

## 技術論文

## D61EXi/PXi-23 の開発 作業機自動制御ブルドーザ

### Development of D61EXi/PXi-23

### Bulldozer with automatic control system of work equipment

林 和彦  
Kazuhiko Hayashi  
嶋田 健二郎  
Kenjiro Shimada  
石橋 永至  
Eiji Ishibashi  
岡本 研二  
Kenji Okamoto  
米澤 保人  
Yasuhito Yonezawa

近年、情報化技術を利用したマシンコントロールブルドーザの広がりにより、丁張りを廃止した施工全体の効率改善が進んでいるが、従来システムでは仕上げ整地など限定的な作業にのみ適用可能であった。そこで、コマツの車体コンポーネント制御技術と GNSS 測量技術を融合させることで、作業機の負荷を自動調整する機能を中心に新機能を付加し、掘削・運土から整地まで一連のブルドーザ作業に作業機自動制御の適用範囲を拡大した D61EXi/PXi-23 の開発を行った。これにより、作業時のオペレータの疲労軽減や、経験の浅いオペレータでも熟練オペレータに匹敵する作業が可能となった。

In accordance with the recent spread of the machine control bulldozers utilizing information technology, efficiency improvement of the entire execution of works has been in progress including abolishing of finishing stakes. However, current machine control system could be applied only to the limited works such as finishing ground leveling. Accordingly, combining Komatsu's frame component control technology and GNSS survey technology, we developed D61EXi/PXi-23. It features new functions starting with the automatic control of work equipment load, and expands the application range of machine control to a series of bulldozer works from digging and soil carrying to leveling work. This has enabled mitigation of fatigue of an operator during work and also enabled even an inexperienced operator to perform work equivalent to that of a skilled operator.

*Key Words:* D61EXi/PXi-23, マシンコントロールブルドーザ, GNSS測量技術, GNSSアンテナ, 慣性センサユニット (IMU), ストロークセンサ付きシリンダ, 整地制御, 掘削制御, 設計面, 作業機負荷

## 1. はじめに

GNSS測量技術を利用したブルドーザの作業機自動制御システムは、丁張を廃止しかつ経験年数の少ないオペレータにも熟練者並みの仕上げ施工を可能とすることで施工全体の効率を大幅に改善した。

しかしながら作業機へ過大な負荷が掛かった場合にはオペレータが手動操作により作業機負荷を調整する必要があるため、作業機の自動制御は整地などの軽負荷作業にのみ適用可能であった。

本稿では、コマツで従来から培ってきた油圧ポンプ・モータ等の車体コンポーネント制御技術とGNSS測量技術を融合させることで、従来のマシンコントロール（以

下MC）ブルドーザに対し、各種コンポーネントを車体に内蔵し（Integrated）、作業機の負荷を自動調整する機能を付加（Intelligent）することで、掘削・運土作業から整地作業まで、MC作業の適用範囲を拡大した革新的な（Innovative）18tクラスのブルドーザ「D61EXi/PXi-23」（図1）について、3つの“**I**”を中心にその特徴を紹介する。

## 2. 車体システム

### 2.1 GNSS測量機器

従来のMC機能を搭載したブルドーザでは、GNSSアンテナおよび慣性センサユニット（以下IMU+）のセンサ類を作業機に搭載し、直接的に作業機の刃先位置を計測

していたが、車体前方の直接土砂とぶつかる作業機上に精密機械であるセンサを搭載することとなり、信頼性等に問題があった。それに対し本機では、GNSSアンテナをキャビンの天板上に、また IMU+を車体フレーム内に内蔵したことにより、従来機（図2）に対して次の優位性を獲得した。

- ① 作業機上のGNSSアンテナマストやケーブル類の廃止により視界性が向上した。
- ② 車体外部に露出したケーブルの廃止により作業中のひっかけ等による断線の懸念がなく、信頼性が向上した。
- ③ 毎日の作業終了後にGNSSアンテナの取り外し作業が不要となり、安全性が向上した。
- ④ 履帯下の位置計測が可能となり、走行するだけでリアルタイムに現況地形の把握ができるようになった。

