

技術論文

建設機械用オイルシールのブリスタ生成メカニズム（第2報）

The Generation Mechanism of Blisters Formed on Oil Seals for Construction Machinery (The Second Report)

今野 芳美
Yoshimi Konno
長田 哲
Tetsu Nagata
小西 晃子
Akiko Konishi
山本 浩
Hiroshi Yamamoto

オイルシールは、オイルの封止および外部からの異物侵入防止のため、回転軸を持ったコンポーネントに使用されている。

オイルシールの不具合の一つとして、シールリップ摺動面近傍にブリスタと呼ばれる円形状の突起物が発生、成長することで生じる油漏れがある。ブリスタについては、従来から生成メカニズムが提唱されており、これまでもそれに基づき都度対策を実施しているが、ブリスタによる不具合は依然として散見される。

前回の第1報（Vol. 62, No. 169 掲載）では、実機で確認されたオイルシールメインリップに発生したブリスタを詳細な現品調査結果により、その発生メカニズムを推定した。

本報では、その推定メカニズムを実験および現品で検証した結果について、前報では推定できなかった要因も含めて報告する。

Oil seals are used in components that have a rotating shaft, to keep oil inside and prevent entry of foreign matter.

Blisters are one of the problems found in oil seals. These are round bumps that may form around the sliding surfaces of seal lips. As they grow they will cause oil leakage. Countermeasures have been taken based on the generation mechanism of blisters explained, however, problems of blisters are still found occasionally

In the previous report, we estimated the generation mechanism of blisters which occurred in oil seals by investigation in detail.

In this report, we have reported results of verifying the estimated mechanism by experiment and observation, including other factors which we could not find out in the previous report.

Key Words: オイルシール, ブリスタ, 油漏れ

1. はじめに

オイルシールは、オイルなどの液体を封止し、また外部からの異物の侵入を防ぐことを目的として使用されている。建設機械においては、エンジン、油圧ポンプ・モータ、トランスミッション等の回転軸を持ったコンポーネントがいくつも搭載されており、これらに封入されている様々な種類のオイルをオイルシールが封止している。

しかし、使用している途中でオイルシールの密封作用が低下し、コンポーネントからオイルが漏れてしまう場合がある。その際、外部へのオイル流出や、最悪の場合はコンポーネント自身が正常に動作しなくなる可能性があるため、オイルシールには高い信頼性が求められる。

オイルシールの密封作用が低下してしまう要因は、リ

ップの異常摩耗や、リップの反転、リップゴム材の劣化等、様々である。中でも従来から図 1 に示すようなブリスタと呼ばれるシールリップ先端の大気側に発生する突起物による油漏れの不具合が散見されている。これまでブリスタによる不具合が発生した場合には、シール形状変更やゴム材質変更などで対応してきた。しかし、ブリスタの発生を完全に防ぐには至っておらず、その防止のためにはブリスタ生成メカニズムを明らかにすることが必要である。

前報^[1]では、このブリスタの生成メカニズムを検討するために、実際に車体に取り付け使用されたオイルシールで、ブリスタの発生が認められたものについて、ブリスタの大きさの観点で体系的に調査を実施し、ブリスタの生成から成長に至る過程を観察した。

その結果、建設機械用オイルシールのプリスタは、従来考えられてきたメカニズム^{[2][3][4]}とは異なり、プリスタの生成と成長に、ゴム内部のき裂の生成と進展が深く関わっていることが分かった。

本報では、このゴム内部のき裂生成・進展の駆動力について検証を試みたので、その結果について以下報告する。



図1 オイルシールに発生したプリスタの例^[1]

2. プリスタ生成メカニズム

車体に使用されたオイルシールに発生したプリスタの観察結果から考察すると、建設機械用オイルシールにおけるプリスタの生成から成長に至る過程は、大きく3段階に分けられると前報にて推定した(図2参照)。

- ①き裂起点の生成
摺動面直下のゴム内部のフィラー周りに空洞が発生することにより微小なプリスタが生成する。この小さな空洞がゴム内部のき裂の起点となる。
- ②き裂の進展
フィラー周りの空洞(=き裂起点)が連通することによりプリスタが成長する。
- ③き裂の拡大
き裂の進展が表面に達した場合、き裂内部と摺動表面が連通し、プリスタ内部にオイルが流入・充満する。

