

環境低負荷資材を利用した土壌固化・地盤改良技術の開発とその可能性

中村 孝道

土壌固化や地盤改良には、セメント系の改良資材を使用するのが一般的である。セメント系資材は、六価クロムを含む重金属汚染や高アルカリ成分の溶出などの問題を孕んでいるため、周辺地盤環境の保全という観点からは環境非配慮型の資材であると言わざるを得ない。そこで、環境配慮型および調和型土壌固化方法および改良施工法を開発を目的に、微生物と農業用肥料といった環境低負荷資材のみを用いた土壌固化技術を開発した。改良体からの環境汚染の懸念がないため、改良土の用途に拡張性があると考えられる。さらには、重機による施工が不要と想定されることから、施工過程におけるCO₂排出量を大きく削減できる可能性がある。本稿では今回開発した土壌固化技術の全体像について紹介する。

キーワード：環境配慮型, 環境調和型, 微生物, 農業用肥料, 土壌固化, 緑化資材

1. はじめに

建築物や土木構造体などの躯体を始め、それを支える地盤の改良や盛土や切り土のり面の保護など、建設業の現場にはコンクリートを始めとするセメント系の資材がありふれている。強度発現性、安定供給性、経済性の側面からセメント系資材は建設業において重要な材料であり、インフラ整備を始めとする国土の開発と発展の礎であることに疑問はない。しかし、セメントの特性である高アルカリ性に起因する安全性の問題、セメント製造過程で発生するCO₂排出量の問題や六価クロム含有のための重金属汚染など、周辺環境への影響を考慮すると問題を孕んでいる資材といえる。また、老朽化等により不要となった際、セメント系資材の撤去は作業性および経済性の面から困難な場合が多い。そこで、セメント系資材を使用しない環境配慮型および調和型土壌固化・地盤改良技術の開発に着手した。持続可能な開発目標 (SDGs) の17の目標のうち特に、「目標12：つくる責任 つかう責任」・「目標15：陸の豊かさを守ろう」に対し、目標達成に寄与できる技術開発を目指した。

2. バイオミネラリゼーション (MICP法) の適用

微生物機能による鉱物化反応(バイオミネラリゼーションあるいは Microbial-Induced Carbonate Precipitation

(MICP法))を土壌固化の核技術として適用した。微生物機能を利用したバイオミネラリゼーションとは、微生物の代謝によって炭酸塩を生成し結晶化することで炭酸岩化を促進させることである(図-1)¹⁾。最も有用な微生物は、尿素分解菌 *Sporosarcina pasteurii* が有名である²⁾。尿素分解菌は、尿素分解によってCO₂とアンモニアを生成することで、炭酸塩の基を供給するとともに鉱物化反応に有利な弱アルカリ環境を整備することができる。高強度コンクリート並の固化が可能という報告³⁾もあるものの、アンモニア発生による悪臭や土壌の窒素汚染といった問題があるため、環境における実用には難がある。他にも硝酸還元菌による脱窒反応を利用した方法⁴⁾があるが、反応速度が極めて遅いため実用的な方法ではない。さらにはパン酵母の発酵による炭酸供給を利用した方法⁵⁾も検討されたが、アルカリ環境の形成に課題があり実

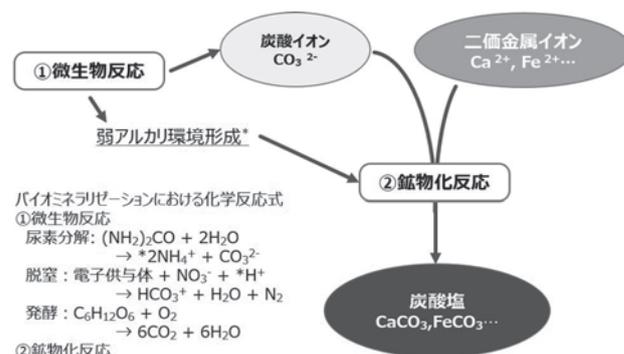


図-1 微生物機能を利用したバイオミネラリゼーションのメカニズム

用的ではないと考えられた。しかしながら、パン酵母はドライイーストとして広く流通しており入手が容易であること、微生物学等の専門的な知識がなくても取扱いが容易で高い発酵能力を発現できることから、バイオミネラル化に高い有用性があると考えた。そこで、アルカリ環境の形成が可能となれば実用性が高くなると考え、パン酵母によるバイオミネラル化を利用した土壌固化技術の開発を行った。

