

論 説

温度依存性を考慮した建設機械の電動化と導入戦略

福 留 未 菜*

湊 宣 明**

要 旨

本稿は、建設機械の電動化における温度依存性を考慮した評価と、その導入戦略の提案を目的としている。2050 年までのカーボンニュートラル達成に向け、CO₂ 排出削減が喫緊の課題となっており、建設機械もその対象となっている。しかし、従来のディーゼル建設機械（ディーゼル建機）に比べ、電動建設機械（電動建機）はバッテリー性能やコストの面で課題がある。特に、電動建機に搭載されるリチウムイオンバッテリー（Lithium Ion Battery, 以下 LIB）は、環境温度に依存して性能が大きく変化するため、建設機械としての実用性や経済性に大きな影響を与える。

本稿では、ディーゼル建機と電動建機の実用性および経済性を比較し、温度依存性を考慮した定量的な評価を行った。評価の結果、25℃の場合は、電動建機の稼働効率はディーゼル建機と同等であり、補助金などがあると経済的なメリットがあることが示された。しかし、0℃や45℃の場合は、稼働効率が大幅に低下し長期的な使用においてはLIBの劣化が進みやすく、実用性や経済性の両方でディーゼル建機に劣ることが明らかになった。また、負荷の高い作業では稼働時間が短縮され、コスト効率も悪化することが確認された。電動建機の普及を促進するためには、利用地域の気候の違いから生じる温度条件に応じた導入戦略が必要であり、単純な補助金政策だけでなく使用条件を考慮した普及戦略が必要であることが示唆された。

効率的に電動建機の普及を促進するためには、導入対象地域を限定し稼働状況を分析しながら政策や開発方針を決定していく必要がある。そのためには、エンドユーザーが有する稼働に関する情報を政府やメーカーと共有できる社会システムの構築が有効であると考えられる。

キーワード：電動建設機械、リチウムイオンバッテリー、温度依存性、普及戦略、社会システム構築

- I はじめに
- II 建設機械の電動化
 - 2-1. 建設機械の電動化の流れ
 - 2-2. 電動建機の実用性、経済性の評価
 - 2-3. 電動建機の温度依存性
 - 2-4. 温度依存性を考慮した実用性、経済性の評価
- III 電動建設機械普及のための社会システム構想設計の提案
 - 3-1. 電動建機の普及方針
 - 3-2. 電動建機普及のために必要な取り組み
 - 3-3. 社会システムの構築
- IV おわりに

* 立命館大学大学院テクノロジーマネジメント研究科 博士課程後期課程

** 立命館大学大学院テクノロジーマネジメント研究科 教授

I はじめに

2016年のパリ協定では2050年までのカーボンニュートラルの達成が掲げられ、二酸化炭素(Carbon Dioxide, 以下 CO₂)排出量の削減が急務となっている。特に、化石燃料を使用するエンジンは多くのCO₂を排出するため、その削減が強く求められている。これに伴い、動力のハイブリッド化や電動化、水素エンジンなど他の動力源への転換が必要とされている。この動きは、自動車だけでなく、建設機械や農業機械、船舶、飛行機などの産業機械や輸送機械にも広がり、各企業が研究開発を進めている。しかし、これらの機械は自動車よりも用途が多様で、要求される仕様も複雑である。さらに、社会インフラの一部としての役割も担っているため、実用性や経済性などの条件に応じて、適切な動力源を選び、段階的に転換を進める必要がある。

電動自動車(Battery Electric Vehicle, 以下 BEV)と比較すると、建設工事や土木工事で使用されることを想定した建設機械は、作業時間が1日の労働時間内に集中することが多い。そのため、短時間で多くの仕事量が求められ、利用エリアが限定されないため充電方法に大きな課題がある点が特徴である。また、コスト意識が高いことから、初期投資の高さも普及を阻害する要因と考えられる。

そこで本稿では、ディーゼル建機と電動建機の実用性および経済性を比較し、さらに温度依存性を考慮した定量的な評価を行った。その結果を基に電動建機の普及戦略を検討する。

II 建設機械の電動化

2-1 建設機械の電動化の流れ

(1) 建設業界の電動化動向

建設および建築業界は世界のエネルギー消費の約30%を占めており、これに伴うCO₂排出量も非常に多い。この排出量には、建材の製造から建造物の取り壊し、運用時のエネルギー消費までが含まれる。特に、建設段階で発生するCO₂排出量の削減を目指し、建設機械の電動化が求められている。

このような背景から、BEVの普及が最も進んでいるノルウェーでは、2025年までに建設現場での化石燃料使用をゼロにする方針を環境省が発表している。すでに大都市の公共工事では、電動建機の使用が条件となっている。しかし、現時点で電動建機の普及は進んでいないため、建設施工会社は既存のディーゼル建機を改造して対応している。一方で、建設機械メーカーは電動建機の開発を進めている。図1に、現在のノルウェー都市部での工事の様子を示す。既に電動建機を使用した工事は行われており、工事現場で充電できるよう運搬可能な大型充電インフラも近くに設置されている。



図1 ノルウェーにおける電動建機を使用した工事現場の様子（筆者撮影，2024年8月）

環境意識の高い欧州に続いて、北米や日本においても電動化への取り組みが進められている。特に米国カリフォルニア州では、カリフォルニア大気資源局（California Air Resources Board, 以下 CARB）が中心となり、公道を走行しない特殊な構造の作業車（以下、オフロード機械）の電動化に対する補助金制度（Clean Off-Road Equipment Voucher Incentive Project, 以下 CORE）が開始された。2024年9月時点で農業機械はトラクターが1機種、建設機械はショベルやホイールローダーなどを含めて15機種となっており、これらの申請数はフォークリフトなどの作業機と比較して車種が少なく、電動建機の商品数はまだ十分ではない（<https://californiacore.org/>）。

