建設・鉱山機械における ライフサイクルコスト低減方策による顧客価値創造*

高 村 藤 寿** 太 田 順 子** 西 澤 泉**

Customer Value Creation by Countermeasures to Reduce Life Cycle Costs of Construction and Mining Equipment

Fujitoshi TAKAMURA, Yoriko OHTA and Izumi NISHIZAWA

In this paper, we discuss efforts to enhance customer value by reducing customers' life cycle costs (LCC) of construction and mining equipment. Though it is necessary to quantitatively grasp the LCC for the reduction of it, many uncertainties included in LCC of construction and mining equipment have made it difficult. In order to solve this problem, the uncertainties were classified into two types. Then we proposed countermeasures required for three types and showed their effectiveness. The first is to quantitatively measure machine operation data by telematics services and to visualize how it is used. The second is to take countermeasures by the telematics information to maintain the machine conditions. By carrying out the first and second countermeasures by telematics services, accurate simulations of future LCC of these two types of uncertainties become possible. The third is fundamental removal of factors that are accidental and uncontrollable. This was demonstrated by the reduction of accident risks of the autonomous haulage system for mining. By combining the three countermeasures, uncertainties in LCC can be reduced. That makes appropriate LCC reduction countermeasures possible and creates customer value, which is obtaining benefits with less cost.

Key words: life cycle cost, construction and mining equipment, uncertainties, customer values, telematics, autonomous haulage system

1. 緒 言

今日、我が国並びに世界における市場はそのグローバル化と共に大きく変化し、製造業においてもかつての狭義の加工組立型モノづくり中心に付加価値を生み出すビジネスモデルは成立しなくなっている¹⁾²⁾。モノづくり企業においても、図1に示すようなバリューチェーンの上流と下流において付加価値を生み出すいわゆるスマイルカーブ化³⁾に対応した戦略にシフトしていく必要がある。スマイルカーブとは、製品のバリューチェーンにおいて、従来は高かった加工組立の付加価値がグローバルな競争が進展するもとの低下し、新規技術・素材・部品やサービス等というバリューチェーンの上下流の付加価値が上昇したとする考え方である。それに対応して、多くのモノづくり企業がバリューチェーンの上下流に着目した戦略にシフトしようとしている¹⁾²⁾。

ただし、モノづくり企業がスマイルカーブ化に対応した戦略をとる際には、付加価値の高い領域にのみ目を向けるのではな

く、従来から持つ中間の加工組立の強みを活かした上で、バリューチェーンの上流や下流で顧客に対する付加価値を創造するビジネスモデルを構築することが肝要である。摺り合わせ技術で性能が決まってくるタイプの商品(モノ)を扱うモノづくり企業では、商品(モノ)による差別化の併用は特に有効である。

著者らは、建設・鉱山機械という摺り合わせ型のモノづくり企業において、商品(モノ)をベースに、バリューチェーンの下流であるサービス、ソリューションを付加して顧客価値を高める取り組みを進めている。建設・鉱山機械のような生産財においては、顧客が支出したコストに対してどれだけの便益を得られるかが顧客価値につながる。顧客がその生産財に対して支払うコスト、すなわち保有のために必要なライフサイクルコスト(以下、LCC)の低減が、顧客価値を高める上で重要な要素である。

LCCを低減するためには、LCCの構成要素を定量的に把握した上で、適切な対策を取ることが必要である。しかしながらLCCの構成要素の中には定量的に把握できない不確実な要素が多く含まれており、そのことがLCCの低減、ひいては顧客価値の創造を阻む要因となっている。本論文では、建設・鉱山機械のLCCの中に存在する不確実な要素を減らして、より定量的に把握できるようにするための考え方を提示する。さらに建設機械のテレマティクスサービスおよび鉱山におけるダンプトラック無人運行システムというこれまでに実現していなかった新しい手法を用いた適用事例を通じてその効果を論ずる。

2. LCC低減における課題と解決策

建設・鉱山機械は生産財であるため、「利益を生む機械」であることが顧客価値に直結する。前章で述べたようにコストに対する便益が顧客価値であると定義すると、機械のライフサイクル全体にかかるコスト、すなわちLCCを考慮した上で利益を生み出す仕組みを整えることが必要である。

Fig. 1 New value-added shape, smile curve

* 原稿受付 平成 27 年 6 月 29 日

掲載決定 平成 27 年 10 月 29 日

** 株式会社小松製作所 (東京都港区赤坂 2-3-6)

Fig. 2 Life cycle cost composition of construction and mining equipment. R&M means repair and maintenance

一般に、大学等の研究やメーカーがその社会的責任(CSR)の観点から評価しているLCCやライフサイクルアセスメント(LCA)という概念は、持続可能社会実現という視点の分析がメインである⁴⁾⁵⁾。その主目的は、商品を提供するメーカーの持続可能性実現への取組みの効果や責任を明確にすることであり、その重要性から著者らも別の取組みを行っている⁶⁾。

