T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	樹脂材料のロボット構造材への適応における減衰特性に関する研究
Title(English)	Study of damping Characteristics in Adaptation of Plastics for Robot Structures
著者(和文)	高木健, 兼清真人, 遠藤玄
Authors(English)	Takeshi Takaki, Masahito Kanekiyo, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, , , 1A1-I15
Citation(English)	, , , 1A1-I15
発行日 / Pub. date	2023, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

樹脂材料のロボット構造材への適応における減衰特性に関する研究

Study of damping Characteristics in Adaptation of Plastics for Robot Structures

○正　高木 健 (広島大)，　兼清 真人 (東工大)，　正　遠藤 玄 (東工大)

Takeshi TAKAKI, Hiroshima University, takaki@hiroshima-u.ac.jp
Masahito KANEKIYO, Tokyo Institute of Technology
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology

In industrial robots, lightweighting is effective for high-speed operation. One method to achieve this is to use plastics, which are lighter than metallic materials, as structural materials. In addition, Vibration damping properties are required in structural materials for industrial robots. In this study, the damping properties of an aluminum alloy and six types of plastic were investigated using a one-degree-of-freedom experimental machine as a simple model of an industrial robot. In the experiment, the amplitude of the vibrations was measured using a laser displacement meter. Damping ratios, amplitudes and settling times were evaluated for these materials.

***Key Words*:** Damping ratio, Plastic, 3D printer

1　緒言

高速に動作できる工業用ロボットを実現するためには軽量化が有効である．そこで，構造材に金属よりも軽量な樹脂を用いる方法が考えられる．また，正確なエンドエフェクタ位置を実現するためには振動しない方が良いため，構造材には制振性の高い材料が好ましい，従来より材料の分野においてアルミニウム合金や樹脂の減衰特性について研究されている [1]-[4]．樹脂材料を用いると軽量化が期待できるが，工業用ロボットの構造材として用いた場合における減衰特性 [5] についてはほとんど知られていない．そこで，本研究では 1 自由度の試験機を用いて，アルミニウム合金の A5052 および樹脂材料のポリアセタール，MC901 ナイロン，フェルカーボ，Onyx，ポチコンおよび Onyx に長繊維のカーボンファイバーを複合した材料を用いて試験片を製作し減衰特性を検証した．

2　減衰率 [5]

減衰率について考える．簡単のため，Fig. 1(1) のように質量 m の物体に粘性 c のダンパと，剛性 k のばねが取り付けられている系を考える．ここで，質量 m の変位を x，時間を t とすると，この系の運動方程式は

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + c\frac{dx}{dt} + k = 0 \tag{1}$$

