

技術ノート

液体ヘリウム容器の振動対策

極低温科学センター 森山弘章 (h_moriyama423@mail.clts.tohoku.ac.jp)

1. はじめに

極低温科学センター極低温物理学部（以下、センター）では液体ヘリウムを運搬するため、主に内容積100Lのアルミ製容器を用いて青葉山地区各部局の研究室等に供給している。アルミ製液体ヘリウム容器（以下、容器）は開口部からの熱侵入を少なくするため、内槽と外槽をつなぐネック部はFRPのパイプが接着剤によって接続されている。そのため、急激な温度変化や高温（接着剤が融ける）、振動等に注意する必要がある。

最近、トランスファー中や終了後に蒸発がおさまらないという連絡を受け、調べてみると真空層と内槽の間にリークがあったという容器が立て続けに何本か出てきた。初期不良にしては製造年月が近い（2011年4月～12月）ものが多かったため、この時期に容器メーカーの製造方法や接着剤の変更等があったのではないかと考えられる。また、リークした容器を購入した頃から、オプション品の台車（図1右）が、以前（図1左）とは変わって簡素化（車輪の減少5→4、ゴム板の緩衝材なし）されるようになった。以上より、恐らく2011年の4月～12月頃にメーカーで容器の製造方法に何らかの変更があり、さらに台車の簡素化により容器に加わる振動が増えたことでネック部に負荷がかか

り、接着剤が剥離等を起こしてリークするようになったのではないかと推測した。製造方法についてはどうすることもできないが、リークした容器と同じ製造年月でシリアルNo.が近いにもかかわらず、現在でも使用できているものもあることから、振動を軽減することで容器の耐用年数を長くできる可能性があると考えた。

本稿では、容器と台車との間の緩衝材とキャスターをそれぞれいくつか選び、振動加速度の計測によって最適な組み合わせを見つけることで、容器に加わる振動の対策を試みたのでその結果を報告する。

2. 緩衝材・キャスターの選定と測定方法

2-1. 緩衝材の選定

台車の緩衝材としてはゴム板がよく使われているようなので、防振用ゴムの中でもさらに効果が期待できそうなNOK株式会社の「ハイダンピングラバー材防振パッドRE7012K3（厚さ3mm）」（以下、HDR）を選定した。また、ゴム板以外の緩衝材としてはゲルシートが考えられたので、高い衝撃吸収・防振効果があるという株式会社エクシールの「ハイペーゲルシート3050（アスカ-C30厚さ5mm）」（以下、HGS）を選定した。図1右は緩衝材がない状態で使用した台車であるが、塗装がはがれている所が振動を受けやすい部分と考えられるので、主にその箇所に緩衝材を取り付けて測定を行った。

2-2. キャスターの選定

購入時に付属しているキャスターはタイヤがウレタン製のため、室内などの滑らかな床での使用には適しているが、当センターのある青葉山地区では粗いアスファルトの路面上で容器を運搬（長い所では約300m）する場合があり、硬いウレタンタイヤで

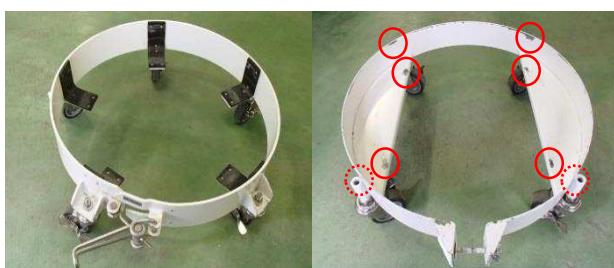


図1. 以前の台車（左）と現在の台車（右）
2011年頃から右の台車に変更された。固定方法もワンタッチクランプから蝶ナットによるネジ留めになっている。赤丸は容器と台車がこすれて塗装がはがれた部分。写真では見えないが手前側キャスターの台車側面部分（点線丸）も塗装がはがれている。

は振動がかなり大きくなる。そこで表面硬度が低く弾性を持ち、凹凸のある路面でも安定した走行が可能なゴムタイヤのキャスターをメーカー別で2つ選定した。また、キャスター自体に衝撃吸収する機構を持つものが2社から発売されていたのでそれぞれ1つ選定した。選定したキャスター（以下、①～⑤）を表1に示す。