一方、本論文で注目するのは顧客自らが建設・鉱山機械を使用する上で負担するLCCである。このような観点からは、トータルのライフサイクルで顧客自身が負担するコストのみを対象とすることで、顧客価値が評価できる。この目的から、本論文ではLCCを「顧客が負担するLCC」の意味で用いる。

LCCを積み上げると、商品自体の取得コストがそのライフサイクル全体に必要なコストの一部に過ぎず、顧客が商品を利用する期間に負担する運用コストがLCCにおいて支配的であることが多い。典型的な例では、顧客の長期保有・管理が前提である建築物や構造物である。このような業種では、設計時に性能、安全性、経済性等のバランスを考慮してLCCを合理的に最小化して仕様を決定する手法が進んでいる⁷⁾。

図2に建設・鉱山機械のLCCの全体構成の一例を示す。機械の本体価に相当するイニシャルコストに加えて、保守費、燃料費、オペレータ人件費、その他の機械を運用するためのコストが加算される。さらに、最終的に中古車として下取りに出す場合は、下取り価がマイナスされる。この全体がLCCであり、一般に建設・鉱山機械ではイニシャルコストよりもそれ以外の運用コストの方が大きな値となる。LCCの低減には、その多くを占める運用コストを下げることで、顧客が使用を終える際の中古車の下取り価を上げることが有効な手段である。

LCCを低減する対策を立てるためには、その前提としてLCCを定量的に把握することが必要である。しかしながらLCCの中には不確実要素が含まれているため、LCCの把握において大きな問題となる。具体的には、実際の使われ方や劣化・偶発的事故のリスク要因等が容易に予測できないため、LCCが正確に算出できないということである。そのための様々な予測手法がこれまでにも提案されている。過去の類似した事例のデータから回帰して求める手法⁸⁾や、データベースを整備して精度を上げる手法⁷⁾、確率を考慮したシミュレーション⁹⁾などの先行研究がある。

回帰計算⁸⁾やデータベース⁷⁾から求める手法は過去のデータを活用して現実に近づく取り組みとして有効である。ただし前提とした条件によって結果が左右されるため、その正確さを高めることでより精度が上がる。また、確率を考慮したシミュレーション⁹⁾は、主に事故、天災等の偶発的事象の影響を平均化して合理的に予測できる手法である。しかし、このような偶発的事象は発生するかしないかが個別のLCCに大きく影響するこ

Fig. 3 Classification of problems in life cycle cost estimation

とから、本質的に解決するためには可能な限り偶発性を除去できることが望ましい。

LCCの中の不確実要素の影響を可能な限り減らして、より正確にかつ適時に評価できるようにすることが、適切なLCC低減対策を立てて顧客価値を生み出すための重要課題である。LCCの各構成要素を不確実性という観点で分類すると、図3のようになる。

まず、LCCはA:確定要素とB:不確定要素に分けられる。確定要素は最初から明確にわかっているもの、例えばイニシャルコストに相当する本体価である。不確定要素は詳細をすぐに算出することができないものである。これはさらにC:データに基づいた予測が有効なものとD:予測が困難なものに分けることができる。データに基づいた予測が有効なものは、具体的な手段を使って計測したデータを用いて傾向を見ることで将来的なコストをある程度の確度を持って見積もることができる。ただし使用環境や運転条件によって違いがあるので、機械や現場ごとにデータを計測し把握することが必要である。建設機械(建機)の例では、燃料費やオペレータ人件費、点検・調整費に相当する。一方、予測が困難なものは、偶発的な要素が絡むことなどによりデータの傾向から将来を単純に予測することが困難なものや、そもそもデータを用いた見積もりが不可能なものなどである。劣化による故障や、完全に偶発的な外的要因によって生じる天災や事故等が相当する。

以上から、LCCに含まれる不確実要素は図3の太枠で示したC:データに基づいた予測が有効なもの、D:予測が困難なものに分類できることがわかる。本論文ではこの二つの要素について、その性質に応じた解決策を提示する。Cは稼働データの定量的計測による使われ方の見える化(方策①)、Dは状態監視保全する対策(方策②)と根本原因の除去(方策③)の二つである。これらの対策を取ることで、LCCに含まれる不確実要素を低減することができ、適切なLCC改善策を講ずることが可能となる。次の3章でまず方策①と②に関してテレマティクスサービスを用いて行った対策事例の詳細を述べる。また、4章では方策③の事例について述べる。方策③については普遍的な解は見出せていないが、この考え方を実証するための取り組みの一例を紹介する。

3. 計測による見える化および状態監視保全による不確実性低減とLCC改善

3.1 稼働データ計測による使われ方の見える化

ここでは、LCCの中に含まれる不確実要素を、テレマティクスサービスによる稼働データの定量的計測で低減する方策(図3の方策①)について述べる。稼働データを計測することによって

Fig. 4 KOMTRAX system schematics

使われ方が見える化すれば、将来に亘ってある程度の確度でコストを見積もることができ、結果としてLCCの精度を高めることができる。ここでは、LCCの中で機械を使用する際に単純に積算されていくものを対象としている。手段としてテレマティクスサービスを例に取り上げるが、このシステムに限らず稼働状況をモニタリングできるものであれば同様の考え方で活用できる。

