

パワースーツに関する力学解析

兵庫県立大学 工学研究科 荒木 望

2020年12月22日
改訂 2021年1月19日

目次

1	はじめに	3
2	バネによる上体曲げからの回復補助力についての検討	4
2.1	上体曲げモデル	4
2.2	上体曲げに対するバネ定数の推定	5
2.3	小結	7
3	伸縮性バンドによる中腰姿勢からの回復補助力についての検討	8
3.1	膝曲げにともなう伸縮性バンドの張力による腰部トルクモデル	8
3.2	伸縮性バンドのバネ定数推定	9
3.3	小結	10
4	まとめ	11
	参考文献	12

1 はじめに

本レポートでは有限会社アトリエケー社製「ワーキングパワースーツ X」(以下、パワースーツと呼ぶ)に関する力学的性能について評価した結果について報告する。

図1に示すパワースーツは、変形・変位により力を発生する箇所として図1(a)の背中に取り付けられたバネと、図1(b)のスーツ下部と膝で固定された伸縮性バンドを有している。このうち、図1(a)の背面部バネは上体曲げからの回復の補助、図1(b)の伸縮性バンドは中腰姿勢からの回復の補助として機能するものと考えられる。

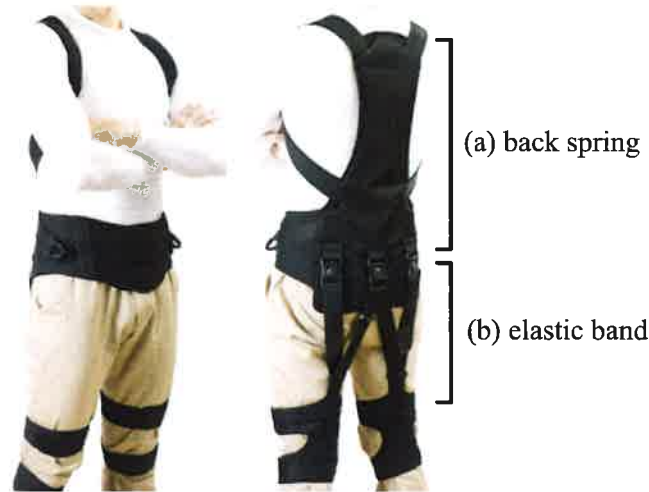


図 1: ワーキングパワースーツ X の外観と構造. (出典: 有限会社アトリエケー ホームページ <https://agri-suit.com>)

そこで本レポートでは、パワースーツ使用時に発生する補助力に関して力学的な観点から実験および解析を行った。このうち、バネによる上体曲げからの回復補助力の評価については、パワースーツを装着させたダミー人形の肩付近で発生する補助力を直接計測することで評価を行った。また、伸縮性バンドによる中腰姿勢からの回復補助力の評価については、伸縮性バンド単体のばね定数(変位に対する張力の比例係数)を実験により計測するとともに、得られたばね定数とパワースーツ装着時の幾何学的な構造から腰部で発生するトルクを計算により求めることとした。本実験における補助力および張力の計測については、デジタルフォースゲージ(株式会社イマダ製 ZPS-DPU-50N, 最大荷重 50 N, 精度 $\pm 0.2\%F.S.$ 以内, 最小分解能 0.01 N)を用いた。

これらの評価の結果、バネによる上体曲げからの回復補助力については肩ベルトに対して上体を起こす方向に最大 7.9 N 程度となることが想定される。また、伸縮性バンドのばね定数については 89 N/m であり、この値から計算した中腰姿勢からの回復補助力として股関節に働くトルクは 3.8 N m 程度となるとの結果が得られた。次章以降でこれらの数値に関する詳細を示す。

なお、本レポートにおける実験・解析はパワースーツの構成部品(スーツ本体、バネ、伸縮性バンドなど)単体、およびパワースーツを装着した際の幾何学的な構造から検討したものであり、人に対してパワースーツを装着した実験は一切行っていない。このため、本レポートにおける実験・解析結果はパワースーツの使用に関する安全性を補償するものではないことを明記しておく。