表1. 選定したキャスター

メーカー	型番	価格
① ハマキャスター	315 EA-UR 75 (台車付属品)	低
② ユーエキヤスター	SUS-ST-75NRS	低
③ ワコパ®レット	ALT-75-NRBDS (本体鋼板)	低
④ ハマキャスター	935SEA-UZ100 φ2.8mm *	高
⑤ ユーエキヤスター	SKY-T100SUES-2 *	高

③以外は本体ステンレス製

* 衝撃吸収キャスター

2-3. 測定方法

振動の測定にはUSBメモリ型の3軸振動データロガーであるDT-178A（図2左）を使用した。これは測定対象に直接取り付けてX・Y・Z軸の振動加速度を測定できるものである。測定したデータは専用の解析ソフトを用いて、グラフ表示やエクセル形式での保存が可能となっている。このロガーを容器のヘッド部分に固定（図2右）し、ロガー印字面を進行方向（Z軸）として、アスファルト上で10mを15秒で走行したときの振動加速度を測定した。また、重量により振動加速度が変わるものなので容器内は空の状態である。様々な条件下で測定したデータから3軸それぞれの実効値を算出して比較を行った。



図2. CEMインスツルメンツ製3軸振動データロガーDT-178A（左）、治具（ロガー付属品）とマジックテープバンドで容器のヘッド部分に固定した様子（右）

なお、振動加速度実効値 $a_{r.m.s}$ は振動加速度の i 番目の値を a_i 、データ数を N とすると次の式で求められる。

$$a_{r.m.s} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i)^2} \quad (1)$$

3. 測定結果

3-1. 緩衝材なしでの測定

最初に緩衝材なしでキャスターごとに測定を行ったのでその結果を図3に示す。また、変更される前の図1左の台車（以下、5輪台車）でも測定したので合わせて示す。こちらに付属しているキャスターはイタリアのDERBY RUOTE 製ウレタンタイヤキャスターであるが、型番などの詳細は不明である。

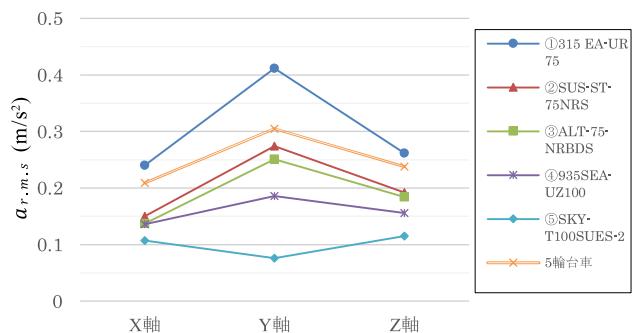


図3. 振動加速度実効値（キャスターのみ）

グラフを見るとやはり、ウレタンタイヤである①の振動が一番大きいことがよくわかる。同じウレタンタイヤの5輪台車では、X・Z軸はあまり変わらないがY軸で大きな差があった。5輪台車のタイヤはかなり磨耗が進んでいる状態での測定だったが、それでもこの差があるのは緩衝材の有無が大きいと思われる。ゴムタイヤの②と③では③の方がわずかに良い値だった。①と比べるとX軸で38.8%、Y軸で34.4%、Z軸で26.4%振動を軽減できている（②の実効値との比較）のでゴムタイヤの効果はかなり大きいようである。衝撃吸収キャスターの④ではY軸以外はゴムタイヤのものとあまり変わらなかった。実はこれは型番の指定が間違っており（UZではなくFR）タイヤがウレタン製であることと、このキャスターは円錐バネを内蔵しており、その線径によって耐加重が異なるのだが、線径が太いためかバネが硬く、あまり振動を吸収できなかつたのではないかと考えられる（※耐加重計算は合っているが実際に容器を運搬するとバネが硬く感じる）。また、④と⑤をあわせて見ると、衝撃吸収キャスターは普通のキ