なお、使用するGNSS測量機器は、市場で実績のあるTOPCON社製機器を、当社工場出荷時に搭載する。

### 2.2 ストロークセンサ付きシリンダ

GNSSアンテナが作業機から車両キャビン天板上へ移設したことによって、GNSSアンテナから作業機刃先の相対座標を計測する必要がある。

本機では、作業機の油圧シリンダ（リフトシリンダ、チルトシリンダおよびアングルシリンダ）に当社製ストロークセンサ付きシリンダを搭載したことで、車体座標系におけるGNSSアンテナと作業機刃先の相対座標をリアルタイムに計測可能とした。これに、GNSSアンテナによる車両の位置情報とIMU+により計算された機体姿勢を加算することで、現場座標系における作業機刃先座標

を算出する。

また本シリンダは、従来の油圧シリンダに対してローラの回転によってストローク量を検出する機構と、ローラの滑り等によって発生しうる誤差を補正するための補正機構を追加した構成となっている。（図3）



図1 D61EXi/PXi-23 外観図



図2 従来 MC ブルドーザイメージ

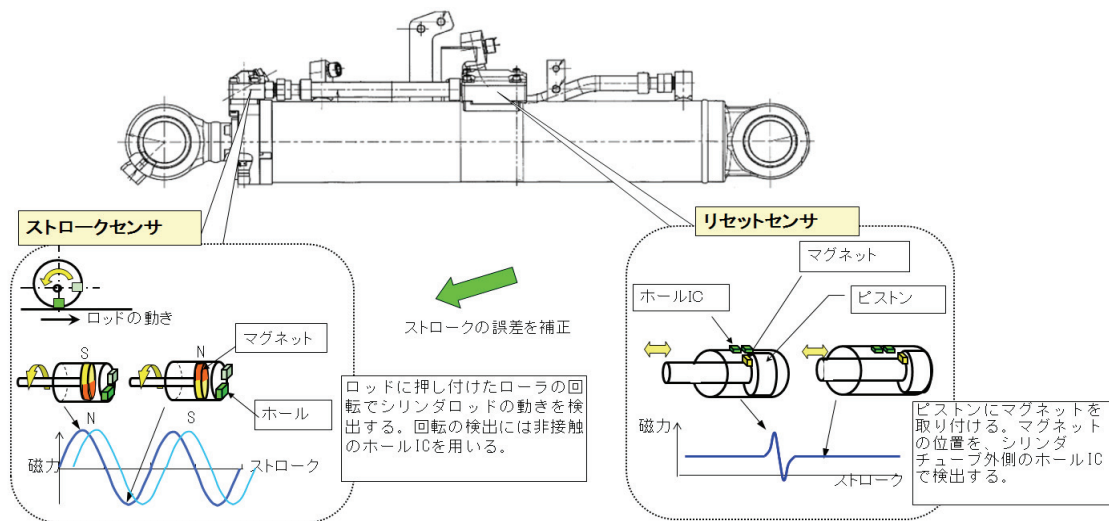


図3 ストロークセンサ付きシリンダ

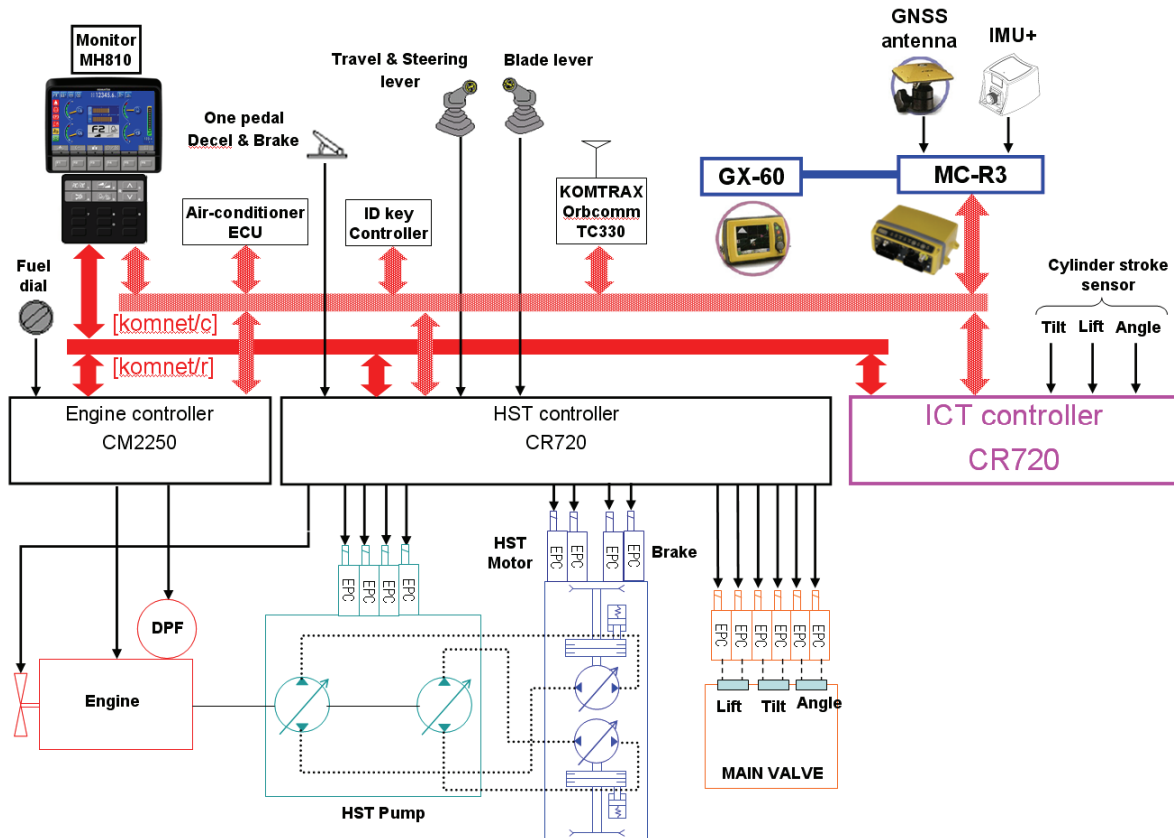


図 4 D61EXi/PXi-23 システム図

### 2.3 電子制御作業機バルブ

自動制御にて油圧シリンダを作動させるためには、コントローラからの電気指令で作動する作業機バルブが必要となる。本機では既に大型ブルドーザにて実績のあるEPC (Electric Pressure Control) バルブを搭載した電子制御式作業機バルブを採用した。

