

報告日 2015年(平成27年) 6月29日

報告者 豊田工業大学 准教授

小林正和

## 1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名 (日本語)

油空圧機器のためのコンプライアントメカニズムに基づくバルブの最適設計法

(2) 研究者氏名

小林正和

(3) 研究概要 (日本文)

油空圧機器に不可欠な構成要素であるバルブについて、単純化、低コスト化、および高信頼性を実現するために、本研究では、コンプライアントメカニズムと呼ばれる柔軟機構をバルブに適用し、コンプライアントメカニズムに基づくバルブの最適設計法の検討を行う。

(4) キーワード

コンプライアントメカニズム, バルブ, ロバスト設計, 信頼性設計最適化

(英文)

(1) Research title

Optimal design method of a novel valve based on a compliant mechanism for hydraulic/pneumatic equipments

(2) Name of researcher with title of position

Masakazu Kobayashi

(3) Summary

Valves are indispensable components for fluid power systems and simplified, low cost and high reliability valves are constantly required. In this research, to achieve such valves, a compliant mechanism is applied to valves and a new optimal design method for valves based on a compliant mechanism is developed.

(4) Key Words

Compliant Mechanism, Valve, Robust Design, Reliability-Based Design Optimization,

## 2. 本研究の意義・特色

コンプライアントメカニズム[1]は機械構造物の柔軟性を利用した新しいメカニズムであり、通常メカニズムとは異なり、ジョイントの代わりに構造物の適切な位置に柔軟性を付与することで、メカニズムとしての機能を実現する。図1にその一例を示す。コンプライア

ントメカニズムはジョイント等の可動部を持たず一体型の構造が可能のため、(1)無騒音、(2)無潤滑、(3)部品点数の削減、(4)軽量化、(5)小型化などの利点を持ち、機械製品から医療部品、MEMS など幅広い適用が期待されている。

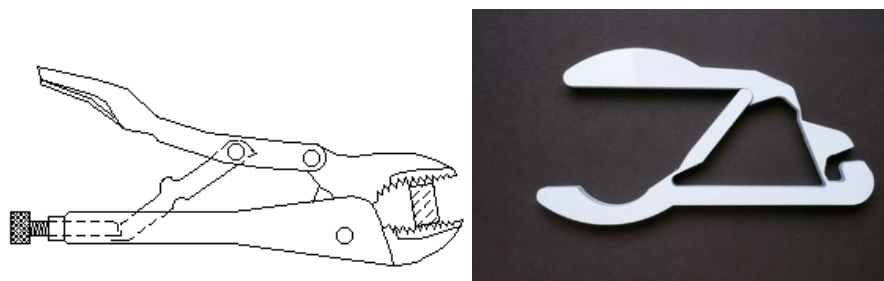


図1 通常メカニズムとコンプライアントメカニズムの例[2]

本研究では、油空圧機器に不可欠な構成要素であるバルブについて、単純化、低コスト化、および高信頼性を実現するために、コンプライアントメカニズムを適用し、コンプライアントメカニズムに基づくバルブ（以降、コンプライアントバルブと呼称）の最適設計法の検討を行う。本研究では特にバルブの信頼性に注目しており、製造時の加工誤差や使用時の摩耗によってバルブの外形形状が変化してもバルブとしての機能や強度を維持できるように、設計法の中で信頼性を評価・最適化する。

[1] Howell, L. L.: *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y., (2001), 1.

[2] <http://compliantmechanisms.byu.edu/>

### 3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

#### 3.1 緒言

機械製品の設計段階では、全てのパラメータは確定的であるが、製品を製造し、使用する段階に至ると、製造時の加工誤差に起因する形状や材料定数のばらつき、使用時の境界条件のばらつきなど様々な不確実性が発生し、製品の性能に影響を与える。この不確実性に対応するために、安全率が広く用いられており、その値は設計者らの長年の経験に基づいて設定されている。また、設計者の経験に基づかない方法として信頼性最適設計 (*reliability-based design optimization*, 以降、*RBDO*) と呼ばれる信頼性設計の研究が行われている。しかしながら、コンプライアントメカニズムは既存のメカニズムと大きく異なるため、安全率を経験的に設定することは難しい。そこで、本研究ではコンプライアントメカニズムの設計に *RBDO* を導入することで、信頼性の高いコンプライアントメカニズムの実現を目指す。これまでに様々な *RBDO* 手法が提案されているが、本研究では *Optimal Safety Factor* (以降、*OSF*) [3] と呼ばれる手法を導入する。コンプライアントメカニズムには、

