

論文 湿式分析と TG-DTA による CO₂ 含有率評価に関する検討

鈴木好幸*1・山本 武志*2・小山 拓*3・野口貴文*4

要旨：本研究では、JCI「カーボンリサイクル評価方法の JIS 開発に関する調査委員会」において発案され、標準化に向けた検討が進められている湿式分析によるコンクリートおよびセメント系材料を対象とした CO₂ 含有率の測定結果を蓄積し、TG-DTA との比較を行った。また、TG-DTA における試験条件や装置の構造形式による影響を明らかにするためにラウンドロビンテストを実施した。その結果、湿式分析では装置構成に起因する流量調整を適切に行うことで安定した評価が可能で、TG-DTA の結果と高い相関があることが確認できた。また、TG-DTA における評価結果は、脱炭酸による温度範囲の設定が重要であり、550～900℃の範囲では過大評価となる可能性があることが確認された。

キーワード：CO₂ 含有率, 湿式分析, TG-DTA, 再生骨材, ラウンドロビンテスト

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けた対応が世界的な潮流となっており、2050 年までのカーボンニュートラル実現を表明する国と地域は我が国を含めて 120 を超えている¹⁾。カーボンニュートラルの達成には、全ての CO₂ 排出源の脱炭素化が必要だが、主要な排出源の一つであるセメント・コンクリートの生産工程における排出量は全世界で排出される CO₂ の 8%程度に相当するとされ、今後も世界規模での人口増と都市化によるコンクリート需要の増加を踏まえると、セメント・コンクリート分野における CO₂削減に向けた革新的な取組みが急務である。

一方で、セメントを使用したコンクリートをはじめとするセメント系材料やその副産物は、使用される段階や細かく粉砕される工程等において自然に CO₂ を吸収することが知られている。こうした特性を踏まえて、回収した CO₂ を用いて人為的な炭酸化養生を行うことでセメント系材料中に CO₂ を固定化させる炭素回収利用技術 (CCU) に関する検討が世界中で意欲的に進められている^{例えば 2～4)}。しかしながら、セメント系材料が使用段階で固定化した CO₂ 量の効果については、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) において認められておらず、また CO₂ 含有率の評価方法の標準化も今後の課題といえる。

セメント・コンクリート分野で用いられる CO₂ 含有率の測定は、熱重量-示差熱同時分析 (TG-DTA) が多く実施されている。しかしながら、TG-DTA はその測定原理から、コンクリートのような複合系材料の場合には、使用材料由来の多様な反応が連続的に生じることから CO₂ 量のみを分離して定量することが難しく、その評価精度には限界がある。そこで近年では、CO₂ 含有率のより精度の高い評価に向けた検討も積極的に進められている。

梅津ら⁵⁾は、5%CO₂濃度の促進炭酸化後のセメント硬化体に対して、全有機炭素 (TOC) 分析装置による全炭素 (TC) と熱重量分析 (TG) の定量結果の比較を行っており、TG により定量した結果から得られる CO₂ 含有率よりも TC による CO₂ 含有率のほうが大きな値を示す傾向があることを報告している。なお、その際の温度範囲は、DTG 曲線の変曲点から求めており、従来の 600～800℃の一義的な温度範囲での定量と比べて 5%程度小さな値であることが示されている。

安田ら⁶⁾は、炭酸化を受けたセメント系材料中の CO₂ 含有率について、TG-DTA、クローメーターおよび TOC 分析装置を用いた評価方法の比較検討を行っている。その結果、TG-DTA では、DTA 曲線から脱炭酸温度を決定する定量手法では正しく評価されない CO₂ が存在することや、Ca(OH)₂ 含有量が多い試料では、500℃付近の脱水反応による質量減少が脱炭酸で発生した CO₂ として加算されることで、CO₂ 含有率を過大に評価する可能性があるなど、TG-DTA 評価における課題が整理されている。一方で、クローメーターおよび TOC 分析装置から求めた CO₂ 含有率是一对一で対応し、精度が良い定量が可能であることが報告されている。ただし、TOC 分析装置やクローメーターをはじめとする高度な機器分析を用いた CO₂ 含有率の評価方法は、分析機器そのものが汎用的ではないことや、機器依存の評価が前提となるため標準化が難しいといった課題がある。

