

地上の技術の宇宙への応用を目指した 建設機械軽量化技術の研究開発

岡田 康弘

油圧ショベルには様々な要望があり「軽量化」もその一つである。しかし「油圧ショベルはある程度の自重が無いと車体が浮いて掘削出来ない（掘削力低下）」と言われており、軽量化はあまり進んでいない状態である。一方、宇宙では月面拠点建設検討時において何かしらの宇宙用建設機械の稼働を想定すると考えられるが、作業性向上、輸送コスト削減より「大型軽量化」がより求められると考える。そこで、本稿では地上と宇宙の共通課題である「軽量化」に着目し、油圧ショベルの「サイズを維持したまま軽量化する技術」について紹介する。

キーワード：CFRP、建設機械、油圧ショベル、軽量化技術、宇宙探査、月探査、月面拠点建設

1. はじめに

地上用建設機械の一つである油圧ショベルはその高い作業性能、汎用性により建設現場だけでなく災害現場での復旧作業においても欠かせない物となっており、機動性向上、安全性向上、燃費向上、輸送性向上、自動施工化等多くの要望が常にある。その中の一つである「軽量化」は、機動性向上、駆動エネルギー減少、組立時の作業効率・安全性向上、燃費向上、輸送性向上等が期待されるが「油圧ショベルはある程度の自重が無いと車体が浮いて掘削出来ない（掘削力低下）」と言われており軽量化はあまり進んでいない状態である。

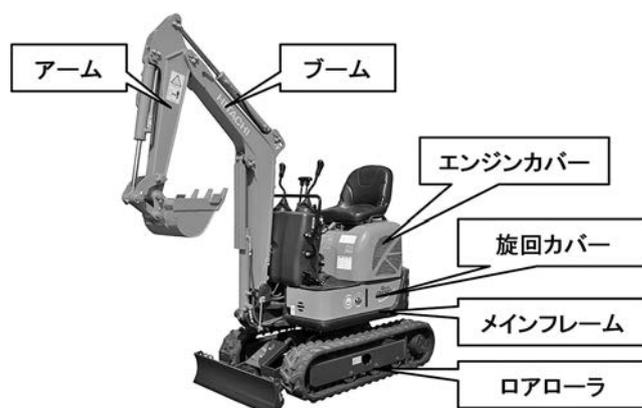
一方、宇宙では月面拠点建設検討時において何かしらの宇宙用建設機械の稼働を想定されると考えるが、宇宙用建設機械を地上から月面までロケットで輸送した場合の輸送コストは現在1kgあたり1億円とも言われている。月面での作業性向上、輸送コスト削減から宇宙用建設機械は「大型軽量化」がより求められると考えられる。

そこで本研究では地上と宇宙の共通課題である「軽量化」に着目し、油圧ショベルを「サイズを維持したまま軽量化する技術」の研究を実施した。本研究による軽量化技術は地上での利用を目的としているが、その軽量化技術は宇宙へも応用が可能と考えており、地上と宇宙のデュアルユースを目指す^{1)~3)}。

2. 研究概要

本研究は、先ず地上での利用を目的とし、設計基準、評価試験等地上で動作する範囲で想定される事案に対して実施しており、宇宙での使用を想定した事案については考慮、実施していない。

軽量化対象となる油圧ショベルは1 ton クラス油圧ショベルであり、その構成部品である「アーム」「ブーム」「メインフレーム」「エンジンカバー」「ロアローラ」(写真—1)を主素材である鉄からCFRP(炭素繊維強化プラスチック)へ変更し、サイズを維持したまま軽量、強度、剛性を備えた設計・試作をし、油圧ショベルへ取り付け・性能評価試験を実施する事でその軽量化効果、有用性を検証した。



写真—1 油圧ショベル各部名称

3. 素材概要

本研究で使用した主素材である CFRP は軽量、高強度であり、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)⁴⁾ において、航空機、人工衛星等への利用に長年研究されており、その実績により地上での建設機械である油圧ショベルへの有用性も期待されると考えたが、建設機械、油圧ショベルへの適用実績は無く、試作にあたり様々な課題が生じた。

CFRP は炭素繊維を樹脂 (プラスチック) で強化した物であるが素材特性として鉄の様に耐摩耗性は高く無い。また、鉄の様な等方性材料では無く、繊維を引張る方向によって強弱が変わる「異方性材料」である。試作部品の製作は、「プリプレグ」と呼ばれるシート状の CFRP を試作部品形状である「型」へ手作業にて貼り付け・積層するハンドレイアップによるオートクレーブ製法での成型を行った (図-1)。積層された CFRP は積層方向に対する荷重方向によっては層間剥離を生じやすい (図-2)。