日本においても、国土交通省は建設現場での電動建機の普及と脱炭素の推進を目的に、「GX 建設機械の認定制度に関する規定」を策定した。この制度は、電動油圧ショベルや電動油圧ホイールローダーなどの電動建機を対象としている。申請受付は2023年10月に開始され2024年9月末時点で5社18機種が登録されている（<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001737665.pdf>）。さらに、環境省、経済産業省、国土交通省が連携し、一般社団法人日本建設機械施工協会が執行団体となって、GX 建設機械の普及促進を目的とした補助金制度が2024年5月から開始された。これは、GX 建設機械認定を受けた電動建機に対し、同等の従来建機との差額の2/3を補助するもので、予算は約2億円である。申請はすでに始まっているが、2024年9月末時点で申請件数は39件、補助金申請額は1.1億円となっている（<https://jcmanet.or.jp/hojojigyo/>）。

このように一部地域では電動建機の使用を義務付ける規制や、初期投資を抑える補助金政策によって電動建機の普及が進められているが、現時点では積極的な採用には至っていない。今

後は、従来のディーゼル建機に対する環境規制を強化し、間接的に電動化を促進する可能性もある。

(2) 商業車の電動化

BEV は、その経済性、普及促進に必要な政策、航続距離を延ばすためのシステム開発など、多岐にわたる研究が報告されている (Y. Guo et al, 2022; H. Martins et al, 2023; N. Koch et al, 2022; 川和田, 2016)。しかし、BEV の大半は個人購入によるもので、利用目的も主に個人使用である。一方、建設機械は主に商業目的で利用されることが多い。商業利用の例として、バスや商用車 (Light Commercial Vehicle, 以下 LCV) が挙げられ、これらの電動化に関する研究報告も増加している (A. Grauers et al, 2020; C. Ribeiro et al, 2024, I. Hovi et al, 2020; J. Amra et al, 2020)。

A. Grauers ほか (2020) は、スウェーデンにおいて、実際のバスの運行ルートや時刻表を用いて、電動バスの TCO の評価を行った結果、ディーゼバスに対して TCO で競争力を得るためには、ランニングコストの低さを活かすため、高頻度での運行が必要であることを示した。また、J. Amra ほか (2020) は、ドイツの実運行データを使用し、充電スケジュールまで考慮した電動バスの TCO 分析を行った結果、運行及び充電スケジュールが最適化された場合にコストメリットが得られることが示された。これらから、商業的な利用で TCO メリットを得るためには、高稼働効率の実現が重要であることが示唆されている。

I. Hovi ほか (2020) は、ノルウェーで実際に電動 LCV を導入した際のユーザーの現状をインタビューによる定性的な調査を行ったところ、電動 LCV では航続距離への不安から多数の充電設備を運行ルート内に含むことや LIB 重量が大きいことで貨物積載量が少ないことなどの制約から、従来の LCV の代替と同様の扱い方はできていないことがわかった。さらに、電動 LCV の TCO は、現在の初期市場段階においては、少量生産による高コストから補助金及び長距離利用を前提としなければコストメリットが得られないこともわかった。C. Ribeiro ほか (2024) は、電動 LCV に対し、EU 圏の各国で実施されている購入時の補助金をはじめ、使用時の減税や免税など電動 LCV に対する様々な経済的支援を含めた TCO 分析を行い、ディーゼル LCV に対してコスト競争力を得るために政府による経済的な支援が重要であることを示した。一方で、TCO に占めるインセンティブの割合と電動 LCV の普及率は直接的な相関関係にないことも明らかになった。この結果から、電動 LCV の普及には経済的な支援だけでなく、性能などの要素の影響が大きいことを示唆している。

バスや LCV において TCO でメリットを得るためには、高額な初期投資を支援する経済政策に加え、長時間の稼働や徹底した運行管理など、ランニングコストの低さを活かした効率的な導入戦略が必要であることが示唆されている。電動建機に対しても同様の傾向が見られるため、ディーゼル建機と電動建機を比較評価し、実用性や経済性を考慮した導入計画を立てるための評価手法が求められる。

2-2 電動建機の実用性、経済性の評価

(1) 実用性の評価

まずは、ディーゼル建機と電動建機の性能を定量的に比較する。一般的に、ディーゼル建機は一度の燃料補給で稼働時間できる時間でその性能を評価する。この考え方に基づき、一度のエネルギー補給にかかる時間を T_c [h]、そのエネルギーを基に稼働できる時間を T_o [h] とし、この1サイクルの間に建機が稼働している時間の割合を稼働率 E_{Spec} [%] と定義し、以下の式で算出する。

$$E_{Spec} = \frac{T_o}{T_o + T_c} \quad (1)$$

ディーゼル建機の T_c^{Diesel} [h] は、補給用燃料がすぐに入手可能であることを前提として、燃料タンク容量 V [L] と燃料供給速度 s [L/min] を用いて、以下の式で算出する。

$$T_c^{Diesel} = \frac{V}{s} \quad (2)$$

電動建機の $T_c^{Electric}$ [h] は、燃料タンクが LIB に置き換わるためその充電時間に相当し、LIB 容量 C [kWh] 及び充電時の供給電力 Q [kW] を用いて、以下の式で算出する。

$$T_c^{Electric} = \frac{C}{Q} \quad (3)$$

一方で、ディーゼル建機の T_o^{Diesel} [h] は、燃料タンク容量 V [L] と平均燃料消費量 g [L/h] を用いて以下の式で算出する。

$$T_o^{Diesel} = \frac{V}{g} \quad (4)$$

電動建機の $T_o^{Electric}$ [h] は、LIB 容量 C [kWh]、電動建機の定格出力 P [kW] 及び使用時の平均負荷率 f [%]、LIB の充放電による劣化率 α 及び充放電回数 t を用いて、以下の式で算出する。

$$T_o^{Electric} = \frac{C(1 - \alpha t)}{P \cdot f} \quad (5)$$

本研究の評価は、各社で既に商品化が進んでいる 3t クラスの建設建機を対象とし、同車格のディーゼル建機を比較対象として用いる。評価に使用したパラメータは表 1 に示す。

