

大学における施工技術研究の現状

高橋 弘

機械と地盤の相互作用を無視した施工技術研究はあり得ないが、この相互作用は極めて複雑であり、また大学の限られたスペース・予算の中で、実施工に直接寄与できるような研究を行うことは容易ではないことから、大学において機械施工技術を専門に研究している研究室は必ずしも多くない。本報では、その中でも精力的に施工技術研究を行っている研究室の研究の一例を紹介し、さらに著者らの研究室で取り組んでいる研究テーマを紹介することにより、大学での施工技術研究の現状報告とする。

キーワード：環境調和型機械施工，環境ジオメカトロニクス，精密施工，環境対応建機，環境知能工学

1. はじめに

自然界で運動する物体には必ず抵抗力が作用する。例えば水中を移動する物体には流体抵抗が作用し、空气中を移動する物体には空気抵抗が作用する。物体の動きを最適に制御しようとした場合、これらの抵抗力を無視した制御はあり得ない。建設機械の場合はどうか。建設機械が作業の対象とするのは、主として土砂や岩盤と言った地盤（地殻）である。例えば油圧ショベルのバケットなどの作業ツールは土中を移動するため、機械は土からの抵抗力を受ける。つまり、建設機械を用いた施工技術の研究では、機械と地盤との相互作用を無視した研究はあり得ない。そこで、必ず機械と地盤の相互作用の研究に立ち入ることになるが、この相互作用に及ぼす因子は極めて多く、非常に複雑である。さらに、この施工技術に関する研究を大学において実施する場合、以下のような問題点もある。

- ①大学の限られたスペースでは、建設機械の実機を用いた研究は必ずしも容易ではなく、スケールダウンした研究にならざるを得ない。そのため、実験室で得られた成果を実施工へそのまま適用できるとは限らず、研究成果と実施工との間にギャップが存在することが多い。
- ②上記の問題を解決するために、できるだけ実施工にそのまま利用できるデータを収集しようとする、ある程度スケールの大きい実験を実施する必要がある。そのためには多額の研究経費が必要になる。しかし、大学の限られた予算ではどうしても限界がある。

以上のような理由から、日本の大学の研究室において建設施工技術を専門に研究している研究室はあまり多くないのが現状である。ここでは、その中でも精力的に施工技術研究を行っている研究室の研究の一例を紹介し、さらに著者らの研究室で取り組んでいる研究テーマを紹介することにより、大学での施工技術研究の一端の紹介としたい。

2. 最近の施工技術研究の一例

(1) 精密施工

これは、立命館大学理工学部建築都市デザイン学科建山和由教授らが進めている研究である。精密施工（Precision Construction）とは、一般土工、トンネル工事、開削工事を始めとする地盤を対象とする土木工事において、綿密な調査を通じ地盤特性の空間的な分布や施工条件に関する詳細な情報を把握した上で、施工方法と施工機械の選定、工程計画の策定、廃棄土処分方法の決定等のプロセスの最適化を図ろうとする技術である。最適化の評価関数としては目的に応じて選択することができ、経済性を採用すれば最小コストによる施工の合理化に、また入力エネルギーを評価関数として近年注目されているライフサイクルアセスメントとリンクさせれば、環境負荷軽減の最適化問題とすることができる。