2 バネによる上体曲げからの回復補助力についての検討

2.1 上体曲げモデル

ここでは図1(a)のバネによる補助力について検討する。パワースーツのバネは肩および腰ベルトにより背中に沿うように設置されている。このため、バネ自体は図2のように前傾姿勢にともなう上体の曲げによって変形すると考えられる。

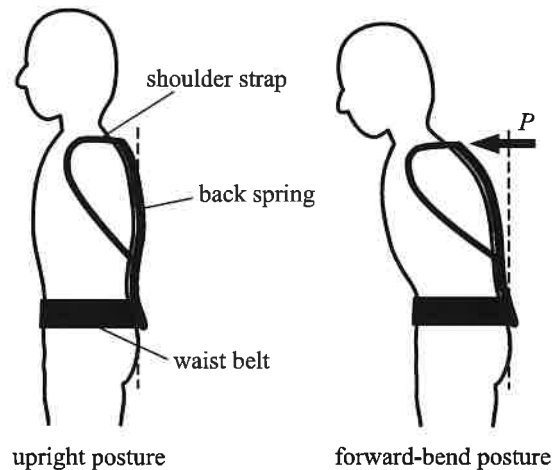


図 2: 姿勢の変化によるパワースーツのバネ変形

図2において、パワースーツは腰ベルトで固定されており腰の位置は変化しないと仮定すると、装着者が前傾姿勢をとることで肩ベルトによる張力によりバネが変形する。一方、装着者はバネが元に戻ろうとする逆向きの力を肩ベルトから受けることとなる。この図2のバネを腰ベルトの位置で支持された片持ち梁として単純化すると、図3に示すような、長さ l の片持ち梁の自由端に集中荷重 P がかったものとして近似できる。

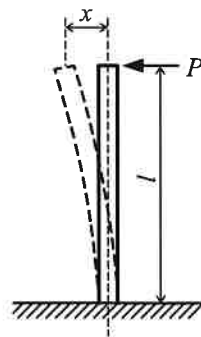


図 3: 片持ち梁モデル

ここで、図3の片持ち梁モデルの荷重 P と変形量 (たわみ) x の関係について考える。いま、梁の断面二次モーメント (断面形状による曲がりにくさを定義する値) を I とし、梁のヤング率 (材質による弾性を表す値) を E とすると、変形量が微小な場合には以下の式が成り立つ [1].

$$x = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (1)$$

一方、図3の梁を単純なバネと考え、変形量 x を上体曲げにともなうパワースーツの変形とし、荷重 P をバネによる補助力とすると、バネ定数を k とするとフックの法則より

$$P = kx \quad (2)$$

となることから、式(1)-(2)より

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (3)$$

を得る。式(3)よりバネのヤング率、断面二次モーメントおよび長さから、装着者に作用する補助力を計算するためのばね定数を推定することができる。

2.2 上体曲げに対するバネ定数の推定

しかしながら、パワースーツのバネはスーツを構成するベルトや外装なども含むことから、ヤング率や断面二次モーメントを求めることは容易ではない。また、図2のようにパワースーツの変形量は微小とはいえなため、単純に物性値からばね定数を求めることは困難である。

そこで、本レポートでは荷重 P と変形量 x に対して式(2)の関係は成り立つものと仮定し、変形量に対する加重を直接計測することで上体曲げに対するバネ定数を推定するものとした。ここでは図4に示す等身大のダミー人形(材質: ポリウレタンフォーム、身長約 172 cm, 座高約 82 cm, 胸囲約 92 cm, 詳細は [2] 参照。)を用い、パワースーツ着用時と非着用時の変形量に対する押しつけ荷重を直接計測した。

