摩擦・衝撃を伴うテザー多体システムの動力学*

(第2報, 数値シミュレーション)

松 永 三 郎^{*1}, 森 治^{*2}, 狼 嘉 彰^{*3}

Dynamics of Tethered Multibody Systems with Friction and Impact

(Second Report, Numerical Simulations)

Saburo MATUNAGA^{*4}, Osamu MORI and Yoshiaki OHKAMI

^{**} Tokyo Institute of Technology, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering,
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

Our previous report discussed a two-dimensional formulation of tethered dynamics with friction and impact: the dynamics between a captured target and a tether with load masses at the end of the tether. This paper conducts the numerical simulation on the dynamics, and clearly shows the following results: 1) the impacts cause motion state transitions, and the stick-slip motion of tether causes friction state transitions, 2) the tether tension can transfer from the angular momentum of target to that of wheel and weight, 3) relationships between the target angular momentum and the model parameters and conditions for winding the target are shown in terms of the initial conditions, and 4) the motion after winding is described in detail. These results shed light on the complicated motion of the tethered multibody.

Key Words: Multibody system, Tether, Dynamics, Impact, Friction, Capturing, Orbiting Object, Numerical Simulation

1. 緒 論

著者らは非協力衛星捕獲において角運動量を減衰させるための一手法として、テザーを利用する方法を提案したが^{§(1)(2)}, その基礎的な研究を行うためには、テザーで連結された多体システムの摩擦や衝撃を伴う動力学が必要である。このような問題はテザーを用いた非協力衛星の捕獲に特有ではなく、宇宙機内外における浮遊物体の繋留のためにテザーをキャスティングする際や、また地上でテザーを操作する作業においても必要となる技術課題である。しかし、今まで数多くのテザー衛星の動力学研究⁽³⁾⁽⁴⁾や衝撃や摩擦を伴った多体動力学研究⁽⁵⁾がなされているにもかかわらず、当該研究はほとんど見受けられない。著者らは、衛星捕獲を念頭に置いて、テザーを介した摩擦・衝撃を含んだ多体システムの動力学のモデル化と定式化を行った⁽⁶⁾。すなわち、物理現象の本質を理解するためにできるだけ簡単化されたモデルとして、捕獲対象となる

ターゲットおよび、テザーでつながれているホイールとおもりの3体の平面運動モデルを考案した。それらを4種類の運動状態に分類して定式化を行い、テザーを介した摩擦の取り扱い、および各物体間の衝突の取り扱い方法について詳しく述べた。

本論文では、この手法を用いた数値シミュレーションを行い、本モデルの生み出す複雑な運動を解明する。具体的には、運動状態と摩擦状態の遷移条件を説明し、テザー張力によって各物体間の角運動量が遷移することを示す。そしてターゲット回転の変化量と各パラメータとの関係、テザーがターゲットに巻き付くための条件、テザーがターゲットに巻き付いた後の挙動を明らかにする。

2. シミュレーションモデル

2.1 初期条件 図1に数値シミュレーションモデルと初期条件を示す。慣性空間 $\{i\}$ に対してターゲットの初期位置が原点、初期速度が零となるように設定する。テザーははじめ x 軸と垂直で、ホイール・おもりはそれぞれ、第4象限・第1象限に位置し、ターゲットへの接近速度を U_w , U_o (ただし $U_w > 0$)とする。また、ターゲットの初期角速度を Ω (時計回りを正)とする。

* 原稿受付 1998年12月21日。

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 正員, 東京工業大学工学部。

^{*3} 正員, 東京工業大学工学部(現: 宇宙開発事業団)。

E-mail: Matunaga.Saburo@horse.mes.titech.ac.jp

Fig. 1 Initial Configurations

2.2 無次元化とパラメータ 質量・距離・時間の

各次元を次の値を用いて無次元化する。

質量: m_t , 距離: r_t , 時間: r_t/U_w

無次元量は m'_w のようにダッシュをつけて表す。以後, 方程式・関数・座標などは, すべて無次元化して使用する。ただし, $m'_t=1$, $r'_t=1$, $U'_w=1$ であるが, 物理的意味を重視して記号のまま表現することもある。今回のシミュレーションでは次の九つのパラメータを考える。

e : はねかえり係数(各衝突共通)

