

# 非線形バネ SAT の耐久性評価試験

## Durability Test of Non-Linear Spring SAT

学 草川 祐樹 (鈴鹿高専) 正 白井 達也 (鈴鹿高専)  
学 石倉 健一郎 (大阪大学) 正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Yuuki KUSAGAWA, Suzuka National College of Technology

Tatsuya SHIRAI, Takumi TOMIOKA, Suzuka N.C.T.

Ken-ichirou ISHIKURA, Osaka University

### Abstract-

The wire utilized in the wire-driven system is broken when it is received a strong impulse force, since the most of motors used for humanoid robots have the reduce gear which has high reduce gear ratio. If the power transmission mechanism has the mechanical compliance, the impulse force should be absorbed. We had proposed a non-linear spring device SAT (*Stiffness Adjustable Tendon*) to equip mechanical compliance for the power transmission mechanism of robots. In this paper, we had examined the relationship between the tension and the displacement of SAT in order to make clear the non-linear spring characteristic of SAT. For the purpose we had developed an automatic characteristic measurement equipment. We had also examined durability of SAT.

**Key Words** : Non-Linear Spring, Durability Test, Stiffness Adjustable Tendon

## 1 はじめに

近年,様々なヒューマノイドロボットが開発されているが,その大半は衝撃力を伴うダイナミックな動作が苦手である。(独法)産業技術総合研究所と川田工業(株)は等身大ヒューマノイドロボットの転倒時の姿勢を制御することで転倒時の衝撃を軽減できることを実験により示した<sup>1)</sup>.この例から分かるように従来のロボットは走ったり,跳んだりといったダイナミックな動作を苦手としており,転倒すると大半のロボットは特別な制御手法を用いない限り動力伝達機構を破損する危険性が高い.小型のヒューマノイドロボットやペットロボットの中にはダイナミックな動作を実現しているものも存在する.この違いはロボットのスケールに依存している.開発された大型のヒューマノイドロボットの大半は,トルク/重量比に優れて技術的に成熟した小型軽量の電気モータを動力として用いている.ロボットのサイズが $n$ 倍になると重量は $n^3$ 倍になるが,アクチュエータは体積が $n$ 倍になったとしても能力が単純に $n^3$ 倍になるとは限らない.ロボットの重量を軽減し,かつロボットを動かすのに十分な大きなトルクを得るには,小型軽量のサーボモータに高減速比を持つ減速器を組み合わせて用いる必要がある.サーボモータの減速器の減速比が高いと,外部からロボットの腕や脚などに外力を加えても外力はサーボモータまで伝わらず,“機構的に硬いロボット”となる.機構的に硬いロボットは制御によって柔らかく振る舞っているに過ぎず,動作限界を超える急激な外力の変化(衝撃力)が生じた場合, Fig.1のように動力伝達機構(ギア,ワイヤ

等)を破損する恐れがある.また,機構的に硬いロボットの歩行は,ヒトが二足歩行する場合に比べてエネルギー効率が悪い<sup>2)</sup>.ロボットの関節が機構的に硬い場合,脚の運動をすべてアクチュエータが発生するトルクに頼らなければならないため,脚を地面から持ち上げるのに消費した運動エネルギーを回生できず,脚を振り下ろす際にもエネルギーを消費するためである.これが現在のヒューマノイドロボットの抱えている問題であり,今後,運動能力の向上を計る上で解決すべき課題である.

制御技術によって機構的な柔らかさを実現しているシステムではロボットが対象物に衝突した後に関節剛性を柔軟化させるため反応が遅い.構成要素(センサ,信号伝達系,コントローラなど)の故障や動作不良により危険な挙動を起こす可能性もある.サービスロボットや介護・リハビリロボットなどヒトと接する機会の多いロボットは,衝突安

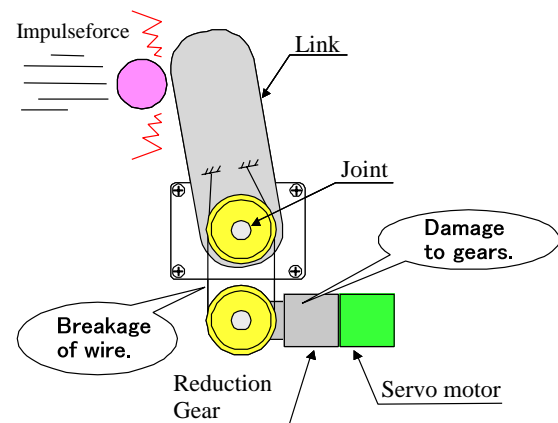


Fig.1 Wire driven system.