負荷率を 20%、40%、60% とした際の初期連続稼働率を図 2 に示す。ディーゼル建機は、一度の燃料補給で 8 時間以上稼働でき、燃料補給も時間が短いため、どの負荷率でも連続稼働率は約 100% となっている。一方、電動建機は急速充電でも約 45 分の充電時間が必要で、負荷率に応じて連続稼働時間が大きく変動するため、稼働率も使用用途によって異なる。この結果から、現在の LIB 性能では負荷率に関係なく、ディーゼル建機の約 80% の稼働率が得られ、新車の実用性に大きな差を感じることなく使用できると考えられる。

図 3 は、LIB の経時的劣化を考慮した 1 サイクルあたりの連続稼働時間の変化を示す。結果から、電動建機は負荷が高いと 1 回の充電で稼働できる時間が短くなり、さらに使用時間が長

くなるにつれて稼働時間も減少するため、長期使用を前提とした場合、ディーゼル建機の代替として使用するの難しいことが分かる。

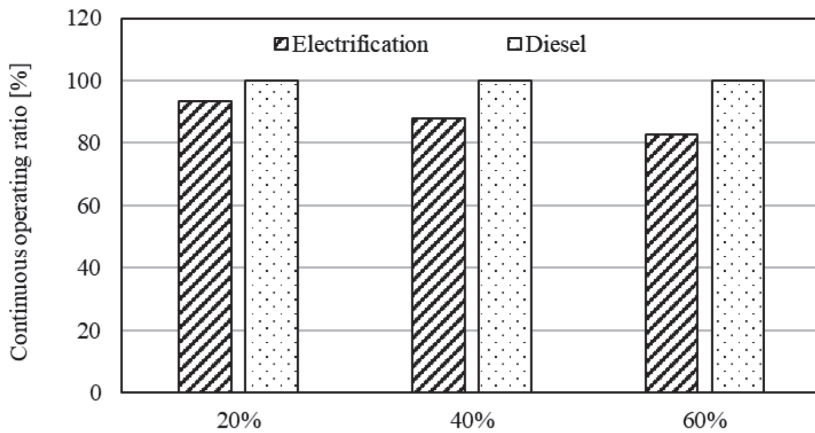


図2 ディーゼル建機及び電動建機の稼働率

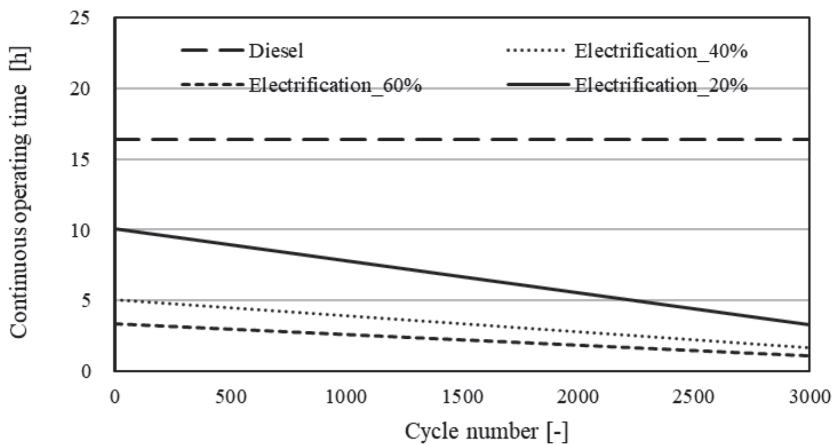


図3 経時劣化を考慮した場合の1サイクル当たりの連続稼働時間の推移

(2) 経済性の評価

次に、ディーゼル建機及び電動建機のTCOを評価する。研究においては、導入コストとして、購入に費用 VIV [JPY] と購入時の補助金 GS [JPY]、運用コストとして、燃料代や電気代などのエネルギーコスト ES [JPY]、およびメンテナンスコスト MC [JPY] を考慮し、以下の式で TCO [JPY] を定義する。

$$TCO = VIV - GS + EC + MC \quad (6)$$

評価に使用したパラメータは表1に示す。TCOの算出においては、充電および燃料補給は1日1回、1日あたりの稼働時間は最大8時間、年間稼働日数は250日と仮定した。補助金を考慮しない場合の負荷率20%、40%、60%の連続稼働率を図4に示す。

ディーゼル建機は、成熟した技術により安定して大量生産され、初期費用が低い、燃料代

やメンテナンス費用などの運用コストが高い。特に負荷率が高い場合、燃料消費量が増加し、運用コストが増える。しかし、燃料の取り扱いや運搬が容易で、長年の技術や経験に基づくトラブル対応が可能なため、広く使用されている。

電動建機は市場導入の初期段階であるため、現在の初期費用は非常に高い。しかし、今回の算出では、BEVで利用されている電気代の定額サービスを前提としており、エネルギーコストはディーゼル建機に比べて低くなる。また、部品点数が大幅に少ないため、メンテナンスコストも大幅に削減できるのが大きな利点である。しかし、日本における建設機械の減価償却期間は8年であり、その期間内に両者のTCO差が埋まることはないとわかった。

このような初期コストの高さは、BEVやLCVでも同様であり、補助金政策が普及に一定の効果を示している。そのため、電動建機に対しても同様に初期コストを支援する補助政策を導入し、コスト競争力を高めることが、建設機械の電動化普及を進める上で重要である。

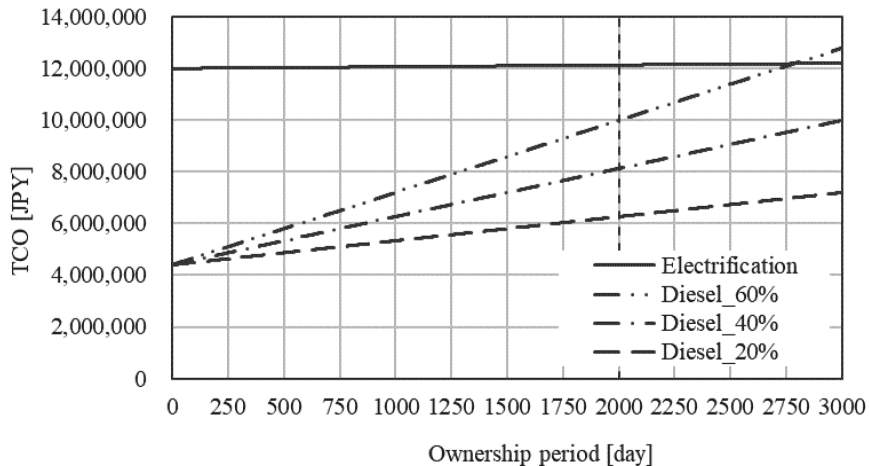


図4 ディーゼル建機及び電動建機のTCO比較

図2に示すように、ディーゼル建機と電動建機では稼働率に差がある。さらに、図3に示した通り、LIBは充放電を繰り返すことで徐々に最大容量が低下し、使用期間が長くなるほど1回の充電で稼働できる時間が短くなる。これらを考慮したTCO分析を行うため、合計稼働時間に対する効率を E_{TCO} [JPY/h]と定義し、以下の式で評価する。

