

# 今後の建設施工の機械化

## ～試行的ロードマップ作り～

建 山 和 由

現在より25年先を想定して建設機械の技術開発に関わるロードマップを考えてみた。最初に、建設機械を取り巻く社会情勢から、建設機械の将来像を予想した。その結果、25年後の建設機械の姿として、現在よりも半分程度のエネルギー消費で仕事を行うことができ、CO<sub>2</sub>の排出も40%削減できている。また、オペレータや技能労働者不足をカバーし、複雑なメンテナンスの作業をこなし、さらには月面開発でも活躍しているといったイメージを描いた。次に、この理想像を実現するために必要な技術開発項目について思いつく物を拾い出してみた。著者の限られた知識で作成したため、斬新的な内容にはなり得ていないが、ロードマップ作りの呼び水になれば幸いである。

キーワード：ロードマップ、省エネルギー、環境負荷軽減、自動化、メンテナンス、月面開発

### 1. はじめに

最近、技術開発のロードマップという言葉をよく聞く。ロードマップとは、現在から例えば20年や30年といった少し先を想定したときに、「世の中はこうなっているだろう」、あるいは「こうなっていてほしい」というイメージを描き、それを実現するために「5年後にはこの技術が開発されていなければならない」、「10年後にはこんなことが実現されていなければならない」といったことを考えて作られる中・長期ビジョンのことである。建設機械に近いところでも日本機械学会が設立110周年記念行事の一環として、2030年を想定年次とするロードマップを作り、一般にも公表している<sup>1)</sup>。ここでは、自動車の燃費向上技術、産業用ロボット技術、マイクロ・ナノバイオメカトロニクス技術を始め、10のテーマを設定して技術開発プロセスの予測を行っている。

正直なところ、未来の確実な予測は誰にもできない。特に技術の分野では、新たな発明が技術開発の流れを大きく変えることがある。また、経済状態や社会のニーズが急激に変化すると、技術に対する要求が大きく変わってしまうこともよくあることといえる。このため、20年、30年先を見越してロードマップを作っても信頼性が低く、役に立たないと考えられる方も多いことと想像する。確かに、その通りではあるが、到達目標を明示して、その目標が達成されるように技術開発を誘導することは、限られた予算や労力を効率的に

使う意味からも重要な方策といえる。その意味からも、建設施工の機械化に関するロードマップがあってもいいのではと考え、「建設施工の機械化」に関する技術開発のロードマップ作りにトライしてみた。ロードマップ作りでは、テーマ毎にその分野の専門家の参画が不可欠である。このため、本稿では、具体的なロードマップまでは明示することはできないが、開発すべきテーマの例までは示したいと考えて、以下、文章を記してみた。なお、ロードマップ作りには多分に作成者の主観が入る。これは、未来の正確な予測は誰にもできないため、やむを得ないことと割り切って議論を進めることをお許しいただきたい。

### 2. ロードマップ策定の準備

#### (1) 最終年次の設定

ロードマップを作る場合、まず目標のイメージを作る年次を設定する必要がある。あまり長いと現実味が無くなる。逆に短かすぎると、確実性は高くなるが、明らかに実現可能な内容になり、技術開発の方向性を誘導するという意味からは意義が低くなる。このため、通常は20年～30年とった中期スパンでロードマップを考えることが多い。ここでもそれらに習い、明確な根拠はないが四半世紀25年先、2033年を想定したロードマップを設定することにする。もちろん、2030年でも2035年でも変わりはないが、ここでは25年先を想定することにする。

(2) 建設機械に関する社会情勢

25年後における建設をイメージするには、これから25年の間に建設を取り巻く社会がどう変わるかを予測しなければならない。これは、建設という行為が社会の成長の一部として、その要求に応える存在でなければならないからである。とはいえ、著者はシンクタンクのように長期ビジョンを立てたことはおろか、その策定に関わったこともないため、前述のようによくまで根拠に乏しい私見というレベルでしかないが、以下の5つのポイントに着目することにする。

(a) 燃料費の高騰

ここ数年、ガソリンの価格が高騰している。図—1は、原油価格の変遷を表したグラフである。21世紀に入り、原油価格は急激に高くなってきている。世界の原油埋蔵量が年々減少していること、中国をはじめとするアジア各国の経済成長が著しいことを考えると、今後25年間という中・長期スパンで考えても、若干の変動は別として、トレンドとして原油価格は高くなっていくことを前提とし、建設機械の将来像を考えなければならない。すなわち、建設機械にとってはガソリンの使用を最小限に抑える技術は必要不可欠な開発目標となる。



