

# 建設施工の自動化における信頼性と環境への配慮

## —「品質と革新」及びリスクマネジメントによる取り組み—

宮村 鐵夫

生産性向上と人手不足への対応には建設現場での省力化と機械化が大きな課題であり、企業の社会的責任として信頼性と環境への配慮による「品質と革新」による競争も求められている。ヒューマンエラーや保全性への配慮を含む建設機械等の使用の信頼性は、生産性や施工コストのみでなく人への安全性や環境にも影響する。

施工計画全体を俯瞰的に見通し自動化や環境配慮へ検討を行うには、施工設計段階で工程 FMEA などによるリスクマネジメントを行い、スルーで施工プロセスとその条件管理を検証することが有効である。

キーワード：信頼性、保全性、ロバストネス、ライフサイクル・マネジメント、リスクマネジメント、工程の FMEA、施工管理のシステム化

### 1. はじめに

建設施工では、

- ・ 製造業と比較して 1994 年に同じであった労働生産性が 2005 年には 2 分の 1 と格差がついており、生産性向上によるコスト低減への合理的な対応
- ・ 建設業就業者数が 1997 年より 2006 年には 559 万人と 18% 減少しており、熟練者（オペレータ）の高齢化など人財環境変化への備え

を進めるとともに、

- ・ 危険な現場作業における労働安全及び排気ガスと騒音低減など環境に対する社会的責任の遂行が要請されている。人による作業の省力化や機械化の推進、作業のフルプルーフ化による信頼性と安全性の向上、人と環境に優しい施工計画策定など、「品質と革新による競争」への取り組みが企業倫理 (Corporate Ethics) からも求められる。

一つは、リスクマネジメントを取り入れた施工計画の策定、技術と経済性を考慮した工法革新である。施工現場と施工方法に適した建設機械を導入し、故障やチョコ停さらにサイクルタイム変動が少なく、短いアタッチメント交換時間などによる品質と安全性の確保を前提とした生産性向上を図る。

二つは、自動化を真に活用する取り組みである。自動化すれば生産性や安全性が向上するわけではない。オペレータと専門保全のコラボレーション、オペレータ自身の的確な自主保全能力向上、準備工程や機械稼

働時のリスクを想定して個々の問題をしっかりとらえ、安全第一、品質第二、施工第三の考え方にに基づき全体最適を目指してマネジメントしていく施策である。

本稿では、建設施工を取り巻くこれらの状況を考慮に入れながら

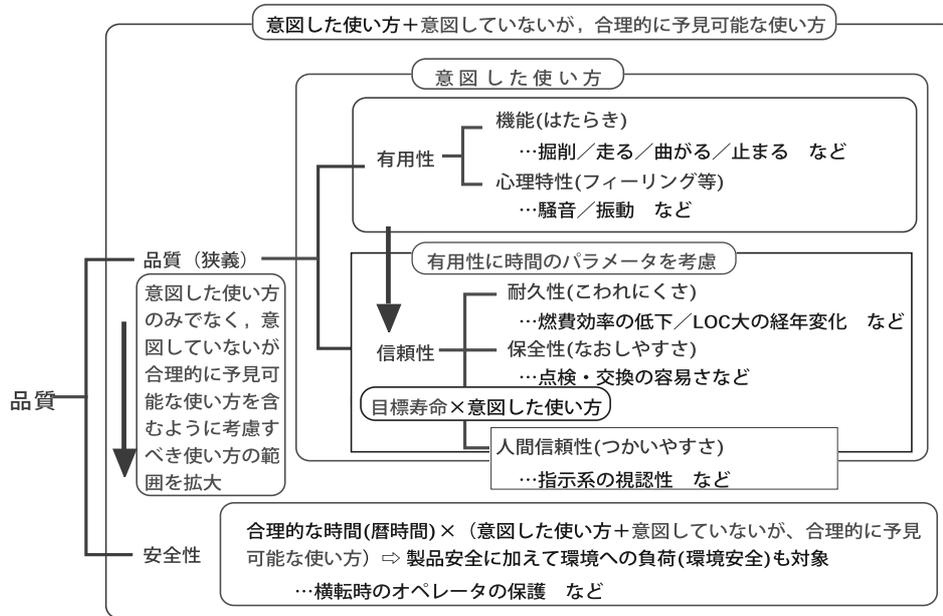
- ・ 建設機械の信頼性と環境配慮
  - ・ 建設機械自動化の背景と進展
  - ・ 安全と環境に配慮した施工計画策定とリスクマネジメント
  - ・ 施工管理のシステム化
- について考える。