Ω' : ターゲットの初期角速度

$$\Omega' = \Omega(r_t/U_w)(180/\pi), \text{ deg}$$

$m'_w + m'_o$: ホイールとおもりの質量和

L' : テザー長さ

h_1 : ホイール質量と質量和との比

$$\left(h_1 = \frac{m'_w}{m'_w + m'_o}, 0 < h_1 < 1 \right)$$

h_2 : x 軸とホイール間距離とテザー長さとの比

$$\left(h_2 = \frac{Y'}{L'}, 0 < h_2 < 1 \right)$$

μ_2 : 動摩擦係数

U'_o : おもりのターゲットへの初期接近速度

X' : ホイールの初期 x 座標値

他の値は次のように設定する。

$r'_w = r'_o = 0.1$: ホイールとおもりの半径

$I' = 0.5$: ターゲットの慣性モーメント

$\mu_1 = 0.5$: 最大静止摩擦係数

$r'_w = r'_o$ よりホイールとおもりのスケールの違いは無視できる。またターゲットは密度の一樣な円と想定している。

3. 運動の遷移

システムの運動状態および摩擦状態遷移を調べるため, 以下のように e , Ω' 以外のパラメータを固定して数値シミュレーションを行う。

(a) $e=1$ (b-1) $e=0.9$ (b-2) $e=0.1$

Fig. 2 Trajectory of wheel and weight w.r.t. target

$$m'_w + m'_o = 0.05$$

$$L' = 20$$

$$h_1 = 0.95$$

$$h_2 = 0.5$$

$$\mu_2 = 0.5$$

$$U'_o = 1$$

$$X' = 5$$

3.1 運動状態遷移 $\Omega' = -30$, シミュレーショ

ン時間(無次元)を30として, $e=1, 0.9, 0.1$ の場合のターゲット中心から見たホイールとおもりの軌跡を図2に示す。ただし各文字の意味は以下のとおり。

- 0: シミュレーション開始
- 1: テザーとターゲットの接触
- 2: 物体間衝突(おもりとターゲット)
- 3: (仮想)テザーとターゲットの分離
- 4: シミュレーション終了

(a) 完全弾性衝突 一連の運動は, 運動状態によって次のように4分割できる。

- 0~1: 張力分離状態 (状態I, 一点鎖線)
- 1~2: 張力巻付状態 (状態II, 実線)
- 2~3: たるみ巻付状態(状態III, 破線)
- 3~4: たるみ分離状態(状態IV, 二点鎖線)

0~1: はじめシステムは運動状態Iである。今回の条件($U_0=1$)において, ホイールとおもりは等速度であり, テザーの張力は零となるため, 2体の軌跡は平行になる。

1~2: テザーがターゲットに巻き付くと, ホイールとおもりがターゲット中心に巻き込まれる。質量の小さいおもりのほうがホイールよりも巻き込まれやすい。2~4: 物体間衝突が起きるとテザーがたるむ。以後, 3体の運動は自由運動とテザー衝突を繰り返すため, 軌跡はジグザグとなる。

(b) 非完全弾性衝突 システムの運動は, 物体間衝突するまでは $e=1$ の場合と一致する。しかし $e < 1$ の場合, たるみ状態においてテザー衝突を繰り返して, 張力状態に遷移したと見なせる場合が生じる。この遷

移を T で表す。

(b-1) $e=0.9$ の場合: 状態IVにおいて遷移 T が起きる。

(b-2) $e=0.1$ の場合: 物体間衝突後, すぐに状態IIIからIIに遷移するが, おもりが再びターゲットと衝突するため状態IIIに戻る。これを数回繰り返す。

これらの運動状態の遷移を図3に示す。

他のシミュレーション結果も踏まえると, 運動状態の遷移は e の値によって以下のように分類できる。

- (a) $e=1$: I $\rightarrow$ II $\rightarrow$ III $\rightarrow$ IV
- (b) (i) $0.86 < e < 1$: I $\rightarrow$ II $\rightarrow$ III $\rightarrow$ IV $\rightarrow$ I
- (ii) $0 < e < 0.86$: I $\rightarrow$ II ($\rightarrow$ III $\rightarrow$ II) $^n \rightarrow$ I
($0 < e < 0.11$: $n \geq 2$, $0.11 < e < 0.86$: $n=1$)