図4に、稼働中の建機から自動で機械稼働状態をモニタリングするテレマティクスサービスの一つであるKOMTRAX¹⁰の概要を示す。KOMTRAXは、建機に搭載されたセンサ等の情報とGPSで得られる位置情報を、衛星通信または携帯電話通信を使って離れたコンピュータシステムに送るシステムである。著者らは、このシステムを建機では初めてとなる2001年から標準搭載し、現在では配車台数の多くに搭載している。このシステムにより、世界中で稼働している建機一台一台の稼働情報データを収集することができる。このようにして集めたデータを使うことで、使われ方が見える化され、図3のCの不確実要素(観測が有効なもの)が予測可能となる。不確実性が減ることにより、LCCの効果的な改善方法を検討することができ、顧客価値につなげることができる。

図5にこのシステムを用いて定量化した、ある先進国Aと新興国Bの顧客が購入してから使い終わるまでのLCCの構成例を示す。テレマティクスサービスで取得したデータを活用して、それぞれ平均的な総稼働時間(顧客が使用を終えるまでの平均時間)まで使用した場合のLCCを見積もったもので、新車の本体価を100として示してある。テレマティクスサービスを用いることで初めて建機のLCCについて定量的に評価が可能となった。二つの国で本体価に幾分差異はあるが、各運用コストの傾向を読み取るのに影響があるレベルではない。なお、図2の中のその他コストは機械本体以外からは発生するものであり、本システムでは対象外になるため、ここでは算出してない。

先進国Aと新興国Bでは総稼働時間が大きく異なり、新興国Bは先進国Aの約2.6倍である。この違いは、必ずしも使用年数が長いことによるものだけではなく、一日あたりの稼働時間が長いもしくは一年間の稼働日数が多いことにも大きな原因がある。総稼働時間が長いことに伴って、新興国Bでは第一に燃料費、次に保守費の負担が大きくなっている。

先進国AのLCCでは、総稼働時間が短いにも関わらず人件費単価が高いため、オペレータ人件費の比率が一番大きい。新興国Bは総稼働時間が長い、オペレータ人件費単価は先進国に比べて著しく安価であるため、総稼働時間の割に負担は大きくならない。一方、燃料費単価は人件費単価ほど先進国と差がないため、結果として燃料費の比率が一番大きい。また長時間稼働によって保守費の負担が増える。このように、テレマティ

Fig. 5 Life cycle cost examples in two countries. R&M means repair and maintenance

クスサービスを用いることで、これまで実態を知ることが難しかった各コストを定量的に把握できるようになり、トータルのLCCの見積りや予測のレベルが格段に進歩した。それによって、例えば各地域においてその特徴に基づいた効果的なLCC低減の対策をとることが可能となる。3.3で具体的なLCC低減の事例を紹介する。

3.2 不確実要素の状態監視保全による低減

LCC中の不確実要素を減らすための二つめの解決策は、図3のDを状態監視保全状態にすることである(図3の方策②)。この不確実要素は偶発性、ばらつき、不透明性等により、観測結果から将来を予測することが困難なものである。そのため前章で述べた図3の方策①のデータ計測による見える化を採用してもなお、不確実性を低減することができない。ここではそのような予測困難性のために顧客にとって不明瞭で見通しが立ちにくかった不確実要素を、状態を監視しそれを保全することで顧客が許容できるばらつきの範囲で予測可能にするための取り組みについて述べる。この不確実要素に相当するのは、例えば建機においては、図2に示すLCC構成の中の保守費の一部である修理費である。図5ではこれらのコストも各国の使い方に応じた平均値で見積もっているが、不確実性が多いため個別の機械によってばらつきが大きく、顧客が自らの所有する機械の将来予測として用いるには精度が低く参考にしづらい。燃料費や人件費のように比較的単純に積みあがっていくコストとは異なる点である。方策②は、まず方策①と同様の見える化を行いつつ、それを利用して将来のばらつき低減のための保全対策を講じるという二つのステップで実施する。偶発的な要素が多く、見える化のみから将来の傾向を導くことができないためである。

例えば、保守費に関しては状態を監視することで点検・調整を効果的に行ってその発生を最小限に抑えることができる。保守費は点検・調整費と修理費に分けられるが、点検・調整費は予定内の費用、修理費は予定外の費用といえる。点検や定期部品交換等の予定内の点検・調整をテレマティクスサービスで機

械の状態を監視しつつ計画的に合理的な範囲で実施することで、予定外の故障による修理を最低限に抑え保守費を顧客が許容できるばらつきの範囲に置くことができるようになる。テレマティクスサービスを用いることで、適切な点検・調整時期を通知するサービスはもちろん、機械の異常を深刻な状態になる前に感知して負担の少ない段階で対策することもできる。また、保守サービス契約を結ぶことで、保守費を計画的かつ合理的に一定額に抑えることもできるようになっている。さらに、保守サービス契約によって管理された機械であれば、先に述べた下取り価についてもメーカーが保証をするサービスに発展させられる可能性もある。