全性の観点からセンサを用いずに関節剛性を調節できることが期待されている。このような背景から、近年、機構的な柔らかさをロボットに付加するための非線形バネ機構の研究が活発になってきた<sup>3)4)</sup>。林原らは開発した剛性可変機構を関節抗縮などのリハビリテーションで用いられるCPM装置に応用し、有用性を確認している<sup>5)</sup>。筆者らも非線形バネ特性をもち、取り扱いが容易な引っ張りバネ式の新しいバネ要素SAT(*Stiffness Adjustable Tendon*)を開発した<sup>6)7)</sup>。本研究ではSATの物理的特性をより正確に計測するとともに、SATの実用化を視野に入れ、耐久性の評価試験を行った。この2つの目的を実現させるために、自動特性測定装置と繰返し荷重印加装置を設計・製作した。

## 2 非線形バネ要素 SAT

SATは従来から産業界はもとより日常生活でも広く用いられているコイルスプリングと同じ引っ張りバネだが、構造・原理・特性はまったく異なる。変位量が小さいうちは剛性が低く、伸びるのに従って剛性が増加する非線形バネ特性を持つ。Fig.2はSATの構造を表した図である。SATは弾性素材である円筒形状のシリコンスポンジ丸棒外周を編みチューブで覆い、両端を結束バンドで封止したソーセージ状のシンプルな構造である。編みチューブを左右方向に引っ張ると編みチューブは伸びると同時に内径が小さくなり、弾性体は周囲から圧縮される。圧縮された弾性体は元の形状に戻ろうとして反発力を発生し、編みチューブの内径を押し広げようとする。この圧縮力と反発力が釣り合う長さまでSATは伸びる。SATの構造は編みチューブを用いる点でラバチューエータ<sup>8)</sup>と似ているが、ラバチューエータは編みチューブ内に高圧の流体(主に高圧エア)を流し込むことでアクチュエータとして用いられるのに対して、SATは固体の弾性体を用いているため、高い圧力が発生しても内部の弾性体が漏洩する危険性がないため、漏洩防止のシールを施す必要がない。さらにSATは引張バネとして用いられることから、圧縮バネのような座屈を防ぐためのカバー等が不要であり、構成部品が少なく破損し難い。コイルスプリ

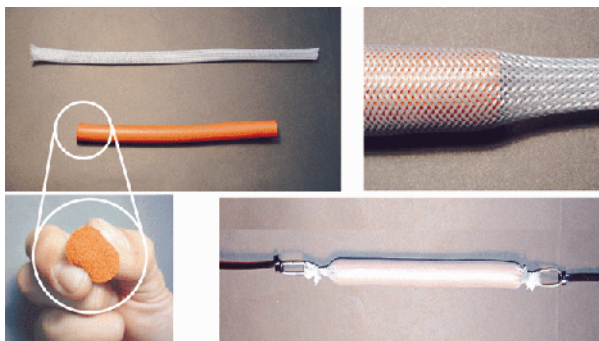


Fig.2 Structure of SAT.

ングのように伸縮する際にコイル空隙が変化して隙間に異物が挟まることもない。金属製の部品を使っていないため動作音が静かで水分の多い雰囲気中でも使用可能である。また、特殊な材料や特殊な加工装置を必要としないため、簡単に製作できる点も大きな特徴である。

Fig.3, 4はSATに印加した張力と変位量の関係調べた実験結果である。各グラフはSATに印加する張力を0 175 0[N]と五往復したデータの平均値である。グラフの横軸はSATの変位量、縦軸は張力を表す。各点における傾きはバネ剛性を表す。Fig.3は全長100[mm]のSATを直列に接続したときの特性を調べたグラフである。いずれのグラフからも、SATが伸びれば伸びるほどバネ剛性の高くなる非線形バネ特性を有することが分かる。2本の100[mm]のSATを直列に接続した特性は全長200[mm]の1本のSATとほぼ等しく、線形バネと同様に単純に2つのSATのバネ剛性を足し合わせた特性を持つことが分かる。外力を加えて引っ張る過程と外力を取り除いて緩める過程で特性が異なるヒステリシス特性を持つことが分かる。Fig.4は全長200[mm]のSATを10, 50, 100[mm/sec]で引っ張った時のSATのバネ特性を比較したグラフである。引張速度が速いほど伸びやすくなる速度依存性を持っていることが分かる。速度依存性もヒステリシス特性もSAT内部の弾性体として用いているシリコンゴムスポンジ丸棒の変形の復元速度の遅さに起因している。

