

デジタル アースムービング

—土工計画の情報化：Digital Earthmoving—

岡本直樹

近年、GPS等を利用した情報化施工が注目されているが、土工計画においても早くから情報処理技術を利用してきた。本稿では機械土工専門工業者が、土工計画プロセスでデジタル技術をどのように活用してきたかを紹介する。まず、土工計画作成プロセスを概説し、地形情報処理としてDTM・土量計算法・土量配分法等について、機械計画では走行シミュレーション・待ち行列シミュレーション・機械の山積み／山崩し等について述べ、最後に施工シミュレーションの課題等についても付記する。

キーワード：土工計画、機械土工、情報化施工、地形情報処理、シミュレーション、DTM、3D-CAD

1. はじめに

近年、国内でも3D-CADやGIS技術とGPS・自動追尾TS等のポジショニング技術を利用した情報化施工が注目され、締固め管理や整形に利用されている。海外の露天掘鉱山では早くから全車にGPSを装備した統合生産システムが導入^{1) 2) 3)}され、デジタル技術のアースムービングへの利用が進んでいる。また、2001年にはDigital Earthmovingの国際シンポジウム⁴⁾がスイスで開かれ、機械土工に関するGIS、DTM、3D-CAD、GPS等のデジタル技術をテーマとした。

土工計画においても古くから情報処理が利用されてきた。著者等も専門工業者として数多くの大規模土工の施工計画に携わってきて、省力化、合理的計画作成のため実践的な情報化を進めてきた。RTK-GPSが実用化される前に、ミリ波電波灯台方式の位置認識システムを利用した自動運行システム⁵⁾(図-1、写

真-1)の研究開発(1988～1993年)に携わったこともある。

70年代の電子計算機(メインフレーム)はバッチ処理が殆どで自由に使うことができなかった。しかし、1979年に手頃で実用に耐える8bitパソコン(当時はマイコン)が登場したので、いち早く利用を始めた。

ここでは、機械土工の専門工業者として土工計画にどのように情報化を取入れてきたか、主にDTM(Digital Terrain Model)の利用と機械のシミュレーションを中心に紹介する。

2. 土工計画のプロセス

土工計画作成プロセスを簡単に説明する。図面・仕様書等の設計図書から工事概要を把握した後、概ね、図-2のような流れで土工計画の作成を進めていく。

まず、原地形図と造成計画図から土量計算を行い、土量分布を把握し、最適な土量配分を行う。次に搬土経路を設定して、距離別搬土量を求める。これらに組合せ機械セットを選定し、それぞれの機械能力計算を

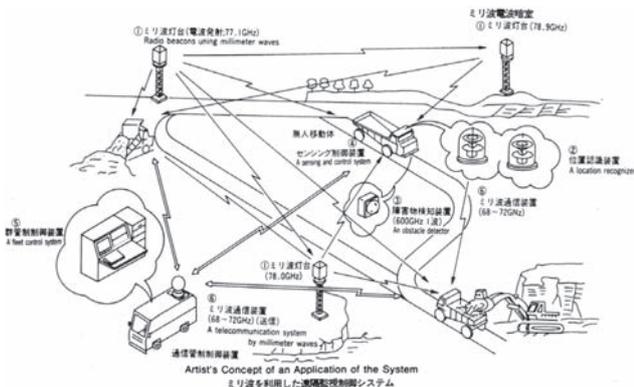


図-1 自動運行システム

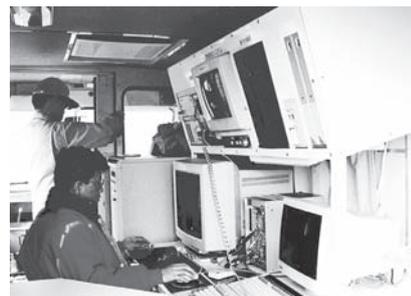
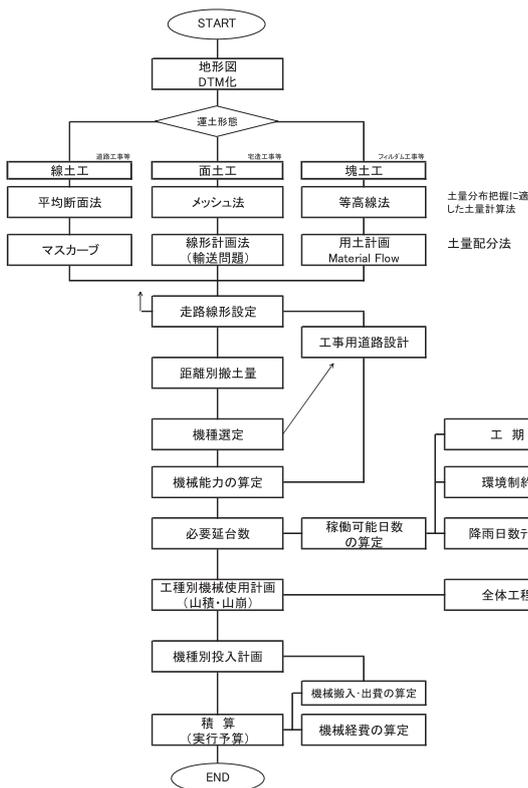


