

フェールセーフ機能を備えた 操舵用電動油圧アクチュエータの開発

梅原 康宏* 鴨下 庄吾** 石栗 航太郎*
山長 雄亮* 下田 恵輔***

Development of Electro-Hydraulic Actuator with Fail-Safe Function for Steering System

Yasuhiro UMEHARA Shogo KAMOSHITA Kotaro ISHIGURI
Yusuke YAMANAGA Keisuke SHIMODA

In order to decrease the wheel lateral force of a bogie angle linked steering truck in the transition curve section, we developed an electro-hydraulic actuator for the steering system, and confirmed the performance regarding the reduction of the wheel lateral force by a running test on a test line. In addition, we devised a hydraulic circuit with a mechanical fail-safe function, and incorporated this hydraulic circuit into the steering electro-hydraulic actuator. Finally, we confirmed that this hydraulic circuit does not hinder the steering performance and maintained the fail-safe function by a bench test and a running test on a test line.

キーワード：フェールセーフ、油圧回路、電動油圧アクチュエータ、操舵台車、横圧

1. はじめに

車体と台車の相対的な動作に応じて輪軸を操舵するボギー角連動操舵台車は、曲線通過時の横圧低減効果に優れている¹⁾。しかしながら、円曲線を主眼とした操舵装置の諸元設定では、円曲線区間に比べて緩和曲線区間での横圧低減効果が小さくなるという課題があった。そこで筆者らは、緩和曲線区間でのみ台車を旋回させる方向に操舵力を付与し、横圧を低減するアシスト操舵システムの開発に取り組んできた²⁾。このシステムをボギー角連動操舵台車に適用することで、緩和曲線を含む曲線区間全体で優れた曲線通過性能を発揮することが期待できる。まず基礎試験として、台車枠と操舵ばりの間に油圧アクチュエータを仮設して所内走行試験を実施し、操舵制御により入口緩和曲線における外軌横圧の平均値は1/2以下に低減される結果が得られた。しかし、逆方向に操舵力を付与した場合には横圧上昇が確認され、このような事象を発生させないフェールセーフ性を担保することが実用にあたって必要不可欠であった。また油圧アクチュエータの油圧源であるポンプユニットが車体に搭載されているため、台車交換時などに油圧配管の脱着

作業が発生し、塵埃による作動油汚染などの問題が発生する可能性があった。

本稿では、さらにメンテナンス性を向上させる操舵用電動油圧アクチュエータ（以下、操舵用EHA）、およびアクティブ方式の最大の課題である逆操舵動作を防止するフェールセーフ油圧回路³⁾について報告する。

2. アシスト操舵システム

2.1 ボギー角連動操舵台車と操舵用アクチュエータ

操舵用アクチュエータを備えたボギー角連動操舵台車の基本的な構造を図1に示す。ボギー角連動操舵台車は、台車枠と操舵ばりの相対旋回角（ボギー角）に輪軸が連動するように操舵でこ・操舵リンクを構成することで、曲線通過時はボギー角に応じて機械的に輪軸を操舵動作させ、外軌側軸距を拡大、内軌側軸距を縮小し、アタック角を減少させることで横圧を低減する台車である。

アシスト操舵システムでは、図1に示すように台車枠と操舵ばりの間に操舵用アクチュエータを構成し、伸縮による推力を台車旋回トルクに変えて、側受すり板による摩擦力を打ち消して、台車が旋回し易くする制御を行う。操舵制御装置に関しては、制御対象が緩和曲線区間であり、指令出力の遅れが制御効果の低下に直結するため予見制御方式を採用した。

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室
** 車両構造技術研究部 車両振動研究室
*** 車両構造技術研究部 走り装置研究室（現 北海道旅客鉄道株式会社）