$$E_{TCO} = \frac{TCO}{\int_0^t T_o} \quad (7)$$

ディーゼル建機と電動建機の負荷率を20%、40%、60%で使用した場合のコスト効率の評価結果を図5に示す。電動建機はSOHが50%に到達するまでのコストを算出した。ディーゼル建機は、一度の給油で8時間以上稼働でき、使用による劣化もわずかであるため、どの負荷率で使用した場合においてもコスト効率は低く抑えられることがわかった。一方、電動建機は負荷率によってコスト効率が大きく変動し、特に高負荷作業では連続稼働時間が短くなり、コスト効率が高くなる傾向が見られた。この結果から、電動建機は低負荷の軽作業での導入が、実

用性および経済性の観点から望ましいことがわかった。

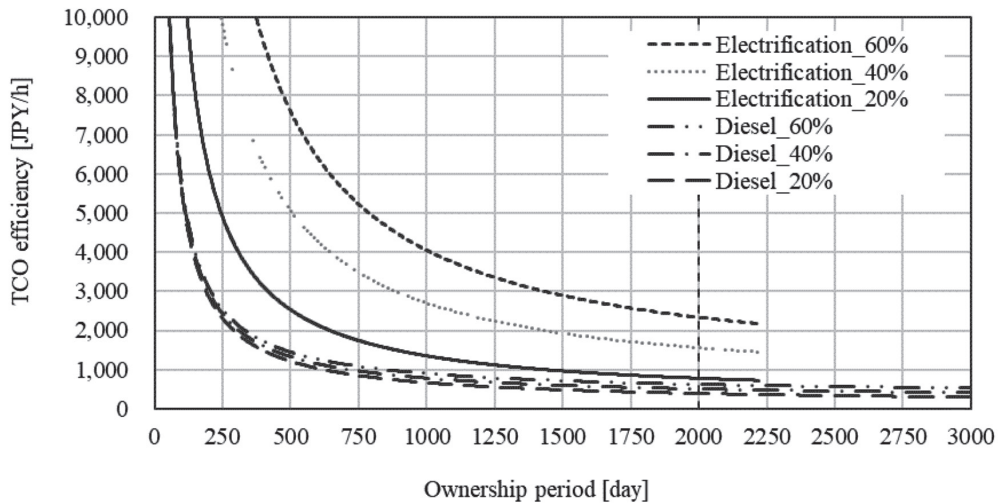


図5 ディーゼル建機及び電動建機のTCO効率比較

2-3 電動建機の温度依存性

(1) リチウムイオンバッテリーの特徴と現状

電動建機の実用性は、その動力源となる LIB の性能によって依存しており、LIB は、使用環境温度によって性能が大きく変動することがわかっている。図6に示す通り、LIB を最適温度帯は 15 ～ 35℃ とされ、常にこの範囲で使用できるように制御することが重要である。温度が低下すると、LIB 内部の化学反応速度が遅くなり、出力が低下する。一方、温度が 35℃ を超えると安全性の確保が難しくなり、最悪の場合は発火のリスクがあるため出力を制限する制御が行われる。どちらのケースでも、LIB を最適な温度帯に保つために温度制御を行い、その際には LIB のエネルギーが消費される。Deyang Huang ほか (2022) は、氷点下での LIB の性能低下が寒冷地での電池システム普及の大きな障害となっていることを指摘している。

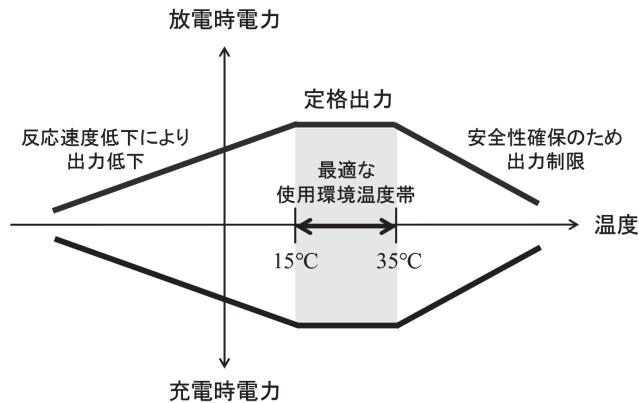


図6 LIB の特性 (A. Pesaran, 2013 に基づき筆者作成)

このような LIB の特性があるにもかかわらず、エンジンから電動化するには、航続距離や連続稼働時間の長さといった実用性の高さを訴求する必要がある。そのため、電動化の初期段階では、LIB を可能な限り多く搭載することで対応することが一般的であり、搭載性を向上させる開発が進められている。しかし、LIB は高コストで重量も大きく、車体重量の増加や搭載スペースの限界といったデメリットが生じる。今後、さらなる実用性向上のためには、LIB のエネルギー密度の向上や、LIB 専用の冷却・加温が可能な温度制御システムの開発が求められる。これらの技術は、使用目的や制約条件、車体ごとの最適な開発戦略に基づいて進める必要がある。

