

津波避難用リヤカーに装着する圧縮空気圧によるアシスト装置の開発

中川 秀夫¹, 北山 一郎¹

要旨

巨大地震の発生に伴う大津波から避難する際に、歩行が困難な高齢者や障がい者を搬送するにはリヤカーを利用すべきである。なぜならば、自家用車では渋滞を招き、緊急車両やその他の避難者の妨げになり、被害が拡大するからである。リヤカーは、燃料が不要で、回転半径が小さく避難路のような狭い場所でも有利であるなどのメリットが多い。さらに、地方では体力の弱い女性や高齢者が牽引する機会が多いので、登坂時の負担を軽減するために圧縮空気の力でアシストすることを提案する。空気圧駆動は、電気モーターや内燃機関による駆動法と比較して、エネルギー保存性、価格、軽量化の点で優れている。本研究では緊急時搬送用としての機能を有したリヤカーの開発を目的として、空気圧駆動のアシスト装置を試作し、これを取りつけたリヤカーによる牽引力測定実験を実施した。その結果、アシスト装置の駆動により牽引力が70%程度に減少されることを確認した。

キーワード：津波避難、リヤカー、圧縮空気、トルクアシスト

1. 緒論

2012年8月に内閣府が発表した「南海トラフ巨大地震の被害想定」⁽¹⁾において、和歌山県ではマグニチュード9クラスの地震により10m以上の津波高が押し寄せると想定された地区は8市町にもなり、さらに津波の到達時間は最短で4minで、全国の中でも早く到達する地域が多い。そこで県では、地震速報が発令された場合、一刻でも早く高所に避難できるよう防災マニュアルを整備し、平常時から避難場所や避難ルートを確認させて、訓練をすることを指導している。

その一方で総務省統計局の2013年度人口推計データ⁽²⁾によると、和歌山県の65歳以上の老年人口割合は29.4%で、全国平均よりも4ポイント以上高く、しかも人口増減率は-0.84%と全国平均の5倍で、老年人口割合の増加は加速的である。このことは、体力的に劣る高齢者、すなわち短時間に高台へ移動することが困難である人が多いことを意味する。これに加えて、寝たきりの高齢者や、下肢に障がいのある要介護の人々、地震による負傷者を連れて避難するには、体力的にも時間的にも非常に困難と予想できる。さらに、高齢化は介護者にも及び、いわゆる老々介護が深刻化している。介護者も高齢で、しかも非力な女性が介護をしている場合が多い。地方では避難時に援助してくれる体力のある若者は高齢者に比べて少ない。こうした状況下で、健常者以外の人々をスムーズに避難させる対策が必要である。

地震や津波などの緊急時に自力で歩行できない人々を連れて避難させる手段として、「リヤカー」が注目されているが、本研究では牽引者の登坂時の負担を軽減するために圧縮空気の力でアシストすることを提案する。空気圧駆動による移動機器は、電気モーターや内燃機関によるものと比較して効率や持続距離は劣るなどの報告⁽³⁾があるが、エネルギー保存性、価格、軽量化の点で有利であり、「避難」という短時間で短距離の移動手段としては十分に検討価値がある。緊急時搬送用としての機能を有したリヤカーの開発を目的として、リヤカー補助動力の空気圧駆動機構を試作し、このリヤカーを用いた搬送運動評価を実施した。

原稿受付 2016年1月14日

本研究は平成25~29年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(S1311045)の助成を受けた。

1. 近畿大学生物理工学部 人間工学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷930

2. 実験装置

2. 1 津波避難用リヤカーの使用条件

津波避難時の搬送手段として、乗用車を利用するのは避けなければならない。なぜならば、前述の防災マニュアルでも記載されているように、必ず渋滞を招き、救急・消防車両をはじめとして徒歩や軽車両での避難者の障害となるからである。また、津波避難時は地震発生直後であり、道路の陥没や倒壊した建物の瓦礫のため車両の通行が困難と予想されるためである。そこで、地域の自主防災組織で消防ポンプや消火ホースの運搬用具として常備されていることが多いリヤカーを使用する。安価でコンパクトなリヤカーは、燃料が不要で、回転半径が小さく避難路のような狭い場所で有利である。また、道路交通法では軽車両であるから、免許や登録が不要で、特別な訓練なく誰でも使用できる。