写真-1 管制車内のコンソール 1992



図一2 土工計画のプロセス

行い、必要延台数を求める。更に工種別工程に機械を割付けて山積み／山崩しを行い、機械投入計画を作成する。最後に機械経費等を積算し、見積や実行予算書を仕上げる。

土工形態

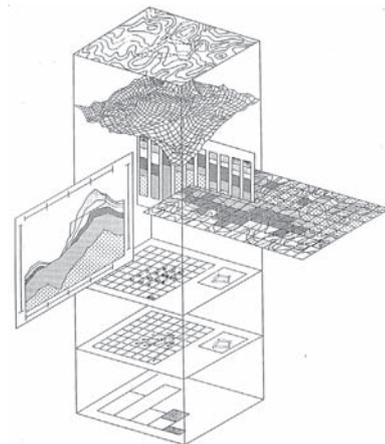
土工事は運土形態から線土工、面土工、塊土工に分類できる。道路・鉄道・堤防工事のような線状の運土工は線土工、宅地造成や敷地造成の多くは面状の運土工となるので面土工である。また、フィルダム工事の原石山・コア山・ダム堤体のように塊状の分布となる運土形態を塊土工（マッシュな土工）という。それぞれの運土形態には、各々適した土量計算法と土量配分法があり、基本的な方法は図一2に示している。

3. 地形情報処理

まず、地形図は情報処理に適したDTM (Digital Terrain Model) として数値化する (図一3)。

80年頃は土量計算とマスカーブ、線形計画法 (LP) による最適土量配分計画にパソコンを利用した。当時の演算速度では、LP計算は切土と盛土ブロックを山谷毎に集約する必要があった。

パソコンが16bit化されてから地形情報処理システムを開発した。地形モデルは、まず断面表示 (一次曲線)、グリッド表示 (双一次曲面) モデルであっ



図一3 DTMの概念図

た。TIN (Triangulated Irregular Network: 不整三角網) モデルは89年にIntergraphのシステムを導入して利用可能となった。国産のソフトウェアはまだTIN対応ができていなかった。TINモデルで地形情報の利用が飛躍的に向上し、3D-CADで道路設計が容易となり、レイトレーシング等のレンダリング機能やウォークスルー機能でプレゼンテーション力が各段に増した。その後グラフィック専用ワークステーションSilicon Graphicsを導入し、グラフィック表示の高速化を図った。近年では、パソコンの能力が向上し、TINモデルを組込んだ地形処理用3D-CADが安価に利用できるようになった。

(1) DTM

地形図を数値化するための一次地形情報には、等高線、断面図、格子点標高、ランダム点標高があり、数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) には図一4のようなものがある。初期のパソコン時代は、一次曲線、一次曲面モデルであったが、近年ではパソコンでもTINモデルが可能となった。

(2) 土量計算法

土量計算と土量配分は前述のように土工形態に適した方法を選ぶ。土量計算には線土工では線状の土量を捉え易い平均断面法、面土工では面状の土量把握に便利なメッシュ法 (柱状法)、塊土工では採石計画や堤体盛立計画のように施工進行に合わせた高さ毎の土量把握に適した等高線法が適している。