しかし、プリスタの起点となる「フィラー周りの空洞(①き裂起点の生成)」がなぜ発生するのか、オイルシールの油漏れが生じるほどの「プリスタの膨らみ(②き裂の進展, ③き裂の拡大)」がなぜ発生するのか、というプリスタの生成・成長に必要なゴム内部のき裂生成・進展の駆動力は明確になっていなかった。

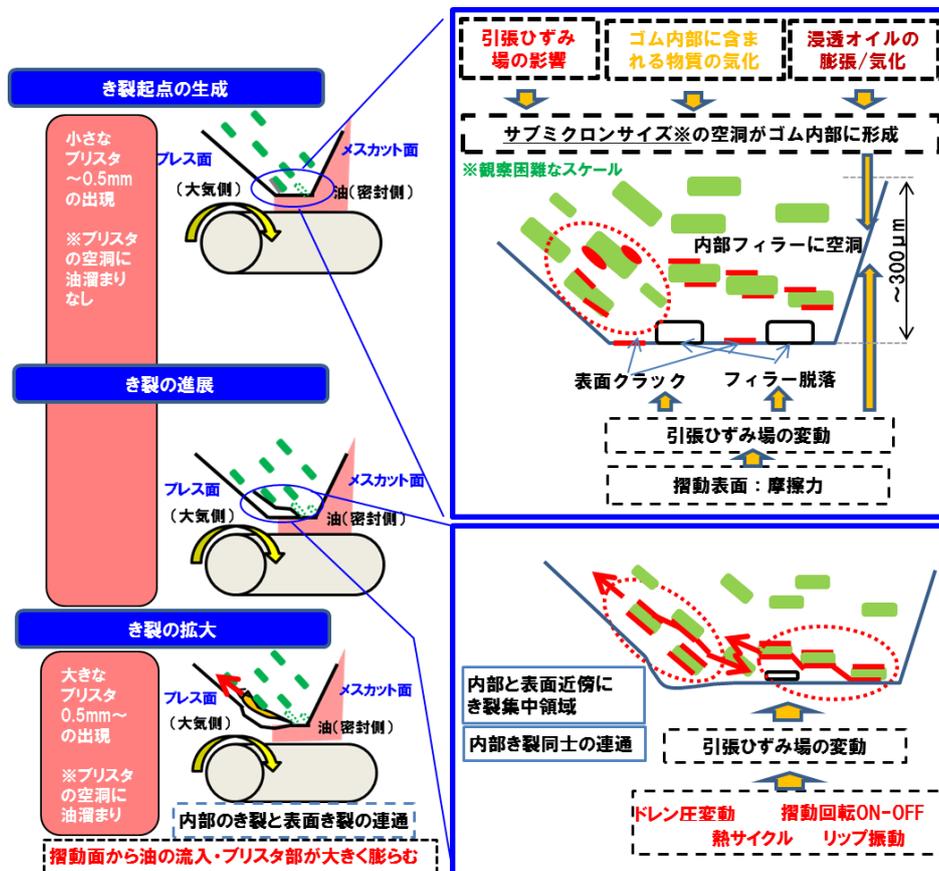


図2 建設機械用オイルシールのプリスタ生成メカニズム^[1]

3. メカニズムの検証

3.1 フィラー周りの空洞の生成要因

前報において「フィラー周りに生成する空洞が、ゴム内部のき裂の起点となる」と推定したが、その空洞がなぜ生成するのかは特定できていなかった。従来提唱されてきたメカニズムでは「気化オイルのゴム内部への浸透・凝集のくり返しによりプリスタ生成に至る」とされてきたが、これまでの現品調査においては、0.5 mm 以下の小さいプリスタの内部で油溜まりは確認されていない。

空気でも同様にゴム内部への浸透（拡散）・凝集のくり返しによりプリスタ起点が生成するのではないかと考え、後述するオイルシール単体を用いたヒートサイクル試験による検証を行った。試験条件を表 1 に示す。

