

日本フルードパワーシステム学会セミナー[油圧] 油圧の魅力とその新たな可能性に迫る！

油圧の潤滑の奥義

The Heart of Lubrication of Hydraulics

油圧機器の高動力密度は他の動力伝達システムを凌駕する。これを支える基盤技術はトライボロジーであり、克服すべき物理現象はキャビテーションにあるともいえる。この視点で油圧の魅力、動向、奥義の一端に触れる。

室蘭工業大学大学院 風間 俊治

T Kazama, Muroran Institute of Technology

IFPEX2014 特別技術セミナー [2014.9.19, 東京ビッグサイト]

油圧の魅力とその新たな可能性に迫る！

- 「油圧の特長と最新事例の紹介」
 - 田中 豊 先生（法政大学）
- 「油圧の潤滑の奥義」
 - 風間 俊治（室蘭工業大学）
- 「油圧ポンプ／モータの最新技術動向」
 - 大見 康生 氏（大見技術士事務所）
- 「油圧作動油の最新動向」
 - 藤浪 行敏 氏（出光興産株式会社）

本講演の要点

- 油圧の**魅力**の再認識
- 油圧の潤滑面の**奥義**
- 油圧の潤滑研究**動向**

奥義

- おうぎ
 - 学芸(学問と芸術)・武術など(技術も?)の奥深い肝要な事柄。極意。おくぎ。「一をきわめる」
 - 広辞苑, 第6版
 - ()は著者補足

アウトライン

1. はじめに
2. 油圧の魅力
3. 油圧の奥義
 - 3.1 油圧ポンプの動作限界因子
 - 3.2 静圧軸受機構採用の利点
 - 3.3 キャビテーションと壊食
4. 油圧の研究動向
 - 4.1 潤滑理論の現状と展望
 - 4.2 関連する研究論文
5. むすび

1. はじめに

- 油圧機器の第一の特長：**高動力密度**
 - 他の動力伝達システムを凌駕
- 特長を支える一基盤技術：**トライボロジー**
 - 容積式機器の特色と宿命
- 克服すべき一物理現象：**キャビテーション**
 - エネルギー伝達媒体が液体

油圧ポンプの損傷例

- 歯車ポンプのサイドプレート
 - ベーンポンプのカムリング
 - ピストンポンプのピストンや弁板
- . . .

「トライボロジー」とは

- 「相対運動しながら互いに干渉し合う二つの表面およびそれに関連した諸問題とその実地応用に関する科学と技術」
 - 従来の **摩擦**, **摩耗**, **潤滑** を広く捉えた学問分野

Τ ρ ι β ο σ + λ ο γ ο σ



tribology

参考文献1

- 山口惇, 田中裕久:油空圧工学, コロナ社 (1986)
- 日本油空圧便覧:油空圧便覧, オーム社 (1989)
- バウデン・テイバー, 曾田(訳):固体の摩擦と潤滑, 丸善 (1961)
- 日本トライボロジー学会:トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001)
- 日本潤滑学会:潤滑故障例とその対策, 養賢堂 (1994)

アウトライン

1. はじめに
2. 油圧の魅力
3. 油圧の奥義
 - 3.1 油圧ポンプの動作限界因子
 - 3.2 静圧軸受機構採用の利点
 - 3.3 キャビテーションと壊食
4. 油圧の研究動向
 - 4.1 潤滑理論の現状と展望
 - 4.2 関連する研究論文
5. むすび