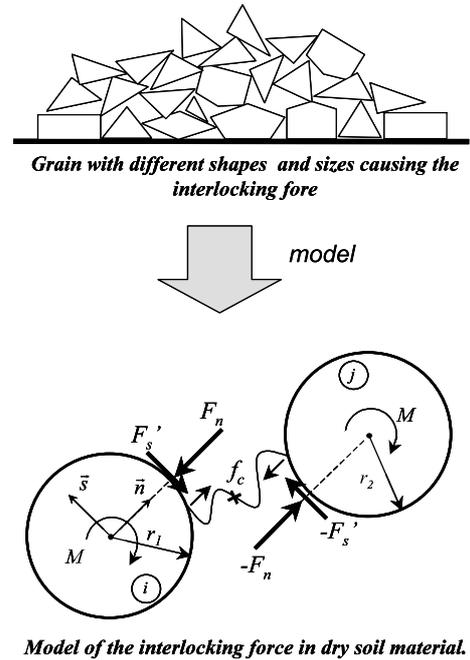
精密施工の特徴は、最近著しい進歩を見せているITツールを利用した情報のリアルタイム収集（図—1(a)はその一例）と得られた情報を最大限利用するためのコンカレントエンジニアリングの導入にある。

コンクリートエンジニアリングの手法は製品の設計と製造の統合を通じた合理化策として既に一般製造業では汎用的に利用されているが、建設の分野では多様で変動する施工条件や施工環境への対応が求められるため、規格化が難しいためにその導入が遅れていた。本研究では、コンクリートエンジニアリングにおける情報の共有化と双方向化（図—1 (b) にそのイメージを示す）という手法を活かし、現場において想定外の課題が生じたときの対処を的確、迅速、柔軟に行うことのできるシステムの構築を行っている。

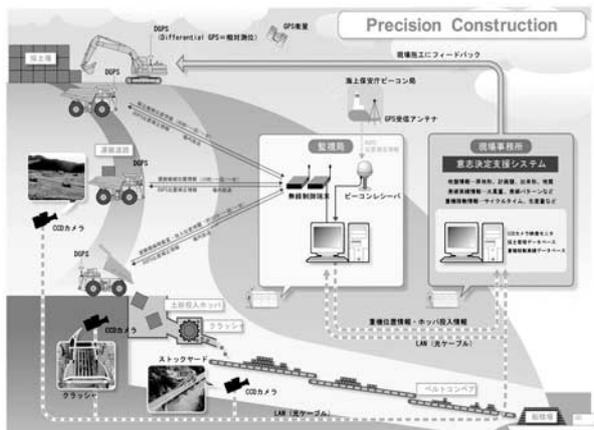
(2) 地盤掘削のDEMシミュレーション

これは、立命館大学理工学部都市システム工学科深川良一教授らが進めている研究である。深川研究室では、これまでに地盤掘削に関する実験的研究を精力的に進めてきたが、近年、月面上に広く分布するレゴリスの掘削特性を把握するため、DEM（個別要素法）を用いた掘削のシミュレーション研究に力を入れている。すなわち、月面探査に関して、月面上に広く分布するレゴリスに対する掘削特性を明らかにする必要がある。レゴリスは細かい粒状土であるが、粒子自体は

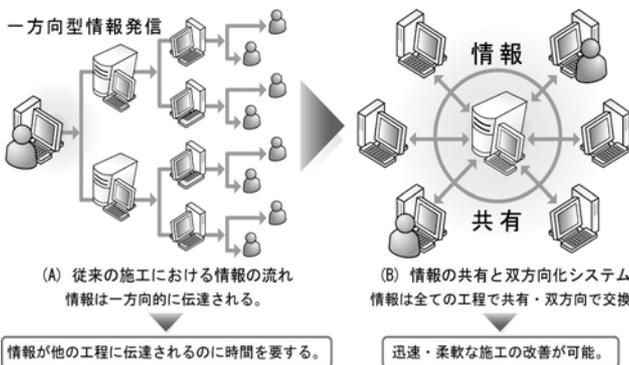
複雑な形状をしており、そのことに起因して粒子間のインターロッキングに基づく見掛けの粘着力が生じており、この見掛けの粘着力は掘削力の算定に重大な影響を及ぼす。そこで、図—2のようにインターロッキングに起因する力 f_c を定式化する試みを行っている。 f_c は二つの粒子を結ぶ糸に作用する力として定義される。二つの粒子が接触している場合は f_c は存在するが、二つの粒子が離れると0になる。すなわち



