

フル電動式 4 トンコンバインドローラの開発

吉 田 悠一郎

2050 年カーボンニュートラル達成という困難な課題に対し、日本では官民一体となって様々な取り組みがなされている。建設機械業界でも電動化への研究・開発が加速している。本報では、道路舗装機械の電動化モデル「フル電動式 4 トンコンバインドローラ」（以下、フル電動ローラ）について、車両構成の概要と実施工事例の紹介をおこなう。また、実施工で得られたフル電動ローラの長所、改善点を元に、今後電動建設機械が普及していくために必要な課題を解説する。

キーワード：道路舗装機械、フル電動式 4 トンコンバインドローラ、カーボンニュートラル、電動化、施工事例

1. はじめに

日本では、1997 年 COP（Conference of the Parties）3 で制定された京都議定書から 2015 年 COP21 でのパリ協定にかけて温室効果ガスの削減を宣言し、温室効果ガスの削減に向け取り組んできた。それらの効果もあり、2022 年（当時）では、2013 年比 22.9%（約 3 億 2,210 万トン）までの温室効果ガス削減を達成できている¹⁾。さらに、2020 年 10 月に 2050 年カーボンニュートラル（以下、CN）達成を宣言した。この宣言は、2050 年までに温室効果ガスの排出量を全体でゼロにするというものである。しかしながら、2050 年 CN の達成は、現状の推移から見ても困難な課題である。

この課題を達成するため、昨今では様々な業界が取り組みを見せており、例えば大手自動車メーカーが内燃機関を撤退し、電動開発に注力するといった大胆な方針転換を見せるなど、その影響は大きくなっている。

建設機械業界も同様に、2050 年 CN 達成へ向けた様々な対策を打ち出している。2020 年代より、電動建機の研究開発に取り組むメーカーが飛躍的に拡大し、ショベル、ダンプなどの一部電動建設機械では既に実用化が始まっている。また、国土交通省が制定した「GX（Green Transformation）建設機械認定制度」も 2023 年 10 月にスタートし、2024 年 9 月現在では 6 社 18 型式の電動建機が認定された²⁾。その他、環境省は GX 建機認定機械の導入を後押しするため、民間事業者や団体などが認定機械を購入する場合、標準的

な燃費水準の同型機種との差額分の内 3 分の 2 を補助金で出すなど、補助事業の展開を見せている³⁾。

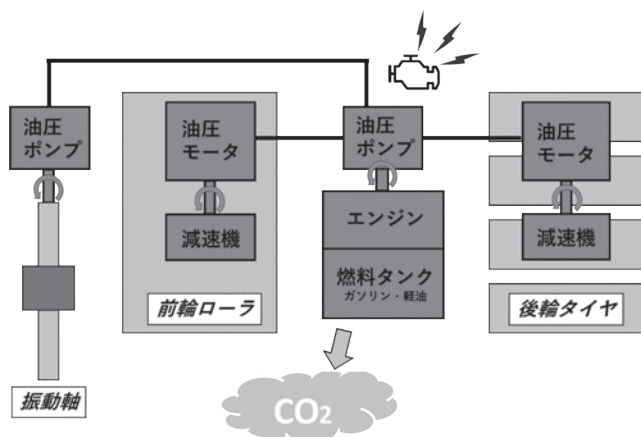
こうした流れの中、道路舗装機械についても CN に向けた研究・開発の流れが加速している。その流れの一つが「フル電動式 4 トンコンバインドローラ」である。本報では、フル電動ローラの機器構成概要や、実際にフル電動ローラを用いて実施した施工活動例を紹介し、電動化のメリット・デメリットや今後電動建機が普及するために必要なことについて解説する。なお、本報にて紹介するフル電動ローラは基礎研究モデルであるため、一部公表できない数値・情報があり、報告内容が限定的なものになってしまうことを予めご容赦願いたい。

2. 「フル電動式 4 トンコンバインドローラ」の機器構成概要

電動ローラの機器構成は大きく二つの方式に分類（電動油圧方式、フル電動方式）され、ここでは従来のエンジン方式と併せて三つの方式について説明する。

（1）エンジン方式

図一¹⁴⁾にエンジン方式の機器構成概略図を示す。従来機のエンジン方式は、軽油、ガソリン等の燃料を動力源とし、エンジンを駆動させ、エンジンが発生したトルクにより油圧ポンプを回転し、油圧機構を制御することで車両を駆動させている。



