7月にかけて増加傾向となり、10月にかけて3 vol%程度を維持しその後年末にかけて減少した。また、その他のガスは確認できなかった。

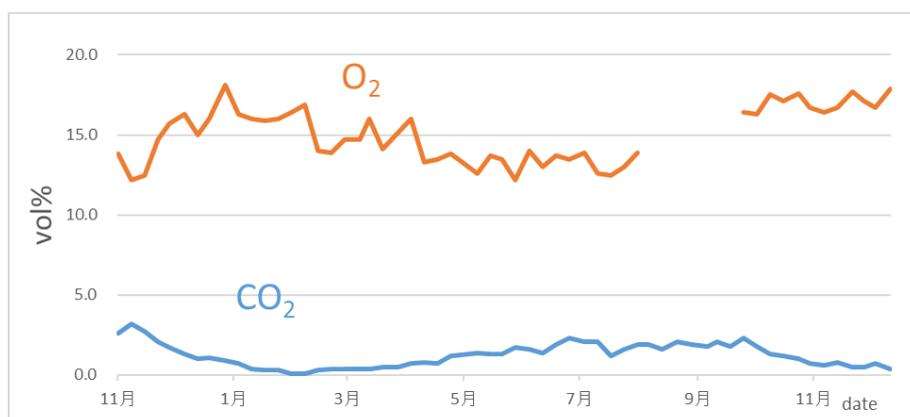


図 4.5.9 B 槽における酸素、二酸化炭素ガス濃度の平均値

平均槽内温度とA槽の発生ガスのデータを図4.5.10に示した。左の縦軸は槽内温度、右の縦軸は発生ガス vol%、横軸 日付とした。槽内温度とCO<sub>2</sub>の発生量を比較すると、基本的には同じ変化傾向であることがわかる。また、2016年の4月以降の槽内温度とCO<sub>2</sub>の上昇に伴って、O<sub>2</sub>が減少していることがわかる。これは、小河の研究結果から外気温の上昇に伴い槽内温度も上昇したことから、好気性微生物の活動が活発となり、その結果O<sub>2</sub>の濃度が減少したからだと考えられる。また、槽内のCO<sub>2</sub>濃度の上昇も、好気性微生物の活動によるものと考えられる。冬に向けてCO<sub>2</sub>が減少し、O<sub>2</sub>が上昇したことは、外気温の低下とともに槽内温度も低下し、その結果好気性微生物の活動が低下したためCO<sub>2</sub>の濃度が減少したと考えられる。また、O<sub>2</sub>の濃度が上昇したことは、模擬土槽下部にある空気導入口からの大気の流れによるものと考えられる。このことから、外気温の低下が直接的に模擬土槽内の温度低下に影響しており、槽内温度が上昇しなかったことは放熱が原因だと考えられる。以上より、屋外模擬土槽A、Bの発生ガスの変化傾向と、外気温、及び土槽内部の温度変化傾向からは、蓄熱よりも放熱が卓越していることが明らかとなった。このため、本土槽の実験条件では蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。

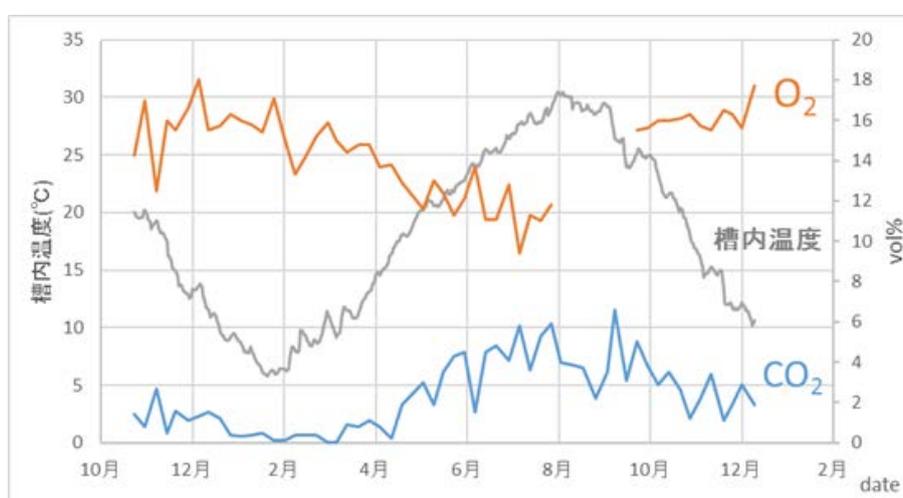


図 4.5.10 A槽内部の平均温度と酸素、二酸化炭素ガス濃度の関係

A槽は、実験初期（2015年10月～12月）にCO<sub>2</sub>の発生量が比較的多い値を示したことから好気発酵があったと考えられる。また、2016年の4月以降から夏にかけてCO<sub>2</sub>の発生量が増加しそれに伴いO<sub>2</sub>は減少した。これは外気温の上昇に伴い槽内温度も上昇したことで、好気性微生物の活動が活発となり、その結果O<sub>2</sub>の濃度が減少したものと考えられる。また、槽内のCO<sub>2</sub>濃度の上昇も、好気性微生物の活動によるものだと考えられる。その後は、夏季をピークにCO<sub>2</sub>は減少、O<sub>2</sub>は増加した。これは外気温の低下とともに槽内温度も低下し、その結果好気性微生物の活動が低下したためと考えられる。また、O<sub>2</sub>の濃度が上昇したことは、模擬土槽下部にある空気導入口からの大気の流れによるものと考えられる。期間を通じて、その他のガスは確認できなかった。B槽は、実験初期にCO<sub>2</sub>の発生量が高い値を示していたが、これはA槽同様、好気発酵が原因と考えられる。また、A槽に比べCO<sub>2</sub>の発生量は少なく変化量も小さかったが、2016年の4月以降から夏にかけてはCO<sub>2</sub>が増加しそれに伴いO<sub>2</sub>は減少しており、A槽と同じ変化傾向が確認できた。その他のガスは確認できなかった。以上より、屋外模擬土槽A、Bの発生ガスの変化傾向と、外気温、及び土槽内部の温度変化傾向からは、蓄熱よりも放熱が卓越していることが明らかとなった。このため、本土槽の実験条件では蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。

