

放射性物質の自動車運搬に係る積載方法の 安全性に関する技術基準の適用指針

平成 23 年 3 月

国土交通省自動車交通局

放射性物質の自動車運搬に係る固縛指針等に関する調査委員会

はじめに

昭和 57 年 3 月に放射性物質自動車運搬技術検討会が、1973 年版 IAEA 輸送規則の適用指針との整合も考慮しつつ、「放射性物質の自動車運搬に係る積載方法の安全性に関する技術基準の適用指針について(報告書)」(以下、「固縛指針」という。)を取りまとめた。以来、我が国における放射性物質の自動車運搬の技術的基準として、安全輸送を行うためには無くてはならないものとなっている。

ただ固縛指針は、策定されてから既に 29 年が経過しており、放射性物質輸送を取り巻く環境は固縛指針が策定された当時とは大幅に変化し、また IAEA 輸送規則も改訂を重ねてきた。

このため今日まで放射性物質輸送の安全性に大いに貢献してきた固縛指針も、現在の視点で一度見直しを図っておく必要があるとの考えから、IAEA 輸送規則との整合性、国内関係法令等との整合性及び輸送方式の変化への対応等について調査を行った。また調査結果を改訂版として取りまとめた。

今後改訂版が、放射性物質安全輸送の確保に一層貢献することになれば幸いである。

平成 23 年 3 月

放射性物質の自動車運搬に係る固縛指針等に関する調査委員会

目次

1. 基本的考え方.....	1
2. 適用範囲.....	1
3. 用語の定義.....	1
4. 固縛方法.....	2
(1) 固縛装置の設計.....	2
(2) 固縛装置の設計上の要求事項.....	3
(3) 積載及び運搬要領における要求事項.....	4
終わりに.....	5
参考資料1 主な固縛用材の使用上の留意事項.....	6
(1) ボルト.....	6
(2) ワイヤロープ.....	6
(3) ターンバックル.....	7
(4) シャックル.....	7
(5) フック.....	7
(6) 環フック.....	8
(7) チェーン.....	8
(8) レバーブロック.....	8
(9) ベルトスリング.....	9
(10) アイプレート.....	9
(11) すみ金具、ツイストロック等.....	9
参考資料2 強度計算例.....	10
(1) ボルトによる固縛.....	10
(2) ワイヤロープによる固縛(止め木有り).....	12
(3) ワイヤロープによる固縛(止め木無し).....	14
(4) ワイヤロープ(8本)による固縛(止め木有り).....	16

放射性物質の自動車運搬に係る積載方法の安全に関する技術基準

輸送物等は、運搬中において移動、転倒、転落等により、輸送物の安全性が損なわれないように積載しなければならない。

運輸省令

核燃料物質等車両運搬規則第4条第2項

放射性同位元素等車両運搬規則第4条第2項

放射性物質の自動車運搬に係る積載方法の安全に関する技術基準の適用指針

1. 基本的考え方

- ① 通常状態において走行に伴って発生する慣性力によって、輸送物が移動または転倒しないこと。
- ② 通常予想される交通事故時において衝突に伴って発生する慣性力によって、輸送物が車両から脱落することがないこと。
- ③ 事故時等に固縛装置に発生する過大な荷重によって、輸送物とその性能を阻害されることがないこと。

注「移動」には、ロープの伸び等に伴う微小な移動及び積載方法の機構に起因する移動を含まない。

2. 適用範囲

この適用指針は、BU型輸送物、BM型輸送物、A型輸送物、IP-3型輸送物、IP-2型輸送物、IP-1型輸送物、L型輸送物並びにこれらの核分裂性輸送物及び六ふっ化ウラン輸送物の積載について適用する。

3. 用語の定義

本適用指針に用いる用語の定義は関係法令によるほか、次によるものとする。

- ① 輸送物……………核燃料輸送物及び放射性輸送物(オーバーパック及びこれらが収納されているコンテナを含む)
- ② 固縛……………輸送物を車両に固定または留めること
- ③ 固縛装置等……固縛するための用具の総称
- ④ アタッチメント……輸送物に取付けられている固縛のための金具等
- ⑤ 止め木……………車両に取付けられた輸送物の滑動を防止するための木または金具
- ⑥ 単独固縛……………個々の輸送物について、それぞれ個別に固縛すること

4. 固縛方法

(1) 固縛装置の設計

固縛装置は、下記に示す通常時条件及び事故時条件において作用する場合に発生する力に耐えうる強度を有していなければならない。

ただし、速度等を制限することによって、明らかに下表の加速度を生ずることがない場合には、これによらないことができる。

① 通常時条件

ア) 固縛装置は、表 a の適用輸送物について、表 b に示すそれぞれの方向の加速度が同時に作用する場合に発生する力に耐える強度を有しなければならない。

表a 適用輸送物

BU 型輸送物、BM 型輸送物、A 型輸送物 IP-3 型輸送物、IP-2 型輸送物 核分裂性輸送物、六ふっ化ウラン輸送物

※ L 型輸送物及び IP-1 型輸送物については(3)参照

表b 設定加速度

上下方向	2 G ^(*)
前後方向	2 G
左右方向	1 G

(*) 重力加速度は含まず

ただし、50kg 未満のA型輸送物、IP-3 型輸送物及び IP-2 型輸送物を非開放型の車両により運搬する場合で、運搬中において移動、転倒、転落等により、輸送物の安全性が損なわれないように積載し、かつ、輸送物が車両より逸脱しないよう措置が講じられている場合は、これらの措置を固縛に代えることができる。