これは, 次のように考察できる。たるみ状態において, 仮想テザーが定義でき, その長さ d が実テザーより長くなるときにテザー衝突が行われる。完全弾性衝突の場合, 仮想テザー長さの変化率の大きさ $|\dot{d}|$ は衝突前後で変化することがないため, 張力状態に戻ることはない。一方, 非完全弾性衝突の場合, 衝突直後の $|\dot{d}|$ の値は, 直前の値より小さくなるので, 最終的には張力状態に遷移すると考えられる。

以上, 一連の運動状態遷移を図4にまとめる。

3・2 摩擦状態遷移 テザーとターゲット間に摩擦が働くのは状態IIに限られる。そこで区間1~2(e の値に依存しない)の摩擦状態の遷移について考える。シミュレーション結果より, Ω' の値によって摩擦状態の遷移は次のように分類できる。

Fig. 3 Transition of motion states

Fig. 4 Summary of motion state transitions

- (i) $\Omega' < -40.3$: 正動
(ii) $-40.3 < \Omega' < -34.4$: 正動→静止
(iii) $-34.4 < \Omega' < 0$: 正動⇒負動→静止
(iv) $\Omega' = 0$: 静止⇒負動→静止
(v) $0 < \Omega' < 30.9$: 負動→静止
(vi) $30.9 < \Omega' < 41.6$: 負動→静止⇒負動→静止
(vii) $41.6 < \Omega' < 82.8$: 負動→静止⇒負動
(viii) $\Omega' > 82.8$: 負動

ただし,

→ : スティック, ⇒ : スリップ

正動: 正の動摩擦状態, 負動: 負の動摩擦状態,

静止: 静止摩擦状態

ここで, 動摩擦力の符号はターゲットの角速度 ω' の値を大きくする向きを正としている。動摩擦力はテザーとターゲット間の滑りを小さくする向きに働く。滑りがなくなるとテザーとターゲットはスティックし, 静止摩擦状態へ遷移する。静止摩擦力はテザーとターゲットが滑らないための拘束力とも見なされ, システムのダイナミクスによりその大きさは変化する。ただし, 最大静止摩擦力より大きくなるとスリップし, 動摩擦状態へ遷移する。

図5に(i)~(viii)に対応したそれぞれの Ω' において, 摩擦因子 α (実線) とターゲットに対するテザーの滑り速度 v'_s (破線) の時間変化のグラフを示す。 v'_s と α の関係は以下になっている。

- (a) $v'_s = 0 : |\alpha| \leq \mu_1$ (静止) (1)
(b) $v'_s > 0 : \alpha = \mu_2$ (正動) (2)
(c) $v'_s < 0 : \alpha = -\mu_2$ (負動) (3)

テザーとターゲットが接触した瞬間において $v'_s = \Omega'$ の関係が成り立つので, 接触直後の摩擦状態は以下のように分けられる。

$\Omega' = 0$: 静止, $\Omega' > 0$: 負動, $\Omega' < 0$: 正動

(i), (viii) の場合, テザーとターゲット間の滑り速度が十分大きく, 零にはならないので動摩擦のみが働く。(ii)~(vii) の場合はスティック・スリップによって動摩擦状態と静止摩擦状態間の遷移が行われている。ただし, (iii) ではスティックとスリップが連続して起こるため, 結果的に正の動摩擦状態から負の動摩擦状態へ遷移している。(iv) ではテザーとターゲットが接触した瞬間は滑らないが, ホイールとおもりの質量差があるため接触直後にスリップし動摩擦状態に遷移する。

次に, 区間1~2におけるターゲット角運動量の変化量を $I'\Delta\omega'$ とし, Ω' による変化のグラフを図6に示す。(i), (viii) の場合, 摩擦状態が遷移しないため $I'\Delta\omega'$ は一定値となる。また, (ii)~(vii) の場合は摩

Fig. 5 Friction factor and sliding speed

 Fig. 6 Dependency of $I'\Delta\omega'$ on Ω'

擦状態遷移が起きて、運動が複雑になるため $I'\Delta\omega'$ を一般的に表すことはできないが、以下のような特徴が挙げられる。

(1) $\Omega' = 30.9$ においてターゲットと衝突する物体がおもりからホイールに変わるため $I'\Delta\omega'$ の値は不連続となっている。なお、 Ω' の値によって、ターゲットの回転の変化に違いが生じるのは、テザーとターゲットの間の摩擦を考慮しているためである。