(2) BEV の温度影響に関する先行研究

LIB の温度依存性の特性の影響は、既に BEV では多数報告されている（J. Ishida et al, 2015; T. Yuksel and J.J. Michalek, 2015; Xu Hao et al, 2020; Yazan Al-Wreikat, 2022; Y. Yu et al, 2022）。Xu Hao ほか（2020）は、北京において BEV の実走行データを分析し、季節がエネルギー消費量と走行距離に影響を与えていることを明らかにした。特に、冬季の走行距離は暖房等の使用によって、新欧州ドライビングサイクル（NEDC）で推定される総走行距離で、64% まで低下することが確認された。Yazan Al-Wreikat ほか（2022）は、英国の大都市圏の BEV の実走行データの解析を行い、特に低温時にはエネルギーの消費量が増え、走行距離が 28% 低下していることを確認した。T. Yuksel and J.J. Michalek（2015）は、米国における BEV の実運転データから、1 日あたりの走行可能距離や単位距離あたりのエネルギー消費量が寒冷地や高温地で悪化する傾向を確認した。この傾向から、地域の気温差が BEV の採用パターンやエネルギー消費、環境への影響を与え、エネルギー消費量の増加が充電量に影響し、その結果 GHG 排出量の増加が懸念されることを示唆している。J. Ishida ほか（2015）は、日本全国の市区町村における BEV 普及の分析結果から、特に山岳地域や寒冷地域で走行距離が短くなり、充電に伴う電力消費量が増加する傾向があることを明らかにした。この結果から、環境温度の影響により、これらの地域では BEV の普及が阻害される可能性があり、全国一律での BEV 普及が必ずしも望ましいわけではないことを示唆している。Y. Yu ほか（2022）は、欧州地域における配電システムおよび充電データの解析結果から、季節によって電力消費量が異なり、特に冬季には消費量が増加することを示し、使用環境温度が性能に影響を与えることを明らかにした。

このように、BEV ではすでに LIB の使用環境温度によって走行距離が低下し、冬季には電力消費量が増加することが報告されている。建設工事や土木工事では、計画や工期を厳守する必要があるため、建設機械はできるだけ長時間連続で稼働できることが、電動建機の採用基準となる。自動車以上に長い稼働時間が求められることから、温度の影響を考慮した導入計画と、その定量的な評価が必要である。

2-4 温度依存性を考慮した実用性、経済性の評価

(1) 温度依存性を考慮した場合の実用性

LIB は温度依存性が高く、使用される環境温度によってその LIB の健康状態 (State Of Health, 以下 SOH) は変化するため、これを考慮した評価が必要である。この影響は、LIB の充放電による劣化率 α が使用温度ごとに異なる点と、冷暖房を使用することによる温度依存容量低下率 β で表現されるため、式 (5) にこれらを加えて以下で算出できる。

$$T_o^{Electric} = \frac{C (1-\alpha t) (1-\beta)}{P \cdot f} \quad (8)$$

電動建機の初期稼働率 E [%] を、25℃に加えて 0℃と 45℃の場合で算出した結果を図 7 に示す。計算に使用したパラメータは表 1 に示す。ディーゼル建機は温度に関係なく稼働率が 100% であるのに対し、電動建機は温度によって稼働効率が大きく変化する。実際の工事現場を想定すると、午前中に 4 時間作業を行い、昼休憩 1 時間で充電を完了させるために稼働効率 80% が求められる。25℃では、どの負荷率でもこの条件を満たしているが、0℃では低負荷作業の場合にのみ条件を満たし、高負荷作業では作業が停滞する可能性がある。さらに、45℃では急速充電が使用できず、通常の充電で約 8 時間を要するため、どの負荷率でも稼働効率の要求レベルに達しないことが明らかになった。

図 8 には、平均負荷率 20% で使用した場合の 1 サイクルあたりの連続稼働時間の変化を示している。電動建機の各温度での評価結果として、連続稼働時間が初期の 50% に達するまでを算出し、連続稼働時間が初期の 70% に到達するタイミングを (□) で示した。この結果から、25℃での使用でも長期的に見るとディーゼル建機の代替品としては不十分であることが示された。さらに、0℃や 45℃では、冷暖房など仕事以外に使用されるエネルギーが増加し、加えてその温度帯での充放電の繰り返しにより劣化が 25℃以上に進行するため、実用性はさらに低くなることがわかった。BEV では、LIB の SOH が 70% 程度になると廃棄対象となるた