### 2. 建設機械の信頼性と環境への配慮

#### (1) 建設機械の品質と使用の信頼性

建設機械の品質は、図-1 に示すように、有用性、信頼性、安全性の 3 つの要素に分けて考えることができる。有用性は機能的な側面、使用環境条件や経年的な側面に着目したのが信頼性である。安全性は、意図していないが合理的に予見可能な使い方についても致命的な状態へ連鎖しない品質の要素である。

「顧客は購入時と使用中の 2 度評価」すると言われるように、信頼性は使用中の品質評価と密接な関係を有し、信頼性の問題が発生すると影響は第一にユーザに及ぶ。またクレーム対応やリコールなどの事後的な処置が必要になり、メーカーにとっても労力並びに経済



図一 建設機械の品質と使用の信頼性 (宮村<sup>1)</sup>を修正して作成)

的な影響は極めて大きい。図一 1における信頼性と安全性を含む上位概念が「使用の信頼性」になる。

(2) 使用条件の多様性とロバストネスの考慮

建設機械では、使用される環境条件のみでなく、燃料や作動油などの使用条件が使用の信頼性に影響するところが大きい。具体的な取り組みは以下のようなものである。

(a) 燃料・潤滑剤・作動油

エンジンの性能を十分に発揮して耐久性と排出ガスを良好に保つためには、

- ・適正な燃料の使用
  - ・良好な燃焼の確保
  - ・燃料中に水分や夾雑物が混入しないように留意
- するとともに、使用燃料の適正範囲をできる限り幅広く許容できるようにロバストネスのあるエンジンの設計と評価を進めておくことが望ましい。企業活動と中古品流通のグローバル化で、ブレーキ液、不凍液などの仕様変動が大きくなり、性能や耐久性のロバストネスを考慮した設計の重要性が一段と高まっている。

(b) 安全装置

機械の転倒防止装置やブレーキ装置の充実、インターロック機構などによる誤操作の防止、人の接触や挟まれ事故の防止、故障予知、異常警告や自動停止などの諸装置、及び

- ・ヘッドガードの要求性能
- ・FOPS (Falling-object protective structure)
  - …落下物に対するオペレータの保護
- ・OPG (Operator protective guards)
  - …油圧ショベルに取り付ける運転員保護ガード

- ・ROPS (Roll-over protective structure)
    - …転倒時の保護構造
  - ・TOPS (Tip-over protective structure)
    - …スイング式のブームをもつ運転質量 1,000 kg 以上 6,000 kg 未満のミニショベルが横転したときに、シートベルトで支えられたオペレータが押しつぶされる可能性を少なくすることを目的とした横転時保護構造
- などオペレータの保護装置へのきめ細かい対応が、安全性重視には不可欠である。

(c) コンピュータによるモニタリングと傾向管理による予防保全など安全性への積極的な対応

定期的に行う点検、潤滑油の採油による摩耗粉チェックなどによる状態監視、近年は自動制御、モニタリングの多様化と高度化で建設機械も電子化が進み ECU (Electronical Control Unit) の搭載が増えており、これを予防保全の手段に活用している機械も増えている。機械ユニットの中で油圧、空圧、油温など機械の状態を知る上で重要な情報を得るために、一定間隔で情報(データ)を取り込み、記憶されたデータを解析判定して、機能限界前に部品交換などの判断を行える予防保全の環境が整ってきている<sup>2)</sup>。