使用するリヤカーは、自力での歩行が困難な高齢者や障がい者を抱える世帯に常備することを前提とする。津波警報が発令された場合に速やかに移乗させ、近隣の高台や避難所まで搬送するが、体力的な問題のある女性や高齢者でも牽引できるように、圧縮空気圧によるアシスト装置を取付けた搬送用具である。

この搬送時の使用環境を、次のように設定した。

- (1) 津波到達予想時間を 10min、リヤカーのセットや被搬送者の移乗など避難開始までにかかる時間を 2min と設定すると、搬送時間としては 8min である。
- (2) 搬送速度は、和歌山県防災マニュアル⁽⁴⁾では単身の歩行速度を 1.0 m/s と想定していることから牽引時では 0.7m/s とする。したがって避難可能距離は、搬送速度に上記の搬送時間を乗じると 330m である。
- (3) 避難場所までの高低差は、予想津波高のデータから 20m 以上とする。
- (4) 住居地から避難場所までの平均勾配（水平距離に占める垂直距離の百分率表示）は高低差を避難距離で除した 6%とする。その避難経路にある坂道の勾配は、国土交通省による道路構造令（昭和 45 年政令 320 号）を参考として、地方部での小型道路の最大勾配 12%とする。

2. 2 実験用リヤカー

本研究で採用したリヤカーは、図 1 に示す昭和ブリッジ（株）製 SMC-1 で、荷台部の長さ 900mm（ハンドル部を含めた全長は 1860mm）、幅 870mm、高さ 630mm の大きさであるが、折りたたみ式であり図 2 のような折りたたみ時には幅 370mm とコンパクトになる。タイヤ以外はアルミニウム合金製で、本体重量は 21kg と軽量であるが、最大積載質量は 100kg と堅牢である。価格も廉価であり、各戸に常備・普及させるには好条件である。なお、図 2 の状態から図 1 の状態に変形するのに要する時間は、1min 以内である。



図 1 実験用リヤカーの外観



図 2 折りたたみ時の状態

2. 3 空気圧駆動のアシスト装置

リヤカーによる避難時の補助装置として駆動源を考えると、電気モータではバッテリーの自然放電があり、長期の保管に適さない。また、内燃機関では原動機本体に加えて低速走行にするための大きな減速機を必要とし、駆動装置の重量が極めて大きくなる。一方、空気圧による駆動では、低速走行で直接駆動で