ヤスターと比べて特にY軸方向の振動を軽減できるようである。なお、衝撃吸収キャスターは車輪径のラインナップが100mm以上からしかなく、天井が低い所では使用できない場合があるのと、価格が高く(①～③の約10倍)全ての台車を衝撃吸収キャスターに換えるのはコスト面からも現実的ではないため、実際の使用は難しいことからこれ以降の測定では除外している。

3-2. 台車底面に緩衝材を貼付した場合

緩衝材を台車の底面に4枚貼付して測定を行った結果を図4に示す。緩衝材はHDRと比較用にセンターにあった厚さ3mmの普通のゴム板、およびHGSの3種をそれぞれ5cm角にカットしたものを使用した。また、キャスターは①～③を使用した。続けて貼付数による違いを見るため、HDRを4、6、8枚にした時の結果を図5に示す。それぞれの緩衝材の貼付場所については図6に示す。

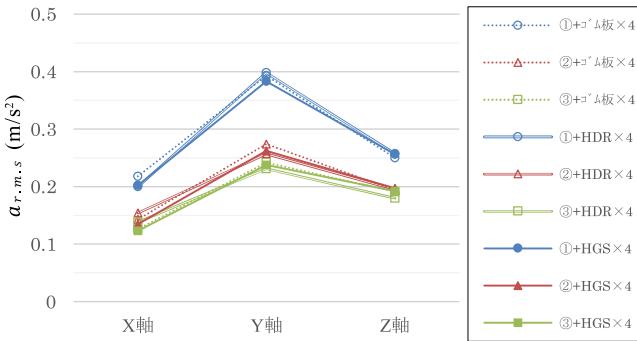


図4. 振動加速度実効値(台車底面緩衝材3種4枚)

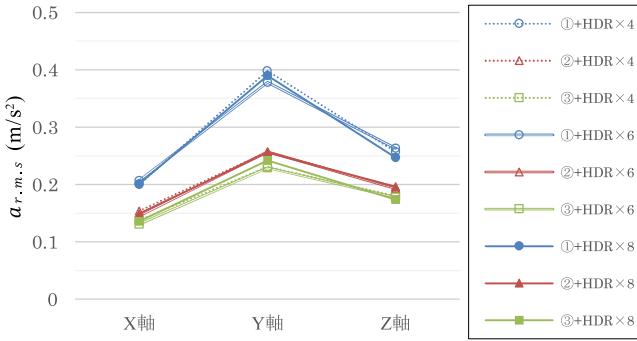


図5. 振動加速度実効値(台車底面HDR 4, 6, 8枚)

いずれもキャスターのみの図3に比べるとわずかに下がっているが、緩衝材や枚数の違いではほとんど変化がないことがわかる。これは容器の側面が台車に接触しており、そこから振動が伝わるためと考えられる。緩衝材の効果を發揮させるためには、容

器と台車が接触しないように貼付する必要がある。

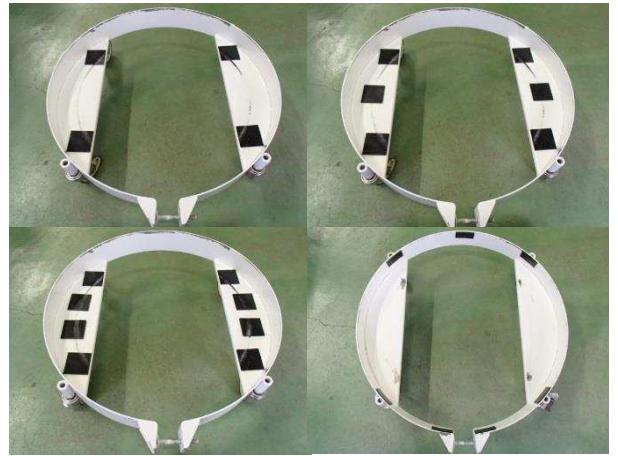


図6. 台車底面と側面の緩衝材の配置場所
底面緩衝材が4枚(左上)、6枚(右上)、8枚(左下)の時の写真。緩衝材と台車底面に円形の線が見えるが、これは容器の底を中心に向かってくぼんでおり、台車底面とは線で接触するためでその跡である。右下は側面に緩衝材を7枚貼り付けた様子。

