

製品紹介

マイニングダンプトラック用 シリンダ機器の開発

谷川 夏樹 ・ 長谷川 一樹

1 はじめに

1.1 概要

マイニングダンプトラック（以下マイニングダンプ）は鉱山、採石場等のマイニング現場で稼働する非公道用の車両であり、マイニングショベル等により掘削された石炭、鉄鉱石、土砂等の運搬を担う建設機械である（写真1、写真2）。多くの場合、車体は定期的なメンテナンスが施されるものの、故障等によるマシンストップが鉱山の利益損失に直結するため、非常に高い耐久性を求められる。



写真1 マイニングダンプ積み込み風景
（日立建機様ホームページより転載）



写真2 日立建機様 EH5000AC-3 外観
（日立建機様ホームページ写真に車体サイズを追記）

表1に日立建機様EH5000AC-3の概略仕様を示す。

表1 日立建機様 EH5000AC-3 概略仕様

| | | |
|--------------|----------------|-----------|
| 公称積載質量 | kg | 296,000 |
| 運転質量（空車質量） | kg | 204,000 |
| 車体総質量 | kg | 500,000 |
| ボディ容量（山積/平積） | m ³ | 202 / 148 |
| 最高走行速度 | km/h | 56 |
| タイヤサイズ | | 53/80R63 |

マイニングダンプは自らの車体質量を超える重さの積載物を運搬することができる。大型のものは、写真2の様に巨大な車体であり、最大積載時の車体総質量は300～500tにもなる。それを支えるために、2m以上の直径を持つタイヤが、フロントに2本、リアには1軸に左右2本ずつ装着される（写真3）。



写真3 マイニングダンプ リア部
（MINEexpo® 2016 日立建機様ブース）

稼働現場である鉱山では、一般的にマイニングショベル1台に対し、複数台のマイニングダンプが稼働するため、マイニングダンプの市場規模は、マイニングショベルより大きいと言われている。KYBは、長年に亘りマイニングショベル用シリンダの設計、生産を行っているが、マイニングダンプ用シリンダ機器に関しては本開発品が初めての参入

となる。

1.2 マイニングダンプ用シリンダ機器

マイニングダンプには、油圧緩衝器である図1で示すサスペンションシリンダ（①フロント：写真4、②リア：写真5）と、油圧直動アクチュエータであるホイストシリンダ（写真6）が、機体左右に各1本搭載される。

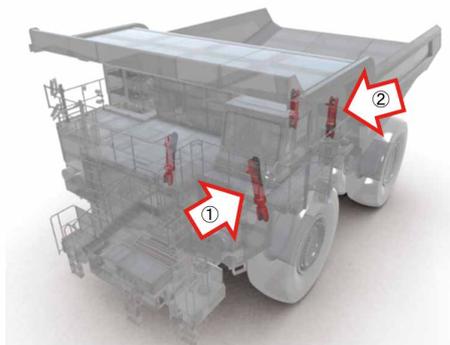


図1 サスペンションシリンダ搭載位置



写真4 ①フロントサスペンションシリンダ
取り付け状態



写真5 ②リアサスペンションシリンダ
取り付け状態



写真6 ホイストシリンダ搭載位置

1.3 開発対象品

今回、日立建機様マイニングダンプEH5000AC-3用フロント、リアサスペンションシリンダと、ホイストシリンダの開発を行ったので、開発背景や構造と共に本報にて紹介する。

2 開発背景

2.1 各シリンダに求められる機能

サスペンションシリンダは車体質量を支え、路面からの衝撃を緩和し、車体フレームへの負荷低減や荷崩れを防ぐ車体保持機能と、車体の振動エネルギーを熱に変換し、振動を収束させることで車体の走行安定性を確保する振動減衰機能を有する緩衝装置である。一般的な自動車用サスペンションにおいては、保持機能を有するコイルばねや空気ばねと、減衰機能を有するショックアブソーバが機能的に分離しているが、マイニングダンプ用サスペンションにおいては、保持と減衰の両方の機能を、ひとつの圧力容器内に備えていることが特徴である。