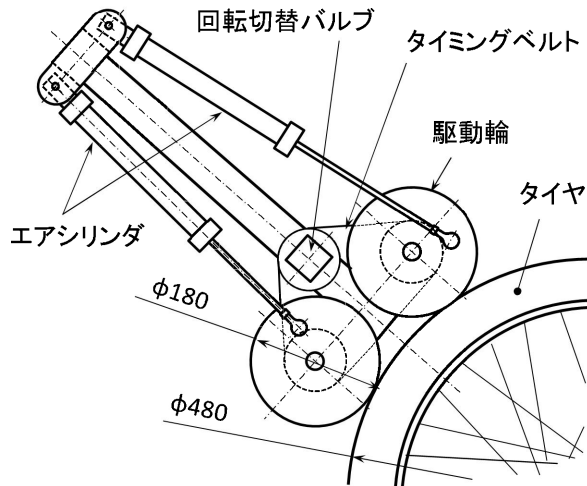


図3 空気圧補助装置の構造

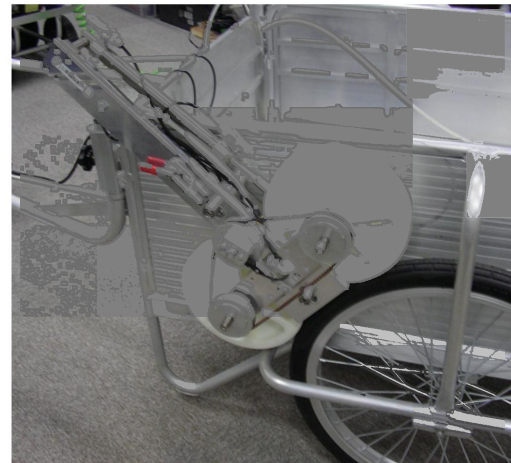


図4 アシスト装置の取付状態

き、軽量でシンプルな構造となる。その結果、普及に必要な低コストの条件を実現できる駆動源であることがわかる。空気圧利用のアクチュエータには、エアモータとエアシリンダがあるが、前者はタービン式の高速回転を発生するものであり、内燃機関と同様に減速装置が必要となって空気圧機器の軽量化という最大メリットを失う。結局、今回の低速・短時間の駆動で軽量・コンパクトな装置を目的とするために、エアシリンダを用いた機構を設計した。

図3に示すように、2本のエアシリンダ（SMC製、内径20mm、ストローク150mm）のロッド先端にロッドエンドベアリングを取付けて2つの駆動輪にそれぞれ接続し、エアシリンダによる押し引きで各駆動輪に回転トルクを与える。駆動輪上のロッド先端位置は、2つの駆動輪で90deg.の角度位相差があり、2個の駆動輪はタイミングベルトで連結されて同方向に回転する。この駆動輪がリヤカーのタイヤに押し付けられており、発生したトルクを駆動輪径180mmとタイヤ径480mmの比率2.67倍に増大できる。このアシスト装置を2セット用意しリヤカーの両タイヤに取付ける。この状態を図4に示す。

タイミングベルトの中継回転軸には、図5に示すような回転式の切替えバルブ機構が取付けてある。回転軸の一部を切欠き、この空間に圧縮空気を導く。この軸が1回転することにより4方向に自動的に切替えられ、表1のようなサイクルで圧縮空気がA、Bのシリンダのヘッド側ポートHとロッド側ポートRに順次供給され、駆動輪を回転させる。エアシリンダの排気側の空気は、各ポートに取付けた急速排気弁により、配管や弁を経由しないで直接大気圧に解放され、配管などの抵抗による背圧を生じないので運転効率が向上できる⁽⁶⁾。なお、エアが切れた時点でエアシリンダは逆に牽引者の負担となってしまうので、この補助装置全体がタイヤ半径方向に手でスライドできるようにし、トグル機構を用いて駆動輪とタイヤの接触を切離すことができるようにしている。

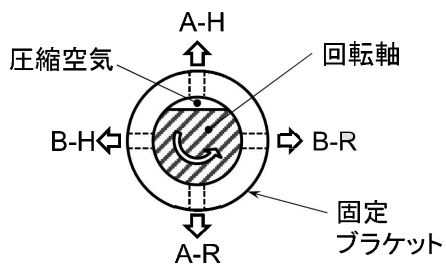


図5 切替バルブの断面

表1 バルブ切替えのタイミング

回転軸の回転角度		1/2π	π	3/2π	2π
シリンダ A	H	○			
	R			○	
シリンダ B	H		○		
	R				○

H: ヘッド側ポート R: ロッド側ポート

空気圧回路を図 6 に示す。圧縮空気は、既設の固定エアポンプからリヤカー上のエアタンクに蓄えられる。手動バルブを開くと圧力調整弁を介して本駆動装置に供給され、回転切替バルブで上述のエアシリンダ A、B に分配される。乗用車などで開発されている空気圧エンジンの例では、航続距離を長くするために 300MPa ものタンク圧力で使用しているが、高圧ガス保安法により 1MPa 以上の圧縮空気を扱うためには、「高圧ガス製造保安責任者」の資格が必要となる。そこで、一般家庭でも充填が可能にするために 1MPa 未満のエアタンクで構成し、避難時間の短時間のみ作動することを前提のエアタンクとした。