(3) 環境への配慮

建設工事による騒音、振動への苦情は年々増加、現場で発生する埃、泥水、排出ガス、漏油なども問題視されることが多くなり、これらの環境負荷を低減する努力が行われている。地球温暖化について、建設業界では 2010 年度に施工段階の CO<sub>2</sub> 排出量を、1990 年度

比で12%削減する目標を立て取り組んでいる。

エンジン(原動機)の排出ガスの4次規制については、米国や欧州の規制と整合化すべく個々の企業で取り組まれている。グローバルな整合化と技術開発のリードタイムを考慮した基準策定が待たれるところである。近年は国内投入の建設機械の新車販売台数が増加している一方で、海外中古車輸出台数が2002年から継続して新車販売台数が上回っている。この循環が持続的に機能するには国内外の使用燃料の品質変動を考慮に入れた開発が重要となる。

地球温暖化防止については、リターダブレーキやハイブリッド方式によるエネルギー回収など建設機械省エネルギー化の機構改善や運転システムの装備などの改良が行われている。工事現場でのCO<sub>2</sub>削減では、バイオディーゼル燃料の掘削機や自走式クレーンの導入、急発進や急加速などエンジンに負荷をかけない運転の指導・徹底などが行われ、公共、民間の工事とも温暖化対策などを条件とする案件が増えている。工事での環境戦略が受注競争の重要な要素となっている。

#### (4) プロダクト・ライフサイクル・マネジメント

海外輸出を含む中古市場との補完性では燃料、作動油などに対するロバストネス、鉱山で使用されている大型建設機械では原単位(\$/kg)のコスト保証など考慮すべきスパンが拡大し、建設機械のライフサイクル・マネジメントの重要性が増している状況である。

2000年に制定された循環型社会形成推進基本法で、廃棄物の適正な処理のみならず、「経済社会システムにおける物質循環」を確保し、「自然物質循環」の保全を確保することが明記され、いわゆる3R(reduce, reuse, recycle)が課題となっている。とくにrecycleの推進では事業者横断的に業界としての取り組みが行われている。(社)日本建設機械工業会においても、「廃棄ゴムクローラ類広域リサイクル」などに取り組んでいる<sup>3)</sup>。

### 3. 建設機械自動化の背景と進展

#### (1) 自動化の制約条件と背景要因

建設機械は、動力に蒸気機関を用いる方式から、段取り・調整がより容易なディーゼルエンジンへ、さらに環境へのCO<sub>2</sub>負荷が少なくなる電気エネルギーの使用へ、と発展している<sup>4)</sup>。制御方式も、リンク機構など機械的な方式から、油圧制御、さらに電気制御へと、よりきめ細かく動力を伝達しフェザータッチ制御へと技術革新が進んでいる。

あわせて

- ・地盤、傾斜地など施工現場の多様性
- ・河川の渡渉など施工現場での多様な使われ方
- ・工期が通年を超え長期にわたる場合の季節変動など自然環境条件の変化
- ・複数作業遂行を考慮に入れた柔軟な段取り・調整などの使用環境条件の多様性
- ・マーケットのグローバル化における使用環境条件の多様性
- ・中古市場のグローバル化による使用燃料や作動油などの多様性

さらに

- ・排出ガス規制の強化

など、環境に対する社会的規範の変化を指摘できる。施工の自動化を進めていく制約条件というだけでなく、技術開発の方向性や建設機械の信頼性や使いやすさへの要求事項の背景要因にもなっている。イノベーションをうながす推進力との位置付けができる。

#### (2) 自動化のフレームワークとインタフェース

自動化では、前項の議論から、使用時の(建設機械)の「オペレータ」と「(施工)環境」の2つの要素に「建設機械」を加えた図-2に示すフレームワークで考えることができ、「①表示系の見やすさ」、「②操作性」など6つのインタフェースが要となる。