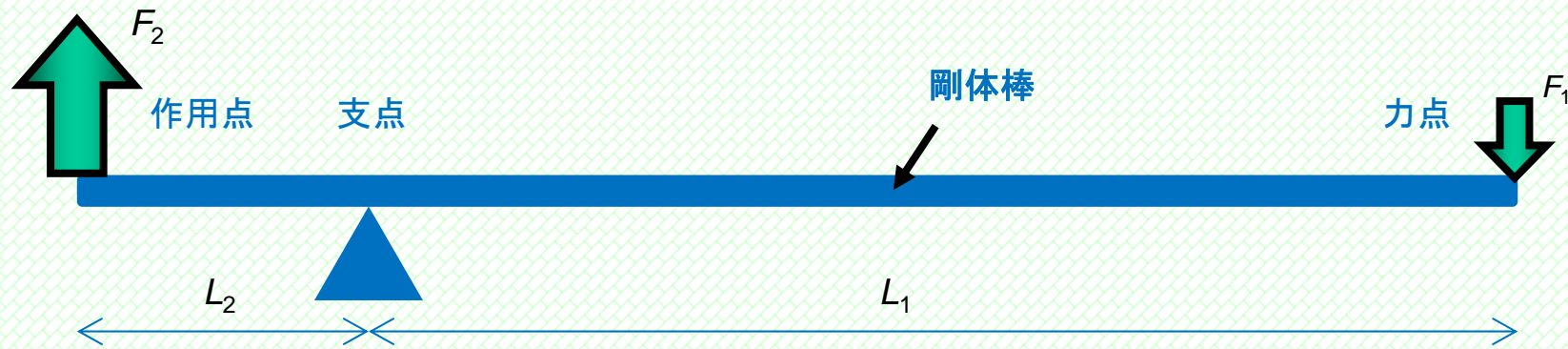
2. 油圧の魅力

- 油圧システム
 - 高動力密度
 - 力やトルクの大増幅を実現 ⇒ 機器の小型化
 - 取り回しが容易 ⇒ システムの小型化
 - 幅広い無段変速域
 - 動作応答性の速さ
 - 制御技術との融合性
 - . . .

詳細は田中先生の講義にて

増幅率の高め易さについて

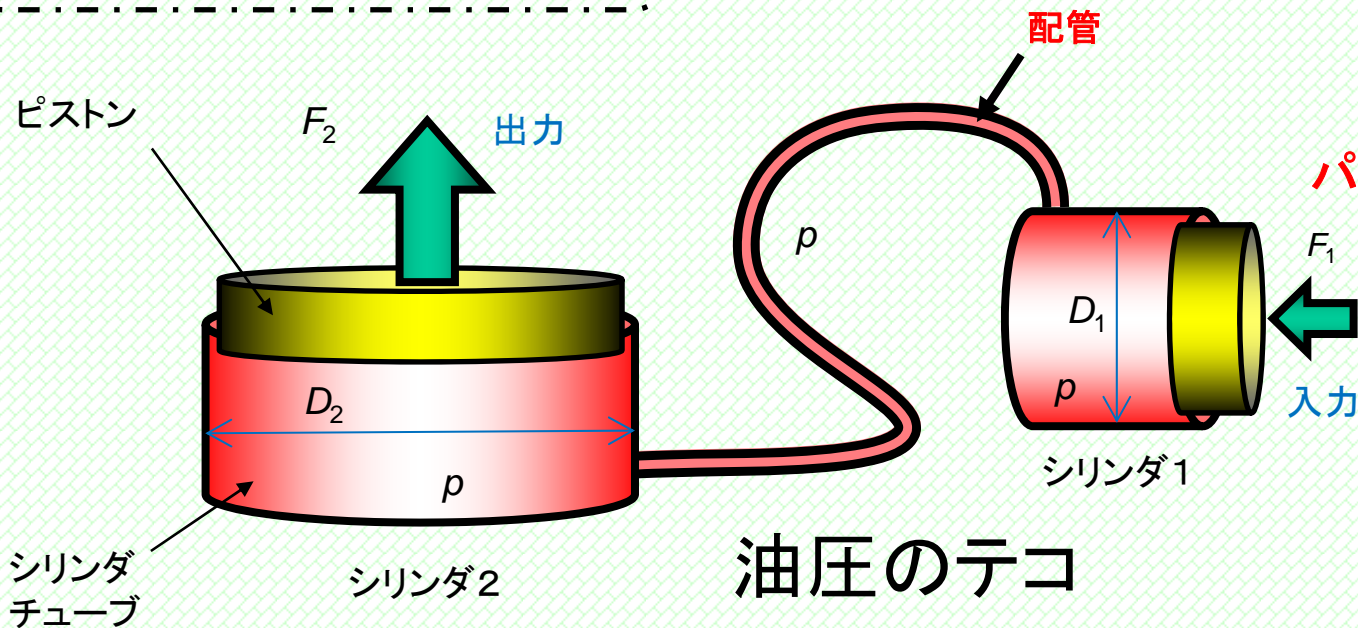
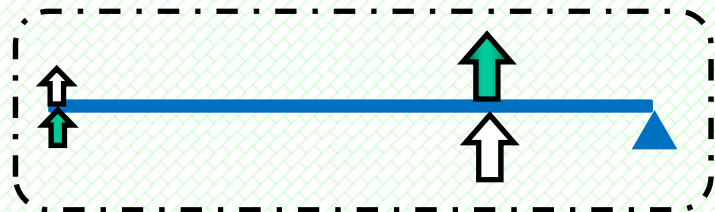
- 一般のテコ
 - 支点に対し作用点と力点との距離比
 - \Rightarrow 長さに比例
- 油圧のテコ「流体テコ」
 - シリンダモデル: 面積比
 - \Rightarrow 代表長さ(直径)の2乗に比例