ホイストシリンダは荷台に積載された土砂などの積荷を降ろすために、荷台を昇降させる機能を有する。荷台が降りた状態におけるシリンダの取り付け長さに対して必要なストロークが大きいため、テレスコピック式のものが多く採用されている。

2.2 サスペンションシリンダ

サスペンションシリンダは前述の通り、車体保持機能と振動減衰機能を、ひとつの圧力容器内に有する油圧緩衝器である。車体保持機能は、サスペンションシリンダに封入されたガスと作動油の圧縮性により発揮し、振動減衰機能は、油室間に設けたオリフィスにより発揮する。この構造は、当社創設者の萱場資郎が1924年に発明した、航空機用の空気油圧式緩

衝脚（以下オレオ）と同一の機能構成である。

マイニングダンプ用サスペンションシリンダは初めての参入となるが、オレオを起源として発展した、自動車、鉄道、航空機向け等の各種油圧緩衝器設計技術を再集結し、さらに、多くの知見を有している建設機械用油圧シリンダの設計技術を組み合わせ、開発を行った。

2.3 ホイストシリンダ

荷台を昇降させる機能を有するテレスコピック式複動油圧シリンダとしては、既存の当社製品として積載質量2t以下の特装車両用シリンダがあるものの、開発対象であるマイニングダンプEH5000AC-3の積載質量は約300tと非常に大きく、積荷を降ろす際、荷台を持ち上げるために必要な推力も大きいため、大型のホイストシリンダが必要となる。当社としては設計、生産実績のない大径、長尺サイズのテレスコピック式シリンダであるため、特装車両用ホイストシリンダをベースにマイニングダンプ用として専用設計を行った。

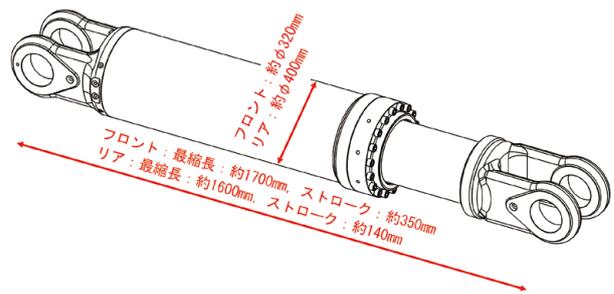


図2 サスペンションシリンダ外観図

サスペンションシリンダは車体保持機能を発揮するため、内部には、作動油とガスが同じ空間内に封入される（図3）。車体には、ロッドが下側となるように取り付けられ、ガスはシリンダチューブ上部に溜まる。サスペンションシリンダが縮む際には、シリンダ内部の容積はロッドが侵入する分だけ小さくなり、ガスと作動油が圧縮されることで、シリンダ内圧が高まる。ガスをばねとして使用する場合、ボイルの法則に基づき、シリンダが縮むほどに圧力が大きくなり、非線形の漸増ばね特性となる。ガスの圧縮による漸増ばね特性は、空荷状態の低いばね定数による乗り心地の確保と、積荷高負荷状態の漸増的に高まるばね定数による高荷重保持が両立できることから、空荷状態と積荷状態の保持荷重が大きく異なるマイニングダンプには最適である。

限られた取り付けスペース、ストロークにて、車体総質量が500tにもなる車体を4本のサスペンションシリンダで保持する必要があるため、動的な最大圧力は60MPaにも達する。マイニングショベルにおける油圧回路のメインリーフ圧が30MPa程度であることと比較しても、サスペンションシリンダの最大圧力は高い。

なお、日立建機様マイニングダンプ用サスペンションシリンダにおいては、作動油としてシリコン系合成油を用いる。ガスの圧縮による漸増ばね特性に加えて、シリンダ内のガスが見かけ上存在しなくなるような積荷高負荷（高圧）領域においては、作動油の圧縮性によるばね特性も用いることになる。一般的な油圧緩衝器に用いられる鉱物油に対し、体積弾性係数の大きい（圧縮性が高い）シリコン系合成油を用いることで、積荷高負荷（高圧）領域においても、鉱物油に対してばね定数を低く保つことができ、車体フレームへの負荷低減が可能となる。

