

技術展望

ジオメカトロニクスの提案と展望

OUTLOOK FOR A NEW DISCIPLINE: GEOMECHATRONICS

深川良一¹・建山和由²・高橋 弘³Ryoichi FUKAGAWA, Kazuyoshi TATEYAMA
and Hiroshi TAKAHASHI¹正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)²正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)³正会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科
(〒980-8571 仙台市青葉区荒巻字青葉01)**Key Words** : *geomechatronics, interaction, ground, construction machinery, automation of construction works*

電子工学を利用して機械の自動化を図る技術分野の総称であるメカトロニクスに地盤工学（ジオテクニカルエンジニアリング）を融合させた新しい研究・技術分野として「ジオメカトロニクス」を提案する。ジオメカトロニクスでは、土や岩などの地盤材料を作業対象とする機械が、地盤特性を自動的に評価し、地盤と機械系の相互作用に関する知見をベースに、その地盤に最適な作業を行うための機械制御を行うことを想定している。本論文では、ジオメカトロニクス技術の開発に必要な要素技術とそれを利用した実例研究を紹介するとともに、この研究・技術分野の将来展望について知見を述べる。

1. はじめに

昨今の経済情勢を反映して、建設業における技術開発投資は減少の一途を辿っている。十数年前より活発に行われてきた建設ロボット関連の研究開発もトーンダウンしつつある。一方、エレクトロニクスや情報関連技術の進展は目覚しく、逆に建設施工や資源開発のための自動化・ロボット化を可能とする周辺技術の基盤はますます整いつつある。施工の自動化・ロボット化によって我々の手にする果実は多種多様である。作業員は危険な作業や苦渋作業から解放されるし、技術開発のための初期投資は必要にしても、最終的には低コスト施工の可能性を高めるだろう。また、昨今では今世紀中の火星への人類の移住が取り沙汰されるようになってきており、月面への日本のミッションはすでに秒読み段階である。このように従来では考えられなかった環境下で作業を行う可能性が出てきており、それを実現するためには施工の中心である建設機械の自動化・ロボット化が必須である。

ところで、施工の自動化・ロボット化を成し遂げるためには、実際には多くの課題を克服しなければならない。建設現場は多種多様で、また一品生産が普通であるため、工場などのオートメーション方式と比べると難易度が格段に高いと言われてきた。施工の主力となる建設機械は一般に大型で、安全性に特に注意を払う必要もある。これらの課題克服のためには、従来の土

木工学、機械工学の知識のみではなく、エレクトロニクス、制御工学、情報工学などの知識を駆使しなければならない。特に、施工現場では地盤材料の関係する課題が多い。我々が今回「ジオメカトロニクス」を提案するゆえんである。

近代の科学技術は課題を細分化することによってその深化を図ってきたといえるが、建設事業は自然を対象とするものだけに、逆に諸技術の統合化をもってしか解決は困難なように思える。今回の我々の提案は、その統合化へ向けた一石でもある。

本論文では、まずジオメカトロニクスの概要について説明し、その主要な検討分野である、1) 対象地盤の特性評価、2) 地盤と機械系の相互作用の評価、3) 地盤特性を考慮した自動化・ロボット化に関連して順にそれぞれの現状および展望について述べる。最後に4.~8.において、主として著者らの関わったジオメカトロニクスの研究の一端を紹介する。なお、ジオメカトロニクスの意味で類似性の強い資源開発分野における適用例も紹介することとする。

2. ジオメカトロニクスとは

まず、「メカトロニクス」とは、機械工学（メカニカルエンジニアリング）と電子工学（エレクトロニクス）を融合した造語であるが、エレクトロニクスの発

展に伴い、さまざまな分野で優れた成果が報告されており、「メカトロニクス」はすでに一般に広く用いられるまでになっている。一方、本研究で対象とする分野を考えると、開発対象は地盤・岩盤であり、作業機械は主として重機である。かつ作業は極限環境を含む一般に厳しい自然条件下で行われる可能性が高いため、特に安全性の観点からこうした作業機械の自動化、ロボット化は不可欠である。以上の点に鑑み、本論文において、地盤材料と種々の作業機械との相互作用や、その相互作用を考慮した自動化・ロボット化に関する新しい研究分野「ジオメカトロニクス」を提案する。「ジオメカトロニクス」は地盤工学（ジオテクニカルエンジニアリング）とメカトロニクスを融合させた造語である。土木施工において建設機械は重要な役割を果たしてきたが、施工の自動化あるいはロボット化を将来的に一層進展させるためには、ジオメカトロニクスの発展が欠かせない。ジオメカトロニクスは、図-1に示すように、地盤・岩盤工学、機械工学、電気・電子工学をその基本的研究分野とする。これらをベースに主として次の分野に関する研究を推進する。

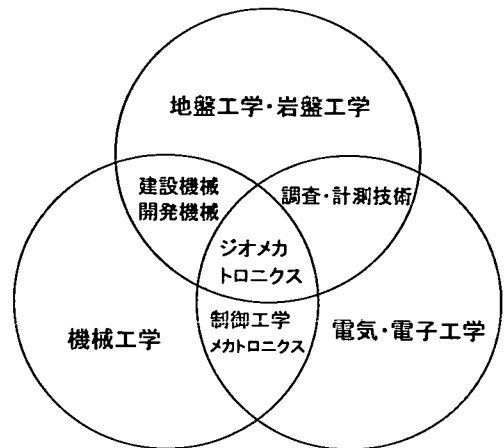


図-1 ジオメカトロニクスの概念図

- (1) 対象地盤の特性評価
- (2) 地盤と機械系の相互作用の評価
- (3) 地盤特性を考慮した自動化・ロボット化

地盤・岩盤に作用させる作業機械の無人化を考えれば上記課題の意味がわかりやすい。まず、作業の対象である地盤・岩盤の特性を把握しなければならない。その結果を受けて、アクチュエータに相当する部分と地盤・岩盤との相互作用が事前に評価されている必要がある。あるいは、相互作用をリアルタイムに評価して、その都度地盤特性および相互作用の評価を繰り返す必要がある。最終的には以上の総合化・最適化として、具体的な自動化された作業に結実する。

「ジオメカトロニクス」に関連の深い研究分野として「テラメカニクス」がある。「テラメカニクス」は、作業機械の地盤上の走行性に関わるテーマを主たる研究分野としている。伝統的に農業機械や特殊車両（軍用車両）などの分野で研究が盛んに行われてきた。「テラメカニクス」がある程度対象研究分野を限定していることもあり、「ジオメカトロニクス」は「テラメカニクス」を包含するような概念であると考えている。

ところで、建設工事は大略一品生産、現地生産であるから、自動化は達成しにくいと言われてきた。それは今でもなお事実である。しかし、施工の自動化に対する研究体制の整備が進んだこともあり、施工機械や施工方法の統一化を図ることができれば、今後各地の建設施工現場において自動化が急速に進展する可能性

はある。また、施工現場における自動化・ロボット化システムにおいては、他産業と比較した場合、悪環境でも耐える耐久性や、場合によってはシステムの一部が破壊しても作動できるというタフさとともに、暴走を回避するための信頼性の高い安全システムが重要なものではなかるか。もちろん微妙かつ迅速な制御が必要な場合も多いが他産業ほどではない。結局、ジオメカトロニクスにおいても微妙な操作を可能とするハイテクよりもいわゆる“ローテク”の果たす役割が一般に大きいかもしれない。

3. ジオメカトロニクスにおける検討要因

ここでは、ジオメカトロニクスにおいて検討すべき要因を2. で述べた研究分野ごとにまとめる。

(1) 対象地盤の特性評価

地盤と機械系の相互作用を評価する上で地盤・岩盤特性をあらかじめ把握することは重要である。建設機械では、特に軟弱地盤上での建設機械の運用に対して、あらかじめコーン貫入試験などを実施し、トラフィカビリティを調査するということが行われてきている。この際、地盤材料の種類（砂であるか粘土であるかなど）、含水状態（特に粘土）、詰まり具合・相対密度（特に砂）を知ることが最も重要であろう。もちろん、変形・強度特性を直接評価できればそれにこしたことはないが、これらの評価は困難である場合が多いため、より明確な評価の可能なパラメータから間接的に推定されるのが普通である。また、機械系の自動化・ロボット化を念頭に置けば、人力によるコーン貫入試験などの手間のかかる方法は現実的ではなく、簡