伸びれば伸びるほど剛性が大きくなるSATの特徴は、伸びるに従って断面面積の減少する編みチューブの特性に由来する。編みチューブは螺旋状に巻かれた素線の集まりである。ここでSAT全長を $l_n$ 、断面の直径を $d$ 、1本の素線の巻き数を $N$ 回、素線の全長を $L_{sn}$ とする。素線は左右方向に同数巻かれているため、SATが伸縮しても擦れず、巻き数 $N$ は常に一定である。同様に、素線全長 $L_{sn}$ もSATの変位量とは無関係に一定なので、 $l_n$ と $d$ の間には次式の関係が成り立つ。

$$d = \frac{\sqrt{L_{sn}^2 - l_n^2}}{N\pi} \quad (1)$$

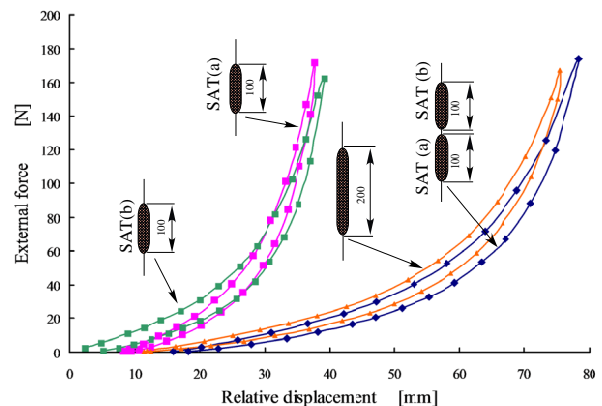


Fig.3 Static characteristic of SAT.

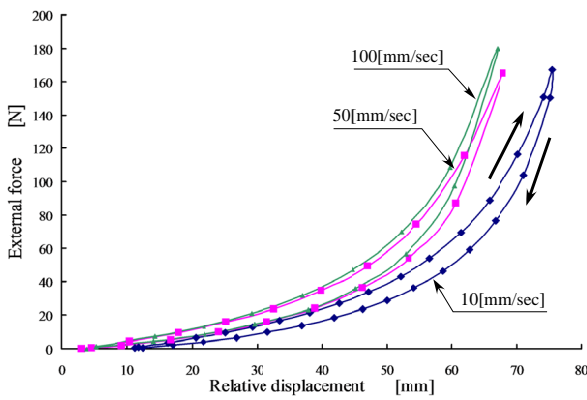


Fig.4 The relationship between velocity and characteristic of SAT.

なお、素線全長  $L_{sn}$  は次式より求まる。ここで  $d_0$  は SAT 全長がある長さ  $l_{n0}$  の時の断面の直径である。

$$L_{sn} = \sqrt{l_{n0}^2 + (N\pi d_0)^2} \quad (2)$$

Fig.5は(1)式に実際のSATの係数を代入して求めたSATの全長  $l_n$  と断面の直径  $d$  の関係を表すグラフである。横軸は  $l_n$ 、縦軸は  $d$  である。グラフ中の  $d$  は(1)式より求めたグラフ、 $V_{in}$  はSAT内部の円筒形の空間の体積である。このシミュレーション結果より、SATが伸びるのに合わせて単にSATの太さが細くなるだけではなく、SAT内部の体積が加速度的に減少して内部の弾性体を強く圧迫することが分かる。これがSATの非線形バネ特性発生メカニズムである。グラフ中のマークは実際のSATの断面直径の計測結果であり、シミュレーション結果とほぼ一致していることが分かる。

### 3 耐久性評価システム

#### 3.1 自動特性測定装置

SATに印加する荷重と変位量を自動的に測定する自動特性測定装置の構造をFig.6に示す。自動特性測定装置はフォースゲージ(ZP-200N/(株)イマダ製)および電動スライダ(MV-500N-SUZUKA-CT/(株)イマダ製)からなる。フォースゲージの仕様は、最大許容荷重200[N]、精度±

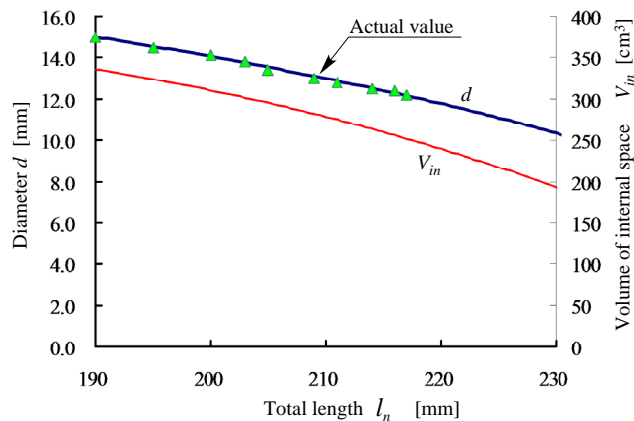


Fig.5 Simulation results.