また、もう一つの重要な機能である、車体振動の減衰機能を発揮するため、作動油に満たされているピストンロッド部にオリフィスを構成している。サスペンションが伸縮動作し、作動油がオリフィスを通過する際の抵抗により、上室と下室に圧力差を發

3 製品仕様

3.1 使用環境と使われ方

マイニングダンプは世界中の鉱山で稼働するため、高温多湿、寒冷地、粉塵環境等、様々な使用環境を考慮する必要がある。想定される使用環境温度は、 $-40\sim 50^{\circ}\text{C}$ であり、舗装されていない鉱山を走行することから、シリンダ機器には泥や砂塵が降りかかり、またそれらが乾燥しロッド表面に付着したり、低温環境で凍り付く等、厳しい環境で使用されることを想定する必要がある。同じく鉱山で稼働するマイニングショベル用シリンダと比較しても、長距離を走行するマイニングダンプは、シリンダ本体に降りかかる泥、砂塵も多いことから、ピストンロッド摺動部からのダスト侵入に対しては厳しい使われ方であるといえる。

また、鉱山機械用部品の多くは定期的にオーバーホールを行い補修することで、長期間使用される。今回開発するサスペンション、ホイストシリンダにおいても同様であり、シールや摺動部品などの消耗品を交換し、繰り返しオーバーホールを行い使用された場合においても構造物が破損しない様、強度部位の長期耐久性が求められる。

3.2 サスペンションシリンダ基本仕様

- ・シリンダ外観寸法：図2による
- ・最大圧力：60MPa
- ・作動油温度範囲： $-40\sim 90^{\circ}\text{C}$
- ・封入作動油：シリコン系合成油

生させることで減衰力を発生させている。オリフィス径、油通路の形状により、所望の減衰力特性にセッティングする。

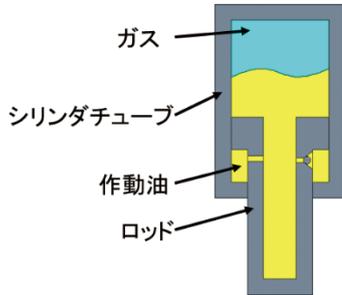


図3 サスペンションシリンダ概要図

3.3 ホイストシリンダ基本仕様

- ・シリンダ外観寸法：図4による
- ・シリンダ形式：複動3段テレスコピック式
- ・圧力仕様：21MPa
- ・作動油温度範囲：-40~90℃

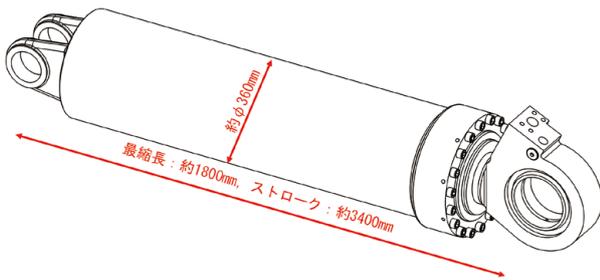


図4 ホイストシリンダ外観

ホイストシリンダは最小径のロッド内部に配管を構成し、図5の様にボトム室、ロッド室を構成している。シリンダの伸作動、すなわち荷台を持ち上げる際は、伸側ポートから内部配管を通してボトム室に圧油がまわり、大径のロッドから順次伸作動する。シリンダの縮作動、すなわち、荷台を降ろす際は、通常は荷台の質量により小径のロッドから順次縮作動する。また複動シリンダであることから、低温時に作動油の粘度が高くなり荷台の質量では縮作動し難いといった場合も、縮側ポートを加圧することでロッド内部を通してロッド室に圧油がまわり、強制縮作動させることができる。