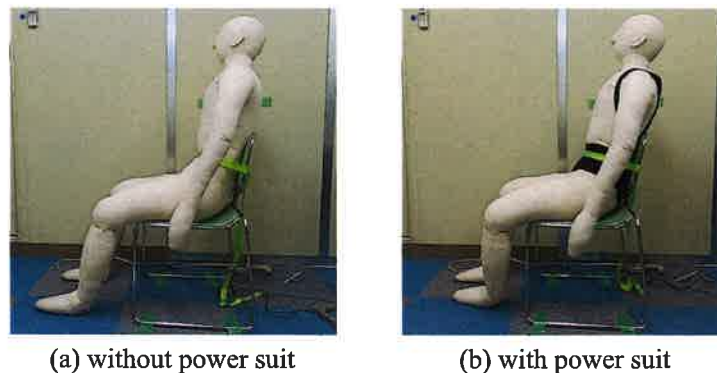


図4: バネ定数推定に用いるダミー人形 ((a): パワースーツ非着用時, (b): パワースーツ着用時)

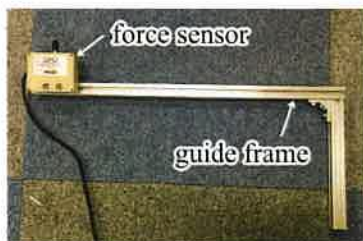


図5: 押しつけ力計測用センサ治具

図4のダミー人形の上体曲げに対する押しつけ荷重の計測については、ダミー人形の固定状況や形状変化から機械的な計測が困難であることから、今回は図5に示す治具を利用して手作

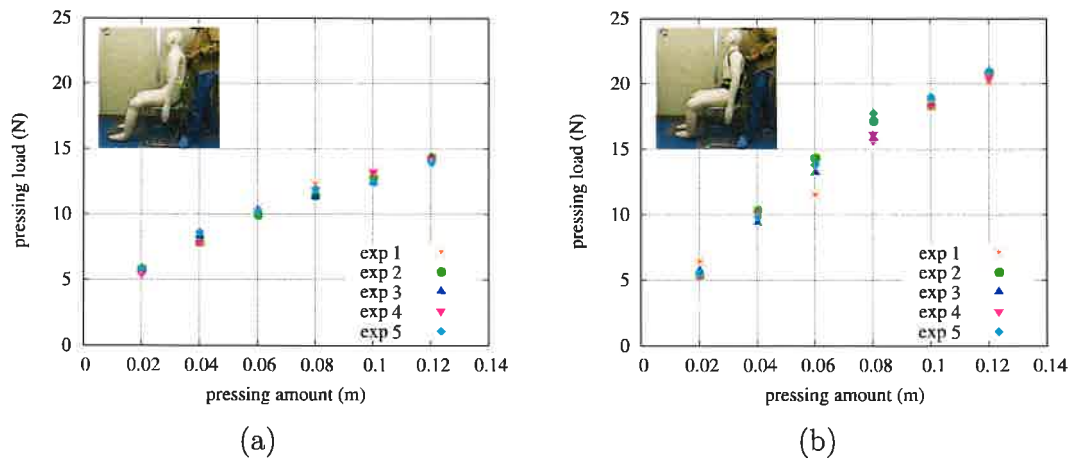


図 6: パワースーツ着用有無におけるダミー人形の押しつけ量と押しつけ荷重の関係 ($N = 5$). (a) パワースーツ非着用時, (b) パワースーツ着用時

業で実験を行うものとした。図5の治具は L 字型に組んだフレームにフォースゲージを固定したものであり、短辺部を壁に沿わすことで押しつけ方向が壁と平行になるようにするとともに、壁に対する移動量を利用することで、ダミー人形に対する押しつけ量を定めるものとなる。

