

持続社会建設材料研究室

二酸化炭素をコンクリート材料の高機能化と 物質循環サイクル構築に活かす

大内 雅博

(受領日：2024年5月31日)

高知工科大学 システム工学群 (総合研究所 持続社会建設材料室)

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: ouchi.masahiro@kochi-tech.ac.jp

要約：高知工科大学総合研究所持続社会建設材料研究室は、建設材料を社会課題解決のための技術と位置づけ、土木・建築の枠を超え農学や化学とも連携して新しい建設材料を開発し実用化するための研究を行うことを目的に2020年に設立された。その使命は、信頼性の高いインフラの迅速な整備による防災および生活環境の維持と、コンクリート用原材料のための資源供給確保と使用後の廃棄物問題処理の解決である。研究の進展に伴い、2024年現在の研究テーマは、自己充填コンクリートの汎用化（一般化）、木質バイオマス発電の副産物である木灰のみから成るバイオマスコンクリートの実用化、そして、現行のセメント・コンクリートの物質循環サイクルの確立、の3本柱となった。三者の共通点は二酸化炭素を活用したコンクリートの高機能化、すなわち、カーボンニュートラルを実用に役立てる研究である。本稿では、各テーマの特徴と、設立以来の研究成果、そして今後の展望について述べる。

1. 研究室設置と研究の柱の設定の経緯

1.1 コンクリートの課題・問題点

コンクリートは、土木構造物や建築物に使用されている段階においては優れた材料であると言える。鉄筋と組み合わせることによって弱点である引張強度を補う鉄筋コンクリートは、地震に対しても十分な耐荷力がある。微小な空隙を多く含んだ内部構造から鉄よりも低強度となり、部材厚が大きくなり重量が増すことから、音や熱や振動も遮断する、人間のための空間確保に適した構造材料である。

寸法を小さくするための建設材料の高強度化は、超高層建築物を除けば無用であると言える。建物や、橋梁といった土木構造物など、人間の生存のための空間を小さくすることに意義があるとは言い難いからである。現在のコンクリートは、建設材料として最適な性状を有していると言える。

コンクリートは最も利用されている建設材料である。生コンクリート価格では1m³あたり約2万円、1トンあたりでは1万円を切るほどの安さであり、安定的に入手可能であり、現在の社会におけるインフラ整備はそのことを前提に成り立っている。

コンクリート材料や鉄筋コンクリート部材が開発された20世紀初頭からの社会の変化に伴い、現在のコンクリートの課題・問題点は、供用時の性能ではなく、構造物内での強度発現の前提となる型枠内への振動締固め技能者の不足、そして、コンクリートに用いる原材料の資源確保、に変化したと言える。前者は、直接的には施工に携わる技能者の不足に起因しているが、そもそもはコンクリートの施工（鉄筋を有する型枠内への充填）に振動締固め作業が必要である、コンクリートそのものの性状に原因がある。後者は、コンクリートが自然エネルギー下では物質循環しない特性、すなわち、新たなコン

クリートを製造・施工するためにはあらたな鉱物資源を発掘しなければならない点に由来している。現在、コンクリート材料が徐々に持続的ではなくなりつつあると言える。

もちろん、セメント製造の際に排出される二酸化炭素の削減も喫緊の課題である。この課題と、コンクリートの性状自体を持続的なものにするための技術開発とが有機的に結合するのが望ましい。

1.2 研究室の設置の趣旨

コンクリート材料に持続可能性を付与することは、従来のコンクリート工学の枠組みの延長線上では不可能である。全地球的問題の解決のため、これまでコンクリート工学とは関わりの薄かった分野との連携が必要となってきたといえる。

筆者は、生物材料を活用し化学に裏付けられた、地球環境の維持および天然資源供給の持続性向上に資するコンクリート材料を研究開発することを意図して、高知工科大学総合研究所内に新たな研究室を設置することを2019年に提案し、認められて2020年度に「持続社会建設材料研究室」が活動を開始した。

土木・建築の中の一分野であるコンクリート工学では、従来から「セメント化学」との連携が行われてきた。これは鉱物由来材料を原料とするセメントを中心として取り扱うものである。一方、本研究室では従来のコンクリート工学と、セメント化学に限定しない化学と農学（現生生物由来材料）を連携・融合させる点に特色がある。他に例を見ないものである（表1）。

1.3 研究内容の変遷

設置当初、自己充填コンクリートと木灰コンクリートを研究の2本柱としていた。前者は施工問題の解決、後者は物質循環問題解決のための技術開発である。いずれも高知工科大学のオリジナル研究テーマであるが、両者は独立に研究を行い、相互の連携は無かったと言える。

その状況が変化するきっかけとなったのは、2022年度に着手した、現在の一般のコンクリートであるセメント・コンクリートの物質循環サイクル構築のための研究である。2024年度現在の研究テーマは、自己充填コンクリートの汎用化（一般化）、木質バイオマス発電の副産物である木灰のみから成るバイオマスコンクリートの実用化、そして、現行のセメント・コンクリートの物質循環サイクルの確立、の3本柱となった。そして、三者に二酸化炭素を活用

表 1. 研究室の構成員

氏名	職名	研究課題・役割分担
大内 雅博	システム工学群・教授	研究総括, 自己充填コンクリート, 木灰コンクリート, 廃コンクリートの材料再生
小廣 和哉	理工学群・教授	化学の専門家
堀澤 栄	理工学群・教授	バイオマス材料の専門家
鈴木 卓	システム工学群・准教授	新型コンクリート材料の構造性能
山川 勉 (2024年度~)	総合研究所・客員教授	コンクリート用化学混和剤の専門家
Attachaiyawuth, Anuwat	システム工学群・客員研究員	フレッシュコンクリートの自己充填性能

したコンクリートの高機能化、すなわち、カーボンニュートラルを実用に役立てるという共通点を見出し、連携しながら研究を行うようになった。

以下、当研究室の研究の各柱である3つのテーマについて、それぞれ、研究の特徴と直近4年間（材料再生については2年間）の成果について、章を1つずつ設けて説明する。

2. 自己充填コンクリート

2.1 研究の特徴

自己充填コンクリート（Self-Compacting Concrete; SCCと略）は、振動締固め作業が不要で、鉄筋を有する型枠内に重力の作用のみで充填されるコンクリートである。1988年に東京大学の岡村 甫教授（高知工科大学の第二代学長）が提唱し世界に先駆けて開発に成功した。その特徴は、特殊な材料を使用せず、汎用のコンクリート用材料のみを用いて自己充填性能を付与している点にある。