4 開発課題と設計上のポイント

4.1 サスペンションシリンダ

4.1.1 保持力、減衰力特性計算モデルの確立

サスペンションシリンダは既述の通り、保持力、

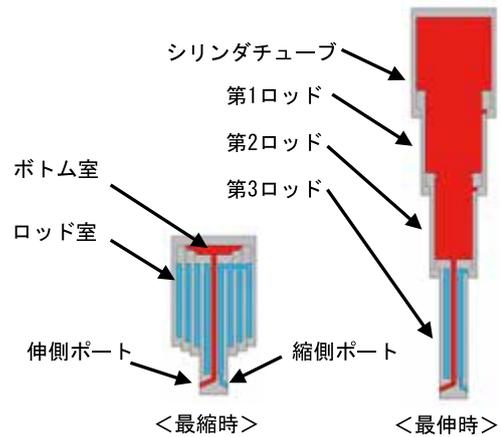


図5 ホイストシリンダ概要図

減衰力機能が求められる。当社は自動車や鉄道車両等、油圧緩衝器における特性計算技術、車体挙動シミュレーション技術を有するが、マイニングダンプ用サスペンションシリンダにおいて、考慮すべき、作動油の圧縮性やガスの溶解込みによる特性への影響を把握するためには、机上計算だけでは不十分であった。作動油の圧縮性やガスの溶解込みは、使用する作動油やガスの種類、組み合わせにより変化するため、基礎試験として、サーボ試験機等を用いて保持力特性、減衰力特性の計測を行い、理論計算値との差を把握した上で適切な補正を行うことが必要である。

しかしながら、マイニングダンプ用サスペンションシリンダを加振試験する場合、実機、又は実機相当の推力、加振速度を負荷できる大型試験設備が必要となる。実機や大型試験設備における検証は、開発費用の増大や開発期間の長期化を招くことから、今回の開発においては、既存のサーボ試験機にて加振可能なサイズのミニチュアサスペンションを製作し、基礎試験を実施した（写真7）。

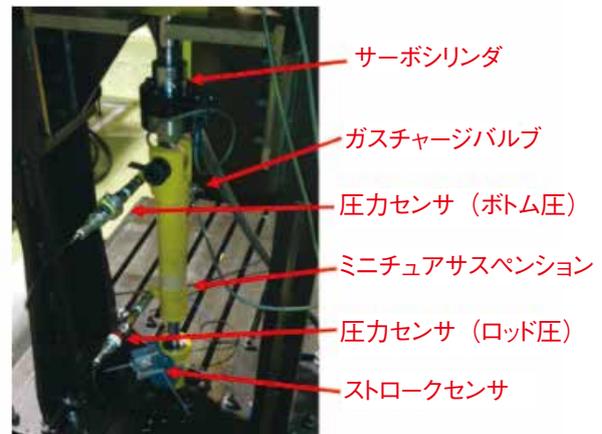


写真7 ミニチュアサスペンション

ミニチュアサスペンションを用いた基礎試験において、作動油の圧縮性やガスの溶け込みによる保持力特性、減衰力特性への影響を把握し、理論計算値に対する適切な補正係数を設定した。さらに、サスペンションシリンダ本体の動特性解析モデルと、これを盛り込んだ車体シミュレーションモデルを構築し、サスペンション特性が車体挙動に与える影響を、実機搭載前に検証することが可能となった。

4.1.2 構造物の圧力耐久強度

既述の通り、サスペンションシリンダは、繰り返し高圧が負荷される圧力容器であるのに加え、オーバーホールを繰り返し行い長期間使用される緩衝器である。構造物の圧力耐久性を向上させるためには、各強度部位の肉厚を増加させることが考えられるが、サスペンションの質量増大は、ばね下質量増大による車体運動特性の低下や、車体質量増加に伴う積載量減少のデメリットがあり、耐久強度と製品質量のバランスが取れた最適設計が必要である。

今回、使われ方が厳しい現場における実稼働時のサスペンションシリンダ圧力データを日立建機様より提供頂き、油圧ショベル用高圧シリンダ設計にて培った当社の頻度解析技術を基に、機体寿命に対するシリンダ耐久強度の明確化を行った。市場が求める耐久強度が明確になったことで、当社の圧力容器疲労設計技術を基にして、必要な耐久強度を確保しつつ製品質量が最小となるシリンダを設計することができた。