図—2 レゴリスのモデル化

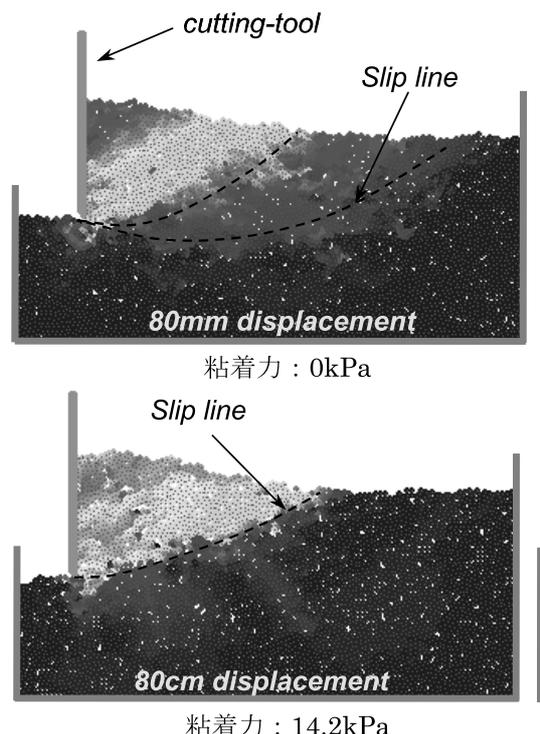


(a) IT ツールを利用した情報のリアルタイム収集



(b) 情報の共有化と双方向化

図—1 精密施工の概念



図—3 シミュレーション結果の一例

fc は、接触面積と実験などから推定される見掛けの粘着力の積として表現される。接触面積は Hertz の接触理論などを利用して求めることができる。この fc の法線および接線方向力を求めれば、インターロッキングを考慮した DEM シミュレーションが可能となる。図—3 にシミュレーション結果の一例を示す。見掛けの粘着力を考慮した場合、滑り線が大きく現れる傾向が見られ、掘削刃前方に堆積していく土の量も増えてくることが分かる。

3. 著者らの研究室における最近の研究課題

以下に、著者らの研究室で取り組んでいる最近の研究テーマと概要を紹介する。

(a) 環境と調和した建設機械の開発—環境対応建機—

【研究概要】 現在、廃棄物問題は避けて通れない大きな社会問題になっている。廃棄物を減らし、これらを再資源化する技術は、持続的発展・循環型社会の構築に対して必要不可欠な技術であると考えられる。本研究室では、資源開発・建設施工のゼロエミッションを目指して、廃棄物を再資源化する機械、すなわち「環境対応建機とその知能化（環境知能工学）」に関する研究を行っている。

【最近の研究テーマ】

- 土質改良機における土砂攪拌トルクに関する実験的・理論的考察
- 土質改良機の処理量に及ぼす土質の影響
- 土質改良機における掘削土砂と添加剤の攪拌混合シミュレーション
- 土質改良機における土塊の小割りシミュレーション
- 建設混合廃材リサイクル処理機械のための分別機能に関する研究

(b) 各種廃棄物を有効利用する技術

【研究概要】 様々な廃棄物を再資源化し、有効利用するための処理技術について、主として土壌改良への適用について研究を行っている。特に各種の廃棄物を有機的に融合し、機能性の高い地盤材料（例えば耐震性地盤材料）の開発を目指している。

【最近の研究テーマ】

- 高含水比泥土の新しい再資源化技術—繊維質固化処理土工法
- 廃石膏ボードの新しい再資源化技術—土質改良への適用
- ペーパースラッジの新しい再資源化技術—土質改良