(1) パン酵母とスラグ肥料の利用

パン酵母は発酵によって糖を分解してCO₂を発生させるが、中間代謝物として乳酸や酢酸などの有機酸を生成するため発酵過程においてpHが下がってしまう。酸性条件下では鉍物化反応が起こらないため、炭酸塩の基であるCO₂が安定的に供給されてもミネラル化には不利な条件である。そこで、アルカリ状態を保持安定させる資材として、酸性土壌の改良資材であるスラグ肥料に着目した。スラグ肥料は、鉄鋼製造工程において副産物として発生する鉄鋼スラグ(高炉スラグと製鋼スラグ)を原料に製造されている。鉄鋼スラグは様々な用途に応じ製造・品質管理が行われており、各種環境基準を満たした環境配慮型リサイクル資材として利用されている。高炉スラグは肥料成分であるCaO, SiO₂, MgOを、製鋼スラグはさらにFeO, MnO, P₂O₅などを含んでおり、稲作、畑作および牧草用の肥料として利用されている。いずれも石灰分(アルカリ分)を含むことから酸性土壌の矯正剤としても機能する。この機能をアルカリ安定剤として活用することにした。

砂質土(山砂)を母材として固化実験を行った。pH調整剤としてスラグ肥料を母材に対し重量1%程度配合し、炭酸塩の基としてのカルシウムイオン供給源としてやはり肥料として利用される硝酸カルシウムを添加、それにドライイーストと水道水を混合し30℃の恒温室内で養生した。その結果、固化体を形成することに成功した(写真-1)^{6,7)}。試験体のpHを8.0~8.5に安定させ鉍物化反応に有利な環境を整備することができ、また、固化の進行とともに試験体中のカルシウムイオン濃度が減少しており、炭酸カルシウムが析出していることが示された。スラグ肥料の配合によってパン酵母の反応による固化体の形成は出来たものの、強度発現には養生5日程度を要し、固化体の強度(一軸圧縮強度換算値として0.1N/mm²以下)も十分ではなかった。

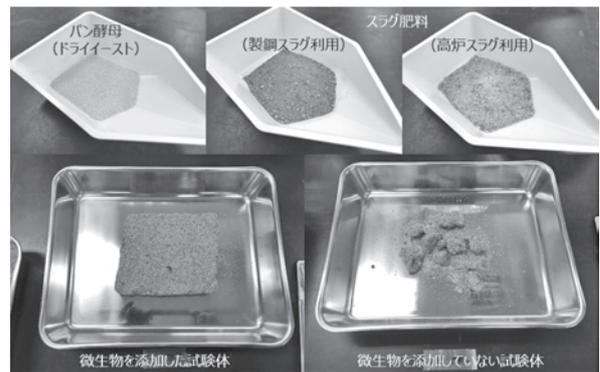


写真-1 パン酵母とスラグ肥料を利用した固化試験体

(2) 貝殻資源配合による強度発現

強度発現に日数を要しかつ十分な強度が得られないことは、固化技術としては致命的といえる。この重要課題の克服には鉍物化反応のさらなる促進が必須であると考えた。鉍物化反応は、物質中に炭酸塩が存在することで、その炭酸塩を核として結晶化する⁸⁾。それを利用し炭酸塩を対象土壌に事前に配合しておくことで、土壌固化における鉍物化反応の促進が可能ではないかと考えた。そこで鉍物化反応の結晶核として、ホタテ貝殻を脱塩・粉砕し再利用した未焼成ホタテ貝殻資源(写真-2、以下貝殻資源)に着目した。貝殻の主成分は炭酸カルシウムの結晶である。複数の炭酸塩結晶がタンパク質を接着剤として結合して複雑な構造を形成している。この結晶構造が鉍物化反応の結晶核として機能するものと考えた。なお、貝殻資源もスラグ肥料同様、農業用肥料としてされている環境配慮型リサイクル資材である。