図ー1 エンジン方式 機器構成概略図

(2) 電動油圧方式

図ー2⁴⁾に電動油圧方式の機器構成概略図を示す。エンジン方式と比較して、動力源が軽油、ガソリン等の燃料からバッテリー(蓄電池)へ置き換わる。また、駆動源もエンジンから電気モータへと置き換わる。バッテリーを動力源として電気モータを駆動させ、発生したトルクによって油圧ポンプを回転させることで油圧機器を制御し、車両を駆動させる方式である。電動油圧方式のメリット・デメリットは以下が挙げられる。

(a) 電動油圧方式のメリット

ユーザーにとってのメリットは、①使用感がエンジン機と同じ、②静音性が高いという二点が挙げられる。

電動油圧方式では、従来の油圧機構をそのまま流用できるため、車両制御が変わらない。よって、車両を使用するユーザーにとっても従来(エンジン機)と変わらない操作感で運転することができる。また、静音性が高い点もメリットとして挙げられる。エンジン騒音がないため、住宅街や、夜間での施工に対し非常にも有効である。

開発メーカーにとってのメリットは、①短期間での

開発が可能、②耐久面での懸念事項が少ないという二点が挙げられる。

開発メーカーにとって、エンジン方式からの変更点が動力源と駆動源のみであるため、車両開発にかかる期間を短縮させることができる。また、エンジン方式で使用している油圧機構と車両の各制御方式をそのまま利用することができるため、操作フィーリングなどの車両制御内容やマシンインターフェイスの変更、並びにそれらに伴う専用調整が不要であるため、総じて開発期間の短縮が可能となる。

(b) 電動油圧方式のデメリット

ユーザーにとってのデメリットは、稼働時間が短いことが挙げられる。従来の軽油、ガソリンといった燃料に対してバッテリーのエネルギー密度は約1/7である。そのため、エンジン機の燃料タンクと同体積のバッテリーを搭載した場合、稼働時間は従来の1/7しかなく、結果車両の駆動時間が短い問題がある。

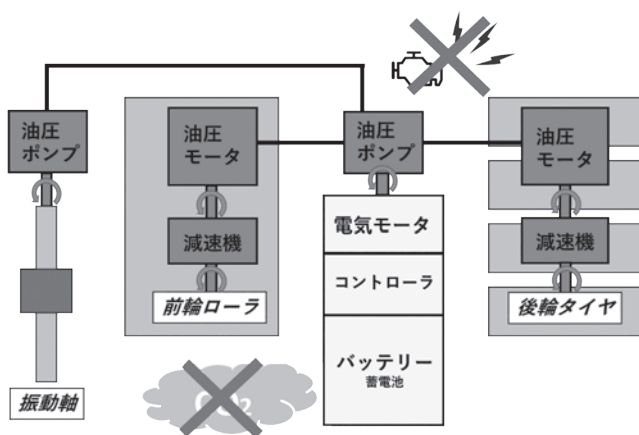
開発メーカーにとってのデメリットは、動力源(バッテリー)の搭載スペース不足が挙げられる。電動油圧方式化のために取り外す部品(エンジン関連)と追加する部品(電装関連)の搭載体積比がほぼ変わらないため、バッテリー搭載スペースの確保が困難となる。

(3) フル電動方式

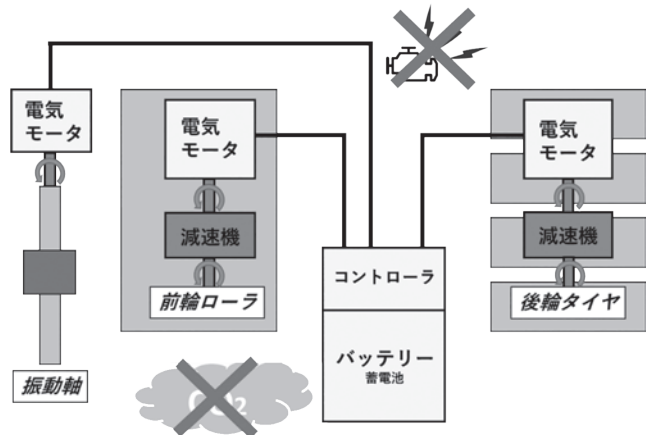
図ー3⁴⁾にフル電動方式の機器構成概略図を示す。動力源をバッテリーとする点は前項の電動油圧方式と同様であるが、車両の駆動を電気モータで直接おこなう点が大きく異なっている。フル電動方式のメリット・デメリットは以下が挙げられる。

