

新幹線用空圧式フローティングブレーキキャリパの開発

狩野 泰*

Pneumatically Operated Floating Brake Calliper for Shinkansen Vehicles

Yasushi KARINO

A calliper is a device that pinches brake discs with any given force to create braking force. RTRI has developed a pneumatic floating calliper that is endowed with simplicity and outstanding maintainability without requiring the use of a pneumatic-hydraulic conversion device (i.e. a booster cylinder) and is interchangeable with the existing lightweight and compact hydraulic calliper used on Shinkansen vehicles. It is further possible to configure it with the same size as a hydraulic calliper. Testing on a braking test bench has verified that the pneumatic floating calliper offers a level of brake performance equivalent to that of the hydraulic calliper, and that the increase in temperature of the diaphragm can be suppressed to a level that does not adversely affect its lifespan thanks to the adiabatic piston arranged between the diaphragm and the brake lining.

キーワード：増圧シリンダ，楕円形ダイヤフラム押付機構，空圧式フローティングキャリパ

1. はじめに

新幹線の油圧ブレーキシステムでは、運転台からの電氣的な指令によりブレーキ制御装置が空気圧を調整し、その空気圧は増圧シリンダと呼ばれる空油圧変換装置で油圧に変換され基礎ブレーキ装置を動作させる。増圧シリンダには、滑走を検知すると空気圧を保持したまま油圧のみを減圧するか、空気圧を直接減圧することで再粘着を促す滑走防止機能が組み込まれている。現在は、在来線のように空気圧を細やかに制御することができる「空圧滑走防止型」が主流となり、増圧シリンダには空油圧変換としての機能のみが求められるようになってきている^{1) 2)}。このような技術開発の動向は、これまで培ってきた新幹線の油圧ブレーキシステムと同等の制御性を、空気圧のみで構成し確保できることを示した一例と言える。本稿では、空気圧を押付力に直接変換できる新たな機構を紹介するとともに、安全と信頼性に十分留意しながら、小型化と軽量化に関する開発や改良が進められてきた新幹線の基礎ブレーキ装置を基本として開発した、空圧式フローティングキャリパ^{3) 4)}について報告する。

2. 油圧式フローティングキャリパ

本研究では空圧式フローティングキャリパを開発するにあたり、図1に示す油圧式フローティングキャリパを基本とした。油圧式フローティングキャリパは1992年に

投入された新幹線300系電車で採用された。台車重量を軽減するため端ばりのないボルスタレス台車が採用されたことから、制輪子吊りが廃止され、基礎ブレーキ装置の本体でブレーキ反力を受け持つ構造に変更されている。また押付機構においても、小径（φ38～45mm）の油圧シリンダを本体に複数内蔵することで、ブレーキテコの倍力作用と同等の効果が得られる直動式の押付機構が具現化され、力の伝達を制輪子吊り等で受け持つテコ倍力

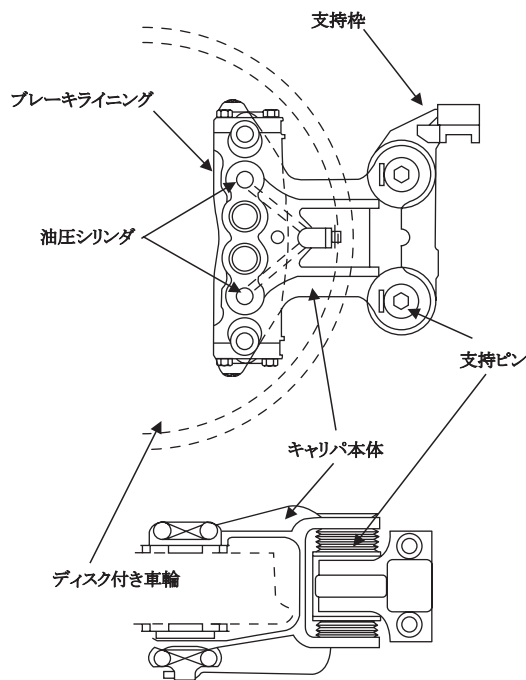


図1 油圧式フローティングキャリパ
(質量：70kg)