(3) 土量配分法

線土工ではマスカーブ (土積図) を利用すると簡単に土量配分が行える。近頃はExcelを用いた土量・土積計算を行い、グラフ表示機能でマスカーブを自動表示

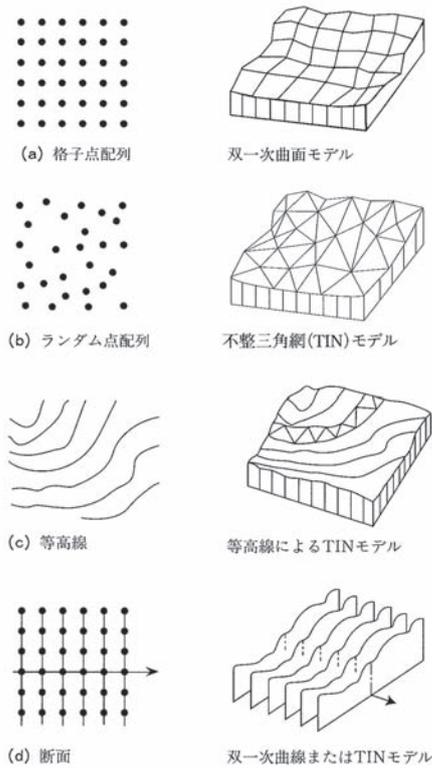


図-4 各種のDEM⁶⁾

は少ないが、ダンプトラックの運搬で本格的な工事用道路を造成する場合は、工事用道路設計⁸⁾を行う。

(5) 工事用道路設計

工事用道路の設計においては、道路設計用の3D-CADを用いて設計を行う。縦断勾配の設定では、後述する使用搬土機械のリムプル（牽引力）とブレーキ性能から検討する。急勾配が長い場合は緊急用の待避線も検討する。また、道路設計用の3D-CADは、パイロット道の取付け検討にも利用できる。図-5は3次元コンターに工事用道路を表示している。背景の山はTIN表示である。図-6はグリッド表示の地形に工事用道路（TIN）のみレンダリングを掛けた例である。



図-5 3DコンターとTIN表示

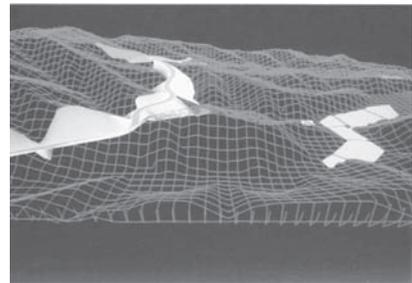


図-6 グリッド表現

している。平衡線の設定はマニュアルで行い、土配を決定する。

面土工の土量配分は、輸送問題として線形計画法で最適化できる⁷⁾。即ち、総仕事量 W_d ($m^3 \cdot m$) の最小化を図る。

$$W_d = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} \cdot D_{ij} \quad (m^3 \cdot m)$$

V_{ij} : 各ブロックの土量, D_{ij} : 各ブロック間距離

線形計画法による土量配分計画では、一次解として最短直線距離による最適土量配分を求め、これを基に地形や勾配・障害を考慮した搬土経路を設定して、再度、線形計画法による最適土量配分を行う。これらの手法に対応すべく、各種のシステムを開発したが、最近では市販のものを利用している。

塊土工の代表であるフィルダム工事等では、ロック材・フィルタ材・コア材など材料別に配分するので堤体盛立ゾーン別の材料の流れを材料フロー図として表す。この場合も Excel の計算機能と作図機能を利用できる。

(4) 搬土経路の設定

土量配分計画では搬土経路を設定する。経路の線形は、土取場と盛場の空間的位置関係と地形、機械性能等を考慮して決定する。特に縦断線形では、牽引力(図-7)とブレーキ性能に配慮する。スクレーパ工法では経路設定のみで特段に工事用道路設計を行う必要性