となる．Fig. 1(2) のように振動しながら減衰する場合を考える．このとき，x の解は，

$$x = x_0 e^{-\zeta\omega_0 t}\sin(\omega_d t + \phi_0) \tag{2}$$

となる．ここで，x_0 と ϕ_0 は初期値に依存し，ω_0 は固有振動数，ω_d は減衰固有振動数である．振幅 x のピークをそれぞれ

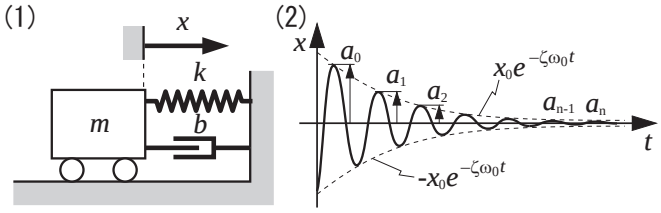

Fig.1 Simplified model and peak of damping vibration

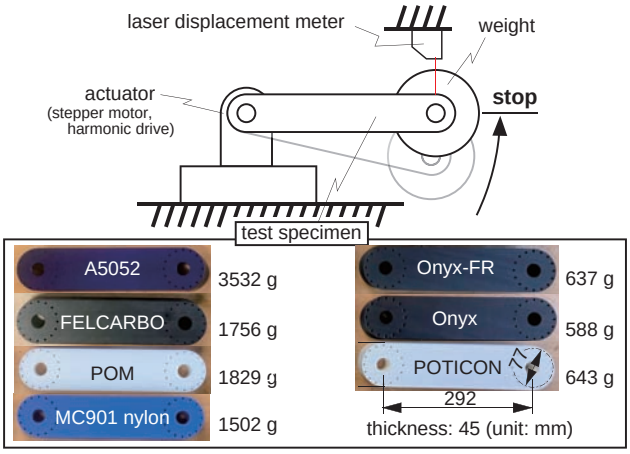

Fig.2 Exprimental setup

$a_0, a_1, \ldots, a_n$ とする．隣り合ったピークの比の対数は等しく，減衰率を ζ とすると下式が成り立つ．

$$2\pi\zeta = \ln\frac{a_0}{a_1} = \ln\frac{a_1}{a_2} = \cdots = \ln\frac{a_{n-1}}{a_n} \tag{3}$$

Eq. (3) より $2\pi\zeta$ は 1 周期からでも求めることができるが，n 周期をから求めることを考える．このとき，$2\pi\zeta n$ は

$$2\pi\zeta n = \ln\left(\frac{a_0}{a_1}\times\frac{a_1}{a_2}\times\cdots\times\frac{a_{n-1}}{a_n}\right) = \ln\frac{a_0}{a_n}. \tag{4}$$

となる．Eq. (1) が成り立つとき，減衰率 ζ は n に依存しない．しかし，3 章の実験では，異なる n 周期から求めた減衰率 ζ は異なった値となった．つまり，実験で用いた系では Eq. (1) が成り立っていないため，以降の式 (4) まで成り立っていないことになるが，減衰特性を評価するための指標として改めてこの論文においては，n 周期から求められる減衰率を ζ_n として下式で表現することとする．