## 3. 作業機の自動制御

本機の最大の特徴は、従来のMCブルドーザの作業適用範囲が軽負荷での主に仕上げ整地のみであったのに対し、仕上げ面まである程度の掘削深さがある場合でも、作業機の負荷を最適に制御することで掘削・運土作業も自動化したことである。

また作業が進行して仕上げ面に近づくに従い、自動的に掘削制御から整地制御に切替えることで、仕上げ面へのダメージを気にせずにシームレスな自動施工を可能とした。

本機に織り込んだ作業機自動制御の特徴を以下に紹介する。

### 3.1 整地制御

作業機刃先座標が、施工現場の設計面データによって決まる目標座標に一致するように油圧シリンダを制御する機能で、従来のMCブルドーザと同一の機能である。

### 3.2 掘削制御

作業機にかかる負荷が、コントローラにあらかじめ設定された目標の負荷に一致するように油圧シリンダを作動させて、作業機刃先の高さを制御する。(図5)

また、本機のパワートレインには静流体駆動式トランスミッション (以下 HST) を採用しているため、左右のスプロケットに搭載された油圧モータ回路圧と回転数から車体の牽引力が算出可能である。作業機の負荷はこの牽引力を基に補正項加味して算出している。

- ① ブレードの負荷が増大
- ② シュースリップが発生しないように自動的にブレードを上げて負荷を調整する。
- ③ 常に作業機の負荷が一定となるように作業機高さを調整する。