このように、従来は顧客にとって不明瞭で見通しが立ちにくかった LCC 中の不確実要素に関しても、状態を監視保全してばらつきを抑えることによって顧客にとって有用なレベルの予測が可能になる。次の 3.3 では、3.1 および 2 で説明したテレマティクスサービスを用いた方策①②による LCC 低減について具体的な事例を説明する。

3.3 計測による見える化およびばらつき低減による LCC 改善事例

以上に述べた二つの解決策、すなわち建機のテレマティクスサービスを用いた稼働データ計測による使われ方の見える化(方策①)と状態を監視保全する対策(方策②)により、LCC に含まれる不確実要素を減らしてその見積の精度を上げることができる。これによって、LCC を低減し顧客価値を生み出すための適切な対策を講ずることが可能となる。ここでは見える化したデータを基に運用コストを予測して LCC を低減しようとする取り組みの事例を述べる。以下はいずれも先進国 A における事例である。

3.3.1 省エネ運転支援による燃料費低減

一つめの事例は運転方法の支援による省エネ運転の実現である。これは方策①で見える化した要素に対する LCC 低減対策である。稼働データ計測によって個々の機械における使われ方が明らかになるので、その機械に最も適した燃費低減対策が立てられる。ここで実施する対策は方策②の状態監視保全による不確実要素の低減とは意味合いが異なる。方策②では見える化しただけでは傾向が把握できず将来予測が立てられないものについて状態監視保全を行うことで許容範囲内のばらつきに抑えている。一方の方策①は見える化した段階で将来予測は可能である。それに加えてコストを低減するための取り組みをすることでどの程度効果が見込めるかも予測できる。そのメリットも見える化することで顧客に動機付けを行って LCC 低減効果を高めているのがここで取り上げる省エネ運転支援による燃料費低減である。

具体的には、テレマティクスサービスから取得した実際のデータに基づいて、顧客の機械のある期間の運転内容を解析し、運転内容についての問題点の指摘と改善点の提案を行う。代表的な改善提案ポイントとしては、不必要なエンジンのアイドリング(仕事をしていない)時間の低減や、作業内容に応じた運転モードの選定(たとえば負荷の低めな作業では燃料消費量を抑えるモードの設定をする)等である。

図 6 に運転内容の改善前と改善後とで、時間あたりの平均燃料消費量と実働比率を比較した例を示す。数値は改善前の値を 100 として規格化してある。改善案に従って省エネ運転を行うことによって、燃料消費量が約 1 割減少している。実働比率とは、実働時間(レバー・ペダル操作時間)と稼働時間(エンジン ON

Fig. 6 Comparison example of fuel consumptions before and after energy-saving operation support by KOMTRAX for one month of the same equipment

Average fuel consumption: fuel consumption per unit work hour
Working ratio: lever or pedal on time / engine running time

時間)の比であり、大きいほど無駄なアイドリング時間が減っていることを意味する。時間当たりの燃料消費量は無駄なアイドリング時間が増えても減少するが、図 6 では同時に実働比率が上がっているの、真の省エネ運転に改善されていることがわかる。このように、機械の稼働データを計測して使われ方を見える化することにより、適切な省エネ運転対策を顧客に提案できる。テレマティクスサービスで対策前後のデータを示し具体的な効果を見える化することがインセンティブとなり、燃費低減効果が高まる。LCC を構成する要素の一つである燃料費を下げることで、顧客価値に結びつけることが可能となる。

3.3.2 履歴情報提供による下取り価評価の透明性向上

二つめの事例は中古車の下取り価をアップする取組みである。この事例も方策①で見える化した要素に対する LCC 低減対策である。

一般の工事現場等で用いられる建機は汎用性の高い機械であるため、中古車市場が発達しており、LCC の中で下取り価も重要である。中古車は一般に現物の査定を基に下取り価が決定される。稼働状態がわからないと、買い手がリスクを避けるために真の価値よりも低く評価される可能性がある。下取り価を向上させるには、機械の残存価値を客観的に見える形で示すことが必要である。テレマティクスサービスを用いて見える化を行い正確な稼働履歴を開示すると、その機械の履歴が全てわかるため、買い手にとってのリスクが少なくなり、正当な価格で評価され、評価のばらつきによる不確実性も小さくなる。なお、下取り価は中古車市場の市況によっても左右されるため、完全にばらつきを抑えることはできない。しかし、機械自体の残存価値に関する限りは下取り価のばらつきを最小にすることができる。顧客はどの時点で下取りに出せばどの程度の評価額になるか最小のばらつきの範囲で把握して、計画的に機械の購入・運用・売却を行えるようになる。

図 7 はあるオークションにおいて下取りに出された 20 トンクラスの油圧ショベルの平均下取り価を、KOMTRAX で収集した稼働履歴つきと履歴なしで比較した例である。いずれも 1 年間に取引された価格の平均値である。履歴つきと履歴なしとは平均稼働時間が異なっているので、データを補正して同一稼働時間で比較している。稼働履歴を提供することにより、この事例では平均下取り価が約 7% 向上している。これまで稼働状態が買い手にわからず低めに評価される傾向があったが、稼働情報提供により買い手の合理的判断がなされるようになったため、下取り価が正当に評価されるようになった結果である。