$$\zeta_n = \frac{1}{2\pi n}\ln\frac{a_0}{a_n} \tag{5}$$

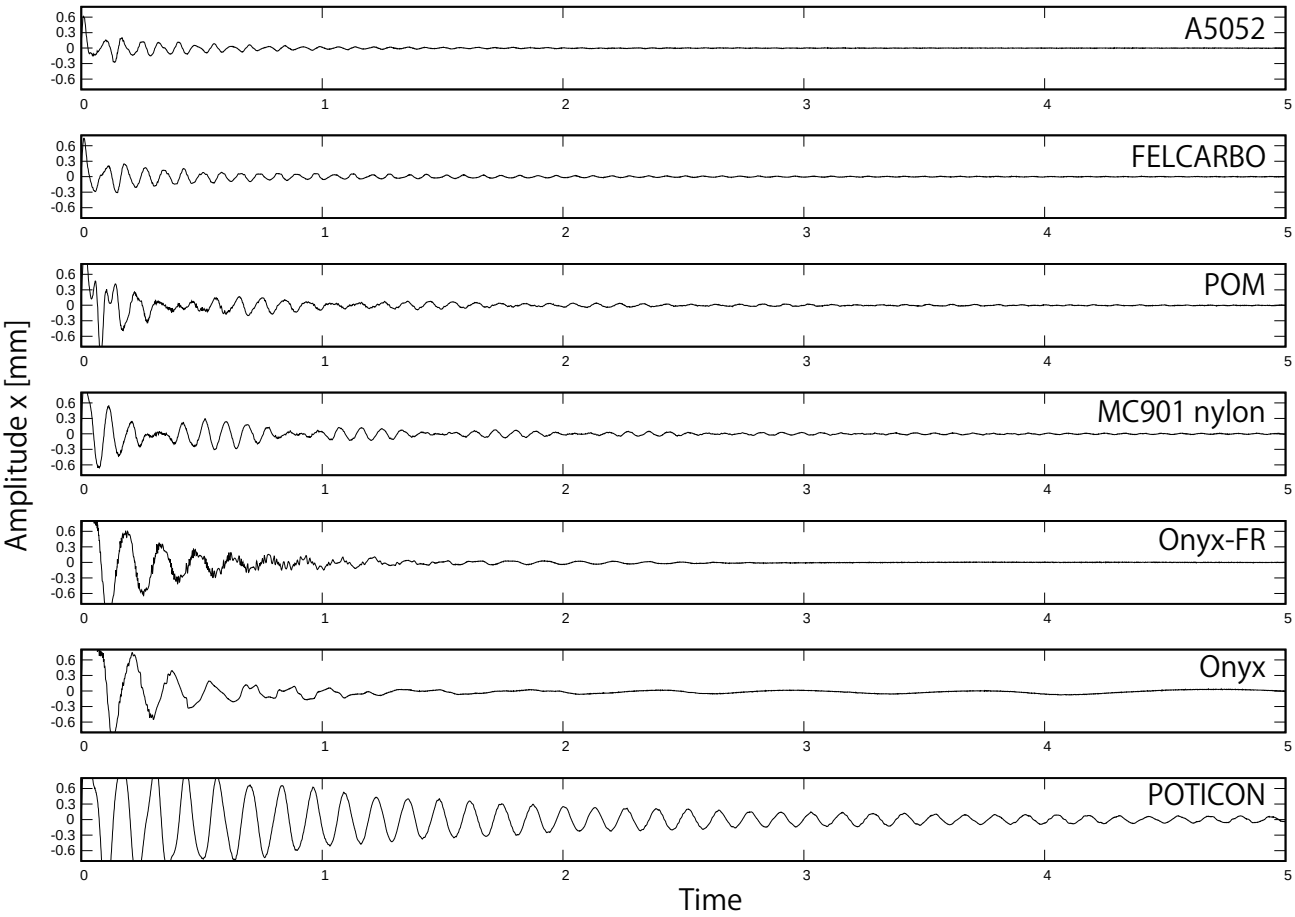

Fig.3 Experimental results of amplitude x through high-pass filter

3 実験

3.1 実験装置

ロボットの構造材をアルミニウム合金から樹脂に置き換えたときにどのように減衰特性が変化するかを調べることを目的とする．簡易的なロボットとして，Fig. 2 に示す 1 自由度の回転関節を持つ装置を用いた．試験片は 7 種類の材料で製作し，アルミニウム合金には A5052 を用いて，樹脂材料にはポリアセタール，MC901 ナイロン，フェルカーボ，ポチコン，Onyx および Onyx に長繊維のカーボンファイバーを複合したもの（以下 Onyx-FR）を用いた．Onyx-FR は長繊維のカーボンファイバーにより上下面が補強されていおり，Markforget 社の 3D プリンタを用いて製作した．また内部構造の充填率は 37% である．Onyx およびポチコンも 3D プリンタにより製作し充填率は 37% である．試験片およびその質量を Fig. 2 に示す．試験片の一端に回転関節，もう一端に 40kg の錘が取り付けられている．アクチュエータにはハーモニック・ドライブ・システムズ社の SHA32M101 を用いた．試験片の先端の変位 x をレーザー変位計 (キーエンス社製，LK-G5000，LK-H150) を用いて計測した．

3.2 実験結果

錘がアクチュエータの真下に位置する角度から，試験片が水平になる角度まで持ち上げ急停止させた．その時に生じた試験片の振幅 x を計測した．計測した振幅 x にはクリープ変形が含まれており，その変形の動きは振動の周期と比較すると十分にゆっくりであったため，前処理として折点周波数が 0.1 Hz の一次のハイパスフィルターを用いてこの変形の影響を除去した．その処理後の結果を Fig. 3 に示す．1，3，10 周期から求めた減衰比 ζ_1，ζ_3，ζ_{10} を Fig. 4(1) に示す．減衰比が大きいほど早く減衰するため，大きいほど減衰特性が優れた材料である．A5052 を基準に考えると，樹脂においてフェルカーボが類似した特性を持っていることが分かる．MC ナイロン，ポリアセタール，Onyx，Onyx-FR も優れた減衰比であると考えらる．一方，ポチコンは減衰比が小さく，長時間振動した．

次に，第 1 ピーク a_0 を Fig. 4(2) に示す．振幅は小さいほど優れた材料であるため，a_0 は小さい方が好ましい．A5052 が最も小さく，樹脂においてはフェルカーボが優れた特性を持っていることが分かる．ポリアセタールと MC ナイロンは同程度あった．これらよりも，3D プリンタで製作した試験片 Onyx，Onyx-FR，ポチコンは a_0 が大きくなっている．これは内部構造の充填率が 37% であるため剛性が低くなったことが支配的な原因であると考えている．