への適用

- 脱水ケーキを用いた高機能性球形骨材の生成技術
- (c) ジオメカトロニクスと環境調和型開発・施工システム

【研究概要】 災害現場の復旧作業などでは、危険な作業を回避するため無人化施工が注目されている。建設機械による無人化施工を実現する場合、機械工学、地盤工学、電子工学を有機的に融合させることが必要不可欠である。そこで、他の研究機関と共同でジオメカトロニクスの高度展開に関する研究を実施している。主な研究テーマは以下の通りである。

【最近の研究テーマ】

- 非拡散型高含水比泥土回収機械の開発
- パワーショベルによる斜面掘削時の抵抗力解析
- 割岩工法の自動化技術
- 画像処理を用いたホイールローダの破砕堆積物掘削作業計画の構築
- バルコン下部に堆積した落鉱の自動処理機械の開発
- 車体屈曲型車輪式移動車輛の自律走行時の横滑りに関する研究
- オーバーヘッド型ベッセル搭載 LHD の機構に関する研究

(d) 環境地盤工学のニューフロンティア

【研究概要】 本研究室では、新しい環境地盤工学の展開を目指した研究も実施している。この研究では、○高機能性の屋上緑化用植生基盤材を廃棄物から作成し、屋上緑化を広く普及させてヒートアイランド対策に貢献するとともに、緑による癒しの空間を創造する。

○切土法面や岩盤面の緑化用生育基盤材を作成し、環境保全・景観修復に寄与する。

○月面の地盤や氷床を掘削するための新しい掘削技術などについて理論および実験の両面から検討し、月資源利用や地球環境の変遷の解明に貢献する。

などを目的とした様々なニューフロンティア研究を展開している。

【最近の研究テーマ】

- 浄水発生土を利用した屋上緑化用植生基盤材の開発
- 岩盤緑化・チップ利用
- 廃棄物の複合利用による高機能性築堤材の開発
- 月資源利用のための地盤掘削技術
- 次世代型氷床内部探査システム

(e) 地盤環境を保全する技術

【研究概要】 近年、土砂流出による環境問題（例えば、沖縄県における赤土流出による珊瑚の死滅などの海洋被害）、地震時における埋戻し土の液状化による

下水道施設の被害や堤防の崩壊、災害現場で発生する軟弱泥土処理など地盤に関する様々な問題が顕在化してきている。本研究室では、これらの問題解決を目指し、「環境保全型地盤・リサイクル工学の新たな展開」に関する研究を実施している。

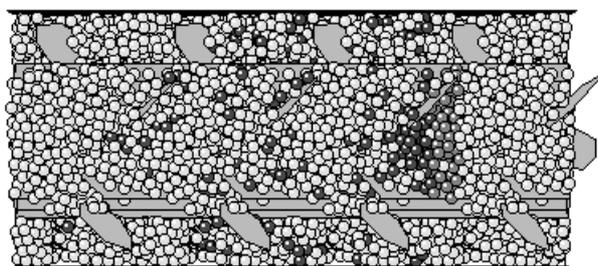
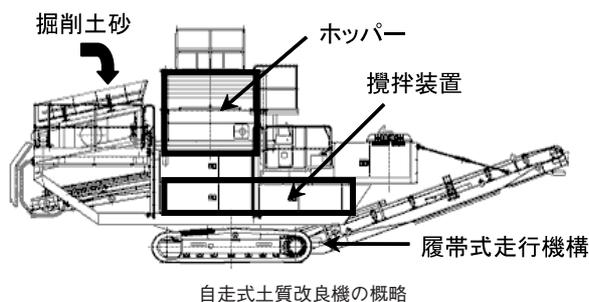
【最近の研究テーマ】

- 赤土流出による海洋被害軽減のための環境保全型赤土改質技術
- 生石灰攪拌混合による揮発性有機化合物汚染土壌の最適浄化システム
- 土質改良機による汚染土壌修復のDEMシミュレーション
- 繊維質固化処理土工法を利用した遊休ため池の再生
- 災害現場で発生する泥土処理への繊維質固化処理土工法の適用