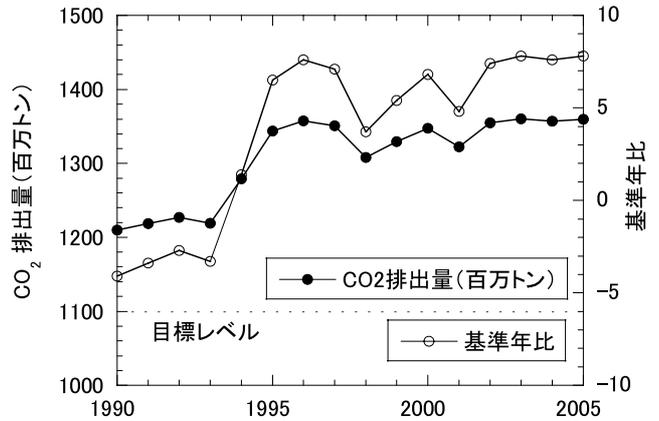
図—1 原油価格の変遷  
出典) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 HP

(b) 環境負荷軽減

図—2は、1990年以降の日本のCO<sub>2</sub>排出量を示している。図中のデータには、CO<sub>2</sub>以外の温暖化効果ガス(メタン、一酸化二窒素、ハイドロフルオロカーボン、六フッ化硫黄)もCO<sub>2</sub>排出量に換算して含めている。

京都議定書が発効されて、日本では1990年のレベルから6%削減という目標値が設定されたが、CO<sub>2</sub>は減るどころか、年々増加している。今後、産業界を挙げてその対策が求められることになる。建設分野に対してもより難しい対応が求められることが予想され、

その場合、当然、建設機械を使った建設工事でもCO<sub>2</sub>削減のための工夫が求められることになる。



図—2 日本のCO<sub>2</sub>排出量  
出典) 温室効果ガスインベントリオフィス (JCCCA : 全国地球温暖化防止活動推進センター) から作成  
「日本の1990～2005年度の温室効果ガス排出量データ」(2007.5.29発表)

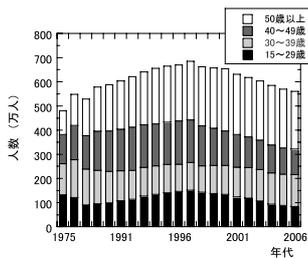
(c) 人材確保

日本の人口は間もなくピークに達し、以降は減少に転じるといわれている。このうち、社会活動を支える15歳～64歳の生産人口はすでに1990年代に増加から減少に転じ、14歳以下の子供の数は、1950年代以降どんどん減少している。人口の自然減少と極端な高齢社会は日本がはじめて体験する局面で、社会の様々な場面で対応が求められることになる。この影響は、建設分野にも明瞭に現れている。図—3は、日本の建設業就労者数とその年齢構成を表す。建設業に従事する人の数は、1997年をピークに年々減少している。また、15歳～29歳の若手層も1997年以降減少しており、2006年現在では、50歳以上の人数が全建設就労者の半数近くにまで及んでいることがわかる。

図—4は、技能労働者の不足率の推移を表す。技能労働者は、型枠工、鉄筋工、とび工、左官工などの専門的な技能を要する労働者である。技能労働者は、バブル期には大幅に不足していたもののバブル崩壊後は充足に向かい1997年以降は不足は解消されていたが、ここ数年、再度不足が見られるようになってきた。建築需要の増加による効果か、高齢の技能者が退職している影響かは現段階では不明であるが、若手の入職が減っている現状では、技能労働者の不足は続くと考えられるべきといえる。

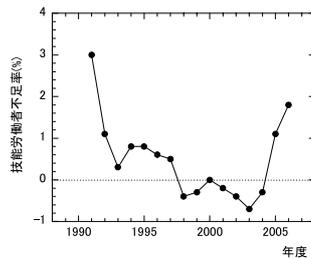
建設就労者と技能労働者の不足は、建設機械にとっては、オペレータと技能労働者の不足をカバーする技術の開発要求として認識される。このうち、オペレータについては、建設機械の技能検定試験の合格者数や