便にほぼリアルタイムで地盤特性評価を行う手法の開発が急務である。そのための有望な方法としては以下のようなものを挙げる事ができる。

a) 接触型

接触型センサの代表的なものとしては触覚センサがある。直接的には、対象物を把持する際の把持力、把持量の一方あるいは両方から対象物の特性を推定するようなセンサを指すのであろうが、例えば、走行時の地盤の振動特性から地盤特性を推定したり(7.参照)、不連続ではあるがコーン貫入特性から地盤特性を推定することも広義には触覚センサとして分類できるだろう。

接触型センサにはまだ十分工夫・開発の余地がある。例えば、原位置試験における試験機と地盤との相互作用に対する認識が深まれば、その結果をリアルタイム評価に生かせる可能性がある。コーン状のものを連続的に地盤に貫入させ、その際の貫入抵抗、周面摩擦などから地盤特性を推定することは典型例である。また、実際の施工機械による施工に際して、地盤に関する情報を集めることも重要である。施工そのものが大型原位置試験を実施していることと等価である場合が多いからである。4.のDJM試験における地盤の回転掘削の際の施工情報、5.の連壁用掘削機位置制御の制御板載荷から得られる情報などは以上の典型例である。

b) 非接触型

五感との関係で言えば、非接触型センサの代表的なものは視覚センサおよび聴覚センサであろう。

機械の知能化のためには、視覚・聴覚センサは必要不可欠であると言っても過言ではない。ジオメカトロニクス技術に関して言えば、地質条件、地盤・岩盤の形状、粒度分布あるいは機械同士の位置認識などが必要になってくる。そのための視覚・聴覚センサとしては、超音波センサ、レーザセンサやAE技術などの利用も考えられるが、画像は瞬時に広範囲の環境を把握でき、かつ目的に応じた処理が柔軟にできることから、特に画像を用いた視覚センサが幅広く利用されており、ジオメカトロニクスの高度展開にはなくてはならないセンサと言える。その適用例は6.で述べる。

画像を利用した粒度分析の例を紹介する。発破成績は一般に発破後の岩石の粒度分布によって行われることが多い。岩石の粒度は、鉋石の積み込み作業などの効率に大きな影響を及ぼすため、その評価は重要であり、その評価法の一つとして画像解析が試みられている²⁾。これは、CCDカメラにより破碎堆積物の画像を取得し、岩石の輪郭を抽出して全体の粒度分布を推定するものである。精度の面で検討の余地が残されているものの、画像解析の有用性がすでに検証されてい

る。

作業機械に特殊な用途が期待される場合もある。例えば、農業土木関連では土壤中の硝酸性窒素の含有量をリアルタイムで判定するためのセンサーが開発されている³⁾。環境分野での計測機械で同種の試みが今後増えてくる可能性がある。

(2) 地盤と機械系の相互作用の評価

地盤と機械系の相互作用については、テラメカニクスの観点から膨大な量の研究がなされており、それらは国内でまとめられたものに限っても文献^{4)~9)}などがあるので参照されたい。特に走行機械の足廻り部と地盤の相互作用、掘削問題については研究が多い。ただし、一般に固体と地盤材料間の相互作用の問題は複雑で難解であるため、従来の研究の中心が現象の忠実なモデル化にあり、これらの結果を自動化・ロボット化まで生かした例は少ないのが実情である。

ところで、地盤と機械系の相互作用を解明するためには、地盤特性以外に以下の2つの要因を明らかにしなければならない。

a) 機械特性

機械特性については、まず地盤と接触する部分の形状(タイヤ、履帯、掘削板など)、サイズ、材質を把握しておかなければならない。形状については、走行機械のいわゆるタイヤ、剛性輪、履帯等、掘削機械の土工板、バケット、ドリル等、多種多様なものがある。材質に関しては、構造体としての変形・強度特性を支配するのみでなく、表面の特性が摩擦、摩耗、付着などの現象に強く影響する。これら以外に、機械の重量・接地圧に対する考慮も重要である。さらに、機械本体の動特性も相互作用に大きな影響を及ぼす。

b) 作業環境・作業特性

まず作業環境としては、気温、湿度、風、有毒ガスの有無などが地盤と機械系の相互作用に影響を及ぼす。特殊な場合であるが、海中であれば流速、濁度、水圧などについて検討する必要がある。また、月面などの惑星が対象であれば、重力、真空度、大気などの影響も合わせて検討されなければならない。

次に、具体的な作業特性としては、まず地盤に対する作業の方向が問題になる。垂直、水平、斜めなど多くの方向性が考えられる。また、作業の動的特性としては、静的、動的(振動、衝撃)等の影響を考慮する必要がある。さらに、作業の連続性(離散的、連続的)についての検討も必要となる場合があろう。

(3) 地盤特性を考慮した自動化・ロボット化

機械による作業の自動化を実現するためには、最終的には機械のアクチュエータを如何に制御するかとい

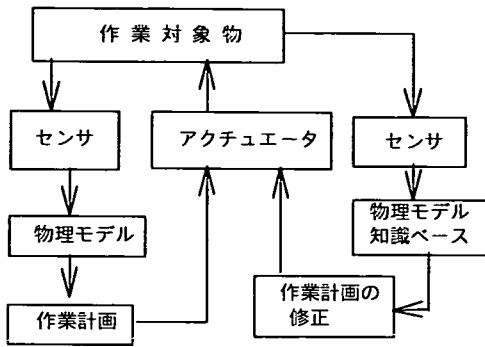


図-2 地盤特性を考慮した自動化・ロボット化の概念

う問題に帰着する。例えば地盤をバケットにより掘削する場合、対象となる地盤特性をセンシングし、それをもとにした作業計画を構築し、その作業計画を実現するように機械のアクチュエータを制御することになる。外乱等が全くない場合は、このフローで作業の自動化はほぼ達成されるが、外乱が生じた場合は、現在の作業状態をセンシングし、その状態を判断して作業計画を修正し、修正作業計画を実行するようアクチュエータを制御する、といったアルゴリズムが自動化・ロボット化のために必要になってくる。以上の流れの模式図を図-2に示す。岩盤の破碎、積み込み、運搬という典型的土工作业において、自動化・ロボット化を検討した事例を6., 8.で紹介する。

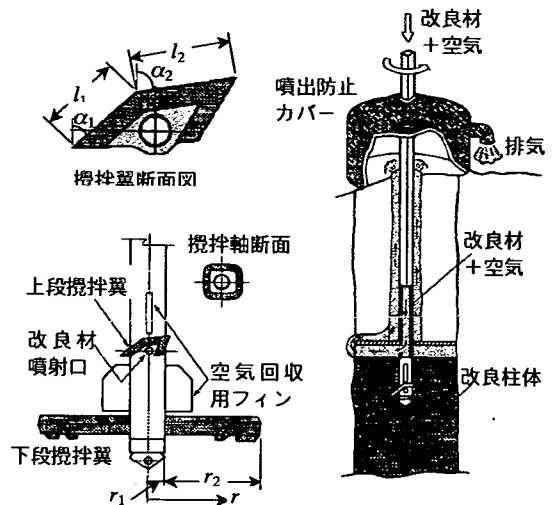
以下、上記の考え方に従い、ジオメカトロニクスが具現化された研究事例を紹介する。

4. DJM 工法における対象地盤特性のリアルタイム評価

(1) DJM 工法とジオメカトロニクスの役割

深層地盤改良工法の一つに Dry Jet Mixing 工法(粉体噴射攪拌工法、略称 DJM 工法)がある。この工法では先端に攪拌翼が取り付けられた攪拌軸を回転させながら軟弱地盤中に入らせていき、土中にセメントや石灰などの粉粒体の改良材を供給する(図-3参照)。改良材は空気流により地上から攪拌軸内を搬送され、攪拌翼付け根部から翼の回転によって地中に生じる空隙部に吐出される。吐出された改良材は攪拌翼の回転に伴って回転軌跡全面に均等散布され、さらに原位置土と攪拌混合される。土と混合された改良材は、ポズラン反応、水和反応などによって短時間に安定した固結土を形成し、地中に改良柱体が形成されることになる。