ドライ環境下でヒートサイクルを供試シールに与えて検証を実施した。

表 1 ヒートサイクル試験条件

ヒート サイクル 条件	加熱	140℃×2h保持 (大気炉)
	冷却	水冷 (室温：約20℃)
サイクル数 (回)	12	



図 3 試験後のオイルシールリップ表面

試験後、オイルシールのメインリップの大気側表面に、微小な膨らみを確認した（図 3 参照）。この膨らみの内部を確認するため、集束イオンビーム（FIB; Focused Ion Beam）により表面から微小な断面を作製し、観察を行った。観察結果を図 4 に示す。表面近傍のフィラー（黒く均質に見える部分）の周りに空洞を確認した（矢印部）。高温保持中にゴム内部に拡散された大気が、冷却時に外に出ることができずにこの空洞内に凝集したと推定される。

このように、熱サイクルが、プリスタの起点となるフィラー周りの空洞形成の要因の 1 つであることを確認した。

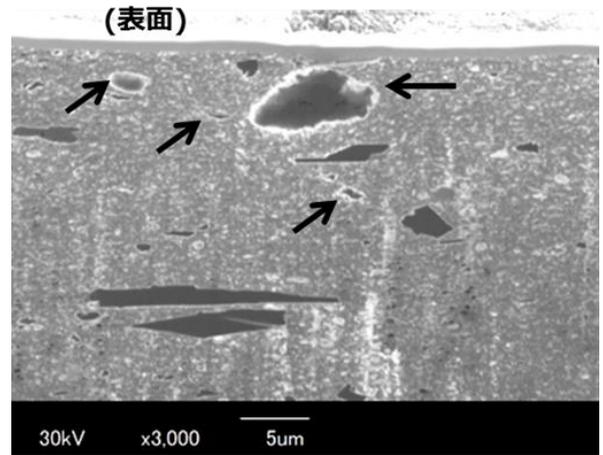
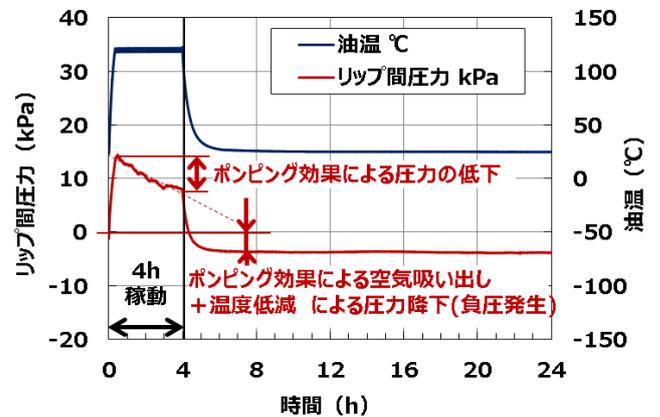


図 4 リップ表面膨らみの表層断面（図 3；A-A 断面）

3.2 プリスタ膨らみ形成の駆動力

オイルシールの油漏れに影響するほどのプリスタの膨らみを形成させる駆動力について、後述する仮説を立て、検証を実施した。

オイルシールは、回転時のポンピング作用により流体が大気側から密封流体側に流れ、油を封止しているが、ダストリップがある場合、リップ間の大気も密封流体側に吸い込まれて、圧力が低下する。その後停止し冷えていくと更に圧力が低下し、リップ間の空隙に負圧が生じることを確認している（図 5 参照）。



回転数：2,050rpm
内圧：0.05MPa
供試油：純正パワーラインオイル TO10 (SAE10W)

図 5 リップ間圧力測定試験結果

そこで、図 6 の模式図に示すような仮説を立てた。高温での連続運転後に温度が低下すると、リップ間に負圧が生じる。この負圧がメインリップ大気側に作用してリップ表層を引っ張り、シール内部のき裂を拡張することでプリスタの膨らみが成長し、内部に油が流入するのではないかと考えた。



図6 ダストリップ付オイルシールの接触部模式図

そこで、実稼働時のポンピング作用+停止時のコンポーネント全体の冷却による圧力降下を想定し、リップ間に負圧を強制的にかける試験を実施した。

試験の手順は、まず「予備試験」でオイルシールの摺動面を形成すると同時にゴム内部にき裂起点を成長させるよう、高温でサイクル運転を実施した。これにより作成された摺動面にカッタで強制的にプリスタのき裂進展方向にあわせて切りこみを入れたオイルシールをシャフトに装着し、リップ間空隙を負圧に設定し保持した(表2)。