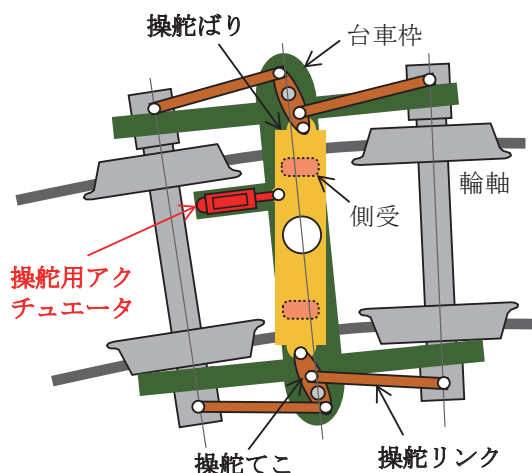


図1 ボギー角連動操舵台車と操舵用アクチュエータ

2.2 操舵用 EHA の開発

アシスト操舵システムの操舵用アクチュエータとして、新たに電動油圧方式のアクチュエータを開発した。特長として、油圧シリンダ・ポンプ・モータが一体となっており、外部との油圧配管接続がなくなるためメンテナンス性が大幅に向上する。また台車内のスペースに搭載可能な小型サイズでありながら、油圧を用いているため大きな発生力および良好な応答特性が期待できる。台車に装備した操舵用 EHA の外観を図2 に、主要諸元を表1 に示す。

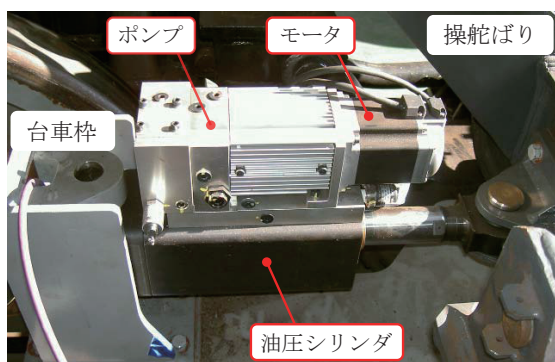


図2 操舵用 EHA の外観

表1 操舵用 EHA の主要諸元

定格発生力	± 34kN
最大発生力	± 55kN
最大ピストン速度	14mm/sec
ストローク	81mm
最大操舵トルク	± 21kN・m

3. 所内走行試験

操舵用 EHA をボギー角連動操舵台車に搭載し、所内走行試験を実施した。前台車が第1軸に PQ 軸を装着し

た操舵台車、後台車を通常のボルスタレス台車とした試験車両を機関車で牽引し、曲線 (R100, C90) を走行速度 20km/h 程度で通過した。今回の試験では、操舵目標パターンとして、緩和曲線区間位置に合わせてランプ状に操舵力を上昇させ、緩和曲線中は操舵力を維持し、円曲線または直線の進入位置付近で圧力を低下させるパターンを採用した。シミュレーションで操舵力と横圧の関係性を把握し、走行試験時において安全性を確認しつつ徐々に操舵力を増加させてデータ取得を行った。操舵制御が必要となる車両走行位置は、地上側に設置した反射シートの検出位置を基準とし、速度発電機の発生パルスと車輪径より走行位置を算出した。

第1軸の内外軌横圧、操舵力 (シリンダ圧力から算出した操舵用 EHA 発生力)、ボギー角を距離軸で表示した結果を図3 に示す。制御なしは、ボギー角連動操舵台車に操舵 EHA を装備しているが操舵力を発生しない条件、操舵制御は、緩和曲線区間 (20 ~ 75m, 135 ~ 175m 付近) で台車の旋回方向に操舵力を付与した条件である。入口緩和曲線において、操舵力を付与することにより、外軌横圧が低減していることが確認できる。また逆操舵制御は、緩和曲線区間で台車の旋回方向とは逆方向に操舵力を付与した条件であるが、入口緩和曲線で外軌横圧が上昇する傾向が確認された。なお、横圧結果が急峻な箇所についてはレール継目などの影響によるものである。

図4 に付与した操舵力と入口緩和曲線における外軌横圧平均値の関係性を示す。操舵力と外軌横圧平均値には線形関係が確認され、操舵制御時の最大操舵力 (55kN) を付与した場合には、制御なし (0kN) に比べて外軌横圧平均値が約6割低減されている。