4.1.3 外力に対する強度

マイニングダンプ用サスペンションは、シリンダのストローク伸エンド、縮エンドそれぞれでストローク規制を行う。悪路を走行するマイニングダンプにおいては、タイヤが路面から浮き上がり、サスペンションシリンダが伸エンドに達する場合もあり、大きな引張外力の負荷を想定する必要がある。ここでも、油圧ショベル用高圧シリンダ設計で培った、ストロークエンド時の外力が大きいシリンダ製品の締結部やクレビス部の設計ノウハウを生かし、一発破壊強度、耐久強度共に満足できる設計を行った。

4.1.4 オイルシールの選定

サスペンションシリンダに用いるオイルシールには、低温側の温度仕様である -40°C でも弾性を有し、作動油の温度上昇にも対応し、さらにシリコン系合成油における耐油性も考慮する必要がある。

一般的な油圧シリンダにおいては、耐寒仕様や耐熱仕様といった、稼働地別の仕様を設定することもある。こういった場合には、専用のシール部品を使い分ける必要が生じることから、コストや、製作リードタイムの増加が問題となる。そのため、今回開発

するサスペンションシリンダでは使用実績のある材質、新規専用材を様々な条件にて浸漬試験実施し、想定される環境温度、作動油温度全域に対応可能な、最適なオイルシールを選定した。これにより、稼働地別の仕様を設定しないで、世界同一シリンダ仕様での対応を可能とした。

4.2 ホイストシリンダ

4.2.1 コンパクト化

ホイストシリンダの伸作動によって荷台を持ち上げた際、シリンダには反力として大きな圧縮荷重がかかる。油圧シリンダのサイズ設定を行う際、シリンダ径は必要推力とメインリリーフ圧によってある程度決定される。しかしながら、テレスコピック式シリンダにおいては必要推力だけで、一概にはシリンダ径を決めることができない。なぜなら、最も細いロッドの座屈強度が問題となる場合があるためである。

テレスコピック式シリンダは構造上、発生した圧縮荷重がそのまま、車体側シャフトと接続している最も細いロッドに作用する。例えば、縮状態から伸び始める際は1段目の最大外径のピストン断面積と内圧から換算される推力分の大きな圧縮荷重を最小径のロッドが受けることになる。ロッドの座屈強度を増そうと最小径のロッド径を大きくしてしまうと、その外側のロッド、更にその外側のロッドと、内側のロッド径に応じて外側のロッド径を大きくせざるを得なくなり、結果として必要推力以上にシリンダが大型になってしまう。必要な推力に対し、いかに最小径のロッドの座屈強度を確保するかがシリンダの軽量・コンパクト化のカギとなる。開発したマイニングダンプトラック用ホイストシリンダでは大きな圧縮荷重にも耐えられるよう、ロッドには高強度で肉厚の大きい鋼管材を採用することで座屈強度を確保し、シリンダのコンパクト化を図っている。

4.2.2 外力と圧力に対する強度

マイニングダンプトラックの荷台は写真3のように車体から後方に大きく張り出した形状をしており、そのため、荷台が昇降する際に回転中心となるヒンジピンの位置は荷台の後端ではなく荷台の中央寄りに位置している。このため荷台を持ち上げて荷台から積荷がすべり落ちる際、積荷がヒンジピンを通過した瞬間にシーソーのように積荷の重さによって荷台が急激に持ち上げられることになる。これにより、ホイストシリンダにかかる荷重は、それまでの圧縮方向から一時的に引張側に反転する(写真8)。積荷がすべり落ちる際に発生する引張荷重の大きさは、積荷の種類や状態、荷台形状によっても異なる。