図6は、図5に示した治具を用いて計測したパワースーツ着用の有無におけるダミー人形の押しつけ量と押しつけ荷重との関係を示したものであり、実験における計測値のばらつきを考慮してパワースーツ非着用時、着用時ともに5回ずつの計測を行っている。図6(a)のパワースーツ非着用時については、押しつけ量の増加にともない押しつけ荷重が増加しており、押しつけ量が0.1 mを越えた付近からは押しつけ荷重の変化が少なくなる(一定値に漸近する)傾向が見られることが分かる。また、実験毎のばらつきは比較的少なく、すべての実験で概ね同様の傾向を示していることが確認できる。一方、図6(b)のパワースーツ着用時については、図6(a)よりも大きな荷重変化となっているが、図6(a)と同様に増加傾向は押しつけ量が0.1 mを越えた付近から若干緩やかになっていることが確認できる。実験毎のばらつきについては図6(a)よりも大きくなっており、特に0.06 mにおける1回目の実験結果はその他の値から顕著に外れていることが分かる。

図6の結果について、図6(a)はダミー人形そのものの特性を表したものと考えることができ、図6(b)はダミー人形にパワースーツの着用により生じた荷重(バネによる反発力)を加えたものと解釈できる。そこで、パワースーツ着用時の押しつけ荷重から非着用時の押しつけ荷重を引いたものをパワースーツの補助力と定義することとし、ここからパワースーツのバネ定数を推定することとした。なお、図6のばらつきを考慮し、図6(a)のパワースーツ非着用時については5回すべての実験の平均値を、図6(b)のパワースーツ着用時については1回目の実験を除く4回の実験の平均値をそれぞれの荷重の計測値として用いることとした。図7に図6(b)と図6(a)の差分から計算した各押しつけ量に対するパワースーツの補助力を示す。図7より得られた補助力は押しつけ量0.1 mまで概ね直線的に増加しており、式(2)のように押しつけ量と押しつけ荷重が比例していることを示している。ただし、押しつけ荷重が0.12 mの点についてはそれ以前のデータよりも増加量が小さくなっており、直線から外れているように見える。これは図6においていずれのデータも押しつけ量が0.1 mを越えたところから増加傾向が緩やかになり、一定値に漸近する傾向を示していることに起因している。このことから、以降のバネ定数の推定では0.1 m以下のデータのみを用いることとする。一方でこれらの値を結ぶ直線は原点を通らない線となっていることが分かる。これはパワースーツの有無によりダミー人形

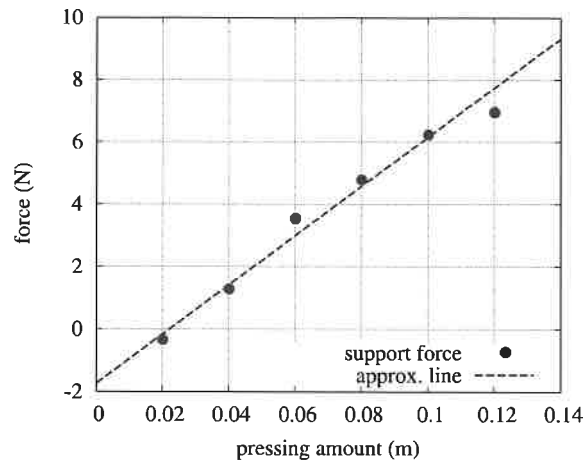


図 7: 実験値の差分から得られた押しつけ量とパワースーツの補助力との関係

の姿勢そのものが若干変化したことによる影響と考えられる。そこで、パワースーツのバネ定数 k_s [N/m], 初期状態での押しつけ荷重 P_0 [N] とし、押しつけ量 x に対する押しつけ荷重 P の関係を

$$P = k_s x + P_0 \quad (4)$$

とし、図 7 の押しつけ量 0.1 m 以下の値から最小二乗法により k_s および P_0 を求めたところ、 $k_s = 79$ [N/m], $P_0 = -1.744$ [N] の値が得られた。図 7 の近似直線は得られた k_s , P_0 を用いて式 (4) により計算された値であり、実験値から得られた押しつけ量 0.1 m 以下の補助力の傾向とよく一致していることが確認できる。