一般のテコ(第1種)

$$F_1 L_1 = F_2 L_2 = M$$

$$\therefore F_2 = \frac{L_1}{L_2} F_1$$



パスカルの原理から...

$$\frac{4F_1}{\pi D_1^2} = \frac{4F_2}{\pi D_2^2} = p$$

$$\therefore F_2 = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 F_1$$

油圧のテコ

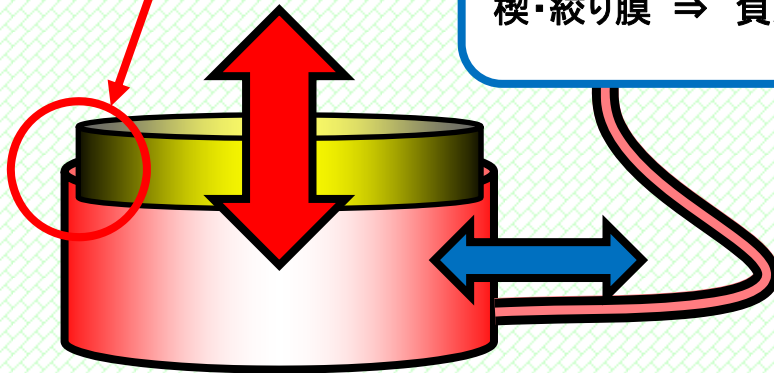
では、その魅力を引き出すためには？

漏れ防止 ⇒ 密封
(横)荷重 ⇒ 軸受
壁面移動 ⇒ 摺動

⇒ **トライボロジー**

液体流動 ⇒ 高速
絞り流路 ⇒ 噴流
楔・絞り膜 ⇒ 負圧

⇒ **キャビテーション**



参考文献2

- 山口惇:油圧機器の潤滑, 潤滑, Vol.31, No.10, p.658-690 (1986)
- 中原綱光:トライボロジー＝油空圧のキーテクノロジー, 油空圧技術, Vol.33, No.6, p.27-31 (1994)
- 風間俊治:フルードパワー・トライボロジーの科学と技術(前編)基礎編, 油空圧技術, Vol.50, No.10, p.46-50 (2011)

アウトライン

1. はじめに
2. 油圧の魅力
3. 油圧の奥義
 - 3.1 油圧ポンプの動作限界因子
 - 3.2 静圧軸受機構採用の利点
 - 3.3 キャビテーションと壊食
4. 油圧の研究動向
 - 4.1 潤滑理論の現状と展望
 - 4.2 関連する研究論文
5. むすび

3.1 油圧ポンプの運転限界因子

- 油圧システムの基本原理
 - 機械的エネルギーと油圧力エネルギーとの変換
- 油圧システムの主要機器
 - エネルギー変換機
 - 容積式ポンプ・アクチュエータ
- 油圧ポンプの作動域と限界因子
 - 容積の可変には壁面の移動を伴う
 - 摺動部 ⇒ トライボロジーが要
 - エネルギー伝達媒体に液体を用いる
 - 相変化 ⇒ キャビテーションが不可避