しかしながら、狭い鉄筋間を重力の作用のみにより、粒径が数cmの粗骨材（いわゆる砂利）を含むフレッシュコンクリート（硬化する前の施工段階のコンクリート）が各構成材料間の変形の一体性を確保する（「材料分離」の防止）ため、比較的安価な骨材を減らし、一方で高価なセメント量を多くする配合、そして、配合設計と製造に新たな技術が必要になることから、材料単価が二倍になってしまい、普及が妨げられて現在に至る結果となってしまった。コンクリート中のセメント量が支配する材料単価と、自己充填性能のレベルとの間にはトレード・オフの関係があると言える。

コンクリート施工に携わる技能者の不足は深刻

化しているため、自己充填コンクリートの必要性自体は認識され、その普及のための研究は高知工科大学以外でも盛んにおこなわれている。しかし、その目的は、価格と性能の間のトレード・オフの関係の中での「最適化」である。地震国日本における密に配置された鉄筋を有する型枠内には、若干の振動締固め作業を必要とするコンクリートが「最適」とであるとされている。

一方、筆者（高知工科大学）は、締固め作業にあまり残すことによる品質確保の不安を懸念すると共に、軽微とはいえ振動締固めが必要なことから、そのための人員確保はむしろ不経済であると見なし、締固め作業不要にこだわり続けた。トレード・オフからの脱却、すなわち、自己充填性能のレベルは維持しつつ安価なものとするための技術開発を行ってきた（図1）。

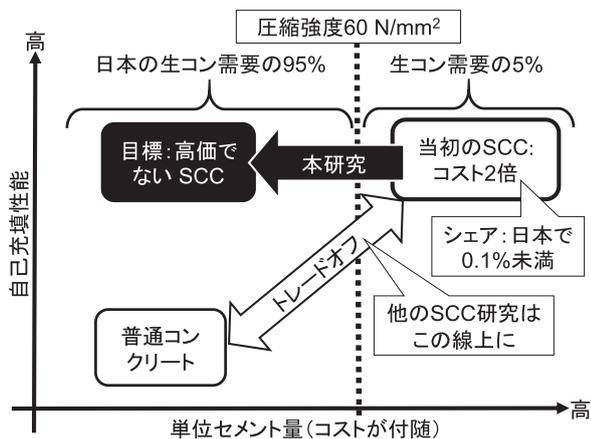


図1. 他研究と比較した高知工科大学における自己充填コンクリート研究の位置づけ

2.2 当研究室としての成果—特に二酸化炭素の活用による高機能化

本学着任以来筆者は一貫して自己充填コンクリートの普及のための研究を行ってきたが、上記のコンセプト（図1）を明示したのは2013年であった。高いセメント量に依存せず、骨材量を普通コンクリート並みに保ちつつ自己充填性能レベルを維持するために新たに用いた技術は、硬化後の凍結融解抵抗性向上のために連行されてきた気泡の微細化・安定化による変形の際の摩擦緩和¹⁾、および、新型増粘剤（セルロースエーテル系）の添加による、低い水セメント比（大きなセメント量）に依存しない、各構成材料間の変形の一体性の確保（材料分離の抑制）²⁾（図2, 3）の2点であった。これを実現したコンクリートには「気泡潤滑型コンクリート

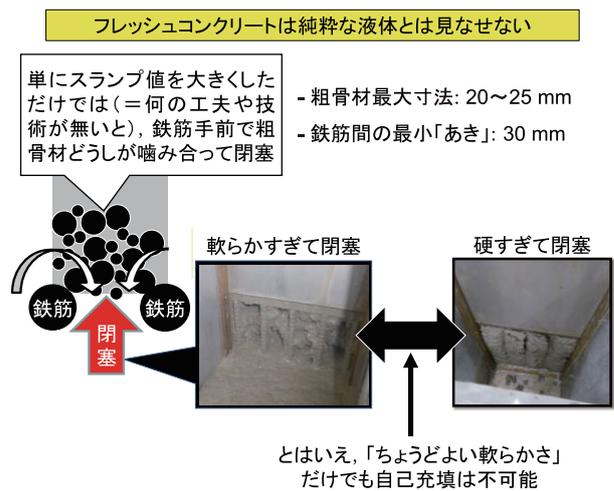


図2. 重力の作用のみでフレッシュコンクリートが鉄筋間を通過することの難しさ

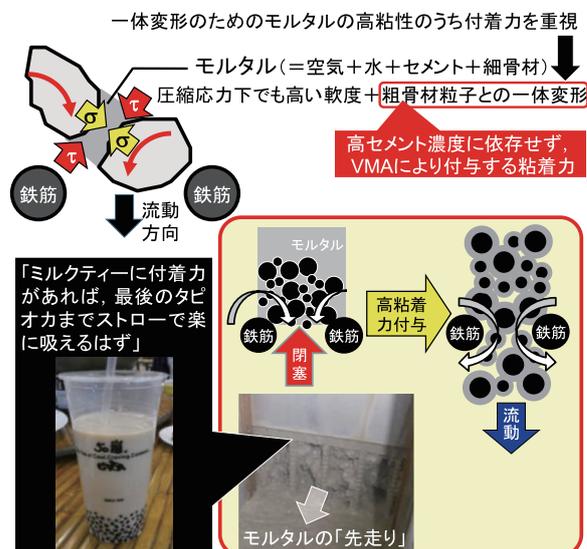


図3. ペースト相に高い付着力を付与することにより骨材との一体変形を可能に→重力の作用のみで間隙通過（自己充填）

（air-SCC; Air-enhanced Self-Compacting Concrete）」と命名した。当初の空気量（コンクリートに占める空気容積）は10%と通常の約2倍であったが、気泡の質向上のため、現在では通常のコンクリート並みの5%に削減することができた。

ここで用いた増粘剤は、自己充填性能の向上に寄与する微細気泡の連行と安定化（合泡の防止）^{3) 4)}、にも効果的であることを確認した。それを確実なものにするための練混ぜ手順を構築した^{8) 9)}。増粘剤の添加は所定の軟度を得るための減水剤添加量の増加をもたらすが、そのことにより自己充填性の経時安定性の向上にも効果があることを確認した¹⁰⁾。

当研究室が発足した2020年度からは、自己充填性能の経時安定性向上に取り組んだ。現在、ほとんどのコンクリートは、施工現場とは別の場所にある市中の生コンクリート工場で製造（練混ぜ）され、時間をかけて運搬される。セメントは水と接した瞬間から水和反応を開始し、コンクリートは硬くなり始める。その現象自体はコンクリートが強度発現するために不可欠なものであるが、コンクリートの現場到着、そして型枠内への打ち込みの際に必要なたらゆる軟らかさが失われる、すなわち型枠内への自己充填が不可能となる。そのための現場における品質管理に割く人員はもはや確保が困難である。