イ) 固縛装置の強度計算の基本となる荷重は、JIS 等に定める使用荷重とする。特に定めのないものについては、その破壊荷重を適切な安全係数で除した許容荷重とする。

② 事故時条件

ア) 事故時とは自損事故による正面衝突の場合を指すものとし、この場合固縛装置は、事故時を想定し設計されている以下の適用輸送物のいずれかに該当する輸送物については、前方

向約 10G((他の一般交通の規制などにより明らかに事故被害の軽減が図られる場合は相当な値)によって発生する力が作用した場合において安全上問題がないことを確認しなければならない。

なお、この場合における後方向及び左右方向についても、適切な数値をもって確認しなければならない。

表c 適用輸送物

BU 型輸送物、BM 型輸送物、 核分裂性輸送物、六ふっ化ウラン輸送物
--

イ) 固縛装置の強度の確認の基本となる荷重は、破壊荷重とする。

(2) 固縛装置の設計上の要求事項

- ① 固縛装置の強度計算においては、輸送物と車両の間に働く摩擦力は、原則として無視して計算すること。
- ② 固縛装置は、それに発生可能な最大荷重によって、アタッチメントを除く輸送物のいかなる部位にも降伏強度を超える応力を発生させないこと。なお、アタッチメントを使用する場合にあっては、アタッチメントの破壊強度は、固縛装置の破壊強度より大きくなければならない。
- ③ 固縛用材は、JIS 規格品等その品質が信頼できるものを用いるとともに、使用にあたっては、当該用材の特質を十分配慮しなければならない。(参考資料-1参照)
- ④ 車両のフレーム、荷台等は、固縛に使用する場合、4(1)①及び 4(1)②に規定する強度を有しなければならない。
- ⑤ 重量輸送物は、ボルト固定による単独固縛とすることが望ましい。
- ⑥ 輸送物の複数個を単独固縛以外の方法で固縛する場合は、必要に応じて輸送物間で衝突エネルギーの分散を考慮した配置としなければならない。
- ⑦ 固縛の設計にあたっては、その施工が確実にできるよう作業性について配慮しなければならない。
- ⑧ 固縛の設計にあたっては、ワイヤロープ等の引張部材が車両等に接触しないように配慮し

なければならない。

(3) 積載及び運搬要領における要求事項

L型輸送物及び IP-1 型輸送物については、運搬中において移動、転倒、転落等により、輸送物の安全性が損なわれないように積載しなければならない。

BU 型輸送物、BM 型輸送物、A 型輸送物、IP-3 型輸送物、IP-2 型輸送物、核分裂性輸送物及び六ふっ化ウラン輸送物は、これに加え該当する次の要件を満たさなければならない。また IP-1 型輸送物においても可能な限り満たすことが望ましい。

- ① 重量輸送物の固縛をワイヤロープ等の引張部材による場合は、可能な限り止め木を併用すること。この場合、輸送物と止め木間にすき間が生じないようにすること。
- ② 固縛にあたっては、固縛用材が仕様に合致していること及び健全であることを確認しなければならない。
- ③ 固縛装置は、弛緩のないように十分な張力を与えておかななければならない。
- ④ 輸送開始前において固縛装置の点検を実施するとともに、輸送途中の休憩時においても適宜点検を実施しなければならない。
- ⑤ 追突事故時等に輸送物が直接衝撃を受けないよう荷台後端との間に空間を設けなければならない。
- ⑥ 車両の偏った位置、特に後車軸の後方に集中的に積載してはならない。
- ⑦ 車両は、走行安定性及び輸送物の安全性の確保を図るため、輸送物の内容、形状、重量等を配慮して選定しなければならない。
- ⑧ 海上コンテナ等の使用において、当該定格荷重が定められているものについては、その荷重範囲内で運用しなければならない。

終わりに

調査委員会の構成は下記のとおりである。

御協力をいただいた関係各位の皆様に深く感謝の意を表するものである。

平成 20 年度及び平成 22 年度
放射性物質の自動車運搬に係る固縛指針等に関する調査委員会
委員名簿

委員長 伊藤千浩	財団法人電力中央研究所 地球工学研究所バックエンド研究センター 副所長 (平成 20 年度、平成 22 年度)
委員 安立辰幸	株式会社上組 重量エネルギー輸送本部 エネルギー二部 部長 (平成 20 年度、平成 22 年度)
委員 宇根崎博信	大学法人京都大学 原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門 教授 (平成 20 年度)
委員 後藤一郎	株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン ウラン燃料センター 業務部 輸送課 担当課長(平成 22 年度)
委員 関根邦敏	社団法人日本アイソトープ協会 医薬品・アイソトープ部 放射線源課 専門職(平成 20 年度、平成 22 年度)
委員 中谷正輝	株式会社エヌ・エフ・ティ・エス輸送部 係長(平成 20 年度)
委員 広瀬誠	原燃輸送株式会社 技術部マネージャー(平成 20 年度、平成 22 年度)