### e 排水の水質測定結果

A槽、B槽におけるpH、ECの経時変化を図4.5.11、図4.5.12に示す。期間を通じてpH=5~8の範囲で推移した。A槽に比べてB槽が常に高い値となった。B槽では、実験初期の値が50 mS/mと高い値を示した。A槽、B槽とも、実験初期に高い数値を出した後、減少傾向となった。

B槽がA槽に比べ、常に高い値となった理由は、まさ土中に含まれる石灰質成分からの塩基成分( $\text{Ca}^{2+}$ など)の溶出によって、pHおよびECが上昇したことが原因であると考えられる。



図 4.5.11 A槽、B槽のpHの経時変化 (■はA槽、▲はB槽)

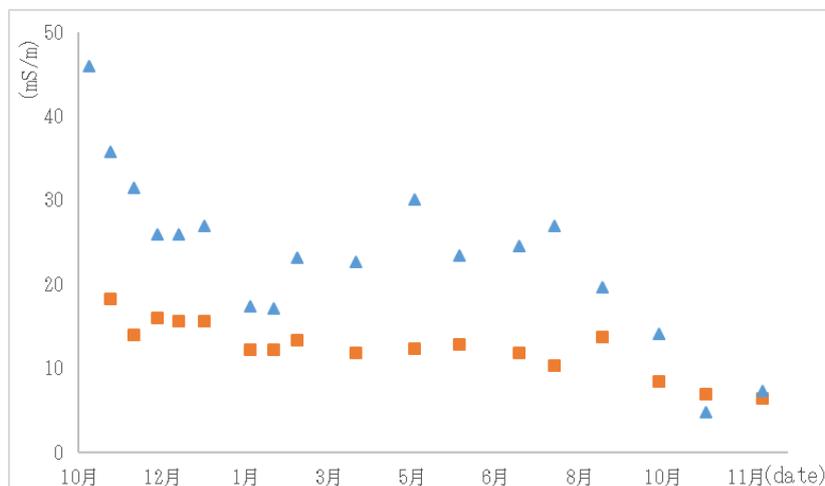


図 4.5.12 A槽、B槽のECの経時変化 (■はA槽、▲はB槽)

A槽、B槽における溶存酸素量、酸化還元電位の測定結果を図4.5.13、4.5.14にそれぞれ示す。溶存酸素量については、実験初期においてA槽、B槽とも、で急上昇した。一定期間高い値を示した後、3月以降では徐々に低下した。特に4月~7月にかけて大きく低下している。酸化還元電位は、常にA槽の方が高い結果となった。A槽、B槽とも、期間前半(11月~4月)にORPが上昇した。その後、期間中盤(5月~8月)で減少し、さらに、期間後半(9月~12月)では、再び上昇する結果となった。

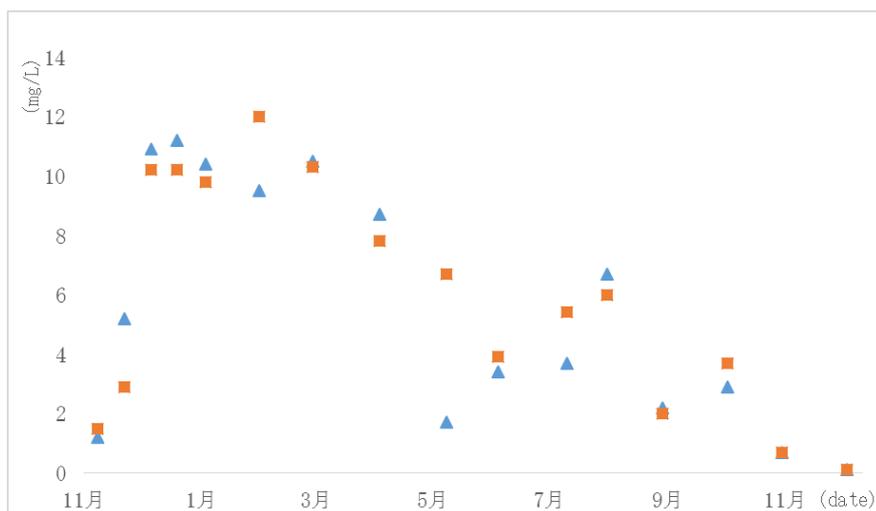


図 4.5.13 A 槽、B 槽の溶存酸素量の経時変化 (■は A 槽、▲は B 槽)

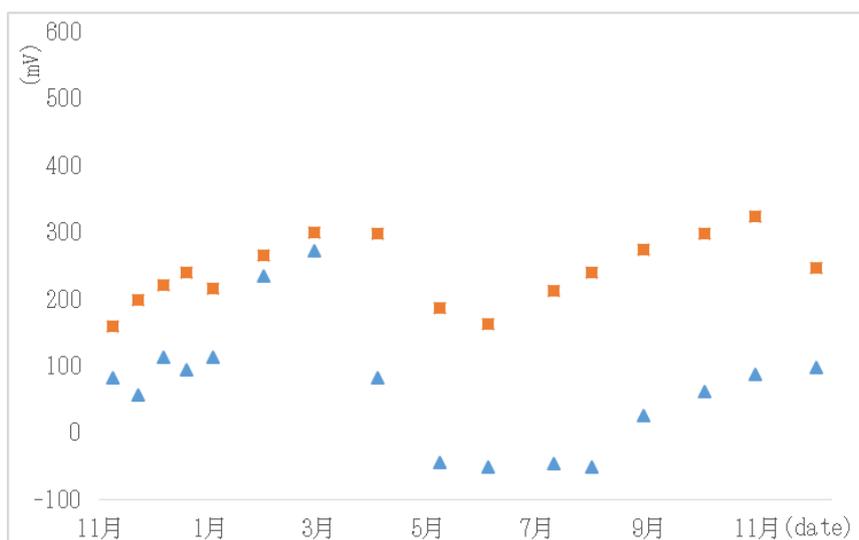


図 4.5.14 A 槽、B 槽の酸化還元電位の経時変化 (■は A 槽、▲は B 槽)