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

特集：車両技術

式押付装置に比べて大幅な摩耗部品の削減が達成された。

更に、この油圧式フローティングキャリパでは、新幹線の基礎ブレーキ装置として留意すべき機能を、最小の艤装スペースで達成する検討が試みられている。図2はフローティングキャリパの動作を示し、キャリパ本体が支持ピン部をスライドするフローティングと呼ばれる機構は、走行中に生じる車輪の傾きや輪軸の左右移動への対策として提案されたものである。また、フローティング機構の摺動抵抗を隙間調整装置の内部抵抗より遙かに小さく設計することで、ブレーキ動作の繰り返しによって拡大するディスクとライニングの摩耗隙間を常に初期値に戻し、ブレーキ扱いから制動力が得られるまでの空走時間が一定に保たれ、速やかなブレーキ動作が約束されている。油圧シリンダを本体に内蔵した直動式の押付機構とフローティング機構を組み合わせた「油圧式フローティングキャリパ」は、小型で軽量の基礎ブレーキ装置として、既存の新幹線で最も多く採用されている。

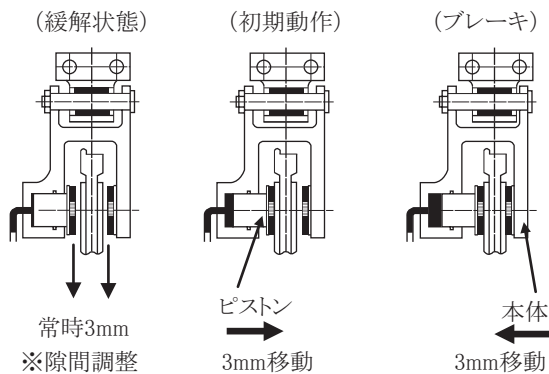


図2 フローティングキャリパの動作

3. 空圧式フローティングキャリパ

表1に新たに開発した空圧式フローティングキャリパの設計諸元、図3に空圧式フローティングキャリパの構造をそれぞれ示す。新たに開発した空圧式フローティングキャリパでは、テコやクサビといった仕組みを用いず大きな力を直接伝えることができる「楕円形ダイヤフラム押付機構」を作動アクチュエータとして用いている。ダイヤフラムは空気圧を押し力に直接変換できる単純な機構で、薄くて気密性の高いゴム膜を用いるため製作形状の自由度が大きいという特徴がある。そのため、限られたスペースを有効に利用できる楕円形状のアクチュエータとすることで、既存の新幹線で用いられている油圧式フローティングキャリパと同等の大きさに構成することが期待できる。但し、この方式はライニングの背面を直接押圧する構造であるため、ブレーキ時の摩擦熱が押付機構の主要部品に伝わりやすい。熱負荷を伴う新幹線での使用環境を考慮し、ダイヤフラムとライニングの間に断熱ピストンを配置することで摩擦熱によるダイヤ

フラムへの温度影響を防ぐ設計とした。開発した装置は42種の構成部品からなり、既に油圧式フローティングキャリパで十分な信頼性が確認されている、フローティング機構や隙間調整装置など32種の部品は従来のものをそのまま用いている。既存装置との互換性は、台車への取り付け方法や主要部品の交換周期においても共通としてあり、メンテナンス環境を変える必要のない装置と

表1 設計諸元

名称	項目	諸値
キャリパ	押付方式	楕円形ダイヤフラム押付機構
	シリンダ面積	201cm ²
	隙間調整機能	3mm (片側)
	機械効率	95%*
	無効圧力	35kPa*
	最大使用圧力	720kPa
	最大押付力	13.06kN*
ライニング	最大減速度	4.05km/h/s*
	摩擦材質	銅系焼結合金
	材料密度	5.3g/cm ³
	摩耗代	5.0mm (片側)
	有効面積	205cm ²
	目安温度	1000℃
	想定摩擦係数	0.40
	有効半径	303.8mm