(五十音順)

昭和57年
放射性物質自動車運搬技術検討会
委員名簿

委員長 島村昭治	通商産業省工業技術院機械技術研究所材料工学部長
委員 兼重一郎	社団法人日本自動車工業会安全公害委員会委員
委員 菊池三郎	動力炉・核燃料開発事業団核燃料部主査
委員 後藤健一	財団法人日本自動車研究所理事
委員 佐藤隆	運輸省交通安全公害研究所交通安全部事故解析研究室長
委員 武村祥夫	社団法人日本アイソトープ協会医薬品部長
委員 田ノ上家久	財団法人放射線安全技術センター技術部長
委員 橋本清一	財団法人全日本トラック協会常務理事
委員 森川尚威	東京大学アイソトープ総合センター助教授

(五十音順)

参考資料1 主な固縛用材の使用上の留意事項

(1) ボルト

- ① ボルトは、次の事項を満足するものでなければ使用してはならない。
 - ア) ボルト、ナット、座金を1組として、円滑に組合わさること。
 - イ) ボルト、ナットのそれぞれのネジ部に著しい損傷、摩耗がないこと。
- ② 特に短距離以外の輸送、悪路での輸送等にあつては、輸送中の緩みを防止するため、ダブルナット、バネ座金等を使用しなければならない。
- ③ ボルトの締付けが均等になるよう留意しなければならない。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

B 1180 六角ボルト、B 1181 六角ナット、B 1251 ばね座金

B 1252 平座金、B 1051 (炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質

—第1部: ボルト、ねじ及び植込みボルト

B 1186 摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット

(2) ワイヤロープ

- ① ワイヤロープは、次の事項を満足するものでなければ使用してはならない。
 - ア) 一よりの間において素線の数の10%以上の素線が切断しているものでないこと。
 - イ) 直径の減少が公称径の7%以上でないこと。
 - ウ) キンクしたものでないこと。
 - エ) 著しく形くずれ又は著しい腐食がないこと。
 - オ) 端末止め部が確実に施行され、かつ異状がないこと。
- ② 鋭利な角を有する物や、ワイヤロープを傷め易い物を固縛する場合は、当金具等を用いなければならない。
- ③ ワイヤロープの使用にあつては、端末の止め方、曲げ引張等による強度の低下を考慮しなければならない。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

G 3525 ワイヤロープ、B 8817 ワイヤロープスリング

(3) ターンバックル

ターンバックルは、次の事項を満足するものでなければ使用してはならない。

- ① ターンバックル胴、ターンバックルボルトは、円滑に組合わさること。
- ② ターンバックル胴、ターンバックルボルトはネジ部に著しい損傷、摩耗のないこと。
- ③ 軸心の偏心、曲りのないこと。
- ④ アイボルト部の断面径の減少が公称径の 10 %以上でないこと。
- ⑤ アイボルト部の内長増が 5 %以上でないこと。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

F 3307 アンカーストップ

F3310 小型アンカーストップ

F7020 船用アイボルト付ターンバックル

(4) シャックル

シャックルは、次の事項を満足するものでなければ使用してはならない。

- ① 強度に影響を与えるような有意な変形が認められないこと。
- ② 本体及びピンに変形がないこと。
- ③ 本体及びピンのネジ部に著しい損傷、摩耗のないこと。
- ④ ピン穴とピンとのがたがないこと。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

B2801 シャックル

(5) フック

フックは、次の事項を満足するものでなければ使用してはならない。

- ① 断面径の減少が公称径の 10 %以上でないこと。
- ② 強度に影響を与えるような有意な変形が認められないこと。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

F 2105 船用荷役フック

F 2803 フック

(6) 環フック

環フックは、次の事項を満足するものでなければ使用してはならない。

- ① 断面径の減少が公称径の 10 %以上でないこと。
- ② リングの内長増が 5 %以上でないこと。

(7) チェーン

チェーンは、次の事項を満足するものでなければ使用してはならない。

- ① 断面径の減少が公称径の 10 %以上でないこと。
- ② 長さの増が 5 %以上でないこと。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

F 2106 船用一般チェーン

(8) レバーブロック

レバーブロックは、事項を満足するものでなければ使用してはならない。

- ① 円滑に作動すること。
- ② ラチェットの歯車、爪のかみ合わせに異常がないこと。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

B 8819 チェーンレバーホイスト

(9) ベルトスリング

- ① 全幅にわたって縫目がわかり、たて糸の損傷及び縁の部分のたて糸の損傷、著しい毛羽立ちがないこと。
- ② 目立った切り傷、すり傷、引っかけ傷などがないこと。
- ③ 縫製部の剥離がないこと。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