表2 プリスタ膨らみ検証試験条件

試験 サイクル	予備試験		負圧試験	
	6h/サイクル	稼働 停止	24h/サイクル	
回転数 (rpm)	2,050	稼働 4h / 停止 2h	(静止)	
油温 (°C)	120	室温	(室温放置)	
内圧 (MPa)	0.05	(リップ内圧は未計測)	-0.05	(負圧印加)
リップ間圧 (MPa)	0.10		0.10	
サイクル数 (回)	8		1	
供試油	純正パワーラインオイル T010 (SAE10W)			

試験後、供試シールを確認すると、リップ表面の切込み部にプリスタの様な膨らみが発生しており(図7参照)、ピンセットで押すと内部から油が出てきた。このリップ膨らみ部をカッタで切断した断面を図8(a)に示す。図8(b)に示す負圧試験前の他サンプルの断面と比べると、切りこみの空隙が負圧による影響で広がっていることが確認できる。今回、き裂の進展まで確認できなかったが、時間を増やせばき裂が進展するものと推定している。

このように、メインリップ大気側に生じる負圧が、プリスタの成長を促進する要因の1つであることが明らかになった。

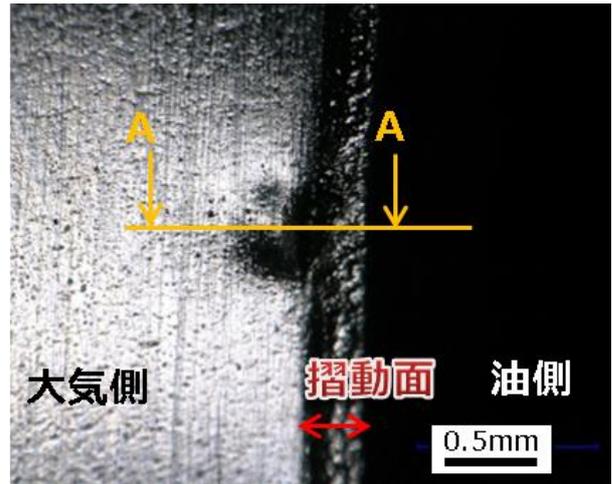
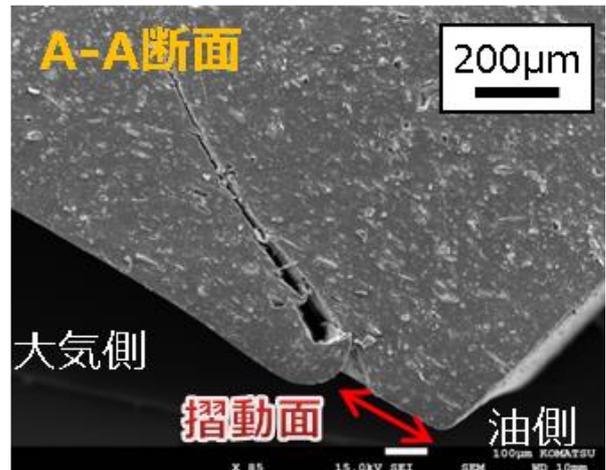
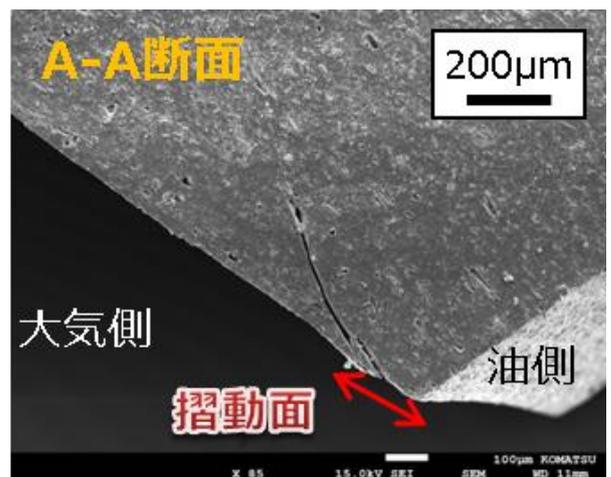


図7 検証試験後のリップ表面 (切込み部に生じた膨らみ)



(a) 負圧試験後のA-A断面



(b) 負圧試験前の他サンプルのA-A断面

図8 検証試験後のリップ表面膨らみ部の断面

3.3 ブリスタ生成メカニズムのまとめ

前報では、ブリスタの生成と成長には、ゴム内部のき裂の生成と進展が深く関わっていることまでがわかっていたが、今回、以下の稼働環境要因が加わることでブリスタの生成・成長が促進されることが分かった。