紙面の関係上、上述した研究課題の一例のみを以下で紹介する。その他の課題については、ホームページ(<http://www2.kankyotohoku.ac.jp/htaka/index.html>)を参照して頂きたい。

(1) 土質改良機における掘削土砂と添加剤の攪拌混合シミュレーション

土質改良機が行う作業の目的は、セメント系固化材や生石灰などの添加剤と掘削土砂とを均質に混合することであるが、この機械の最適設計を行う場合、例えばパドルの取り付け角度、ピッチ、回転数などの機械



シミュレーション結果の一例：薄い色の要素は掘削土砂を、濃い色の要素は攪拌混合部分にある添加剤およびフィーダーから供給された添加剤を示している。要素の流動方向は、右から左に向かう方向である。

図-4 自走式土質改良機の概略と土砂混合シミュレーション結果

要素の他に土質条件など土砂の混合に関与すると考えられるパラメータは非常に多く、それらを全て実験によって評価・検討するのは非効率的であるばかりでなく、あまりにも非経済的である。これに対し、コンピュータ上で土砂の混合過程をシミュレートすることができれば、コンピュータ上で土質改良機の最適設計を行うことが可能になる。

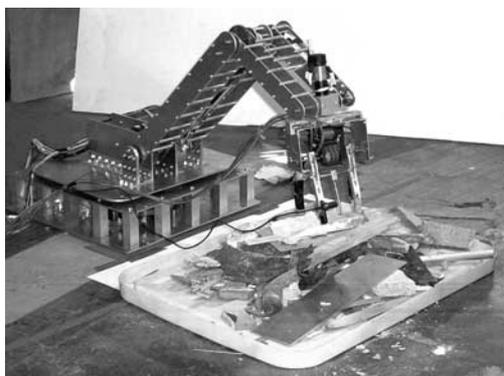
そこで本研究室では、処理機械の効率的かつ経済的な設計を可能にするため、コンピュータ上で混合容器内における土砂挙動を解析するためのシミュレータを開発している。シミュレータは粒状体の挙動解析に広く用いられている個別要素法 (DEM) を用いている (図-4)。

(2) 建設混合廃材リサイクル処理機械のための分別機能に関する研究

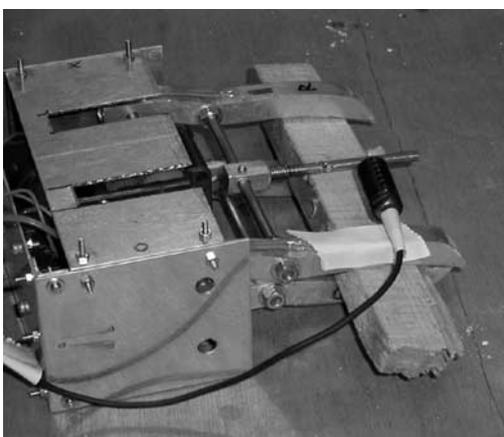
建物の解体工事によって排出される建設混合廃材には将来的に再資源として利用できる角材、木屑、コンクリート塊などが多く含まれている。そのため、現在、分別解体が推奨されているものの、古い家屋は分別解体に適した建築構造になっておらず、建設混合廃材の処理費削減から、古い家屋の解体工事現場では、建物を材料の区別なく重機で一度に取り壊す「ミンチ解体」が多々見られるのが現状である。その結果、現場には様々な種類の建設混合廃材が混在し、それらの分別作業に多くの人手と時間を要している。そのため、建設混合廃材のリサイクル率が向上しないばかりでなく、廃材の不法投棄や野外焼却といった不正処理が増加し、社会問題にもなっている。それゆえ、分別作業の現場では自動化・ロボット化により廃材の自動選別を行う建設混合廃材リサイクル処理機械の開発が望まれている。今後、このようなリサイクル処理機械の開発が実現すれば、建設混合廃材のリサイクル率が向上し、新たな資源の採取の抑制、廃棄物の発生抑制、資源の循環的利用が促進されると考えられる。さらに、天然資源の消費をできるだけ節約し、環境への負荷をできる限り少なくする資源循環型社会に貢献できるものであると考えられる。