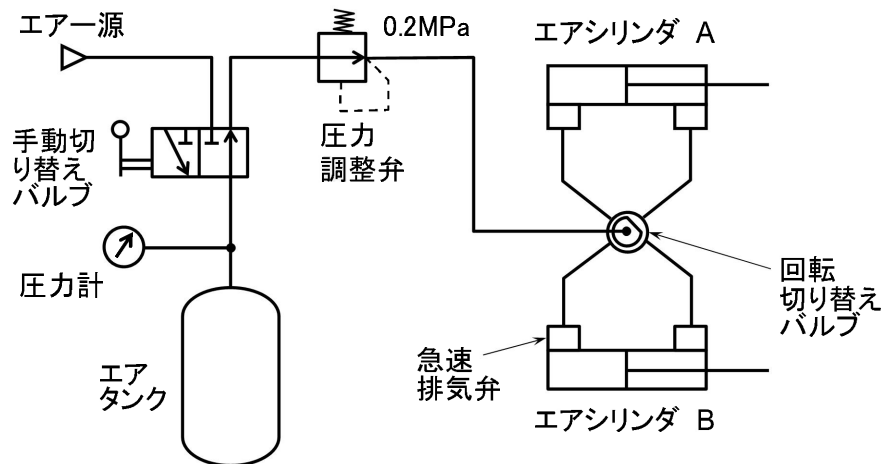


図 6 駆動装置の空圧回路図

3. 測定方法および結果

3. 1 実験用スロープモデル

リヤカーでの運搬により津波による危害を回避できる高度まで移動するときに想定される坂道としての実験スロープモデルを設定するため、大学構内にある各坂道の勾配を測定した。測定場所は、大学構内で 20m 以上の直線距離を持つアスファルト舗装路である。レーザーレベル（新潟精機製 LL-450S）の三脚を路面に設置し、付属の水準器でレベルを水平に調節したのち、レーザースポットが路面に当たった位置までの距離をメジャーで測定し、勾配を算出する。

その結果、勾配はほぼ水平（0%）のスロープ A、平均勾配に近い 5.6% のスロープ B、最大勾配に近い 11.1% のスロープ C の 3 種類の異なる勾配を持つ実験用スロープモデルを選出した。

3. 2 エア消費量の測定

内容量 6.3ℓ のリザーブタンク（日建製エアタンク HT-560）を 2 本連結し、エアポンプで充填したのち、手動切替バルブでアシスト装置に圧縮空気を供給する。2 本のエアシリンダが交互に伸縮し、駆動輪の回転回数が 5 回ごとにその時のタンク圧力を記録する。これを初期圧力 0.2MPa ずつ上昇させた実験の測定結果を図 7 に示す。ただし、エアポンプの仕様上、最高初期圧力は 0.74MPa とした。タンク内の空気の体積は、エアシリンダの伸縮による往復動作回数に比例して減少する。気体の体積が圧力に逆比例するボイルの法則そのものである。

このときアシスト能力が継続すると思われる 0.2MPa にタンク内圧力が低下するまでのタイヤ回転回数は 68 回であった。これをタイヤが 1 回転で 1.51m 前進することから走行距離に換算すると 103m になる。搬送距離 330m が必要であることから、エアタンクには容量 25ℓ のアルミニウム製タンク（アストロプロダクツ製）を増設した（合計 37.6ℓ）。