CFRP を用いた各部品の設計において、部品にかかる荷重の大きさ、方向を見誤った繊維・積層方向とすると、容易に剥離、破損が生じる為、この見極めも重要となる。

4. 複合材製軽量部品

試作部品は鉄製オリジナル部品とそのまま置換可能な取付互換を持たせる為、締結箇所はオリジナルと同

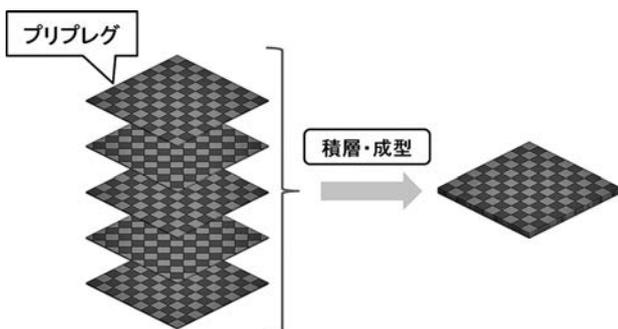


図-1 プリプレグ積層

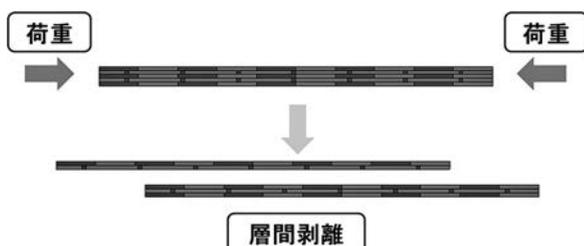


図-2 層間剥離例

寸法としているが、オリジナル部品形状をそのまま CFRP へ置換しただけでは軽量化されても強度・剛性不足となる。強度・剛性を優先させると軽量化不足となり、軽量化・強度を優先させると剛性不足となり、各部品に応じて CFRP の特性を生かしつつ軽量、強度、剛性といった各要素のバランスをどの様にするか見極めながらの設計も重要となった。各部品は CFRP の特性を生かした形状変更としているが油圧ショベルの作動範囲が大幅に変更となる様な形状変更や 1 ton クラス油圧ショベルが持つコンパクト性を大きく損なう形状変更は行っていない。また、メインフレームの様に CFRP での設計時において強度・剛性の確保が困難であった物は、隣接する他部品 (旋回カバー) と一体化した形状とする事で強度・剛性の確保を行ったが、油圧ショベル全体で見した場合の大幅な形状変更には至っていない。複合材製部品への各部品締結には金属製オリジナル部品であるピンやボルトを使用する為、締結部位や可動部位には CFRP の強度、耐摩耗性向上として金属製部品の挿入を行っている。

試作完成した複合材製部品を写真-2～6 に示す。



写真-2 複合材製アーム



写真-3 複合材製ブーム



写真-4 複合材製メインフレーム



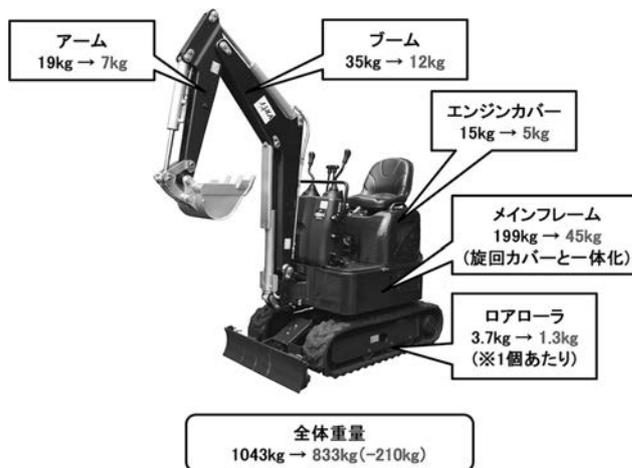
写真一五 複合材製エンジンカバー



写真一七 複合材製軽量油圧ショベル



写真一六 複合材製口アローラ



写真一八 軽量化

5. 性能評価試験

試作した複合材製軽量油圧ショベル（写真一七）は鉄製オリジナル油圧ショベルと比べて 200 kg 以上の軽量化となった（写真一八）。

性能評価試験として「転倒角試験」「静的安定性試験」「走行牽引力試験」「作業量試験」を実施した。本性能評価試験は複合材製軽量油圧ショベルの最軽量状態での性能を把握する為、油圧ショベル後部への追加ウェイトは搭載していない。また、比較用の鉄製オリジナル油圧ショベルは複合材製軽量油圧ショベルと同一機種であるが同一個体では無い為、アワメータや内部構成部品（エンジン、油圧ポンプ、油圧モータ等）に僅かな個体差が生じている。