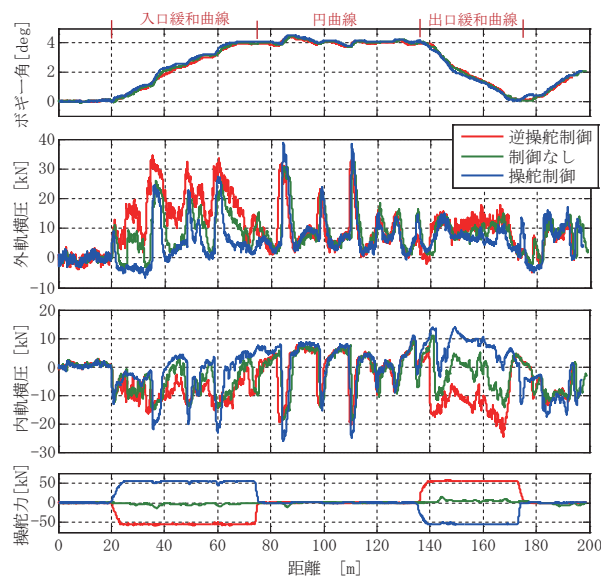


図3 所内走行試験結果

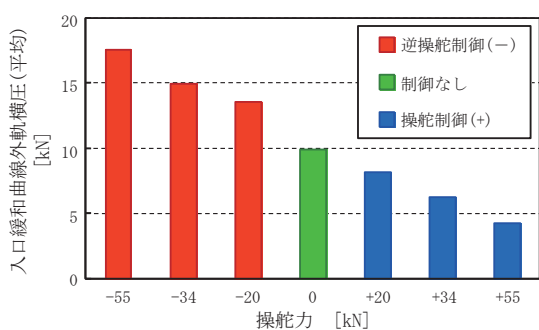


図4 操舵制御による外軌横圧平均値の変化

4. フェールセーフ性の向上

4.1 フェールセーフ油圧回路

無対策のアシスト操舵システムでは、車体-台車間にアクチュエータを設け緩和曲線通過時に台車の旋回方向に旋回を補助する力を加えることで横圧を低減させるため、万一アクチュエータが逆方向に力を発生（逆操舵）すると図4のように横圧が増大する。このため、実用化を目指すにはフェールセーフ対策が必要不可欠となる。フェールセーフ対策として、センサ等を活用してフェール状態を検知して安全性を確保する方法もあるが、本報告では機械的に逆操舵状態を回避する方法について示す。

操舵用 EHA のシリンダには、操舵動作時に台車旋回を助ける方向に加圧されるが、逆操舵動作時には台車旋回に逆らう方向に加圧されるためシリンダ内部が高圧となる。シリンダ内圧が規定圧を超えた場合に規定圧以上の圧力を逃がす弁（リリーフ弁）を用いることで制御圧を抑制し、逆操舵動作時の影響を軽減することは可能であるが、この方法では操舵動作保護のリリーフ圧力で操舵力が制約される。このため、逆操舵動作時にはより低い圧力で加圧側シリンダ内の作動油を逃がして操舵 EHA が発生する力を抑制し、操舵動作時にはシリンダ内の作動油を逃がさない構造が必要である。そこで、制御方向と実際のシリンダ伸縮方向（曲線方向）の一致を判別する弁とリリーフ回路を組み合わせた油圧回路をポンプとシリンダの間に追加することで、フェール動作を抑制する回路（フェールセーフ油圧回路）の開発を行った。

フェールセーフ油圧回路およびスプール弁の概略図を図5および図6に示す。フェールセーフ油圧回路はスプール弁2個とチェック弁4個で簡易に構成され、油圧シリンダと電動式油圧ポンプの間を接続している。スプール弁は、6つのポートを有したスリーブの中で串形状の弁体（スプール）がばねによって片側に保持された構造となっており、ばねの弾性力とポート B 圧力およびポート C 圧力のバランスによって、スプールが軸方向に移動し、流路を開閉する仕組みになっている。