本研究室では、分別作業の無人化・自動化を実現するための基礎的研究として、排出された混合廃材の中でも抽出が容易で再生利用価値の高い角材および最終処分場で混入の嫌う木材の分別機能について研究している。具体的には、機械に搭載した視覚センサにより廃材の山を撮影し、画像処理により木材部分を抽出し、その部分の位置計測を行い、ハンドで掴み、材料をハンマーで打撃した時の打撃音を解析することにより、材

質を判断させるアルゴリズムを開発している(図—5)。



建設混合廃材リサイクル処理機械：
視覚センサと聴覚センサにより混合廃材から木材のみを分別する。



マイクロホンを設置したハンド：ハンマーで材料を打撃し、その打撃音を解析することにより、ハンドで掴んだ材料の材質を判断する。

図—5 木材自動分別実験の様子

(3) 高含水比泥土の新しい再資源化技術—繊維質固化処理土工法

建設汚泥等の高含水比泥土は含水比が高いために直接の再利用が難しく、ほとんどが産業廃棄物として最終処分場で処理されている。しかし処分場の不足・遠隔化は深刻な問題であり、輸送コストの負担から建設汚泥の不法投棄が後を絶たず、地球環境への汚泥負荷の影響が大きな問題となっている。そのため、建設汚泥および浚渫土等の高含水比泥土を現場で再資源化する技術の確立が切望されている。

そこで、本研究室では民間企業等と共同で、古紙と泥水を混合し、さらに高分子系改良剤を加えて良質な土砂に蘇らせる工法、すなわち「繊維質固化処理土工法」を開発した。本工法による処理土は繊維質を含むため、粘り強く破壊ひずみや残留強度が大きいという特徴を有することから、盛土材として最適であり、既に多くの施工実績を有している。現在は、繊維質固化処理土の耐震性地盤材料としての評価や環境保全への



含水比 500 % の建設汚泥



繊維質固化処理土工法により生成された土砂。処理後、直ちに人が乗って歩ける状態にまで改質できる。



繊維質固化処理土工法を採用した工事現場の様子：仙台市宮城野区小田原から青葉区本町までの一般国道45号線道路下にシールド工法により共同溝を1.37 km構築する工事(仙台東部共同溝工事)。シールド掘進機を導入するための立坑を掘削する際に排出される汚泥を繊維質固化処理土工法で全量処理し、4号線バイパス拡幅工事に盛土材として再利用するという完全なゼロエミッションを実現した現場である。

図—6 繊維質固化処理土工法による施工事例

適用などに関する研究を実施している(図—6)。

(4) パワーショベルによる斜面掘削時の抵抗力解析
掘削機械により土砂・鉱石等の自動掘削を行う場合、作業中の状況判断は、作業の安全性を確保する上

で非常に重要な要素であり、これを的確に行うためには、力覚機能の有効利用が必要不可欠である。つまり機械は、「作業が順調に進んでいるかどうか」、「バケットには土砂・鉱石が十分入っているか」、「バケットが大塊等に衝突し、危険な状態にないか」などを自動的に判断する必要があり、このためには作業が順調に進んでいる時の理論的掘削抵抗力を予め把握しておき、さらに機械に力覚センサを搭載して掘削作業時にバケットに作用する抵抗力を常に計測し、両者を比較することにより作業状況を判断することが必要である。

そこで、本研究室では代表的な掘削・積み込み機械であるホイールローダとパワーショベルを取り上げ、掘削作業時にバケットに作用する抵抗力に関する物理モデルを導出し、さらに小型模型を用いて実際に掘削作業時における抵抗力を測定し、モデルによる計算値と実験値との比較検討を行い、モデルの妥当性を検証している（図一七）。