(2) $I'\Delta\omega'$ の値が零になるのは、原点ではなく $\Omega' = -20.9$ である。よって Ω' の値が零に近い場合、摩擦によってターゲットの回転が励起される。

(3) Ω' の単純減少関数ではない。

4. 角運動量変化

ターゲットの初期回転 $|\Omega'|$ が十分大きく動摩擦力のみが働く場合 [3・2 節の (i), (viii)] において、ターゲットの回転角運動量変化量 $I'\Delta\omega'$ とパラメータ $m'_w + m'_o$, L' , h_1 , h_2 , μ_2 との関係について考察する。なお、 e の値はこれらに影響を及ぼさないことに注意する。

4・1 角運動量 システムの質量中心を基準にターゲット、ホイール、おもりの角運動量 P'_t , P'_w , P'_o を定義する。ホイールとおもりの質量がターゲットの質量に比べ十分小さい場合 ($m'_w + m'_o \ll 1$)、システムの質量中心とターゲット中心はほとんど一致する。よって、ターゲットの角運動量 P'_t は回転角運動量 $I'\omega'$ で近似できる。また 3 体の初期角運動量 P'_{t0} , P'_{w0} , P'_{o0} は次のように近似できる。

$$P'_{t0} \approx I'\Omega' \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$P'_{w0} \approx -m'_w Y' U'_w = -(m'_w + m'_o) L' h_1 h_2 U'_w < 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$P'_{o0} \approx m'_o (L' - Y') U'_o = (m'_w + m'_o) L' (1 - h_1) (1 - h_2) U'_o > 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

P'_{t0} , P'_{w0} , P'_{o0} は X' の関数となっていないことに注意

するとテザーがターゲットに接触するまでは、3 体の角運動量は変化しない。よって、以後 $X' = 1$ と設定し接触直前からの運動を考える。

外力が働かないことからこのシステム全体の角運動量は保存される。

$$P'_t + P'_w + P'_o = P'_{t0} + P'_{w0} + P'_{o0} \quad (\text{一定}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、ターゲットとホイール間の張力を T'_1 、ターゲットとおもり間の張力を T'_2 とすると、ターゲットの受けるトルクは $r'_t(T'_2 - T'_1)$ となる。よって回転角運動量の変化量は次のようになる。

$$I'\Delta\omega' = \Delta P'_t - \Delta P'_1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$\Delta P'_1 = \int r'_t T'_1 dt' \geq 0, \quad \Delta P'_2 = \int r'_t T'_2 dt' \geq 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上より、3 体の角運動量は以下のように表される。

$$P'_t \approx I'\omega' = I'\Omega' + (\Delta P'_2 - \Delta P'_1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$P'_w \approx P'_{w0} + \Delta P'_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$P'_o \approx P'_{o0} - \Delta P'_2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

テザーがターゲットに巻き付くと、ホイールとおもりはターゲット中心に巻き込まれる。このとき、張力 T'_1 によって角運動量 $\Delta P'_1$ がターゲットからホイールに、角運動量 $\Delta P'_2$ が張力 T'_2 によっておもりからターゲットに遷移し、2 体の角運動量は零に近づく。ターゲットの半径が無視できる場合 ($r'_t \approx 0 \Leftrightarrow L' \gg 1$)、先に角運動量が零になった物体がターゲットと衝突すると考えられる。よって、衝突時において角運動量遷移量 $\Delta P'_1$, $\Delta P'_2$ は以下のように表される。

ホイールが衝突：

$$\Delta P'_1 \approx -P'_{w0}, \quad \Delta P'_2 < P'_{o0} \quad \dots\dots\dots (13)$$

おもりが衝突：

$$\Delta P'_1 < -P'_{w0}, \quad \Delta P'_2 \approx P'_{o0} \quad \dots\dots\dots (14)$$