また、シリンダが伸作動中に大きな引張荷重が負

荷されると、シリンダのロッド室の圧力が、油圧回路に設けたオーバーロードリリーフ圧まで高まることもある。ロッド室が高圧になると、各段のロッドシールの負荷が大きくなり、また、ロッド室の圧力容器としての構造物耐久強度も厳しくなる。荷重反転による圧力負荷、外力負荷を考慮し、シールシステムの選定や、溶接継手構造の設計を行っている。



写真8 ホイストシリンダにおける荷重反転

4.2.3 耐久性

サスペンションシリンダと同様に、ホイストシリンダにおいても、定期的なオーバーホールによる長期間使用を想定した設計を行う必要がある。構造の面では、実稼働データの圧力頻度解析から必要な耐久強度を把握するとともに、油圧ショベル用高压シリンダの溶接継手構造を採用することによって耐久性を担保している。

既述の通り、ホイストシリンダにも泥や砂塵が降りかかり、それらが乾燥しロッド表面に付着したり、低温環境で凍り付く等を想定する必要がある。ピストンロッド摺動部からのダスト侵入によるロッド表面の傷つきやロッドシールの破損による外部油漏れを防ぐため、シールメーカーと共同で耐ダスト性の高いダストシールを新規開発した。このダストシールはサスペンションシリンダにも採用している。

5 実機評価

マイニングダンプ用サスペンションシリンダ、ホイストシリンダの机上検討及び、要素試験方法等の妥当性を確認するため、日立建機様ご協力の下、実際の車両に、開発したシリンダを搭載頂き、各種実機評価を行った。

5.1 サスペンションシリンダ

4.1.1項にて確立した保持力特性、減衰力特性の計算モデルの妥当性最終確認のため、実機使用時におけるサスペンションシリンダの保持力特性(図6)、減衰力特性(図7)を計測した。

図6、図7の通り、確立した計算値と実測値が一致したため、保持力、減衰力特性の算出モデルの妥

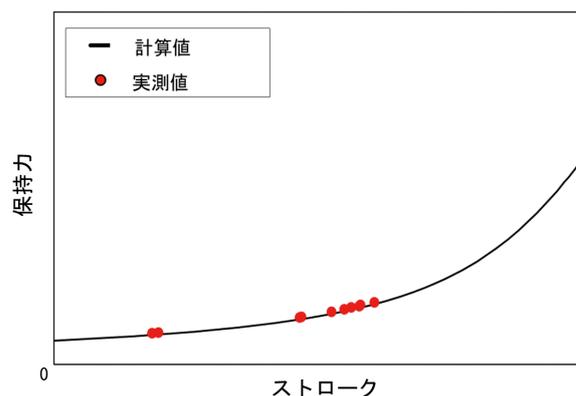


図6 サスペンション保持力特性計測結果

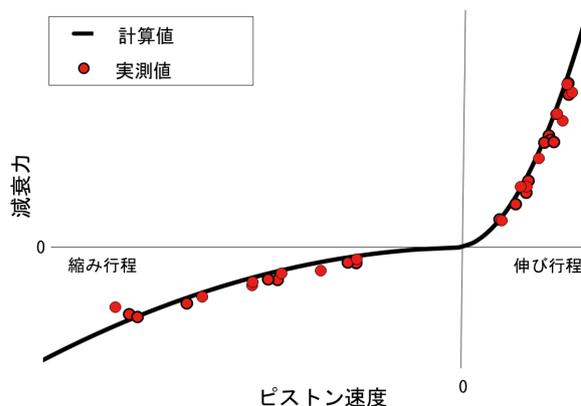


図7 サスペンション減衰力特性計測結果

当性が確認できた。特性計算モデルを確立できたことで、実機による試行錯誤的なチューニングを行うことなく、お客様要望の特性を机上検討で設定することが可能となった。

また試乗官能評価においても、乗り心地が良い等の高い評価を頂くことができた。

5.2 ホイストシリンダ

シリンダの油圧測定、外力測定その他、車体フレームの応力等、シリンダ変更による車体側影響の確認を行った。机上検討時に設定した想定負荷以下であり、設計仕様の妥当性を確認できた。これらの負荷測定については、サスペンションシリンダにおいても同様に計測を実施している。