3-3. 台車側面と底面に緩衝材を貼付した場合

容器側面の下部は丸くなっていますので、縦2.5cm横5cmにカットした緩衝材を側面に使用しました。また、場所については図1右で塗装のはがれている箇所を含めて計7枚貼付した(図6右下)。これより緩衝材を減らすと台車と容器が接触してしまい、増やすと蝶ナットが締められなくなる。側面にHDRを7枚、底面にHDRを4、6、8枚貼付した時の結果を図7に示す。

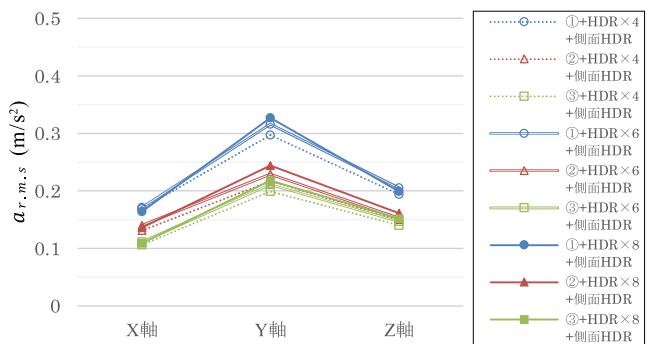


図7. 振動加速度実効値(底面HDR 4, 6, 8枚+側面HDR)

側面に緩衝材がない場合の図5と比べると全体的に減少しているのがわかる。ウレタンタイヤの①が特に顕著であるが、②と③がそれほどでもないのはタイヤがゴムなので、そこでほとんどの振動が軽減されているのではないかと考えられる。ここで、台車と容器側面が接触していない(以下、側面非接触)状態でも測定を行ったので結果を図8に示す。緩衝

材はHDR、キャスターは②を使用した。

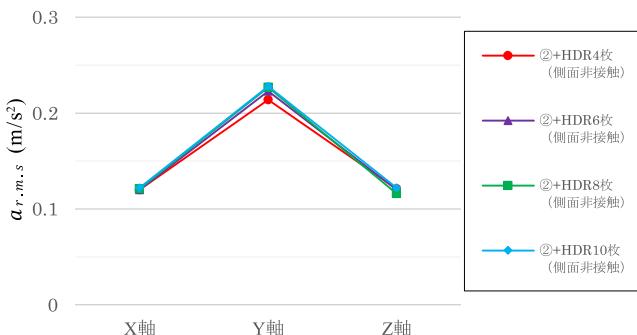


図8. 振動加速度実効値 (底面HDR 4, 6, 8枚、側面非接触)

X・Z 軸はほとんど違いがないが Y 軸だけ枚数が少ない方がわずかに低かった。これは図7でも同じ傾向が見られる。底面の緩衝材の枚数は少ない方がY 軸方向の振動を抑えられるようなので、これ以降は底面の緩衝材を4枚にして測定を行った。

3-4. 緩衝材の材質と厚さ違いによる効果

側面にHDRを7枚、底面の緩衝材4枚をゴム板、HDR、HGSにした時の結果を図9に示す。

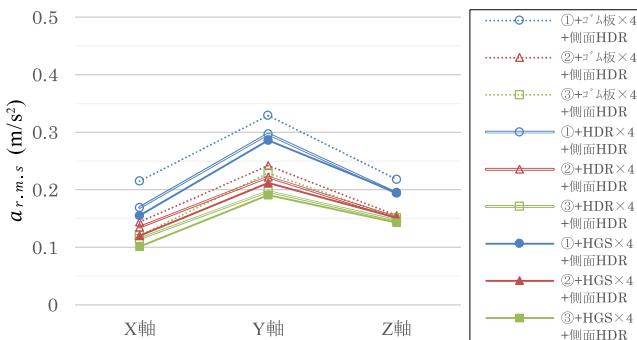


図9. 振動加速度実効値 (底面緩衝材3種4枚、側面HDR)

ゴム板とHDRを比べるとHDRの方が振動を軽減できるのがわかる。また、HGSはHDRよりわずかに良い傾向がある。さらに緩衝材ごとの性能を明確にみるために、側面非接触で測定を行ったので結果を図10に示す。キャスターは②を使用した。