人が行っていた作業を自動化すれば、人による作業の信頼性が必ずしも向上するとは限らない。労力を使ってバルブ操作を行うとき閉を開に間違えることは極めて少ないが、遠隔で自動的に行える場合には間違える頻度が高くなる。自動化で新たなエラーモードが生じるのが一般的であり、オペレータのスキルアップなど教育・訓練を同時に進めていく必要がある。

##### (a) オペレータとのインタフェース

文献<sup>2)</sup>によれば、「建設機械は、諸外国から導入されたさまざまな操作方式の建設機械を元にして個別に開発が進められてきたため、かつて各メーカーごとに操作レバーの配置や操作方式、ペダルや計器類の配置が異なっていた」ということである。しかし、建設機械の保有形態が買い取りによる自社保有からリースやレンタルへと移行するにともなって、操作方式の標準化が進み、新しく製造される建設機械のほとんどが標準操作方式の建設機械となり、着実に普及が進んでいる。1998年4月から(社)日本建設機械化協会において“標準操作方式建設機械認定制度”として標準操作方式の普及活用が図られている。

メーカーにより操作方式が異なれば、作業手順の習熟性が落ちてサイクルタイムが長くなり生産性への影響

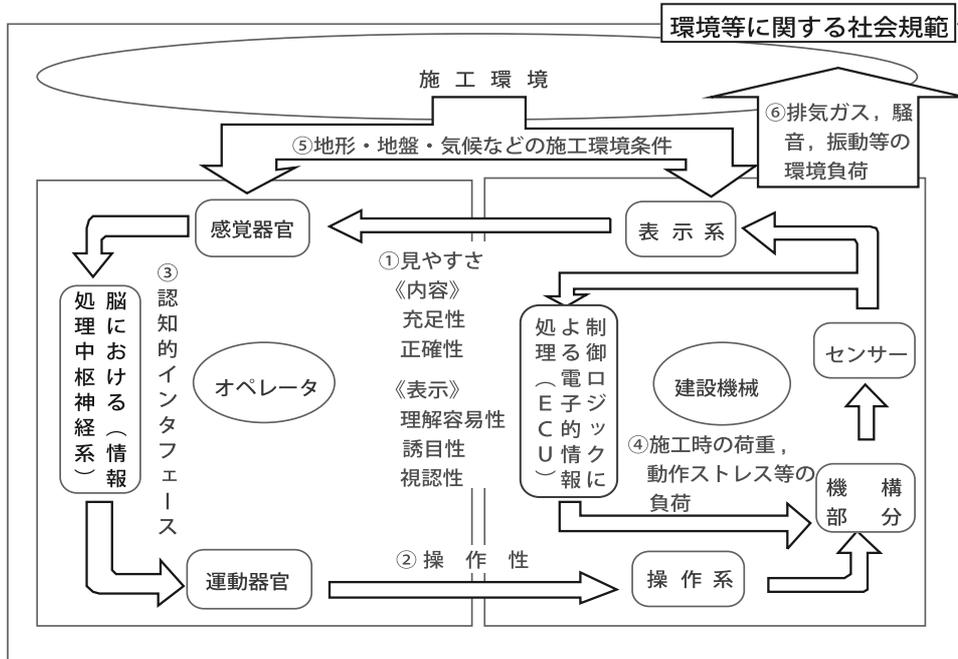


図-2 自動化を考えるフレームワーク (宮村<sup>1)</sup>を修正して作成)

が出るだけでなく、緊急時に誤操作をする危険性が高まってくることになる。ユーザインタフェースを標準化していく（消費生活用製品の分野で重視されつつある）ユニバーサルデザインの考え方はグローバル化とともに必要性が高まっている。

(b) 自動化とユーザインタフェース

自動化における基幹技術としては

- ・遠隔操作技術
- ・遠隔監視技術
- ・危険予測・回避技術
- ・多重安全回路技術

がある。ユーザと機械との情報のやりとり、複数の機械を通信により管理して施工するように自動化が進化していくと、視認性や操作性などのインタフェースのみでなく、人とコンピュータとの情報処理の特徴を踏まえた認知的インタフェースの標準化も必要になってくる。