油圧ポンプの作動域と限界因子

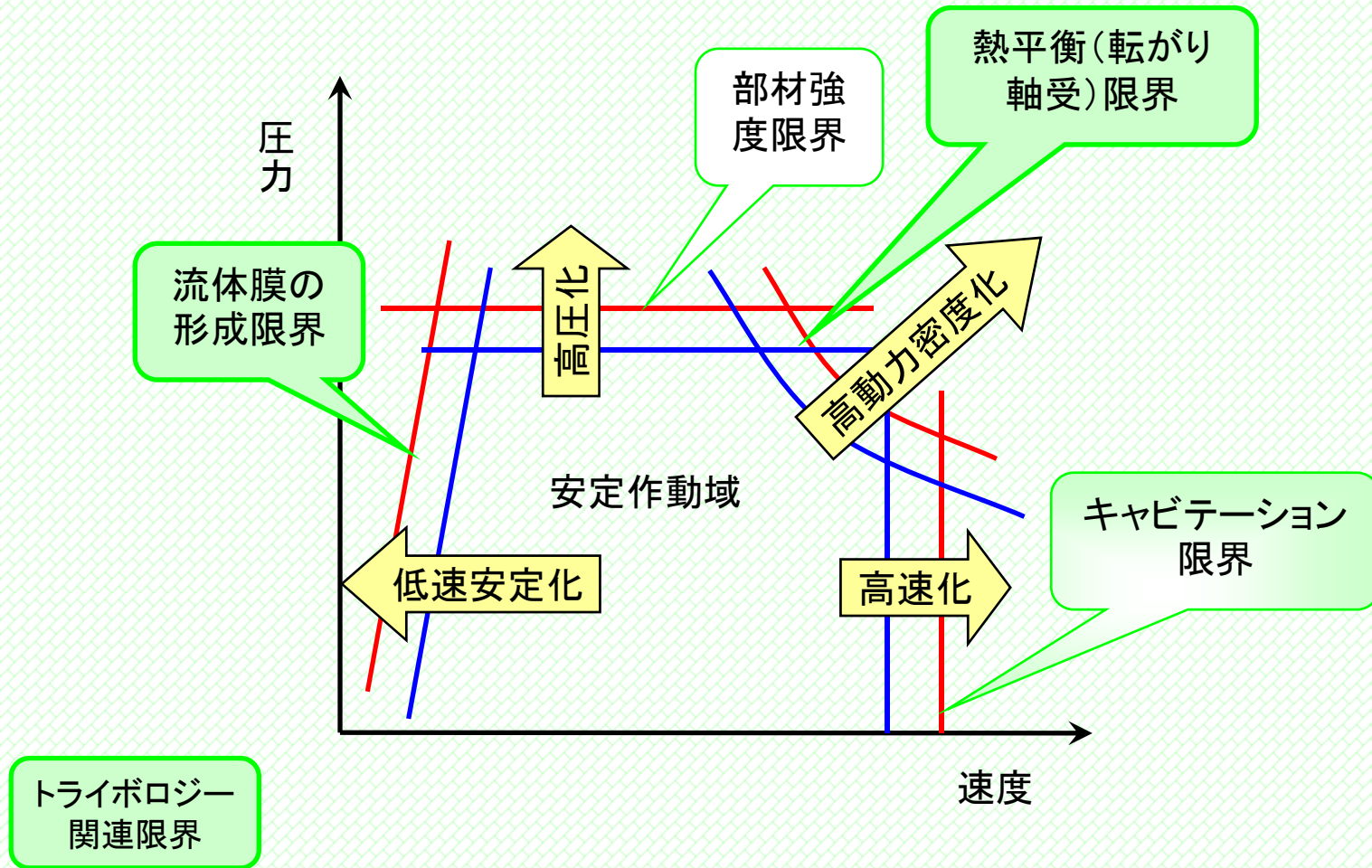


図1 油圧ポンプの安定作動域

油圧独特のトライボロジー

- 作動油が潤滑剤
 - － 油性状(粘度)のバランス
- 摺動部荷重が高圧側圧力に比例
 - － 小型化, 高圧化で摺動部の過酷化対策
- 作動圧力と回転速度の変化が大きい
 - 摺動部荷重と摺動面速度に対応
 - － 油圧モータや回転数制御式ポンプの変速域拡大
 - 油膜形成, 振動, 発熱, キャビテーション, . . .
- 作用要素が摺動部を構成
 - 摺動部性能が信頼性や効率に影響
 - － 摺動部で軸受機能とシール機能を兼担
 - 摺動部設計の自由度に強い制約

すべり軸受との対比を主として

ブレークスルー・テクノロジー

トライボロジー的な視点を主として

1. 作動流体の改良
2. 材料・表面処理の改良
3. 機構上の改良
 - 損失動力の概念
 - 機器効率の考慮

山口 (1986)

作動流体の改良

- 環境, 安全
 - － 省エネルギー化, 低環境負荷化
 - . . .
- 低粘度化, 高粘度指数化, 長寿命化
 - 粘性抵抗, 摺動摩擦, 配管抵抗, 油温上昇の低減
 - 耐摩耗性, 低摩擦性, スラッジレス化, 生分解性
 - 基油, 添加剤, 非Zn
 - － . . .