このような背景から、2021 年に経済産業省の委託を受けて日本コンクリート工学会 (JCI) に「カーボンリサイクル評価方法の JIS 開発に関する調査委員会」(委員長：野口貴文) が設置され、特殊な分析装置を要せず、一定の精度において CO₂ 含有率を評価可能な分析方法を確立

*1 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部 博士(工学)(正会員)

*2 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 構造・耐震工学研究部門 博士(工学)(正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 修士(工学)(正会員)

*4 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 教授 博士(工学)(正会員)

することを目的として、JIS R 9101 で規格化されている水酸化ナトリウム溶液吸収-塩酸滴定法を参考にした湿式分析による評価方法について発案・検討がなされた。その後「カーボンリサイクル評価方法の JIS 原案作成委員会」にそのまま移行し、同方法の標準化に向けた検討が進められている。

本研究では、上記委員会にて発案された湿式分析により各種コンクリートおよびセメント系材料を対象としたCO₂含有率の測定結果を蓄積し、TG-DTA との比較を行った。また、PP 繊維や天然繊維などの有機系材料を含むコンクリートおよびセメント系材料の評価結果に関して考察した。さらに、精度面の課題はあるものの、汎用的な評価方法として期待される TG-DTA における試験条件や装置の構造形式による影響を明らかにするために、ラウンドロビンテストを実施した。

2. 試験概要

2.1 分析試料

本研究で対象とした分析試料を表-1 に示す。分析を実施した試料は、一般的なコンクリートや PP 繊維、天然繊維などの有機系材料を含むコンクリートに加え、スラッジケーキ、再生骨材、生コンクリートに粒状化材料を混入して造粒化させた再生骨材（粒状化再生骨材）などのセメント系材料である。試料は天然資源由来のCaCO₃が多く含まれるもの、人為的に炭酸化養生を行うことでCaCO₃の生成を促進させたものなど多様な条件の試料を対象とした。なお解体ガラ由来の再生骨材に関しては、原コンクリートの種類は特定していないが、不純物量試験においてプラスチック片や木片などの有機系不純物が含まれていないことを確認している。

2.2 試料の調製方法

試料の調製方法を表-2 に示す。試料調製では、極力対象サンプルの素材構成がばらつかないように留意し、コンクリートの場合には円柱供試体（直径 10cm×高さ 20cm）やコア供試体（直径 10cm×高さ 10～20cm）を 1

サンプルにつき 1 本用いて、各セメント系材料の場合には、四分法や試料分取器で縮分した試料を 2kg 程度用いた。その後、粉碎・縮分・混合により所定の量まで均一に調製をするが、粉碎後に試料の比表面積が増大することで周囲のCO₂と反応する影響を極力防ぐために、粗粉碎後すぐにアセトン浸漬をし、6 時間以上脱水処理を行った後、真空乾燥装置でアセトンと自由水を除去した。その後、ボールミルで 100μm 以下の粒度まで微粉碎・縮分・混合し、分析用試料とした。繊維が含まれる試料については、ボールミルで繊維を完全に破碎することが困難だったため、メノウ乳鉢により目視で繊維形が確認できなくなるまで追加粉碎をしている。なお、粉碎・縮分・混合作業は大気中で実施したが、微粉碎前にアセトンおよび真空乾燥により試料中の自由水を脱水することで調製工程中の炭酸化を抑制するとともに、調製作業や分析時以外の試料は真空デシケーターの中で保管することで、極力試料の炭酸化による影響を受けないように配慮した。

表-1 分析試料

種類	備考	サンプル数
コンクリート	Nセメント-繊維なし W/C:65%,S/a:44%	7
	Nセメント-PP繊維 W/C:65,70%,S/a:45,60%, 繊維混入率:0.5,1vol%	7
	Nセメント-天然繊維 W/C:45,55,65%,S/a:40,42,44%, 繊維混入率:1vol%	16
	BBセメント-繊維なし W/C:55%,S/a:44,48%	11
	BBセメント-PP繊維 W/C:55%,S/a:44,48,52,60%, 繊維混入率:0.5,1,2vol%	10
	ポーラスコンクリート 5mmTOP (7号砕石) , 13mmTOP (6号砕石)	17
セメント系材料	スラッジケーキ 生コン工場から採取	14
	再生粗骨材 解体ガラ由来	24
	生コン由来	72
	再生細骨材 解体ガラ由来	24
	粒状化材料: 高分子ポリマー系	9
	粒状化材料: セルロース系	6
計		217