通常の構造物とは異なり，応力や出力変位など複数の評価指標が存在するため，信頼性の考慮にあたっては複数の評価指標についての信頼性を考慮する必要がある．しかし，従来の OSF は単一の評価指標に対する信頼性のみを考慮しているため，本研究ではこれを拡張して用いる．適用例では，マイクロ水冷システムに用いる熱アクチュエータ型流量調節バルブの設計に提案手法を適用し，その有効性を検証する．

### 3.2 コンプライアントメカニズムの信頼性最適設計法

高い信頼性を有するコンプライアントメカニズムを設計するために，本研究では OSF に基づく多目的信頼性最適設計法を提案する．提案手法は以下の 2 段階から構成される．

第 1 段階：コンプライアントメカニズムの初期形状設計

第 2 段階：拡張 OSF に基づく信頼性最適化

以降，各段階について述べる．

### 3.3 第 1 段階：コンプライアントメカニズムの初期形状設計

第 1 段階では，信頼性を考慮せずにコンプライアントメカニズムの初期形状を設計する．

初期形状の設計にはどのような方法を用いても良いが，本研究では申請者が提案する 2 段階最適設計法[4]を用いる．

2 段階最適設計法はトポロジー最適化と形状最適化から構成されており，まず初めにトポロジー最適化を用いてコンプライアントメカニズムの最適な形態と概略形状を創成し，その後，形状最適化を用いて応力集中等の工学的要件を考慮しながらコンプライアントメカニズムの詳細な形状を決定する．2 段階最適設計法を用いることで，実用的なコンプライアントメカニズムを容易かつ効率的に設計することが出来る．

### 3.4 第 2 段階：拡張 OSF に基づく信頼性最適化

第 2 段階では，拡張された OSF を用いて第 1 段階で設計されたコンプライアントメカニズムの形状を修正し，その信頼性を向上させる．本節では，まず初めに，既存の OSF を用いた信頼性最適化の説明を行い，その後，複数の評価指標についての信頼性を考慮するための OSF の拡張について述べる．

#### 3.4.1 Optimal Safety Factor

Optimal Safety Factor (OSF) は Kharmanda らによって提案された RBDO の一手法である．OSF は信頼性を考慮しない確定的構造最適化で導出された設計点  $\mathbf{y}$  から以下の 3 ステップに従って信頼性を考慮した設計点  $\mathbf{x}$  を導出する．

まず初めに，通常的设计空間で不確実性を考慮せずに構造最適化を行い，設計点  $\mathbf{y}$  を求める．これは提案手法の第 1 段階に相当する．次に，設計点  $\mathbf{y}$  における限界状態関数の勾配と最適性条件から，次式により標準化空間での信頼性を考慮した設計点  $\mathbf{u}$  を求める．

$$u_i = \pm \beta \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial y_i}\right)^2 / \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G}{\partial y_i}\right)^2}, i = 1, \dots, n$$

ここで、 $G$  は設計空間における限界状態関数、 $\beta$  は信頼性指標の目標値である。±の符号は次式に示すように限界状態関数  $G$  の勾配に依存する。

$$\partial G / \partial y > 0 \Leftrightarrow +, \quad \partial G / \partial y < 0 \Leftrightarrow -$$

図 2 は設計変数が 2 個の場合の標準化空間における初期設計点と信頼性を考慮した設計点の対応関係を示す。ここで、 $\mathbf{P}_D$  は初期設計点、 $\mathbf{P}_{Op}$  は信頼性を考慮した設計点、 $H(\mathbf{u}) = 0$  は標準化空間における限界状態関数、 $\beta$  は信頼性指標を表す。