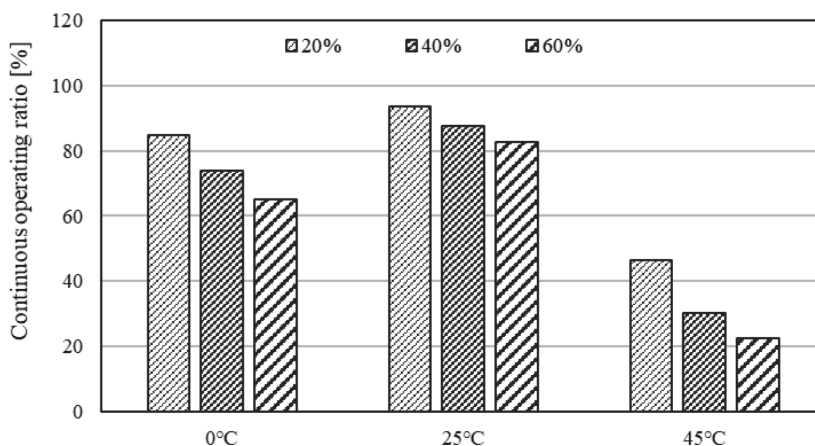


図 7 電動建機の温度依存性を考慮した稼働率の評価結果

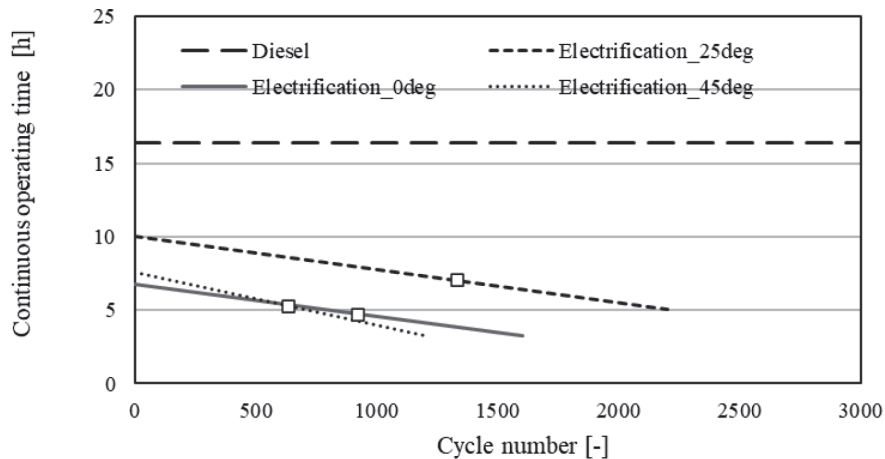


図8 温度依存性を考慮した稼働時間の時系列変化

め、最適温度帯から外れた環境での使用では、LIBの使用可能回数が大幅に減少し、稼働効率を考慮するとこうした温度帯での使用や普及は適切ではないと考えられる。

(2) 温度依存性を考慮した場合の経済性

使用環境温度の違いが実用性に大きな差を生じることがわかったため、この影響を考慮してコスト効率を算出する。式(7)を用いて、平均負荷率60%で1日1回の充電を想定した場合のTCO効率を評価した結果を図9に示す。連続稼働時間が初期の70%に達するタイミングを(□)で示し、稼働時間が初期の50%に達するタイミングまでを算出した。今回の評価では、連続稼働時間が70%に達する期間は0℃で3.7年、25℃で5.3年、45℃で2.5年と算出された。この評価では1日1回の充電を前提としているため、長くても半日の作業しかできない。(1)の結果から、1日に複数回の充電を行い長時間使用する場合、充放電による劣化がさらに進む

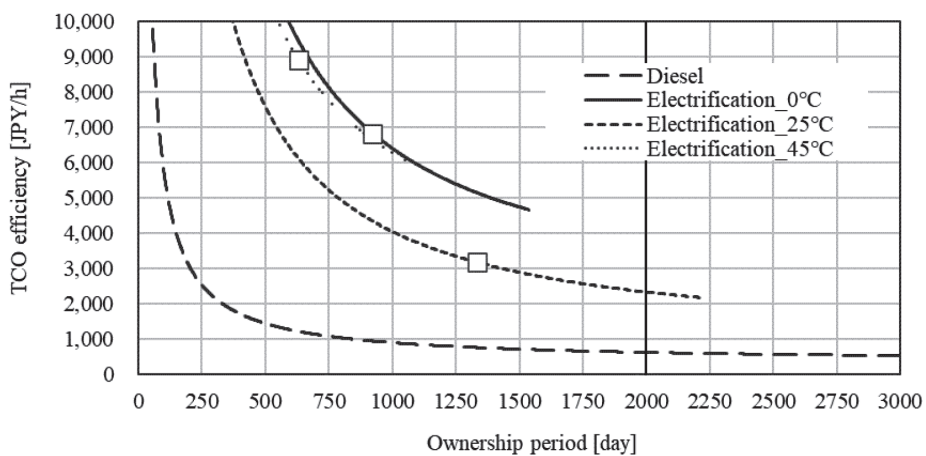


図9 温度依存性を考慮した場合のTCO効率

ため、連続稼働時間が70%に達する期間はより短くなると考えられる。

BEVでのLIBの使用状況を踏まえると、連続稼働時間が70%に達した時点でLIBの交換や電動建機自体の廃棄を検討することになる。ディーゼル建機が通常10年程度使用されることを考えると、電動建機では廃棄物の増加により環境負荷が高くなる可能性がある。また、LIBの交換には高額なコストがかかるため、TCOの増加は避けられない。経済的な観点から電動建機を効率的に導入するには、コスト効率が安定する期間まで所有することが理想であり、減価償却期間を考慮すると8年程度の使用が望ましい。しかし、0℃や45℃の環境下での使用では、この期間までの使用は難しいことが明らかになった。

Ⅲ 電動建設機械普及のための社会システム構想設計の提案

3-1 電動建機の普及方針

本研究の評価結果から、電動建機は使用環境温度が実用性や経済性に大きく影響を与えることが明らかになった。実用性を向上させるためには、1回の充電での稼働時間を延ばすためにLIBの容量増加が有効であり、LIBのエネルギー密度の改善に向けた研究開発が導入時の性能向上と懸念の解消に寄与すると考えられる。さらに、長期的に電動建機が環境負荷低減に貢献するためには、充放電による劣化を抑制し、寿命を延ばすことが必要であり、これに対する研究開発は電動建機の競争力向上に不可欠である。しかし、LIBの温度依存性が実用性や経済性に悪影響を及ぼし、普及の障害となる可能性があるため、使用環境温度を考慮し、LIBが最も効率的に動作できる地域から電動建機を展開することが適切であると考えられる。

先行研究から、補助金政策は一定の効果があるものの、電動化普及率と直接的な相関が得られていないこと、またLIBの温度依存性を考慮した普及が適切であることが示されている。これを踏まえると、コスト意識が高く作業効率が重視される建設機械に対して、一律的な補助金やエンジン規制による強制的な誘導は、作業効率の低下や経済性の悪化といった問題を引き起こす可能性がある。したがって、電動建機の導入は、その特性に応じた普及戦略が必要である。従来、ディーゼル建機は汎用性の高さから特定の作業内容に合わせた使用方法が考慮されていなかったが、電動建機を適切かつ迅速に普及させるためには、ICT技術などによるデータ活用を通じて電動建機に適した作業を抽出し、政府、作業機メーカー、建設機械ユーザーが情報を共有し連携する社会システムの構築が重要である。

3-2 電動建機普及のために必要な取り組み

電動建機の普及を効率的に進めていくためには、政府、作業機メーカー、ユーザーが取り組む課題があり、以下にその内容を示す。

まず、政府には電動建機普及のためのガイドライン策定が必要である。ガイドラインには、

気候を考慮した優先普及地域、最適な運用方法、建設現場での充電インフラ整備、リサイクル基準などを含むことが望ましい。また、バスやLCVと同様に、電動建機がディーゼル建機に対してコスト競争力を持つためには、購入時の補助金の導入が不可欠である。そのため、これに対する長期的な投資計画の策定が必要であり、業界団体と協力しつつ周知を図ることが求められる。