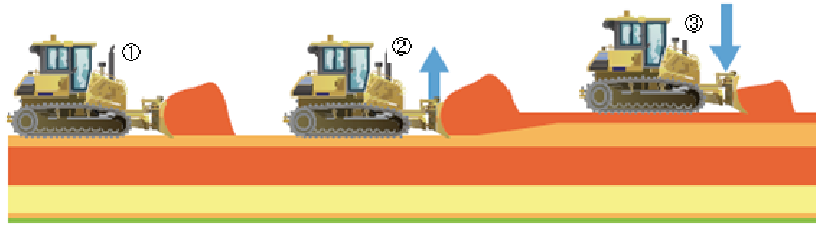


図5 掘削制御イメージ図

### 3.3 整地制御と掘削制御の自動切替

現在の作業機刃先高さと最終仕上げの設計面との高さ方向の距離に応じて、掘削制御と整地制御のどちらが最適であるかをコントローラが自動判別し制御モードを切替える。

設計面から一定の距離 $\Delta Z$ より高い位置に作業機刃先がある場合は、掘削制御により作業機負荷を調整し、それ以下の場合は整地制御で仕上げをする。(図6)

但し $\Delta Z$ の領域は掘削⇔整地制御の切替ゾーンとして、作業機に一定以上の負荷がかかった場合は整地→掘削制御に切り替えて作業機の負荷を調整する。逆に、作業機の負荷が一定以下に抜けた場合は掘削→整地制御に切り替えて作業機刃先高さを設計面に一致させる。