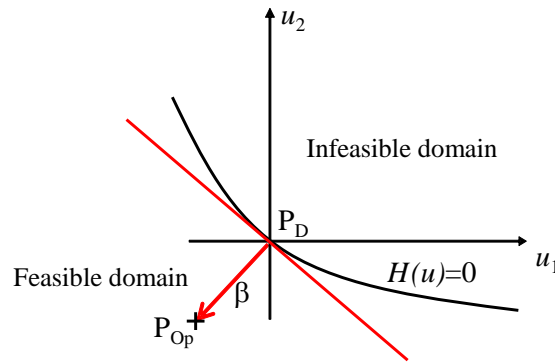


図 2 標準化空間における初期設計点  $\mathbf{P}_D$  と信頼性を考慮した設計点  $\mathbf{P}_{Op}$

最後に、標準化空間の設計点  $\mathbf{u}$  から設計空間の設計点  $\mathbf{x}$  を導出する。今、 $\mathbf{x}$  のばらつきが正規分布  $N(\mathbf{x}, \sigma)$  に従うとき、設計点  $\mathbf{x}$  は下式で求められる。

$$x_i = y_i - \sigma_i u_i, i = 1, \dots, n$$

### 3.4.2 複数の評価指標に対する信頼性を考慮した OSF

従来の OSF は単一の信頼性を対象としているが、コンプライアントメカニズムの機能を保証するためには応力と出力変位など複数の評価指標に対する信頼性を同時に考慮しなければならない。そこで、本研究では複数の評価指標に対する信頼性を考慮できるように OSF を拡張する。

拡張 OSF の基本的な考え方は、標準化空間において複数の限界状態関数から与えられた信頼性指標だけ離れた新しい設計点を導出することである。個々の限界状態関数は信頼性を考慮する個々の評価指標に対応している。信頼性を考慮した設計点  $\mathbf{P}_{Op}$  を導出する過程を図 3 を例に述べる。ここでは、二つの設計変数  $u_1, u_2$  と三つの限界状態関数  $H_1, H_2, H_3$  を考える。空間の原点は初期設計点  $\mathbf{P}_D$  である。初期設計点  $\mathbf{P}_D$  は信頼性を考慮しない構造最適

化によって求められた最適設計点であり，全ての限界状態関数がこの点を通っている．

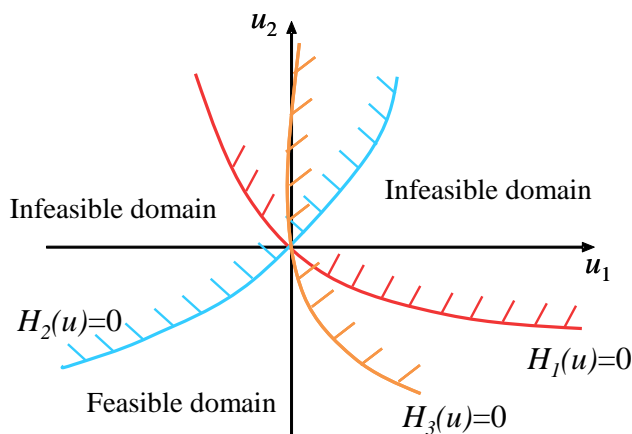


図 3 三つの評価指標の場合

まず初めに，図 4 に示すように，1 個の評価指標に対する信頼性を考慮した設計点  $\mathbf{P}_{Op1}$ ， $\mathbf{P}_{Op2}$ ， $\mathbf{P}_{Op3}$  を通常の OSF を用いて個別に導出する．また，各限界状態関数を原点で線形化する．

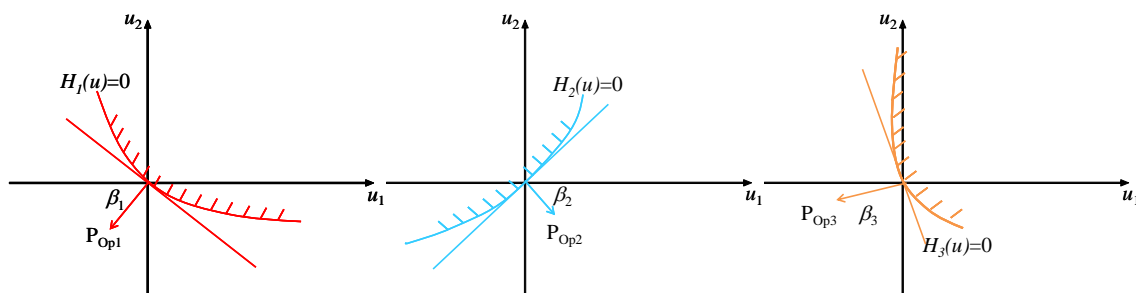


図 4 従来の OSF を用いた設計点  $\mathbf{P}_{Op1}$ ， $\mathbf{P}_{Op2}$ ， $\mathbf{P}_{Op3}$  の導出