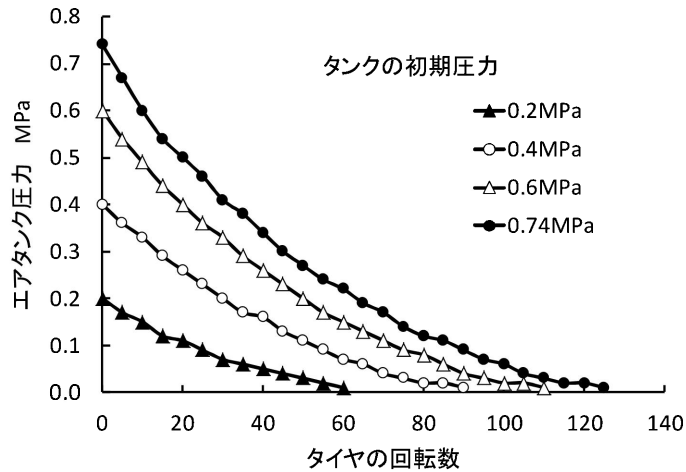


図7 エア消費量の測定実験結果

3. 3 アシスト装置がない場合の牽引力測定

アシスト装置なしの状態では牽引抵抗を測定した。上述の異なる3つの勾配の slope において、荷台上が空の場合と、一般的な高齢者として体重60kgの人を積載した場合とについての牽引力の測定をおこなった。人はリヤカー車軸より前方の位置に座位姿勢で乗った。リヤカーにデジタルフォースゲージ(IMADA製 ZPS-DPU-200N)を取付け、避難走行速度約0.8m/sの一定速度で5.0mほどリヤカーを牽引し、それぞれ同一の牽引者が3回試行した。加速域を除いた各測定値の分散比(F値)は1.2~2.5であったので3回とも同様の測定がおこなわれたものとして3回の平均を取った。

その測定結果を図8に示す。平地でのスタート時は加速による牽引力が無積載で30N、積載時には85Nと測定された。その後の定速時には、車台の慣性により負荷が減少するが、最大勾配11.1%の slope Cでは約100Nの負荷となった。これらの定速時における平均値について有意水準5%でt検定をおこなったところ、荷台空の場合の0%と5.6%の間には有意な差がなかったが、これは牽引力が車軸やタイヤの転がり摩擦抵抗で占められ、slope 勾配の影響が少なかったためと考えられる。その他の平均値間には有意な差が認められた。

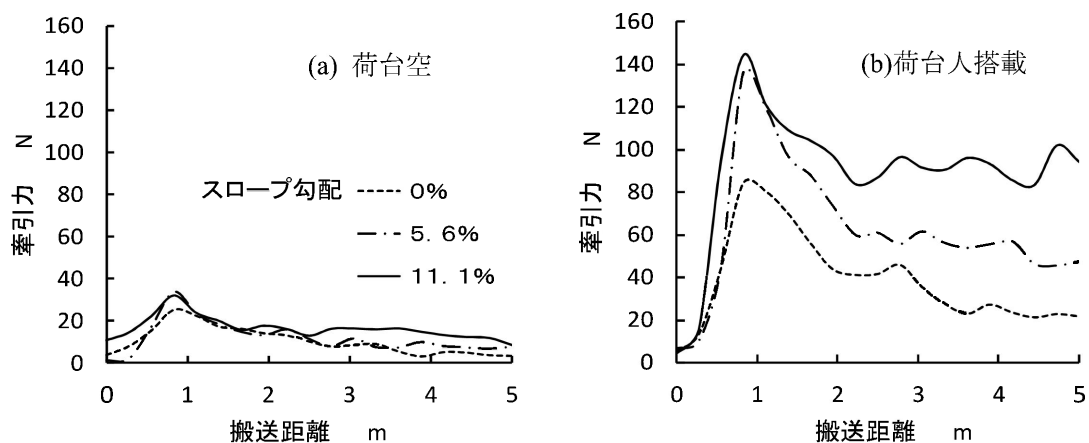


図8 リヤカー牽引力の測定実験結果

3. 4 アシスト装置を取付けた場合の牽引力測定

リヤカーにアシスト装置を取付け、前項と同様に牽引力測定をおこなった。ただし、加速時のオーバーシュートを防ぐため、スタート時には緩やかな加速とし、一定の負荷になるようにした。これに伴い、搬