図7に操舵制御時の動作メカニズムを示す。ここで図

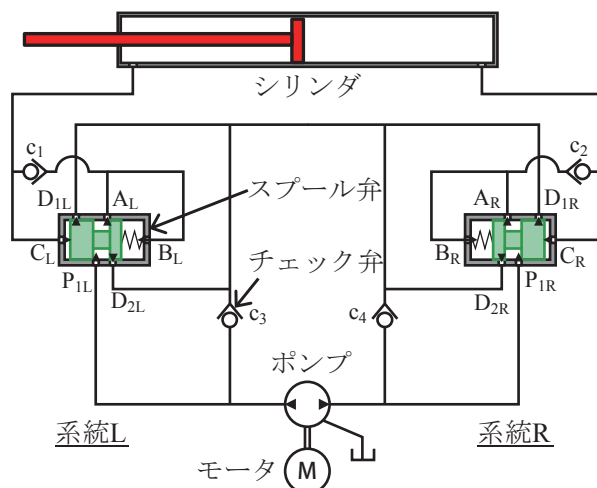


図5 フェールセーフ油圧回路

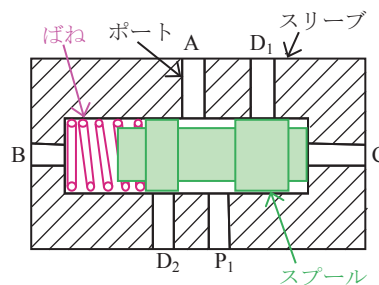


図6 スプール弁の構造

中の油圧回路の左半分を系統 L, 右半分を系統 R とする。緩和曲線通過中に操舵ばりの外力により系統 L 側にピストンが変位し、これと同時にポンプにより系統 R 側のシリンダを加圧しピストンを系統 L 側に変位させる（実際の操舵 EHA 変位と制御方向が同じ）場合、ポンプから回路に供給される作動油は、供給回路を構成した系統 R 側スプール弁 ($P_{1R} \rightarrow A_R$) を経由して、チェック弁 c_2 を通り系統 R 側のシリンダへ供給され、アシスト操舵力が発生する。

これに対して図8に逆操舵制御（フェール）時の動作メカニズムを示す。緩和曲線通過中に操舵ばりの外力により系統 R 側にピストンが変位し、これと同時にポンプにより系統 R 側のシリンダを加圧しピストンを系統 L 側に変位させる（実際の操舵 EHA 変位と制御方向が異なる）場合、逆方向の動作が発生し設定圧以上に系統 R 側シリンダ内の圧力が高くなり、スプール弁が動作することによりリリーフ回路が構成されて、系統 R 側シリンダ内の作動油は、スプール弁 ($C_R \rightarrow D_{1R}$) を経由して低圧側へと流れる。この動作とともにスプール弁においてバイパス回路 ($P_{1R} \rightarrow D_{2R}$) が構成されているため、ポンプから回路に供給される作動油は系統 R 側のシリンダには供給されず、アシスト操舵力を抑制することができる。なお、油圧回路は系統 L, R ともに同じ構成であるため、前記の動作例においてシリンダ加圧方向と外力