期間中の降水量を図 4.5.15 に示す。縦軸は月ごとの日平均降水量を示している。雨水は実験槽内部を浸透するため、pH、EC、DO、ORP のそれぞれに大きく影響を与えることが考えられる。この中で、特に、DO と ORP の変化傾向と降水量について考察した。溶存酸素量については、初期に急上昇しているが、これは模擬廃棄物内に雨水が侵入したことにより、雨水の DO に近い値まで上昇したことが考えられる。その後は、基礎をなすコンクリートの影響を受け、しばらくは微生物の定着等が無く、基本的に雨水の値に近い値で推移したものと考えられる。その後、期間の後半においては、徐々に下部のコンクリート槽内に微生物が定着し、かつ、赤松からの継続的な有機成分の溶出等により、排水中の酸素が消費される傾向が続き、溶存酸素量が低下したものと考えられる。このように溶存酸素量の変化には微生物の活動というのが大きく関与している可能性が考えられる。酸化還元電位については、一般的に DO との相関が示唆されるが、期間の後半で高くなる傾向を示した。これについては、2016 年 8 月以降に比較的多い降水の影響により、上昇した可能性が考えられる。しかし、ORP の変化傾向については、槽内の酸素濃度との相関について、次項に

て考察する。いずれにしても、排水のすべては雨水起源であるので、1) 実験槽内の微生物の影響、及び  
2) 下部のコンクリート槽内に溜まってからの微生物の影響、の両方が関与している可能性が高い。

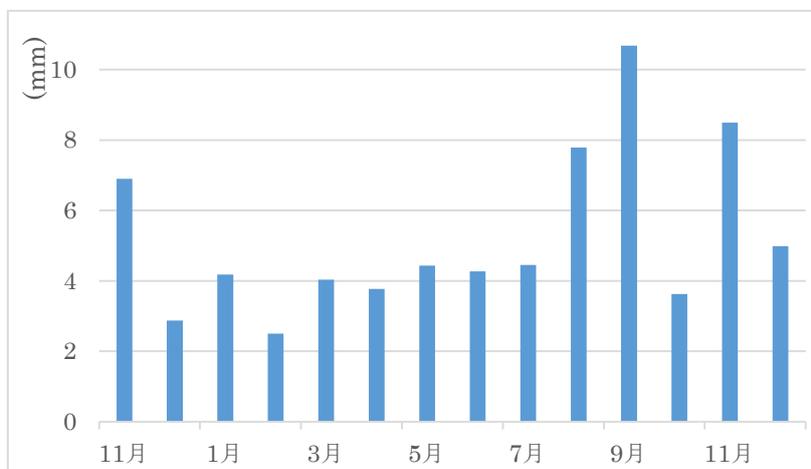


図 4.5.15 月ごとの日平均降水量

A 槽、B 槽における生物化学的酸素要求量 (BOD) 及び化学的酸素要求量 (COD) の変化傾向をそれぞれ図 4.5.16、図 4.5.17 に示す。BOD、COD ともに、実験開始直後には高い値を示し、その後、継続的に減少した。また、常に A 槽の値が高い結果となった。これは A 槽により多くの赤松のかんな屑が含まれることから、より多くの有機成分を溶出したことが原因と考えられる。期間を通じての BOD、COD の減少は微生物による有機成分の消費が原因と考えられる。

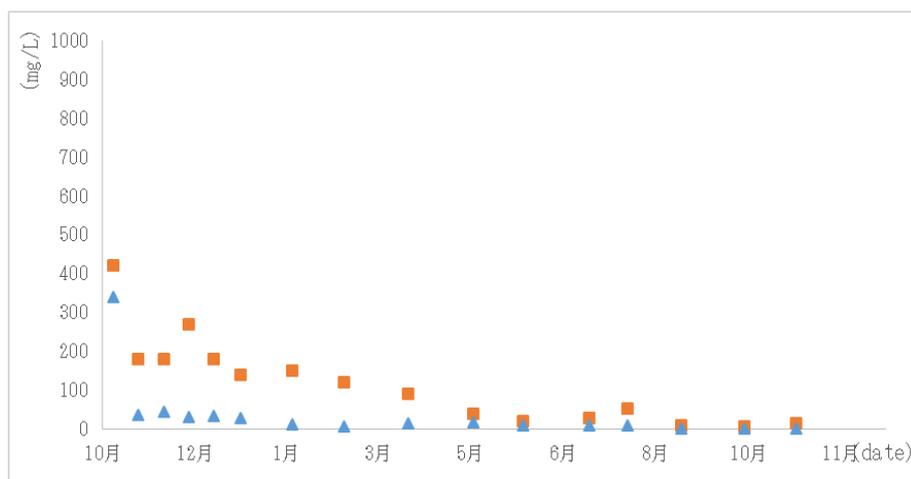


図 4.5.16 A 槽、B 槽の BOD の経時変化 (■は A 槽、▲は B 槽)

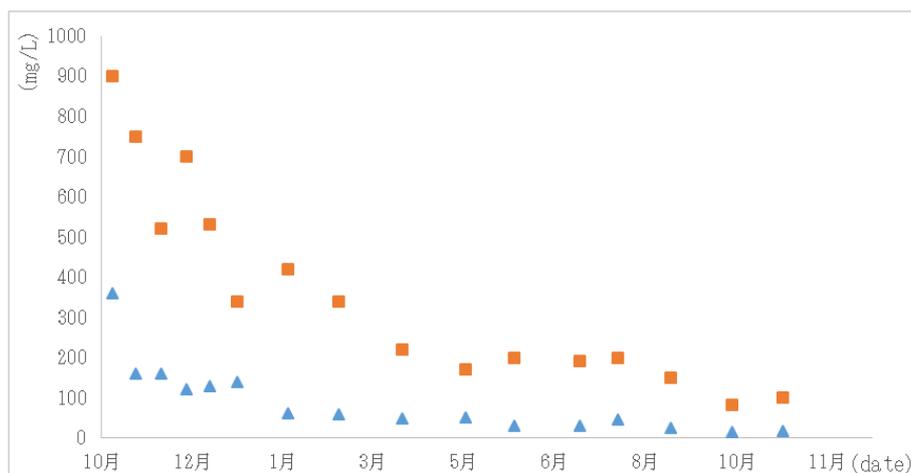


図 4.5.17 A 槽、B 槽の COD の経時変化 (■は A 槽、▲は B 槽)