性能評価試験結果を表一へ示す。試験結果の数値は鉄製オリジナル油圧ショベルを「0」とした相対値であり、「複合材製油圧ショベル（ウェイト追加時）」は、性能評価試験結果より算出された計算値である。

(1) 転倒角試験

油圧ショベル全体での重心位置、前方向へ転倒するまでの角度を把握する事を目的としている（図一三）。軽量化により油圧ショベル全体の重心位置が鉄製オリジナル油圧ショベルよりも下位置となった為、油圧ショベルが前方へ転倒するまでの角度が大きくなり、安定性が増している。

(2) 静的安定性試験

油圧ショベルの静的安定性及びリフト力（クレーン性能）の把握を目的とし、油圧ショベルのアーム先端へバケットを取付けた状態でのリフト力の計測を実施した（図一四）。

油圧ショベル構成部品軽量化に伴う形状変更の為、荷重点から支点までの距離が鉄製オリジナル油圧ショベルと複合材製油圧ショベルとで若干異なるが大きな影響は無いと考える。軽量化により鉄製オリジナル油圧ショベルよりもリフト力が低下する結果であった。低下要因として油圧ショベル質量がそのままリフト力へ影響している為である。複合材製油圧ショベル後部へ追加ウェイト（57 kg）（図一五）を搭載する事で、鉄製オリジナル油圧ショベルと同等なりフト力が得られる。

軽量化された 200 kg 分のウェイトが必要とならないのは、リフト力がモーメントのつり合いによるからである（図一六）。その為、複合材製油圧ショベルから更に離れた後方へ追加ウェイトを搭載すれば 57 kg よりも軽いウェイトで可能となるが、その場合油圧ショベルの旋回半径が大きくなり 1 ton クラスのコン

表一 性能評価試験結果

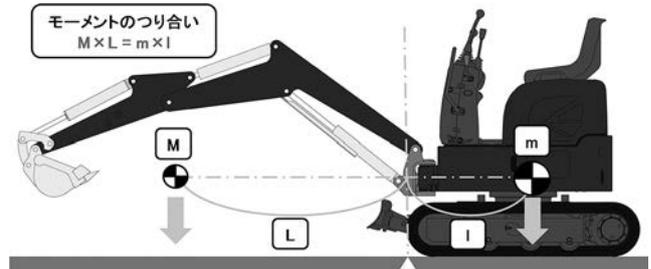
| 名称 | 試験開始時 アワメータ (hr) | 機械質量 (kg) |
|---------------------------------------|------------------------|----------------|
| 鉄製オリジナル油圧ショベル | 391 | 1,043 |
| 複合材製軽量油圧ショベル | 10 | 833 |
| 複合材製軽量油圧ショベル (ウェイト追加時) ※値は全て計算値 | 10 | 890 (+57kg) |

| 名称 | 転倒角試験 | | 静的安定性試験 | | 走行牽引力 | |
|---------------------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|
| | 転倒角 (deg) | 荷重点から支 点までの距離 (m) | リフト力 (kN) | モーメント (kN・m) | 低速時 (kN) | 高速時 (kN) |
| 鉄製オリジナル油圧ショベル | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 複合材製軽量油圧ショベル | +5 | +0.04 | -0.31 | -0.54 | -1.34 | -1.65 |
| 複合材製軽量油圧ショベル (ウェイト追加時) ※値は全て計算値 | +8 | +0.04 | 0 | +0.1 | -1.34 | -1.65 |

| 名称 | 作業量試験 | | | |
|---------------------------------------|------------------|--------------|-----------------------------|------------------------------|
| | サイクルタイム (sec) | 燃費 (L/hr) | 燃費土量 (m ³ /L) | 計算土量 (m ³ /hr) |
| 鉄製オリジナル油圧ショベル | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 複合材製軽量油圧ショベル | 0 | +0.1 | -0.1 | 0 |
| 複合材製軽量油圧ショベル (ウェイト追加時) ※値は全て計算値 | 0 | +0.1 | -0.1 | 0 |