表-2 試料の調製方法

手順	調整方法
1	10mm以下程度まで粗粉碎
2	縮分器にて1/8もしくは1/16まで縮分
3	アセトンに6時間以上浸漬
4	真空乾燥装置でアセトンと自由水の除去
5	100μm程度以下までボールミルで微粉碎・混合
6	※試料の状態をみて必要に応じてメノウ乳鉢で追加粉碎
7	真空デシケーター内で分析まで密封容器で保管

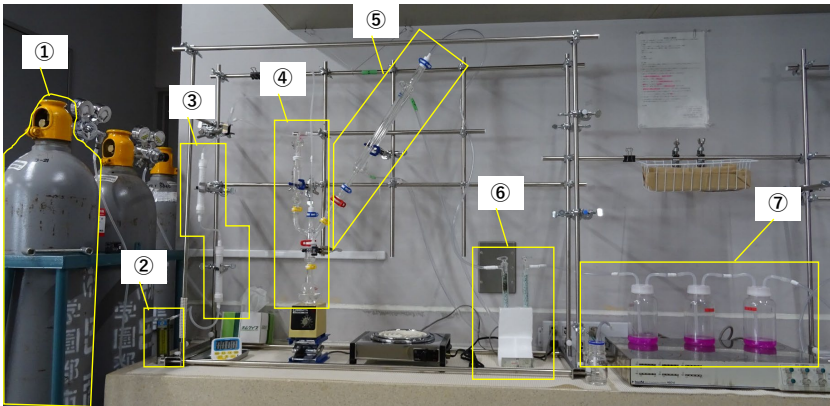


図-1 湿式分析装置全景と資材・器具構成

番号	資材・器具
①	N ₂ ガス
②	流量計
③	CO ₂ 吸収材
④	反応器
⑤	冷却管
⑥	亜硫酸水素ガス捕集材
⑦	CO ₂ 捕集瓶 (0.05mol/L NaOH 50ml)

なお、本試料調製方法についても、前述の委員会にて検討された方法に準じて行った。

2.3 測定方法

(1) 湿式分析

湿式分析は、試料を塩酸で分解し、生成した CO_2 を水酸化ナトリウム・塩化バリウム溶液中に導入して吸収させ、塩酸標準溶液で滴定する分析方法である。

装置全景と構成を図-1 に示す。本測定は、試料分解フラスコに投入した試料 1g を塩酸で分解させ、生成させた CO_2 を吸収びん中における水酸化ナトリウム・塩化バリウム溶液の表面で吸収させる原理のため、配管内を通す窒素ガスの流量管理が非常に重要になる。流量が多すぎる場合、3本の吸収びんで CO_2 が完全に吸収されずに排出されてしまい、流量が少なすぎる場合、生成させた CO_2 が経路内で滞留し、吸収びんに到達できないといった影響により正しく評価できないことが想定される。そのため、測定にあたっては、事前に高純度の CaCO_3 の試薬を用いて回収率を確認しながら適切な流量に調整し、本装置においては 32~33 mL/min 程度の流量で回収率が安定することが分かった。その後は適切な頻度で回収率の確認を行いながら測定を実施したが、回収率は概ね $99 \pm 2\%$ 程度で安定していた。滴定は、3本の吸収びん中の水酸化ナトリウムに指示薬としてフェノールフタレインを数滴加え、塩酸滴定液 (0.10 mol/L) を加えながら指示薬の赤色が完全に消えた時点を終点として判定し、試料中の CO_2 含有率は次の式(1)により算出した。

$$\text{CO}_2[\%] = \frac{(V_B - V_S) \times \frac{c}{1000} \times \frac{1}{2} \times 44.01}{m} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 V_B ：空試験の塩酸の使用量 [mL]， V_S ：試料の塩酸の使用量 [mL]， c ：塩酸の濃度 [mol/L]， $1/2$ ：塩酸と炭酸の価数の違いによる係数，44.01： CO_2 の分子量 [g/mol]， m ：試料の量り採り量 (g)

(2) TG-DTA

TG-DTA (日立ハイテック EXSTAR TG/DTA7200) は、試料量約 50mg を用いて、窒素雰囲気下 (N_2 ガス流量 70ml/min) において昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ で 1000°C まで昇温を行った。 CO_2 含有率の評価に関して、本測定では 600°C 付近にピークがある⁷⁾とされるアラゴナイトやバテライトからの脱炭酸も評価対象に含めることとしたが、