①き裂の起点の生成

〈フィルター周りの空溜〉

熱サイクルによって生じるゴム内部への大気の拡散・凝集

〈摺動表面のき裂〉

摺動トルクによって生じる引張力

②③き裂の進展、油の流入

リップ大気側に生じる負圧による引張力

4. 現品調査による推定メカニズムの検証

4.1 ブリスタ発生シールの現品調査によるメカニズム推定

コンポーネントベンチ試験においてブリスタが発生したオイルシールの現品調査を実施した。発生したブリスタの内訳を図9に示す。各々のブリスタに切込みを入れて内部の油溜まりを確認すると、最も大きかったブリスタ（サイズ0.9 mm）以外のブリスタについては内部に油溜まりは確認されなかった（図9参照）。

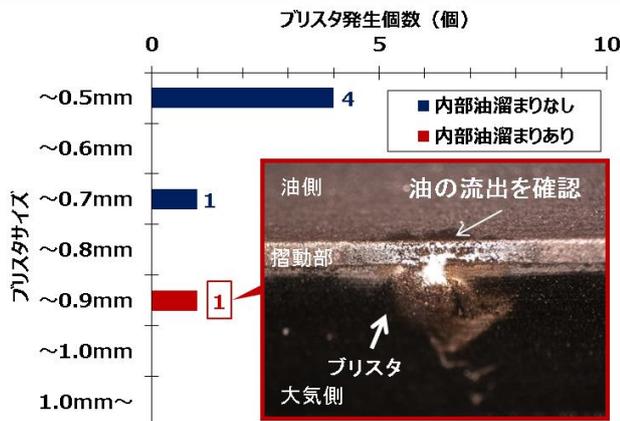


図9 コンポーネントベンチ試験でのオイルシールブリスタ発生内訳

現品を詳細に調査していくと、ブリスタ近傍の摺動面の面荒れ、フィルターの脱落等が確認された（図10）。この原因としては、十分な潤滑油量が摺動面に供給されなかった可能性が考えられる。この貧潤滑条件下で、摺動トルク（摩擦係数）が大きくなったことで、表面および内部のき裂（図11）が進展、最終的に表面き裂と連通し、油が流入したものと推定した。

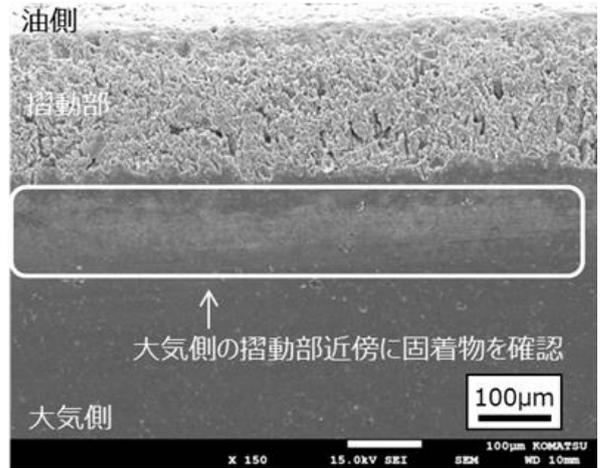


図10 ブリスタ近傍のリップ表面

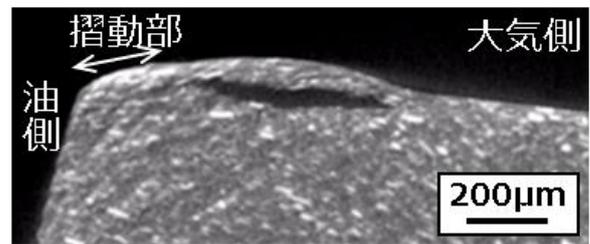


図11 ブリスタ断面のX線CT像
(ブリスタサイズ：0.7 mm)