Fig. 7 Comparison example of trade-in prices at average work time with and without operating information from KOMTRAX. Average trade-in prices were corrected per average work time. All data were obtained from the same type of equipment which was sold at a certain auction site for one year (40 units with and 25 units without KOMTRAX information)

Fig. 8 Residual value increase by combination of hard and soft value

Fig. 9 Comparison example of repair and maintenance costs resulting from appropriate and inappropriate maintenance excluding repair and maintenance by customers

市場において評価される商品(ハード)の残存価値(=下取り価)は図8に示すように時間の経過によって下がっていくが、ソフトによるサービスを組み合わせることで、その下げ幅を抑えることができる。建機(ハード)とテレマティクス(ソフト)に関する例では、稼働履歴情報提供というサービスを組み合わせることによって残存価値が高められている。さらに、それまでの稼働状態が全て判明しているものとしていないものでは、その後の点検・調整の計画にも大きな違いが出てくるため、この点もソフト的な価値として付加される。

自動車においても、その履歴情報を活用したサービスが欧米を中心に行われている^{11) 12)}。テレマティクスサービスを利用したものではないが、中古車の購入者に対して車両登録情報を基に車両のオーナー数、事故・整備履歴、走行距離等の履歴情報を有料で提供するサービスが米国で実施されている。中古車の買い手は安心して車を購入でき、また売り手にとっても売却価格が適正に高く設定できる等双方にメリットがあり、中古車流通市場の活性化にも寄与している。ここで示した建機の例のよ

Fig. 10 Breakdown and time record examples of repair and maintenance cost (Average maintenance cost in appropriate case as 100)

うにテレマティクスサービスによる稼働情報を利用すれば、さらに正確かつ合理的に中古車価格を設定できるようになると考えられる。

3.3.3 適切な点検・調整による保守費低減

三つめの事例は、稼働データに基づいて適切な点検・調整を行うことによる保守費低減の取り組みである。この事例は方策②によって状態監視保全でばらつきとともにLCC自体も低減する対策である。テレマティクスサービスで機械の状態を監視し、適時に適切な点検・調整を計画的に行うことで、故障の発生を減らし修理費を抑えることができる。保守費は点検・調整費と修理費に分けられるが、点検・調整費用が増えても、修理費と合わせた保守費全体では減らすことができる。

図9は点検・調整の状態が「適切」「不適切」と判断される2台のケースについて、時間あたりの保守費を比較したグラフである。グラフでは「適切」ケースの値を100として規格化して比較している。

「適切」はKOMTRAXによって得られた稼働データから推奨される適切な点検・調整を実施したケースである。一方、「不適切」はそのような適切な点検・調整を怠ったケースである。

「適切」ケースは「不適切」ケースに比べて点検・調整費が多めにかけている代わりに、修理費が大幅に減っている。その結果、保守費合計では「不適切」ケースに比べて約6割低減できている。

この保守費の発生状況について詳細を見るために、図10に1000時間ごとの保守費発生状況を示した。「不適切」ケースでは多額の修理費が突発的に発生している。これは顧客にとっては非常に不確実な要素であり、顧客がLCCを把握しようとする際に大きな障害となる。これに対し「適切」ケースでは修理費の発生が少なく、保守費全体でも「不適切」ケースに比べると安定的に発生している。顧客が計画的に実施できる点検・調整

Fig. 11 Time changes of each cost of life cycle cost by simulation

Fig. 12 Density distribution probability of the failure interval used in the simulation with Weibull parameter as 2

費が大部分を占めているため、保守費の把握や管理が容易となる。

このように、テレマティクスサービスを活用した稼働データ計測に基づき適時に適切な点検・調整を実施して予定外の費用を発生させないようにすることで、それまで不確実要素であった保守費を許容できるばらつきの範囲内に置くことができるようになる。テレマティクスサービスを用いることで、容易に点検・調整履歴および計画が把握できる他に、万が一の異常発生時に軽微な段階で感知・対応できるため効果が高い。

3.4 LCC シミュレーションによる低減効果の評価

これまでに示した事例を基に、テレマティクスサービス活用による LCC 低減効果のシミュレーションを行ってみた。ここで説明する事例はいずれも、図 3 における不確実要素 C および D についてシミュレーションしたものである。テレマティクスサービスによって基となるデータの正確性やリアルタイム性が向上したため、これまでよりも予測精度を高めることが可能になった。