高稼働率が求められる建設機械にとって、LIBの極端な環境温度下での性能劣化は、電動建機普及の大きな障壁となっている。この問題を解決するために、建設機械メーカーは、LIBや周辺システムに関連する技術開発や全固体電池などの新技術導入を検討し、商品化に繋げる必要がある。さらに、ICTとの組み合わせにより、最適な充電サイクルや稼働管理の提案、最新ソフトウェアの更新を充実させ、稼働時間の短さに対するユーザーの不安を補うシステム構築も不可欠である。また、電動建機は劣化を抑えた条件で長期的に使用することで経済的な優位性が得られるため、TCOだけでなく、ディーゼル建機とのコスト効率性を評価し、導入に伴う経済的リスクを適正に評価することが重要となる。電動建機はランニングコストの低さが大きなメリットであるため、導入補助金に加えて、想定使用方法に基づくランニングコストを考慮したTCO提示が、ユーザーの導入計画に有効である。さらに、初期費用を抑えたビジネスモデルの提案も導入障壁の低減に寄与する可能性があり、技術開発だけでなく、ビジネスモデルの開発にも取り組む必要がある。

これまでディーゼル建機を使用していたユーザーにとって、電動化に関する知識が乏しいことが大きな障壁となっている可能性がある。そこで、電動建機に関する知識や技術を習得することで、導入への抵抗感を軽減できると期待される。政府、建設機械メーカー、業界団体が協力して充実した教育・トレーニングプログラムを提供することが必要であり、実際に使用するユーザーが積極的に技術習得に取り組むことが重要である。また、今後はICTの活用により実稼働データの取得が容易になるため、市場での稼働情報を有効活用し、政府やメーカーにフィードバックを行うことで、より適切な政策や支援策の検討につなげることができる。

3-3 社会システムの構築

上記の取り組みは相互に影響を与えることが想定され、適切な情報共有がなされることで、政策や支援がさらに最適化される可能性が高くなる。従来は、ユーザーが政府や建設機械メーカーから一方的に情報提供を受けることが多かったが、今後は蓄積された実稼働データなどの市場情報をメーカーや政府にフィードバックする取り組みを強化する必要がある。そのためには、図10に示すような社会システムの構築が有効であると考えられる。特に、電動建機の実使用データは技術改善や普及ガイドラインの更新に役立つため、このようなシステムが構築されることで、効率的な技術開発や有意義な投資方針の決定が可能となる。このフィードバックシステムの構築は、技術革新と普及促進の両面で貢献し、長期的な成功の鍵となる。

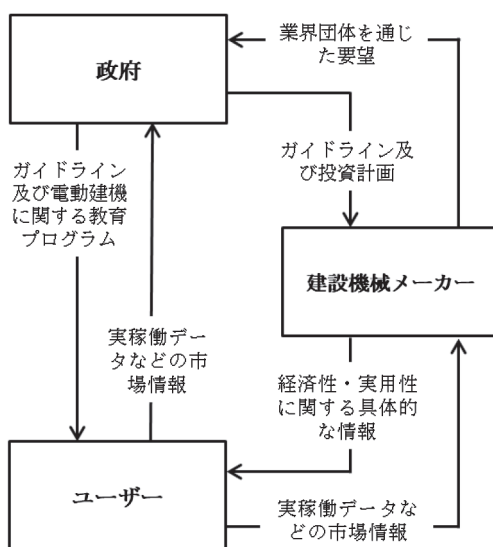


図 10 フィードバックができる社会システム

IV おわりに

本稿では、電動建機とディーゼル建機の実用性および経済性に対し、使用環境温度を考慮した評価モデルを構築し、3tクラスの建設機械を対象に比較評価を行った。その結果、25℃の環境では、電動建機の稼働効率が80%以上を維持できるため、ディーゼル建機の代替として導入できる可能性が示された。しかし、長期的にはLIBの充放電回数の増加により劣化が進み、特に高負荷作業では実用性の低下が顕著となり、TCO効率も低下することが明らかになった。さらに、0℃や45℃の環境下では、25℃に比べて実用性およびTCO効率が大幅に低下することがわかったため、電動建機の導入は使用環境温度や条件を慎重に考慮する必要がある。

さらに、政府の経済的補助政策の効果を最大化し、建設機械メーカーが効率的に商品開発を行うためには、ICT技術を活用し、作業機の実稼働データなどの情報を共有できる社会システムの構築が有効であると考えられる。

これまで、実用性および経済性の評価を行ってきたが、電動建機の推進目的はCO₂排出量削減への貢献である。今後は、ディーゼル建機と電動建機の製造から使用までのCO₂排出量を比較評価するモデルを構築し、電動建機導入による環境改善効果を定量的に評価する。そして、実用性、経済性、環境性のバランスを考慮した電動建機の普及戦略に関する研究を進める。

表1 算出に使用したパラメーター一覧

区分	パラメータ	単位	値	出典
電動建機	LIB 容量	kWh	35	Komatsu HP
	定格出力	kW	17.4	Komatsu HP
	温度依存劣化率	—	0℃ : 0.33 25℃ : 0 45℃ : 0.25	E Samadani, 2015; S. Wu, 2020; 白方, 2018
	経時劣化率	—	0℃ : 0.0325 25℃ : 0.0225 45℃ : 0.0475	松田, 2015
	充電電力_急速	kW	50	常盤, 2012
	充電電力_普通	kW	4	常盤, 2012
	販売価格	JPY	12,000,000	Komatsu HP
	充電価格	JPY/Month	1400	eMOBILITY POWER HP
ディーゼル建機	出力	kW	17.4	Komatsu HP
	燃料タンク容量	L	41	Komatsu HP
	燃料消費率	L/kWh	0.144	一般財団法人 日本建設機械施工協会報告書
	給油速度	L/min	30	総務省消防庁危険物保安室報告書
	販売価格	JPY	4,400,000	Komatsu HP
	燃料価格	JPY/L	155	経済産業省資源エネルギー庁 HP