(a) フル電動方式のメリット

ユーザーにとってのメリットは、①メンテナンス性の向上、②稼働時間の延長、③追加機能の豊富さなどが挙げられる。



図ー2 電動油圧方式 機器構成概略図



図ー3 フル電動方式 機器構成概略図

フル電動方式では電気モータで直接車両を駆動するため油圧システムが必要ない。したがって、搭載する部品点数が少なくなりメンテナンス性が向上する。例えば、作動油の交換やエレメントの交換といった従来発生していたメンテナンス作業がなくなるため車両のランニングコストを下げるができる。

また、前項の電動油圧方式では、バッテリーの搭載スペースに余裕がなかった。しかし、フル電動方式では従来の油圧機器が不要であるため、バッテリーの搭載体積比が増え、フル電動方式よりも多くの稼働時間を確保することができる。

さらに、フル電動モデルでは、車両の完全な電気制御により、自動ブレーキや自動運転といった機能と相性が良い。そのため、ユーザーにとってより扱いやすく、かつ安全性の高い機能を持った車両を提供することができる。

開発メーカーにとってのメリットは、①バッテリー搭載スペースの増加、②追加機能の拡張性向上が挙げられる。

バッテリー搭載スペースの増加について、前述の通り、電動油圧方式よりも取り除く部品点数が多いため、バッテリーの搭載スペースに余裕ができる。

また、開発メーカーにとっての最大のメリットは追加機能の拡張性向上である。車両を電気モータで直接制御しているため、従来の油圧制御では油圧の流れでおこなっていた部分が、電気モータでは詳細な制御が可能となっている。これにより、車両の発進、停止のみならず途中の加速、減速や車両の操作に合わせた振動制御などの最適化が可能となった。したがって、従来では油圧回路の改造や、制御上難しかったフィーリングの調整も、非常に簡便かつ多岐にわたり実施できるようになる。また、車両側からフィードバックされる情報も従来の内燃機関方式と比較して多くなっている。例えば、車両の走行状況、オペレータの操作情報なども数値として可視化できるようになり、これらの情報を元にすれば、自動ブレーキや転圧状況の管理、締固め状況の監視といった機構を特別な機器や改造を追加せずとも搭載可能となる。

(b) フル電動方式のデメリット

ユーザーにとってのデメリットは、①稼働時間の短さ、②車両操作感の違和感などが挙げられる。

前述の通り、フル電動方式においてエンジン方式と同等の稼働時間を設けるには、バッテリーのエネルギー密度の観点より非常に難しい。また、電動油圧方式と比較してバッテリーの搭載スペースに余裕はあるものの、それでも足りないというのが現状だ。

また、フル電動方式は電気モータによる完全な電制車両である。そのため、エンジン機の操作感と比較して若干の違いが発生するため、施工作業に問題はなくとも車両操作に違和感が発生する場合がある。

開発メーカーにとってのデメリットは、①バッテリー増量の難しさ、②車両制御の技術的難易度が挙げられる。バッテリーの搭載スペースが足りないのはもちろんのこと、稼働時間延長のためのバッテリーの増量は、そのまま車両コストの増加に直結する。従来の油圧機器と比較して電装部品は高コストであり、特にバッテリー価格がボトルネックとなっている。そのため、安易にバッテリー容量を増やすことは車両のコストバランスの観点から難しく、施工作業に支障を出さない稼働時間を確保しつつ、ユーザーが購入可能なコストに落とし込むバランスが何より求められる。