これらの実験結果より，減衰比が大きくても振幅が大きい場合には長時間振動することが分かる．そこで，振幅 x が時間 t_{th} 以降すべて閾値 x_{th} よりも小さくなる時間を整定時間 t_{th} と定義する．閾値 x_{th} を 0.01，0.02，0.05 mm とし，その結果を Fig. 4(3) に示す．Onyx およびポチコンの $x_{th} = 0.01$，0.02 mm は実験時間内に整定しなかった．整定時間 t_{th} は減衰する時間を示しているため，小さいほど優れた材料となる．この場合においてもフェルカーボは優れた特性を持っていることが分かる．続いてポリアセタールが優れている．Onyx-FR は MC ナイロンと類似した値となっている．Onyx は時間内に整定しなかったことを考慮すると，長繊維による補強は有効であることが分かる．

4 結論

6 種類の樹脂材料について，アルミニウム合金 A5052 と比較して減衰特性を調べた．樹脂材料の減衰率はアルミニウム合金と同程度であるが，剛性が小さいため振幅が大きく，整定時間が長くなる傾向があった．その中でフェルカーボの減衰特性が優れて

いることが分かった．今後，これらの減衰特性を考慮した機械設計方法を確立して行く予定である．

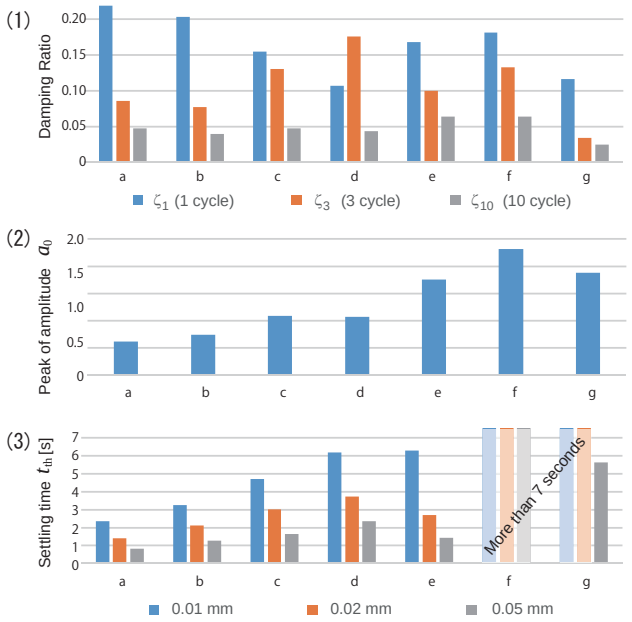

Fig.4 Exprimental result, a: A5052, b: FELCARBO, c: POM, d: MC901 nylon, e: Onyx-FR, f: Onyx, g: POTICON

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の 助成事業（JPNP20016）の一環として行われたものである。また、本論文は、技術研究組合 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構との共同研究の成果であり、技術研究組合 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構が共有著作権を有している。

貴重なコメントと議論をいただきました武居直行教授（東京都立大学），太田裕介教授（千葉工業大学）に感謝いたします．

参考文献

[1] X. Guan, H. Numakura, M. Koiwa: Internal Friction Peak in Cold-Worked ”Pure” Aluminum and Aluminum Alloys, J. de Physique IV Proceeding, EDF Sciences, Vol. 6(C8), pp. 219-222, 1996.

[2] T. C. Lei: Relationship between internal friction and creep rupture behavior of aluminum alloys, J. de Physique Colloques, Vol. 42(C5), pp. 487-492, 1981.

[3] S. Dongli, Y. Dezhuang and Y. Zhengyao: Effect of heat treatment on internal friction of grain boundary in 2091 Al-Li alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 7, No. 3, pp. 118-122, 1997.

[4] T. Kawaguchi: Dynamic Mechanical Properties of Polyethylene Terephthalate, J. Polymer science, vol. 31. pp. 417-424, 1959.

[5] T. Takaki, M. Kanekiyo, G. Endo: Damping Characteristics in Adaptation of Plastics for Robot Structures, in Proc. 2023 IEEE/SICE Int. Symp.System Integration (SII). pp. 512-524, 2023.