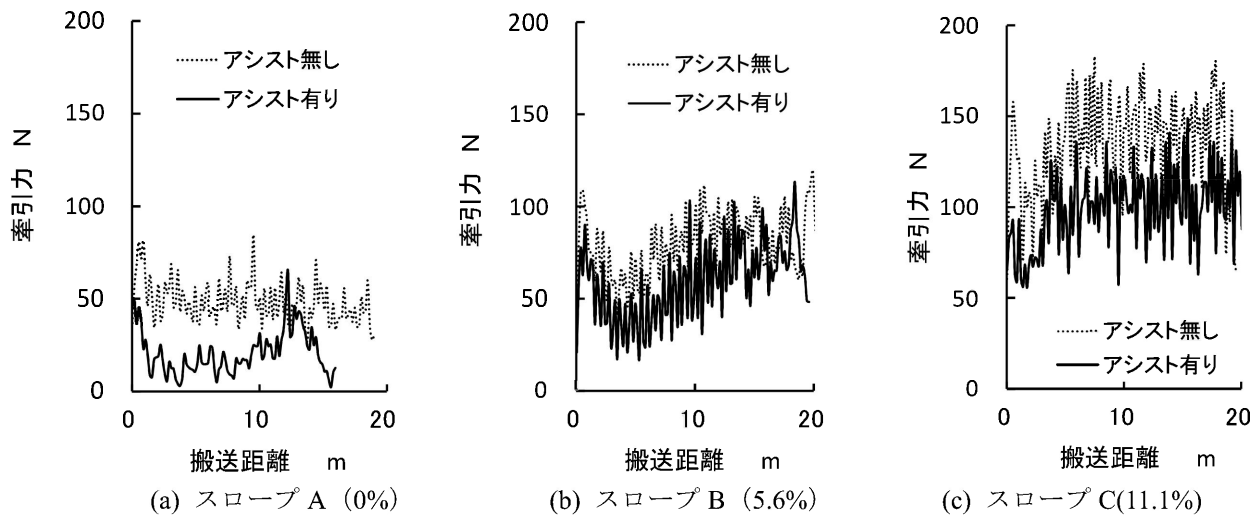


図9 アシスト装置の有無による牽引力の減少

送距離を20mと長くした。比較のため、アシストなしの場合（装置をタイヤから切離し）も併せて測定し、(1)式のアシスト率（全負荷に対するアシスト力の割合）を求めた。アシストなしの場合の牽引力を F_0 、アシストした時の牽引力を F_a とすると、

$$\text{アシスト率} = \frac{F_0 - F_a}{F_0} = 1 - \frac{F_a}{F_0} \quad (1)$$

図9の(a)は水平面、(b)は避難路の平均勾配5.6%、(c)は最大勾配11.1%の slope での測定結果である。これらの牽引力の相加平均値について、アシスト率を計算すると、それぞれ63%、28%、27%となり、いずれもアシストの効果があることがわかる。

4. 牽引力測定結果の考察

最大勾配11%の坂道モデルでのリヤカー牽引測定で、牽引力は平均で100N必要であることが分かった。荷台を空にしたときのタイヤなどの転がり抵抗 F_R 、リヤカー総質量（本体21kg+被搬送者60kg） M 、slope 角度 θ とすると、牽引力 F は

$$F = Mg \sin \theta + F_R \quad (2)$$

と求まり、11%の角度 $\theta = 6.3 \text{deg.}$ 、図8の測定値から $F_R = 18.2 \text{N}$ として計算すると $F = 106 \text{N}$ でほぼ測定値と一致する。この牽引力を基に駆動に必要な空気圧 P を計算すると、エアシリンダ断面積 A 、設定アシスト率 K とすれば、駆動輪とタイヤにかかる接線力は等しいから、

$$P \cdot A = K \cdot F \quad \therefore P = K \cdot F / A \quad (3)$$

ここで、シリンダ径20mm、 $K = 0.3$ とすると、 $P = 0.22 \text{MPa}$ と計算できる。これにより、回転切替弁の前端に挿入した圧力調整弁の設定圧を0.2MPaと決定した。