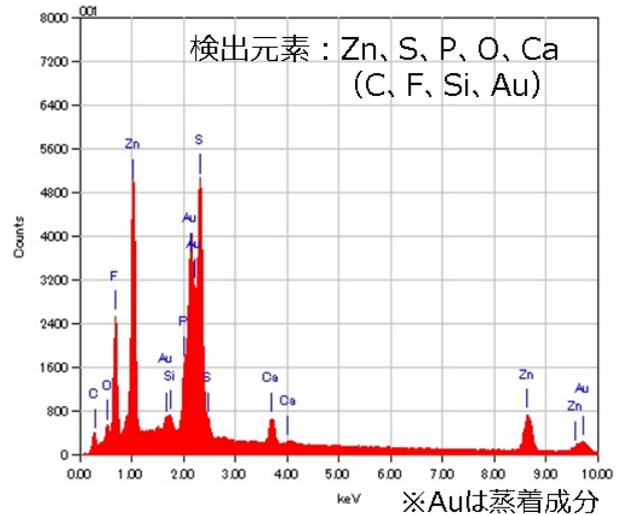


図12 ブリスタ近傍のリップ表面で確認された固着物の元素分析結果（EDS）

また、大気側の摺動部近傍に確認された固着物（図10参照）についてエネルギー分散形X線分光器（EDS; Energy Dispersive X-ray spectrometer）により元素分析を実施した。その結果、固着物の主成分はZn, S, Pといったオイル添加剤成分であることがわかった（図12）。このように、オイル添加剤成分由来の固着物が生成するということは、局部的に高温にさらされていたと推定される。

4.2 ブリスタ発生メカニズムの検証

本事例におけるブリスタ発生の主要因を摺動トルクによる発熱及びメインリップ大気側に作用する負圧と想定し、摺動トルクを低減するために緊迫力を4割低減し負圧発生がないシングルリップシール（以下、検証シール）で比較・検証試験を行った。

まず、同一コンポーネントに「ブリスタ発生シール」「検証シール」を順次組込み、各々回転数を変化させた時のリップ温度を計測した。「PV値（シール緊迫力と周速の積）」「リップ温度上昇」でまとめた結果を図13に示す。

摺動発熱（ \propto リップ温度上昇）は摩擦係数と接触荷重（面圧）と周速の積に比例するので、グラフの傾きは摩擦係数に対応することになる。概ね同じ近似線上に乗ることから、各オイルシールの潤滑状態には大きな差がないと考えられ、緊迫力を下げることによってリップ温度上昇が半減できることが分かった（図13）。

検証シールにて同様にコンポーネントベンチ試験を実施した結果、ブリスタの発生は微小サイズ1個のみの発生となり、ブリスタの生成、成長が抑制されたことを確認した。

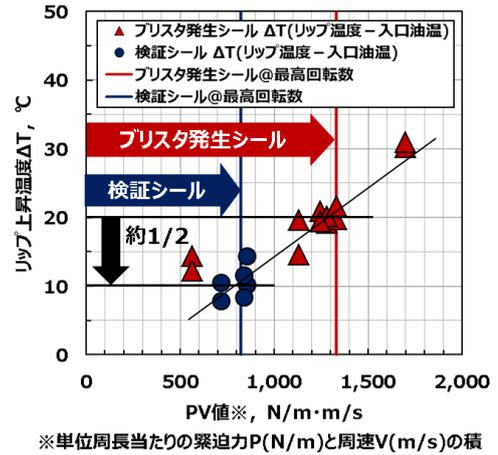


図13 コンポーネントでのリップ上昇温度測定結果

5. おわりに

今回、ブリスタの生成・成長に必要なゴム内部のき裂生成・進展の駆動力を明確にできたことで、ブリスタを抑制する方向性を図14の通り導くことができた。

また、そのブリスタ対策をオイルシールに織込み、実機ベンチ試験でブリスタ発生が抑制されることを確認した。

このように、建機特有の過酷な使われ方がブリスタ生成・成長の駆動力となり、ブリスタ発生につながっていることが明確になった。そのため各コンポーネントの使われ方、稼働環境をよく理解し、オイルシールを選定することが重要であることを確認した。