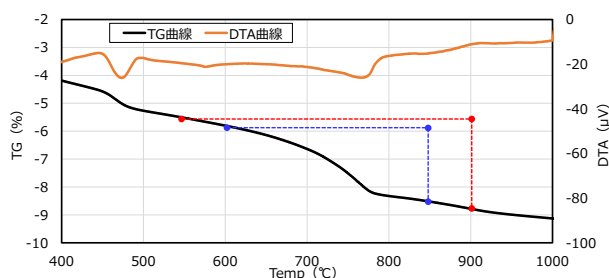


図-2 脱炭酸による質量減少の温度範囲

500°C 付近では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水反応による質量減少と重複することが懸念⁹⁾されるため 550°C を脱炭酸反応の開始温度とした。終了温度については、文献 6) で報告されるように、 CO_2 含有率が高い試料では CaCO_3 の脱炭酸による CO_2 分圧の影響により反応の終点が高温側にシフトすることが懸念されることから 900°C とした。以上のとおり、本測定においては図-2 に示すように、 $550 \sim 900^\circ\text{C}$ の温度範囲における質量減少量を CaCO_3 の脱炭酸反応による減少と仮定して定量を行った。また、上記温度域では過大評価となる可能性もあることから比較用に $600 \sim 850^\circ\text{C}$ での定量も行った。

3. CO_2 含有率測定結果

3.1 湿式分析と TG-DTA の比較

図-3 に湿式分析と TG-DTA の CO_2 含有率の全試料の比較結果を示す。 $600 \sim 850^\circ\text{C}$ の温度範囲で定量した TG-DTA の結果は、湿式分析に対して概ね一対一で高い相関が認められる。一方、 $550 \sim 950^\circ\text{C}$ の温度範囲では同様の高い相関は認められるものの若干 TG-DTA による結果が大きくなる傾向にある。

図-4～図-6 に、各セメント系材料の種類ごとの比較結果を示す。スラッジおよび再生骨材は、 $600 \sim 850^\circ\text{C}$ の結果、 $550 \sim 950^\circ\text{C}$ の結果ともに湿式分析と高い相関を示している。粒状化再生骨材についても、 $600 \sim 850^\circ\text{C}$ のばらつきが若干大きくなっているが、 $550 \sim 950^\circ\text{C}$ の決定係数は高く、他の材料と同様の傾向が確認された。今回使用した粒状化再生骨材は、製造工程で投入される粒状化処理剤に植物由来の成分や高分子ポリマーなど、有機系の材料が含まれるが、本測定の範囲では評価結果に及ぼすような顕著な影響は確認されなかった。

図-7～図-9 に各コンクリート試料の比較結果を示す。各コンクリート試料においても湿式分析と TG-DTA に相関が認められるが、セメント系材料の測定結果に比べて、湿式分析と TG-DTA の誤差が大きくなっている。また、 $600 \sim 850^\circ\text{C}$ の定量結果においても TG-DTA の測定結果が大きな値を示す傾向が確認される。特に N セメントのコンクリートで PP 繊維や天然繊維を使用した試料の測定結果は、TG-DTA の温度設定域によって湿式分析との測定誤差が大きく湿式分析の結果に比べて 2% 近い

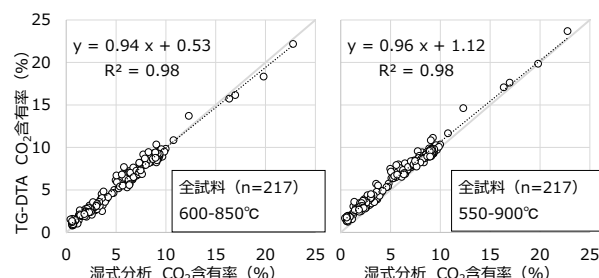


図-3 湿式分析と TG-DTA の比較 (全試料)

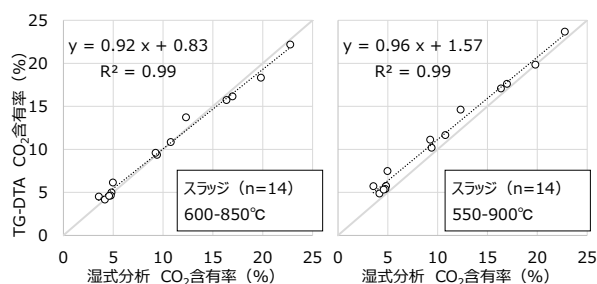


図-4 湿式分析と TG-DTA の比較 (スラッジ)