そこで、炭酸水練混ぜにより、フレッシュコンクリートの軟度を維持する技術を開発し、練上がり3時間後まで維持することを確認した（図4）¹⁰。増粘剤の効果も含め、炭酸水練混ぜにより、減水剤の所要添加量の増加が経時安定性を向上させている可能性を得た（図5）。現在、そのメカニズムを解明中である。さらに、炭酸水練混ぜには、低セメント量での自己充填性能付与に効果的な、ペースト相への付着力付与¹¹、さらに、微細気泡の連行に効果があること¹²を確認した（図6, 7）。

一連の研究成果による、自己充填性能レベルを維持しながらの、自己充填コンクリートの配合の合理化、すなわち、セメント量の削減と骨材量の増加の推移を示す（図8）。研究着手当時の骨材量は584L/m³であったが、現在は651L/m³を達成した。目標は普通コンクリートと同程度の664L/m³である。現在、目標達成のための最終段階にある。高機能を維持しながらのセメント量の削減は、コスト削減のみならず二酸化炭素削減にとっても意味がある。

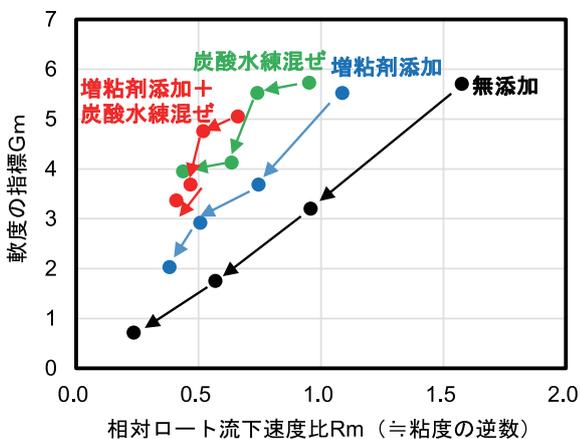


図4. 炭酸水練混ぜにより軟度と粘度の経時安定性の向上が可能に

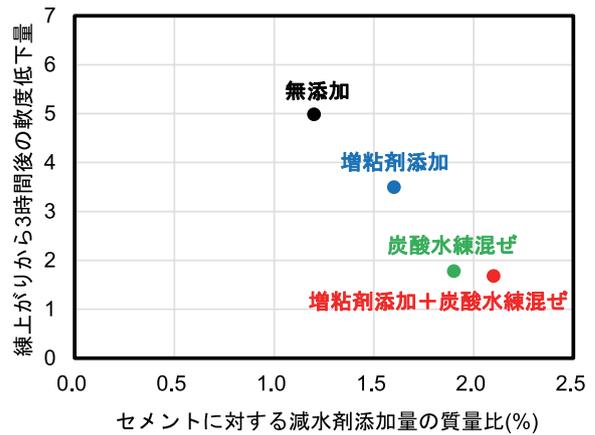


図5. 軟度の経時安定性向上は減水剤添加量の増加による

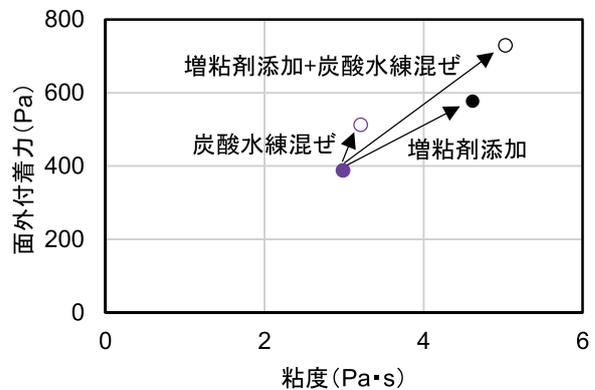


図6. 炭酸水練混ぜにより効率的に付着力を高めることが可能に（万能物性測定装置による測定）

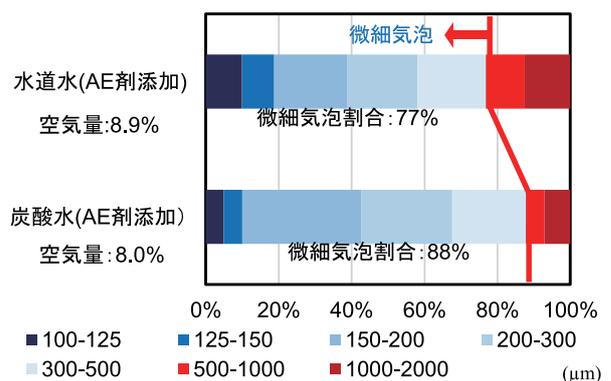


図7. 炭酸水練混ぜにより気泡径が微細化され自己充填性能レベルの向上が可能（浮力法によるフレッシュモルタルからの直接測定）

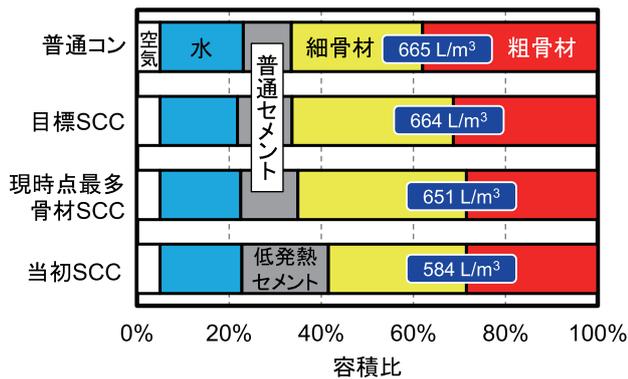


図 8. 単位セメント量削減・骨材量増加の進展

3. 木灰コンクリート

3.1 研究着手の経緯と特徴

2015年に、その設立に高知工科大学も関与したグリーン・エネルギー研究所 宿毛バイオマス発電所（高知県宿毛市）から、木質バイオマス発電の副産物である木灰の活用方法について相談を受けた。高知県は面積の8割以上が森林であり、特にその間伐材を活用したバイオマス発電は、林業の振興と、エネルギー自給率の向上の両面から意義があるので引き受けることにした。