図一七 知能化パワーショベル模型による掘削実験

4. 今後の展開

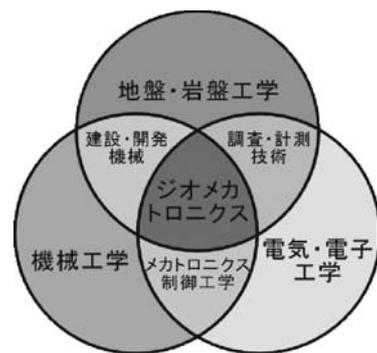
(1) ジオメカトロニクスと環境ジオメカトロニクス

建設機械を用いた機械施工は、建設機械工学と土木（地盤）工学との境界領域に位置すると考えられるため、効率よい機械施工を実施するためには、両方の知識を必要とする。さらに近年、災害復旧現場における作業において、危険な作業からオペレータを解放するために、無人化建設機械・建設ロボットの導入が進められてきているが、この場合は制御工学の知識も必要になる。著者らは、図一八に示す3つの学問領域の共通部分を「ジオメカトロニクス」と定義し、新たな学問体系を確立するための基礎研究を実施している。

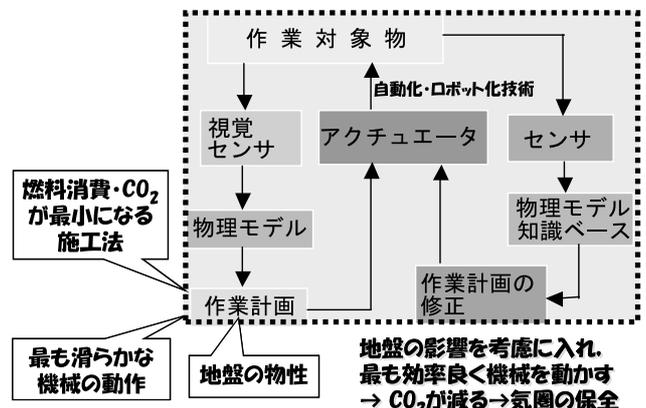
建設機械にかかわらず、ほとんどの知能ロボットの

構成要素は「環境情報を取り込むセンサ」、「センサによって取り込まれた情報を認識・判断する知識」および「実際に作業を行う部分を制御するアクチュエータ」であり、これらをまとめると図一九の点線で囲まれた部分に示すようになる。知能建設ロボットには一旦作業を開始したら、別なセンサで作業の進行状況を把握し、作業計画を実行できないような状況が発生したら、知識ベースを基に作業計画を変更するという一連の動作を自律的に行うことが要求される。以上のような一連の動作を実現するために必要な技術を総合的に検討しようとするのが「ジオメカトロニクス」である。

ところで、これからの機械施工では、環境負荷などの影響を無視した施工はありえない。すなわち、環境調和型の機械施工システムが強く求められることになる。そこで、「ジオメカトロニクス」に「環境」を考慮に入れた、いわゆる「環境ジオメカトロニクス」を提案したい。これは、上述の「ジオメカトロニクス」をベースにするが、機械動作を計画する際に、効率のみならず環境負荷を最小にするような機械動作を計画し、機械の動きを制御することにより、燃料消費を削減し、地球温暖化ガスであるCO₂の排出量を削減しようとするものである。図一九に示すように、「ジオメカトロニクス」では、機械自らが自分を取り巻く環