資格保持者数を見る限り、5年程度のスパンでは建設工事に支障を来すことはないと予測されるが、中・長期的に見ると徐々にではあるが、問題として顕在化する可能性が高いといえる。また、技能労働者の不足はすでに現場で認識されてきており、これらの課題の解消は、建設機械にとって重要な開発項目になる。



図一三 建設就労者数と年齢構成の変遷

出典) 国土交通省政策局 建設産業をとりまく経済社会の状況, 2007.6.29 版

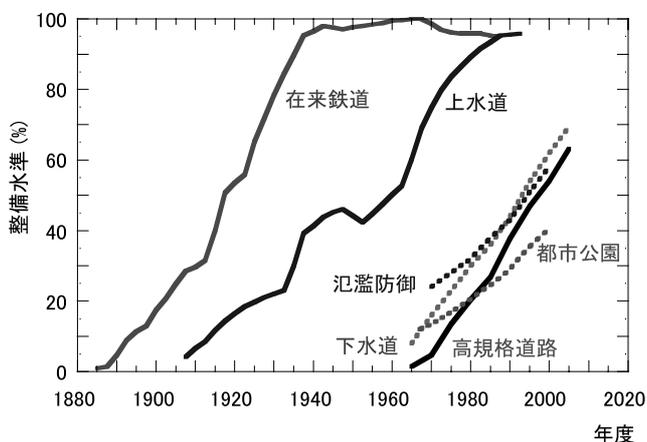


図一四 新卒入職者数と技能労働者不足率の変遷

#### (d) 建設から維持管理へ

図一五は、日本のインフラの整備水準の推移を表す。日本のインフラは、戦後急速な勢いで整備が進められてきた。おかげで、道路、鉄道、空港、上下水道、電力、ガス、通信、その他人々の生活と社会活動を支える様々なインフラがあるレベルまでは整備されるに至った。

一方、日本でもインフラ整備は建設の時代から維持管理の時代に移っている。このことは、図一五の日本におけるインフラの整備水準の推移からも推測することができる。技術的には、維持管理は、建設よりも遙かに難しいことは言うまでもない。供用中の工事に起因する時間的・空間的な制約、劣化状況の把握と適切な工法を選択等、現場毎に難しい判断が要求されるからである。このため維持管理に使われる建設機械に



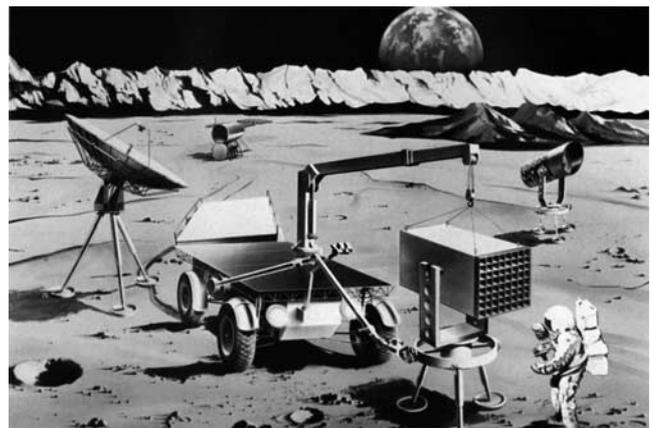
図一五 日本におけるインフラの整備水準の推移 (H13年度国土交通白書他から作成)

は、極めて多様なニーズに応える機能を有することが求められる。

#### (e) 宇宙開発

最近、月面開発が再び注目を集めている。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、本年10月に2010年代半ばまでに月面に着陸船を送りこむセレーネ2計画を発表した。このミッションでは、無人の着陸船にローバーと呼ばれる月面探査車を積み込み、これで月面上の数百m～数kmの範囲の地盤について調査を行う計画が立てられている。将来的には、月面に有人基地を構築し、月資源の利用や別の惑星探査の中継基地として利用することも計画されている (図一六)。

これらのプロジェクトでは、地球上の建設機械を模した機械に掘削、運搬、荷揚げなどの作業を月面上で行わせる必要がある。しかしながら、地球の1/6という低重力、真空、14日間続く極めて高温の昼と、同じく14日続く極低温の夜、レゴリスという細かい砂で覆われた表面など地球とは大きく異なる環境での作業となるため、月面作業機械には通常建設機械には無い機能や機構を備えさせる必要がある。これらの機械は、地球上における建設機械に関する知見をベースに、月という特殊な環境条件を付加して設計・製作されなければ実用的な機械になり得ない。月面開発を成功させるために、建設機械の月面作業機械への発展は、キーになる技術となる。