一般に「～灰」のコンクリートへの活用は、いわゆる「混ぜ物」、コンクリート工学の専門用語では混和材としての添加が主である。セメントの増量材としての役割である。しかしながら、3種類の灰を総称した木灰（図9）の中には、セメントの強度発現にも関与する酸化カルシウム（CaO）が含まれ、強アルカリ性を呈する飛灰がある。これを強度発現に活かすことは出来ないか、そして、出来ればセメントを使用せず、水と混ぜて硬化する、コンクリートのような材料とすることが出来ないだろうかと思い、早々に「木灰コンクリート」と命名して研究に着手した。当初、木灰と水を練混ぜただけでは28日圧縮強度が1 N/mm²に満たなかった。補助的に消石灰（水酸化カルシウム Ca(OH)₂）を添加して2 N/mm²を達成したが、副産物の利用のために石灰石を加熱して製造された消石灰を利用するのは適切ではないと判断した。

そこで、飛灰から、発電所における通常の発火プロセスである加湿処理を省き反応性を維持することにより、「未加湿飛灰」とした。さらに細骨材粒子程度の大きさであった「主灰」をボールミルにより粉砕して粉末状に細かくしたものをを用いることにより、28日圧縮強度を3 N/mm²に高めた¹³⁾¹⁴⁾。

以上の経緯からプロトタイプが出来上がった高



図 9. 使用する木灰3種類（実用上は主灰とリドリング灰を合わせて「主灰」と称する）

知工科大学の木灰コンクリートを、他の木灰を利用したコンクリート研究と比較して、その特徴を示す（表2）。セメントも消石灰も使用せず、植物由来材料である木灰のみを使用して水と練混ぜて強度発現するものとして唯一の存在である。

現時点で想定している木灰コンクリートの用途と物質循環サイクルを示す（図10）。木灰は、森林に土壌中和剤やカリウム肥料として一般的に散布されている。その間に1プロセスを挿入し、木灰コンクリートから成る簡易舗装用ブロックを森林作業道に敷設し、天気に左右されにくい、林業作業の効率化のために役立つことを想定している。

表 2. 高知工科大学の木灰コンクリート研究の特徴

	セメント以外の鉱物由来材料 (他産業からの副産物)		木灰(=植物由来材料)使用	
	不使用	使用		
石灰石焼成プロセス有り	セメント使用	一般のコンクリート	「木灰添加型コンクリート」(強度発現はセメント主体)	
		(セメント主体) 一般のコンクリート	「セメント以外が主体」 「環境配慮型コンクリート」	
石灰石焼成無し	セメントも消石灰も不使用		他の木灰コンクリート	当初の木灰コンクリート
			本研究の木灰コンクリート 植物由来材料のみとして唯一	

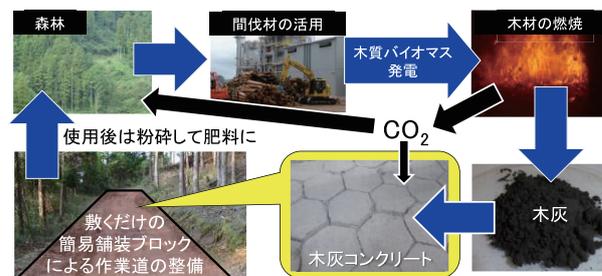


図 10. 木灰コンクリートを用いた作業性の向上による林業活性化

3.2 当研究室としての成果①—新たな手法による強度増進

水と木灰のみを練混ぜることによる強度発現が確認できたところで本研究室が発足した。

それまでの試験結果を基に、木灰コンクリートの効果メカニズムを、飛灰中の酸化カルシウムが接水により生じた水酸化カルシウムが空気中の二酸化炭素と反応して生じた炭酸カルシウムによるもの、と設定した。そこで、木灰コンクリート内部にも二酸化炭素を行き渡らせれば強度増進が可能になると想定し、市販の高濃度炭酸水（濃度約 10 g/L）による練混ぜを行い、その効果を調べた（図 11）¹⁶。バラつきを考慮しても炭酸水練り混ぜには若干の強度増進効果が見られたが、はかばかしいものではなかった。木灰コンクリートの強度発現メカニズムに関して再考の必要性を示唆したと言える。

強度増進のために行ったことは、型枠内への締固め作業に振動機を用いることによる単位水量の低減である（図 12）¹⁷。これにより、当初の最低水比（飛灰に対する水の質量比）0.70 を 0.50 まで下げることが出来るようになり、材齢 28 日圧縮強度が 10 N/mm² を上回ることが出来た。一方、水比を 45% まで下げたものは型枠内への充填不良により強度が著しく低下したが、練混ぜ時間の延長により、平均値で 15 N/mm² を上回ることが出来た¹⁷。

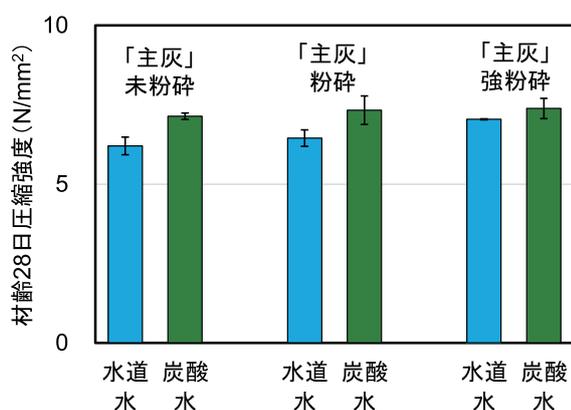


図 11. 炭酸水練混ぜによる木灰コンクリートの強度増進効果

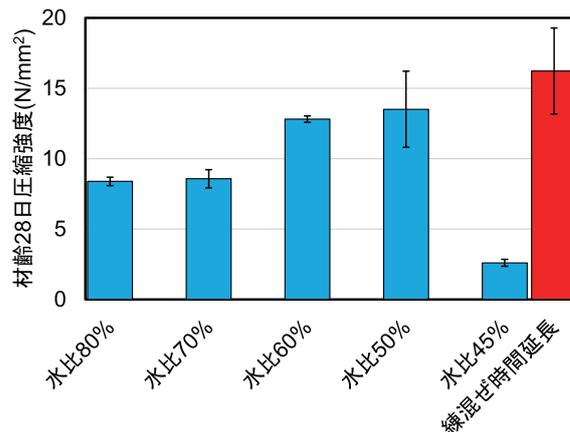


図 12. 水飛灰比（水比）の低下と練混ぜ時間延長による木灰コンクリートの強度増進（「水比」は飛灰に対する水の質量比；すべて粉砕「主灰」使用）

3.3 当研究室としての成果②—強度発現メカニズムの仮説更新

当初、木灰コンクリートの強度発現メカニズムを、飛灰中に含まれている酸化カルシウムが接水することにより生じる水酸化カルシウムの炭酸化によるものと仮定していた。すなわち、炭酸カルシウムが生じ、それが強度発現の源であるとしていた¹⁵。