具体については藤浪氏の講義にて

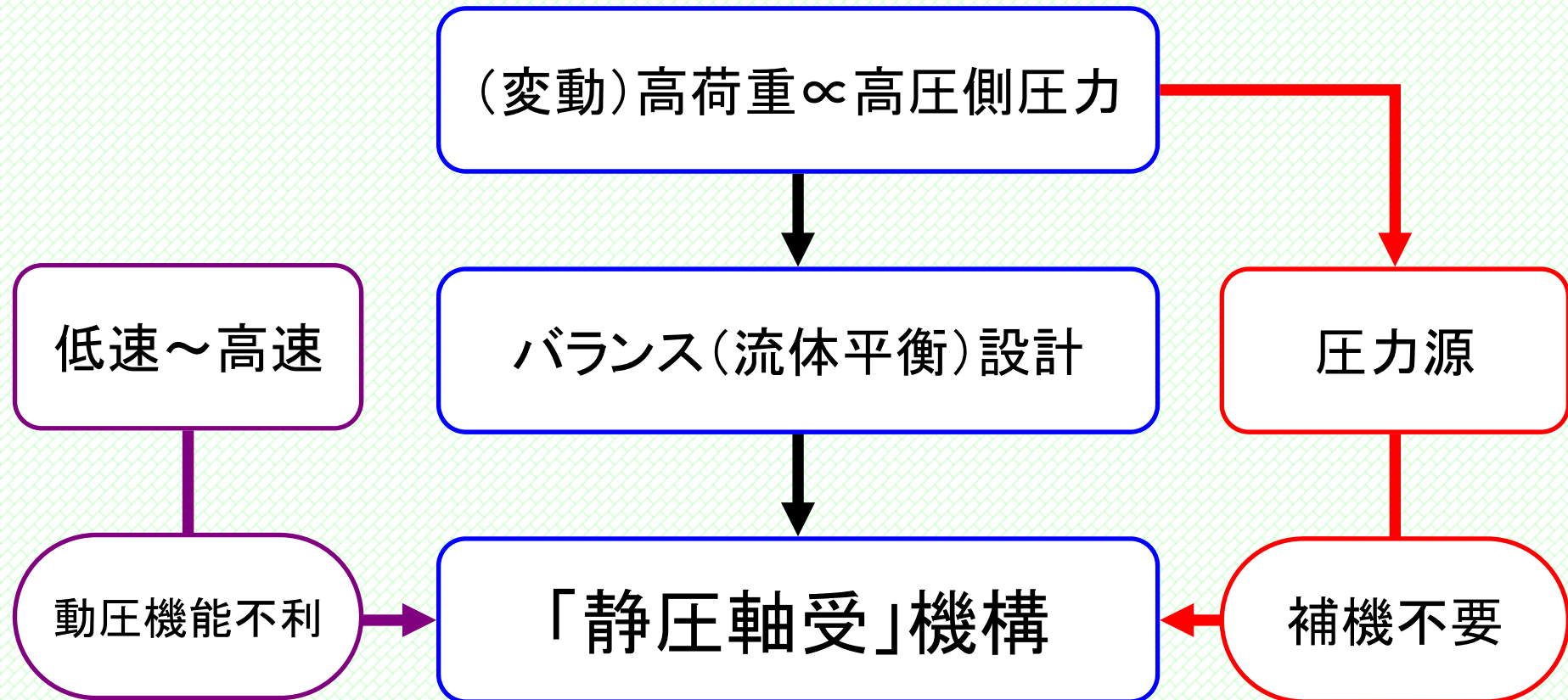
材料・表面処理の改良

- 高 pV 値における諸特性向上
 - 耐摩耗, 耐焼付き, 耐腐食
 - 低摩擦, なじみ易さ, 高疲労強度, 高圧縮強さ
- 材料の選定
 - メリット／デメリットのバランス
 - 多数／複雑な因子によりケースバイケース
- 今後の期待
 - 材料／表面改質のデータベース構築／データマイニング
 - 系統的な整理, オープンマインドの思想, 利便性の追求
 - 実験結果のバラツキ／ラボテストとの乖離等の克服

機構上の改良

- 一般的な軸受／シール設計法の流用は？
 - 作動条件や設計制約条件に差異
 - 液圧機器には直接的に適用不可
- 荷重が高圧側圧力に比例
 - バランス(流体平衡)設計
 - . . .

軸受機構選択の基本概念



3.2 静圧軸受機構採用の利点

- 機器の主作用要素：可動摺動壁面で構成
 - 作動圧力に比例する荷重が摺動部に作用
- 広い無段変速域
 - 摺動速度範囲も大きい
- 摺動隙間の潤滑機構
 - × 動圧効果
 - ○ 静圧効果
 - 摺動壁面の片側に高圧源
 - この圧油を導く静圧軸受機構の採用が理に適う

静圧軸受機構の懸念と対策

- 主な懸念
 - コンタミナントによる絞りの閉塞に起因する信頼性の低下