また、掘削制御中は、設計面に接近するにつれて作業機角度を設計面の角度に近づけることで、掘削→整地制御の切り替わり時に設計面を削らないよう制御している。

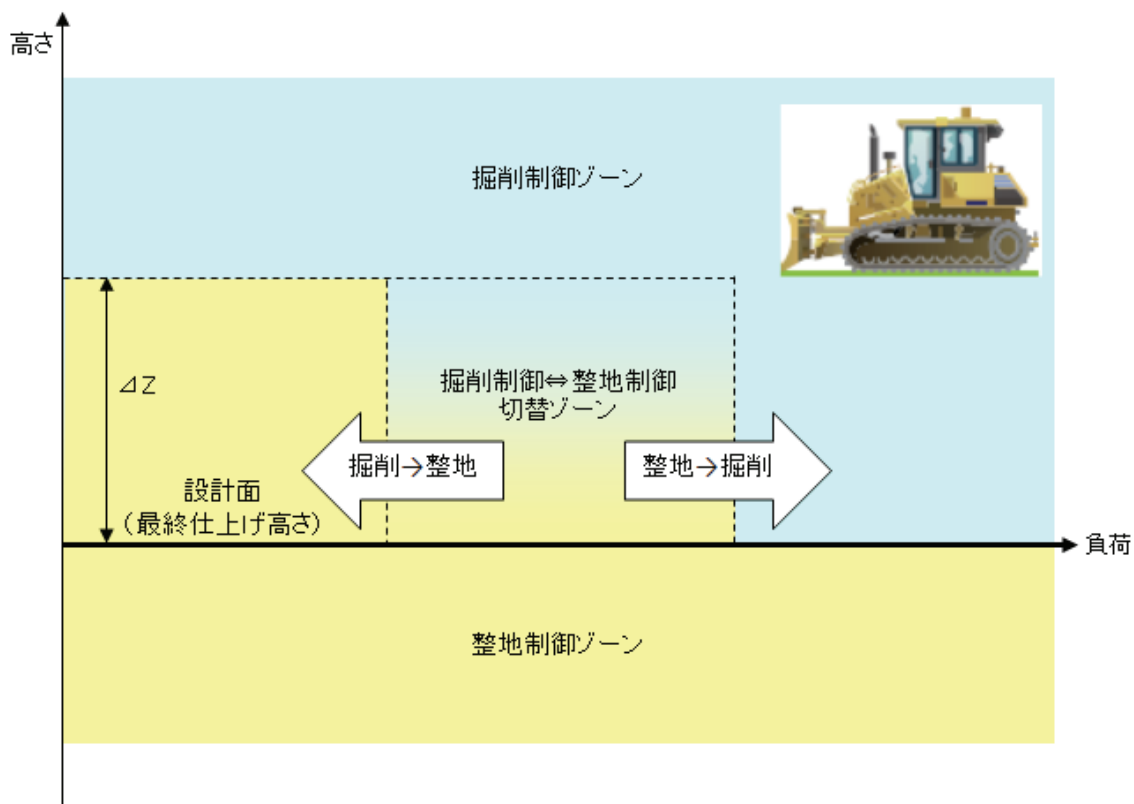


図6 掘削制御と整地制御の自動切り替え

### 3.4 掘削開始制御

作業機に負荷がかかっていない状態からの掘削開始では、作業機刃先が徐々に地面に切り込むように制御する。(図7)

本制御により、土質や現場の地形に依存しない安定した掘削開始が可能となり、施工面も滑らかに仕上がるため、オペレータの疲労軽減にも大きく寄与した。

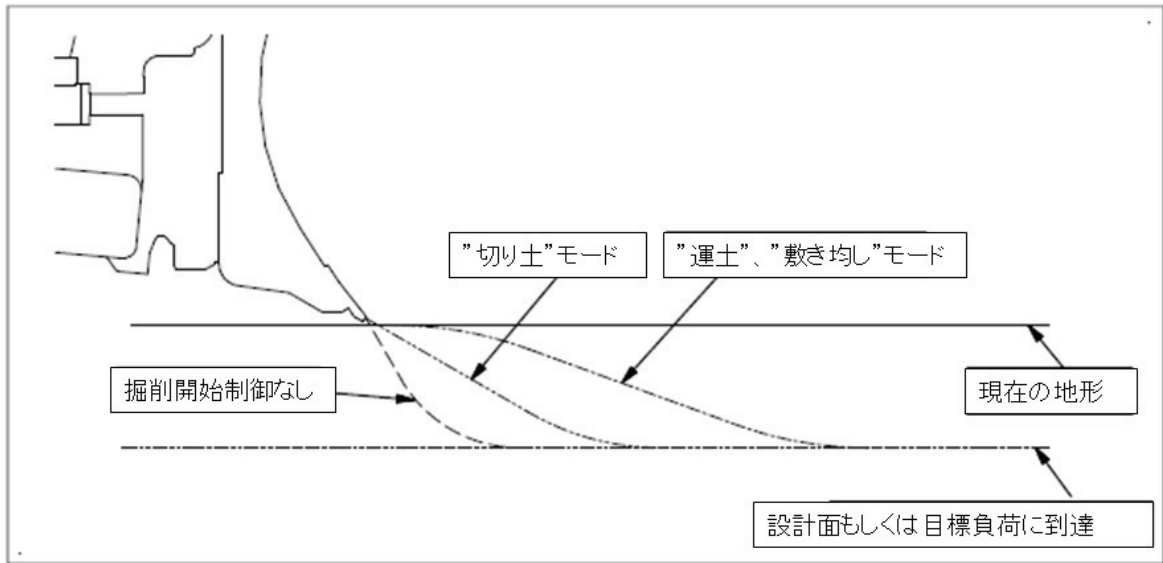


図7 掘削開始制御イメージ図

### 3.5 シュースリップコントロール

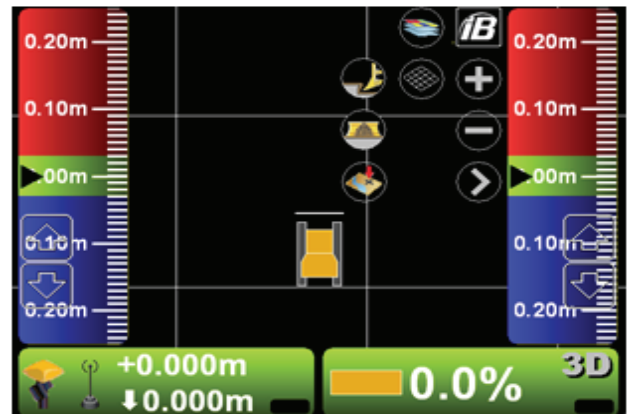
機械の本体に搭載したGNSSアンテナからリアルタイムに計測される位置情報により、機械の移動体速度が得られる。一方、スプロケット回転数から理論车速が得られる。この両者の比率から履帯のスリップを検出している。作業中に一定量のスリップを検出すると、自動的に作業機を上げることで作業機負荷を下げ、スリップを回避する。