DJM 工法では、効率的な施工を行うために地中の



(a) 攪拌翼の構造

(b) 施工状況

図-3 深層混合処理工法と攪拌翼

地盤特性に応じて攪拌翼貫入時の機械制御を行ったり、均一な改良柱体を得るために地層構造に応じて噴出する改良材の吐出量を調整することが求められる。ジオメカトロニクスでは、この DJM 工法において施工中にリアルタイムで地盤特性を評価し、その結果を機械制御や施工の最適化に利用する手法を提案する。

(2) DJM 工法における地盤評価手法

DJM 工法において施工中にリアルタイムで地盤特性を評価するには、攪拌翼を地中に入るときに翼に作用する貫入抵抗や攪拌トルクなどの機械負荷に関する計測値と、翼の貫入速度や回転速度等の操作条件を利用する。これらの計測値から地盤特性を推定するには、機械負荷と地盤特性の関係、およびこの関係に及ぼす操作条件の影響を把握しなければならない。この検討については、攪拌翼の回転貫入を翼による地盤の掘削問題と考え、理論的に考察する方法¹⁰⁾と、ファジィ推論等を用いて処理する方法¹¹⁾がある。本稿では前者の方法を用い、以下、機械負荷や操作条件から地盤特性を推定する手法とその機械制御への利用について説明する。

本研究では、攪拌翼に作用する回転トルク T ($t \cdot m$)、攪拌翼の回転数 f (回転/min)、貫入速度 v (m/min) から地盤特性である N 値を推定することを考える。

攪拌翼が地中に回転貫入する際に地盤から翼に作用する抵抗は、平刃で地盤を切削する際に刃に作用する切削抵抗の推定式を利用して求めることができる。

図-4は、平刃により地盤を掘削する状況を表している。このとき平刃に作用する水平抵抗 $H_a(N)$ は下式で表わされる¹²⁾。

$$H_a = 1.82 \cdot B \cdot t^2 \cdot R_s 10^{-ma} + B \cdot b \cdot t \cdot \frac{dt}{dx} \tan \delta \quad (1)$$

ここで、式中の諸量は下記のとおりである。

B : 切削刃の幅 (m)

t : 切削深さ (m)

x : 水平移動距離 (m)

R_s : 土の比掘削抵抗 (N/m^3)

α : 切削刃のすくい角 (deg)

b : 貫入抵抗係数 (N/m^2)

δ : 切削刃と土の間の摩擦角 (deg)

m : 土質により決まる定数

この式の右辺第一項は、平刃が一定の深さで土を掘削するときに平刃に作用する掘削抵抗を、また、第二項は、平刃が地中に貫入する際に刃先に作用する貫入抵抗を表わす。式中の R_s は、地盤の強さを表わす指標で、通常は原位置試験で簡単な計測により求めるが、土の粘着力 c (N/m^2) と内部摩擦角 ϕ (deg) を用いると式(2)で表わすこともできる。また、 c , ϕ と N 値との関係は一般に式(3), (4)で表される。

$$R_s = CR \cdot (c + p(z) \tan \phi) \quad (2)$$

$$\phi = \sqrt{20N} + 15 \quad (3)$$

$$c = 6.125 \cdot N \cdot 10^3 \quad (4)$$

ここで CR は、 R_s 計測装置の諸元により決まる係数で、幅 5 cm の鋼版を 10 cm の深さだけ地盤に貫入して土の強度を調べる場合には $CR = 36.6$ (1/m) となる。また、 $p(z)$ は、地中で切削刃に作用する鉛直土圧 (N/m^2) である。

DJM 工法の攪拌翼は平刃が回転軸に取り付けられたものと考えることができる (図-3(a)参照)。そこで、式(1)で表される切削抵抗が攪拌翼の各点に作用すると考えると、回転軸周りのトルク T は平刃に作用する切削抵抗の効果を積分することにより式(5)で求めることができる。

$$T = 4 \int_{r_1}^{r_2} 1.82 R_s \{ (l_1 \cos \alpha_1)^2 10^{-ma_1} + (l_2 \cos \alpha_2)^2 10^{-ma_2} \} r dr + 4 \int_{r_1}^{r_2} b t \frac{v}{2\pi f} \tan \delta dr \quad (5)$$

式(2), (3), (4)より、攪拌トルク T (t・m) と地盤の N 値の関係、ならびにそれに及ぼす貫入速度 v (m/sec) の影響を計算で求めることができる。

これらの結果より T と N 値, v の関係を定量化すると式(6)が得られる。ただし、攪拌翼の回転数は一般に用いられる $f = 40$ (回転/min) に固定している。

$$T = a(v+b)(N+c) + d \quad (6)$$

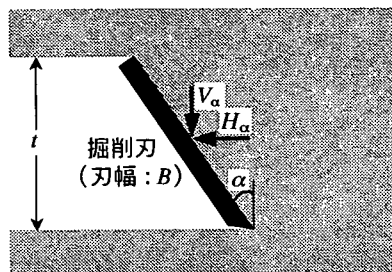


図-4 平刃に作用する掘削抵抗

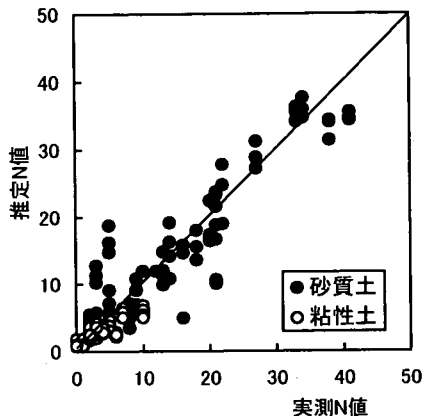


図-5 DJM 施工中に推定した地盤の N 値

ここで、 a , b , c , d は機械の諸元や土質により決まる係数で、実機を用いた現場実験の結果と照らし合わせると、汎用的な機種に対しては砂, 粘土でそれぞれ下記の値をとる。

砂質地盤: $a = 401$, $b = 2.0$, $c = 0.56$, $d = 1417$

粘土地盤: $a = 1200$, $b = 2.0$, $c = 0$, $d = 2000$

図-5 は、式(6)の適用性を調べるために、実際の現場計測で T と v に関する計測結果から N 値を予測し、それを実測 N 値と比較したものである。この図より、ばらつきはあるものの、式(6)により地盤の N 値を施工中にリアルタイムで評価することができる。この評価方法を利用すると、攪拌翼貫入時に翼に作用する負荷と回転数、貫入速度の操作条件により、地盤特性を把握することができる。さらに、攪拌翼が所定の深さまで貫入した後改良材を吐出しながら翼を引き抜くとき、貫入時に評価した地盤特性に応じて各深さごとに改良材の吐出量を調整すると均一な改良柱体を作ることも可能となろう。

5. 連壁用掘削機の位置制御の自動化

(1) 連続地中壁工法および掘削機

連続地中壁工法は、地盤中に連続する壁体を造成する工法である。造成された地中壁は、地下水の移動を遮断したり、地盤の水平土圧をそれ自体で受け持ち地盤の水平方向移動を押さえるといった目的のために用いられる。この工法は、他の工法に比べて、掘削周辺地盤への影響が少ない、工期が短く安全な施工ができる、低公害（低騒音・低振動）工法であるなどの理由から従来よりよく用いられてきている。