タンクにフル充填してこの0.2MPaに低下するまでの駆動輪回転回数から逆算してエアタンク容量を決定した。この場合アシスト装置を付加した状態では、平均勾配の slope を330m走行できると見積もられるが、東日本大震災後のアンケート調査⁽⁶⁾では、平均避難距離は438mであったことから、これ以上の距離を目指す必要がある。タンク容量にはスペース的な制約があるので、平地走行時などの一定負荷以下のときにはエア消費を抑制する工夫も必要である。

アシスト装置を取付けての牽引力測定において、アシストなしの牽引力がそれぞれ45N、70N、135Nと装置なしの場合より増大しているが、アシスト装置や空圧機器、タンクなどの総重量13.3kgの増加分の

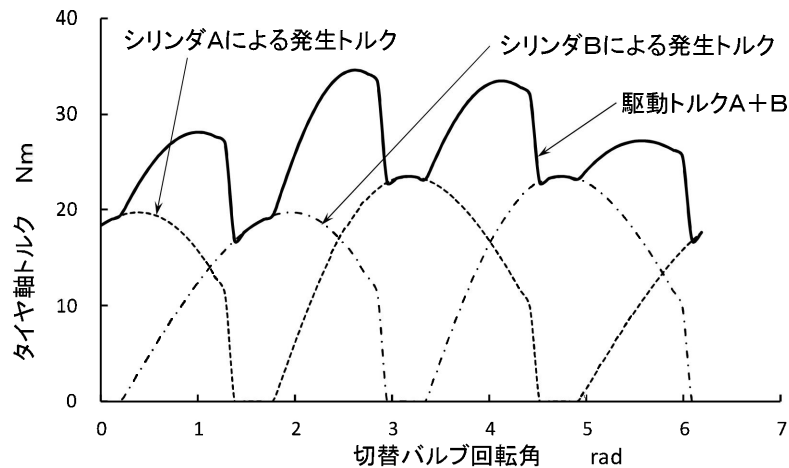


図10 エアシリンダごとの発生トルクシミュレーション結果

影響と考えられる。各勾配のスロープでいずれもアシスト効果が見られたが、本アシスト装置は一定トルクを加えることによって牽引力を低減させるため、当然勾配が大きくなるにつれてアシスト率が低下してくる。換言すれば、アシストを期待する急勾配ではアシスト率が低くなるので、傾斜角に応じて圧力調整弁の設定を自動的に（機械式に）変更する機構が必要と考えられる。今回の測定データからアシストするトルクは、各勾配で20～35Nmであるとわかったが、このトルクを切換え弁の切欠き高さを変数にしてシミュレーションしたところ、図10のようになった。ピーク値は34.8Nm、平均値は25.6Nmであり、測定値とよく一致している。すなわち、駆動輪とタイヤのスリップはほとんどないと言える。また、このシミュレーションでわかるように、回転切替弁の回転角によりエアシリンダへのエア供給ポートが切り替えられるので、25%のトルクの変動がある。このトルクむらには実際の牽引時にも若干感じられたが、牽引操作自体に支障はなかった。

5. 結論

巨大地震により大津波が短時間で到達すると予想されていることから、その避難手段を準備しておかなければならない。本稿では、津波警報が発令された場合に、寝たきりや体力的に劣る高齢者、下肢に障がいのある要介護の人々、あるいは地震による負傷者を連れて避難するために用いられるリヤカーについて、搬送者も高齢者や女性である場合が多いことに着目した。そこで搬送者の負担を軽減するためにこのリヤカーに取り付けることができる圧縮空気の力で駆動するアシスト装置を提案し、空気圧駆動による移動機器についての多くのメリットを述べた。そして、実際にリヤカーに取り付けた空気圧駆動によるアシスト装置を試作し、アシストの有無による牽引力測定実験を実施して次のような有益な知見を得た。