(3) 作業手順の標準化と汎用性を考慮した自動化の進化

個々の施工現場は変化するが、同じ原理・方式を用いる工法の作業手順は、図-3に示すように4M (Man, Machine, Method, Material)の要素に構造化することで標準化できる。標準作業手順はコスト見積りでのサイクルタイム設定などの基礎データにもなる。

作業手順標準化の効用は、

- ・適用対象によって不適切なところがあれば事前に標準を見直して、実行に反映
- ・実行して問題があれば標準を見直すことにより継続

的な改善実施

など組織学習が可能となることである。前者は新規要素・変更点のマネジメント、後者は改善活動による組織学習であり、属人的から組織としてのノウハウの蓄積・継承になる。

標準化にあたって、4Mに関する重要な考慮事項は下記のようなものである。

①工法の検討

工法は、各現場の施工及び周辺環境の条件などにより選定するが、複数の工法が選定可能な現場の場合には地球温暖化対策の観点も含めて総合的な検討を行う。

②資材の選定

材料などの仕様を明確に定義して、異材が混入しないように明確に指定すること。

③建設機械の選定

汎用要請の高い建設機械導入でも専用機と劣らない生産性をあげるには、作業手順の標準化、スキルの教育・訓練などマネジメントシステムと一対となった取り組みが不可欠である。

④排出ガス・粉塵対策

2005年7月に公布された「特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律」（以下、オフロード法）による排出ガス対策型の建設機械の指定要件は、

- ・特定原動機の型式指定
- ・特定特殊自動車の型式届け出
- ・特定特殊自動車の少数承認

の3つであり、これらの要件に適合した届け出により、基準適合表示を行うことができる。

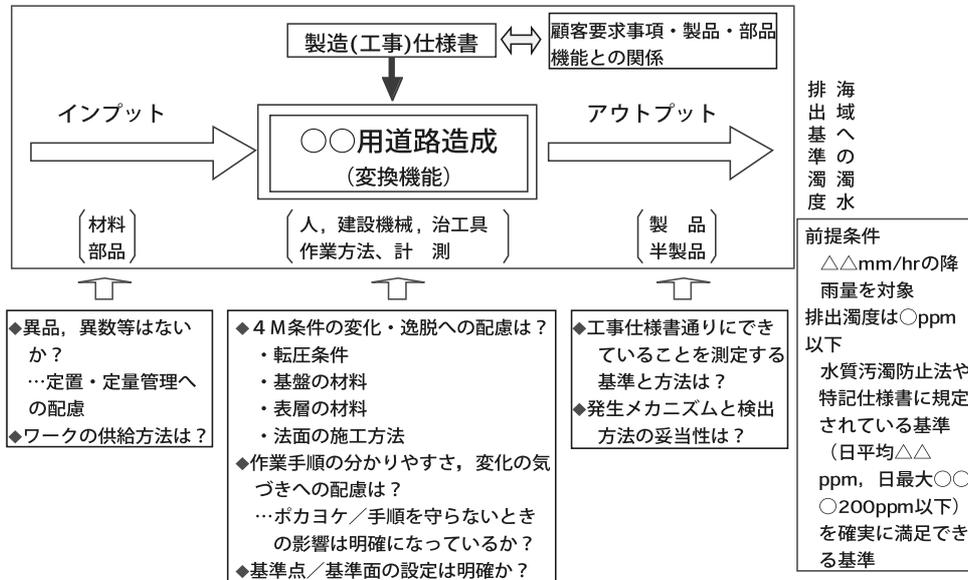


図-3 工事用道路形成の4M条件の一例

#### 4. 施工計画策定とリスクマネジメント

##### (1) 施工計画策定プロセスの標準化

施工計画策定では、施工プロセスの立案、これをさらに掘削や敷きならしなどの単位作業へと展開していくことになるが、事前調査の可否が計画どおりに施工を進めていく上で大きな比重を占める。施工の段階では関係する事業者が多数かわり、計画作成段階で事業者間でのコミュニケーションをしっかりとって情報を共有化して、施工計画の完備化を進めていく。段取り・調整さらに単位作業のサイクルタイムを的確に読み、実際との差異が発生しないように問題を明らかにして事前に解決するとともに、現場でのTBM (Tool Box Meeting) などをとおして双方向のよいコミュニケーションを図る。