 - 理論的に求まる絞りの最適寸法を実現する加工の難しさ
 - 漏れの増大に基づく効率の低下
- ひとつのアプローチ
 - 全てを同時に完全に克服する最適解 ⇒ 性能を発揮する満足解
 - 摺動部隙間を表面粗さ程度に保持
 - 絞り径を大き目に設計
- 現実的な対応
 - 本静圧軸受機構の設計・製作 & 性能の精確な予測
 - 焼付きを回避し、摩耗を最小限に抑えて運転
 - 軽微な固体接触を伴う混合潤滑状態

静圧軸受機構の適用例

- ピストンポンプ・モータの事例と主点
 - スリッパ軸受－斜板間
 - 最適設計(高速:流体, 低速:混合)
 - 球面軸受／球継手
 - 球面座形状の工夫で特性改善
 - シリンダブロッカー－弁板間
 - 静圧軸受付弁板で安定域の大幅拡大
 - ピストン－シリンダボア間
 - 静圧軸受付ピストンで横力の大幅低減

3.3 キャビテーションと壊食

- 油圧機器内部
 - － 狭窄流路(すきま, 絞り)が多い
 - 各所に絞り形状
- 絞り部を液体が高速流動
 - － 流れは壁面から剥れ, 渦を生じ, 気泡が析出, 成長
 - 主流に随伴して, キャビテーション噴流を生成
- 高圧力場: 油中の気泡は瞬時に崩壊
 - － 衝撃波発生 ⇒ 局所的な高圧力
 - 壁面近傍での多量の崩壊と長時間の曝露 ⇒ 壊食

壊食防止策

- 気泡の発生低減
- 気泡の成長抑制
- 壁面での崩壊阻止

山口 (1978)