特集：車両技術

による変位の方向が逆転しても同様の動作をする。

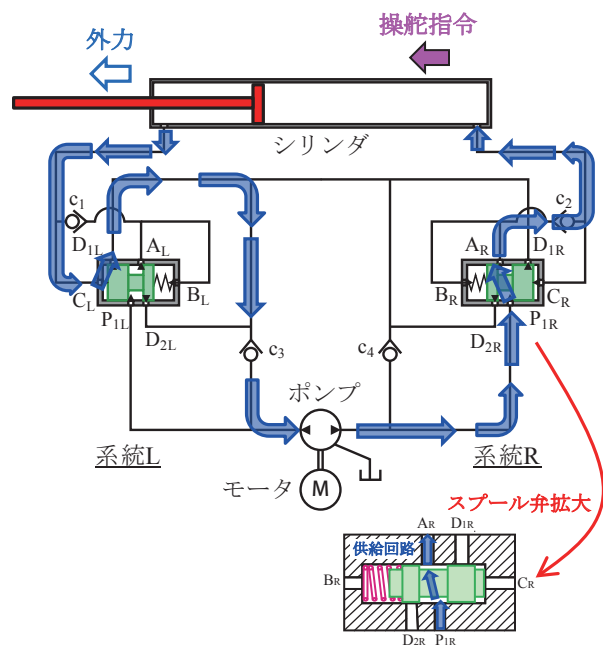


図7 操舵制御時の動作メカニズム

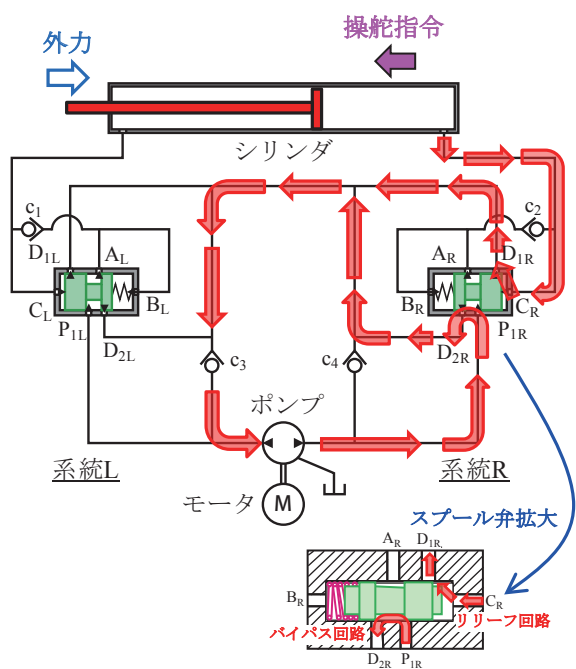


図8 逆操舵制御（フェール）時の動作メカニズム

4.2 動作検証試験および油圧回路シミュレーション

フェールセーフ油圧回路の動作検証試験ならびに同等の試験条件を設定したシミュレーションにおける逆操舵制御時の結果を図9に示す。曲線通過時における操舵ばり動作を模擬するためのシリンダを対向させ、ピストン速度4mm/sにて操舵用シリンダに強制変位を与えた。そして操舵用シリンダ動作中は、ポンプに対して逆操舵方向に吐出指令を継続した。図中の実線が試験結果、破

線がシミュレーション結果である。

操舵用シリンダ動作開始時にシリンダ内圧は6MPa程度まで急上昇するが、スプール弁が動作することで、シリンダ内圧を抑制できていることが確認できる。その動作はシミュレーションにおいても同等の結果を示している。検証試験とシミュレーションにおいてスプール弁動作後の定常的な残留圧力は、それぞれ0.2MPa、0.7MPaと若干の差があり、シミュレーションに用いたポンプモデルが動作検証試験に用いたポンプ特性を十分に再現できていない可能性が考えられる。動作検証試験結果とシミュレーション結果を詳細に比較すると、一部で両者に異なる点も見られるが、動作検証試験の傾向をおおむね再現するシミュレーション結果が得られており、油圧回路ならびにスプール弁の設計に活用できることを確認した。