A 槽、B 槽における ORP と槽内  $O_2$  vol% の変化傾向について考察するため、両者の関係を図 4.5.18 に示す。この図では右の縦軸を濃度、左の縦軸を酸素濃度 (vol%)、横軸を期間とした。槽内の  $O_2$  濃度も ORP も 2016 年 3 月頃～7 月頃まで減少し、その後上昇傾向に転じた。特に、槽内の  $O_2$  濃度と、A 槽の ORP は似た変化傾向を示した。これは、排水のほとんどが土槽内部を通過した雨水ものなので、土槽内部の酸素濃度の影響を強く受けている可能性が考えられる。これにより、両者の強い相関の理由が説明できると解釈できる。

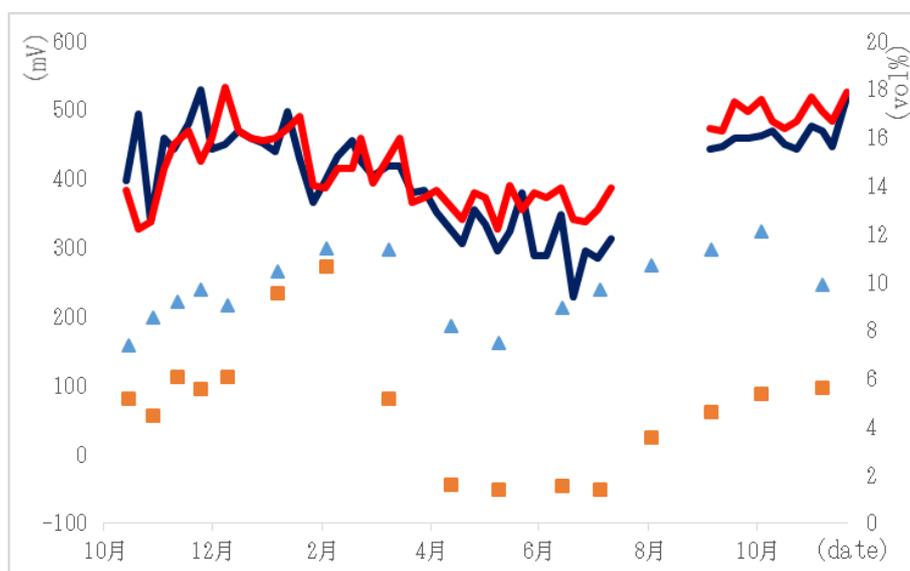


図 4.5.18 A 槽、B 槽における ORP と槽内の酸素濃度の経時変化  
(■：A 槽、▲：B 槽の ORP、赤線：A 槽の  $O_2$  濃度、青線：B 槽の  $O_2$  濃度)

## 6) まとめ

### a 強熱減量に及ぼす強熱温度および強熱時間の影響

木くず等の有機炭素含有量を把握するための至適強熱温度ならびに強熱時間を検討するため、災害廃棄物由来の実際の分別土や有機質土等の土質材料、粘土系材料、木くず等の有機炭素成分をまさ土に添加し

た人工材料の合計 26 種の粒状体試料を対象として、強熱温度を 150～750℃の範囲で 8 種類、強熱時間を 10～360 分の間で変化させ、従来のバッチ式強熱減量試験を網羅的に実施した。その結果、1:1 型粘土鉱物のカオリン系粘土（ハロイサイトを含む）やドロマイトが含まれていると、600℃以上の強熱減量が上昇することが確認された。また、人工材料の強熱減量より、至適温度は 375℃であることが求められたが、350℃になると有機炭素含有量を低く測ってしまう可能性が高く、多少、強熱温度が上昇したとしても、過大評価する誤差が小さいことから、強熱温度 400℃が至適強熱温度であることを明らかにした。至適温度の検討には、強熱後の炭素含有量も評価している。また、強熱時間は、400℃強熱に着目し、恒量になる最小の時間として 2 時間が適当であることを示した。

強熱過程の重量変化を連続的に測定するシーケンシャル型の強熱試験より、温度 400℃前後で 1 時間半から 2 時間程度強熱処理を行う事で含有する有機系夾雑物の混合割合を推定することが可能であることが示された。当該評価方法を災害時に発生する大量の土砂廃棄物に適用することで、現場での土砂の再利用が遅滞なく行われ災害復興の早期展開の一助となり得ると考える。また、400℃：2 時間強熱試験の試験方法についても提案した。

#### **b 木くず等の含有が汚濁成分の溶出に及ぼす影響**

測定値を得るまでに時間を要する BOD や COD の代替指標として、即日測定可能な E260 や DOC、TOC を用いることの可能性を検討した。BOD は、全有機物質質量中に含まれる易分解性有機物質質量の割合が異なる試料間では DOC や TOC による評価は難しいと考えられた。一方で COD は、DOC や TOC と強い相関性が認められそれらの回帰式を得た。E260 もまた SS をろ過によって除去した検液であれば COD と相関性が認められたが、 $E260 < 0.2$  となる低濃度の検液については E260 から COD を見積もることが難しい。

木くず等混入廃棄物の仮置き/埋立/有効利用時の受入条件を強熱減量の点から見出すことを目的として、COD と強熱減量の関係を調べた。強熱温度が 375℃または 400℃の 2 時間強熱減量値が、試料中の有機汚濁成分量と相関性が強いと考えられ、その回帰式を得た。この回帰式を活用することで、仮置き/埋立/有効利用時の廃棄物の受入条件を規定することができる。例えば、浸透水を  $COD < 40 \text{ mg/L}$  を満たすためには、廃棄物受入条件を 375℃-2 時間強熱減量値を 2.74%以下（安全側にみて 1.0%以下）にする必要がある。