図一六 月面開発のイメージ (JAXA デジタルフォトアーカイブより)

### 3. ロードマップのテーマ選定

前章の議論に基づき、建設機械の技術開発に関するロードマップのテーマを設定する。

#### (1) 省エネルギー化

具体的な数値目標を挙げ始めるときりが無いが、代

表的工事について数値目標案を設定することは、目標が明確になるため、一つの方法であると考えて。例えば、

目標：1 m<sup>3</sup>の土を掘削するのに必要なエネルギーを現在の50%まで低下させる。

なども代表的な目標といえる。この目標を達成するためのメニュー案を以下に考えてみる。

#### (a) 燃費の向上

一般的に考えられるのは、建設機械のエンジンの燃費向上である。ちなみに前述の日本機械学会のロードマップを見ると、2050年頃には燃料電池ハイブリッド車と電気自動車のシェアが40%程度にまで増加し、自動車のエネルギー需要も60%削減されるという目標を設定している。建設機械のエンジンについても一般乗用車のようにハイブリッド化をはじめとする燃費向上の取り組みが期待される。

#### (b) 作業能力の向上

作業能力の向上も省エネルギーを実現するための方策である。この場合、機械の輸送に要するエネルギーや機械製作に伴う環境負荷までも考えると単なる建設機械の大型化ではなく、小型で高出力な機械の開発が望まれる。

#### (c) 使用方法の改善

必要以上の機械の使用を最小限に抑えることも省エネルギーのための有力な方法といえる。省エネ運転によるエネルギー効率の向上、機械の使用方法の工夫によるエネルギー投入量の最小化なども省エネルギーにつながる。これらのメニューは、結果として次節のCO<sub>2</sub>排出量の削減のための有力なツールになり、すでに成果も上げられている。それらの具体的な事例については、次の環境負荷軽減の節で紹介する。

ロードマップの作成では、これらのメニューを難易度を鑑みながら時間軸を横軸にとった図面上に数値目標を付けて並べ、総合すると達成目標である「エネルギー50%削減/m<sup>3</sup>」が達成できるように作り上げる必要がある。

### (2) 環境負荷軽減

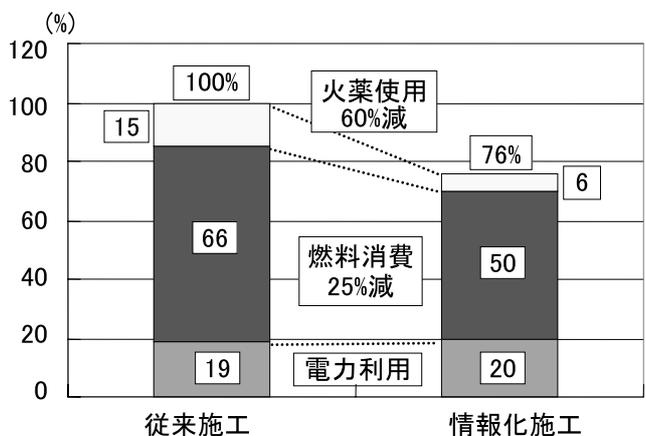
環境負荷として最も重要視されているのはCO<sub>2</sub>といえる。もちろん、その他にも土壌・水域・大気汚染、騒音、振動なども環境への負荷といえるが、ここでは、社会的な注目度が最も高いCO<sub>2</sub>を取り上げて考える。CO<sub>2</sub>排出量に関し具体的な数値目標の設定を行う場合、建設分野全体とするのか、代表的な例として個別の作業に限定するのかを決める必要はあるが、ここでは、建設分野全体として、例えば、下記のような

達成目標を立てることにする。

目標：建設工事に起因して発生するCO<sub>2</sub>を40%削減する。

基本的にCO<sub>2</sub>排出量の削減は、前節の省エネルギー技術と両立する。このため、開発技術のメニューとして前節の技術は、いずれもCO<sub>2</sub>排出量の削減技術としても最有力の技術といえる。ここでは、前節で紹介した技術のうち、機械の使用方法による環境負荷軽減について、すでに実用化された技術について紹介する。