図一八 ジオメカトロニクスの概念図



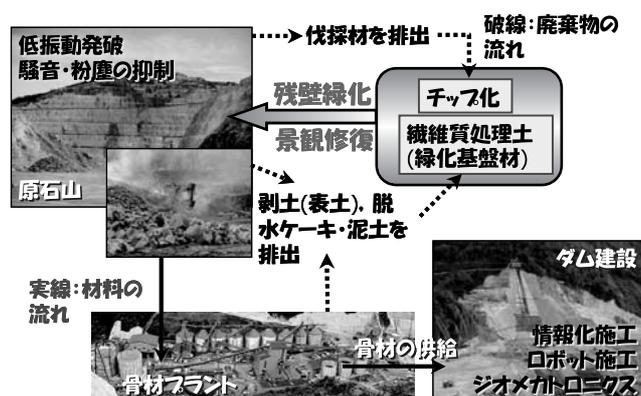
図一九 知能化建設機械による環境調和型機械施工システム

境を認識した後、最も効率良い作業計画を構築することになるが、「環境ジオメカトロニクス」ではさらに「燃料消費・CO₂排出量が最小になるような施工法」、「最も滑らかな機械の動作法」、「地盤の物性」などの影響を考慮し、効率だけでなく環境にも配慮した作業計画を構築し、作業を実行することになる。すなわち、「作業対象である地盤情報をセンシングし、その情報を基に燃料消費・CO₂排出量を最小にし、かつ機械の効率的な自動制御を目指す」のが「環境ジオメカトロニクス」の概念である。今後、他大学や企業と共同で、「環境ジオメカトロニクス」の展開研究を進めて行きたいと考えている。

(2) 建設廃棄物の地産地消

環境と調和した機械施工を行うためには、現場で排出された廃棄物を外に持ち出さず、現場で処理し、現場で再利用できることが最も望ましい。これは、いわゆる廃棄物の「地産地消」と言える。

例えば、図—10に示すようにダム建設工事では、大量の土砂、岩石・骨材などを必要とする。そこで、近くの原石山から岩石・碎石を得ようとする時、木を伐採し、表土を剥ぎ取らなければならず、伐採材や掘削土砂が排出される。環境調和型機械施工を実現するためには、これらの廃棄物を有効利用し、環境修復などを行う工夫が必要不可欠である。原石山から採取した岩石は破碎プラント・骨材プラントに送られ、骨材が生成され、ダム工事現場に供給されるが、この時、脱水ケーキや高含水比泥土を排出する。この廃棄物も



図—10 建設廃棄物の「地産地消」の一例

有効利用することが望ましい。著者らが研究を進めている繊維質処理土は、軽量であり、高い保水性・保肥性を有し、かつ乾湿繰り返しに対する劣化耐久性に優れていることから、土質系廃棄物は繊維質処理土に再資源化し、また伐採材はチップ化して、両者を混合して強い降雨にも対抗でき岩盤斜面に馴染む生育基盤材を生成し、原石山の残壁を緑化するという循環システムの実現に向けて研究を進めている。このような循環システムが確立できれば、いわゆる廃棄物の「地産地消」が可能になり、景観修復にも繋がると考えられる。それゆえ、このような環境調和型施工システムの構築に関する展開研究に今後取り組んで行きたいと考えている。

5. むすび

上述したように、大学において機械施工を専門に研究している研究室は必ずしも多くない。本報では、いくつかの研究室の研究事例と著者らの研究室の研究事例を紹介するとともに、今後の研究展望の一端を紹介させて頂いた。近年では、コンピュータの発達により、今までは大型計算機でなければできないようなシミュレーションがPCレベルで可能になってきていることから、実施工と研究室レベルでの研究成果との間に存在するギャップをシミュレーションにより埋めようとする試みが数多く行われてきている。シミュレーションは効率的・経済的な機械の設計や施工計画に大いに寄与できる強力なツールであり、今後も大いに活用されると考えられる。

ところで、本報は著者の力不足により必ずしも正確な「大学における施工技術研究の現状」の報告原稿になっていない点もあるかと思うが、ご容赦頂ければ幸いです。また本報が読者にとって何らかの寄与するところがあれば、望外の喜びである。 JICMA

【筆者紹介】

高橋 弘 (たかはし ひろし)
東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻
教授