4・2 おもりが近づく場合 ($U'_o > 0$) 動摩擦が働かない場合 ($\mu_2 = 0$) はターゲットの初期回転速度 Ω' にかかわらず、ターゲットとホイール間の張力およびターゲットとおもり間の張力が常に等しくなるため ($T'_1 = T'_2$)、ターゲットはトルクを受けない。よって回転角運動量の変化はない。

$$I'\Delta\omega' = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

このとき $\Delta P'_1 = \Delta P'_2$ であり、ホイールとおもりの角運動量が零に近づく速度は等しい。よって、初期角運動量がより小さい物体がターゲットと衝突する。すなわち $|P'_{w0}| > |P'_{o0}|$ のときはおもり、 $|P'_{w0}| < |P'_{o0}|$ のときはホイールがそれぞれ衝突する。

動摩擦力が働く場合については、図 7～9 に数値シミュレーション結果を示す。これらはターゲットの初

Fig. 7 Dependency of $I'\Delta\omega'$ on m'_o Fig. 8 Dependency of $I'\Delta\omega'$ on $(L'-Y')$ Fig. 9 Dependency of $I'\Delta\omega'$ on U'_o

期回転が負の方向に十分大きいとき ($\Omega' = -10\,000$), ターゲットの角運動量変化 $I'\Delta\omega'$ とおもりの初期角運動量の近似 $m'_o(L'-Y')U'_o$ の $\mu_2=0.5, 0.02$ に対するグラフである。ただし、以下の条件を用いた。

図7 横軸: $m'_o = (m'_o + m'_w)(1 - h_1)$

$L' = 100, h_2 = 0.5$ (固定)

$m'_w + m'_o = 0.01, 0.1, 1$

$h_1 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$

図8 横軸: $L' - Y' = L'(1 - h_2)$

$m'_w + m'_o = 0.1, h_1 = 0.5$ (固定)

$L' = 10, 100, 1\,000$

$h_2 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$

図9 横軸: U'_o

$m'_w + m'_o = 0.1, L' = 100, h_1 = 0.5, h_2 = 0.5$ (固定)

(a) 動摩擦係数が大きい場合 ($\mu_2=0.5$) 図7~9より以下の関係式が得られる。

$$I'\Delta\omega' \approx m'_o(L'-Y')U'_o \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 $m'_w + m'_o \ll 1, L' \gg 1$ の近似が成り立たない場合、 $I'\Delta\omega'$ は式(16)右辺の値より小さくなる。また、上記の条件において、いずれもおもりがターゲットと衝突する (Weight Impact)。以上のことは次のように解釈することができる。

T_1, T_2 の関係式 [第1報⁶⁾, 式(19)参照] より μ_2 の値が十分大きい場合、 $T_2/T_1 \gg 1$ (正の動摩擦) もしくは $T_2/T_1 \ll 1$ (負の動摩擦) となる。今の条件 ($\Omega' <$

0) では, 正の動摩擦が働きホイールとターゲット間の張力を無視することができるため, ホイールはほとんどターゲット中心に巻き込まれることはない ($\Delta P'_1 \approx 0$). そして, おもりのみがターゲットに巻き込まれターゲットと衝突する ($\Delta P'_2 \approx P'_{o0}$). よって, ターゲットの回転角運動量の変化量 $I'\Delta\omega'$ は以下ようになる.

$$I'\Delta\omega' \approx P'_{o0} \approx m'_o(L' - Y')U'_o \quad (17)$$

式(17)式において中式と右式の近似は $m'_w + m'_o \ll 1$, 左式と中式の近似は $L' \gg 1$ を前提としている. これらを満たさない場合, ターゲットの並進運動および半径の大きさが無視できなくなり, 式(17)は成り立たなくなる.

同様の議論をすることにより, 負の動摩擦が働く場合 ($\Omega' > 0$) はホイールがターゲットと衝突する (Wheel Impact, $\Delta P'_1 \approx -P'_{w0}$, $\Delta P'_2 \approx 0$) ことを示すことができる. さらに $I'\Delta\omega'$ は以下ようになる.

$$I'\Delta\omega' \approx P'_{w0} \approx -m'_w Y' U'_w \quad (18)$$

(b) 動摩擦が小さい場合 ($\mu_2 = 0.02$) 動摩擦係数 μ_2 が小さいため T'_1 を無視することはできないので $I'\Delta\omega'$ は μ_2 が大きい場合に比べ小さくなるが, 一般におもりがターゲットに衝突することがわかる. しかし式(5), (6)より h_1, h_2 の値が小さくなるか, または U'_o の値が大きくなると, おもりの初期角運動量の大きさ $|P'_o|$ がホイールの初期角運動量の大きさ $|P'_w|$ に比べ十分大きくなる. このとき, ホイールの角運動量