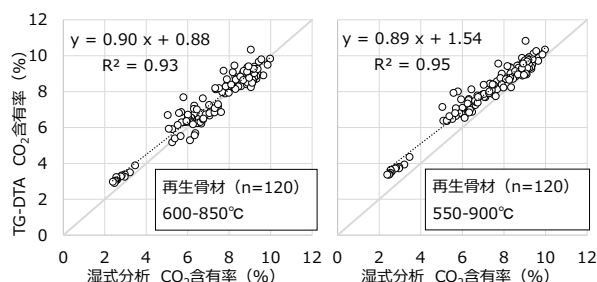


図-5 湿式分析と TG-DTA の比較 (再生骨材)

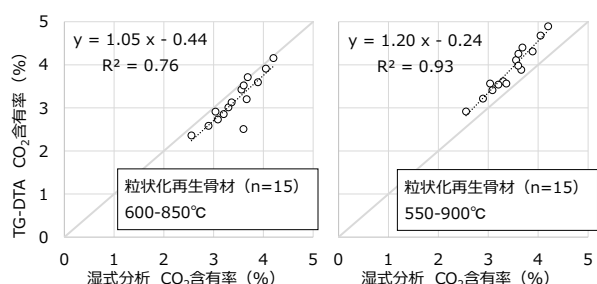


図-6 湿式分析と TG-DTA の比較 (粒状化再生骨材)

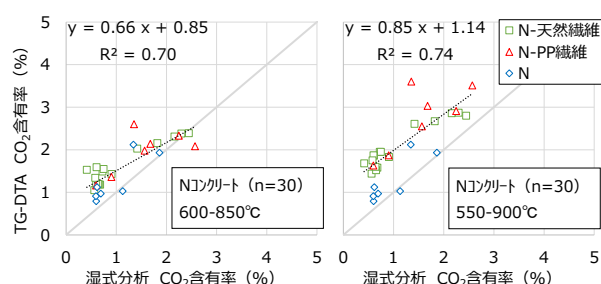


図-7 湿式分析と TG-DTA の比較 (N コンクリート)

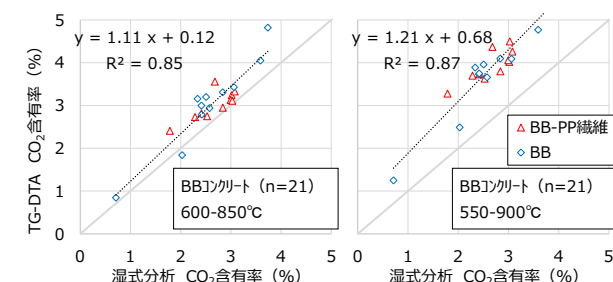


図-8 湿式分析と TG-DTA の比較 (BB コンクリート)

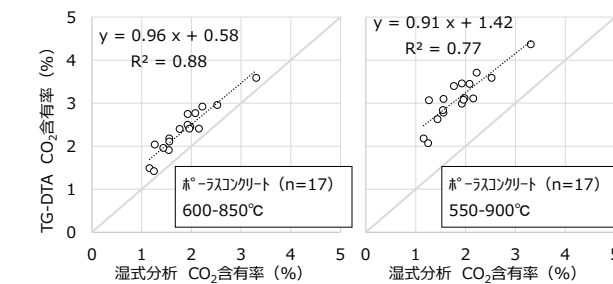


図-9 湿式分析と TG-DTA の比較 (ポーラスコンクリート)