2.3 小結

ここでは、パワースーツの上体曲げに対する補助力について、腰を支点とした片持ち梁構造をもつバネと仮定し上体曲げによる変位に対するバネ定数を推定してたところ、概ね 79 N/m 程度となることを確認した。腰を固定した場合の上体曲げの変位量に関するデータについては、今回文献を確認することができなかったが、身長 170 cm 程度の人の場合、最大でも 0.10 m 程度と推測される。(上体よりも腰が先に曲がるため、それほど大きく変化しないと考えられる。一般的なバイオメカニクスなどの文献 [3] でも、人のモデルとして上体曲げは考慮されていない。) このため、上体曲げによってパワースーツの肩ベルトにかかる補助力は上体を起こす方向に最大 7.9 N 程度と想定される。これは 0.8 kg 程度の物体を垂直に引き上げる程度の力となる。

3 伸縮性バンドによる中腰姿勢からの回復補助力についての検討

3.1 膝曲げにともなう伸縮性バンドの張力による腰部トルクモデル

次に、図 1(b) の伸縮性バンドによる補助力について検討する。伸縮性バンドは腰付近のパワースーツ下部と、膝に取り付けるサポーターで固定されている。実際にパワースーツを着用すると、中腰姿勢を取ることで伸縮性バンドが腰部の股関節の回転と臀部の体表面の増大にともなって変形し、補助力として作用することが分かる。この補助力発生メカニズムについては田中らの持ち上げ動作用ゴムベルトスーツ [4] と近い構造となっているため、本レポートでは [4] を参考に補助力の検討を行った。

図 8 に中腰姿勢による伸縮性バンドの変形に関するモデルを示す。ここで図 8 における中腰姿勢については文献 [4] に従い、膝関節が最も力を発揮する 60 deg となる姿勢を基準として、体幹角度 50 deg 、足関節角度 20 deg とし、これらの値から算出される股関節角度 40 deg を最大変形量として回復補助力の計算を行うものとした。

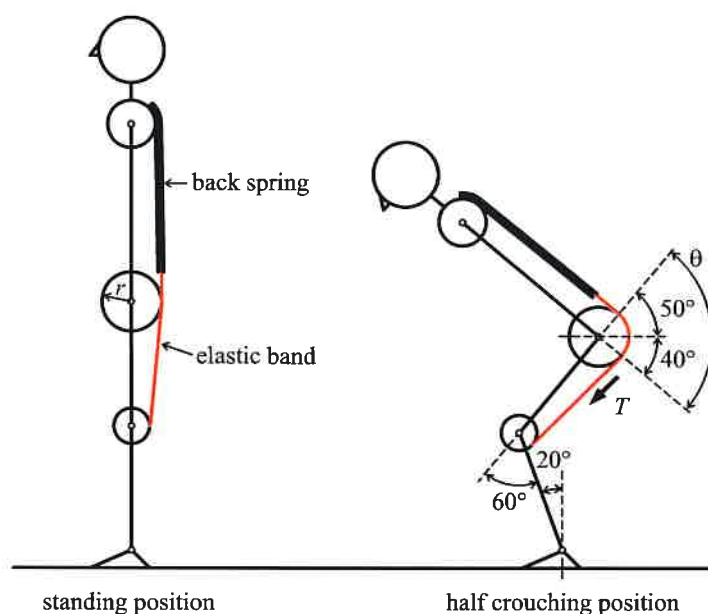


図 8: 中腰姿勢によるパワースーツの伸縮性バンドの変形

いま、伸縮性バンドの変形は姿勢変化による臀部体表面の増大のみで生じると仮定し、股関節（臀部）を半径 r [m] の円弧と考えると、中腰姿勢を取ることに伴う臀部の体表面増大量 x [m] は、股関節の角度変形量を θ [rad] として

$$x = r\theta, \quad (5)$$

となる。一方、図 1 より、パワースーツの伸縮性バンドはスーツ下部と膝の間で W 型に取り付けられていることが分かる。このため、伸縮性バンドの変形量は単純計算で式 (5) の体表面増大量の 4 倍となる。従って、中腰姿勢を取ることに伴う変形で生じる伸縮性バンドの張力 T [N] は、伸縮性バンドのバネ定数を k_e [N/m] として式 (5) より