※摩耗のない初期状態での設計値

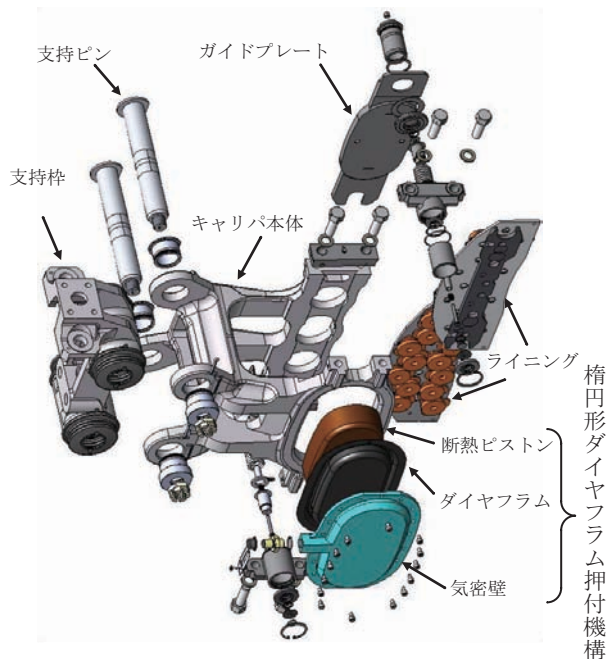


図3 空圧式フローティングキャリパの構造 (構成部品：42種類、質量：70kg)

した。なお完成した装置については、JIS E 4311に準拠した型式試験を実施し、新幹線の基礎ブレーキ装置としての安全と信頼性を検証した。

3.1 楕円形ダイヤフラム押付機構

図4に楕円形ダイヤフラム押付機構の動作原理を示す。空圧式フローティングキャリパ用のダイヤフラムは、1.3mmと極めて薄い作動膜であるが、強靱なアラミド繊維で重ね織られた基布を、耐寒性および耐熱性に優れたシリコンゴムで被覆した構造により、その限界耐圧は3MPaで、想定する最大制御圧力720kPaに対して約4倍の強度を有している。なお作動膜は、断熱ピストンとシリンダ壁の間に折り返し部分を設けながら組み込まれている。空気源から圧縮空気が供給されると、折り返し部分がピストン壁からシリンダ壁へと摩擦することなく滑らかに転がりながら移動し（以下、ローリング作用）、空気圧に比例した押付力がライニング背面に直接作用することで、ブレーキ力の発生機構として働くこととなる。この自然な作動膜のローリング作用と高い限界耐圧により、ダイヤフラムを用いた押付機構は優れた耐久性と高い機械効率を得ることができる。このような、楕円形ダイヤフラム押付機構は構成部品が少ないことも利点の一つであり、新幹線で培われた信頼性の高い油圧式フローティングキャリパの本体構造と組み合わせることで、メンテナンスで求められる作業の簡素化と低減についても期待できる装置となる。

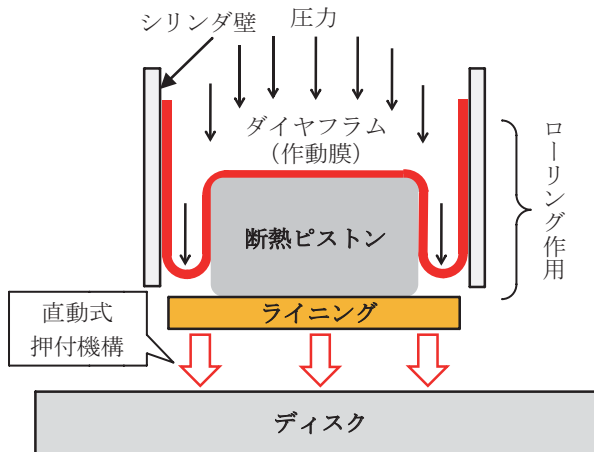


図4 楕円形ダイヤフラム押付機構の動作原理

3.2 ダイヤフラム

ゴム製品の特徴である柔軟性は環境温度により変化し、特に低温下では脆化が進むことで本来の弾性を失い、室温状態に比較して、機能、性能、耐久性が著しく低下することが考えられる。天然ゴムはイソプレンという物質が数千個以上もつながった分子鎖からなる高分子化合物である。分子鎖の運動性はその化学構造と温度に依存し、高温から低温へ「液体＞ゴム状態＞ガラス状態」