差が生じている試料もあることから、PP 繊維や天然繊維といった有機系材料が測定結果に影響を及ぼした可能性も考えられる。今回使用した PP 繊維の主な構成素材であるポリプロピレンなどの高分子化合物の熱分解特性は周知のとおりであり、窒素雰囲気下においても熱分解による質量減少が 500℃以内に終了することが報告⁸⁾されている。また、天然繊維の主成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンに関しても同様に、熱分解による質量減少のほとんどは 500℃以内に終了する。リグニンに関しては、窒素雰囲気下では 500℃以降も緩やかにガス化に伴う質量減少が続く現象も報告⁹⁾されているが、その減少量は僅かであり、コンクリート中に使用される量を考慮しても今回設定した温度範囲の質量減少率に直接影響を及ぼすことは考えにくい。よって、有機系材料が TG-DTA の CO₂ 含有率の測定結果に及ぼす影響は、有機系材料の熱分解による質量減少が、脱炭酸と想定した温度範囲と重複した影響によるものではなく、例えば、分析中に有機系材料のガス化により生成した CO₂ がコンクリート中の Ca(OH)₂ と反応して新たに CaCO₃ を生成するなどといった何かしらの反応に起因することが推察される。このような現象に関する詳細な検討は今後の課題

としたい。BB を使用したコンクリートにおいては、高炉スラグに由来する硫黄及び低次の硫酸化合物の影響が、ポーラスコンクリートでは混和材料の使用量が多いことなどによる影響が懸念されるが本測定の範囲においては湿式分析と TG-DTA の誤差が大きくなるような影響は認められなかった。

以上より、セメント系材料試料に比べてコンクリート試料は湿式分析と TG-DTA の測定結果の誤差が大きく、TG-DTA の測定値がより大きな値を示す傾向があり、繊維等の有機系材料が含まれる場合にはその傾向が顕著になる可能性がある。

3.2 TG-DTA による評価の検討

(1) ラウンドロビントスの概要

前節の湿式分析と TG-DTA の比較結果からも明らかのように、TG-DTA の CO₂ 含有率定量的ための温度範囲の設定は測定結果および定量精度に直結する非常に重要な要素となる。さらに TG-DTA は、装置種類によっていくつかの測定方式があるため、装置種類・測定方式によっても、最適な条件が異なる可能性が考えられる。

そこで、同一条件で調製した再生骨材試料を用いて、表-3 に示す複数の試験機関におけるラウンドロビント

ストを実施し、装置仕様と測定条件が測定結果とばらつきに及ぼす影響について検討した。TG-DTA の代表的な構造として、吊り下げ式、水平式、上皿式の天秤方式があるが、今回は機関 A と機関 C が水平式、機関 B と機関 D が上皿式の装置である。CaCO₃ の脱炭酸反応の温度域の設定は、前節で実施した条件と同じく、4 機関とも 550～900℃および 600～850℃の 2 つの条件で実施した。試験に使用した試料は、残コンクリート・戻りコンクリートを硬化後に粉砕・分級して製造された再生粗骨材で、①初期値用と②CO₂ 濃度 5% の中性化促進槽内で 3 日間炭酸化養生を行った炭酸化養生後の 2 種類である。

(2) 試験結果

試験結果を図-10、図-11 に示す。比較用の参考値として、同じ試料を用いて実施した湿式分析および TOC 分析装置による全炭素量 (TC) の測定結果を併せて示している。TG-DTA の温度範囲の影響は、前節までの傾向と同様にいずれの機関での結果においても 600～850℃に比べて温度範囲が広い 550～900℃の測定結果が大きくなっている。ばらつきは、機関 A、D に比べて、機関 B、C が大きくなっていることが分かる。機関 B、C と同じ天秤式の TG-DTA を用いて、堆積泥を対象に窒素ガス流量の検討を行っている文献 10) によると、装置下部にある天秤部が窒素ガスで満たされてから燃焼部に窒素ガスが充填されるため、窒素ガス流量が低い場合には試料を設置している燃焼部が全て窒素ガスで置換されずに測定結果に影響を及ぼす可能性が報告されている。このことから、本測定においても流量の影響を確認するため、機関 B の流量を 250mL/min に増加して 550～900℃の温度範囲における再測定を実施した結果を図-10 に併せて示すが、標準偏差が 0.57 から 0.17 に小さくなったことから流量調整により測定精度が向上したことが伺える。このように装置の構造形式により留意すべき測定条件が存在することが本結果においても確認できた。

また、今回機関 A のみ試料量が約 50mg と他の 3 機関に比べて多いことから、試料量の影響を確認するため機関 A において試料量を 20mg に減らして再測定を実施した結果も図-10 に示している。その結果、平均値、標準偏差ともに試料量の影響はほとんど認められなかった。