参考文献3

- 潤滑関連
 - 山口惇: 油圧ポンプ・モータのトライボロジー, 油空と空気圧, Vol.20, No.7, p.597-603 (1989)
 - 風間俊治: 静圧軸受の最適設計, フルードパワーシステム, Vol.33, No.4, p.210-215 (2002)
- キャビテーション関連
 - 山口惇: 水道水を作動流体とする可能性, 油圧と空気圧, Vol.9, No.4, p.205-210 (1978)
 - 加藤洋治: キャビテーション, 槇書店 (2000)
 - 風間俊治: フルードパワー機器におけるキャビテーション壊食 (単一気泡の基礎解析と噴流衝突式の壊食実験を主として), フルードパワーシステム, Vol.37, No.6, p.360-364 (2006)

アウトライン

1. はじめに
2. 油圧の魅力
3. 油圧の奥義
 - 3.1 油圧ポンプの動作限界因子
 - 3.2 静圧軸受機構採用の利点
 - 3.3 キャビテーションと壊食
4. 油圧の研究動向
 - 4.1 潤滑理論の現状と展望
 - 4.2 関連する研究論文
5. むすび

4.1 潤滑理論の現状と展望

- PCモデルとGW(GT)モデルに基づく混合潤滑モデル
 - 方程式群の取扱いがやや複雑
 - 厳しい条件下への適用の課題は残る
 - 実験的に妥当性検証済み, 実用性は高い
- 機器内部の滑り面や片当りする摺動部
 - 見掛け上, 線や点で接触しつつ滑りや転がりを伴う潤滑状態
 - 大規模計算となるが, EHL理論の援用が期待される
 - 発熱, 変形, 接触のモデル構築や連成モデルによるシミュレーション開発
- シールの理論解析
 - レイノルズ方程式の逆解法から現実的モデルの多元連立方程式の直接解法
- 技術開発
 - 材料としては DLC
 - 表面加工としては微細テクスチャ
 - 作動油としては低粘度化

実機の現状・展望は大見氏の講義にて

4.2 関連する研究論文

- ポンプ・モータ関連

- ピストン式が主流, 歯車式やベーン式も
- 大規模数値解析結果の発表が増加
 - シミュレーションソフトウェア, ピストンの挙動, スリップパの特性, 球継手部の性能
- ポンプ性能に関する検討
 - 摺動部の温度分布測定

- シール関連は持続的な発表数

- 数理モデルの発展
 - 粗さ, キャビテーションを考慮した混合潤滑モデル, EHL理論の取り込み
- 実験的アプローチも存続
 - 生分解性作動油との適合性, 性能向上に関する研究

- トレンド

- 環境関係の割合が増加
 - 生分解性油や水圧
- 作動液は実機への応用に重点を置いた開発研究
 - 鉱油系／生分解性

Kazama, T., Totten, G.E. (2006)

風間 (2006) 眞田・風間 (2006)

風間 (2007) 田中 (2007)

参考文献4

- 風間俊治:フルードパワー機器のトライボロジーに関する理論の現状と研究の動向, フルードパワーシステム, Vol.40, No.4, p.193-196 (2009)
- 風間俊治:平成25年度の油圧分野の研究活動の動向, 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol.45, No.E1, p.E5-9 (2014)
- Pelosi, M., Ivantysynova, M.: The Impact of Axial Piston Machines Mechanical Parts Constraint Conditions on the Thermo-Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of the Fluid Film Interfaces, International Journal of Fluid Power, Vol.14 (2013)
- Kazama, T.: On Thermal Lubrication Characteristics of Hydraulic Pumps (Comparison among Piston, Vane, and Gear Types), Proc. MOVIC2014, 2D31, No.14-202 (2014)