有機質土壌を含む一般的な土壌や、まさ土におがくずを添加した人工試料の結果をみると、少量の有機物が存在していると溶出液の BOD や COD は比較的高くなり、安定型処分場の浸透水基準を満足することが難しいといえる。泥炭等の有機質土壌を、土質材料として一般環境中で利用することに対して、水質汚濁という観点での規制はない。そのため、分別土の有効利用においても、これら水質汚濁成分の値は参考値として用いるべきであり、規制対象にするために BOD や COD の制限を設けるべきでは無いといえる。水質汚濁防止法を考えても、恒常的に排水される水を対象としており、浸透水は対象にしていない。また、分別土の BOD 成分は、時間と共に速やかに消失する可能性が高いと考えられる。

#### **c 木くず等の含有が分解ガス発生に及ぼす影響**

木質の粒径と固液比および経過時間をパラメーターとして、得られる有機炭素濃度の取得方法を一般化することができた。固体からの成分の溶出は、固体表面積が大きいほど（粒径が小さいほど）、また固体と液体との比率において固体が多いほど（固液比が大きいほど）、強度が大きいことが分かった。すなわち、木質からの有機炭素溶出強度は、木質の粒径と固液比によって決定される。以上のことを用いて、木質の粒径と固液比が分かっている分別土の、経過時間ごとの溶出有機炭素濃度を予測できるモデルを構築した。今後の研究で、安全値以下のメタンガスが発生するときの木と水の固液比を決定することが可能になれば、この固液比を分別土利用の際の基準値として利用していくことが期待できる。

溶液中有機炭素濃度と酸素消費速度の関係を調べた。培養温度を 35℃と 20℃に設定し 7 日間の木くずの抽出液と粉碎木質の酸素消費速度実験を行った。結果として、有機炭素濃度が高いほど酸素消費速度も大きくなることが明らかになった。そして、酸素消費速度と有機炭素濃度から酸素進入深さを算出し、嫌気ゾーンが形成されずに分別土を土木資材として利用するための分別土の堆積の高さの指標を評価した。

溶液中有機炭素濃度とメタンガス発生強度の関係を調べた。培養温度を 35℃に設定し、28 日間の木くずの粉碎木質と木質抽出液のガス発生強度測定を行った。有機炭素濃度とガス発生強度の明確な関係性が得られなかったため、目的としていた有機炭素含有量の上限を提案することはできなかった。有機炭素濃度が低濃度側では、メタンの生成量と比例関係が見られたが、本研究で許容濃度上限値としたメタンガス濃度 1%を上回ることはなく、メタンガスの発生量は極めて少ないということがわかった。

有機炭素濃度と酸素消費速度の関係、有機炭素濃度とガス発生強度の関係を調べた。培養温度を 35℃に設定し、酸素消費速度実験は 7 日間、ガス発生強度実験は一か月の測定期間で一週間ごとの試料を測定した。有機炭素濃度が高いほど酸素消費速度が大きいことが明らかになった。酸素消費速度と有機炭素濃度から酸素侵入深さを算出し、嫌気ゾーンが形成されずに分別土等を土木資材として利用するための分別土の堆積の高さの指標を評価した。また、ガス発生強度と有機炭素濃度の間に関係性は見られなかったが、各試料のメタンガス最終濃度より今回用いた分別土等は土木資材として安全に利用できることが明らかになった。

#### d 発火危険性に関する熱分析

分別土 A 種や分別土 B 種について、消防庁の提案した試験方法に準じて危険性評価試験を行った結果、全体的に、再生資源燃料に比べてより安全といえ、発火危険性は少ない分類となった。

#### e 屋外模擬土槽による実証試験

外気温と屋外模擬土槽内の温度は、赤松のみの A 槽に関して、実験初期は、槽内部温度が最高気温よりも高い傾向にあったが、ほぼ同様に变化した。これより、屋外模擬土槽 A、B ともに、蓄熱よりも放熱が卓越している可能性が高く、それゆえ、本土槽の条件（規模や断熱仕様、資材の充填方法等）では蓄熱発火の危険性はないと結論することができる。この点は、酸素濃度が高く、二酸化炭素濃度が低い状況であったガスの分析結果からも同様の結論を得ることができた。また、排水の化学的、生物学的指標の変化は、雨水、模擬廃棄物、微生物の活動に強く影響されていると考えられるが、反応自体が生じておらず、特筆すべき挙動は観察されなかった。先述した BOD 成分については、本実験土槽の結果、降雨の浸透と共に速やかに低下することが確認された。そのため、数%の木くずが混入した分別土における浸透水 BOD も、初期にやや高くなるものの、継続的には汚濁成分を放出しない可能性が高いといえる。

### 7) 災害廃棄物由来の分別土における木くず等含有量試験の提案

本研究の目的は、災害廃棄物由来の分別土における木くず等含有量試験の提案である。従来の JIS 規格による強熱減量試験方法を改善し、分別土が含有する数%程度の木くず等有機炭素含有量を対象とする試験方法を提案する。本試験方法は、有機質土等の数十%の有機物含有量を求めることは対象としていない。また、建廃由来中間処理物の安定型処分場への埋立判定も対象とはしていない。安定型処分場への埋立は、確かに熱しゃく減量という 600℃強熱温度での強熱減量試験であるが、基本的に木くずの混入を一切、認めないため、熱しゃく減量で 5%以下というのは、木くずを対象にしていない。

本検討では、災害廃棄物由来の分別土の有効利用を、環境保全上の支障が無い範囲で促進し、かつ、災害時の分別土利用と、災害廃棄物処理にタイムラグがあることから、分別土を安全にストックできるよう

にすることを目的としている。そのため、災害復興時に分析評価することになり、そのような時期であっても多くの分析機関で実施でき、計画停電のような電力不足に陥ったとしても、短時間で試験ができることが重要となる。そこで、本研究成果の取りまとめの一つとして、JIS規格に倣い、試験方法を以下に提案する。なお、以下の節番号等は本報告書とは別であり、独自にナンバリングしている。

=====

## 災害廃棄物由来の分別土における有機炭素含有量試験方法

Test method for organic carbon content of  
recovered soils derived from disaster wastes