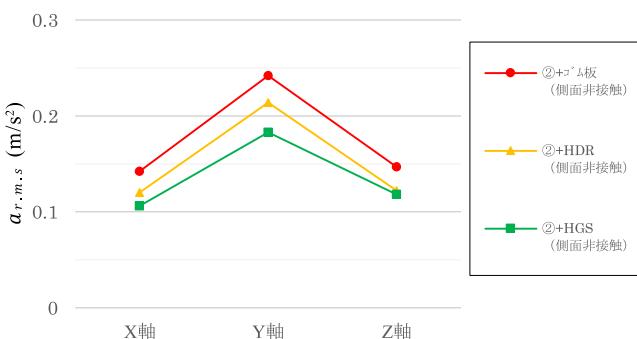


図10. 振動加速度実効値 (底面緩衝材3種4枚、側面非接触)

こちらでもHDRはゴム板より効果があることが確認できる。この中ではHGSが一番良いように見えるが、今回選定したHDRとHGSでは厚さが異なるため、材質と厚さのどちらによるものかを確認する必要がある。厚さによる違いを見るため、側面非接触で底面にHDRとHGSを複数枚重ねた時の結果を図11に示す。キャスターは②を使用した。

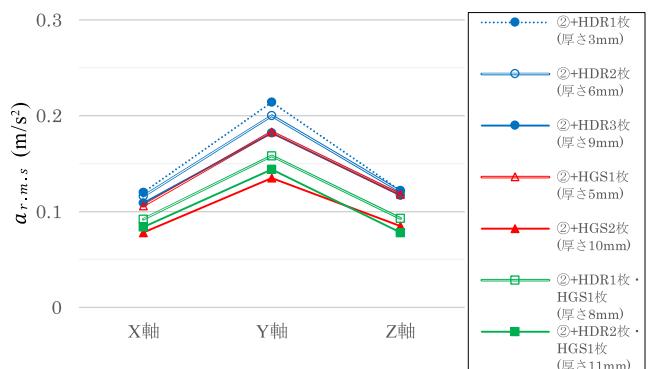


図11. 振動加速度実効値 (底面緩衝材2種異厚、側面非接触)

HDRとHGSのどちらも厚さが増すごとに振動軽減の効果が大きくなっている。HDR3枚(厚さ9mm)とHGS1枚(厚さ5mm)がほぼ同じ値であることから、厚さあたりの性能はHGSの方が良いようである。また、HDRとHGSを重ねた場合も測定したところ、HDR2枚+HGS1枚でHGS2枚に近い値となつた。性能として良いのはHGS2枚かHDR2枚+HGS1枚だが、台車の深さが約5cmしかなく、さらに容器下部の角が丸いため、緩衝材が厚くなると側面同士が接触せずに容器が固定できなくなってしまう。容器が固定できる底面緩衝材の厚さは7~8mmが限度であるため、今回の条件ではHDRとHGSを1枚ずつ重ねたものを台車底面に使用するのが適当と考えられる。なお、側面の緩衝材は台車の構造上、厚さ5mmまでが限度のようで、HDRの2枚重ね(厚さ6mm)では蝶ナットを締めることができなかった。従って、側面の緩衝材にはHGSを使用することにした。

3-5. 緩衝材とキャスター組み合わせの決定

最後に3-4の結果から、底面の緩衝材にHDRとHGSを1枚ずつ重ねたものを使用し、側面にはHGSを使用した時の結果を図12に示す。キャスターは①②③と単体で一番性能の良かった⑤を使用