$$T = k_e \cdot (4x) = 4k_e r\theta \quad (6)$$

となる。さらに、式 (6) の張力 T により股関節に働くトルク N [N m] は

$$N = Tr = 4k_e r^2 \theta \quad (7)$$

となる。ここで作業中における股関節の角度変化量 θ の最大値 θ_{max} を図 8 に示した 90 deg ($= \pi/2$ rad) であるとする、股関節に働くトルクの最大値 N_{max} は

$$N_{max} = 4k_e r^2 \theta_{max} = 2k_e r^2 \pi \quad (8)$$

により計算することができる。このうち、股関節の半径 r については直接計測することは困難であるが、文献 [4] において臀部の近似円の円周を足の大腿部の周長 (大腿囲) l [m] で近似する、すなわち

$$l = 2\pi r \quad \therefore r = \frac{l}{2\pi} \quad (9)$$

の関係を用いる手法が採用されている。この股関節半径 r については本レポートでも同様の数値を用いることとし、文献 [5] から大腿囲の成人平均データ $l = 0.515$ [m] を用いて $r \approx 0.082$ [m] として計算することとした。

3.2 伸縮性バンドのバネ定数推定

前述の式 (8) から股関節に働くトルクを推定するためには、伸縮性バンドの張力を計算するためのバネ定数が必要となる。このため、本レポートではパワースーツの伸縮性バンド単体を引き伸ばしたときに発生する張力を直接計測することでバネ定数を求めることとした。図 9 に実験の様子を示す。

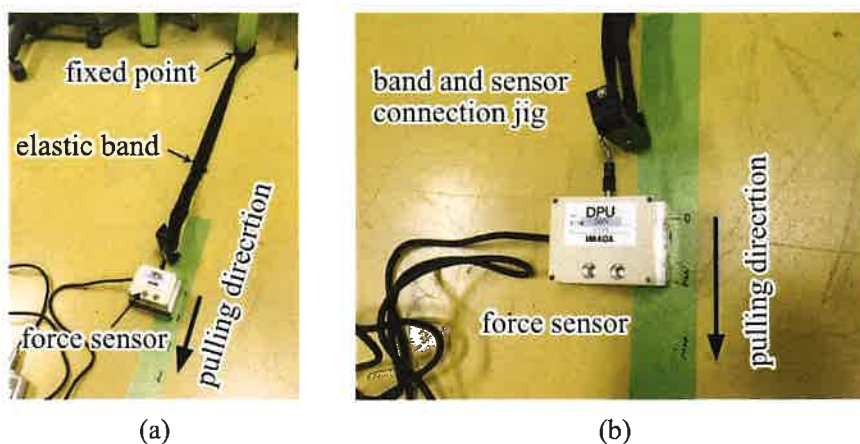


図 9: 伸縮性バンドの変形量に対する張力計測の様子 ((a): 実験概要図, (b): フォースゲージ付近拡大図)

実験では図 9 のように伸縮性バンドの一端を柱に固定し、他端に治具を介してフォースゲージを取り付けた。今回は伸縮性バンドの変形量 x [m] を初期位置 (たるみのない状態) から 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 m とし、それぞれの変形量での張力 T [N] をフォースゲージにより計測した。また、実験における計測値のばらつきを考慮し、同じ実験を 5 回繰り返して張力の測定を行った。図 10 に、実験で得られた変形量と張力の関係を示す。図より、各変形量における張力は 5 回の実験ともほぼ同様の値を示していることが確認できる。また、変形量に対する張力の変化はほぼ線形に増加しており、伸縮性バンドが線形バネとして近似できることが分かる。

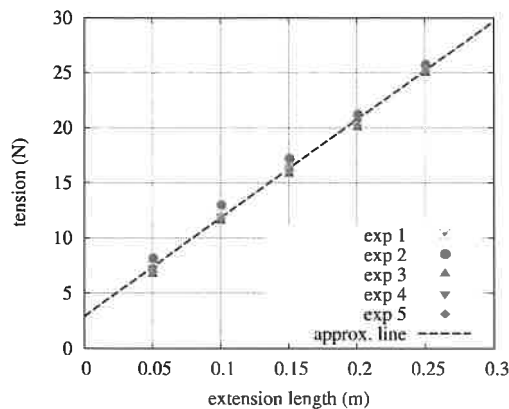


図 10: 伸縮性バンドの変形量と張力の関係 ($N = 5$)