【参考文献】

- Anders Grauers. (2020). Total Cost of Ownership Model and Significant Cost Parameters for the Design of Electric Bus Systems. *Energies*, 13(12), 3262. Website.
<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/12/3262>. (accessed Oct 14, 2024)
- A. Pesaran. (2013). Tools for designing thermal management of batteries in electric drive vehicles. *The Large Lithium-Ion Battery Technology & Application Symposia Advanced Automotive Battery Conference*.
- Carolina Gil Ribeiro and Semida Silveira. (2024). The impact of financial incentives on the total cost of ownership of electric light commercial vehicles in EU countries. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 179, 103936. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856423003567>. (accessed Oct 14, 2024)
- Deyang Huang. (2022). Self-powered heating strategy for lithium-ion battery pack applied in extremely cold climates. *Energy*, 239, Part B, 122095. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221023434>. (accessed Oct 14, 2024)
- E Samadani. (2015). Li-ion battery performance and degradation in electric vehicles under different usage scenarios. *International journal of energy research*, 40, 379-392.
- H. Martins. (2023). Assessing policy interventions to stimulate the transition of electric vehicle technology in the European Union. *Socio-Economic Planning Sciences*, 87, Part B, 101505. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012122003123>. (accessed Oct 14, 2024)
- Inger Beate Hovi. (2020). Experiences from Battery-Electric Truck Users in Norway. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1). Website.
<https://www.mdpi.com/2032-6653/11/1/5>. (accessed Oct 14, 2024)
- Jahic Amra. (2021). Impact of route and charging scheduling on the total cost of ownership for electric bus depots, *IEEE*. Website.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9640075>. (accessed Oct 14, 2024)
- J. Ishida. (2015). The effect of non-policy factors on the diffusion of electric vehicle with the focus on temperature and slope. 環境情報科学 学術研究論文集, 29, 135-140.

- N. Koch. (2022). When is the electric vehicle market self-sustaining? Evidence from Norway. *Energy Economics*, 110, 105991. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988322001621>. (accessed Oct 14, 2024)
- Norwegian Ministry of Climate and Environment. (2021). Norway's Climate Action Plan for 2021-2030. Website.
<https://www.regjeringen.no/contentassets/a78ecf5ad2344fa5ae4a394412ef8975/en-gb/pdfs/stm202020210013000engpdfs.pdf>. (accessed Oct 14, 2024)
- S. Wu. (2020). The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather. *Journal of Energy Storage*, 27, 101059. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19307728?via%3Dihub>. (accessed Oct 14, 2024)
- T. Yuksel and J.J. Michalek. (2015). Effects of Regional Temperature on Electric Vehicle Efficiency, Range, and Emissions in the United States. *Environmental science and technology*, 49, 3974-3980.
- Xu Hao. (2020). Seasonal effects on electric vehicle energy consumption and driving range: A case study on personal, taxi, and ridesharing vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 249(10), 119403. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619342738?via%3Dihub>. (accessed Oct 14, 2024)
- Yazan Al-Wreika. (2022). Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle. *Energy*, 238 Part C, 122028. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221022763> (accessed Oct 14, 2024)
- Yulu Guo. (2022). Variability in total cost of vehicle ownership across vehicle and user profiles. *Communications in Transportation Research*, 2, 100071. Website.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277242472200021X>. (accessed Oct 14, 2024)
- Y. Yu. (2022). Data-Driven Study of Low Voltage Distribution Grid Behaviour with Increasing Electric Vehicle Penetration. *IEEE*, 10, 6053-6070.
- 川和田達也 (2016) 「充電時の冷却による EV 用リチウムイオンバッテリーの劣化抑制」『自動車技術開
論文集』第 47 号, 133-137 頁。
- 白方雅人 (2018) 「低温環境用リチウムイオン電池の開発」『電気設備学会誌』第 38 号 717-720 頁。
- 常盤昌宏 (2012) 「充電インフラを形成する大容量急速充電機「TQVC500M3」と CHAdeMO プロトコ
ル」『NEC 技研』第 65 号 (1), 33-37 頁。
- 松田智行 (2015) 「1/3C サイクル試験におけるリチウムイオン電池の劣化機構」『JARI Research Journal
(Web)』第 2015 号, https://img.jari.or.jp/v=1641526830/files/user/pdf/JRJ20150402_q.pdf (2024 年 10 月
14 日閲覧)

The Electrification of Construction Machinery Considering Temperature Dependence and Introduction Strategies

Mina Fukudome*

Nobuaki Minato**

Abstract:

This study evaluates the temperature-dependent performance of electric construction machinery (ECM) and proposes strategies for its implementation to support carbon neutrality by 2050. While ECM offers a viable alternative to diesel-powered construction machinery (DCM), challenges remain regarding battery performance and cost. Especially, Lithium-ion batteries (LIB) exhibit significant sensitivity to environmental temperatures, which affects both operational efficiency and economic feasibility.

A quantitative comparison of ECM and DCM was conducted under varying temperature conditions. The results indicate that at 25°C, ECM achieves operational efficiency comparable to DCM, with economic advantages when subsidies are available. However, at 0°C and 45°C, ECM performance declines markedly, with accelerated LIB degradation under prolonged use, compromising both practicality and cost-effectiveness. High-load operations further reduce operational duration and exacerbate cost inefficiencies. The findings highlight the need for region-specific implementation strategies that account for temperature conditions influenced by climatic differences. While financial incentives such as subsidies can offer short-term benefits, they are insufficient to ensure long-term adoption. Comprehensive strategies must consider operational conditions to enhance ECM viability.

To efficiently promote ECM adoption, policies should prioritize targeted regional deployment and incorporate operational analysis to inform decision-making. Establishing a collaborative system that enables end-users to share operational data with governments and manufacturers is essential to optimize strategies and development efforts. This study underscores the importance of integrating technological, economic, and environmental considerations to accelerate the adoption of ECM while addressing regional and operational challenges.

Keywords:

Electric construction machinery, Lithium-ion battery, Temperature dependence, Regional implementation strategy, Social system development

* Ph.D. Student, Graduated School of Technology Management, Ritsumeikan University

** Professor, Graduated School of Technology Management, Ritsumeikan University