した。また、比較として購入時そのままの台車（①キャスター、緩衝材なし）の値も表示する。

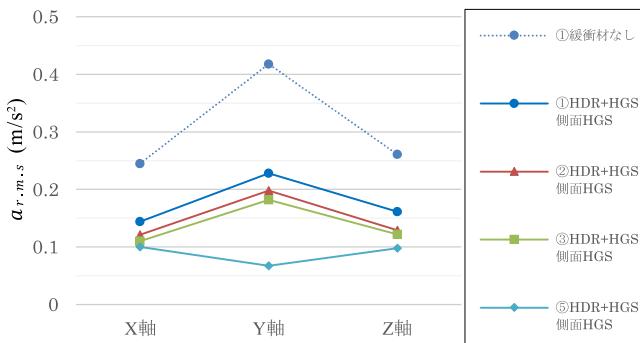


図1.2. 振動加速度実効値（底面HDR+HGS、側面HGS）

①に緩衝材を加えただけでかなり振動を軽減できている。②③と比べてもそこまで違いはないが、アスファルト上を走行した時の騒音がかなり大きいのがネックである。②③と⑤の衝撃吸収キャスターではY軸は大きな差があるが、X・Z軸では近い値になった。ゴムタイヤキャスター同士では③の方がわずかに良いが、本体が鋼板で磁性があるため供給先にNMRがある当センターでは使用が難しい。以上よりキャスターは②を使用するのが適当であると考えられる。最終的に①+緩衝材なしと比べて、②+緩衝材の組み合わせではX軸:49.4%、Y軸:47.4%、Z軸:49.4%振動を軽減できることがわかった。

4.まとめ

3軸振動データロガーを使用して振動加速度を測定することで、容器に加わる振動を軽減できる緩衝材とキャスターの組み合わせを探した。今回確認できたことをまとめると以下の通りである。

- (1) 振動加速度を測定し、その実行値を算出することで容器に加わる振動の度合いがわかる。
- (2) タイヤをウレタンからゴムにする、または緩衝材を貼付することで振動を大幅に低減できる。
- (3) コストと容器使用場所の高さに問題が無ければ、ゴムタイヤの衝撃吸収キャスターを使用するのが振動軽減（特に鉛直方向）に一番良い。
- (4) 振動源（キャスター・台車）と対策物（容器）とは緩衝材で絶縁する必要がある。
- (5) 緩衝材には普通のゴム板ではなく防振効果のあるものを使用したほうがよい。
- (6) 緩衝材は厚い方が振動軽減の効果が高い。

以上より、今回選定した緩衝材とキャスターおよび諸々の条件を考慮すると、緩衝材は台車側面にHGS7枚、底面にHDRとHGSを1枚ずつ重ねて4箇所に貼付し、②のゴムタイヤキャスターを取り付けるのが当センターでの使用に適していることがわかった。また、これにかかる費用も台車1台あたり約9千円（ほぼキャスター代）のため、台車を新しく購入・製作するよりも安価に振動対策ができる。

液体ヘリウム容器は非常に高価な上に一度リークすると修理ができず、真空不良による事故の原因にもなるので、今後も緩衝材とキャスターの情報収集および振動の測定を行っていきたい。

補足

- 当センターでは衝撃吸収キャスターを、元々の車輪径が100mmであるMVE製100Lステンレス容器に使用している（所持本数が少なく、ステンレス容器での供給先が決まっているため）。こちらは振動の軽減だけではなく、軽い力で運搬が可能になる^[2]ことも目的とした使用である。
- ③のゴムタイヤキャスターは本体が鋼板で磁性があるが、②と比べると静音性はかなり良い。
- ゴムタイヤは使用していくうちに磨耗・硬化するので、振動加速度を測定することでタイヤの寿命を知ることが出来るはずである。後日、使い始めの値とどの位の変化があるのか測定したいと思う。
- トラックで運搬中の容器に加わる振動を測定した。容器の固定はポリエチレン製荷締ベルト2本がけである。実行値は緩衝材・キャスターによる違いはあまりないが、X・Z軸が0.17~0.20m/s²に対しY軸は0.09~0.10m/s²と衝撃吸収キャスター並みに低いことから、人力でのアスファルト上の運搬は鉛直方向の負荷がかなりかかるようである。

参考文献

- [1] 岡村美好、深田直紘、「車いすの振動加速度を用いた歩道路面凹凸の評価に関する研究」、土木学会舗装工学論文集 第9巻 (2004) 17-23.
- [2] 宗本久弥、「寒剤運搬容器の台車改良」、琉球大学極低温センターだより 第9号 (2013) 12-15.