と変化することが知られている。高分子物質がゴムとしての特性を示すのは、分子鎖の運動性が高い状態に限られており、低温下で柔軟性を維持するためには、ゴム状態（分子運動性が高い）からガラス状態（分子運動性が低い）に変化する転移点（以降、ガラス転移温度）の低い生ゴムを選択することが重要となる。表2に生ゴムとして利用される高分子物質のガラス転移温度を示す。他の生ゴムと異なり、シロキサン結合（ケイ素-酸素）からなるシリコンゴムは化学的安定性が非常に高く、耐候性、耐水性、耐油性に優れるとともに、ガラス転移温度においても-120℃前後と最も低い値を示す生ゴムである。

表2 生ゴムとして利用される高分子物質のガラス転移温度

名称		転移温度 (°C)
汎用ゴム	天然ゴム	-56
	乳化 SBR	-54
	溶液 SBR	< -70
	シスポリブタジエン	< -70
	ブチルゴム	-67 ~ -75
耐油耐熱ゴム	エチレンプロピレンゴム	< -70
	ニトリルゴム (N-20%)	-47
	ニトリルゴム (N-45%)	-22
	クロロプレンゴム	< -70
	シリコンゴム	-110 ~ -132
	フッ化ビニリデン-ヘキサフルオロプロピレン	-7 ~ -25

ゴム工業便覧 第4版 P175 日本ゴム協会 参照

表3に主なダイヤフラム材の低温特性を示す。ダイヤフラムに用いるゴムの低温特性を評価する方法としては、JIS K6261で規定される低温ねじり試験が適切と考えられることから、主なダイヤフラムで用いられている各ゴム材について低温ねじり試験による比較評価を行った。表中のRM（比モジュラス）とは「ねじり剛性」の常温時との比で、式(1)により算出される。比モジュラス値が2, 5, 10を示す温度を、それぞれ t_2 , t_5 , t_{10} と定めた。ダイヤフラムとして用いる際、目安とする比モジュラス値は5とすることが一般的であり、各ゴム材の t_5 温度が低温下の保証温度となる。本試験結果より、北海道等の厳しい使用環境を前提に保証温度として-40℃の低温下で確実に動作する押付機構とする場合でも、シリコンゴムは十分に低温環境を満足するダイヤフラム材であることが認められた。

$$RM = \frac{(180 - \theta')}{\theta'} \bigg/ \frac{(180 - \theta_0)}{\theta_0} \quad (1)$$

RM：比モジュラス

θ_0 ：23 ± 2℃の試験片ねじれ角度

θ' ：測定温度における試験片ねじれ角度

特集：車両技術

表3 主なダイヤフラム材の低温特性

材質	t ₂ (RM=2)	t ₅ (RM=5)	t ₁₀ (RM=10)
FKM	-25℃	-29℃	-31℃
EPDM	-14℃	-36℃	-43℃
VMQ	-41℃	-44℃	-44℃

FKM：フッ素ゴム

EPDM：エチレンプロピレンゴム

VMQ：シリコンゴム

表4にJIS E 4311に準拠した型式試験で得られた主要部品の交換周期を示す。シリコンゴムは耐熱性についても優れ180℃で連続的に使用できるが、極低温では脆化する傾向にある。そこで、型式試験による耐久試験および環境試験を実施した。試験の結果、室温環境においては4全検周期に相当する120万回の繰り返し動作を行い、従来装置と同等の耐久性が得られた。また、低温環境を模擬し-40℃の雰囲気中で15万回、高温環境においても120℃の雰囲気中で15万回、合計30万回の1全検周期に相当する繰り返し動作を行い、従来装置(-20℃~80℃)よりも厳しい温度下でも同等の耐久性が確保できることを確認した。

表4 型式試験で得られた主要部品の交換周期

部品名称	交換規定		
	距離(動作)または期間	時期	時期
キャリパ本体	—	15年	—
ダイヤフラム	120万km (30万回)	3年	1全検
断熱ピストン	120万km (30万回)	3年	1全検
隙間調整装置	240万km (60万回)	6年	2全検