B 8818 ベルトスリング

(10) アイプレート

- ① 強度に影響を与えるような有意な変形が認められないこと。
- ② 目立った損傷、摩耗のないこと。

(11) すみ金具、ツイストロック等

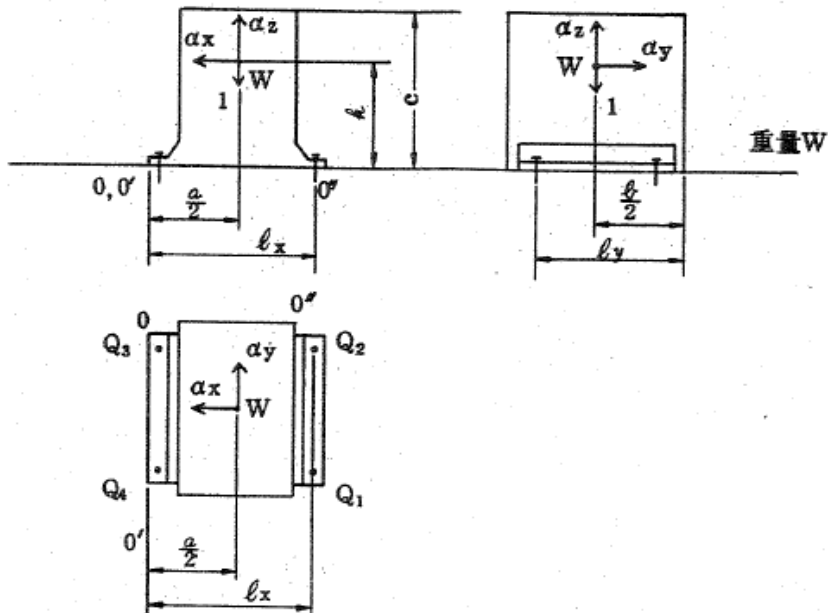
- ① コンテナは下部の四つのすみ金具を用いて車体に支持・緊縛すること。
- ② すみ金具、ツイストロックについては JIS の規格(ISO 規格)の基準を満たすものを使用すること。

参考: 関連する JIS の規格例を示す。

Z 1616 国際貨物コンテナすみ金具

参考資料 2 強度計算例

(1) ボルトによる固縛



S : ボルト断面積 (1本)

加速度 α_x によって生じる力には、 Q_1 と Q_2 が等しく耐える。

$$\therefore Q_{1x} = Q_{2x}$$

加速度 α_y によって生じる力には、 Q_1 と Q_4 が等しく耐える。

$$\therefore Q_{1y} = Q_{4y}$$

ボルト 1 に最大の引張力が生じる。

$$Q_1 = Q_{1x} + Q_{1y}$$

OO' を支点とする転倒を考えると、

$$W \alpha_x h + W \alpha_z \frac{a}{2} - W \frac{a}{2} = 2Q_{1x} l_x$$

$$\therefore Q_{1x} = \frac{W}{4} \cdot \frac{2\alpha_x h + (\alpha_z - 1) a}{l_x}$$

OO''を支点とする転倒を考えると、

$$W\alpha_y h + W\alpha_z \frac{b}{2} - W\frac{b}{2} = 2Q_{1y} \ell_y$$

$$\therefore Q_{1y} = \frac{W}{4} \cdot \frac{2\alpha_y h + (\alpha_z - 1)b}{\ell_y}$$

$$Q_1 = Q_{1x} + Q_{1y}$$

$$= \frac{W}{4} \cdot \left\{ \frac{2\alpha_x h + (\alpha_z - 1)a}{\ell_x} + \frac{2\alpha_y h + (\alpha_z - 1)b}{\ell_y} \right\}$$

よってボルト1に生じる引張応力は、

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{Q_1}{S} \\ &= \frac{W}{4S} \cdot \left\{ \frac{2\alpha_x h + (\alpha_z - 1)a}{\ell_x} + \frac{2\alpha_y h + (\alpha_z - 1)b}{\ell_y} \right\} \end{aligned}$$