この事例では、埋め立て用の大規模土取り工事において、情報化施工技術を活用して、多様で時々刻々変化する現場の情報をリアルタイムで収集した。この情報に基づき、土取り場の位置、機械の使用方法、爆薬の使用量等を柔軟に変更することにより、必要最小限のエネルギーで所定の採土を行うシステムを構築した。その結果、工事のために投入するエネルギーを減少させることができ、これをCO<sub>2</sub>排出量に換算すると従来工法に比べ24%の削減を実現することができた(図一七)<sup>2)</sup>。この種の取り組みは、他の工事にも展開可能であり、汎用的な技術への発展が期待される。



図一七 情報化施工による環境負荷低減効果

ロードマップの作成では、これらのメニューを「CO<sub>2</sub>排出量の40%削減」が達成できるように、時間的な難易度を加味しながら数値目標を付けてマップ上に並べていくことになる。

### (3) 建設就労者・技能労働者不足への対応

将来起こり得るオペレータ不足や技能労働者不足に対しては、建設業への入職者を増やす取り組みが直接的な対策となるが、少子化が進む現在の日本ではこの方策は簡単に実現できるわけではなく、技術面でカバーすることが必要になる。すなわち、建設機械に自動

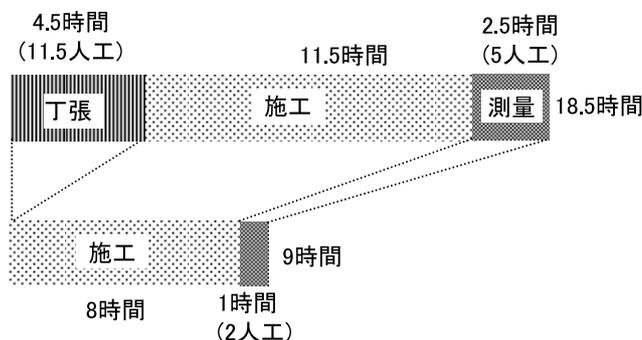
化技術を導入してこれらの課題の解決を試みることも有力な対応策になる。このテーマに関するロードマップの作成では、具体的な目標を数値で設定することが難しく、ここでは、下記のような定性的な目標を掲げておく。

目標：オペレータ不足、技能労働者不足の解消。

この目標を達成するための技術は、現段階でもかなりのレベルまで実現されている。例えば、リモートコントロールによる建設機械の遠隔操作技術<sup>3)</sup>やダンプの自動走行システム<sup>4)</sup>などは、すでに実用化の域に達している。これらの技術はコストの問題から、災害復旧など危険な作業で利用されることが多いが、将来、オペレータ不足が深刻になってくると経済的にも成立する技術になると思われる。さらに自律的な動きをすることができる完全自動化の建設機械もすでに開発研究が行われているが、実用化までには今しばらくの時間を要する<sup>5)</sup>。ただし、ロードマップで想定している25年先を考えると、十分に実現されていることが期待できる技術といえる。

また、技能労働者不足への対応からみると、一部の操作を自動化することにより、熟練オペレータ以上の作業効率と精度を実現することが実証されている。図一8は、自動化技術の導入効果を調べるために行った現場実験の結果である<sup>6)</sup>。実験では、ブルドーザの排土板にGPSを搭載し、排土板の上げ下げの制御を自動で行う機械システム（以下、GPSドーザと呼ぶ）とオペレータ操作によるブルドーザ（従来機）を同じ条件の整地作業で使用し、両者の作業性等について比較を行った。従来機を用いた場合には、完成面を示すための丁張りを設置するために作業員と時間を要するが、GPSドーザの場合、機械が完成面の座標を覚えていて、その座標面を作るようにGPSで3次元の位置に特定された排土板を自動で動かすため、丁張りの設置が必要なくなる。また、土を均す作業もオペ操作に比べると少ない回数で平滑に均すことができるため、実作業時間も大幅に短縮することができた。このことは、機械の稼働時間の短縮を意味するが、これは、前節のエネルギー消費やCO<sub>2</sub>排出量の削減を実現する手段としても有望な道具といえる。

同種のシステムは、舗装や整地におけるグレーダのブレード制御で使われており、徐々に汎用化しつつある。この技術は、中・長期といわず、数年後には多くの現場に広まっていることが期待できる。自動化技術には、その他、配筋作業、左官作業等の技能労働において労働力と精度を自動化された機械で補完する効果も期待される。このため、労働力不足に対するメニ