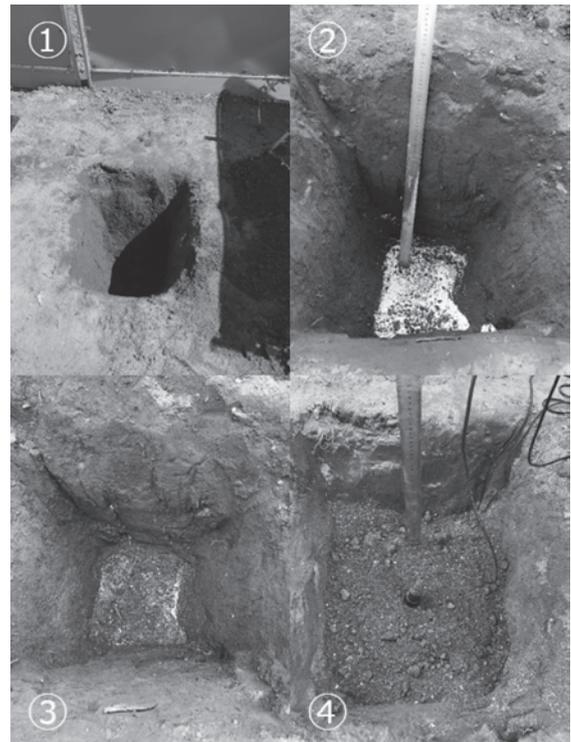


写真-2 貝殻資源と固化供試体

砂質土に加え、粘性土（赤土）を母材として固化実験を行った。なお、粘性土は pH が 6 台と比較的低いため、スラグ肥料の配合だけでは固化することができなかった。砂質土の場合は母材重量に対し 10% 程度、粘性土の場合は 50% の貝殻資源を配合し、先の実験同様硝酸カルシウムとスラグ肥料を添加しドライイーストと水道水を混合し 30℃ の恒温室内で養生した。その結果、砂質土では養生 2 日程度と強度発現を早めることができた。また、強度発現には養生 3～4 日程度かかるものの貝殻資源の配合により粘性土の固化に成功した。貝殻資源の添加により、種結晶として機能し結晶化を促進し、貝殻資源間の結合がより進行したものと考えられる。すなわち、土壌粒子間と貝殻資源間で起きた二つの鉱物化反応の相乗効果によって土壌固化が促進され効果的に強度が発現したものと考えられる⁹⁾。貝殻資源を配合した試験体はかなりしっかりと形状が保持され、写真—2 に示すような供試体の作成ができた。粘性土を母材とした供試体の一軸圧縮強さは、物によっては 1 N/mm^2 以上を示しセメント改良土並の強度となった。

(3) 表層地盤改良の検討

上記固化に成功した粘性土は、熊谷組技術研究所敷地内の屋外実験ヤード内の土壌であった。この土壌を現場発生土と見立て、セメント系資材を使用せずに環境低負荷資材を配合することで、現場発生土を対象とした表層地盤改良の屋外施工試験を実施した。1 m 四方の試験区を深さ 1.5 m 掘削し（写真—3 ①）、掘削土に貝殻資源、硝酸カルシウム、スラグ肥料、ドライイースト、水道水を添加した（写真—3 ②）。50 cm ごとに混合攪拌（写真—3 ③）と転圧（写真—3 ④）を行い、浅層混合処理工法を基本とした簡易的な表層地盤改良試験を行った。施工中に改良土をサンプリングし供試体を作成した。目標設定強度は 0.1 N/mm^2 以上としたが、35 日後の供試体の一軸圧縮強さは $0.60 \sim 0.99 \text{ N/mm}^2$ と残念ながら目標を達成することはできなかったが、パン酵母による固化反応は起こり改良体が形成されているものと考えられた。改良体形成を確認するために、施工試験から 18 ヶ月後に試験場所を掘削し改良体を掘り起こした（写真—4）。地中に改良体が確認され、軟岩用の針貫入試験器（軟岩ペネトロ計）を用いて強度を測定した結果、約 1.5 N/mm^2 の一軸圧縮強さ換算値が得られた。一軸圧縮強さの実測値としては $0.2 \sim 0.3 \text{ N/mm}^2$ と予想され、地中においてもパン酵母による土壌固化反応によって改良体形成が可能であることが分かった。



写真—3 屋外施工試験における工程



写真—4 屋外施工試験と掘り起こした改良体

しかしながら、改良体の形成および強度に大きなばらつきが観察され、地盤改良技術として 2 つの大きな課題がある。1 つ目は、1 m 以深では改良体が形成されていなかった。深部で改良体形成がなされないのは酸素供給不足が原因であると考えられる。地中では酸素が少なくなり深部においては無酸素状態になっている。無酸素条件下ではパン酵母による土壌固化が進行しにくいことを室内実験で確認しており、地中深い場所での固化に限界があると予想されていた⁹⁾。したがって、1 m 以深ではパン酵母による土壌固化は適用不可であることが示された。2 つ目は、改良体内部に十分な強度を持たない脆弱な部分が混在している状況であった。これは、単純に資材の混合攪拌が不十分であったのが原因と考えられる。試験区が非常に狭かったため小型とはいえバックホーでの混合攪拌による資