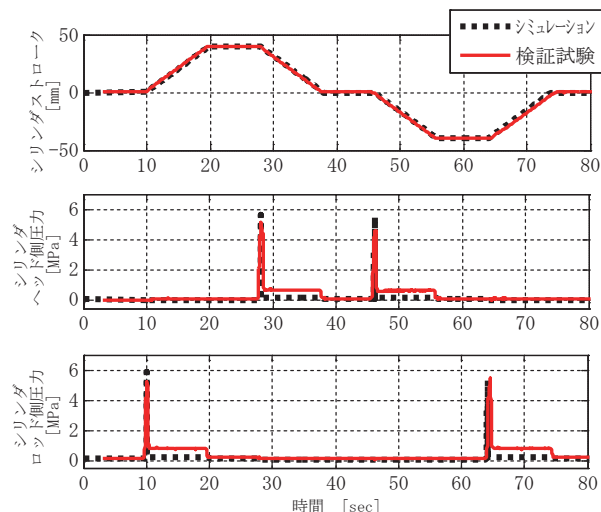


図9 動作検証試験およびシミュレーションの結果比較（逆操舵制御の場合）

4.3 フェールセーフ機能付操舵用EHAおよび性能確認装置試験

次にこの油圧回路シミュレーションを使用して、フェールセーフ油圧回路の配管径、スプール弁内のオーバーラップ量等のパラメータ設計を行い、操舵用EHAに内蔵可能なフェールセーフ油圧回路の製作を行った。図10にフェールセーフ油圧回路を内蔵した操舵用EHAの外観を示す。

図11にフェールセーフ機能付操舵EHAの性能確認装置試験の状況を示す。動作検証試験と同様に、操舵用EHAの対向位置に曲線通過時の操舵ばり動作を模擬する対向シリンダを設け、操舵性能およびフェールセーフ機能を確認した。

図12に操舵制御時、図13に逆操舵制御（フェール）時の操舵用EHAシリンダストローク、荷重指令および操舵力を示す。図12では制御方向と操舵ばり動作によるアクチュエータ変位が同じ方向であるため、フェール

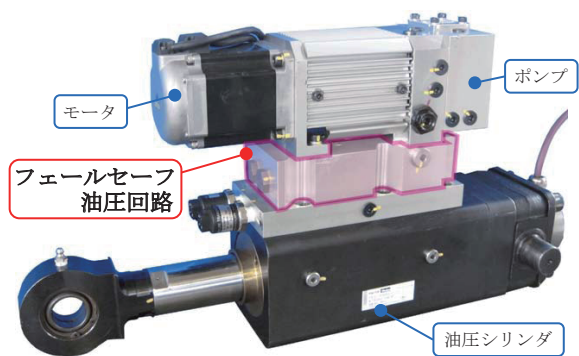


図 10 フェールセーフ機能付操舵用 EHA の外観

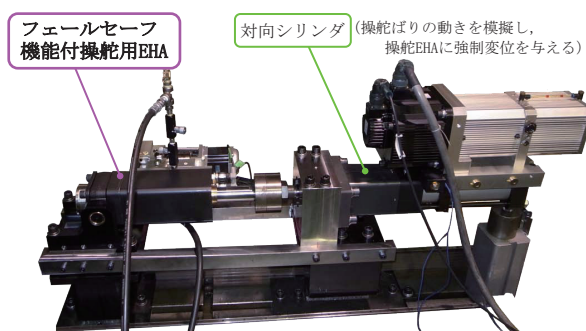


図 11 操舵用 EHA の性能確認定置試験状況

セーフ油圧回路が動作を阻害することなく操舵力が発生していることが確認できる。また図 13 では操舵ばり動作によるアクチュエータ変位と反対方向に、操舵用アクチュエータが力を発生するように指令が入力され、油圧ポンプが動作しているが、結果としてアクチュエータによる力は立ち上がり時にわずかに発生するだけで、全体を通して小さく、フェールセーフ性が確保できていることを確認できた。