次に、得られた変形量と張力の関係より伸縮性バンドのバネ定数を推定する。線形バネの張力は変位量にバネ定数を乗じることで計算できるが、パワースーツの伸縮性バンドの自然長の定義が困難であり初期状態でも若干の張力が掛かっていることから、伸縮性バンドのバネ定数を k_e [N/m]、初期状態での張力を T_0 [N] とし、張力 T と変形量 x との関係が

$$T = k_e x + T_0 \quad (10)$$

となると仮定する。図 10 に示した実験値と式 (10) が最も一致するように最小二乗法により k_e および T_0 を求めたところ、 $k_e = 89.296$ [N/m]、 $T_0 = 2.898$ [N] の値が得られた。図 10 の近似直線は得られた k_e 、 T_0 を用いて式 (10) から計算された値であり、計測値とよく一致していることからバネ定数の良好な推定値が得られたといえる。

以上のバネ定数の推定値と式 (8) から股関節に働く補助トルクの最大値を計算したところ、 $N_{max} \approx 3.77$ N m となった。

3.3 小結

ここでは、パワースーツの伸縮性バンドによる中腰姿勢からの回復力について、中腰姿勢時の臀部体表面増大により発生する張力から検討を行った。成人の平均的なデータを用いてパワースーツ着用時に股関節に働く補助トルクの最大値を求めたところ、3.8 N m 程度のトルクが発生している可能性を確認した。ただし、今回の検証では伸縮性バンドを 0.25 m 程度変形させた張力からばね定数を求めているが、補助トルクは計算上 0.5 m 以上伸縮性バンドを変形させたときの張力から得られている。一般に変形量が大きくなると張力は一定の値に漸近する傾向があるため、実際には今回計算された値よりも若干小さな補助トルクになると考えられる。

また、図 8 のモデルでは伸縮性バンドの押しつけ方向の力による臀部の変形は考慮していない。この変形によっても伸縮性バンドの変形量は少なくなるので、今回計算した股関節に対する補助トルクは実際に発生するトルクよりも大きな値となっていると考えられる。

4 まとめ

本レポートではパワースーツの力学的性能について、背面部のバネによる上体曲げからの回復に対する補助力、および伸縮性バンドによる中腰状態からの回復に対する股関節まわりの補助トルクについて実験および静的モデルから評価を行った。本評価により得られた結果は以下となる。

1. 背面バネによる上体曲げからの補助力について、腰を支点とした片持ち梁構造と仮定し、ダミー人形を用いた上体曲げ方向の押しつけ量と押しつけ力の関係から背面バネのバネ定数を推定したところ 79 N/m であることを確認した。
2. 推定した背面バネのバネ定数に対し上体曲げの最大値を 0.1 m と仮定することで、パワースーツの肩ベルトにかかる上体を起こす方向に働く補助力については最大 7.9 N 程度と想定した。
3. パワースーツ下部および膝に固定された伸縮性バンドによる中腰状態からの回復力については、臀部の体表面増大による張力によって股関節にトルクが発生すると仮定し、トルクを算出するためのモデルを構築した。
4. 伸縮性バンドのバネ定数については変形量と張力の関係から推定したところ 89 N/m であることを確認した。
5. トルク算出モデルと伸縮性バンドのバネ定数および成人の平均的な大腿囲の数値を用いることで、中腰状態からの回復力となる股関節トルクが最大 3.8 N m 程度であるとの計算結果を得た。