### 3.6 掘削モードの選択機能

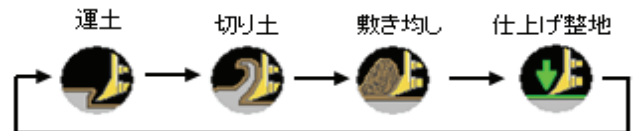
作業機の自動制御は、作業の内容に応じてオペレータが4つのモードから最適な掘削モードを選択可能とした。

モードの切替えは、コントロールボックス画面上的のアイコンをさわることでサイクリックに切替わる。(図8)

アイコンは各モードをイメージしたイラストに切り替わるため、オペレータは現在選択されているモードを容易に視認可能となっている。



掘削モード



負荷モード



図8 モードの選択画面



- ① 運土モード  
掘削深さが浅く、長い距離を掘削・運土する作業に適する。作業機に掛かる負荷が下がった場合でも刃先高さを下げないことで滑らかな掘削跡となり、長い距離での作業でも疲れない。
- ② 切り土モード  
掘削深さがある程度深く、短い距離を掘削する作業に適する。作業機に掛かる負荷を常に目標値に保つことで、最大効率での作業を行い、時間当たり土量の効率が良い。
- ③ 敷き均しモード  
ダンプトラックが排土したような置き土を、撒き出し・敷き均しする作業に適する。置き土への突込み時、急激な負荷変動があっても、一時的に目標負荷を上げることで荷の抜けが無いよう制御を行う。
- ④ 仕上げ整地モード  
掘削制御を有しない、整地制御のみのモードであり、仕上げ整地の作業に適する。設計面への作業機の追従のみを行う。(図9)