(6) 距離別搬土量

搬土経路を設定後、経路を土量配分計画にフィードバックして実施土量配分計画とし、その結果から距離別搬土量を求め、この一覧から次の機械計画を行う。

(7) 流域粒線図

その他にも地形情報処理として、流域流線図を作成して施工中の排水計画が立案できる。また、降雨データと組合せて調整池の設計にも応用できる。

4. 機械計画

(1) 機種選定

機種選定においては、次のような施工性を検討し、搬土機械については経済的搬土距離を考慮して、使用

する機種を決定する。

- i) 掘削性
- ii) 積込性
- iii) 走行性
- iv) 締固め性

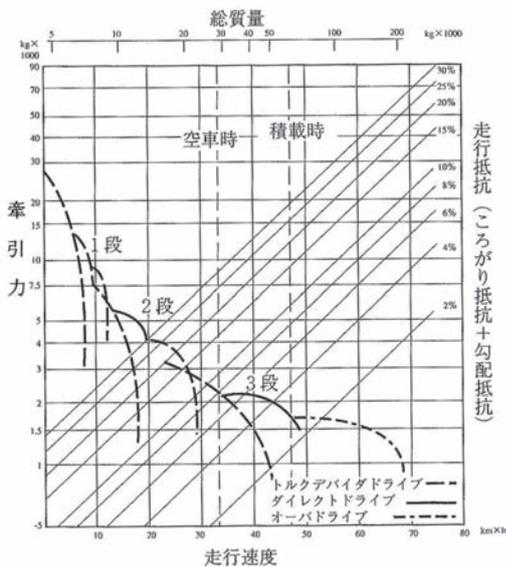
(2) 機械能力算定

次に作業能力の算定を行い、工種毎の必要延台数を求める。機械能力計算では、専用の積算システムを開発して使用したこともあるが、自由フォーマットのExcelを利用した方が便利である。

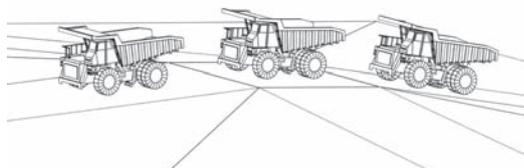
(3) 走行シミュレーション

搬土機械の作業能力は、平均走行速度から求める方法が一般的であるが、走行シミュレーション⁹⁾を利用すると、リムプル（牽引力曲線：図—7）とブレーキ性能から走行速度を合理的に決定し、サイクルタイムを求めることができる。アップダウン等の変化に富む走路の場合に特に有効な方法である。また、これは設計した工事用道路の評価にも利用できる。

更に3D地形図と走行シミュレーションを組合せて、地形サーフェス上での走行シミュレーション表示も可能である。(図—8)



図—7 牽引力曲線



図—8 3D地形図上の走行シミュレーション

(4) 待ち行列型シミュレーション

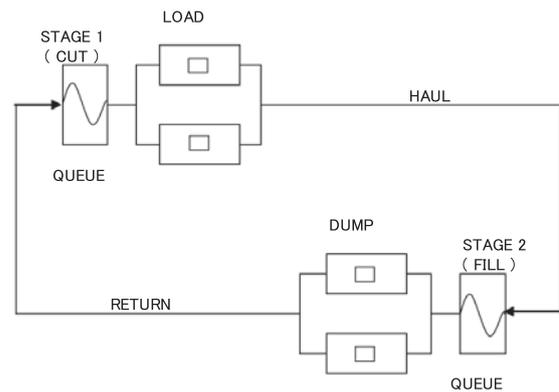
搬土機械は、積込場やホッパ等のダンプアップ箇所ではしばしば待ち行列が発生する。このような機械土工の基本的な待ち行列は、循環待ち行列で図—9のように表せる。

また、運行経路上でも交差点や離合箇所待ち行列が発生する。このような場合のサイクルタイムの遅れの評価や投入台数の決定に利用する。

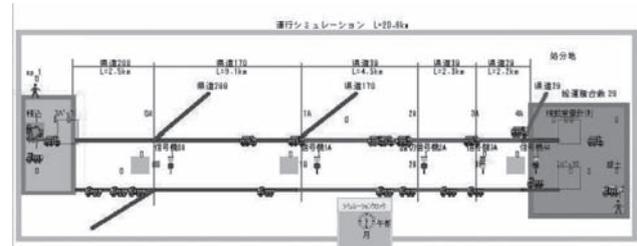
待ち行列型のシミュレーションのプログラミングには各種のシミュレーション言語があり、88年から著者等はSLAM IIを用いてモデリング¹⁰⁾を行った。また、ビジュアル化に同系統のTESSを利用した。近年では、パソコン用の安価なSIMUL8を利用できる。製造業向けで機械土工への利用には工夫が必要であるが、ビジュアルなアイコンを繋ぐだけで極めて容易にモデリングが可能で、複雑なことはExcelのマクロやビジュアルベーシックを組込むことができる。

(5) 機械投入計画

機械能力を計算し、必要延台数が求まると投入機械台数を決定する。そのためには、工種別工程に機械を割付け、山積み・山崩しを行い機械投入の平準化を図る。PERT系の工程計画ソフトウェアに山積み/山崩し機能があるが、大規模土工では投入機種が多いので、自動的に平準化を図ることは困難で、マニュアル操作に頼ることになる。結局、Excelの集計機能を利用し