表-3 分析機関の装置仕様と測定条件

	機関A	機関B	機関C	機関D
装置名	日立ハイテクサイエンス TG/DTA7200	Bruker AXS TG-DT2000SA	Bruker AXS	Rigaku TG-DTA8121
天秤形式	水平差動型示差熱天秤	上皿式差動型示差熱天秤	上皿式差動型示差熱天秤	水平差動型示差熱天秤
N ₂ ガス流量 (ml/min)	70	50	100	80
昇温速度 (℃/min)	20	20	20	20
試料容器材質	Pt	アルミナ	Pt	Pt
試料量 (mg)	約50	約20	約20	約20

一般的には試料量が多いほど試料内の温度分布が大きくなり分解能が低下することや、発生ガスの分圧の影響を受けやすくなることで熱変化のピークが高温側にシフトすることなどが知られている¹¹⁾。図-12 に本測定における試料量の違いによる TG 曲線の測定結果の一例を示す。本測定でも試料量 50mg の結果が 20mg に比べて高温側にシフトしていることが分かるが、質量減少率には大きな差はなく、今回設定した 550～900℃の温度範囲では質量減少率から定量した CO₂ 含有率評価結果には影響がなかったことが確認できる。ただし、より厳密な温度範囲を設定して評価を行う場合には注意が必要である。

湿式分析と TC を比較すると、CO₂ 含有率の平均値はほぼ同程度であり、ばらつきも少ないことから両測定とも高い精度で CO₂ 含有率を評価できているものと思われる。各機関の TG-DTA の結果は、前節の傾向と同じように、600～850℃の温度範囲の結果がいずれの機関での結果においても湿式分析と近い値になっており、550～900℃の設定では CO₂ 含有率を過大評価してしまう可能

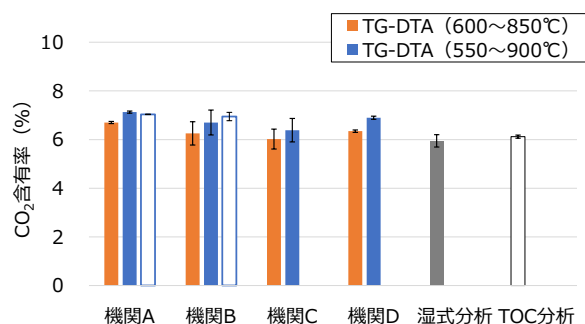


図-10 ラウンドロビンテスト結果 (①初期値用)

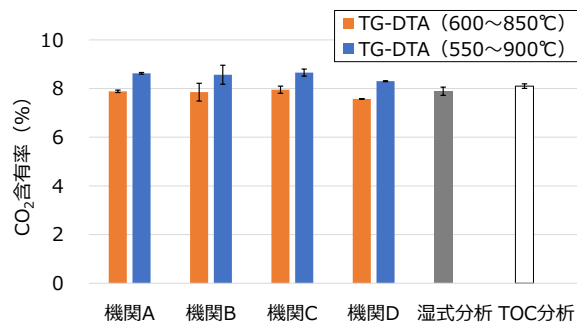


図-11 ラウンドロビンテスト結果
(再生骨材 ②炭酸化養生後)