- (1) 対象のスロープの勾配は、0～12%（平均6%）で、搬送距離330mを達成するためには、約38ℓのエアタンクが必要である。
- (2) リヤカーの荷台に人を乗せて搬送する時、各勾配で20～100Nの牽引力が必要であり、これはリヤカー本体や人の質量などからの計算値と一致する。
- (3) 一定トルクを加えることによって牽引力を低減させる本方式では、勾配が大きくなるにつれてアシスト率が低下してくるが、最大勾配の11%スロープでも73%まで牽引力を低下させることができた。
- (4) アシストトルクは、各勾配で20～35Nmであるとわかった。これは、シミュレーションで求めたピーク値34.8Nm、平均値25.6Nmとよく一致した。

今後は、効率的な圧縮空気の使用方法を検討し、アシスト率やアシスト走行距離を改善していきたい。

謝辞

本研究は平成 25~29 年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1311045) の研究費によって支援された。また、牽引力測定実験等は生物理工学部人間工学科の松尾将吾君をはじめとする人間支援ロボット研究室の諸君の協力により実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 内閣府 HP、南海トラフ巨大地震の被害想定について
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html.
- (2) 総務省統計局、人口推計 <http://www.stat.go.jp/data/jinsui/2013np/index.htm>.
- (3) 石川泰弘、神田淳、橋本嘉洋 (1982) 空気圧駆動式動力ホースカーの開発について、消防科学研究所報 24, 40-43.
- (4) 和歌山県障害者・高齢者・難病患者防災マニュアル、
http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/040400/bosai/BOUSAI_2.pdf.
- (5) 小根山尚武 (2003) 空気圧システムの省エネルギー、第 1 版、pp.270-271、省エネルギーセンター
- (6) 国土交通省、東日本大震災の津波被災現況調査結果 (第 3 次報告)
<http://www.mlit.go.jp/common/000186474.pdf>

Development of compressed air power-assist mechanism
being attachable to a bicycle-drawn cart (Rear-cars)

Hideo Nakagawa¹, and Ichiro Kitayama¹

When taking refuge from tsunami occurred by a massive earthquake, the refugees sometimes use a small car called “bicycle-drawn cart (Rear-cars)” to carry elderly and/or the handicapped persons who have difficulty in ambulation. The reason is that using private cars would cause traffic jams which obstruct transfer of emergency vehicles and other evacuees. Rear-cars have many benefits such as to be required no fuel, to have small turning radius that is profitable in the narrow street like escape route for evacuees. The compressed air power-assist system is more excellent in energy conservation, cost reduction and weight saving than the system with an electric motor and/or an internal combustion engine. In this research, we made a prototype of a power-assist mechanism using compressed air which is attachable to a rear-car, and make certain of its function by the inclination climbing test. We have knowledge mentioned as below through it.

- (1) The target slope is 0-12% (average is 6%) incline and have 330m path length. A 38ℓ air tank is needed to climb it.
- (2) In carrying a person by the developed rear-car, the system need 20-100N traction power which is consistent with the theoretical value that is calculated based on the weight of a human and a rear-car.
- (3) The increasing of inclination generally reduces assist rates when the system employs the constant power-assist mechanism such as a compressed air. The developed system is, however, able to decrease the human traction force to 73%.
- (4) The assist torque was identified as 20-35Nm by each inclination which is consistent with the maximum value 34.5Nm and average value 25.6Nm obtained from simulations.

Key words : refuge from tsunami, rear car, compressed air, torque assist.

1. Department of Biomechanical and Human factors Engineering, Kindai University, Wakayama 649-6493, Japan