しかし、強度発現における木灰中の飛灰構成比率には最適値が存在することが分かった（図 13）。すなわち、二酸化ケイ素（SiO₂）を主成分とする「主灰」も強度発現に関与している可能性に思い至った（図 14）。

そこで、主灰を、二酸化ケイ素純度の高い試薬に置き換え、ほぼ同配合で練混ぜたところ、二酸化ケイ素試薬に置換したものの方が高い強度が得られた（図 15）¹⁸。「主灰」単体または二酸化ケイ素試薬と水とを練混ぜても強度発現しないことは確認済みである。本実験にて二酸化ケイ素に置換した配合中の単位水量はむしろ多めであるため、二酸化ケイ素、すなわち、「主灰」が強度発現に寄与している可能性を示唆していると言える。

木灰硬化体を市販炭酸水に 1 週間浸漬し、熱分析によりその前後での水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの含有率を、さらに、比較のため、空气中に放置したものについても測定した。その結果、炭酸水浸漬により炭酸カルシウム含有率は増加したが、その量は水酸化カルシウムの減少量を大きく上回った（図 16）。木灰コンクリート中には、水酸化カルシウム以外のカルシウム供給源の存在を示唆していると言える。今後の詳細な分析が必要である

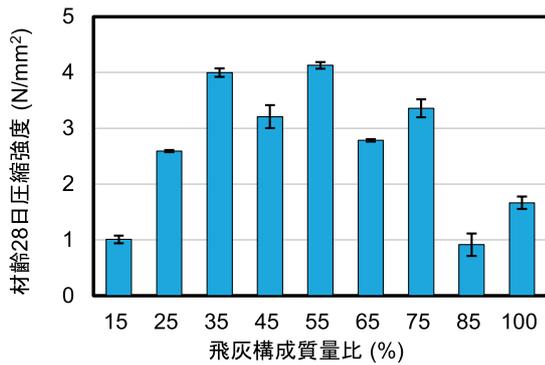


図 13. 飛灰と主灰の構成比率には最適値が存在

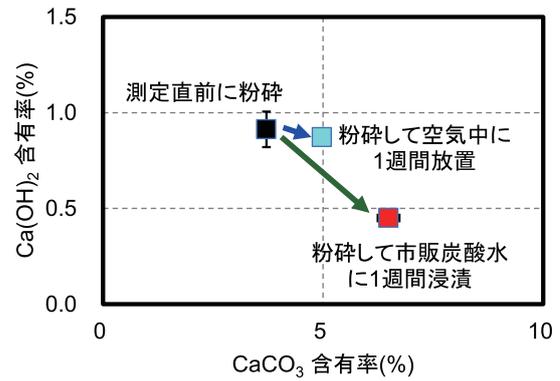


図 16. 木灰硬化体の炭酸水浸漬により水酸化カルシウム減少量以上の炭酸カルシウムが生成→他のカルシウム供給源の存在

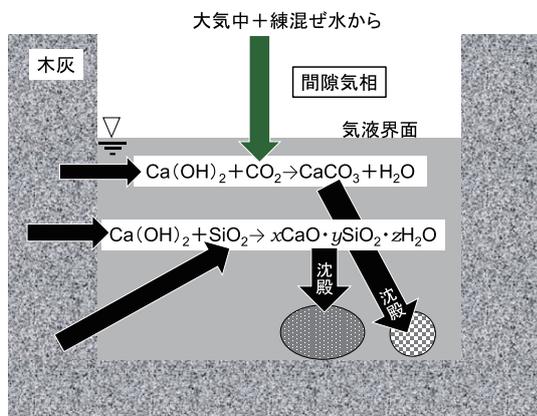


図 14. 木灰コンクリートの強度発現メカニズムに関する新たな仮説

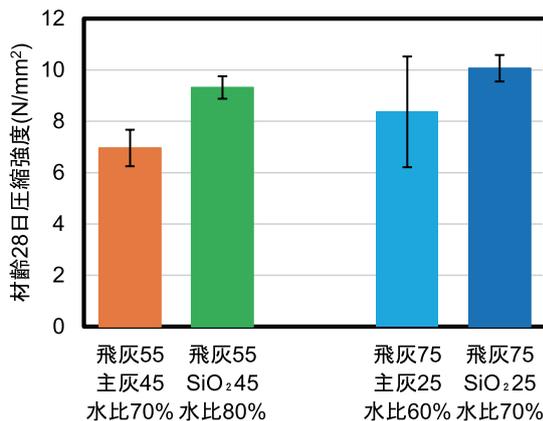


図 15. 主灰を二酸化ケイ素試薬に置換し強度増進 (全て水道水練混ぜ)

が、例えば、セメント硬化体と同様の、カルシウムシリケート水和物またはそのようなもの（酸化カルシウム、二酸化ケイ素、水の化合物）の可能性がある。

4. 廃コンクリートからの材料再生

4.1 研究着手の経緯

コンクリートは常温常圧の大気中において自然エネルギーでは物質循環しない材料である。使用後に放置しておいても土に還ることは無く、コンクリートのまま、もしくは、破碎しても表面にセメント硬化体（セメントと水が化学反応して硬化したもの）が付着した骨材の状態にとどまっている。コンクリートの強度の源の働きをするセメント硬化体の主成分であるカルシウムシリケート水和物（CaO・SiO₂・H₂O；ただし三者の構成比率は複数種類存在；略称 C-S-H）が常温常圧下・常炭酸ガス濃度下では極めて安定した物質だからである。そのことが構造物・建築物の材料としてのコンクリートの耐久性を高めている一方で、使用後に自然エネルギーにより原材料に戻る物質循環を不可能にしている。コンクリートの原材料は、地球上で何億年もかけて出来上がった鉱物由来資源である。人類が短期間に消費してしまえば、材料供給が途絶えることになる。

さらに、コンクリートには処分場所の問題もある。国土交通省の調査によると、2018年度には1人当たり毎年0.2トンものコンクリートが廃棄されている。現在はそのほとんどが破碎されて路盤材などに再利用されているが、いずれその需要も減少する。セメント製造をはじめとしてコンクリートは他産業等からの廃棄物を積極的に受け入れてきたが、コンクリート自身は物資循環の行き止まりである。現状のままでは、いずれ最終処分場が廃棄コンクリートで満杯になり、廃コンクリートの行き場がなくなりかねない（図 17）。