##### (2) 信頼性と環境に配慮した施工への対応

公共事業では設計と施工の分離原則から、発注者が設計して受注者が施工することになり、設計図書には施工方法についてはほとんど示されていない場合が多い。設計の段階から施工の情報をフィードバックして、より最適な設計仕様の検討を進めていく考え方が取り入れにくい面がある。情報共有化とコラボレーションの進め方で、製造業と異なるところである。

製造業における新製品開発では、「設計仕様に適合した製品を目標原価で安定的に製造できる工法・工程を、これを適正な開発リードタイムで確立し垂直立ち上げでの量産へ結びつけるためには、関連する情報共有が重要であり、開発の源流段階から生産部門も積極的に参画することが大切」との考え方に基づいて、開

発段階から生産部門が生産構想を提示し積極的に参画して以下の取り組みを行っている。

- ①新材料を効果的に使うための設計配慮
- ②新加工技術の採用や既存設備の有効活用のための設計配慮 (例、ネジの切削から転造化、バリ発生ゼロ化と面取りの角度など)
- ③多くの機種に共用できるフレキシブルな生産ライン、加工設備を導入し、成果を上げるための設計配慮  
【例】連結・ライン化、工程内物流システムの最適化等による流れるライン、段取り・調整の治具工器化、点検・検査の容易化等による生産性の向上
- ④加工ロボットの生産効果を上げるための設計配慮
- ⑤エレクトロニクス装置搭載増加に対する検査装置等への設計配慮
- ⑥製造品質を大幅に向上するための設計配慮 (例、基準面と基準点を考慮した設計や図面指示)
- ⑦製造コストを大幅に低減するための設計配慮 (例、研削個所の少ない構造)

このような考え方を取り入れた新製品開発の進め方—コンカレントエンジニアリング—が、特に設計と生産のすり合わせが重要とされる自動車産業などでは活発である。開発初期からの徹底した情報共有・共用、そして部分から全体最適を指向している。

施工現場がその都度変わるなど前提条件が異なり、この考え方を直接取り入れ実践していくことは難しい面もある。しかし、設計から施工そして検収に至る業務フローの普遍性、他社・異質に学ぶ組織学習の重要性と有用性を考慮すれば、施工方法など後工程の力を施工計画策定段階で積極的に活用する「品質と革新による競争の仕組み構築と実効化」が企業の社会的責任

遂行への要請からも大切である。国土交通省の「公共事業における新技術活用システム」でも、

- ・新技術の採用動向の把握
- ・新技術活用システムのあり方などの活用方策の検討
- ・推奨技術の選定

をとおして、より最適な設計と施工の融和を求めている。

(3) 施工計画における事前調査と検証の進め方

—法規制と環境への対応—

施工計画の目標は、「工事の目的である建築物を、設計図書に基づいて、所定の工事期間内に、品質の良いものを経済的に、しかも環境に配慮しつつ、安全に施工する条件と方法を生み出すことである。このため、施工現場の事前調査をしっかりと行うことと、この調査結果を有効に活用できるように協力会社の英知を結集して施工計画業務を進めていくこと」である。施工計画は、「計画→実施→検討→処置」の建設工事における管理のサイクルの第一段階であり、十分な予備調査により慎重に立案するとともに、工事進行の各段階において、計画どおり行うことができるか対比・検討し、必要な是正措置を適切にとれるように作成しておく。