図—9 2ステージ循環待ち行列モデル



図—10 SIMUL8によるモデリング

て、工程全体を眺みながら平準化を図っている。

運土矢線と工程アクティビティを連動させ、GUI (Graphical User Interface) のスライダー機能を利用して山積み/山崩しを行える対話型システムを試作したこともある (図-11)。

稼働可能日数の算定

稼働可能日数の算定には、降雨日数と降雨量のデータが必要であるが、近頃はインターネットから降雨データを容易に得ることができる。稼働可能日数の算定はExcelを利用して機械的に行えるが、確率的に稼働可能日数を予測する場合は降雨シミュレーションを行う。

5. 施工シミュレーション

デジタルアースムービングといえば、ビジュアルな施工シミュレーションをイメージしてしまう。究極的には、VR (Virtual Reality) の仮想空間に入り込み、仮想体験的に施工検討を行えることであろう。施工法の検討や施工の進捗をビジュアルに表現するには、地形のシミュレーションと機械稼働状況の表示が必要となる。

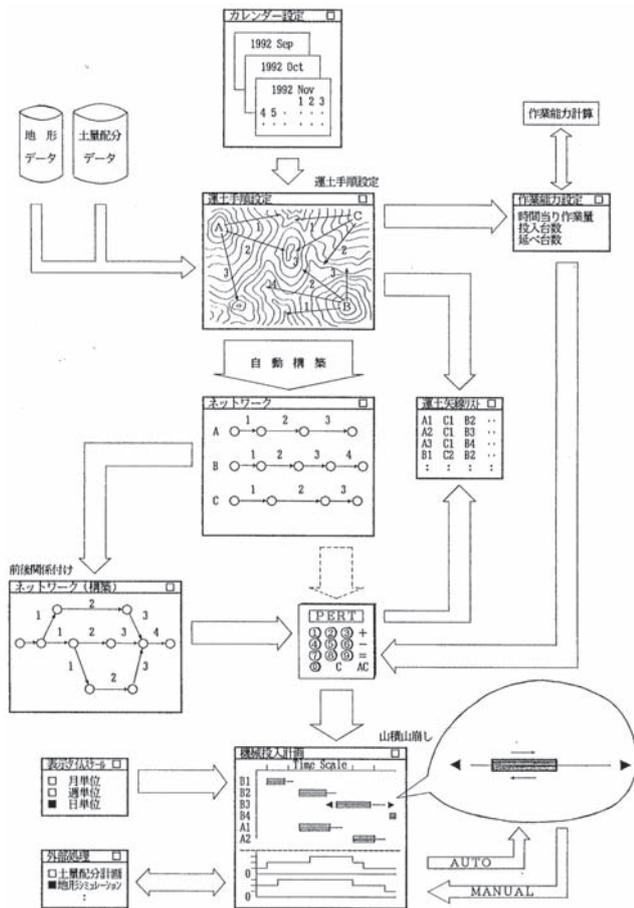


図-11 GUIによる対話型工程計画¹¹⁾

(1) 地形シミュレーション

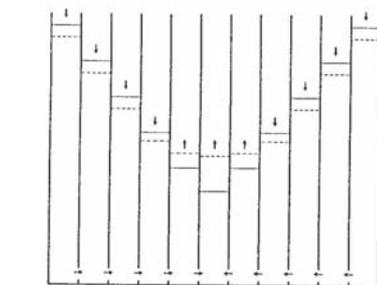
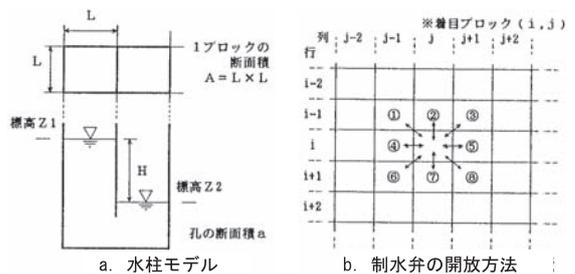
3D-CADで作成した鳥瞰図や完成パースは、自由な視点で表示でき、ウォークスルー機能で自由に動き回ることができる。また、航空写真や地図等をテクスチャマッピングで張付けたり、レイトレーシング等の高描写画像はコマ落としによりアニメーション化が図れる。ウォークスルー機能も時間軸の一種であるが、工程を加えた4D化が行えると理想的である。