一方、ボルト1に生じる剪断応力は α_x と α_y の合成加速度 α_{xy} によって、

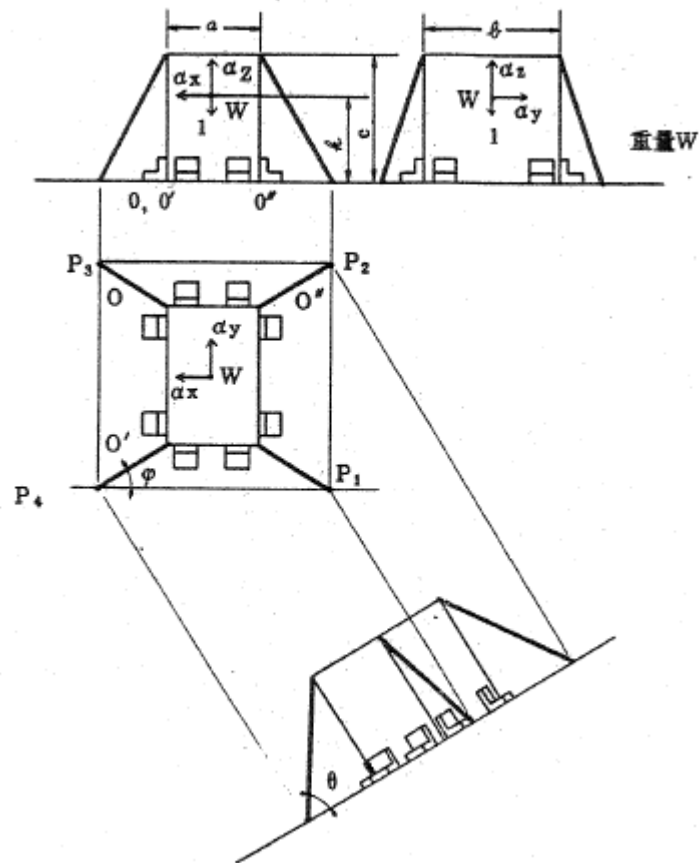
$$\begin{aligned} \alpha_{xy} &= \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} \\ \tau_1 &= \frac{\alpha_{xy} W}{4S} = \frac{W}{4S} \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} \end{aligned}$$

剪断歪エネルギー説によって引張応力 σ_1 、剪断応力 τ_1 を合わせると、

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} \\ &= \frac{W}{4S} \sqrt{\left\{ \frac{2\alpha_x h + (\alpha_z - 1)a}{\ell_x} + \frac{2\alpha_y h + (\alpha_z - 1)b}{\ell_y} \right\}^2 + 3\alpha_x^2 + 3\alpha_y^2} \end{aligned}$$

(2).ワイヤロープによる固縛(止め木有り)

① ワイヤロープに働く力



加速度 α_x によって生じる力には P_1 と P_2 が等しく耐える。

$$\therefore P_{1x} = P_{2x}$$

加速度 α_y によって生じる力には P_1 と P_4 が等しく耐える。

$$\therefore P_{1y} = P_{4y}$$

ワイヤロープ 1 に最大の引張力が生じる。

$$\therefore P_1 = P_{1x} + P_{1y}$$

止め木が有効に機能し、 OO' を支点とする転倒を考えると、

$$\begin{aligned} W\alpha_x h + W\alpha_z \frac{a}{2} - W\frac{a}{2} \\ = 2cP_{1x} \cos\theta \cos\varphi + 2aP_{1x} \sin\theta \\ \therefore P_{1x} = \frac{W}{4} \cdot \frac{(\alpha_z - 1)a + 2\alpha_x h}{c \cos\theta \cos\varphi + a \sin\theta} \end{aligned}$$

OO'' を支点とする転倒を考えると、上と同様に

$$\begin{aligned} P_{1y} &= \frac{W}{4} \cdot \frac{(\alpha_z - 1)b + 2\alpha_y h}{c \cos\theta \sin\varphi + b \sin\theta} \\ P_1 &= P_{1x} + P_{1y} \\ &= \frac{W}{4} \left\{ \frac{(\alpha_z - 1)a + 2\alpha_x h}{c \cos\theta \cos\varphi + a \sin\theta} + \frac{(\alpha_z - 1)b + 2\alpha_y h}{c \cos\theta \sin\varphi + b \sin\theta} \right\} \end{aligned}$$