### 1 適用範囲

この試験方法は、分別土の木くず等の有機炭素含有量試験方法について記す。なお、本試験方法は、災害廃棄物、特に津波堆積物を含む災害廃棄物や夾雑物混じり津波堆積物を中間処理して生成された分別土に適用できる。

### 2 引用規格

次に掲げる規格は、この試験方法に引用されることによって、本試験方法の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

JIS A 1201 土質試験のための乱した土の試料調整方法

JIS R 1301 科学分析用磁器るつぼ

JIS R 3503 科学分析用ガラス器具

JIS Z 8801-1 試験用ふるいー第1部：金属製網ふるい

### 3 用語及び定義

#### 3.1

#### 分別土の有機炭素含有量

(110±5)℃で一定質量になるまで炉乾燥した分別土を、(400±25)℃に強熱したときの減少質量を炉乾燥分別土の質量に対する百分率で表したもの。

### 4 試験器具

試験器具は、次による。

#### 4.1 高温乾燥炉

高温乾燥炉は、温度を(110±5)℃に保持できるもの。

#### 4.2 電気マッフル炉

700℃以上に加熱可能な炉で、温度制御が±25℃の範囲でできるもの。

#### 4.3 はかり

0.001 gまではかることができるもの。

#### 4.4 るつぼ

JIS R 1301に規定するふた付きの容量30 mL～50 mLのもので、強熱によって質量の変化を生じないもの。るつぼの容量は、木くず等の有機炭素含有量が50%程度

を超えると想定される場合には 50 mL のもの、それ以外の分別土では 30 mL のもの。

#### 4.5 ふるい

JIS Z 8801-1 に規定する金属製網ふるい目開き 9.5 mm、2 mm のもの。

#### 4.6 デシケータ

デシケータは、JIS R 3503 に規定するもの又はこれと同等の機能をもつ容器で、シリカゲル、塩化カルシウムなどの吸湿剤を入れたもの。

#### 4.7 その他の器具

##### a) るつぼばさみ

b) 炉乾燥容器 容量は 100 mL 以上のもので、対象となる分別土の粒径が大きく、不均質な場合には、500 mL など大きな容器のもの。

c) 試料粉砕器 カッターミキサーなど、氷を砕けるミキサーのようなもの。

#### 5 試料

試料は、次によること。

a) JIS A 1201 によって得られたものを用い、ときほぐしやすい程度まで空気乾燥する。

b) 粉砕困難な 9.5 mm 以上の無機質粒子をふるい等を用いて可能な範囲で取り除いた後、ミキサーで粉砕して、目開き 2 mm のふるいを通過させる。

なお、目開き 2 mm のふるいに残留する粉砕が困難な粒子等は取り除く。また、粉砕時に過度に発熱することを抑制するよう、粉砕時間等を調整すること。

c) 目開き 2 mm のふるいを通過した分別土を高温乾燥炉に入れ、 $(110 \pm 5)$  °C で一定質量になるまで炉乾燥する。

d) 炉乾燥後、デシケータでほぼ室温になるまで冷ましたものを試料とする。

なお、空気乾燥のみでは破砕が困難な場合、空気乾燥ではなく、炉乾燥を行ってもよい。

e) 試料の量は、容量 50 mL のるつぼを用いるとき（木くず等の有機炭素含有量が 50% 程度を越えると想定される場合）は 2~5 g 程度、容量 30 mL のるつぼを用いるときは 7~10 g とする。

#### 6 試験方法

試験方法は、次による。

a) るつぼの質量  $m_c$  (g) をはかる。

b) 炉乾燥試料をるつぼに入れ、全質量  $m_a$  (g) をはかる。

**注記 1** 炉乾燥後の分別土は、多種の材料が混在しており、その比重の違いによって不均一試料となっている可能性が高いので、十分に混合したものをるつぼに入れること。

c) るつぼを電気マッフル炉に入れ、徐々に加熱する。

**注記 2** るつぼにはふたを斜めにかぶせること。特に、通気口の無い電気マッフル炉を用いる場合には、るつぼ内が無酸素状態とならないように、ふたを斜めにかぶせることが重要となる。

d) 温度を  $(400 \pm 25)$  °C に保持し、設定温度に到達してから、2 時間強熱する。な

お、あらかじめ温度を (400±25) °C に設定した電気マッフル炉を用いてもよい。

**注記 3** 温度が極めて高温ではないが、あらかじめ昇温したマッフル炉にるつぼを入れる時には、長めのるつぼばさみを用い、十分に注意すること。

- e) 強熱停止後、るつぼをデシケータに移し、ほぼ室温になるまで冷ました後、全質量  $m_b$  (g) をはかる。

**注記 4** 通常、強熱停止後 10 分程度電気マッフル炉を解放した後、るつぼばさみを用いて、るつぼを炉内から取り出し、室温で数分間放置した後にデシケータに移すことが多い。

**注記 5** 室温で数分間放置せず、恒温炉乾燥炉を 110°C 程度に設定しておき、るつぼを恒温炉乾燥炉に入れて数十分間放置した後にデシケータに移してもよい。

## 7 計算

木くず等の有機炭素含有量は、次の式によって算出する。

$$LOI = \frac{m_a - m_b}{m_a - m_c} \times 100$$

ここに、LOI：木くず等有機炭素含有量 (%)

$m_a$ ：炉乾燥試料及びるつぼの質量 (g)

$m_b$ ：強熱後の試料及びるつぼの質量 (g)

$m_c$ ：るつぼの質量 (g)

## 8 報告

試験結果には、次の事項を報告する。

- a) 強熱時間
- b) 木くず等の有機炭素含有量 (%)
- c) この試験方法と異なる方法を用いた場合には、その内容
- d) 実施試料の概観
- e) その他報告事項

=====

以上が、本研究で提案する「木くず等の有機炭素含有量」の試験方法である。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