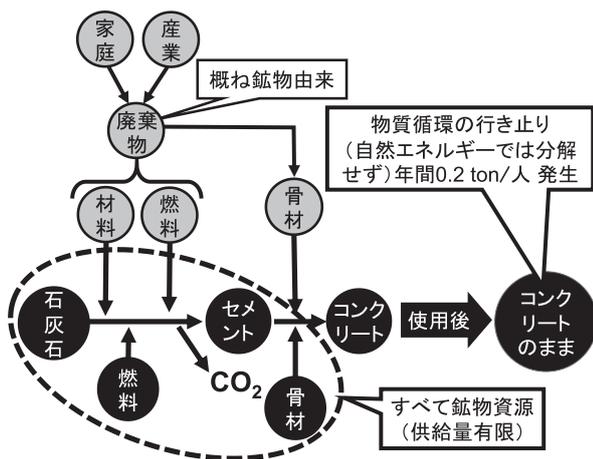


図 17. 現在のコンクリートの物質循環上の問題点

地球環境問題および天然鉱物資源枯渇の問題が顕在化し始めた現在、コンクリート工学においてもその解決のために「サステナビリティ」を標榜する研究が行われている。しかしながら、これらは現在のコンクリートの在り方・対象範囲や、社会や生活のあり方の延長線上に位置するものでしかない。すなわち、鉱物資源由来の原材料や副産物に依存した、自然（太陽）エネルギーによる分解・物質循環が不可能なセメントおよび骨材を用いたコンクリートの在り方という点では何ら変わらない。

鉱物資源を用いたセメント、骨材や高機能化のための混和剤の製造に際して、他産業や家庭からの廃棄物を用いる技術開発も活発であり、実用化された技術も多い。現在ではセメント製造の意義の一つに産業廃棄物の処理が掲げられている。しかし、これらの大部分も鉱物資源由来のものである。その副産物により作られる現在のセメント・コンクリートは使用後に自然エネルギーによる物質循環が不可能であり、天然鉱物資源供給に関する懸念が解決されるわけではない。

以上の問題点の技術上の核心は、通常的环境下ではセメント硬化体の主成分であるカルシウムシリケート水和物（C-S-H）が二酸化炭素を固定せず、分解しないことにある。一方、セメント硬化体中に含まれる、アルカリ性を呈する水酸化カルシウム（Ca(OH)₂）が空気中の二酸化炭素と容易に反応して炭酸カルシウムに変化する現象（Ca(OH)₂ + CO₂ → CaCO₃ + H₂O）は、「中性化」として知られている。この現象はコンクリートの細孔組織を緻密にすることから、コンクリートの耐久性向上のために活用する技術開発が活発に行われている。

一方、小林一輔（1990）は、通常にはあり得な

い高い二酸化炭素濃度下にコンクリート（セメント硬化体）試料を置き、C-S-H が二酸化炭素を固定して炭酸化・分解が生じること、そして、それにより炭酸カルシウムや二酸化ケイ素（SiO₂）といったセメント原材料が生成されることを明らかにした（CaO・SiO₂・H₂O + CO₂ → CaCO₃ + SiO₂ + H₂O）。ここでの固定され得る二酸化炭素の最大量は、セメント製造時に排出されたプロセス起源の量と等しいものである。それが再び固定化されて、セメント硬化体が原材料に戻ったと言える。

4.2 研究の特徴

上記の小林の研究を、コンクリート構造物・建築物の耐久性の観点からは起きてほしくない高濃度二酸化炭素環境に置けば、コンクリートへの二酸化炭素の大量の固定化と、それによる原材料への再生が可能であることの示唆であると筆者は解釈し、廃コンクリートから得られた微粉状のセメント硬化体を市販高濃度炭酸水（濃度約 10 g/L）中に浸漬することによりそのことを確認した（図 18）。

以上の経緯から、筆者は、セメント製造に際して排出された二酸化炭素のうちプロセス起源に相当する量を、廃コンクリート中のセメント硬化体に効率的に固定化する技術の開発を着想した（図 19）。これにより、表面に付着したセメント硬化体がすべて剥離して骨材は新品同様の品質に再生されると共に、剥離したセメント硬化体はセメントの原材料として再生されることを想定している。

高濃度二酸化炭素によるセメント硬化体の分解（＝二酸化炭素固定）による廃コンクリートからの材料再生の方法と、これを基本としたコンクリートの物質循環サイクルを考案し、他研究と比較した。本研究の特徴は、極めて高濃度の二酸化炭素中に曝露するため、水酸化カルシウムだけではなく C-S-H 全量にも二酸化炭素を固定させることにより、セメント硬化体を分解して材料再生に資する点に特徴がある（図 20）。