6 おわりに

実機評価の合格により、当社製サスペンションシリンダ、ホイストシリンダは、日立建機様マイニングダンプEH5000AC-3(積載時車体質量:500t)に採用頂いている。

マイニングダンプ用シリンダ機器の開発、評価を通して製品特有の知見を得る事ができた。当社既存技術である、油圧ショベル用高压シリンダの設計技

術と、自動車用等の油圧緩衝器設計技術を生かし、市場の使われ方、お客様ニーズに合わせたマイニングダンプ用シリンダ機器の設計、製作が出来る様になった。

今回の開発においては、日立建機様ご協力の下、実機評価を行うことができたが、機体が大型であるため、実機での評価、検証は容易ではない。今後は要素技術、シミュレーション技術の深掘りによるモデルベース開発を推進していく。

6.1 今後のマイニングダンプ用シリンダ機器開発

内燃機関や油圧機器の電動化が進んでいる昨今、その流れは建設機械にも拡大しつつあるが、大推力、大容量を求められる鉱山向け機器においては、今後も油圧が主流であると考えられる。そのため、マイニングダンプ用サスペンションシリンダ、ホイスシリンダにおいても、以下のように、更なる改善、性能向上が求められると考える。

6.1.1 サスペンションシリンダ特性の最適化

将来的には自動運転化が進み、オペレータが乗車しないマイニングダンプも多くなることから、乗り心地は重要視されなくなる。しかし、オペレータの経験で回避できている荷崩れや、路面状況に合わせた運転は難しくなる。サスペンションシリンダとしては、いかなる走行条件、環境であっても最適な保持力特性、減衰力特性が得られ、車体構造物への負荷低減や走行安定性を確保できることが求められる。

自動車用油圧緩衝器においては、随時最適な減衰力特性を得られるアクティブサスペンションや、ステアリングとの協調制御等、様々な解決方策例が存在する。マイニングダンプ用サスペンションとして最適な方策を見出し、適用に向けた研究開発を推進する。

6.1.2 ホイスシリンダのコンパクト化

ホイスシリンダを更にコンパクトにすることができれば、車体側の設計自由度が向上する。今後自動運転化などの導入が進み作業現場でのマイニングダンプの運用方法が変わることによって車体の構造が大きく変化する可能性が想定される。時代の変化に合わせたマイニングダンプの最適な車体設計に貢献できるよう、よりコンパクトなテレスコピック式シリンダの設計技術を追求していく。

6.1.3 油圧機器と情報化技術の融合

鉱山機械業界においてもIoT、DX等を取り入れた作業効率向上、自動運転化が広がっており、油圧機器における情報化技術との融合が急務である。

当社では、作動油の状態監視や、油圧シリンダの故障検知システムを開発中である。本システムをマイニングダンプ用シリンダ機器に適用することにより、油漏れ等の故障早期検知や、最適なオーバーホールタイミング提案等が可能となり、マイニングダンプの生産性を更に高めることができると考える。

最後に、本製品の開発にあたりご協力頂きました日立建機株式会社様、関連協力会社の皆様、社内各部署に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日立建機様：EH5000AC-3カタログ，EH5000AC-3 Feature and Specs Brochure
- 2) 高井：油圧ショベル用シリンダ変遷，KYB技報50号，(2015年4月)。
- 3) 吉田，亀田，原：状態監視システム，KYB技報60号，(2020年4月)。
- 4) 岩本，高橋：油圧シリンダ用故障検知機器の開発，KYB技報61号，(2020年10月)。

著者



谷川 夏樹

2010年入社。ハイドロリックコンポーネンツ事業本部技術統轄部 岐阜南油機技術部シリンダ設計。ショベル向け等のシリンダ製品設計・開発に従事。



長谷川 一樹

2012年入社。ハイドロリックコンポーネンツ事業本部技術統轄部 岐阜南油機技術部シリンダ設計。ショベル向け等のシリンダ製品設計・開発に従事。