また、先ほどフル電動方式のメリットとして拡張性の向上を挙げたが、このメリットは同時に技術的難易度の向上にもあたる。例えば、車両の操作フィーリングをエンジン方式に近付けるためには、電気モータで油圧制御を再現する必要がある。道路締固め機械であるロードローラにおいて、車両の走行フィーリングはそのまま施工品質に直結するため、確実な再現、または施工に影響が出ない電気特有の走行フィーリングが求められる。

本報にて紹介するフル電動ローラは、機器構成にフル電動方式を採用し、従来のエンジン方式車両と同様に振動、散水、液剤散布の機能を搭載した実施工可能な車両である。また、開発にあたり締固め能力を同系統のエンジン式4トンコンバインドローラ（以下、エンジンローラ）と同等に設計している。

3. 「フル電動式4トンコンバインドローラ」を使った実施工事例

実施した施工事例の一覧を表—1に示す。今回の実施工では、基本はAs施工（アスファルト施工）をおこない、一部路盤施工を実施した。表—1にある通り、全四現場にてフル電動ローラを使った施工をおこなった。今回実施した施工の目的は以下の四点である。

- ①電気部品の耐水性、耐塵性など実現場で使用しての検証
- ②フル電動ローラの締固め能力の確認
- ③エンジンローラと操作感、施工品質の比較
- ④使用した施工業者様との意見交換・情報収集

補足として、目的に確認事項を含んでいるが、事前に車両検証をおこない、締固め性能が実施工に十分耐

表—1 フル電動式4トンコンバインドローラの実施工事例

適用先	施工内容	天候	平均外気温 [°C]	施工面積 [mm ²]	累計稼働時間 [min]
私有地内道路	路盤施工（下層・上層）	晴	16	378.0	445
	As 施工（表層）	晴	15		
駐車場	路盤施工（上層）	晴	14	927.7	101
	As 施工（基層）	晴	15		
駐車場	As 施工（表層）	晴	18	392.0	158
駐車場	As 施工（基層）	雨／雪	0	946.2	77



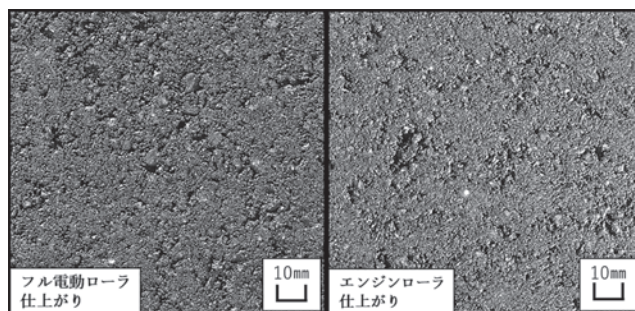
写真—1 フル電動式4トンコンバインドローラの施工状況

えうることは確認済みである。一部現場にてフル電動ローラの締固め能力評価のため、エンジンローラと同時に施工をおこなった。

総評として、施工自体は問題なく実施することができた（写真—1）。施工環境としては快晴下での舗装に加え、一部雨・雪などの悪天候下であっても問題なく舗装することができた。バッテリーの特徴として、低温下では放電能力が低下するが、今回の施工にて降雪下での低気温時においても十分な車両パフォーマンスを確認することができた。また、施工外の時間では基本的に屋外暴露状態にすることで、実際の現場での使われ方に沿って試用した。その他、ユーザー意見として、充電時間、稼働時間への指摘が多く、また電気モータで制御する車両のフィーリングに対し違和感を持っている作業者也いた。

4. 実施工事例の結果

今回の四現場にてフル電動ローラを使用した結果を、(1) 締固め能力の評価、(2) 電動化による施工現場へのメリット、(3) 電動化による施工現場へのデメリットの三つに分けて報告する。



写真—2 路面の仕上がり状況比較

(1) フル電動ローラの締固め能力評価

エンジンローラとの比較をおこなうことで、フル電動ローラの締固め能力について評価した。評価項目は、(a) 路面の仕上がり、(b) 平坦性、(c) 密度に分けて評価をおこなった。