4. 実物大台上試験

開発した装置の列車速度に応じたブレーキ性能を確認するため、設計諸元に基づき式(2)により慣性質量、式(3)によりブレーキライニングの押付力を設定し、図5に示す実物大台上試験を実施した。

$$I = We \cdot Rw^2 \tag{2}$$

$$F = We \cdot \frac{Rw}{2f} \cdot \frac{\beta}{3.6} \tag{3}$$

I：慣性質量 (kg・m²)

We：等価質量 (kg)

Rw：車輪半径 (m)

F：押付力 (kN)

Rd：ディスク有効半径 (m)

f：想定摩擦係数

β：減速度 (km/h/s)

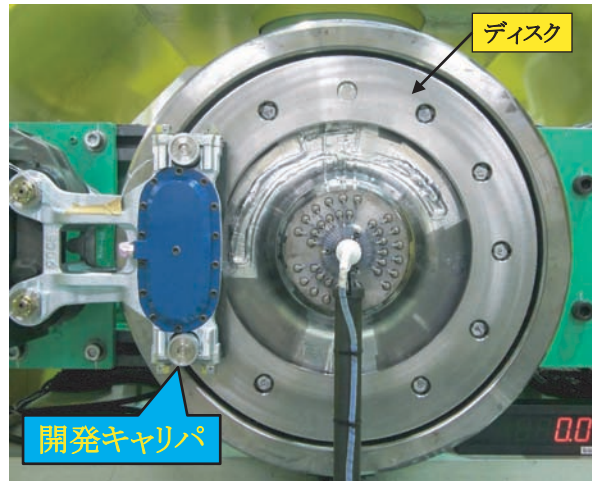


図5 実物大台上試験の様子

4.1 ブレーキ性能

表5に設定したB7ブレーキパターン、表6に設定したEBブレーキパターンをそれぞれ示す。本試験は、車両質量50ton、最高速度300km/hまでの停止ブレーキ性能を確認するもので、既存新幹線の常用最大(B7)および非常(EB)ブレーキの設定減速度に合わせた押付力パターンを設定し、各ブレーキ初速度において3回ずつのブレーキ試験を実施した。

図6にブレーキ初速度と平均摩擦係数、図7にブレーキ初速度と停止距離の関係をそれぞれ示す。その結果、

表5 設定したB7ブレーキパターン

初速度 (km/h)	減速度 (km/h/s)	押付力 (kN)	停止距離 (m)
0	2.700	8.708	—
30	2.700	8.708	46
70	2.700	8.708	252
120	2.417	7.795	771
170	2.135	6.886	1662
230	1.796	5.792	3372
270	1.570	5.064	5031
300	1.400	4.515	6636

表6 設定したEBブレーキパターン

初速度 (km/h)	減速度 (km/h/s)	押付力 (kN)	停止距離 (m)
0	3.640	11.740	—
30	3.640	11.740	34
70	3.640	11.740	187
120	3.640	11.740	549
170	3.323	10.717	1130
230	2.943	9.492	2200
270	2.690	8.676	3189
300	2.500	8.063	4106

ブレーキ初速度300km/hまでのB7ブレーキ扱いは、想定していた摩擦係数0.4を下回ることなく計画通りのブレーキ性能が確認された。しかし、EBブレーキの扱いでは、初速度300km/hの条件において摩擦係数が0.4を下回り、計画停止距離を僅かに満足できなかった。高負荷条件におけるブレーキ性能の不足は、ライニングの摩擦特性に起因したものと考えられ、今後はライニングの潤滑成分と耐摩耗成分の配合比調整により摩擦特性の改善を進める。