連続地中壁（以下連壁と略す）を造成するための掘削機の位置制御は、連壁の主たる目的である遮水性に特に重要な影響を及ぼすため精度よく実施されなければならない。100 m を超える大深度の連壁も珍しくなく、こうした連壁では設計値に対して横ずれを深さの1000分の1程度に収めるといった厳しい管理が要求されている。ジオメカトロニクスの適用が期待される典型的な一例である。本稿では、水平多軸回転カッターを利用して地盤を掘削する回転式連壁用掘削機を念頭においている。

(2) 掘削機の位置制御

回転式を含め連壁用掘削機の位置制御は、当初、手動で実施されていた。この手動による位置制御は連続的な緊張を強いるため、オペレータにとっては典型的な苦渋作業であり、しかも技能者不足もあり、早急に自動化を推進することが期待されていた。ここでは、地盤特性を考慮した制御アルゴリズムが掘削機の位置制御にとって重要であることを、簡単な室内掘削実験結果をもとに紹介する。

深川らは、連壁用モデル掘削機を製作し、制御に関わる種々の要因について考察を加えた^{13)~16)}。図-6にモデル掘削機による試験装置¹³⁾を示す。このモデル掘削機は、両側面に各々1個、計2個の制御用載荷板を有し、掘削機本体上部のヒンジ回りによりのみ回転できる。連壁用掘削機の位置制御は、アジャスタブルガイドあるいはアジャストガイドと呼ばれる制御用載荷板を地盤に押しつけることによって達成される。制御結果には、多くの因子からなる制御条件のほか、地盤条件や掘削機本体の作動特性などが影響を与える。

ところで、対象地盤が砂か粘土かは制御結果に重大な影響を与える。例えば、かなり固い砂利地盤のような地盤と、豆腐のような軟らかい地盤を想定してみよう。基準位置からのずれに応じてある量だけ制御板を操作することになると、砂地盤と粘土地盤では大きな差の現われることが予想される。砂地盤では、基準位

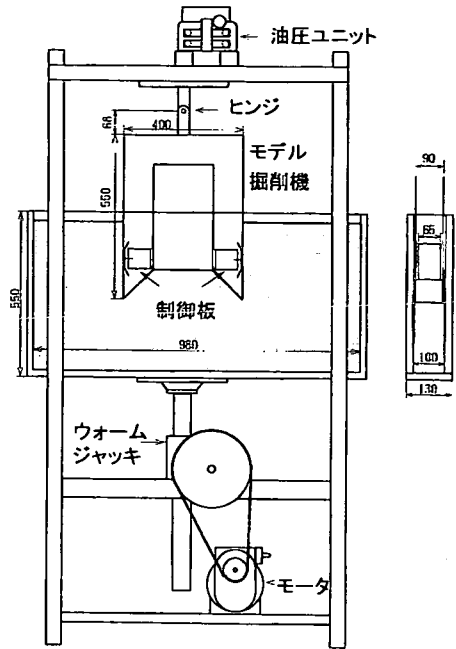


図-6 連壁用掘削機モデル試験装置

置に戻すための反力は得やすい代わりに、掘削機本体をある量だけ変位させることは相対的に困難である。一方、粘土地盤では、反力は得にくいに変位は生じさせやすいかもしれない。粘土地盤ではさらに制御板に対する土の付着の問題があり、現象はかなり複雑になる。実験では、とりあえず地盤剛性の影響を見るために、4種類の粒状材料を用いてモデル実験を実施した。用いた粒状材料は、豊浦砂、川砂、ポリエチレンビーズ、発泡スチロールビーズである。豊浦砂、川砂の平均粒径はそれぞれ0.25、1.0 mmであり、いずれも粒径幅の狭い砂である。また、ポリエチレンビーズはそれぞれ2.7、6.5 mmであり、ほぼ均一の粒径の粒子からなる。実験は掘削機下端を10 mm、基準状態から時計と逆回転方向に変位させた状態から開始した。基準状態は、掘削機本体が掘削機上部中央のヒンジの鉛直下方に自然に釣り下がった状態である。制御は比例制御動作に基づいて行い、その際感度を5~100の間で種々変化させた。感度は入力値に対する出力値の比として定義され、感度が大きいほど敏感な制御が実施されることになる。掘削機の地盤への貫入速度は0.35、0.6、1.0 mm/secの3種類設定した。

図-7に豊浦砂に対する典型的な実験結果を示す。このケースでは制御は順調に行われ、ほぼ14 secで基準状態回りに近づいていることがわかる。なお、制御しなければ掘削機本体が基準状態近くに落ち着くことはほとんど期待できない。

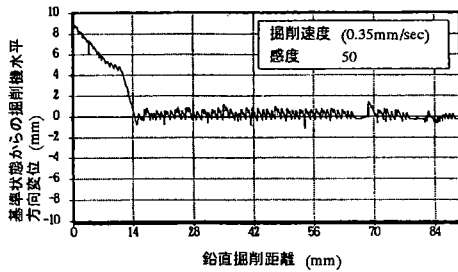
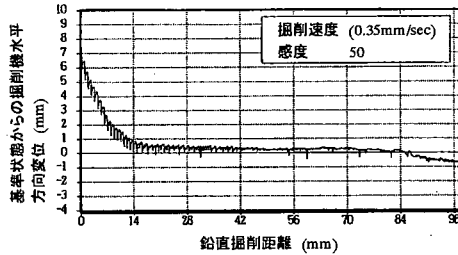
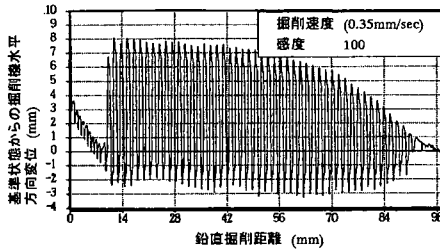


図-7 豊浦砂に対する典型的な制御結果



(a) 感度 50 の場合



(b) 感度 100 の場合

図-8 制御結果に及ぼす感度の顕著な影響の一例 (発泡スチロールビーズの場合)

地盤材料が変形しやすいものであると、制御結果にも顕著な影響が現われる場合がある。図-8は発泡スチロールビーズに対する実験結果であるが、感度 50 の場合はほぼ基準状態近傍に制御されているのに対し、感度 100 ではいわゆるハンチング現象的な極端な振動現象が見られた。

図-8 ほどではなくとも、地盤材料によって、適切な制御結果を与える制御条件が変化するようであった。図-9 に川砂の制御結果に及ぼす感度の影響を示している。縦軸の SS は、掘削機が基準状態に復帰した後の変位量の標準偏差である。制御結果は掘削貫入速度の影響も受けるが、感度としてはほぼ 50 程度を設定すればよいことがわかる。図-10 は豊浦砂に対する制御結果を示したものである。この場合、感度は 20 程度以上であればさほど制御結果に影響は与えな

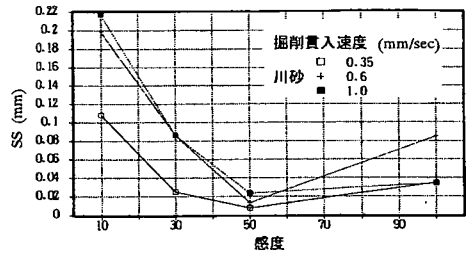


図-9 制御結果に及ぼす感度の影響(川砂)

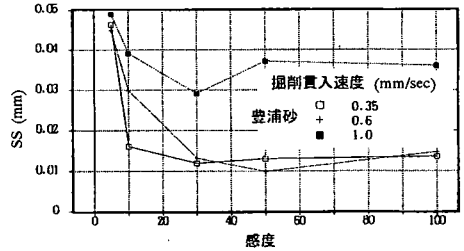


図-10 制御結果に及ぼす感度の影響(豊浦砂)

いようである。また、川砂に対して SS が全体に小さく、制御しやすいことがわかる。これらに対して、ポリエチレンビーズ、発泡スチロールビーズではさらに複雑な感度および貫入速度依存性を示した。

以上のように、地盤特性によって制御結果はかなり影響を受けるから、制御アルゴリズムに地盤特性を組み込む方が滑らかで合理的な制御結果を生むことは容易に想像できる。もし、制御板の载荷に対する掘削機本体の応答をあらかじめ予測できれば、制御条件をより合理的なものに変えることが可能となろう。