次に，二つの限界状態関数を選択する．ここでは例として  $H_1$  と  $H_2$  を選択する．そして，線形化された限界状態関数から図 5 の左図に示す交点を求め，この点を  $\mathbf{P}_{Op12}$  とする．この点の信頼性指標を  $\beta_{12}$  とし，原点において  $\beta_{12}$  と直交する直線を  $H_{12}$  とする．最後に， $H_1$  と  $H_2$  に対して  $\mathbf{P}_{Op12}$  を求めたのと同様に  $H_{12}$  と  $H_3$  に対して  $\mathbf{P}_{Op123}$  を導出し，この設計点を最適設計点  $\mathbf{P}^*_{Op}$  とする．

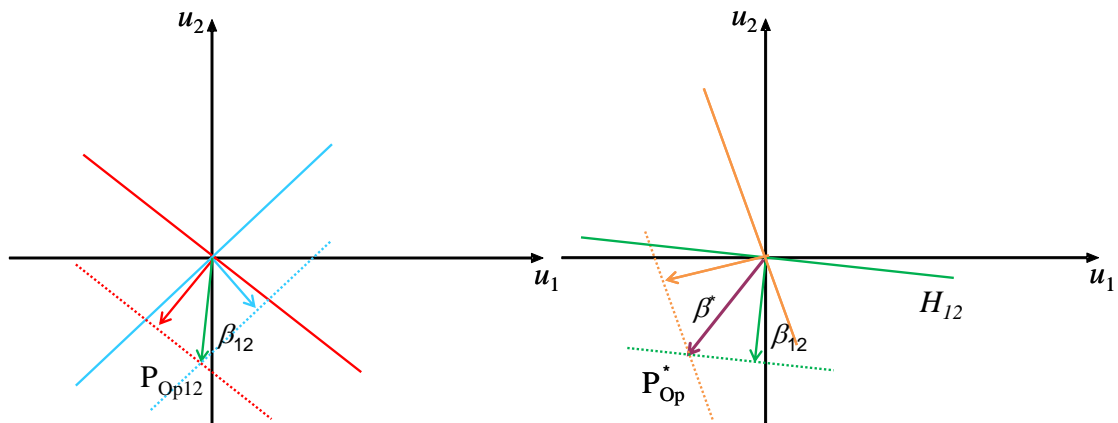


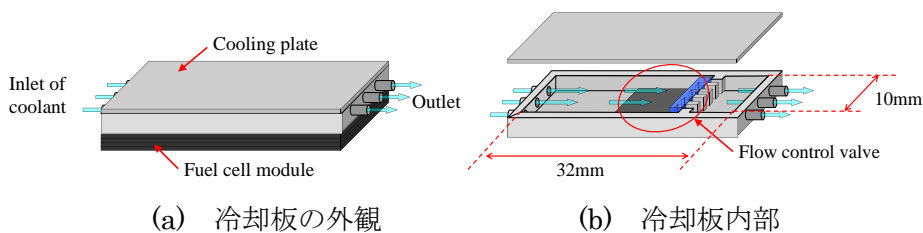
図5  $P_{Op12}$  と  $P^*_{Op}$  の導出

### 3.5 適用例

提案手法の有効性を検証するために、マイクロ水冷システムに用いる熱アクチュエータ型流量調節バルブ[5]の設計に適用する。

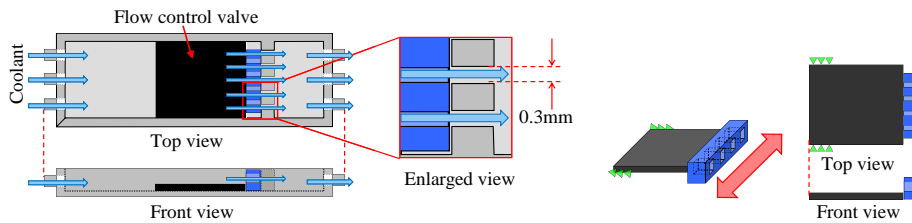
本適用例で扱うマイクロ水冷システムは、ノートパソコンや携帯電話などの携帯機器に用いる小型燃料電池での使用を想定したものである。携帯機器用の小型燃料電池は、近年、注目されているが、このような小型のシステムに搭載する冷却機構は、十分に小さく、また電力消費が小さいことが望ましい。そこで本適用例では、これらの要件を満たすために、熱アクチュエータ型のコンプライアントメカニズムを流量調節バルブとして用いたマイクロ水冷システムを検討する。熱アクチュエータ型コンプライアントメカニズムは、構造物の熱変形を利用して所定の出力変位を得るコンプライアントメカニズムである。熱アクチュエータ型コンプライアントメカニズムを用いた流量調節バルブは、冷却対象である燃料電池の発熱を動力源として動作し、また、バルブの開度は燃料電池の温度に応じて自動的に調整されるため、外部動力だけでなく、バルブの制御装置も不要となる。そのため、小型燃料電池のためのマイクロ水冷システムのバルブとして適している。