材の均一化が困難であったものと考えられる。また、資材が複数あることも原因と考えられる。予め各資材を混合しプレパック資材とする方法が有効であると考えられる。プレパック資材と現場発生土をモルタルミキサーなどでよく混合し埋め戻しするという施工法が、実用性が高いものと考えられる。地中深部では適用が難しいことやプレパック資材を混合する現場施工性の観点からは、1 m 以浅の表層面の舗装に最も適用性があると考えられる。

3. 地盤改良以外の展開の検討

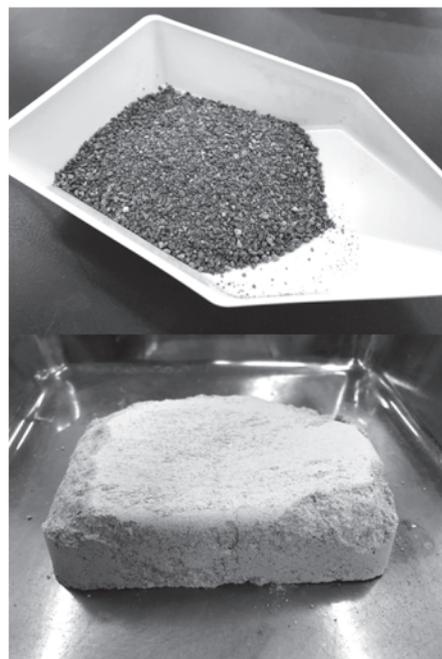
以上の取組により、微生物と農業用肥料といった環境低負荷資材のみを用いた土壌固化技術を開発した。本技術の一番の特徴は改良体からの環境汚染の懸念が極めて低いことである。この特徴を生かした有効活用方法としては、緑地や公園内の通行路の舗装や建設現場の仮設通路の簡易舗装、のり面の保護などに本技術の適用性が高いのではないかと考えている。また、地盤改良や舗装以外の用途に改良土自体が有効利用できるのではないかと考えている。例えば、本技術によって砂質土を植生に適した土壌に改良することで緑化技術への転用可能性がある。現在、簡易舗装の実用化を目指した技術開発および緑化技術転用の検討を進めている。

(1) 舗装用成形材の作成

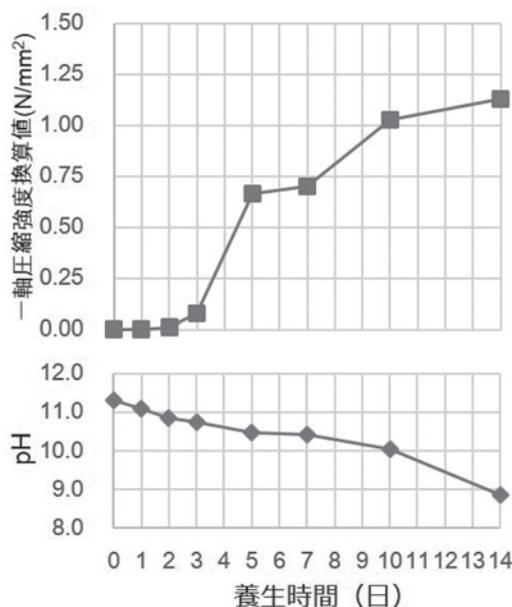
インターロッキングブロックのような舗装用成形材をイメージし、砂や土壌を母材とした成形材の作成を検討している。安定して 1 N/mm^2 以上の強度を発現させるために貝殻資源を多めに配合する以外は先に示した実験と同様の方法により固化実験を行っている(写真—5)。図—2に実験時のデータの一例を示すが、2～3日目で強度発現が見られ、最終的に 1 N/mm^2 以上の強度が再現性良く得られている現状にある。pHについては9近くで安定し弱アルカリ性である。このような舗装用ブロックを作成することができるが、現場発生土を用いた舗装技術としての実用化を考えている。今後は、現場にて資材を混合し舗装する現場施工法を検討していく方針である。

(2) 緑化技術への転用

植物の生育に有利な土壌の条件として有機的で肥沃であること、つまり生物学的および化学的な特性が重要であると考えられるが、保水性や根張りをよくするためには物理性も重要である。パン酵母とスラグ肥料を