土工計画では図-12のような施工段階図を作成し、切羽展開や取付道の検討を行うが、この作業は地形3D-CADを利用して力仕事となる。効率化を図りたいが、自動化が難しいプロセスである。

粗造成設計の自動化技術に水柱法 (図-13) や Elastic Surface Model (図-14) がある。これらを利用すると連続的な切盛変化の表示が行える。水柱法では制水弁を制御して地形シミュレーションへの応用を研究したことがある。水柱法は、図-13のような格子状の水柱モデルで地形を表現し、各格子間を制水弁の開閉で通水制御し、切盛バランスをさせながら地形を変化させるものである。



図-12 施工段階図



c. 地形変形の過程

図-13 水柱法

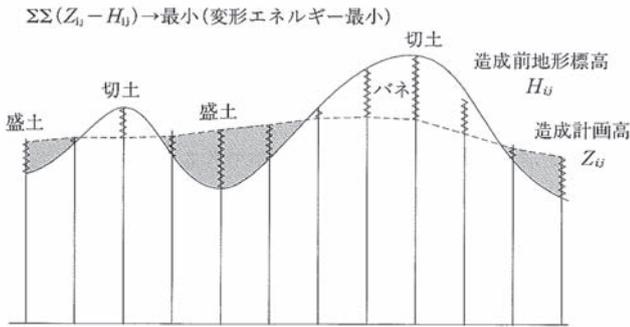


図-14 Elastic Surface Model⁶⁾

(2) 重機稼働アニメーション

建設機械のアニメーション¹²⁾は、作業装置等の関節を図-15のように動かせるようにした3Dモデルを作成し、コマ落としとして作成できる。図-15~17は、90年頃に作成したものである。近年では容易に、より精巧な3Dモデルリングが可能となった(図-18)。

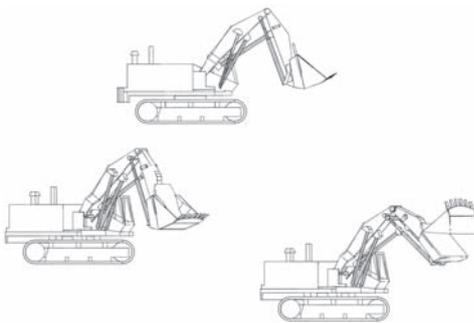


図-15 積込機のアニメーション 1990



図-16 原石山の機械配置 CG 1989



図-17 土取場機械配置 CG 1993



図-18 CG 建機 2008

6. おわりに

アースムービングの専門工事業者としていかに情報化に取り組んできたか、主に土工計画でのDTMの利用と機械計画でのデジタル化の取組みを述べてきた。今後は、施工シミュレーションや施工段階のベンチ展開等の作図の合理化が研究課題であるが、ベンダによる工程進捗を表現できる4D-地形CADの開発にも期待したい。

JCMA

【参考文献】

- 1) 岡本：大型土工機械の動向とコンピュータ管理，建設の機械化，JCMA，2001.5
- 2) 岡本：大規模土工の近未来風景，建設の機械化，JCMA，2003.1
- 3) 岡本：MINExpo2004 見聞記，建設機械，日本工業出版，2005.4
- 4) C.Y.Westort (Ed.)：Digital Earth Moving，2001.9
- 5) ミリ波を利用した遠隔監視制御システム，建設ロボット・自動化便覧，先端建設技術センター，p66,1995
- 6) 村井俊治：空間情報工学，日本測量協会，2002.8
- 7) 岡本：土量配分計画，環境土構造工学 (1)，電気書院，2006.4
- 8) 岡本：工事用道路の設計と安全，建設の施工企画，JCMA，2008.7
- 9) 岡本・大下：搬土機械の走行シミュレーションにおける走行速度の合理的決定法，第9回建設マネジメント問題に関する研究会・討論講演集，1991.12
- 10) 岡本・大下：施工シミュレーションの研究とその開発，第8回シミュレーションテクノロジーコンファレンス発表論文集，1989.6
- 11) 岡本・大下：土工のGUIによる対話型工程計画，第10回建設マネジメント問題に関する研究会・討論講演集，1992.12
- 12) 岡本・田中：重機稼働アニメーションについて，第17回土木情報シンポジウム講演集 1992.10

【筆者紹介】

岡本直樹 (おかもと なおき)
山崎建設(株)
技術部長