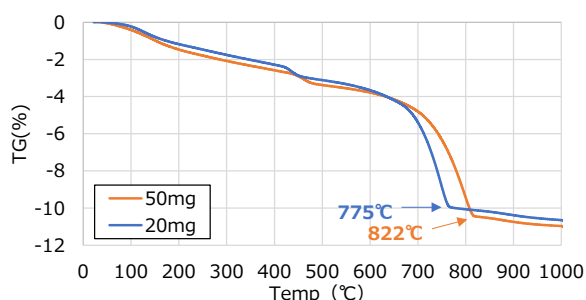


図-12 試料量の違いによる TG 曲線測定結果

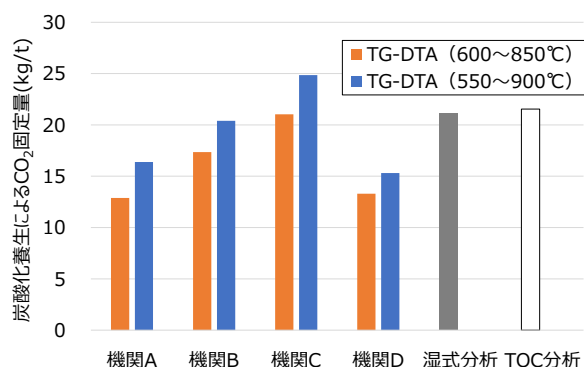


図-13 炭酸化養生による CO₂ 固定量評価

性が本ラウンドロビンテストの結果からも確認された。

図-13 に CO₂ 含有率の測定結果から評価した初期試料に対する CO₂ 固定量を示す。なお、CO₂ 固定量は真空引き後の乾燥状態を基準として初期の再生骨材 1t あたりに固定化された値を示しており、CO₂ 固定による質量増加分を考慮した炭酸化後と初期値の CO₂ 含有率の差で算出した。CO₂ 固定量は、湿式分析と TC による評価ではいずれも 21 kg/t 程度であったが、TG-DTA では機関および温度条件により 13~25 kg/t と評価結果に差がみられた。このように、人為的な炭酸化養生による CO₂ 固定量を高い精度で評価するためには、より精度よく安定した測定結果に基づく評価が必要であり、評価目的に応じて適切な測定方法を選択する必要があると考える。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 湿式分析では装置構成に起因する流量調整を適切に行うことで安定した評価が可能で、TG-DTA の結果と高い相関があることが確認できた。
- (2) セメント系材料に比べてコンクリートは湿式分析と TG-DTA の測定結果の誤差が大きく、TG-DTA の測定値がより大きな値を示す傾向があり、繊維等の有機系材料が含まれる場合にはその傾向が顕著になる可能性がある。
- (3) 有機系材料が TG-DTA の CO₂ 含有率の測定結果に及ぼす影響は、分析中に有機系材料のガス化により生成した CO₂ がコンクリート中の Ca(OH)₂ と反応して新たに CaCO₃ を生成するなどといった何かしらの反応が生じていることが推察される。
- (4) TG-DTA は、装置の構造形式により留意すべき測定条件が存在し、温度範囲の設定と同様に測定結果と精度に影響を及ぼす重要な要素であることが確認された。
- (5) TG-DTA における CO₂ 含有率の評価では、600~850℃の温度範囲の結果が湿式分析と近い値になっており、550~900℃の設定では CO₂ 含有率を過大評

価してしまう可能性がある。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の業務委託 (JPNP21023) の一環として行ったものです。湿式分析の測定にあたってセメント協会各位にご指導・ご助言を頂きました。TG-DTA の測定では東京都立大学の上野准教授にご支援頂きました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：エネルギー基本計画, 2022.10
- 2) 取達剛, 関健吾, 渡邊健三, 坂井吾郎：炭酸化養生による CO₂ 吸収型カーボンネガティブコンクリートの開発と今後の展開, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.813-818, 2021.9
- 3) Ke-yu Chen et al. : An overview on the influence of various parameters on the fabrication and engineering properties of CO₂-cured cement-based composites, Journal of Cleaner Production, p.8, 2022.9
- 4) 山岸弘大：総合商社のカーボンリサイクルへの取り組みと海外技術の紹介, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.764-768, 2021.9
- 5) 梅津真見子, 黒川大亮, 森泰一郎, 坂井悦郎：セメント硬化体の CO₂ 吸収と生成物の変化, Cement Science and Concrete Technology, Vol.75, pp.34-41, 2021
- 6) 安田遼介, 島崎 大樹, 七澤 章, 森 泰一郎：炭酸化を受けたセメント系材料中の CO₂ 含有率評価に向けた分析方法の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.75, No.1, 2021
- 7) 石川俊介, 丸山一平, 栗原諒, 江藤淳二：ガンマ線環境下にある早強ポルトランドセメントペーストの中性化に関する研究, Cement Science and Concrete Technology, Vol.71, pp.240-247, 2017
- 8) 武内次夫, 斎藤謙：熱天秤および示差熱分析計によるポリプロピレンの熱分析, 工業化学雑誌, 67 巻, 6 号, 1964
- 9) 森田明宏：木質バイオマスのガス化過程における基礎熱分解特性とその予測手法の検討, 高温学会誌, 35 巻 2 号 pp. 85-90, 2009
- 10) 中下慎也, 下方幹治, KIM Kyeongmin, 日比野忠史：堆積泥を対象とした示差熱・熱重量分析の測定条件の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 76 巻 2 号 pp. I_1027-I_1032, 2020
- 11) 中川英昭, 市原祥次：初心者のための熱分析 (1)DTA,DSC の原理と測定法, 熱測定, 7 巻 1 号, 1980