② 止め木に働く力

加速度 α_x が働いたときに、止め木に生じる前後方向の力 F_x を考える。

輸送物の移動を止めている力は、摩擦を無視して、 P_1 、 P_2 、 F_x であるとすると、

$P_1 = P_2$ であるから、

$$W\alpha_x = 2P_1 \cos\theta \cos\varphi + F_x$$

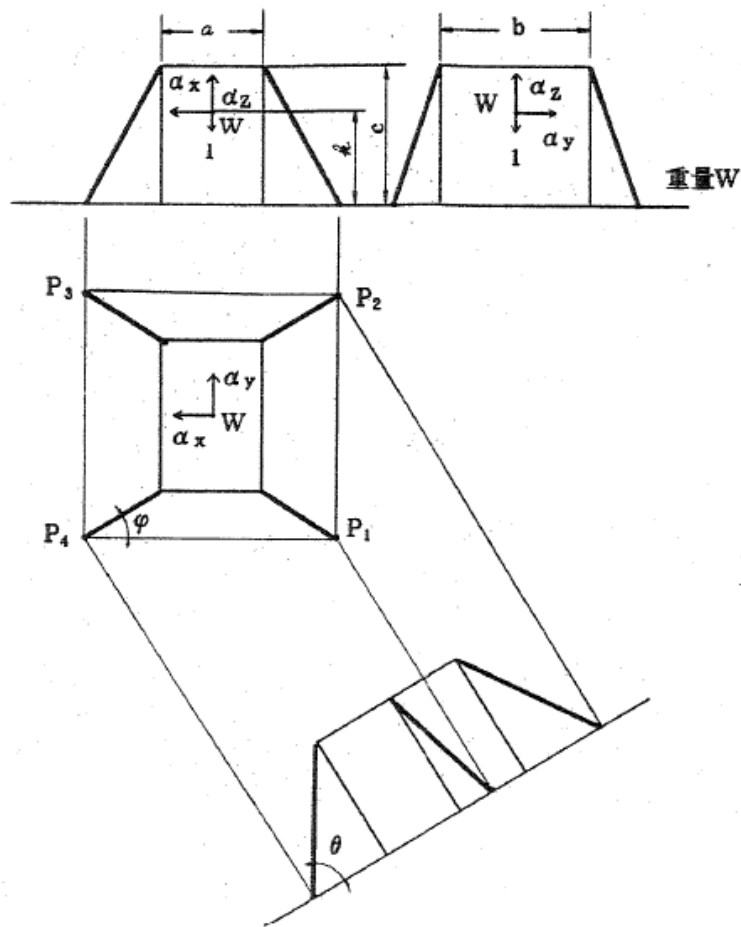
ここで加速度は前後方向と上下方向だけを考えているから、

$$\begin{aligned} P_1 = P_{1x} &= \frac{W}{4} \cdot \frac{(\alpha_z - 1)a + 2\alpha_x h}{c \cos\theta \cos\varphi + a \sin\theta} \\ \therefore F_x &= W\alpha_x - \frac{W}{2} \cdot \frac{(\alpha_z - 1)a + 2\alpha_x h}{c \cos\theta \cos\varphi + a \sin\theta} \cdot \cos\theta \cos\varphi \end{aligned}$$

加速度 α_y が働いたときに、止め木に生じる左右方向の力 F_y は、上と同様にして、

$$F_y = W\alpha_y - \frac{W}{2} \cdot \frac{(\alpha_z - 1)b + 2\alpha_y h}{c \cos\theta \sin\varphi + b \sin\theta} \cdot \cos\theta \sin\varphi$$

(3) ワイヤロープによる固縛(止め木無し)