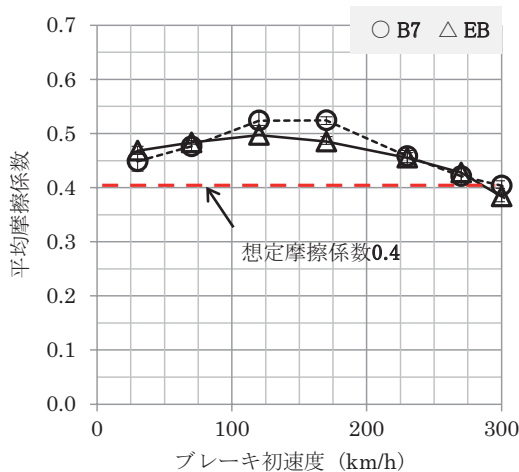


図6 ブレーキ初速度と平均摩擦係数

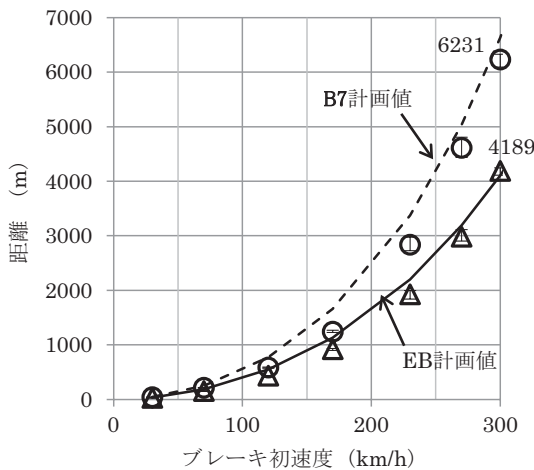


図7 ブレーキ初速度と停止距離

4.2 断熱性能

楕円形ダイヤフラム押付機構は、空気圧を押付力に直接変換できる単純な機構であるが、ライニングの背面を直接押圧する構造であるため、ブレーキ時の摩擦熱が押付機構で最も重要なダイヤフラムに伝わりやすい。そこで、ライニングを押すピストンに相当する部分に断熱性を持たせる必要がある。ここでは断熱性の指標として熱伝導率を用いる。一般に、物質内でその温度勾配に比例した熱流束 q (単位時間に高温部から低温部に向かって

流れる熱量) は、フーリエの法則として式(4)で表される。式(4)から分かるように、高い断熱性を得るためには、熱伝導率の小さな材料を選択し、断熱材を可能な限り厚くすることが必要である。ダイヤフラムとライニングの間に配置した断熱ピストンは、必要な断熱性を経済的に得るため、在来線の踏面ブレーキ装置に幅広く採用されている合成制輪子をベースに設計したもので、熱伝導率 $0.78\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、厚さ 45mm としてある。この値であれば、ライニング温度が 900°C を超える高速からのブレーキ動作においても、ダイヤフラム温度は目安温度 120°C 以下に抑制可能となる。

$$q = -\lambda \cdot (d\theta / dx) \tag{4}$$

- q : 熱流束 (W/m^2)
- λ : 熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
- θ : 温度 (K)
- x : 距離 (m)

図8に実物大試験で測定したダイヤフラム接触面の最高温度、図9に停留ブレーキで上昇するダイヤフラム接触面温度の推移をそれぞれ示す。

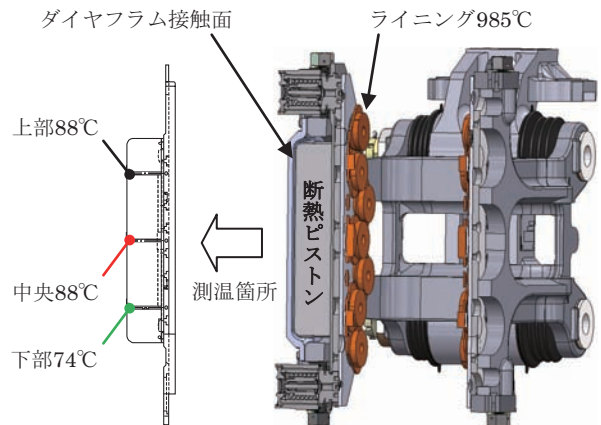


図8 実物大試験で測定したダイヤフラム接触面の最高温度

試験では断熱性の確認を目的として、初速度 360km/h から EB 停止ブレーキを扱い、停留ブレーキを 100 分間動作した状態のダイヤフラム接触面温度を測定することで、ブレーキ摩擦熱の伝導に対する断熱ピストンの効果を確認した。その結果、ダイヤフラム接触面のブレーキ中における温度上昇は 10°C 以下と些少であり、最高温度は停止から約 40 分後の停留ブレーキの動作中に観測された。最高温度は、何れの測定箇所でも 100°C 以下 (上部 88°C 、中央 88°C 、下部 74°C) であり、環境試験において検証されたダイヤフラム寿命へ悪影響を及ぼさない目安温度 120°C 以下に抑制できる見通しが得られた。