(a) 路面の仕上がり

As 施工後の路面の比較について写真—2 に示す。写真—2 より、外観観測上においてエンジンローラとフル電動ローラの間に違いは見られなかった。

(b) 路面の平坦性

As 施工後の平坦性について、表—2 に平坦性試験結果のまとめを示す。表—2 に示す通り、フル電動式4トンロードローラにて舗装した As 路面の平坦性は標準偏差平均値 $\delta 2.24$ （合格基準値 ≤ 2.4 ）となり基準を満たしていることが分かる。また、エンジンローラの結果と比較した結果、平坦性は同等の仕上がりであることが分かった。

(c) 路面の密度

As 施工後の密度について、表—3 に現場切り取り供試体試験結果のまとめを示す。表—3 に示す通り、フル電動ローラにて舗装した As 路面の表層密度は 97.8%、エンジンローラにて舗装した As 路面の表層密度は 96.7% であった。試験結果より、締固め密度が基準を満たしていることが分かった。

以上の結果より、フル電動ローラとエンジンローラの締固め能力は同等であるといえ、フル電動ローラの締固め能力を十分評価できた。

表一 2 路面の平坦性試験結果

判定エリア	測点数 [個]	標準偏差 δ [mm]		合格判定値 [mm]	合否
		各測定エリア	平均		
フル電動ローラ転圧部 1	19	2.22	2.21	$\delta \leq 2.40$	合
フル電動ローラ転圧部 2	19	2.21			
エンジンローラ転圧部 1	19	2.09	2.08	$\delta \leq 2.40$	合
エンジンローラ転圧部 2	19	2.06			

表一 3 現場切り取り供試体試験結果

	No.	締固め度 [%]			合否
		各測点	平均	合格判定値	
フル電動ローラ	1	98.1	97.8	$96.5 \leq$	合
	2	98.0			
	3	97.7			
	4	97.9			
	5	97.5			
エンジンローラ	1	96.8	96.7	$96.5 \leq$	合
	2	96.6			
	3	97.1			
	4	96.7			
	5	96.5			

(2) 電動化による施工現場へのメリット

(a) 排気ガスを排出しない

トンネルや、立体駐車場などの閉所での施工の際に、排気ガスの滞留が発生しないため、作業員への健康被害が少なくできる点が挙げられた。また、従来であれば閉所作業の場合、排気ガスを施工現場から排出する対応が必要だが、電動ローラであればそういったコストも削減できることが挙げられた。

(b) 低振動

電動ローラはエンジン振動がないため、エンジンローラと比較して運転席周りが低振動である。車両を操作していて疲れにくく、また作業しやすいなどの利点が挙げられた。特に長時間作業をしても体への負担が少ない点が評価された。

(c) 静音性

エンジン騒音がないため、夜間工事や住宅街での工事のしやすさが挙げられた。また、車両騒音が低いいため、従来では作業車両を停止しエンジン回転数を下げなければ難しかった作業者間の意思疎通も、電動ローラであれば取りやすい点が挙げられた。

(3) 電動化による施工現場へのデメリット

(a) 充電時間・稼働時間

充電時間では、充電時間の長さ、並びに充電場所確保の難しさが指摘された。現場によっては、車両を持

ち帰らずに現場に置いて帰るケースが多いが、充電状態にしたまま帰ることは安全上の観点から難しい。また、車両を持ち帰った場合でも保管場所で常に充電できる環境があるとは限らないため、充電時間の短縮が求められた。さらに、ローラが使用される現場では電源設備の確保が難しい場合が多く、特に 200V 以上の充電環境が必要な場合、外部発電設備が必須となるなど運用コストが高くなる。

稼働時間の短さも指摘されている。現場にて最も求められた最低稼働時間は 5 ～ 6 時間であるが、同様の稼働時間を電動ローラで確保する場合、必要なバッテリー容量が車両サイズと比較して大きくなるため車両への搭載難易度が高い。さらに、バッテリーの増量は、充電時間の長時間化、車両価格の上昇につながり、結果的に現場での運用コストが高くなる。

(b) 走行フィーリングの違和感

フル電動ローラは電気モータで直接車両を制御するため、エンジンローラと比較して車両の走行フィーリング（加速・減速・停止）に違いが発生している。実施工では、エンジンローラと比較したときの走行フィーリングの違いが違和感として指摘された。