図一8 ブルドーザのGPSによるブレード制御の効果

ューとしては、自動化された建設機械の汎用的な使用が挙げられる。ここで、「汎用的な使用」としたのは、すでに紹介したように技術的には実用化のレベルにまで達している物があるものの、コスト面から導入されないケースが多いが、将来、オペレータや技能労働者の不足が顕在化してくると、経済的にも成り立つ技術になる可能性が高いためである。

#### (4) メンテナンス技術の確立

メンテナンスの目的は、構造物が必要な機能を所定の期間有することを保証することである。ここでいう所定の期間とは、耐用年数と考えればよいが、実際には構造物は劣化や損傷等で使用に耐えなくなるまで使われることが多いため、ここでは寿命と考えることにする。前述のように生産人口が減少を続ける日本においては税収の増加が見込めないため、今後も公共投資は低迷すると考えると、構造物の延命は重要な方策となる。このため、この課題に対する目標としては、下記を設定する。

目標：構造物の平均寿命を50%延長する。

構造物のメンテナンスでは、対象とする構造物の健全度評価のための技術と評価結果に基づく補修・補強技術が必要となる。このため、この目標を達成するための建設機械に関する技術開発のメニューとしては、下記が挙げられる。

##### (a) 構造物の健全度評価

構造物の健全度評価技術としては、すでに多くの非破壊検査技術が実用化に至っている。これらの手法は劣化等の支障が疑われる箇所の検査では有効に利用されている。しかしながらメンテナンスの対象となる構造物は日本全国で無限といえるほどあるため、広範な地域から検査を行う箇所を抽出することは難しく、このための技術開発が必要となる。この技術が建設機械という形をとるか否かは現段階では不明であるが、探査機械という形で開発されることも期待できる。

### (b) 補修・補強技術

補修、補強の技術は、構造物の種類、部位、劣化程度により異なる。当然、これに使用される建設機械も多種多様となり、補修・補強の内容に応じてそれに適した建設機械が開発されることになる。しかしながら材料のリサイクル技術は、共通の技術として議論しやすい。コンクリートや舗装、建設発生土のリサイクル技術は、環境負荷を軽減する意味からも重要な技術といえる。補修・補強におけるリサイクル率 100% を目指した機械の開発が望まれる。

## (5) 月面作業用機械

月面での作業機械は、夢物語のように思われがちであるが、日本のセレーネ 2 計画が加速し出すと、近い将来必ず必要になる技術といえる。開発目標としては、目標：月面上で作業可能な建設機械の開発とする。この技術開発のために具体的なメニューとしては、下記が挙げられる。

### (a) 走行装置の開発

月の表面はレゴリスと呼ばれる緩く堆積した非常に細かい砂で覆われている。月面作業車は、このふかふかのレゴリス上を走行して移動しなければならない。地球上の建設機械は、タイヤや履帯の走行部周辺の地盤のせん断強度から移動のための推進力を得ているが、地球の 1/6 という低重力下では、レゴリスはせん断強度を発揮できないため、車両は十分な推進力を得ることができない。この場合、車両は機動性を発揮できないばかりか、スタックの状態に落ちってしまう危険性も孕んでいる。月面上を自由に走行することのできる走行機構と制御技術は必要不可欠な開発項目といえる。

### (b) 反力を必要としない掘削機械

地球上で地盤の掘削を行う場合、機械の重量に反力を求める場合が多い。月面上では、重力が地球の 1/6 であるため、反力となる機械の重力も 1/6 となる。レゴリスは月の表層付近では柔らかいため簡単に掘削することができるが、数十 cm ～数 m の深さになると固結しているといわれている。この硬い層を掘削するには、ある程度の反力が必要になるが、機械の自重では反力として不十分で、別途何らかの機構で反力を得るか、反力を必要としない掘削機構を開発する必要がある。

### (c) 真空への対応

月面の真空条件は、建設機械にとって様々な制約となる。例えば、地上の機械であれば摺動部の潤滑に油を使うが、真空中では普通の油では飛散してしまう。

また、空気がないと熱放射にも影響を及ぼす。地上では機械の中ではファンが回っており、空気を介して比較的簡単に冷却することができるが、月面では放射だけの冷却となり、機械の稼働を制約することが懸念される。真空への対応は、月面作業車にとっては、意外と深刻な課題といえる。