特集：車両技術

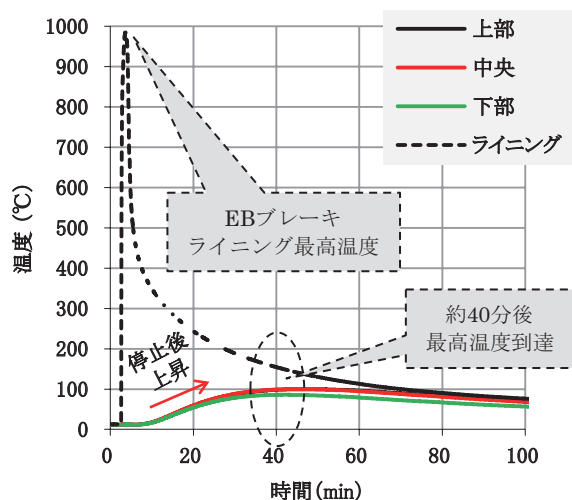


図9 停留ブレーキで上昇するダイヤフラム接触面温度の推移

5. まとめ

本研究では、安全と信頼性に十分留意しながら、小型化と軽量化に関する開発や改良が進められてきた新幹線の基礎ブレーキ装置を基本として、保守性に優れた空圧式フローティングキャリパを開発した。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 既存の油圧式フローティングキャリパと置き換えるためには、油圧シリンダに変わる直動式の押付機構が必要であり、保守性に優れた小型で高出力の空気圧アクチュエータとして「楕円形ダイヤフラム押付機構」を考案した。
- (2) 開発した空圧式フローティングキャリパは42種の構成部品からなり、フローティング機構や隙間調整装置など32種の部品について、既存の油圧式フローティングキャリパと互換性を持たせた。更に、台車への取り付け方法や主要部品の交換周期も共通とすることで、メンテナンス環境を変えることなく受け入れ可能な装置とした。
- (3) 実物大台上試験では、既存新幹線の常用最大および非常ブレーキ試験を実施し、油圧式フローティングキャリパと同等のブレーキ性能が得られることを確

認した。なお、初速度360km/hからのブレーキ中においてもダイヤフラムの温度上昇は10°C以下と些少であり、停留ブレーキ動作中に観測された最高温度もダイヤフラムの目安温度120°C以下に抑制できることを確認した。

6. おわりに

鉄道車両の機械ブレーキは、車輪やディスクと呼ばれる回転体に対して、制輪子を押付ることで摩擦力を発生させ列車を止めるものであることから、押付力を生む基礎ブレーキ装置の構造は単純で繰り返しの動作に耐える堅牢なものでは不十分な。開発した空圧式フローティングキャリパは、テコやクサビといった仕組みを用いず空気圧を押付力に直接変換できる「楕円形ダイヤフラム押付機構」の考案によって、シンプルで信頼性の高い基礎ブレーキ装置にできる見通しが得られた。今後は現車試験を予定しており、実用化に向けた最終段階として性能評価や保守性などの検証に取り組む予定である。

謝辞

本装置の開発にあたり、多大なご協力を頂いたKYB(株)、藤倉ゴム工業(株)、上田ブレーキ(株)の関係各位に心より感謝の意を表す。

文献

- 1) 熊谷則道, 内田清五, 長谷川泉, 加藤博之, 渡辺清一, 樋口正勝: 新幹線用すべり率滑走制御システムの開発, 機構論, 第6回交通・物流部門大会, pp.217-220, 1997
- 2) 熊谷則道, 内田清五, 長谷川泉, 仲野政志: 新增圧シリンダを用いた新幹線用すべり率滑走制御システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.12 No.5, pp.5-10, 1998
- 3) 狩野泰, 大河原義之: 空圧フローティングキャリパの開発, 第16回鉄道技術シンポジウム講演論文集, pp.4-15, 2009
- 4) 狩野泰: 新幹線ブレーキ用空圧式フローティングキャリパの開発, R&m (社団法人 日本鉄道車両機械技術協会誌), Vol.19 No.3, pp.25-28, 2011