以下、図-6 に示すモデル掘削機において、左側の 1 個の制御板を押し出した場合のモデル掘削機本体の戻り量を推定した。

図-11 は、理論値と実験値の比較を行ったものである¹⁶⁾。横軸の地盤反力係数は地盤の変形特性を表現しており、地盤反力係数が大きくなるほど地盤は変形しにくい。理論値は、平板载荷を行った場合の载荷応力～変位関係にある指数分布曲線型の関数で近似し、ヘンジ回りのモーメントの釣合を考慮することによって得ている。また、左側の制御板が 30 mm 押し出された時点での本体の水平方向戻り量に対応している。図-11 より、本体戻り量の実測値の傾向は、定量的にもほぼ理論的に推定しうることがわかる。したがって、制御板の载荷量に対する掘削機本体の戻り量をモニターすることによって、より適切な制御板の制御量が設定できることになる。ただし、実際は地盤条件が深さ方向に複雑に変化することが多いため、制御条件(载荷速度、制御板変位量など)を合理的に変更するため

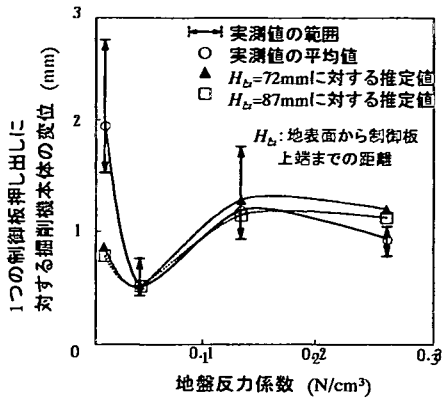


図-11 制御板载荷に対する本体戻り量の実験値および推定値

にはさらに研究を重ねる必要がある。

いずれにしろ、地盤特性を考慮した制御を実施することによって、より信頼性の高い位置制御が達成できる可能性が高い。実機位置制御においては、ファジィ制御という形でここで述べたジオメカトロニクスの実現が図られた^{17),18)}。

6. ロータとダンプトラックの知的協調作業による積み込み・運搬作業の自動化

(1) ロータとダンプトラックの協調作業

土木・建設現場あるいは資源開発現場における基本的な作業の一つに、大量の土砂・鉱石の積み込み・運搬作業があり、この作業は一般にローダとダンプトラック（以下、ダンプと記す）の組み合わせにより行われている。現在、ダンプの自動走行は実用化の域にあるが、土砂・鉱石の積み込み作業は未だオペレータの操作によっていることから、作業の完全自動化を目指した要素技術に関する研究が行われている。

ところで、ローダの作業能力とダンプの作業能力を比べた場合、ローダの作業能力がダンプの作業能力を上回る場合と、その逆の2通りがある。前者の場合、ローダは土砂・鉱石をバケットに積み込んだ状態でダンプの到着を待つ。すなわち、ダンプが停止しているローダに接近する。後者の場合、逆にローダが停止しているダンプに接近することになる。そこで、土砂・鉱石の積み込み・運搬作業を自動化するためには、1) ロータがダンプに自動接近するための制御アルゴリズムおよび2) ダンプがローダに自動接近するための制御アルゴリズムの2つが必要になる。

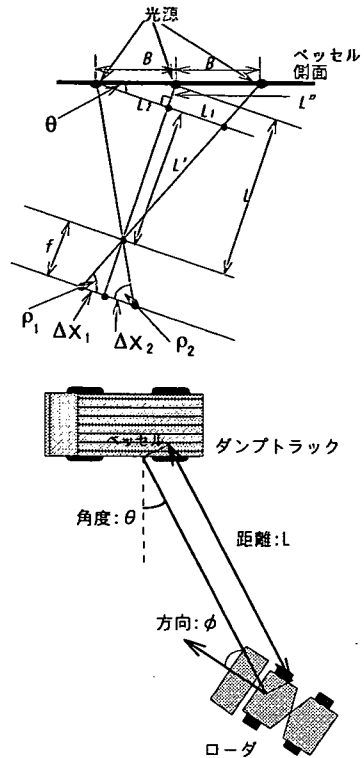


図-12 ロータがダンプに自動接近するための制御アルゴリズム

(2) ロータがダンプに自動接近するための制御アルゴリズム

この場合、ローダの仕事はバケットに満載されている土砂・鉱石をダンプのベッセルに積み込むことであるから、ローダはダンプのベッセルを認識しながらダンプに接近する必要がある。図-12は著者らが提案したアルゴリズムの概略を示したものである¹⁹⁾。Lはローダとダンプとの間の距離であり、phiはローダとダンプのベッセル中心を結ぶ直線がローダの進行方向と成す角度である。また、fはCCDカメラの焦点距離、Bは光源間の距離であり、角度rho1およびrho2は図-12に示すように定義される。本システムでは、ベッセルの側面に光源を設け、ローダに搭載したビジョンシステムがベッセル側面の光源を捉え、ベッセルの位置・姿勢を認識しながらダンプに接近する。さらにローダには超音波センサが搭載されており、これによりダンプとローダの間の距離を認識し、最適な位置でバケットを制御し、土砂・鉱石をベッセルに積み込むようになっている。模型を用いてローダがダンプに接近し、積み込み作業を実行する制御実験を行ったが、本アルゴリズムを用いることにより、ローダはダンプとの位置関係を認識し、積み込み作業を自律的に実行するこ

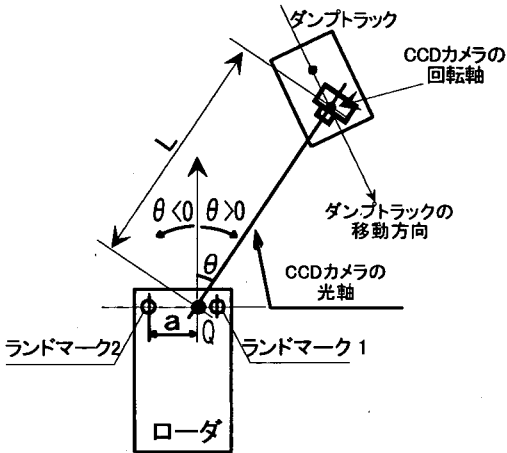
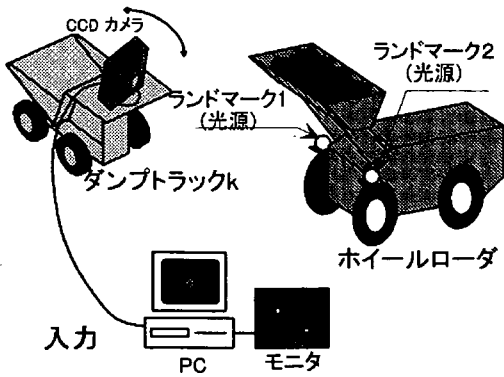


図-13 ダンプがローダに自動接近するための制御アルゴリズム

とが確かめられた。

(3) ダンプがローダに自動接近するための制御アルゴリズム

この場合、ダンプの仕事は積み込み地点で待機しているローダの前面に、ローダの進行方向とダンプの進行方向が直角になるように姿勢を保ちながら接近することである。したがって、ダンプはローダの位置・姿勢を認識する必要がある。図-13は著者らが提案したアルゴリズムの概略を示したものである²⁰⁾。Lはローダとダンプとの間の距離であり、 θ はダンプに搭載された CCD カメラの光軸がローダの進行方向と成す角度である。本システムでは、ローダの前輪の上方に2つの光源を設置し、ダンプに設置した回転可能なビジョンシステムによりその位置情報を取得し、さらに姿勢を認識するようになっている。このダンプの移動制御法の妥当性を検討するために、ダンプおよびローダの模型を用いて移動制御実験を行った結果、ダンプの実際の位置と推定した位置がほぼ一致しており、自己