本研究では C-S-H の全量分解を目指す。これによりコンクリートの物質循環サイクルを確立し、カーボンニュートラルにつなげることを意図している（図 21）。



図 18. 市販高濃度炭酸水への浸漬による廃コンクリートの分解（予備実験）

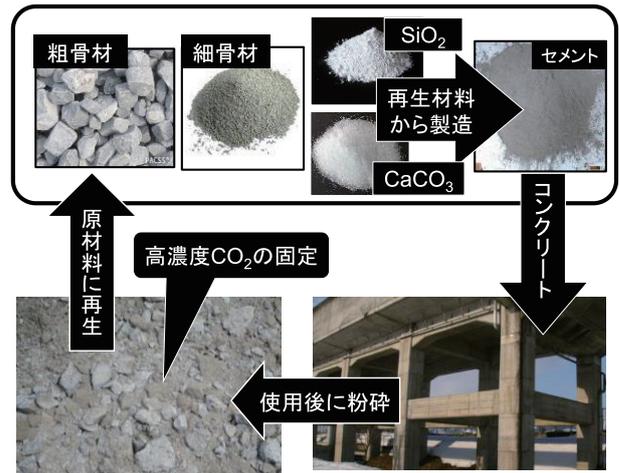


図 21. 本研究成果により目指すコンクリートの物質循環システム

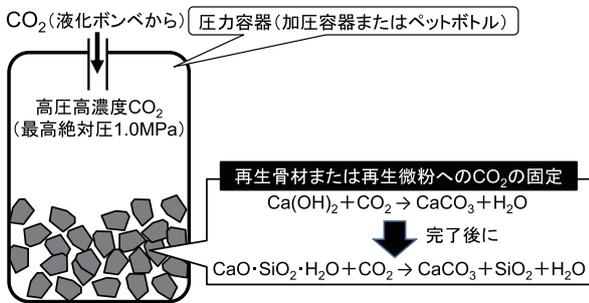


図 19. セメント硬化体への二酸化炭素の固定方法

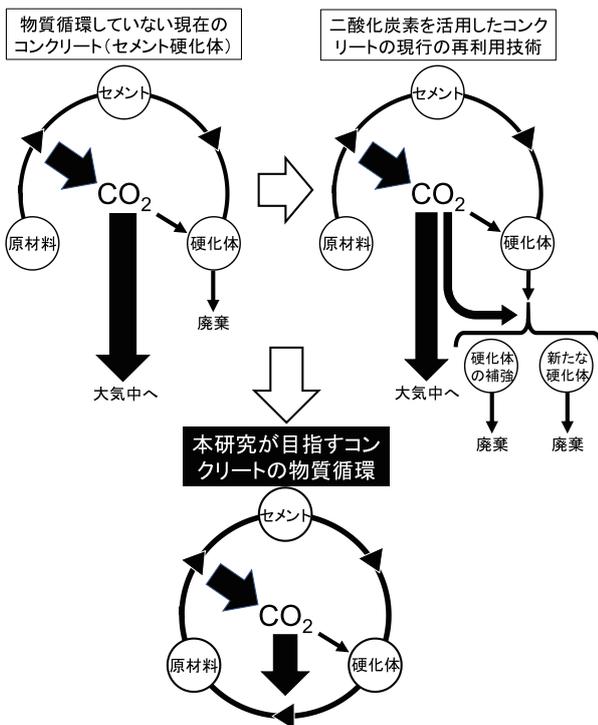


図 20. 高知工科大学における材料再生研究の特徴

4.3 現時点で得られたこと

実験には、二酸化炭素固定の効率を高めるため、再生骨材 M、および、その製造の際の副産物である、セメント硬化体を主成分とする「再生微粉」を使用した（図 22）。

再生微粉を市販炭酸水に 1 週間浸漬し、熱分析によりその前後での水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの含有率を、さらに、比較のため、空気中に放置したものについても測定した。その結果、炭酸カルシウム含有率は増加した一方、水酸化カルシウムの量に変化は無かった（図 23）¹⁹⁾。再生微粉は製造時からの時間経過により、その表面積の大きさから、含まれていた水酸化カルシウムはほとんどがすでに空気中の二酸化炭素により炭酸化して炭酸化カルシウムに変化していたものと推察した。一方、炭酸カルシウムは、C-S-H の二酸化炭素固定により生じたものと推察した。高濃度炭酸水浸漬によるセメント硬化体分解の有効性が示されたと言える。

さて、炭酸水の濃度向上のための試行錯誤により、炭酸水濃度は 16g/L まで高めることが可能となった（図 24）。しかし、それに浸漬しても実用には不十分な固定速度であった（図 25）^{20) 21)}。効率的な手法の構築が必要であることを認識した。



図 22. 使用した再生骨材と再生微粉

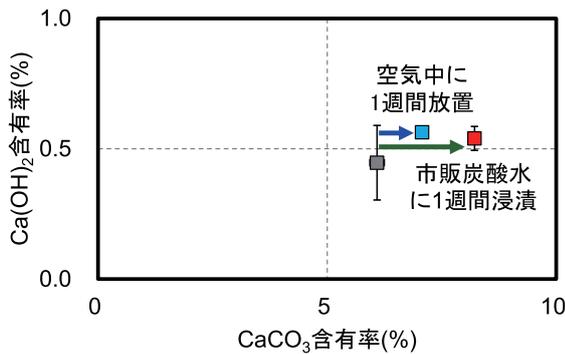


図 23. 再生微粉の炭酸水浸漬により水酸化カルシウム量の変化とは無関係に炭酸カルシウムが生成 → C-S-H が二酸化炭素固定して生成した可能性

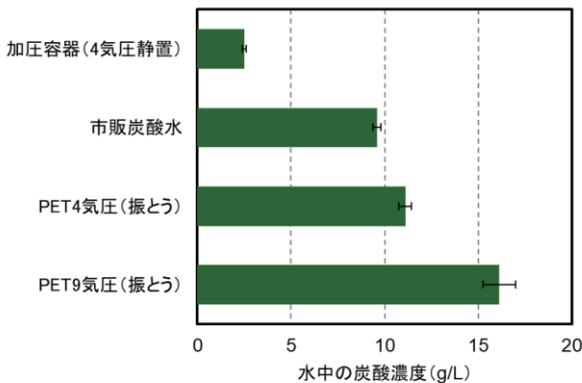


図 24. 各手段により調製した炭酸水の濃度 (多段階体積膨張法による測定)

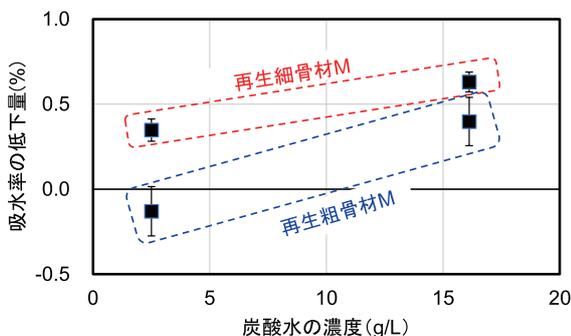


図 25. 高濃度炭酸水 (16g/L) 浸漬による再生骨材 M の品質向上

5. 今後の展望

当研究室では今後も、ここで述べた3本柱にて研究を行っていく一方で、これらを融合させた技術の開発に着手する予定である。

謝辞

本稿にて紹介した研究に際して、増粘剤は信越化学工業(株)からは新型増粘剤を、ポゾリスソリューションズ(株)からは高性能 AE 減水剤を、そして木灰は(株)グリーン・エネルギー研究所より御提供いただきました。高知工科大学における実験のための学生による補助、技術指導員 曾我部敏郎氏 (株) CRD コンサルタンツ専務取締役) の技術指導と安全管理の下に行いました。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤 (B) 「粘着力を高めたペーストの骨材からの剥離防止による最多骨材自己充填コンクリート」(2019 ~ 21 年度) および「極高濃度炭酸水を活用したフレッシュコンクリートの自己充填性能向上と維持技術」(2023 ~ 25 年度)、科学研究費補助金・挑戦的研究 (萌芽) 「極高濃度炭酸水浸漬による廃コンクリートの材料再生」(2023 ~ 24 年度)、一般社団法人四国クリエイト協会技術開発支援制度「微細独立気泡を連行した自己充填コンクリートによる硬化後表面気泡の発生防止」(2020 ~ 21 年度)、一般社団法人カーボンリサイクルファンド 2022 年度研究助成「木灰を用いたバイオマスコンクリートの実用強度化」(2022 ~ 23 年度)、一般財団法人国土技術研究センター研究開発助成「セメント硬化体の炭酸化反応を活用した再生骨材の高品質化に関する研究」(2023 年度) (いずれも代表者：大内雅博) によるものです。