設計図書には主として完成すべき建築物の形状、寸法、品質などが示されているが、施工者は自らの技術と経験を生かしてどのような方法・手段で工事を実施するか検討しなければならないのがほとんどである。立案で要となるのは、施工現場におけるリスクを予測して、これをマネジメントすることである。考慮事項としては以下の項目がある<sup>4)</sup>。

- ①公衆災害
- ②騒音・振動対策
- ③水質汚濁対策

建設工事における濁水は、土木材料と水の混合によ

って発生。主なものは

- ・切り土、掘削による濁水
- ・コンクリート骨材の洗浄による濁水
- ・コンクリート打設・洗浄、グラウト、ボーリングなどに伴う濁水
- ・浚渫、埋め立てによる濁水
- ・泥水加圧シールド工法や地下連続壁工法などの泥水処理による廃棄泥水

④濁水処理

建設工事において主として行われる処理方法には、沈降分離、脱水濾過、中和がある。沈降分離では、沈殿地などで水中に浮遊している微細な粒子を高分子凝集剤などにより大きな粒に成長沈降させる。

(4) 工程の FMEA を活用したリスクマネジメント

—濁水流出リスクを考慮した環境配慮への活用—

宮本<sup>3)</sup>は、工事エリアの現状を事前調査に基づき把握した上で、「伐採→工事用道路造成→2号沈砂地造成→盛土」の当初施工計画について、

- ・顧客重要要求項目のひとつで環境保全基準における「濁水の流出」と関係のある工事工程を抽出し、
- ・当該工事工程における工事方法の情報を活用して施工時に発生する「濁水の流出」にかかわる問題を故障モードとして想定し、
- ・発生品頻度、検出難易、影響度を考慮してリスク評価し、許容できない故障モードについて事前の対策を検討

している。すなわち、施工時の想定故障モードとリスク評価を工程の FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, 故障モードと影響解析) により実施し、事前解析によるリスクマネジメントを行っている。

新たに必要な改善項目は、リスクの種類である故障

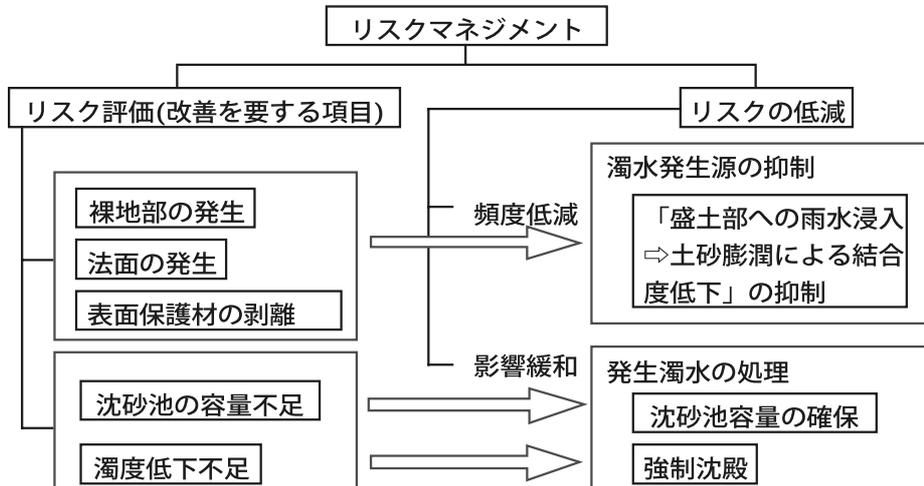


図-4 工程 FMEA 活用によるリスクマネジメント

モードの発生頻度低減と発生した場合の影響（損害の大きさ）緩和に整理でき、その概要は図-4に示す通りである。

濁水発生源の抑制については「敷きならし」、「転圧締固め」などの各単位工程における締固め回数など4M条件を見直し、裸地部等の発生そのものの低減を図る。影響緩和については発生濁水が海に流出する連鎖事象を確実に断ち切ることを考えて、発生した濁水が的確に処理できるようにするため沈砂池の造成による容量確保や濁度を強制的に沈殿する設備形成などを行うように是正する。見直し後の工程概要は、仮沈砂地造成を新たに追加して「伐採→仮沈砂地造成→工事用道路造成→2号沈砂地造成→盛土」となる。