位置・姿勢推定法は有効であることが確認された。また、作業終了後のダンプの停止状態と理想的な停止状態の比較を行い、その結果から、本研究で提案した移動制御法の妥当性が確認された。

ローダがダンプに自動接近するための制御アルゴリズムについては、ローダにレーザ照射装置を搭載し、またダンプ側にはベッセルの側面に反射板を設置し、ダンプの位置・姿勢を認識する試みも行われている²¹⁾。実際の制御では、重機の暴走は絶対に避けなければならない重要な問題であるので、複数のセンサシステムにより安全性を十分確保できるような制御アルゴリズムの開発が望ましいと考えられる。そして、この制御アルゴリズムの開発は、いわゆるジオメトロニクス技術の活用なくしては困難であり、ジオメトロニクス技術に寄せられる期待は大きい。

7. 振動締めにおけるジオメトロニクス

(1) 振動ローラと締め度管理

振動ローラは、機械内部に回転する偏心重りを持ち、その遠心力により周期的な振動力を発生させる土工用建設機械である。この機械は本体の自重と振動力の作用により効率的に土を締め固めることができるため、フィルダム、道路盛土、宅地造成、埋設管の埋め戻しをはじめ種々の土工事において広く利用されている。

振動ローラの振動挙動が土の締め固めの進行とともに変化することは、このローラが開発された当初より知られている。これは、土が締め固まるとともに地盤剛性が増加し、これに伴い振動ローラの振動挙動が変化するためである。この現象を利用して振動ローラの振動挙動から締め固め度を評価する手法が1970年代後半にヨーロッパで開発され²²⁾、北欧ではすでに実施工における管理手法として取り入れられている。ジオメトロニクスでは、この地盤評価手法を利用して、さらに地盤特性に応じて振動ローラの振動特性を制御することにより、より効率的な締め固めを実現する手法を提案する。

(2) 地盤の締め固めに伴う振動ローラの振動挙動の変化とその利用

図-14は、道路盛土の建設現場において振動ローラの振動輪の加速度波形を計測した結果である。振動ローラは10tクラスの中型の機械で礫質土を締め固めたときのデータである。図-14(a)は転圧初期で、あまり締め固められていない地盤上を走行した場合、図-14(b)は締め固めが進み剛性が大きくなった地盤上を走

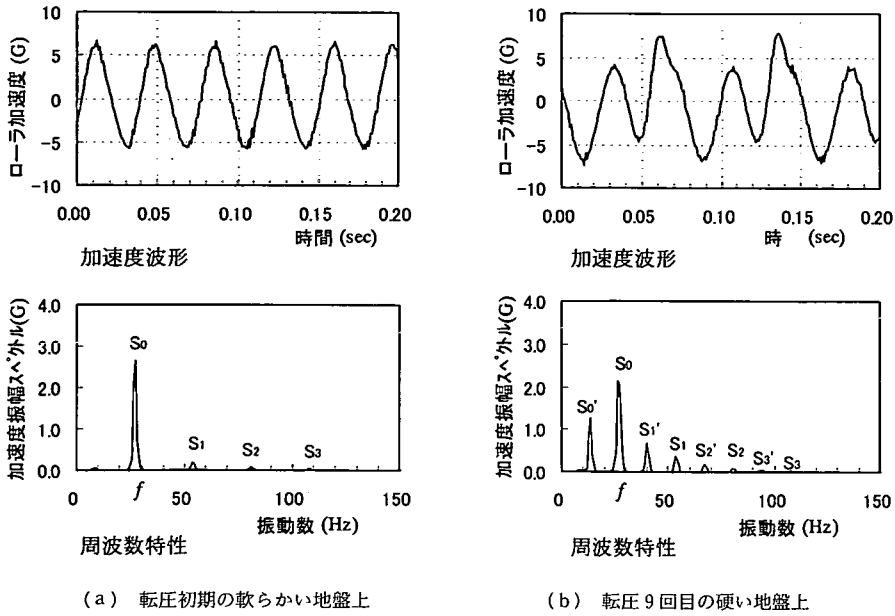


図-14 振動ローラの振動挙動変化(実測結果)

行した場合の振動波形である。

これらの図より振動輪の振動挙動は地盤の締固め度、すなわち地盤の剛性により異なり、地盤剛性が大きくなると加速度波形が乱れ、その周波数特性に振動輪の振動数の他に、その高調波成分や分数調波成分も成長してくることが読みとれる。これは地盤剛性が大きくなると振動輪がその振動過程において、地盤からの飛び上がりや地表面との衝突を繰り返す挙動を採るためと考えられる²³⁾。この波形の乱れを定量化するために本研究では式(7)で定義される乱れ率 SD を用いることにする。

$$SD = \frac{\text{基本振動数の高調波と分数調波に対するスペクトルの総和}}{\text{振動ローラの基本振動数に対するスペクトル}} \quad (7)$$

(3) 振動輪の振動挙動を利用した地盤剛性の評価

図-15は種々の地盤をVoigtモデルで置き換え、振動ローラの振動挙動を数値計算で求め、その結果から乱れ率 SD と地盤剛性 k_2 との関係性を求めた結果である²⁴⁾。この計算では、地盤剛性 k_2 、地盤の粘性係数 c_2 の他、振動ローラのフレーム質量(バネ上質量) m_1 、振動輪質量(バネ下質量) m_2 、起振力 F 、振動数 f 等の機械諸元に関するパラメータを以下に示す範囲で種々に変化させ、振動ローラの振動挙動を計算している。

m_1 : 500, 1000, 3000 (kg)

m_2 : 1000, 2000, 4000 (kg)

f : 20, 40, 60 (Hz)

$$F: 2(m_1 + m_2)g, 3(m_1 + m_2)g, 4(m_1 + m_2)g \text{ (N)}$$

(g : 重力加速度 9.8 m/sec²)

この図より、いずれの振動条件においても乱れ率は地盤剛性ととも増加するが、その関係は振動条件により大きく異なることがわかる。このため、施工中に振動ローラの挙動から地盤剛性を評価するには個々の振動ローラに対して乱れ率～地盤剛性の関係をあらかじめ求めておく必要がある。しかし、この関係は振動ローラの振動数が若干なりとも変動すると著しく影響されるため、振動条件の影響を除去することが望まれる。そこで、図-15の計算結果を整理し、横軸を式(8)で表わされる正規化した振動数(接地限界振動数比 R と呼ぶ)で表わすと図-16が得られた²⁴⁾。式中の f_{jump} とは振動輪が地盤から飛び上がる限界の振動数で、地盤特性 (k_2, c_2) と振動ローラの機械諸元 (m_1, m_2, F, f) から決まる。

$$R = \frac{f_{jump} - f}{f} \quad (8)$$

$$f_{jump} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{m_2} \sqrt{1 - 2\alpha D_2^2 + \sqrt{4\alpha D_2^2 - 4\alpha D_2^2}}}$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{F^2}{(m_1 + m_2)g} \right)^2, \quad D_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{m_2 k_2}}$$

この図より明らかなように、ばらつきは存在するものの、図-15の振動条件の影響はほぼ除去され、乱れ率と接地限界振動数比 R の間に一意的な関係が見い出される。この図より、乱れ率の計測値から接地限界

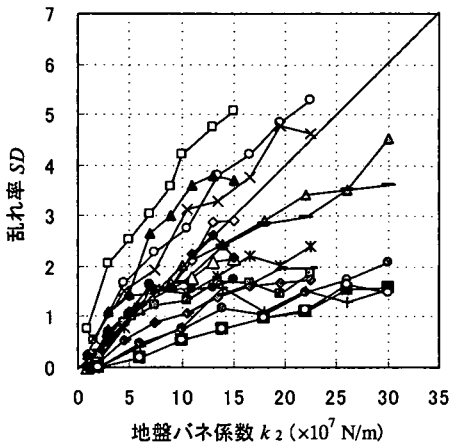


図-15 乱れ率 vs. 地盤剛性(計算結果)