強熱減量の結果が有機物含有量に相当する、という考え方は、研究者も含み、実務者の間で広く浸透している。しかしながら、地盤工学会の実験解説書や、農学系の実験図書のいずれを読んでも、強熱減量を有機物としてよいのは有機質土を対象にした時のみであり、概ね 30～50%以上の有機物含有量がある場合に適用可能となっている。対象土を限定せずに、強熱減量値が有機物含有量であるとして、強熱減量が数%オーダーの土や分別土にも適用することは、有機物含有量を過大評価し、本来の試験方法の目的に合致しない適用外利用であるといえる。土木、農業、材料、環境の各分野で、強熱減量の温度や時間に差異があり、その測定に対する目的も異なる。従前の研究の多くは、材料中に含まれる無機炭素定量や、土壤に含まれる貝殻の遺骸量など、炭酸カルシウムの脱炭酸量を正確に求めるための研究が多い。数%オーダーの有機物含有量を正確に求めるための強熱試験方法については、規格というよりも、大学単位で独自に実験方法等を規定しているケースが多い。その多くは、強熱温度 350～375℃の範囲にあり、理論的な有機炭素の熱分解温度を採用し、TG-DTA 分析等によって理論付けを行っている。本研究で提案する 400±25℃：2 時間強熱法は、試験機関や試験者が異なっても、分別土の有機炭素含有量を比較的正確に求める事を優先しており、小数点以下の精度よりも、測定誤差の最小化を優先している。そのため、電気マッフル炉の性能も含め、従前の強熱温度よりも高い温度に設定した。

土壌よりも雑多な物質で構成されている災害廃棄物由来の分別土に対し、従前の強熱減量試験方法の強熱温度と時間を変化させるだけで、有機炭素含有量（無機炭素は揮発させない）を測定可能な方法を提案したことは、科学的、特に、工学的側面での意義が大きいと考えられる。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

東日本大震災では、災害廃棄物や津波堆積物を処理することで分別土 A 種（津波堆積物由来）、分別土 B 種（不燃性混合廃棄物由来）、分別土砂（宮城県内処理物）などの土質材料が作られたが、木くず等の有機物が混入していることから、復興資材利用が進まない状況があった。これは、土壌混入の木くず等有機物含有量の評価法として強熱温度が 600℃以上の熱しゃく減量や JIS 規格の強熱減量を適用したことも原因の一つと考えられる。本来、熱しゃく減量は焼却灰の燃え残りを評価するための試験方法であり、その試験方法を建設系混合廃棄物のふるい下残さにも適用し、安定型処分場への埋立判断基準にも援用したものである。そのため、土壌成分を含む材料に適用されるべき基準ではない。JIS 規格の強熱減量試験は土のためのものであるが、その減量率を有機物量として評価してよいのは、亜泥炭や泥炭などの有機質土壌に限定されている。しかしながら、代替できる有機物判定方法が無いと、復興資材にも援用され、有機物含有量を過大評価してしまったと考えられる。本研究で提案する 400℃：2 時間強熱方法は、有機物含有量を過大評価せずに、従来の強熱試験方法の温度と時間を調整するのみで、災害廃棄物由来の分別土に含まれる有機物量を迅速に測定するものである。本方法は、災害復興時のような混乱期であったとしても、多くの分析機関（土質試験所等も含む）で実施可能であり、復興資材の有効利用を時間的に妨げる可能性も低い。

400℃：2 時間強熱の強熱減量が少なくとも 8%以下であれば、有機汚濁成分の継続的な溶出や、メタンガスの発生を抑制することが可能であることも実験的に確認した。また、熱分析や高さ 1.5 m 程度の屋外土槽実験によって、蓄熱による自然発火危険性を判定した結果、危険性が極めて低い分類に属することも明らかとなった。復興資材となる分別土は、処理されてから利用されるまでの期間、ストックヤードに保管されることになるが、400℃：2 時間強熱の強熱減量が少なくとも 8%以下の分別土であれば、堆積高さを混合廃棄物を対象とした高さ制限 5 m を超えてストックすることも可能と判断される。本研究成果は、望まずとも発生するであろう将来の巨大災害時の災害廃棄物処理を円滑に進め、仮置場のみならず、ストックヤードの適正管理、復興資材の品質管理にも適用できると考えられる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上发表

#### <論文(査読あり)>

- 1) 古積 博・村沢直治：災害廃棄物の自然発火とその対策、熱測定、43(1)、pp. 25-31 (2016)

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 遠藤和人・竹崎 聡・高井敦史・勝見 武：災害廃棄物由来の分別土を用いた試験盛土の観測 (1 年目)、第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 105-112 (2015)

#### <その他誌上发表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) 竹崎 聡・遠藤和人・中川美加子：土壌中の有機物(木くず)含有量評価、第 51 回地盤工学研究発表会講演要旨集、岡山、in CD-ROM (2016)

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

## (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) 社団法人地盤工学会 (2009) : 地盤材料試験の方法と解説、p. 336
- 2) 古積博・村沢直治 (2016) : 災害廃棄物の自然発火とその対策、熱測定 43(1) pp. 25-31
- 3) 消防研究センター (2007) : 再生資源燃料等の危険性評価に関する研究報告書、消防研究技術資料 79号、2007年3月
- 4) 富田武満・田辺和康・山本克巳 (1992) : マッフル炉を用いた強熱減量法による粘土鉱物の定量、土木学会論文集、No. 445/III-18、pp. 55-63
- 5) 須藤定久 (2008) : 伊那カオリンー信州ローム層の粘土化を測るー、地質ニュース、No. 650、pp. 36-47
- 6) 田中信壽 (2004) 「環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理」、技報堂

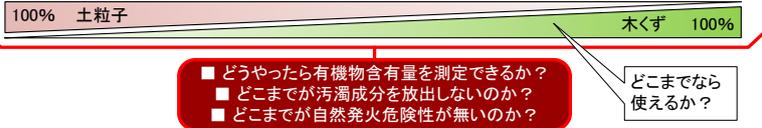
[研究概要図]

災害廃棄物由来の分別土有効利用における木くず等有機炭素含有量の評価

3K152005

国立環境研究所 遠藤和人

**【目的】** 災害廃棄物由来の分別土に含まれる有機物含有量を適切、迅速に求めるための強熱減量試験方法の開発。ならびに、強熱減量が水質汚濁やガス発生に及ぼす影響の検証。分別土の発火危険性の判定を行い、災害仮置場や分別土ストックヤードの適正化。