LCC は、図 2 等で述べてきたように式(1)の形で記述することができる。

$$LCC = NP + MC + RC + FC + OC + OTC - TP \quad (1)$$

ここで、LCC: ライフサイクルコスト, NP: 本体価, MC: 点検・調整費, RC: 修理費, FC: 燃料費, OC: オペレータ人件費, OTC: その他コスト, TP: 下取り価である。保守費は MC(点検・調整費)と RC(修理費)に分けて考えた。ここではテレマティクスサービスの対象外であるその他コスト以外の予測を行う。イニシャルコストである NP(本体価)以外は時間関数と考えられる。MC(点検・調整費), FC(燃料費), OC(オペレータ人件費)は時間 t に比例して増加していくものとした。TP(下取り価)は、 $t=0$ (未使用時点) では本体価に等しいとし、式(2)の指数関数で定義した。

Fig. 13 Example of simulations of repair cost accruing process by Monte Carlo method

Fig. 14 Example of simulation regarding time changes of life cycle cost composition

$$TP = NP a^{-\frac{t}{t_0}} \quad (2)$$

ここで定数 a はある時刻 t_0 における中古車価格を TP_0 として、次のように表せる。

$$a = \frac{NP}{TP_0} \quad (3)$$

各コストの時間変化を表すと図 11 のようになる。RC(修理費)については、故障間隔がワイブル分布に従うと仮定し、モンテカルロ法で計算した。故障率は時間に比例して増加していくと仮定して、ワイブル係数は 2 とした。この場合、故障間隔は図 12 のような確率密度分布となる。

多数の車両を想定して、個々の車両について故障が発生する都度一定額の修理費を計上することとした。図 13 に、6 台の車両について修理費の発生状況を計算した一例を示している。今回のシミュレーションでは 3000 台の車両に対してこのような計算を行った後、全車両の計算結果を平均して時間と修理費 RC との関係求めた。その一例も図 11 に示してある。

ライフサイクルシミュレーションの事例として、図 5 に示す先進国 A の LCC 構成を基にして、その時間変化を計算した。結果を図 14 に示す。LCC の中の各コストについて、本体価を 100 として規格化した値を積み上げて示している。下取り価はマイナスされる値であるため、それ以外の積算値から差し引く形になる。図 5 の先進国 A の総稼働時間 7000H の LCC に相当する値を両矢印で示している。テレマティクス等を用いた稼働データ計測から求められるコストの実績値を用いてこのようなシミュレーションを行えば、将来のライフサイクル中に必要なコストの時間変化を見積もることができる。

Table 1 Precondition of life cycle cost simulation both with and without KOMTRAX

KOMTRAX effects	With	Without
Body Cost, NP	1	1
Maintenance Cost, MC	1	0.73
Fuel Cost, FC	1	1.1
Operator Labor Cost, OC	1	1
Trade-in Price, TP	1	0.9
Average Failure Interval	1	0.15

Fig. 15 Examples of simulation regarding time change comparison of life cycle cost between units with and without KOMTRAX

図 14 の基データは KOMTRAX を通じて得られたものであり、KOMTRAX 活用による LCC 低減効果が含まれているものとみなすことができる。そこで比較のために、3.3.1～3 の事例を基にこれら KOMTRAX 活用による LCC 低減がないと仮定した場合についても計算してみた。KOMTRAX 活用によるコスト低減効果がある場合(図 14 の計算条件)に対して、KOMTRAX によるコスト低減がない場合の各コストやパラメータを、表 1 に示した倍率で設定した。修理費 RC は、図 9,10 を再現するにあたって 1 回あたりの修理費を固定としたため、平均故障間隔が 0.15 倍と非常に小さくなる想定となっている。

図 15 に、KOMTRAX 活用による LCC 低減がない場合のコストと、KOMTRAX 活用効果がある場合のコスト(図 14 と同じもの)を示した。3.3.1～3 の事例の再現では、KOMTRAX を活用して保守費や燃費の低減、中古車価格の改善がなされることによって、LCC が 15%前後改善されている。ここでは例示のため一回あたりの修理費や平均故障間隔に簡略化した仮の数値を用いたが、一台一台の予測においてはテレマティクスサービスによる機種や地域等に応じたより正確な値を用いて、より精度の高いシミュレーションが可能である。

以上のように、テレマティクスサービスによる LCC 改善の効果やその時間変化について、シミュレーションでより精度を上げて定量的に評価することができるようになった。

4. 不確実要素の原因除去とそれによる LCC 低減

ここでは、これまでのような直接的にコストを扱うのとは異なる視点を取り上げる。LCC 中の不確実要素を減らすための三つめの解決策となる根本原因の除去(図 3 の方策③)である。偶発性が極めて高い不確実要素を根本から除去するという異なる観点からの対策である。そのような不確実要因としては、たとえば事故や安全にかかわるコストがあげられる。この要因は偶発性が高いためテレマティクスサービスを用いた見える化による方策①②では対処できない。これに関して普遍的な解は見出せていないが、不確実要素の根本原因除去という考え方を実践するための解の一例を紹介する。

Fig. 16 Life cycle cost composition schematics of mining dump trucks comparing both human-operated and not

Table 2 Number of accidents causing injury or death

	Mining dump truck (North America)	Passenger vehicle (Japan)
Accidents accompanied by lost worktime and worse	141 cases per year	-
Fatal accidents included in above	3 cases per year	4113 cases per year
Fatal accidents per 1000 cars	1.27 cases per year	0.05 cases per year