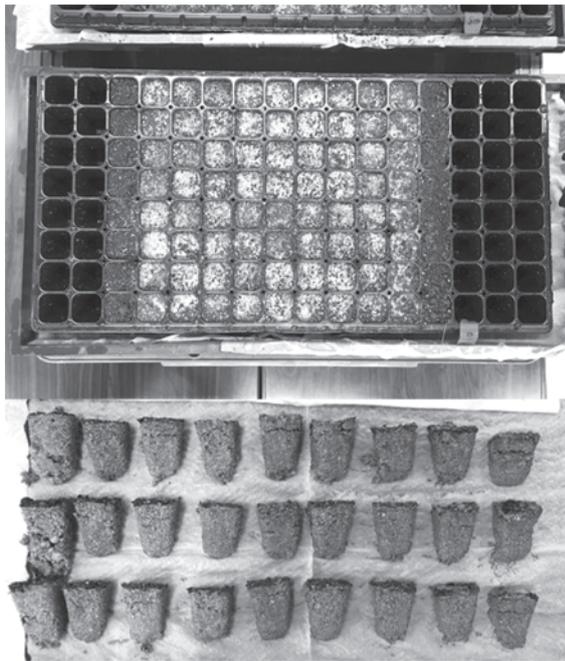


写真—5 砂を母材とした成形材試作品



図—2 試験体の強度発現と pH の推移

利用した土壌固化技術には、パン酵母利用による生物性改善、肥料成分添加による化学性改善、固化による物理性改善の効果があるといえる。pH を上げすぎず緩やかな固化状態が保持できれば砂質土を植生に適した土壌に改良できるのではないかと考えた。現在、砂を対象として固化培土作成の検討を始めたところである(写真—6)。のり面保護工や近年の豪雨災害により増加している土砂崩れに起因する崩壊地の復元といった現場への適用を想定し、実用化を検討していく方針である。



写真一6 固化培土試作品

4. おわりに

セメント系資材を使用しない環境配慮型および調和型土壌固化技術を開発した。本技術は、重金属汚染などの環境影響や製造工程におけるCO₂排出量の多いセメント資材を、環境低負荷資材で代替することで環境影響の懸念が極めて低く、さらには大型重機による施工が不要と想定されることから、製造から施工過程を含めてCO₂排出量を大きく削減できる可能性がある。コンクリートやセメント資材の役割を代替することはできないが、本技術の用途によっては、地球環境の保全に対し責任を持ちその土地の豊かさを守ること

ができる、サステイナブルな土壌固化・地盤改良・土壌改良技術となる可能性がある。

JCMA

《参考文献》

- 1) 川崎了：微生物機能を利用した地盤改良技術の現状，資源素材学会誌，131，155-163，2015。
- 2) DeJong, J.T., Fritzges, M.B. and Nusslein, K.: Microbial induced cementation to control sand response to undrained shear. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(11), 1381-1392, 2006.
- 3) van der Star, WRL., Taher, E., Harkes, M.P., Blauw, M., van Loosdrecht, MCM. and van Paassen, L.A.: Proc. Int. Symp. on Ground Improvement Technologies and Case Histories (ISGI2009), Ed. by C. F. Leung, J. Chu and R. F. Shen, 177-182, 2009
- 4) Martin, D., Dodds, K., Butler, I. B., and Ngwenya, B. T.: Carbonate Precipitation under Pressure for Bioengineering in the Anaerobic Subsurface via Denitrification, Environmental Science and Technology, 47, 8692-8699, 2013.
- 5) 川崎了，村尾彰了，広吉直樹，恒川昌美，金子勝比古：微生物の代謝活動により固化する新シグラウトに関する基礎的研究，応用地質，47，2-12，2006。
- 6) Nakamura, T., Endou, M. and Taniguchi, E.: Solidification of soil using microbial function. 32nd annual meeting of Japanese society for microbial ecology & 10th Asian symposium on microbial ecology, 06-7, 2018.
- 7) 中村孝道：地球環境問題解決に寄与する技術開発を目指した研究開発の取組－持続可能な循環型社会を実現のための基礎技術開発，実験力学，19（4），269-275，2019。
- 8) Akiyama, M. and Kawasaki, S.: Improvement in the unconfined compressive strength of sand test pieces cemented with calcium phosphate compound by addition of calcium carbonate, Ecological Engineering, 47（3），264-267，2012。
- 9) 谷口恵梨，中村孝道，遠藤正美，阿部磨弥，川崎了：パン酵母と農業用肥料を使った環境調和型地盤改良技術の開発，第14回地盤改良シンポジウム論文集，p. 213-220，2020。

【筆者紹介】

中村 孝道（なかむら たかみち）
 ㈱熊谷組 技術本部 技術研究所 循環工学研究室
 主任研究員