加速度 α_x によって生じる力には P_1 と P_2 が等しく耐える。

$$\therefore P_{1x} = P_{2x}$$

加速度 α_y によって生じる力には P_1 と P_4 が等しく耐える。

$$\therefore P_{1y} = P_{4y}$$

加速度 α_z によって生じる力には P_1 , P_2 , P_3 , P_4 が等しく耐える。

$$\therefore P_{1z} = P_{2z} = P_{3z} = P_{4z}$$

最大の引張力を生じるワイヤロープは 1 であり、その力の大きさは、

$$P_1 = P_{1x} + P_{1y} + P_{1z}$$

加速度 α_x に対して前後方向の力の釣り合いは、

$$W \alpha_x = 2P_{1x} \cos \theta \cos \varphi$$

$$\therefore P_{1x} = \frac{W \alpha_x}{2 \cos \theta \cos \varphi}$$

加速度 α_y に対して上と同様にして、

$$P_{1y} = \frac{W \alpha_y}{2 \cos \theta \sin \varphi}$$

加速度 α_z に対して、上下方向の力の釣り合いは、

$$W \alpha_z = W + 4P_{1z} \sin \theta$$

$$\therefore P_{1z} = \frac{W(\alpha_z - 1)}{4 \sin \theta}$$

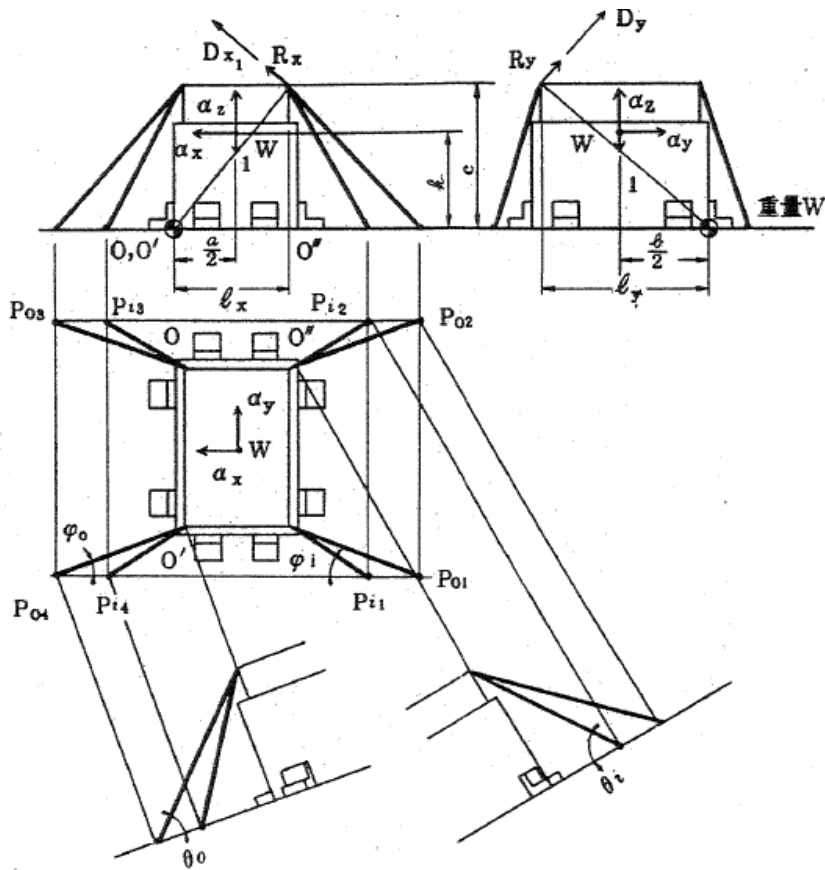
最大引張力は、

$$P_1 = P_{1x} + P_{1y} + P_{1z}$$

$$= \frac{W}{2} \left\{ \frac{\alpha_x}{\cos \theta \cos \varphi} + \frac{\alpha_y}{\cos \theta \sin \varphi} + \frac{\alpha_z - 1}{2 \sin \theta} \right\}$$

(4) ワイヤロープ(8本)による固縛(止め木有り)

① ワイヤロープに働く力



加速度 α_x によって生じる力には P_{i1} 、 P_{o1} 、 P_{i2} 、 P_{o2} が耐える。

$$P_{i1x} = P_{i2x}$$

$$P_{o1x} = P_{o2x}$$

加速度 α_y によって生じる力には P_{i1} 、 P_{o1} 、 P_{i4} 、 P_{o4} が耐える。

$$P_{i1y} = P_{i4y}$$

$$P_{o1y} = P_{o4y}$$

ワイヤロープ 1_i 、 1_o に最大の張力を生じる。

$$P_{i1} = P_{i1x} + P_{i1y}$$

$$P_{o1} = P_{o1x} + P_{o1y}$$

止め木が有効に機能し、 OO' を支点とする転倒を考えると、転倒力 R_x は、

$$R_x \sqrt{\ell_x^2 + c^2} = W \alpha_x h + W \alpha_z \frac{a}{2} - W \frac{a}{2}$$

$$\therefore R_x = \frac{W \left[\alpha_x h + (\alpha_z - 1) \frac{a}{2} \right]}{\sqrt{\ell_x^2 + c^2}}$$

一方、 P_{ix} と P_{ox} の関係は、それぞれが D_x の方向となす角を ψ_{ix} 、 ψ_{ox} とすると、

$$\cos \psi_{ix} = \frac{c^2 \left(1 + \frac{c^2}{\ell_x^2} \right) + \frac{c^2}{\sin^2 \theta_i} - c^2 \left(\frac{\sin \varphi_i}{\tan \theta_i} \right)^2 - c^2 \left(\frac{\cos \varphi_i}{\tan \theta_i} - \frac{c}{\ell_x} \right)^2}{2 \cdot \frac{c}{\sin \theta_i} \cdot c \sqrt{1 + \frac{c^2}{\ell_x^2}}}$$

$$\cos \psi_{ox} = \frac{c^2 \left(1 + \frac{c^2}{\ell_x^2} \right) + \frac{c^2}{\sin^2 \theta_o} - c^2 \left(\frac{\sin \varphi_o}{\tan \theta_o} \right)^2 - c^2 \left(\frac{\cos \varphi_o}{\tan \theta_o} - \frac{c}{\ell_x} \right)^2}{2 \cdot \frac{c}{\sin \theta_o} \cdot c \sqrt{1 + \frac{c^2}{\ell_x^2}}}$$

式を変形すると、

$$\cos \psi_{ix} = \frac{\sin \theta_i + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{\ell_x^2}}}$$

$$\cos \psi_{ox} = \frac{\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{\ell_x^2}}}$$

変化量が微小であり、 D_x の方向に d_x であったとするとワイヤロープ 1_i 、 1_o の伸び量はそれぞれ

$$d_x \cos \psi_{ix}、d_x \cos \psi_{ox}$$

となる。

このとき、弾性変形による仕事量 U はワイヤロープの長さを l_i 、 l_o 、断面積 A (共通)、縦弾性係数 E (共通) とすれば、

$$U = \frac{AE}{2l_i} (d_x \cos \psi_{ix})^2 + \frac{AE}{2l_o} (d_x \cos \psi_{ox})^2 - R_x d_x$$

$$\frac{\partial U}{\partial d_x} = 0 \text{ より}$$

$$d_x = \frac{R_x}{AE \left(\frac{\cos^2 \psi_{ix}}{l_i} + \frac{\cos^2 \psi_{ox}}{l_o} \right)}$$

$$\text{ここで } l_i = \frac{c}{\sin \theta_i}, \quad l_o = \frac{c}{\sin \theta_o}$$