図 16 の左に、大規模露天掘り鉱山で用いられる超大型ダンプトラックの LCC 構成を概念的に示した。ここでは、機械本体が必要とするコスト以外に、その機械の使用に付随して発生する鉱山運営のための様々なコストについても併せて LCC として評価している。テレマティクスサービスでは検討から外していた図 2 のその他コストの一部に相当するものである。一方、鉱山機械においては機械を寿命まで使い切ることが前提であるため、下取り価は考慮に入れていない。この左の棒グラフの中で、事故補償やストライキ対策費が偶発性の高く予測困難な不確実要素に相当する。

鉱山の運営において顧客の一番大きなニーズは、安全と LCC を抑えた上での安定稼働である。安全による人命優先は顧客の企業としての社会的使命であると同時に、鉱山の安定稼働、コストにも関わる。事故やストライキは、発生頻度こそ低いものの、ひとたび発生すると多大なコストがかかる。そのため高度に管理された鉱山の運営の中でも LCC を正確に把握するのを難しくする主要な原因となり、計画的な鉱山経営を目指す上での課題となっている。特に万が一の事故が起こった際には、鉱山の稼働が長期に亘って停止することにもつながり、鉱山運営にとって大きな負担となる。

鉱山における事故の実状については、北米の鉱山に関する米国労働省鉱山安全保健管理局(MSHA)のレポート¹³⁾でその一部を知ることができる。表 2 は MSHA で報告のあるデータを基に北米の鉱山における 2008 年から 2012 年までの 5 年間のダンプトラックのオペレータに関わる休業災害以上の事故および死亡事故の件数をカウントして年平均を求めたものである。

表 2 には比較のために日本における交通死亡事故のデータ¹⁴⁾も示してある。2014 年における日本の自動車保有台数 1000 万台あたりの死亡事故件数は 0.05 件であるのに対し、鉱山用ダンプ

Fig. 17 Autonomous haulage system (Haulage by driverless trucks)

トラックでは稼働台数 1000 台あたり 1.27 件となる。鉱山用ダンプトラックは一般の自動車に比べて稼働率が高いこともあり、約 25 倍の高い頻度で死亡事故が発生している。これに伴って補償費用や鉱山稼働の停止による損失が生じている状況が推定できる。

このような予測できない負担の大きな不確実要素については、それを根本から取り除くことが最も効果的な対策となる。それによって LCC の把握や低減を行うことが可能となる。事故補償やストライキ対策費は、いずれも有人オペレーションであることに起因して生ずるコストである。したがってこれらの不確実要素を除去する最も効果的な手段は、オペレーションを無人化することである。以下では、超大型ダンプトラックの無人運行システム(図 17)を導入することにより、不確実要素を除去して LCC を低減した事例について述べる。

ここで事例として取り上げる無人運行システムは、高精度 GPS やミリ波レーダ等センサ類をダンプトラックに搭載することで、複雑な鉱山の地形の中でも表土・鉱石を積載して完全無人で搬送することを可能にしている。2005 年から一部の大規模鉱山において稼働を開始して、採掘した鉱石等の運搬に用いられている¹⁵⁾。

無人ダンプトラック運行システムの導入でダンプトラックを無人化することによって、予測できない不確実要素であるストライキ対策費や事故補償を、ダンプトラックオペレータに起因するものに関しては根本から除去することができる。これによって顧客は LCC に含まれる不確実性を減らすことができるばかりでなく、これらのコストそのものをなくすことができ LCC 低減に直結する。事故に関しては、無人化することによってオペレータが事故にあうリスクをゼロにできるばかりでなく、人為的ミスや疲労といった有人であることによって起きる様々な事故もなくなることができる。

さらには有人であることに起因する様々なダンプトラックの運用コストも同時に不要となる。図 16 の左の棒グラフの上半分に示してある、従業員の福利厚生・労務管理、雇用確保に関わる費用等である。これら鉱山を維持管理していくために必要なコストも、無人化することによりダンプトラックオペレータに関する分はなくなることができ、LCC の低減につながる。もちろん鉱山には他に有人の機械もあればシステム運用のための人員も必要であるが、鉱石等の運搬を担うダンプトラックは台数が多いため、そのオペレータに関するコストを削減できる効果は高い。

図 16 の右の棒グラフに示すように、無人運行システムという新規技術の導入によって本体価はアップし、フリート管理を行うシステムの運用費も新たに発生する。しかしその一方で、オ

ペレータ人件費は必要なくなり、コンピュータ自動制御による安定かつ適正な運行によって燃料費やタイヤ等の消耗品費を低減させることができるようになる。

以上に述べたように、顧客が予測不能な偶発性の高い不確実要素については、それを根本から除去することが最も良い対策となる。無人化によって不確実要素を根本から除去することにより、ダンプトラックに関する LCC 見積の精度が上がり、同時に大幅な LCC 低減ももたらされる。本事例では無人化という取り組みを行ったが、対策はこれに限定されるものではない。いかに予測不能な不確実要素を除去するかという視点が重要である。