追 補

- 風間俊治・鈴木基司・鈴木健太・成田幸仁・桜井茂行: 斜板式アキシャルピストンモータに用いられるスリッパのしゅう動部温度とすきま形状の同時計測, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.45, No.2, p.22-28 (2014)
- 風間俊治: 油圧ベーンポンプの熱潤滑実験に関する一考察, C28, 第13回「運動と振動の制御」シンポジウムUSB論文集, No.13-18, USB (2013)
- 鈴木健太・鈴木基司・桜井茂行・辺見真・風間俊治: 斜板式ピストンポンプ・モータのスリッパにおける機構と油膜の連成解析, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.816, p.1-10 (2014)
- Kazama, T. and Narita, Y.: Numerical Simulation of a Slipper Model for Swash Plate Type Axial Piston Pumps and Motors: Effects of Concave and Convex Surface Geometry, International Journal of Automation Technology, Vol.6, No.4, p.434-439 (2012)
- Kazama, T., Tsuruno, T. and Sasaki, H.: Temperature Measurement of Tribological Parts in Swash-Plate Type Axial Piston Pumps, Ventil, April, 17-2, p.140-146 (2011)
- Kazama, T., Sasaki, H. and Narita, Y.: Simultaneous Temperature Measurements of Bearing and Seal Parts of A Swash Plate Type Axial Piston Pump — Effects of Piston Clearance and Fluid Property, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.24, p.203-206 (2010)

解説記事(入門)

- 風間俊治:技術講座～油圧機器のトライボロジー
 - 理論編(1)油圧機器と潤滑、摩擦、摩耗
 - フルードパワー, Vol.28, No. 1, p.33-37 (2014)
 - 理論編(2)油圧機器と作動油
 - フルードパワー, Vol.28, No. 2, p.40-43 (2014)
 - 理論編(3)油圧機器と潤滑理論
 - フルードパワー, Vol.28, No. 3, p.56-60 (2014)
 - 理論編(4)
- 風間俊治:入門講座「トライボロジー」
 - 第1回:摩擦について
 - フルードパワーシステム学会誌, Vol. 45, No. 4, p.35-37, (2014)
 - 第2回
 - 第3回
 - 第4回
 - 第5回

解説記事(基礎)

- 風間俊治:平成25年度の油圧分野の研究活動の動向, 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol.45, No.E1, p.E5-E9 (2014)
- 風間俊治:水とトライボロジー, 油空圧技術, Vol.52, No.8, p.11-15 (2013)
- 風間俊治:油圧機器の発熱について, 油空圧技術, Vol.52, No.3, p.19-22 (2013)
- 風間俊治:水圧の過去、現在、そして・・・, 油空圧技術, Vol.51, No.12, p.11-15 (2012)
- 風間俊治:各種油圧ポンプのしゅう動部の温度計測(実作動条件下の実機ピストンポンプ, 歯車ポンプ, ベーンポンプを対象として), フルードパワーシステム, Vol.43, No5, p.268-270 (2012)
- 風間俊治:生分解性作動油の油機評価実験(ポンプ試験によるトライボロジカル特性と噴流衝突式試験によるキャビテーション壊食性), フルードパワー, Vol.26, No.3, p.8-11 (2012)
- 風間俊治:総論:寒冷地における油空圧, Vol.50, No.13, 1-3 (2011)
- 風間俊治:静圧軸受の基礎(油圧・水圧機器の設計のために), 油空圧技術, Vol.50, No.5, p.30-34 (2011)

5. むすび

油圧機器と、トライボロジーや潤滑ならびにキャビテーションや壊食との関連について、学理を追及する視座で幾つかの要点を纏めた

油圧の潤滑の奥義

1. はじめに
2. 油圧の魅力
3. 油圧の奥義
 - 3.1 油圧ポンプの動作限界因子
 - 3.2 静圧軸受機構採用の利点
 - 3.3 キャビテーションと壊食
4. 油圧の研究動向
 - 4.1 潤滑理論の現状と展望
 - 4.2 関連する研究論文
5. むすび

フルードパワーが
災害の復旧復興
世界の平和繁栄
自然人類との共生
に資するを信じて

kazama@mmm.muroran-it.ac.jp
<http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~kazama/>

ご清聴, 誠にありがとうございました. 最後まで, ご聴講をお願い致します.