がおもりよりも先に零に達するためホイールがターゲットと衝突する. 負の動摩擦が働く場合についても同様に考えることができる. $\Delta P'_2 \approx 0$ と近似できない分, $I'\Delta\omega'$ は式(18)より大きくなる. さらに $|P'_w|$ が $|P'_o|$ に比べ十分大きくなる場合 (h_1, h_2 が大きいまたは U'_o が小さい) は, ターゲットと先に衝突するのは, ホイールではなくおもりとなる.

また, 図8において L' の値が小さくなると $I'\Delta\omega'$ の値は零に近づいている. これは, ターゲットへのテザーの巻付量が少なくなり, μ_2 を小さくしたのと同様に, $\Delta P'_2/\Delta P'_1$ の値が1に近づいたためと解釈できる. 以上をまとめて図10に示す.

4.3 おもりが遠ざかる場合 ($U'_o \leq 0$) テザーがターゲットに巻き付くための条件は図11のようになる. これは次の2式で表される.

$$h_1 \leq h_{1\max} = 1 - h_2 \quad (19)$$

Fig. 11 Conditions for Tether Winding Target

(iii) if $\mu_2 \rightarrow 0$, $L' \rightarrow 1 \Rightarrow \Delta P'_2/\Delta P'_1 \rightarrow 1$

Fig. 10 Summary of angular momentum transition

(a) $\Omega' = 10\,000$

(b) $\Omega' = -10\,000$

Fig. 12 Dependency of $I'\Delta\omega'$ on u

$$|U_0| \leq U'_{0\max} = \frac{1-h_2}{h_2} \dots\dots\dots (20)$$

式(19)はテザーとターゲットの接点がテザーの回転中心(ホイールとおもりの質量中心)よりも下にある条件, 式(20)は接点を中心としたおもりの角速度がホイールの角速度よりも小さくなる条件を表している。以後 h_1 , U_0 の代わりに以下のパラメータを用いる。

$$h_3 = \frac{h_1}{h_{1\max}} \quad (0 \leq h_3 \leq 1) \dots\dots\dots (21)$$

$$u = \frac{|U_0|}{U'_{0\max}} \quad (0 \leq u \leq 1) \dots\dots\dots (22)$$

$\Omega' = 10\,000$, $-10\,000$ の場合について, u に対するターゲットの回転角運動量変化量 $I'\Delta\omega'$ のグラフを図12に示す。ただし,

$$m'_w + m'_o = 0.1, \quad L' = 100, \quad h_2 = 0.5, \quad h_3 = 0.8 \quad (\text{固定}) \\ \mu_2 = 0.5, \quad 0.02$$

(a) ターゲット初期回転が正の場合 ($\Omega' = 10\,000$)

おもりがターゲットから遠ざかる場合, おもりの角運動量 P'_0 は常に負となるため, おもりがターゲットと衝突することはない。おもりの初期角速度の大きさ $|P'_{00}|$ が小さい場合, テザーがターゲットに巻き付き始めてもすぐに解ける。このときターゲットの回転角運動量の変化 $I'\Delta\omega'$ はほとんどない。一方 $|P'_{00}|$ が大きい場合, テザーの解けることはなくホイールがターゲットと衝突する。本節の条件では, 負の動摩擦力が働くために動摩擦係数 μ_2 が大きいほどおもりの角運動量の遷移 $\Delta P'_2$ が小さくなり, テザーが解けにくくなる ($\mu_2 \rightarrow \infty$ とすると解けなくなる)。さらにターゲットの回転角運動量の変化量 $I'\Delta\omega'$ は P'_{00} とほぼ一致する。

(b) ターゲット初期回転が負の場合 ($\Omega' = -10\,000$)

正の動摩擦力が働くために $I'\Delta\omega'$ の値は正となる。また μ_2 が大きくなるほどテザーはターゲットから解けやすくなる。テザーの最大巻付角 $\theta_{2\max}$ によって次のように二つに分類できる。