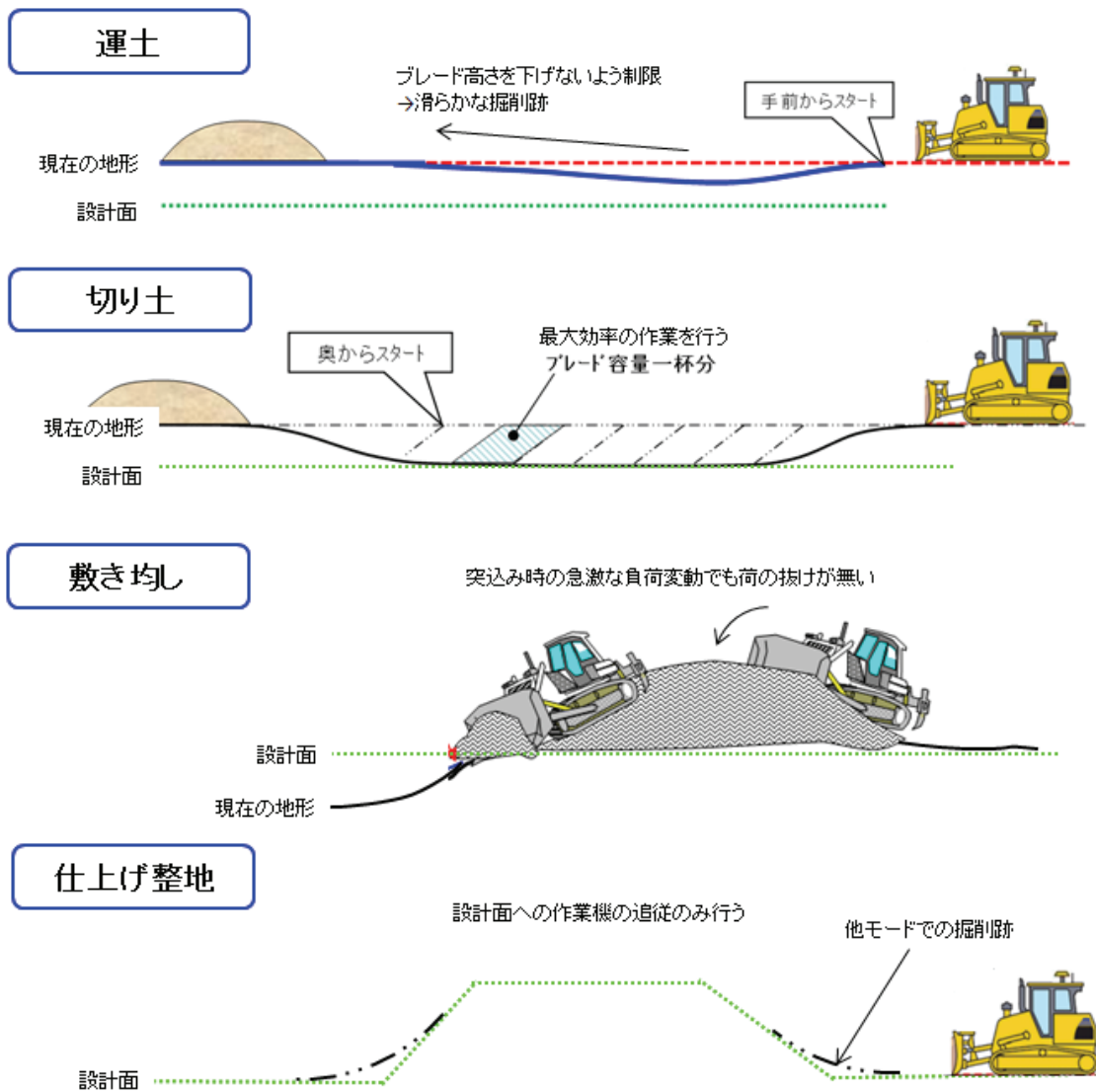


図9 掘削モードイメージ図

### 3.7 作業機負荷の選択機能

掘削制御の作業機負荷の目標値は、土質や作業の内容に応じて3つのモードから選択可能とした。モード切替は、モニタ上のアイコンをさわることでサイクリックに切替わる。アイコンは作業機にかかる負荷の大きさをイメージしたイラストに切り替わるため、オペレータは現在選択されているモードを容易に視認可能である。(図8)