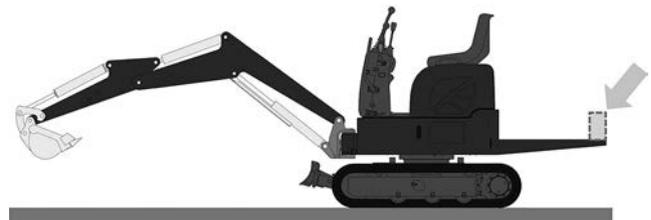
図一三 転倒角



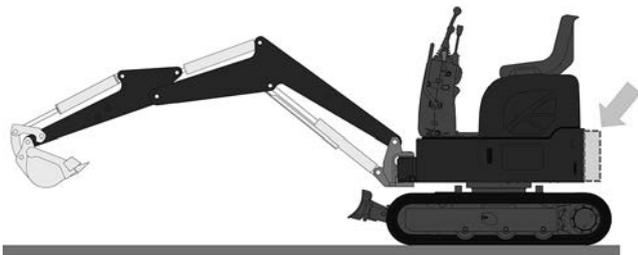
図一六 モーメントのつり合い



図一四 リフト力



図一七 ウェイト軽量化例



図一五 ウェイト追加

パクト性に影響が出る事となる (図一七)。

ウェイトを追加した状態での全体重量も鉄製オリジナル油圧ショベルと比べて軽量である。

(3) 走行牽引力

油圧ショベルの走行牽引力の把握を目的としている。軽量化により走行牽引力が低下する結果であったが、低下要因として走行用油圧モータの出力トルクに違いが生じている為と考えられる。

試験中、鉄製オリジナル油圧ショベル、複合材製油圧ショベルともにクローラが地面とスリップして牽引不能な状態とはなっておらず内部リリーフバルブによるものであり、走行用油圧モータの入口側圧力、出口側圧力も鉄製オリジナル油圧ショベルと複合材製油圧ショベルは同じ値であった。鉄製オリジナル油圧ショベルはアワメータが300時間以上と十分な「慣らし運転」がされているのに対し、複合材製軽量油圧ショベルは10時間とほぼ新品状態である。複合材製油圧ショベルの走行用油圧モータは十分な慣らし運転がされておらず、油圧モータがなじんでいない（アタリがつかない）状態である為、走行用油圧モータの機械効率に差が生じ、出力トルクへ影響したと考える。

油圧モータ出力トルク T [N・m] は油圧モータ容量 q [cm³/rev]、有効圧力（入口側圧力－出口側圧力） P [MPa]、油圧モータ機械効率 η_m とすると、次式で表せられる。

$$T = \frac{P \times q \times \eta_m}{2\pi}$$

複合材製軽量油圧ショベルを十分な走行慣らし運転を行う事で走行用油圧モータの機械効率が上昇し走行牽引力は鉄製オリジナル油圧ショベルと同等になると推測される。

(4) 作業量試験

作業量、作業サイクル、燃料消費を計測し、燃費性能及び経済性の把握を目的としている。軽量化による影響は見られず同等な結果であった。要因としてサイクルタイム（掘削→90°旋回→排土→90°旋回→元の位置へ戻るまでの一連の動作時間）の短縮が見られない事より、1 ton クラス油圧ショベル自体が小型であり各動作間の稼働量・動作時間が小さく、軽量化による差が極微小であったと考える。燃費（時間当たりの燃費量）、燃費土量（燃料当たりの作業量）、計算土量（時間当たりの作業量）においても、誤差範囲内の同等な値であり、上記サイクルタイム他、作業負荷に応じた油圧ショベル内部システム制御の有無も影響したと考える。

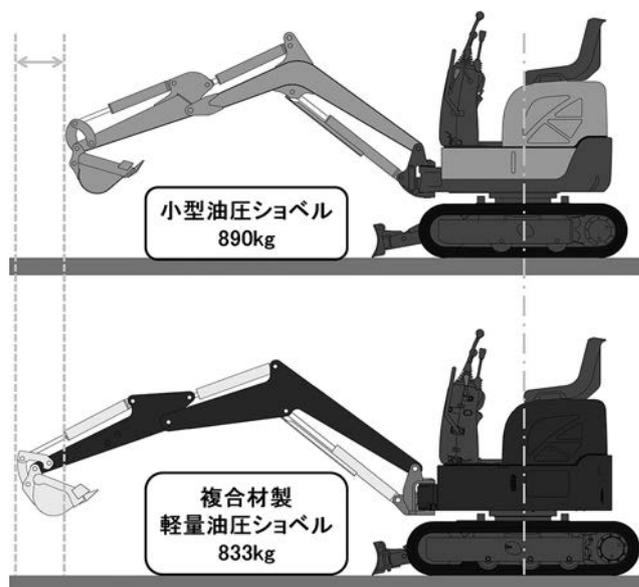
(5) 掘削状態

試験中、複合材製軽量油圧ショベルが浮いてしまって掘削出来ない、掘削時にアーム、ブームがしなって掘削出来ない、旋回停止時にアーム、ブームがブレてすぐに位置決め出来ない、破損した、という事は無く、鉄製オリジナル油圧ショベルとの違いが体感出来ない同等な作業姿勢、操作性、操作感で掘削が可能であっ