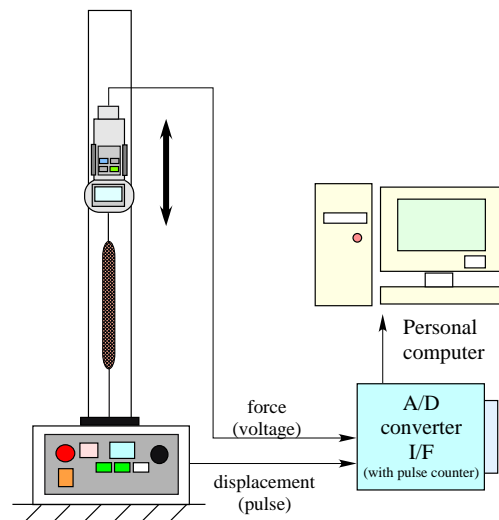


Fig.6 Automatic measurement equipment.

0.2%F.S. ± 1[DIGIT]、サンプリング周期1000[回/秒]、表示更新周期10[回/秒]である。電動スライダの仕様は、最大許容荷重500[N]、最大ストローク850[mm]、速度は20~600[mm/min]の範囲で変更可能である。フォースゲージの出力はUSBケーブルでパーソナルコンピュータ(以下、PC)に取り込むことができる。フォースゲージの出力はアナログ電圧(±1[V])でリアルタイムに出力される。電動スライダの変位量はアナログ電圧(0~2[V])およびエンコーダパルスで出力される。フォースゲージのアナログ出力および電動スライダのエンコーダ出力をA/D変換インターフェース(パルスカウンタ内蔵、PCI-320416、(株)インフェース製)を介してPCに取り込むことで、電動スライダの変位量とフォースゲージに作用する張力を同期入力可能である。

#### 3.2 繰返し荷重印加装置

SATに一定ストロークあるいは一定荷重を繰返し連続して印加する繰返し荷重印加装置の構造をFig.7に示す。SATの下端をベース部に固定し、SAT上端をエアシリンダによって上下動させて引っ張る。高圧空気源としてエアコンプレッサを用い、0.5[MPa]の圧力を印加、約100[N]の張力を発生可能である。制御装置にはシーケンサ(KV-16DR/キーエンス製)を用い、繰返し回数、往復時間を調整可能である。ストロークエンドにショックアブソーバを内蔵したストップを設置してある。エアシリンダが下端に伸び切った際にストップに接触して停止する。エアシリンダの取付位置を上下に移動させてエアシリンダの下端停止位置を調整することでSATを引張るストローク長をゼロから最大200[mm]まで調整可能である。エアシリンダを高い位置に取り付けることでストップによるメカニカルリミットを無効化すれば、高圧空気の圧力に応じて決まる最大荷重による繰返し荷重印加実験を行うこともできる。高圧空気の圧力はレギュレータにより調整可能である。



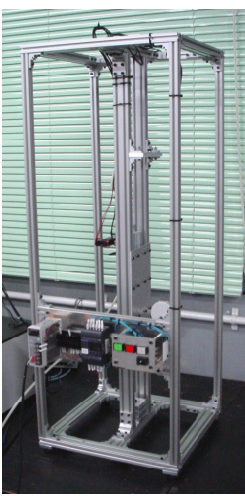


Fig.7 Load test equipment.

1,000回と10,000回の繰返し荷重試験を行った前後のSATの静特性の変化をFig.8に示す．使用したSATは全長200[mm]， $\phi 16$ である．繰返し荷重印加装置で約100[N]の張力を与え続けた結果，繰返し荷重印加試験を行っていない状態のSATに比べて1,000回の繰返し荷重印加試験を行ったSATは約10[mm]，10,000回の繰返し荷重印加試験を行った場合は20[mm]近く変位量が減少しており，SATとしての性能が変化していることが分かる．10,000回の繰返し荷重試験直後のSATは全長203[mm]に伸び，断面直径は $\phi 16$ から $\phi 15.5$ に減少していた．このSATを2時間放置したところ全長197[mm]， $\phi 16$ に復元した．10,000回の繰返し試験を行ったSATの12時間後および24時間後の静特性の時間変化をFig.9に示す．グラフより10,000回の繰返し荷重試験から長時間が経過したSATは徐々に特性が復元していくことと，初期の特性までは戻らないことが分かる．原因は内部の弾性体であるシリコンスポンジ丸棒に応力が残留したことにある．もし一定回数以上の繰返し荷重を印加したあとは特性が変化しないのであれば，使用前にエージングを行うことで実使用上は問題ないが，残留応力が時間経過と共に取り除かれて特性が復元してしまい，使用条件によって特性が不安定に変化することを示している．静特性がヒステリシス特性を持つことと合わせて，内部の弾性体の材質の改善が必要である．