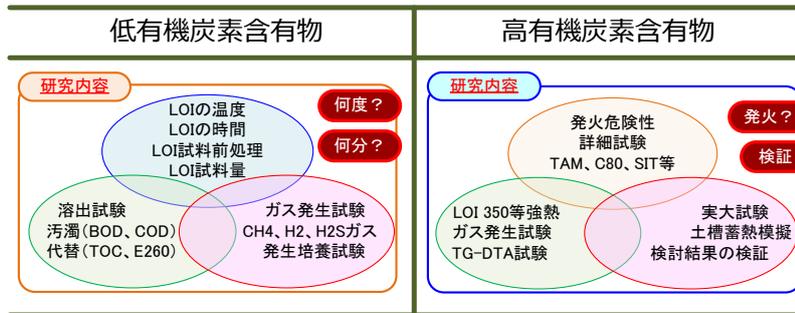
木くずの混入が復興資材の妨げの一つとなるが、実際、どの程度までが許容範囲なのか。どの程度の環境影響を及ぼすのか。

木くずの混入率の適切な判定方法は何か。

どの程度の有機炭素量であると発火危険性が有意になるのか。

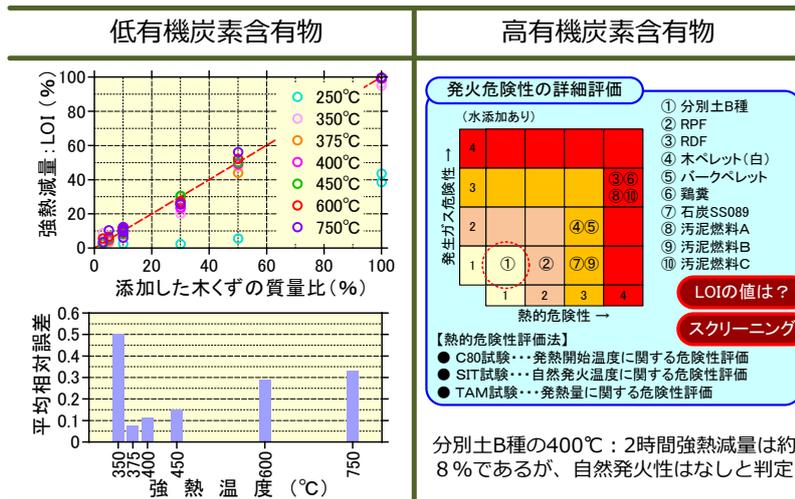
発熱はどのような条件でどこから始まるのか。

**【研究方法】** サブテーマ1と2に分けて検討



- 災害廃棄物由来の復興資材による環境負荷を考慮した適正な有効利用の促進
- 復興資材の有機炭素含有量の適正な評価方法の提案
- 発火危険性判定に基づく、災害廃棄物仮置場、復興資材ストックヤードの適正管理への提案

**【研究成果】** 全体成果の抜粋



(1) 温度○○℃、○○時間の強熱減量値によって、分別土に含まれる木くず等の混入率を評価できる ⇒ 温度400±25℃、2時間強熱試験

(2) 上記の強熱減量○○%以下であれば環境保全上の支障は生じない ⇒ 分別土に対して水質汚濁の規定は必要無い

(3) 上記の強熱減量○○%以下であれば堆積物の高さ制限を解除できる ⇒ 少なくとも8%までは高さ制限を解除可能

アウトカム

将来発生するであろう巨大災害時における、復興資材の品質管理方法とその判定値を提案し、迅速な有効利用を促進させると同時に、災害仮置場、復興資材ストックヤードの堆積高さの適正化に貢献

[英文概要]

## Evaluating of Organic Carbon Content in Recovered Soil Materials Derived from Disaster Waste

Principal Investigator: Kazuto ENDO  
Institution: Center of Material Cycles and Waste Management  
Research,  
National Institute for Environmental Studies  
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2228 / Fax: +81-29-850-2016  
E-mail: k-endo@nies.go.jp

Cooperated by: Kogakuin University, Nagasaki University, Ritsumeikan University, Chiba Institute of Science

[Abstract]

Key Words: Organic carbon content, Loss of ignition test, Ignition temperature, Recovered soil derived from disaster waste, Spontaneous combustion

Recovered soil is produced by intermediate treatment of a mixture of tsunamiite, impurities, and disaster waste. Organic matter such as small particles of wood chips and vegetation remains in the recovered soil. In geotechnical uses of the recovered soil, the organic matter may cause generation of gases and organic polluted water, and ground settlement. The organic matter will be one of the obstacle to the geotechnical uses.

Loss on ignition (LOI) test is, in general, adopted as a test method of the organic carbon content (OC). The ignition temperature is normally 600 degree Celsius and above. The LOI of 600 degree Celsius and above would give results which are higher than the actual OC. The reason is decarbonation and dehydration of crystal water. The overestimation of the OC will make the uses of the recovered soil more difficult. The aim of this research is to develop a test method that will give quickly an accurate measurement of the OC in the recovered soil.

Many kinds of soil samples were utilized for a batch of LOI tests in the range of 150 to 750 degree Celsius, in order to find optimal temperature of ignition. Sequential ignition tests were simultaneously performed to evaluate an influence of the ignition time on the LOI.

We recommend LOI test of 400 degree Celsius and 2 hours of ignition time (LOI400). We deducted those numbers from the results of both the batch and sequential LOI tests. The LOI400 can avoid the destruction of kaolinite structure and avoid volatilizing carbonate in dolomite. The relationship between the LOI400 and the leaching behavior of organic pollution was also evaluated. It was, however, impossible to find good correlation between them. From obtaining high organic pollution from the natural soil which are used for usual construction work, we

recommend to ignore organic pollution in the recovered soil. Considering the gas generation and the leaching tests, the recovered soil containing the OC less than 8 percent in the LOI400 test can be used as a geotechnical material, with no treatment or no improvement.

No risk of spontaneous combustion of the recovered soil was observed. Thermal analysis using TG-DTA, C80, MS80, and TAM was performed. Two pilot scale tanks were used for simulation test, one using wood chips and second one using mixture of decomposed granite soil with wood chips (3 percent of mass).