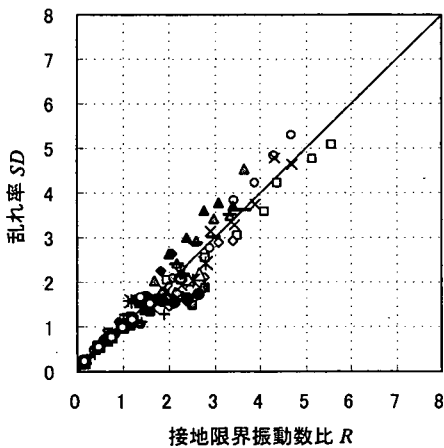


図-16 乱れ率 vs. 接地限界振動数比(計算結果)

振動数比 R を決定し、これに振動ローラの諸元を代入すれば地盤剛性 k_2 を決めることができる。

(4) 締固めに最適な振動条件

振動ローラが地盤に与える効果のうち締固めに最も効果的な要因は最大接地荷重(締固め力)である。締固め力は、地盤剛性と振動ローラの諸元との相互作用で決まるため、地盤剛性に応じて振動ローラの振動条件を変化させてやれば、より効率的な締固めを実現することが可能となる。前述の数値計算で振動ローラが地盤に与える締固め力と地盤剛性、ならびに振動条件の影響を調べた結果、地盤剛性の大きさに応じて締固め力を最大にする振動数の存在が明らかになった。このことは、地盤剛性に応じて振動ローラの振動数を変化させてやればより効率的な締固め施工を実現することができるということの意味する。この計算結果か

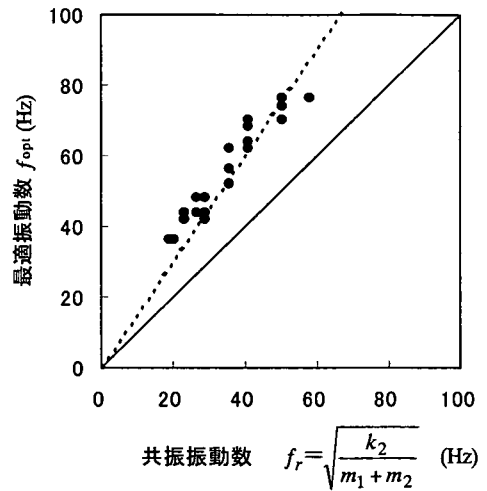


図-17 最適振動数(計算結果)

ら、個々の地盤条件に応じて最大締固め力を発揮する振動数を最適振動数 f_{opt} とし、これを地盤剛性 k_2 を振動輪荷重 $(m_1 + m_2)g$ で除した $k_2 / (m_1 + m_2)g$ に対して整理した。その結果を図-17に示す。ただし、横軸は平方根で表わし、さらに 2π で除している。これは、振動ローラ～地盤系の共振振動数 f_r に相当する。この図より、前述の方法により振動ローラの振動挙動から地盤剛性 k_2 を評価し、図-17の関係を利用してその地盤を締固めるのに最適な振動数を決定すれば効率的な締固めを実現し得ることになる。すなわち、作業対象である地盤の特性をリアルタイムで評価し、その情報を利用してその地盤を締固めるのに最適な振動条件に調整することのできる機械を開発し得ることになる。

8. 硬岩自由断面掘削機とLHDの自動化

(1) 資源開発分野における自走型岩盤掘削機

現在の豊かな文化生活を維持・発展させるためには、大量の資源・エネルギーの確保がきわめて重要である。地下深部には未利用の資源・エネルギーが大量に賦存しているが、そこは大深度・高温・多湿など、作業員にとって過酷な作業環境であることが予想される。そこで、地下深部における資源・エネルギーの開発には、高温・高圧環境下における狭い空間内で岩盤を自律的にかつ効率的に掘削する機械および掘削した土砂・鉱石を自律的に運搬・排出する機械の開発が必要不可欠である。そのためには、岩盤の強度、地質条件あるいは破碎堆積物の堆積形状をリアルタイムで認識し、その結果を作業計画にフィードフォワードする

必要がある。このような作業では、ジオメカトロニクスの果たす役割はきわめて大きい。ここでは、自走型岩盤掘削機の概略を述べるとともに、地下作業現場における代表的な積み込み・運搬機械であるロード・ホール・ダンプ (LHD) の自動化の現状について簡単に解説する。

(2) 硬岩自由断面掘削機 (モービルマイナー)

モービルマイナーは、鉱山における横坑を掘削することを目的に開発された機械であり、横坑掘削には多くの実績がある²⁵⁾。最新のモービルマイナーは、従来のモービルマイナーをベースにしており、機械の前面に直径 130 インチのカッターホイールを有し、そのホイールの周囲に、岩盤を掘削するためのディスクカッターおよびゲージカッターならびに掘削土砂をかき取る役割を果たすパドルが設置されている。カッターホイールを回転させながらディスクカッターを岩盤に押し付け、さらにホイールを上下左右に移動させることにより自由断面を掘削できるようになっている。掘削されたずりは、パドルにより掻き取られ、前面中央のホッパ部に集められ、ベルトコンベアにより機械後方に搬送し、ダンプトラックで坑外に排出される。

岩盤強度に応じた最適操業条件が選択されるとともに掘削作業は自動制御されており、TG システム (Tunnel Guidance System)、PG システム (Profile Guidance System) および PLC システム (Programmable Logic Control System) が、全ての自動掘削を制御する。足回りには履帯式の走行機構を有し、機動性があるのも特徴である。

(3) ロードヘッダ (ブームヘッダ)

ロードヘッダは、モービルマイナーと同様に自由断面掘削機と称されるが、モービルマイナーとは異なり、機体前方のブーム (アーム) 先端に取り付けたカッターヘッドを回転させながら岩盤に押し付けて岩盤を掘削する機械である。カッターヘッドは多数のビットから構成されており、このカッターヘッドを比較的自由に動かすことができるため、自由断面を掘削することができる。排土機構は、モービルマイナーとほぼ同じである。

(4) LHD 自動化の現状

LHD は、1 台で土砂・鉱石等の積み込み・運搬および荷下ろしを行う機械であり、図-18 に示すようにホイールロードに似た構造を有している。ホイールロードとの違いは、すくい取った土砂・鉱石を自らダンピング地点まで運搬して排出する点である。LHD は上述したように主として地下環境で用いられるが、今

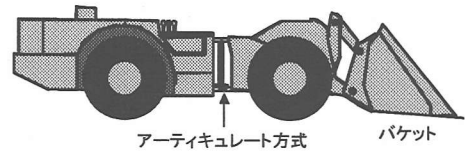


図-18 従来の LHD の構造

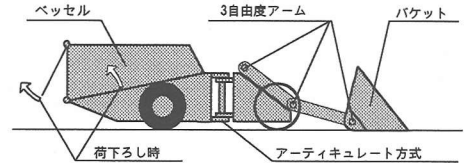


図-19 新たに考案した LHD の構造

後、作業環境が地下深部に移行するにつれて高温・多湿になるなど作業員にとって過酷な作業環境になることが予想されているため、LHD の自動化技術の開発が各国で精力的に行われている。特に自動走行に関しては、ほぼ実用の域にあり、電磁誘導方式²⁶⁾、光学誘導方式²⁷⁾、自律走行方式²⁸⁾などが提案されている。電磁誘導方式は、走行ルートにケーブルを埋設し、ケーブルに電流を流し、発生する磁界を機械に搭載したピックアップコイルで検出し、ケーブルに沿って LHD を誘導するものである。光学誘導方式は、天盤に反射テープを貼り付け、さらに LHD に光学ビジョンシステムを搭載して、テープの位置を認識し、テープに沿って LHD を誘導しようとするものである。これに対して、自律走行方式は、超音波センサを車体の両側側面に設置し、壁面との距離を認識しながら、坑道ネットワーク内を自律走行するものである。土砂・積み込み機構に関しては、掘削抵抗力解析が進められている程度である。今後は、LHD に搭載されたビジョンシステムとの組み合わせにより、ずり (土砂・鉱石) の状態を把握して力覚センサにより掘削作業時の状態を判断し、自律的にずりを積み込むアルゴリズムの確立が期待される。LHD は一度にバケットの容量分しか土砂・鉱石を運搬できないことから、運搬距離が増大するにつれて作業効率が大幅に低下してしまう。LHD を無人化できれば、オペレータのためのキャabinは不要になり、その結果、オーバーヘッドによる積み込みが可能になる。著者らは、図-19 に示すように LHD の後部にベッセルを搭載して運搬容量を増加させ、オーバーヘッド方式により土砂・鉱石をベッセルに自ら積み込む新たな LHD の機構についての研究を進めている。土砂・鉱石の自動積み込みを実現するためには、バケットと土砂・鉱石との相互作用力の評価が必要不可欠である。すなわち、ジオメカトロニ