(i) $\theta_{2\max} < 90 \text{ deg}$: すぐに解ける

(ii) $\theta_{2\max} \geq 90 \text{ deg}$: 十分巻き付いてから解ける

μ_2 が小さい場合 ($\mu_2 = 0.02$), $\Omega' = 10\,000$ のときとほとんど同じ傾向を示す。すなわち, $|P'_{00}|$ が小さいとテザーはすぐに解け, $|P'_{00}|$ が大きいとホイールがターゲットと衝突する。 μ_2 が大きい場合 ($\mu_2 = 0.5$), μ_2 が小さい場合よりもすぐに解けやすくなる ($\mu_2 \rightarrow \infty$ とするとほとんど巻き付かなくなる)。さらに $|P'_{00}|$ が大きくテザーが十分に巻き付いたとしても, 張力 T'_1 は T'_2 に比べ無視できるほど小さくなるため, ホイールはタ

ーゲットと衝突しにくくなる。よって, 最終的にはテザーがターゲットから解け, $I'\Delta\omega'$ の値を一般的にパラメータで表すことはできない。

5. 結 論

ターゲット, テザーで連結されたおもりとホイールの3体からなるシステムの摩擦と衝撃を伴う運動を数値シミュレーションによって検証した。その結果, 以下の結論を得た。

(1) システムの運動状態の遷移を明らかにした。特に, テザーがたるんだ後の運動状態の遷移ははねかえり係数に依存することを示した。

(2) 張力巻付状態時の摩擦状態の遷移条件をスティック・スリップを考慮することによって明らかにした。また, ターゲットの初期回転が十分大きい場合, 動摩擦力のみが働くことがわかった。

(3) ホイールおよびおもりの質量が十分小さい場合, 張力によって角運動量がおもりからターゲットに, そしてターゲットからホイールに遷移することを示した。ただし, ターゲットの角速度は時計回りを正とする。

(4) 初期におもりがターゲットに近づく場合, ターゲットと衝突する物体およびその条件を示し, ターゲット角運動量の変化量と各パラメータ (Ω' , m'_w , m'_o , L' , h_1 , h_2 , μ_2 , U'_0) との関係式を導いた。

(5) 初期におもりがターゲットから遠ざかる場合, テザーがターゲットから巻き付くための条件, および巻き付いた後の挙動を示した。

以上の解析結果は, テザーが物体に巻き付く摩擦や衝撃を伴うダイナミクスの最も基本的な性質を示しており, これを応用することによって, 非協力衛星の捕獲のためにテザーを巻き付けたり, 浮遊物体の繫留のためにテザーをキャスティングすることが可能となる。さらに, 地上においても投げ縄のようにテザーを操作する作業に対して広く本解析結果を適用することができる。これらの知見をもとにしたターゲット角運動量を減衰させるためのテザー制御方法についての初期検討は別報⁽⁷⁾で報告する。

文 献

- (1) 松永三郎・狼嘉彰・林良一, テザーを利用した浮遊物体捕獲実験のための小型衛星, 電子情報通信学会技報, SANE96-61, 96-326, (1996), 51-56.
- (2) 松永三郎・狼嘉彰・林良一・森治, テザー利用捕獲装置の放出・展開・巻付シミュレーション, 第40回宇宙科学技術連合講演会講演集, (1996), 105-106.
- (3) Misra, A.K. and Modi, V.J., A Survey on the Dynamics and Control of Tethered Satellite Systems,

- Tethers in Space*, 62 (1987), 667-719, Advances in the Astronautical Sciences.
- (4) Beletsky, V. V. and Levin, E. M., *Dynamics of Space Tether Systems*, 83, (1990), 20-33, Advances in the Astronautical Sciences.
- (5) Glocker, C. and Pfeiffer, F., Multiple Impacts with Friction in Rigid Multibody Systems, *Nonlinear Dynamics*, 7 (1995), 471-497.
- (6) 松永三郎・森治・狼嘉彰, 摩擦・衝撃を伴うテザー多体システムの動力学(第1報, 2次元解析モデルと定式化), 機論, **66**-642, C (2000), 447-453.
- (7) 松永三郎・森治・中谷幸司・狼嘉彰, テザーを用いた不具合衛星の角運動量減衰制御, 機論, **66**-643, C (2000), 809-816.
-