(c) 車両の静音性

施工現場へのメリットにて静音性が高いことを前述したが、現場においてはメリットばかりではなく、一部で問題視されたのが安全面である。エンジンローラであれば車両騒音により、作業者が車の接近を察知することができるが、フル電動ローラでは静音性が高いため車両の接近を直前まで気付けないケースがあり対策が必要だと感じた。

5. 施工現場へのデメリット改善の例

(1) バッテリーの充電問題・稼働時間の延長

バッテリーの充電問題・稼働時間の延長の対策では、①外部電池を搭載した蓄電車の運用、②充電ステーションの普及、③着脱式可搬バッテリーの搭載などが挙げられる。

写真一 3 に着脱式可搬バッテリーを搭載している



写真-3 着脱式可搬バッテリーを搭載した電動油圧式ローラの例

電動油圧ローラの一例を示す。その他、短期的に取り組める対策としてバッテリー搭載量の増量があるが、充電時間の延長、車両価格の上昇につながるというトレードオフの関係になる。写真-3のように着脱式可搬バッテリーにすることで充電時間と稼働時間の両立を図ることは可能だが、着脱式可搬バッテリーは、実用性を考慮すると一定の車両重量までしか使えない。抜本的な解決策としては固体電池などのエネルギー密度の高いバッテリーを搭載しなければならない。

(2) 走行フィーリングの最適化

車両の走行フィーリング（加速・減速・停止）について、電気モータの制御を最適化することで解決を図ることができる。また、走行モード、作業モードで操作フィーリングを変える、予めプリセットされた操作フィーリングからユーザーが選択できるといった運用メリットも存在する。

(3) 高い静音性と安全性の両立

基本的に静音性が高いことは大きなメリットである。しかし一部で気付けないといった危険が潜んでいる場合がある。こういった場合の安全性の確立においては、例えば自動ブレーキや警告アナウンスで知らせる、または車両の接近を振動などで作業者に伝える方法が挙げられる。特にこれらの方法はフル電動ローラの拡張性の高さと相性が良い点も挙げられる。

6. おわりに

本報では、フル電動ローラの概要説明並びに実施工活動報告をおこなった。報告内容の通り、フル電動ローラが従来のエンジンローラと同様の締固め能力を保持していることを数値として確認することができたことは非常に重要であり、実施工現場の使用事例として問題なく施工できたことは今後の電動建機開発における大きな一歩であると考えている。

反面、実施工試験を通じ明確になった課題も多くある。それらのほとんどは稼働時間や充電時間、充電環境といった、かねてより懸念されていた問題だったが、走行フィーリングの違和感や静音性による安全面への配慮など、実施工をすることで初めて浮き彫りになった問題もある。こういった問題はエンジンローラでは発生しえなかったものであり、今後の電動建機の研究・開発をさらに進めていくなかで同種の問題点が発生することは十分に考えられる。そのため、従来通りの使い方ができる点に加え、電動化によって施工現場に発生する影響を今一度見つけ直す必要性を感じた。今後も、問題点の改善に取り組むと同時に、使いやすい電動ロードローラとなるよう研究開発を進めていく。

最後に、本研究のため、フル電動ローラを現場に受け入れてくださり、実施工での使用にご協力頂けた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

J C M A

《参考文献》

- 1) 環境省 HP より 報道発表資料「2022 年度の我が国の温室効果ガス排出・吸収量について」
(https://www.env.go.jp/press/press_03046.html)
- 2) 国土交通省 HP より GX 建機認定制度 認定一覧〔令和 6 年度 9 月現在〕(<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001737665.pdf>)
- 3) 環境省 HP より 報道発表資料「『令和 6 年度予算 建設機械の電動化促進事業』の公募について」
(https://www.env.go.jp/press/press_03218.html)
- 4) 柴田大地：電動式ロードローラの研究開発，建設機械，2023.5，699，Vol.59，No.5，pp.13-18，2023 年 5 月 1 日発行

【筆者紹介】

吉田 悠一郎（よしだ ゆういちろう）
酒井重工業㈱
開発本部 新技術開発部
EV&CN グループ
技師補