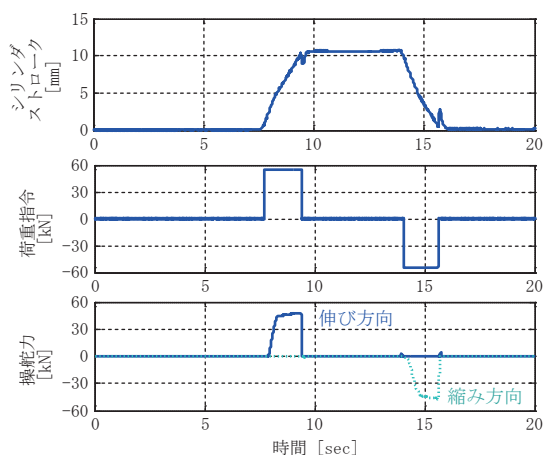


図 12 アクチュエータ制御圧力と横圧（操舵制御）

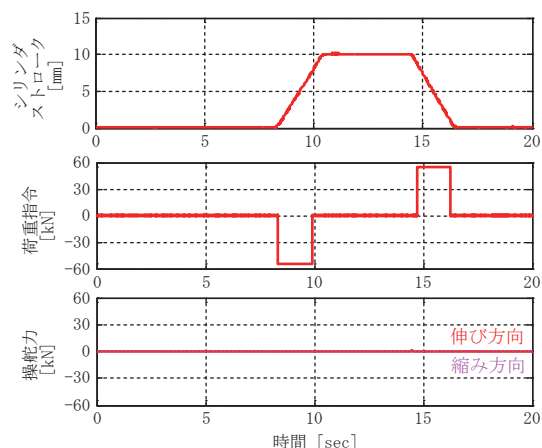


図 13 アクチュエータ制御圧力と横圧（逆操舵制御）

5. フェールセーフ機能確認走行試験

フェールセーフ機能付操舵用 EHA をボギー角連動操舵台車に搭載し、第 3 章とほぼ同じ条件にて所内走行試験を実施した（図 14）。図 15 に第 1 軸の外軌横圧、シリンダ圧力、操舵指令を距離軸で表示した結果を示す。入口緩和曲線において、制御なしに比べて操舵制御で外軌横圧の低減が確認された。また逆操舵制御時は、緩和曲線において操舵指令が入力されているにもかかわらず、フェールセーフ油圧回路が動作することによりシリンダ圧力が低下し、操舵力を発生させない状態を維持できることが確認された。さらに逆操舵制御中の外軌横圧については、制御なしとほとんど変わらない傾向を示した。

図 16 に付与した操舵力と入口緩和曲線における外軌横圧平均値の関係を示す。図 4 と比較しても分かるように、フェールセーフ油圧回路を装備することで、逆操舵制御の操舵力が増加しても、外軌横圧平均値はほとんど増加しない結果が得られ、実車両においてもフェールセーフ性が確保されていることを確認した。また操舵制御時は、操舵力の増加に伴い外軌横圧平均値が低減していることを確認できた。図 15 において操舵制御時のシリンダ圧力を見ると、距離 40～50m 付近で急激に圧力が低下しており、これはレール継目部角折れ等の軌道不整箇所を通過した際の外力によりシリンダ内圧が変動し、