なお、これらの結果についてはいずれも簡略化したモデルから算出したものであり、実験の特性上、実際の値は今回得られた数値よりも小さくなる傾向となることが予想される。

今回の結果に対して、特に背面バネの補助力については力学的にそれほど大きな値ではないため、その効果については生理学的あるいは心理学的な側面から検証すべきではないかと考える。また、本パワースーツは動力を有しないという構造上、今回計算したような補助力に対する反力は固定点である腰や膝で受けることになる、という点については注意が必要である。これらの反力に対する安全性については生理学的観点から別途検討すべきである。

参考文献

- [1] 一般社団法人 日本機械学会, “JSME テキストシリーズ 材料力学”, 丸善出版, 2007
- [2] キャンバスドール アダム, <https://www.canvasdoll.com/SHOP/07AD.html> (2020/12/10 閲覧)
- [3] David A. Winter, “バイオメカニクス 人体運動の力学と制御 原著第4版”, ラウンドフラット, 2011
- [4] 田中英一郎, 松本慶一, 綿貫啓一, 三枝省三, 岩崎泰雄, 弓削類, “上肢と背部を補助する持ち上げ動作用ゴムベルトスーツの開発と筋活動評価”, 設計工学, Vol.52, No.6, pp.405-418, 2017
- [5] 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター, AIST 人体寸法データベース 1997-1998, https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/97-98_Statistics.pdf (2020/12/21 閲覧)

パワースーツに関する力学解析

補足資料 伸縮性バンドによる股関節の補助トルクについて

2020年12月23日 荒木 望

2021年1月19日改訂

本資料では、パワースーツに関する力学解析の結果得られた、伸縮性バンドの張力によって股関節に働く補助トルク N についての補足説明を行う。

トルク (力のモーメント) とは、ある支点を中心に物体を回転させる作用をおよぼす物理量であり、物体に掛かる力と力の作用点から支点までの距離の積で表される。今回の場合、図1 (レポートの図8) の股関節に最大で $N = 3.8 \text{ N m}$ のトルク (上体を起こそうとする回転方向の力) が生じることとなる。これを伸縮性バンドの張力 T に換算すると、股関節の近似円半径が $r = 0.082 \text{ [m]}$ であることから $T = N/r \approx 46.3 \text{ [N]}$ となる。この力はおよそ 4.7 kg のおもりを垂直に持ち上げる力に相当する (伸縮性バンドの膝側に 4.7 kg のおもりをつるした場合とほぼ同等)。

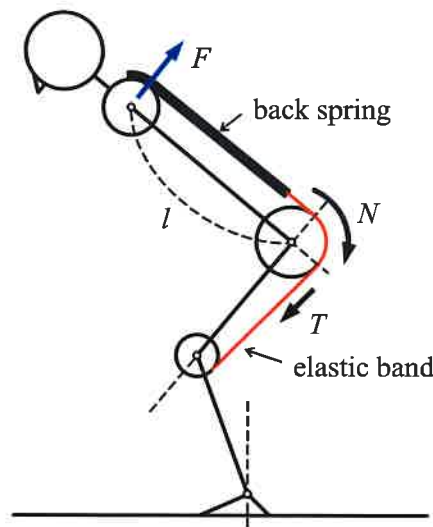


図1: 伸縮性バンドの変形により生じる力

また、図1の状態で下半身が固定されており、股関節から上に変形しないと仮定 (股関節から上を単純な棒として考える) することで、股関節へのトルクを肩付近に働く力 F (図1の青矢印) に換算することを試みる。この F を算出するためには股関節から肩関節までの長さ L が必要になる。この値は人により異なるが、文献[1]の身長 H に対する平均的な割合を用いると $L = 0.288H$ となり、身長 170 cm の場合でおよそ $L = 0.5 \text{ m}$ となる。この値を用いると $F = N/L = 7.6 \text{ [N]}$ となり、得られた股関節に対する補助トルクの最大値は肩関節付近で 0.78 kg 程度のおもりを垂直に持ち上げる力に相当することとなる。

参考文献

- [1] David A. Winter, “バイオメカニクス 人体運動の力学と制御 原著第4版”, ラウンドフラット, 2011