マイクロ水冷システムの概要を図6に示す。図6(b)に示すように冷却板内部は流路になっており、その中央に熱アクチュエータ型流量調節バルブが設置されている。図6(c)に示すようにバルブ先端と流路には0.3mm幅のスリットが多数開けられたブロックが固定されており、バルブが図中の上下方向にスライドすることで、全閉から全開の状態まで流量を調整することができる。図6(d)にバルブの設計領域を示す。バルブは両側の側壁に固定されており、また、底面を介して冷却対象に密接している。



(a) 冷却板の外観

(b) 冷却板内部



(c) 流量調節の仕組み (d) 熱アクチュエータ型コンプライアントバルブ

図6 マイクロ水冷システムの概要

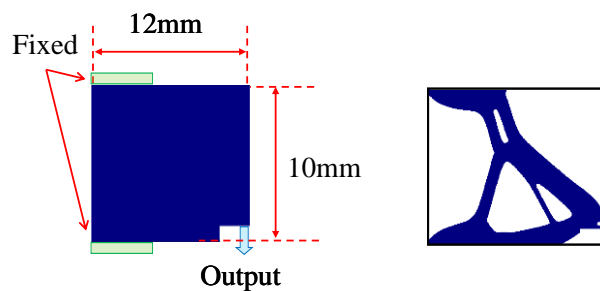
バルブの最大寸法は長さ 12mm, 幅 10mm であり, バルブは流路の側壁に固定されている. バルブの動作は 25 度の時に全閉(スライド長 0mm), 100 度の時に全開(スライド長 0.3mm) となるものとする. 材料には高分子量ポリエチレンを用いる. その材料特性を表 1 に示す.

表 1 高分子量ポリエチレンの材料特性

熱膨張係数	$130 \times 10^{-6}$ [1/°C]
引張強さ	121 [°C]
ヤング率	887 [MPa]
ポアソン比	0.35
密度	960 [kg/m <sup>3</sup> ]
許容応力	40 [MPa]

### 3.5.1 第 1 段階 : コンプライアントメカニズムの初期形状設計

トポロジー最適化と形状最適化からなる 2 段階最適設計法を用いてコンプライアントバルブの初期形状を設計する. 図 7(a)(b)にトポロジー最適化の設計条件と最適形状を示す.



(a)設計条件

(b)最適形状

図7 トポロジー最適化の実施

トポロジー最適化の最適形状は図 8(a)に示す形状最適化の初期形状に変換される. 図に示すようにバルブ先端のブロックを付加した状態で形状最適化を実施する. 図中の矢印は形状最適化の設計変数として用いた直線や曲線のコントロールポイントの位置を表している.

表 2 に 75 度の温度上昇時におけるバルブ先端の垂直方向の変位（スライド長），水平方向の変位および最大応力の目標値と形状最適化後の最適値を示す．また，図 8(b)に最適形状を示す．これらの結果により，設計要件を満足するバルブが設計できたことが分かる．

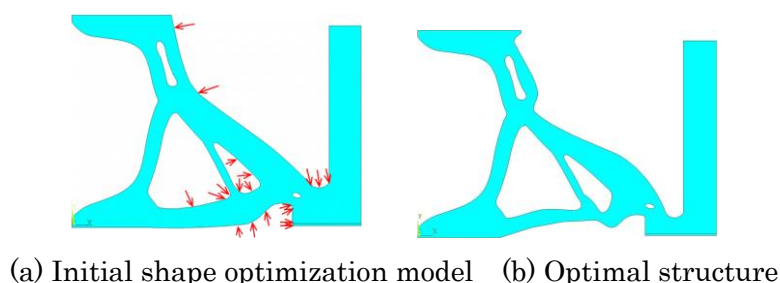


図 8 形状最適化の実施

表 2 評価特性の目標値と最適値

	目標値	最適値
垂直変位 (mm)	> 0.3	0.3
水平変位 (mm)	< 0.003	0.0019
最大応力 (MPa)	< 10	8.6

次に，得られた最適形状に対して信頼性評価を行う．信頼性評価にはモンテカルロシミュレーションを用い，バルブの形状にばらつきが生じた際に垂直変位と水平変位，最大応力が目標値を満足する確率を導出した．形状のばらつきの標準偏差 $\sigma$ は 0.03mm である．表 3 に目標値を満足する確率を示す．表から垂直変位と水平変位に対する信頼性が不十分であることが分かる．