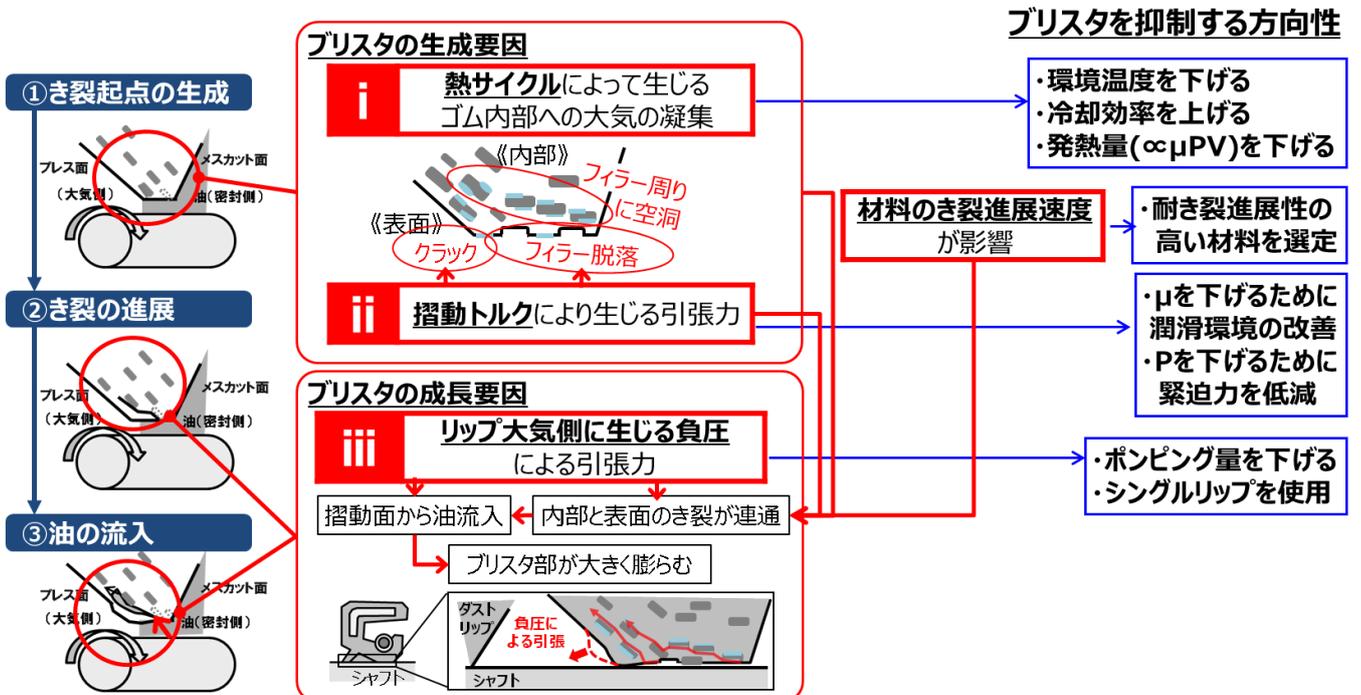


図14 ブリスタの生成・成長メカニズムとブリスタを抑制する方向性

参考文献

- 【1】 今野芳美, 川井仁, 田村幸雄, 村上満理奈,
佐々木喜代治: 建設機械用オイルシールの
プリスタ生成メカニズム, コマツ技報, Vol.62,
No. 169 (2017)
- 【2】 Hertz, Daniel L. Jr. : The Hidden Cause of Seal
Failure Machine Design 9 (1981), April, p209-212
- 【3】 Stevenson, A.: Gasinduzierte explosive
Dekompression in Elastomeren GAK-Gummi und
Kautschuk, Kunststoffe, 3 (1996), p549-555
- 【4】 Kanzaki, Y., Kanno, T., Kawahara, Y.: A Study of
Blistering Phenomenon on Rubber Seals, 12th
International Conference on Fluid Sealing, Brighton,
UK, 10-12 May 1989, p27-36

筆者紹介



Yoshimi Konno
こんのよしみ
今野芳美 2008年コマツ入社。
 開発本部 材料技術センタ所属。



Tetsu Nagata
ながたてつ
長田 哲 2002年コマツ入社。
 開発本部 材料技術センタ所属。



Akiko Konishi
こにしあきこ
小西晃子 1991年コマツ入社。
 開発本部 材料技術センタ所属。



Hiroshi Yamamoto
やまもとひろし
山本 浩 1987年コマツ入社。
 開発本部 材料技術センタ所属

【筆者からひと言】

前回の課題となっていたプリスタの生成・成長の駆動力を今回明らかにすることができました。これにより、各コンポーネントに最適なオイルシールを提案することによって、油漏れに通じるプリスタの成長を抜本的に防げるよう活動していきます。