#### 4 まとめと今後の課題

シンプルな構造を特徴とする非線形バネ要素SATの実用性を評価するために，耐久性評価システムの構築を行った．自動特性測定装置および繰返し荷重印加装置を設計／製作し，実際にSATに対して10,000回の繰返し荷重印加実験を行った．その結果，SATの特性が繰返し荷重を印加し続けるうちに徐々に変化すること，荷重を取り除いて放置すると時間と共に特性が徐々に復元してしまう不安定な性質を持つことが明らかになった．

不安定な特性を有する原因は内部弾性体として用いて

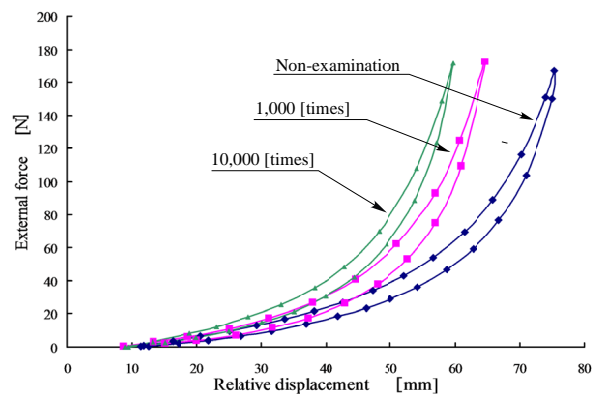


Fig.8 Experimental results (10000times).

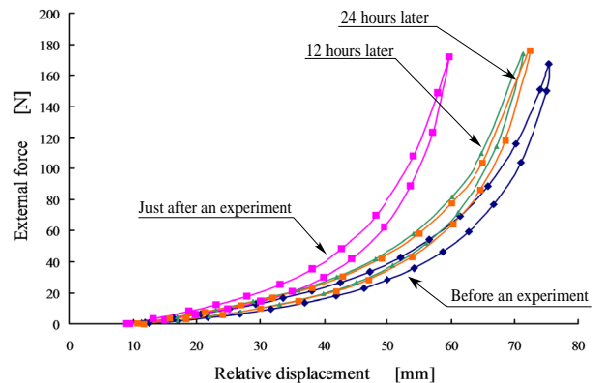


Fig.9 Experimental results (24hours).

いるシリコンスポンジの材質に起因することから，今後は様々な材質・形状の弾性体を探索し，実用的な安定した特性をもつSATを完成させる．また，SATの物理的特性を正確にモデル化し，希望する特性のSATを設計するための指針を示す．

なお，本研究は独立行政法人・科学技術振興機構のデータ補完助成を受けて行われたものである．

#### 参考文献

- 1) 藤原，兼弘，梶田，横井，齋藤，原田，比留川，五十雄： “等身大ヒューマノイドロボットによる転倒制御”，第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2003.
- 2) 小坂： “二足歩行ロボットのエネルギー効率の考察”，第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2002.
- 3) 森田，菅野： “メカニカルソフトネスとコンプライアンス調整”，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 6, pp. 790-794, 1999.
- 4) 小金澤，山崎，石川： “剛性可変機構を有する拮抗筋型腱駆動システムとその制御”，日本ロボット学会誌，Vol. 18, No. 7, pp. 1003-1010, 2000.
- 5) 砂崎，林原： “剛性可変機構を用いたリハビリ用CPM装置の開発”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集，2003.
- 6) 白井，富岡： “ワイヤ駆動式ロボットの関節剛性調整機構SATの提案”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集，2003.
- 7) 白井，田中，富岡： “非線形バネSATの原理と特性”，第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2003.
- 8) 松下，相良，山下，谷口： “ラバチュエータを用いた一軸ロボットハンドの力制御の適用”，日本ロボット学会誌，Vol.11, No. 3, pp. 461-467, 1993.