図 14 所内走行試験状況

特集：車両技術

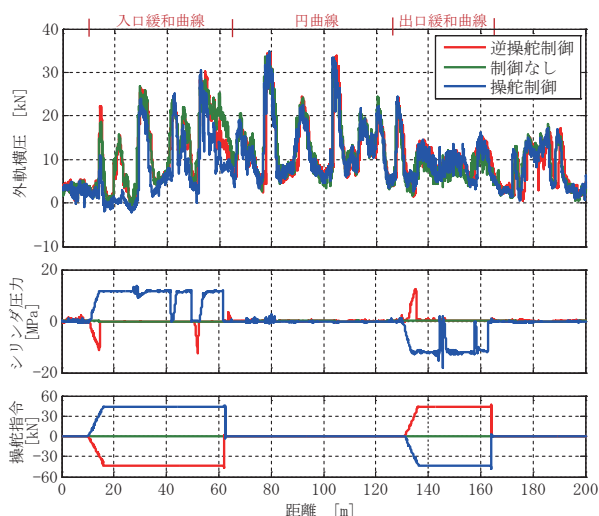


図 15 所内走行試験結果（フェールセーフ機能付）

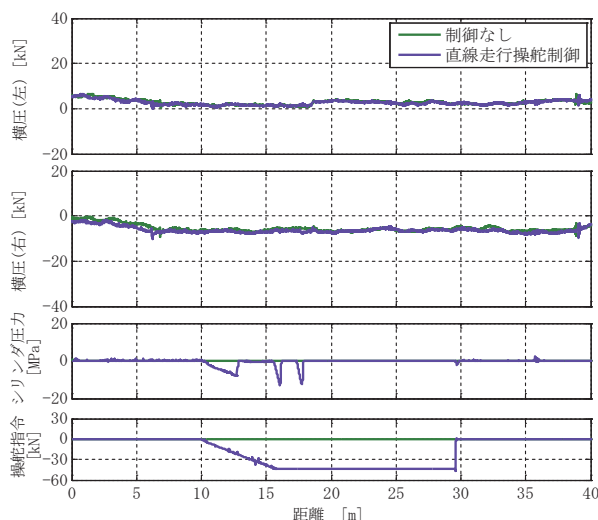


図 17 所内走行試験結果（直線走行操舵制御）

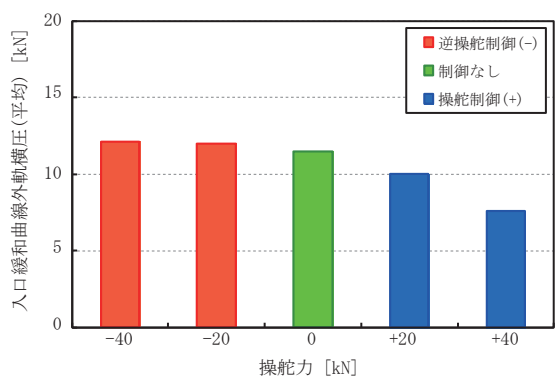


図 16 操舵制御による外軌横圧平均値の変化
（フェールセーフ機能付）

フェールセーフ油圧回路が動作したためと考えられる。しかし、この事象は瞬時的であり実効的な操舵力に与える影響は小さいと考えられる。

フェールセーフ機能付操舵用 EHA は、緩和曲線通過時の外力変化を検出して操舵力発生の有無を決定するので、直線走行時に操舵指令が入力されると、操舵力やスプール弁でのハンチング現象の発生により走行安定性に影響を与えることが懸念される。そこで直線区間において、走行速度 10km/h の惰性走行時に操舵力を付与する試験を実施した。図 17 に左右車輪の横圧、シリンダ圧力、操舵指令を距離軸で表示した結果を示す。直線走行操舵制御時には、操舵指令入力によりシリンダ圧力の上昇が若干見られるが、側受すり板の摩擦力により操舵ばりは旋回しないため、フェールセーフ油圧回路が動作し、シリンダ圧力が低下していることが確認できた。また制御なし時の横圧と比較して、横圧の増加はほぼ認められず、直線走行時においてもフェールセーフ性を確保していることが確認できた。

6. おわりに

ゴギー角連動操舵台車に適用可能な操舵用 EHA を開発し、所内試験線での実車走行試験において、緩和曲線区間の横圧低減効果を確認した。また逆操舵制御などのフェール時を考慮し、機械的なフェールセーフ機能を備えた油圧回路を考案し、動作検証試験およびシミュレーションにより性能を確認した。油圧回路シミュレーションで求めた油圧回路諸元をもとに製作したフェールセーフ油圧回路を操舵用 EHA に組み込み、定置試験および所内走行試験にて操舵性能を阻害することなく、緩和曲線区間および直線区間にてフェールセーフ性を確保できていることを確認した。また実用化に向けて、振動耐久試験や低温環境試験等を実施し、営業線走行に対応した操舵用 EHA の仕様を策定済みである。

謝 辞

本装置の開発にあたり、構内走行試験用台車を御提供頂いた北海道旅客鉄道株式会社、操舵用 EHA の製作にご協力頂いた株式会社 TAIYO の関係各位に心より感謝の意を表する。

文 献

- 1) 佐藤栄作：操舵台車における横圧と最近の操舵台車の技術動向，鉄道車両と技術，No.7, pp.12-19, 1997
- 2) 鴨下庄吾，石毛真，梅原康宏，山長雄亮，石栗航太郎：ゴギー角連動操舵台車へのアシスト操舵技術の適用，鉄道総研報告，Vol.26, No.3, pp.17-22, 2012
- 3) 梅原康宏，鴨下庄吾，石栗航太郎，下田恵輔：フェールセーフ機能付操舵用電動油圧アクチュエータの開発，第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，No.12, pp.77-80, 2012