クスの高度活用により本作業の実現が達成されると言っても過言ではない。

9. おわりに

機械工学と電気・電子工学を基礎として発展してきたメカトロニクス（機械の自動化を図る技術分野の総称）に地盤工学・岩盤工学を融合させた新しい研究・技術分野として「ジオメカトロニクス」を提案した。ジオメカトロニクスでは、土や岩などの地盤材料を作業対象とする機械が地盤特性を自動的に評価し、地盤と機械系の相互作用に関する知見をベースにその地盤に最適な作業を行うための機械制御を行うことを想定している。ジオメカトロニクスの発展によって地盤・岩盤に関わる各種作業が自動化あるいはロボット化され、苦渋作業や危険な作業などが減り、かつ作業コストの低減に繋がる可能性もある。本論文では、ジオメカトロニクス技術の開発に必要な要素技術とそれを利用した事例研究を紹介した。今回は紙面の都合により一部の技術開発事例しか紹介できなかったが、この他にも著者らの関係した事例には、シールド掘進機の制御^{29),30)}等様々な事例がある。本論文を機会に、他技術分野との学際領域であるジオメカトロニクスに多くの方々が関心をもっていただき、そのことが施工環境の改善などに結びつければ筆者らにとっては望外の喜びである。

参考文献

- 1) 江尻正員, 大田友一, 池内克史: マシンビジョン, (株)昭晃堂, pp. 112-132, 1990.
- 2) Palangio, T. C., Franklin, J. A. and Maerz, N. H.: Wip-Frag and WipJoint-To Measure, Record and Predict Blast Results, Proc. of 7th High-Tech, State-of-the-Art, Blasting Technology Seminar, pp. 489-508, 1997.
- 3) Shibusawa, S.: Precision farming and terramechanics, Proc. of the 5th Asia-Pacific Regional Conf. of ISTVS, pp. 251-261, 1998.
- 4) 杉山昇: 建設機械と土の諸問題, 鹿島出版会, 1972.
- 5) 室達朗: テラメカニクス, 技報堂出版, 1993.
- 6) 笈田昭, 田中孝: 車両・機械と土系の力学, 学文社, 1993.
- 7) タイヤ設計指針作成委員会編: オフロードタイヤ工学, テラメカニクス研究会, 1999.
- 8) 履帯設計指針作成委員会編: 履帯の設計工学, テラメカニクス研究会, 2000.
- 9) ローラ設計指針作成委員会編: 転圧ローラ工学, テラメカニクス研究会, 1999.
- 10) 建山和由, 深川良一, 辻井剛: 深層混合処理工法における地盤評価とその自動化施工への応用, 土木学会論文集, No. 535/III-34, pp. 165-173, 1996.
- 11) 深川良一, 建山和由, 辻井剛: DJM 工法における N 値の推

- 定, ファジィ推論の応用, 建設の機械化, No. 520, pp. 42-47, 1993.
- 12) Hata, S.: Submarine cable: multi-blade plough, Geotechnique 29, No. 1, pp. 73-90, 1979.
- 13) 深川良一, 室達朗, 鈴木貴雄, 松生隆司, 澤芳幸: 地中連続壁掘削機の位置制御に及ぼす地盤特性の影響, 第3回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 175-184, 1993.
- 14) 深川良一, 室達朗, 保積浩二, 松生隆司, 澤芳幸: 連壁用モデル掘削機の作動特性と制御条件, 第4回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 15-22, 1994.
- 15) 深川良一, 室達朗, 山本素, 松生隆司, 澤芳幸: 連壁用掘削機と地盤の相互作用に関する基礎的研究, 第5回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 37-44, 1995.
- 16) Fukagawa, R., Muro, T., Yamamoto, H. and Matsuike, T.: The prediction of the interaction between an excavator for the diaphragm wall method and the surrounding ground, Proc. of the 13th Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 625-634, 1996.
- 17) Fukagawa, R., Muro, T., Hozumi, K. and Matsuike, T.: Estimation of ground properties based on a fuzzy reasoning method during vertical hole excavation, Journal of Terramechanics, Vol. 33, No. 2, pp. 103-112, 1996.
- 18) Matsuike, T., Sawa, Y., Ohashi, A., Sotozono, S., Fukagawa, R. and Muro, T.: Development of automatic system for diaphragm-wall excavator, Proc. of the 13th Symp. on Automation and Robotics in Construction, pp. 285-294, 1996.
- 19) 高橋弘, 沖田謙: ホイールロードによるダンブトラックへの積み込み作業の自動化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 581/VI-37, pp. 145-154, 1997.
- 20) 高橋弘, 森川康弘: ロードとダンブトラックの協調作業による積み込み作業の自動化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 672/VI-50, pp. 169-177, 2001.
- 21) 三宅謙三郎, 須崎利夫, 吉田弘喜, 大島寛: 砕石業における岩石採取作業の自動化技術開発, 資源・素材学会誌, Vol. 128, No. 8, pp. 571-580, 1996.
- 22) Thurner, H. and Sandstrom, A.: A new device for instant compaction control, Proc. of the Int. Conf. on Compaction, Vol. 2, pp. 611-614, 1980.
- 23) 建山和由, 藤山哲雄, 西谷誠之: 締固め施工における振動ローラの振動挙動に関する考察, 土木学会論文集, No. 554/III-37, pp. 231-237, 1997.
- 24) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集, No. 652/III-51, pp. 115-123, 2000.
- 25) 弓削竹志: 自由断面トンネル掘進機の掘削技術の高度化, 第6回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 53-58, 1997.
- 26) Eriksson, G. and Kitok, A.: Automatic loading and dumping using vehicle guidance in a Swedish mine, Proc. of 1st Int. Symp. on Mine Mechanization and Automation, Vol. 2, pp. 15-33-15-40, 1991.
- 27) St-Amant, M., Laperrriere, Y., Hurteau, R. and Chevrete, G.: A simple robust vision system for underground vehicle guidance, Proc. of 1st Int. Symp. on Mine Mechanization and Automation, Vol. 1, pp. 6-1-6-

10, 1991.

- 28) King, R. H., Lever, P. J. A., Strickland, W. and Lane, J. D.: Ultrasonic rangefinders for underground mine equipment navigation, Proc. of 1st Int. Symp. on Mine Mechanization and Automation, Vol. 1, pp. 6-31-6-44, 1991.
- 29) Yingyongrattanakul, N., Adachi, T. and Tateyama, K.: Finite element analysis of shield tunneling and its application to advancing control, Proc. of the 11th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Eng., pp. 79-80, 1999.
- 30) Yingyongrattanakul, N., Tateyama, K. and Utsumi T.: Development of the shield machine control based on soil-machine interaction, Proc. of the 6th APISTVS Conference, pp. 286-294, 2001.

(2002.1.16 受付)

Geomechatronics is a technical field in which the Geotechniques is fused with the Mechatronics that is the technical field to promote the automatic control of machines by using the electronics. In the field of Geomechatronics, the machinery, which treats the geomechanical materials such as soils and rocks, automatically evaluates the properties and conditions of the ground and determines the optimum controlling method of itself for the ground with the base of the interaction between the machine and ground. We introduce the elemental techniques required for geomechatronics and some researches for practical use in this field, and then express the progressing view of this research and technical field.