$$\begin{aligned} \therefore d_x &= \frac{R_x \cdot c}{AE (\cos^2 \psi_{ix} \sin \theta_i + \cos^2 \psi_{ox} \sin \theta_o)} \\ &= \frac{R_x \cdot c \left(1 + \frac{c^2}{l_x^2} \right)}{AE \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{iix} &= \frac{AE}{l_i} \cdot d_x \cos \psi_{ix} \cdot \frac{1}{2} \\ &= \frac{R_x \sqrt{1 + \frac{c^2}{l_x^2}} \sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)}{2 \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]} \end{aligned}$$

$$P_{oix} = \frac{AE}{l_o} \cdot d_x \cos \psi_{ox} \cdot \frac{1}{2}$$

$$R_x \sqrt{1 + \frac{c^2}{l_x^2}} \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)$$

$$= \frac{R_x \sqrt{1 + \frac{c^2}{l_x^2}} \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)}{2 \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

R_x を代入すると、

$$P_{iix} = \frac{W \left[\alpha_x h + (\alpha_z - 1) \frac{a}{2} \right] \sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)}{2 l_x \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

$$P_{oix} = \frac{W \left[\alpha_x h + (\alpha_z - 1) \frac{a}{2} \right] \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)}{2 l_x \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

加速度 α_y によって生じる OO'' を支点とする転倒を考えると、上と同様にして、

$$R_y = \frac{W \left[\alpha_y h + (\alpha_z - 1) \frac{b}{2} \right]}{\sqrt{l_y^2 + c^2}}$$

$$\cos \psi_{iy} = \frac{\sin \theta_i + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{l_y^2}}}$$

$$\cos \psi_{oy} = \frac{\sin \theta_o + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{l_y^2}}}$$

$$d_y = \frac{R_y}{AE \left(\frac{\cos^2 \psi_{iy}}{l_i} + \frac{\cos^2 \psi_{oy}}{l_o} \right)}$$

$$P_{ily} = \frac{AE}{l_i} \cdot d_y \cos \psi_{iy} \cdot \frac{1}{2}$$

$$P_{oiy} = \frac{AE}{l_o} \cdot d_y \cos \psi_{oy} \cdot \frac{1}{2}$$

より

$$P_{ily} = \frac{W \left[\alpha_y h + (\alpha_z - 1) \frac{b}{2} \right] \sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right)}{2l_y \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

$$P_{oiy} = \frac{W \left[\alpha_y h + (\alpha_z - 1) \frac{b}{2} \right] \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right)}{2l_y \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

$P_{il} = P_{ilx} + P_{ily}$ より

$$P_{il} = \frac{W \left[\alpha_x h + (\alpha_z - 1) \frac{a}{2} \right] \sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)}{2l_x \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

$$+ \frac{W \left[\alpha_y h + (\alpha_z - 1) \frac{b}{2} \right] \sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right)}{2l_y \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{l_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

$P_{o1} = P_{o1x} + P_{o1y}$ より

$$P_{o1} = \frac{W \left[\alpha_x h + (\alpha_z - 1) \frac{a}{2} \right] \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)}{2 \ell_x \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]} + \frac{W \left[\alpha_y h + (\alpha_z - 1) \frac{b}{2} \right] \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right)}{2 \ell_y \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{\ell_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

② 止め木に働く力

加速度 α_x が働いたときに、止め木に生じる前後方向の力 F_x を考える。

輸送物の移動を止めている力は、摩擦を無視して、 P_{i1} 、 P_{i2} 、 P_{o1} 、 P_{o2} 、 F_x であるとする、加速度は前後方向と上下方向だけを考えているから、

$$P_{i1} = P_{i1x}, P_{i2} = P_{i2x}, P_{o1} = P_{o1x}, P_{o2} = P_{o2x}$$

また $P_{i1x} = P_{i2x}$ 、 $P_{o1x} = P_{o2x}$ より

$$W \alpha_x = 2P_{i1x} \cos \varphi_i \cos \theta_i + 2P_{o1x} \cos \varphi_o \cos \theta_o + F_x$$

$$\therefore F_x = W \alpha_x -$$

$$\frac{W \left[\alpha_x h + (\alpha_z - 1) \frac{a}{2} \right] \left[\cos \varphi_i \sin \theta_i \cos \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right) + \cos \varphi_o \sin \theta_o \cos \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right) \right]}{2 \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_x} \cos \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]}$$

加速度 α_y が働いたときに、止め木に生じる左右方向の力 F_y は、上と同様にして、

$$F_y = W \alpha_y -$$

$$\frac{W \left[\alpha_y h + (\alpha_z - 1) \frac{b}{2} \right] \left[\sin \varphi_i \sin \theta_i \cos \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{\ell_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right) + \right.}{2 \left[\sin \theta_i \left(\sin \theta_i + \frac{c}{\ell_y} \sin \varphi_i \cos \theta_i \right)^2 + \right.}$$

$$\left. \left. \frac{\sin \varphi_o \sin \theta_o \cos \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right) \right]}{\left. \sin \theta_o \left(\sin \theta_o + \frac{c}{\ell_y} \sin \varphi_o \cos \theta_o \right)^2 \right]} \right]$$