5. 結 言

本論文では、建設・鉱山機械を対象として、顧客の LCC を低減して顧客価値を高める手法について論じた。建設・鉱山機械のような生産財においては、顧客が支出したコストに対してどれだけの便益を得られるかが顧客価値につながる。そのため LCC 低減が顧客価値を高める上で重要な要素となる。

LCC 低減のためには、その中身をライフサイクル全体で把握して適切な対応を取る必要があるが、建設・鉱山機械の LCC の構成要素の中には不確実要素が多く含まれており、その定量的な把握が困難である。このことが LCC を効果的に低減するための適切な対策を取る際の障害となっていた。

このような不確実要素に対する対応策として、不確実要素を

- ・データに基づいた予測が有効なもの(図 3 の C)
- ・データに基づいた予測が困難なもの(図 3 の D)

の 2 種類に分類し、それぞれの要素に対し、

- ・稼働データの定量的計測による使われ方の見える化(図 3 の方策①)
- ・状態監視保全する対策(図 3 の方策②)
- ・根本原因の除去(図 3 の方策③)

という対応策を取ることが有効であることを示した。これらの対策を取ることによって、LCC に含まれる不確実要素を減らしてその見積精度を向上させることができ、適切な LCC 低減策を講ずることが可能となる。

本論文では事例として紹介するにいたらなかったが、上記三つの対応策を同時に適用することで、LCC 低減をさらに推し進めることができる。たとえば最後に紹介したダンプトラックの無人運行システムの事例では、無人化による根本原因の除去についてのみ議論した。これにテレマティクスサービスを用いた稼働データの定量的計測による使われ方の見える化や、それに基づいて不確実要素を顧客が許容できる範囲のばらつきに抑える対策を加えれば、さらなる LCC 低減につなげることができる。

本論文では建設・鉱山機械を例にとって不確実要素の低減について議論したが、この考え方はそれ以外の分野にも同様に展開できる可能性がある。顧客価値が LCC と明瞭に結びつくことが多い BtoB の分野では特に有効である。

本論文で示した LCC 中の不確実要素に対する三つの対応策を採用することにより、LCC に含まれる不確実要素を減らすことができる。それによって、顧客による LCC の見積精度向上と適切な LCC 低減策の採用を可能として、顧客価値の創造に寄与することができる。

参 考 文 献

- 1) 木村 達也：わが国の加工組立型製造業におけるスマイルカーブ化現

- 象-検証と対応, 富士通総研研究レポート, 167 (2003).
- 2) 木村 達也: わが国の加工組立型製造業におけるスマイルカーブ化の再検証, 富士通総研研究レポート, 261 (2006).
 - 3) J. Dedrick et al.: Asia's computer challenge: Threat or opportunity to the United States and the world?, Oxford University, New York, (1998).
 - 4) 梅田靖, 堤田真矢, 富山哲男, 田村徹也, 藤本淳: ライフサイクルシミュレーションを用いたサービス指向製品の実現可能性の検討, 設計工学, **36**, 12 (2001) 517.
 - 5) 梅田靖, 比地原邦彦, 大野雅史, 小川康暢, 小林英樹, 服部光郎, 増井慶次郎, 深野彰: 廃棄要因分析表を用いたライフサイクル戦略決定支援手法の提案. 精密工学会誌, **69**, 9 (2003) 1270.
 - 6) コマツ環境報告書 2015.6.25 アクセス
<http://www.komatsu.co.jp/CompanyInfo/csr/environment/2013/index.html>
 - 7) 国土交通省, 建築保全センター: 平成 17 年版 建築物のライフサイクルコスト, 経済調査会, (2005).
 - 8) N. Ahmed: A design and implementation model for life cycle cost management system, Information and Management, **28** (1995) 261.
 - 9) 中島洋行: ライフサイクル・コストの見積りと不確実性-モンテカルロ・シミュレーションの適用可能性, 経理知識 (2005).
 - 10) 土井下健治: 建設機械における ICT システムの活用-遠隔機械稼働管理システムの展開とデータ活用の推進, 建設の施工企画, **1** (2011) 22.
 - 11) 佐川 果奈英: テレマティクス自動車保険: イギリスにおける動向を中心として, 損保総研レポート, **101**, 10 (2012) 29.
 - 12) 国土交通省: 「自動車関連情報の利活用に関する将来ビジョン検討会」中間とりまとめ 2014 年 6 月
 - 13) 米国労働省鉱山安全保健管理局(MSHA): Part 50 of the U.S. Code of Federal Regulations (30 CFR Part 50) 2015.6.25 アクセス
 - 14) 警察庁による交通事故発生状況(2014 年)および自動車検査登録情報協会による全国の自動車保有台数(2014 年)より算出
<http://www.msha.gov/STATS/PART50/p50y2k/p50y2k.htm>
 - 15) 坂根正弘: ダントツ経営—コマツが目指す「日本国籍グローバル企業」, 日本経済新聞出版社, (2011).