## 5. 施工管理のシステム化

GPSなどを利用した運行管理システムは、車載無線など人手に頼っていた基地と車両との各種情報授受を、GPS（全地球測位システム）を利用した位置情報や車載の各種機器によるデータ（作業内容、車両状態など）をまとめてリアルタイムに行い、機械管理の効率化を図っている<sup>5)</sup>。

道路工事における建設機械のGPSによる位置情報と車載機器のデータの相互交換は、鉱山など大きな規模で多数の機械を管理する必要のある業種では、GPSや通信衛星などを利用した管理方法がとられるようになってきている。

大規模な資源開発や土工においては、ダンプトラックの運行管理システムとして、運搬土量や稼働状況を管理するシステムが利用され、システムの要素は以下のとおりである。

### ①稼働状況把握

ダンプトラックの稼働状況には、特定の通過地点で行う定点観測と連続的に捉える連続観測がある。

### ②運搬資源／土量把握

運搬回数（マンボ）やトラックスルー（計量機）の利用から、超音波による体積測定や車載センサー（圧力センサーや磁界変化検出センサー）も活用されている。

### ③情報入力法

運搬土量などのリアルタイム伝送入力法としては、光通信や無線が利用されている。一方、稼働時間などのリアルタイム性を一般に必要としないバッチ系情報は、直接入力するか、ICカードを介して入力されている。

### ④運搬資源／土量管理

運搬土量をタイムリーに把握できると、運土計画と対比して、実績値を計画にフィードバックして、計画

の修正が行える。

そのため、地形の変化、土量を適時、的確に把握するために、地形をデジタル化したデジタル Terrain モデル DTM (Digital Terrain Model) として扱い、コンピュータで三次元的に処理して、GPSとこれらの技術を組み合わせればトータル的な情報化施工としての土工管理が可能となる。

### ⑤作業（盛土先）指示

作業指示は、電光掲示板や無線などが利用されている。

### ⑥無人ダンプトラック

ダンプトラックは、運土工事の建設機械の中で投入台数が多く、無人化を図った場合、省力化の効果が大きい機種で、GPSを利用した無人ダンプトラックの実用化が予想されている。安全装置としてレーザレーダと超音波センサ、接触センサなどを装備することになる。

## 6. おわりに

GPSを活用した位置情報と通信技術、遠隔操縦の技術などによる施工の自動化と管理のシステム化が今後さらに進展する。このような自動化を有効に使いこなすには、システムを構成する建設機械など要素についての知識と点検整備などのメンテナンス、さらに事前調査と施工計画の妥当性についての事前検証が大切になってくる。これらの事前検証において、環境配慮への重視が今後のグローバルスタンダードになると考えられる。

最後に、(社)日本建設機械工業会常務理事 徳永隆一様には本原稿作成に当たり文献紹介等何かとお世話になりました。ここに記して謝意を表します。 JICMA

### 《参考文献》

- 1) 宮村鐵夫：PL制度と製品安全技術，朝倉書店（1995）
- 2) (社)日本建設機械化協会：建設機械施工ハンドブック，(社)日本建設機械化協会（2006）
- 3) 日本建設機械工業会ニュースリリース，“2006年度中古車建設機械の流通量調査の概要”，2007年8月23日
- 4) 建設機械：特集，建設機械の変遷，500，42 [10]，日本工業出版（2006）
- 5) (社)日本建設機械化協会：建設の施工企画—情報化技術特集，II [693]（2007）
- 6) 宮本康司：海域に面した造成工事における濁水対策，品質管理フォーラム発表資料

### 【筆者紹介】

宮村 鐵夫（みやむら てつお）  
中央大学  
理工学部経営システム工学科  
教授