た。「油圧ショベルはある程度の自重が無いと車体が浮いてしまって掘削出来ない」と言われているが、実際に油圧ショベルの自重は掘削や安定性に大きく影響してくる。油圧ショベルは小型の物で質量 0.3 ton、大型の物で 200 ton と大小様々に存在しているが、小型の油圧ショベルだから掘削出来ないという事はない。つまり、掘削を可能とするには油圧ショベルの自重以外にも油圧ショベルの掘削姿勢、地盤状態も影響してくる。本試験条件では鉄製オリジナル油圧ショベルと複合材製軽量油圧ショベルに掘削状態に差は確認出来なかったが、地盤状態によっては差が確認出来る可能性もあると考える。

6. 大型軽量建機の実現

複合材製軽量油圧ショベルと近い質量の鉄製小型油圧ショベルと比較した場合、複合材製軽量油圧ショベルの作動範囲が広く、小型油圧ショベルから見た複合材製軽量油圧ショベルは「大型軽量建機の実現」と言える（図－8）。



図－8 油圧ショベル比較

7. 地上と宇宙のデュアルユース技術

本研究での性能評価試験結果より、複合材製軽量油圧ショベルは鉄製オリジナル油圧ショベルと比べて軽量でありながら同等な性能を有している結果を得た。軽量化の効果は他にも存在し、例えば輸送性の向上や油圧ショベルの更なる作業性能・作業効率向上が可能となる。輸送性の向上として、空路で輸送する場合使用するヘリコプタの最大積載量によっては油圧ショベ



写真—9 アタッチメント

ルを分解して輸送する必要があるが、軽量化により分解点数を減少させ作業現場での組立作業時間を短縮する事が可能となる。作業性能・作業効率の向上として、油圧ショベルには「アタッチメント」と呼ばれる主に油圧ショベルのアーム先端部へ装着し、作業用途に応じた機能を有する装置があり、土を掘削するアタッチメント、鉄骨を切断するアタッチメント、草を刈るアタッチメントと多種多様な物が存在する(写真—9)。

油圧ショベルの軽量化により、アタッチメントを装着した油圧ショベル全体の質量は鉄製オリジナル油圧ショベルと同等でありながら、大型アタッチメントの装着が可能となり、油圧ショベルの作業性能・作業効率向上が可能となる。

本研究での軽量化技術は油圧ショベルに限らず他の地上用建設機械への応用が可能と考える。また、宇宙側での課題である輸送コスト削減、大型軽量建設機械を解決する検討材料の一つに成り得ると考える。

8. おわりに

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)⁵⁾ 「イノベーションハブ構築支援事業」に基づく国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙探査イノベーションハブ⁶⁾ の共同研究である RFP (研究提案募集) の「超軽量建機アタッチメントおよびブーム等の開発および実地検証」と「遠隔操作およびアタッチメントの自動脱着可能な軽量建機システムの開発と実地検証」によるものである。(株)タグチ工業⁷⁾、国立大学法人東京農工大学小笠原俊夫教授⁸⁾、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙探査イノベーションハブの共同研究により実施した。

JICMA

《参考文献》

- 1) 若林幸子 他, “宇宙探査イノベーションハブで目指す月面拠点基地”, 第 16 回建設ロボットシンポジウム論文集, P2-06, 2016.8.
- 2) 岡田康弘 他, “地上・宇宙のデュアルユースを目指した建設機械軽量化技術の研究開発”, 第 17 回建設ロボットシンポジウム論文集, P2-8, 2017.8.
- 3) 岡田康弘 他, “地上・宇宙のデュアルユースを目指した建設機械軽量化技術の研究開発 2”, 第 19 回建設ロボットシンポジウム論文集, P-08, 2019.10.
- 4) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
<http://www.jaxa.jp/>
- 5) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)
<https://www.jst.go.jp/>
- 6) 宇宙探査イノベーションハブ
<http://www.ihub-tansa.jaxa.jp/>
- 7) (株)タグチ工業
<http://www.taguchi.co.jp/>
- 8) 国立大学法人東京農工大学
<http://www.tuatac.jp/>

【筆者紹介】

岡田 康弘 (おかだ やすひろ)
(株)タグチ工業 技術本部