- ① ライトモード 軽負荷作業に適する
- ② ノーマルモード 一般作業に適する
- ③ ヘヴィモード 重掘削作業に適する

## 4. システムによる効果

これまでに述べてきた作業機の自動制御システムの支援により、ブルドーザの運転には高い技量が必要とされ

ているが、掘削・運土や整地まで内容を選ばずに、経験の浅いオペレータでも熟練オペレータに匹敵する作業が可能となった。

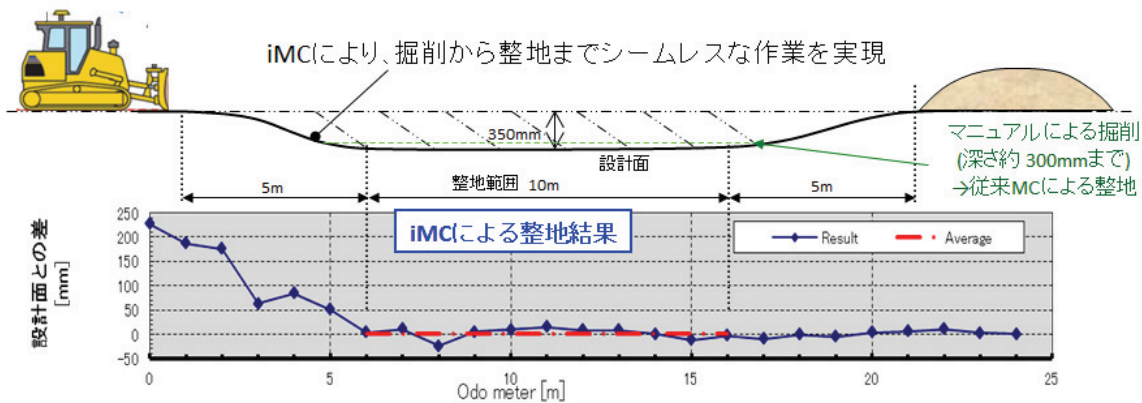
以下に本制御の効果を確認するため、定型モデル作業試験の比較データを示す。

本作業は、設計面に向かって掘削から整地まで一連のブルドーザでの作業を内包した試験となっている。

本結果によると、従来の設計面を傷つけないよう気を付けながらマニュアル操作による掘削→スリップ発生しないよう数回に分けての従来MCによる仕上げ整地を行う場合に比べ、掘削から整地までシームレスに作業を行い、設計面を傷つける恐れのない本システムの場合、動かし土量当たりの所要時間で、従来を1として0.87となり、10%近くの効率化が実現された。

表1 定型モデル比較

		iMC	マニュアル+従来MC
掘削	土量	1.25	1.00
	所要時間	1.27	1.00
整地	土量	0.21	1.00
	時間	0.38	1.00
合計	土量	1.04	1.00
	所要時間	0.91	1.00
	土量当たり時間	0.87	1.00
燃費	燃料消費	1.05	1.00
	燃料当たり土量	0.99	1.00

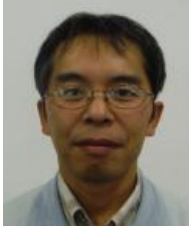


## 5. おわりに

MCブルドーザ「コマツD61EXi/PXi-23」について、オペレータの作業環境や機器の信頼性を大きく向上した新規構造や、新たな付加価値を生み出す掘削・運土制御機能の特徴を中心に紹介してきた。作業機の自動化技術は、オペレータの疲労軽減のみならず、施工管理システムや最適な作業手順のガイダンス機能などと組み合わせるこ

とで更に施工効率の向上につながり、そう遠くない将来において施工現場を自律化・無人化するための大きな前進になったと自負する。ICT技術を活用する分野は常に継続的な進化を求められており、ユーザーニーズをタイムリーに捉え商品化していくことで、お客様にとってなくてはならないビジネスパートナーとなれるよう努力していく所存である。

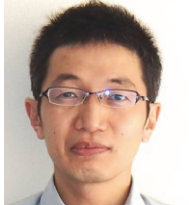
## 筆者紹介



Kazuhiko Hayashi

はやし かず ひこ  
林 和彦 1995年，コマツ入社。

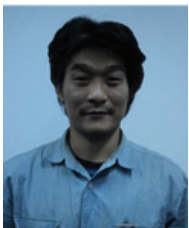
中小型ブルドーザの制御システム開発に従事。現在，開発本部建機第一開発センタ情報化建機開発グループ。



Kenjiro Shimada

しま だ けん じ ろう  
嶋田 健二郎 1997年，コマツ入社。

ブルドーザトランスミッション開発，ブルドーザ自動化に従事。現在，開発本部建機第一開発センタ情報化建機開発グループ。



Eiji Ishibashi

いし ばし えい じ  
石橋 永至 1999年，コマツ入社。

小型 HST ブルドーザの制御システム開発に従事。現在，開発本部建機第一開発センタ情報化建機開発グループ。



Kenji Okamoto

おか もと けん じ  
岡本 研二 1998年，コマツ入社。

ブルドーザの車体制御コントローラの開発業務に従事。現在，開発本部システム開発センタメカトロ制御開発第二グループ。



Yasuhito Yonezawa

よね ざわ やす ひと  
米澤 保人 2009年，コマツ入社。

ブルドーザの性能試験，品質確認に従事。現在，開発本部試験センタ栗津グループ。

### 【筆者からひと言】

GNSS 測量機器やシリンダ搭載のストロークセンサなどのセンシング技術の発展により、ブルドーザの“現在”の状況を把握できるようになることで、本開発は可能となりました。

今後は、地形情報を立体視可能なカメラ等で取り込み、作業により地形がどう変化するか、どのように作業を行うと効率的かなど、“予測”に基づいた制御を織り込むことで、更なる自動化、効率化を進めて行きたいと考えています。