### (d) 動力源の確保

月面では、14 日間昼ばかりの日が続き、次の 14 日間は夜ばかりとなる。月面上での作業機械の動力源としては、太陽電池が有力ではあるが、14 日間の昼間しか使えないため、残りの 14 日間の動力をいかにして確保するかも重要な課題といえる。

月面は地球上とは環境が大きく異なる上に、地球から資材を輸送するのに莫大な費用がかかるため、省エネルギー、高効率、リサイクル技術を発展させなければならない。これらの技術は、地球上では、経済的に成り立たないことが多いため、研究開発にまで繋がらないことが多いが、月面を想定した場合、新たに地球から輸送するための費用を考えると経済的に成り立つ技術になり得る。ここで開発された技術は、将来、地球上での技術に逆にスピノフされることにより、新たなイノベーションが生まれることが期待される。

## 4. ロードマップのイメージ

前章で述べたロードマップの目標と技術開発項目のメニューを図 9 に示す。本来であれば、技術開発項目は達成年次を予測して、該当する年代に配置していく必要があるが、最初に述べたように著者にはそれを決めるだけの知見がないため、項目を列挙するにとどめている。設定した目標の妥当性、開発項目のメニューに関しては、多くの専門家の意見を入れて修正・変更していく必要はあるが、イメージ的にはこのようなロードマップになると思われる。

なお、図中の矢印は、個々の目標を達成するために開発された技術が他の目標にも寄与することを示している。例えば、ブルドーザの排土板の自動制御技術は、重機の実稼働時間を短縮するため、燃料消費や環境負荷軽減に寄与することになる。また、維持管理作業における完全リサイクルは、新たな材料の使用を最小限に抑えるため、やはり燃料消費や環境負荷の軽減に寄与する効果が期待できる。さらに、宇宙開発に関わる技術は、限られたエネルギーの有効活用を基本とするため、燃料消費や環境負荷軽減技術に新しい考えをもたらす効果が期待される。

社会情勢	2007	2012	2017	2022	2027	2033年	目標
燃料の高騰		1) 燃費の向上					1m <sup>3</sup> の土の掘削作業におけるエネルギー 50% 削減
環境負荷軽減		2) 作業能力の向上					建設工事に伴うCO <sub>2</sub> の 40%削減
人材確保		3) 使用方法の改善					オペレータ, 技能労働者不足の解消
維持管理		1) 遠隔操作技術, 3) 自律的完全自動化技術	2) 部分作業の自動化				オペレータ, 技能労働者不足の解消
宇宙開発		1) 構造物の健全度評価技術 2) 補修・補強技術, 完全リサイクル技術					構造物の平均寿命の 50%延長
		1) 走行装置の開発, 3) 真空への対応,	2) 反力を要しない掘削機械, 4) 動力源の確保				月面作業機械の開発

図一9 建設機械の技術開発に関するロードマップのイメージ

## 5. おわりに

本稿では、建設機械の技術開発に関わるロードマップを考えてみたが、あらためて内容を見ると、結局は、従前より言われている内容とさして変わりはないものになった。これは著者の知見が限られているためで、より広い視野を有する専門家が考えるとより斬新で魅力的なロードマップが描けることと思う。本稿がそのための呼び水になれば幸いである。

JICMA

### 《参考文献》

- 1) JSME 技術ロードマップ日本機械学会誌 (付録), **10** [1067] (2007.10)
- 2) 建山和由: IT と建設施工 — Precision Construction の試み—, 建設の機械化, [625], pp.3-7 (2002.3)
- 3) 田上幸雄: 遠隔操縦ロボットの開発と施工効率化, 建設の機械化, (2004.1)
- 4) 若林洋他: 無人ダンプトラックの運転システムについて, 小松技法, **22** [4], pp.9-23 (1976)
- 5) 山元弘他: 「ロボット等による IT 施工システムの開発」の取組み, 建設の施工企画, [681], pp. 13-18 (2006.11)
- 6) 永井孝雄・安東正生・神田俊彦: 高精度 GPS を利用した建設機械の情報化施工システム, 建設機械, **43** [1] (2007.1)

### 【筆者紹介】

建山 和由 (たてやま かずよし)  
立命館大学  
理工学部