ここに記して御礼申し上げます。

文献 (研究室設立以来の論文を主体としつつ、参考のため、それ以前の、現在の研究活動のきっかけとなったものを加えた)

【自己充填コンクリート】

- 1) Anuwat, A., Rath, S., Tanaka, K., Ouchi, M.: Improvement of Self-Compactability of Air-Enhanced Self-Compacting Concrete with Fine Entrained Air, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 14, No. 3, pp.55-69, 2016 年 3 月
- 2) 毛利匡志, 大内雅博: ペーストへの高粘着力付与による自己充填コンクリートのモルタル中の

- 細骨材分布の均等化，コンクリート工学年次論文
文集，Vol. 41，No. 1，pp.1169-1174，2019年7
月
- 3) 大西 悠，大内雅博：フレッシュコンクリート
に連行した空気泡による自己充填性のためのベ
アリング効果の解明，コンクリート工学年次論
文集，Vol. 42，No. 1，pp.1043-1048，2020年7
月
 - 4) 福田翔太，大内雅博：フレッシュコンクリート
の間隙通過性を支配するモルタルの固体粒子間
摩擦の定量化，コンクリート工学年次論文
集，42(1)，pp.1025-1030，2020年7月
 - 5) 和田晃宜，浅野弘裕，大内雅博：砂糖添加によ
る水和反応進行の抑制が自己充填性能安定化の
ためのフレッシュモルタルの性状に及ぼす影
響，コンクリート工学年次論文
集，Vol. 43，
No. 1，pp.826-831，2021年6月
 - 6) 佐藤 奨，大内雅博：自己充填性を支配するフ
レッシュモルタルの粘着力の回転粘度計による
定量化，令和3年度土木学会全国大会第76回
年次学術講演会，V-294，2021年8月
 - 7) Attatchaiyawuth, A., Puthipad, N., Ouchi, M.:
Effects of air-entraining agent, defoaming agent
and mixing time on characteristic of entrained
bubbles in air-enhanced self-compacting concrete
mixed at concrete plant, Engineering Journal,
Vol. 26, No. 2, pp.38-48, 2022年2月28日
 - 8) 古竹莉久，大内雅博：消泡剤と増粘剤の併用に
よる自己充填コンクリートへの安定した微細気
泡連行法の開発，コンクリート工学年次論文
集，Vol. 44，No. 1，pp.796-801，2022年6月
 - 9) 森崎弘汰朗，大内雅博：増粘剤を添加した自己
充填コンクリート用モルタルに微細気泡を連行
する練混ぜ手順の確立，コンクリート工学年次
論文
集，No. 45，Vol. 1，pp.814-819，2023年6
月
 - 10) 福田龍大，大内雅博：炭酸水練混ぜによるフ
レッシュモルタルの時間経過に対する軟度と粘
性の維持性能の向上，コンクリート工学年次論
文集，No. 45，Vol. 1，pp.802-807，2023年6月
 - 11) 向井仁哉，佐藤 奨，大内雅博：炭酸水練混ぜ
によるフレッシュモルタルの粘性向上，コンク
リ
ート工学年次論文
集，No. 45，Vol. 1，
pp.808-813，2023年6月
 - 12) 曾我部蓮太，大内雅博：炭酸水練混ぜと微細気
泡の連行による増粘剤添加型フレッシュコンク
リ
ートの自己充填性能の向上，コンクリート工
学年次論文
集，Vol. 46，No. 1，pp.937-942，2024
年6月
- 【木灰コンクリート】
- 13) 鈴木麻由，大内雅博，永野正展：木灰を用いた
バイオマスコンクリートの開発，土木学会第
74回年次学術講演会概要集，V-538，2019年8
月
 - 14) 山地陽大，鈴木麻由，大内雅博：主灰とリドリ
ング灰の粉碎による木灰コンクリートの施工性
向上と強度増進，土木学会第74回年次学術講
演会概要集，V-539，2019年8月
 - 15) 山地陽大，鈴木麻由，大内雅博：炭酸カルシウ
ム生成量が木灰コンクリートの強度に及ぼす影
響，コンクリート工学年次論文
集，Vol. 43，
No. 1，pp.1313-1318，2021年6月
 - 16) 岡田 陸：主灰粉碎と炭酸水練り混ぜ及び主灰
粉碎による木灰コンクリートの強度増進，高知
工科大学卒業研究概要書，2023年3月
 - 17) 博田紗季：減水剤添加と練混ぜ時間・振動時間
調整による木灰コンクリートの強度増進，高知
工科大学卒業研究概要書，2024年3月
 - 18) 綿貫 開，植田裕理，山本亜実，大内雅博：灰
の粉碎および構成比率の調整による木灰コンク
リ
ートの強度増進，コンクリート工学年次論文
集，Vol. 46，No. 1，pp.1351-1356，2024年6
月
- 【廃コンクリートからの材料再生】
- 19) 江本圭吾：高濃度炭酸水による再生微粉末の分
解，高知工科大学卒業研究概要書，2024年3
月
 - 20) 佐藤優斗：高濃度炭酸水浸漬による再生粗骨材
の品質向上，高知工科大学卒業研究概要書，
2024年3月
 - 21) 川村友汰朗：高濃度炭酸水浸漬による再生細骨
材の品質向上，高知工科大学卒業研究概要書，
2024年3月

Laboratory for Construction Materials in a Sustainable Society

- Utilizing Carbon Dioxide to Improve the Functionality of Concrete and Build Material Circulation Cycles -

Masahiro Ouchi

(Received: May 31st, 2024)

School of Systems Engineering
Laboratory for Construction Materials in a Sustainable Society, Research Institute

Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782-8502, JAPAN

E-mail: ouchi.masahiro@kochi-tech.ac.jp

Abstract: The Kochi University of Technology Research Institute's Laboratory for Construction Materials in a Sustainable Society was established in 2020 with the aim of positioning construction materials as a technology for solving social issues, and conducting research to develop and commercialize new construction materials in collaboration with agriculture and chemistry beyond the boundaries of civil engineering and architecture. Its mission is to prevent disaster and maintain the living environment through rapid development of reliable infrastructure, secure the supply of resources for raw materials for concrete, and solve the waste disposal problem after use. There are three research pillars as of 2024: the generalization of self-compacting concrete, the practical application of biomass concrete composed only of wood ash, which is a by-product of woody biomass power generation, and the establishment of the material circulation cycle for the current cement and concrete. What the three pillars have in common is research on the use of carbon dioxide to improve the functionality of concrete, that is, the practical use of carbon neutrality. In this paper, we describe the characteristics of each theme, the results of research since its establishment, and future prospects.