表 3 最適形状の信頼性

垂直変位	水平変位	最大応力
68.0%	78.7%	99.1%

### 3.5.2 第 2 段階：拡張 OSF に基づく信頼性最適化

拡張 OSF を用いて信頼性最適化を実施する．信頼性指標の目標値は垂直変位に対しては $\beta_1 = 3$ ，水平変位に対しては $\beta_2 = 2$ ，最大応力に対しては $\beta_3 = 2$  とする．

図 9 に信頼性最適化の最適形状を示し，表 4 に最適形状の信頼性評価の結果を示す．比較のために，従来の OSF を用い最大応力のみ注目して信頼性最適化を行った結果を併せて示す．従来の OSF では最大応力に対する信頼性のみを向上させた結果，垂直変位と水平変位に対する信頼性が大幅に損なわれているが，提案手法では全ての評価指標に対して高い



信頼性が達成できている。

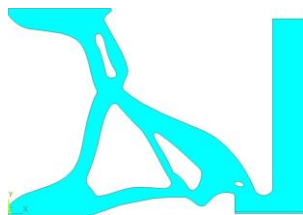


図 9 信頼性最適化の最適形状

表 4 最適形状の信頼性

	垂直変位	水平変位	最大応力
従来 OSF	28.6%	39.9%	99.9%
提案手法	99.3%	95.6%	98.6%

### 3.6 結言

製造時に生じる形状のばらつきに対して、出力変位と最大応力など複数の評価指標に対して高い信頼性を持つコンプライアントメカニズムを設計するために、Optimal Safety Factor (OSF) を拡張し、2 段階最適設計法と組み合わせた多目的信頼性最適設計法を構築した。

適用例では、マイクロ水冷システムの流量調節バルブの設計に提案手法を適用し、提案手法を用いてコンプライアントバルブを設計することで、複数の評価指標に対して高い信頼性を持つコンプライアントメカニズムが得られることを確認した。

### 参考文献

- [3] Kharmanda, G., Olhoff, N. & El-Hami, A.: Optimum values of structural safety factors for a predefined reliability level with extension to multiple limit states, *Structural Multidisciplinary Optimization*, 27, 6, (2004), 421-434.
- [4] 小林正和, 山下進介, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, 富田直秀: トポロジー最適化と形状最適化に基づいたコンプライアントメカニズムの多段階創成設計法, 精密工学会誌, 70, 11, (2004),
- [5] Kobayashi, M. & Higashi, M.: Optimal Design of Thermal Actuated Valves Based on Level Set Based Topology Optimization, *Proceedings of 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, June 13 -17, 2011, Shizuoka, Japan.

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

小林正和・准教授

5. 研究実施時期

2013年（平成25年） 10月1日から 2015年（平成27年） 3月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

Kobayashi, M., Higashi, M., Multi-criteria Reliability-based Design Optimization for Compliant Mechanisms, International Design Conference - DESIGN 2014, May 19 - 22, 2014, Dubrovnik, Croatia.

7. 内外における関連研究の状況

コンプライアントメカニズムはジョイント等の可動部を持たず一体型の構造が可能のため、(1)無騒音、(2)無潤滑、(3)部品点数の削減、(4)軽量化、(5)小型化などの利点を持ち、機械製品から医療部品、MEMSなど幅広い適用が期待され、研究が進められている。例えば、[5]は飛行機の翼にコンプライアントメカニズムを適用した研究であり、一体型の翼が弾性変形することによりフラップ等の機能を実現している。

[6] <http://www.flxsys.com/>

8. 今後の発展に対する希望

本研究では、適用例として冷却システムの流量調節バルブに注目し、材料の熱膨張を利用することで外部動力を必要とせずに冷却水の温度に応じて自動的に開閉するバルブを設計した。今後は、油空圧機器の各種バルブへの適用と、プロトタイプ製作・実験を行い、コンプライアントバルブの有効性を検証する。