テザーシステムのダイナミクスについて*1

吉 村 庄 市*2

Key Words: Tether, Tethered System, Dynamics and Control

1. ま え が き

近年宇宙におけるテザーシステムの可能性については多くの論文が発表されており、関心を呼んでいる。筆者も1984年頃からテザーシステムについて検討を行ってきた。まず、テザー(tether)というやや聞き慣れない用語の意味を辞書、たとえば研究社の新英和大辞典によって調べてみると、名詞として(牛馬などをつないで草を食わせる)つなぎ縄、鎖。また動詞としてそれらによりつなぐ、という意味が掲げている。縄、鎖というとやや太いロープ状の物を連想するが、宇宙において用いられるテザーとしては、大電力の通電を考えない限り、糸もしくは細い紐と考えるのが適当であろう。したがって、宇宙におけるテザーシステムとは、糸もしくは紐およびそれによって繋がれた2個以上の物体から構成されるシステムと考えることができる。

このようなテザーシステムの応用例としては、重力傾度力による姿勢安定、人工重力環境の創出、軌道間輸送、電磁気学的干渉の観測/利用、多数衛星複合体(constellation)等、多数が考えられるが、それらの実現にはそれぞれのシステム全体のダイナミクスを解析することが必要である。

以下にテザーシステムのダイナミクスについて簡単に概観するが、それにはMisra, Modi¹⁾に負うところ

が大きいことを明記しておく。というのも、当該論文はそれまでのテザー研究の歴史と現状、問題点、および今後なされるべき研究領域について簡潔にレビューしており、筆者がテザーシステムの検討に着手するに際しても大いに参考としたからである。

2. テザーシステムの運動の特徴

テザーシステムの運動は、テザーの繰出し、繰出し後の位置保持、最終的なテザーの巻取り、という三つのフェーズに分けることができ、それぞれのフェーズにおけるシステムの挙動および制御が検討の対象となる。しかし、他の宇宙システムと著しく異なった特徴は、テザーに張力が働かない状態、すなわちテザーが緩んだ状態では、テザーはもちろん、テザーで互いに繋がれた母船も副衛星も独立した物体として自由運動を行うことである。テザーがその自然長より伸びていて張力が働いているときに初めて、各物体は張力を介してそれぞれの運動に相互に影響を及ぼし合う。このテザーが緩んだ状態についても検討が必要と考えられる。

テザーシステムの運動を考えるときには、テザーに関しては、

- (1) テザーの剛体としての並進運動
- (2) テザーの剛体としての回転運動
- (3) テザーの横振動
- (4) テザーの長さ方向に沿った縦振動(伸縮)
- (5) テザーの長さ方向まわりの捻り振動

母船、副衛星に関しては、

- (6) 剛体としての並進運動
- (7) 剛体としての姿勢運動

等、きわめて自由度が多く、それらの結果として、システム全体は軌道運動のほかに、軌道面内、面外の回転および振動運動を行う。

3. テザーシステムの力学モデル

3.1 システムのモデリング 第1図に示すような、2物体がテザーで繋がれた基本的なシステムの運

著 者 紹 介

動制御学会会員。

吉村 庄市(正会員)

昭和21年生。富山県出身。昭和44年東京大学工学部航空学科卒業。同年航空宇宙技術研究所入所。現在に至る。主として人工衛星の軌道遷移や姿勢制御の研究に従事。計測自

*1 平成元年1月19日原稿受理 On the Dynamics and Control of the Tethered System in Space

*2 航空宇宙技術研究所宇宙研究グループ Shoichi YOSHIMURA

$$\alpha'' + 3\alpha = Q_\alpha \quad (1a)$$

$$\gamma'' + 4\gamma = Q_\gamma \quad (1b)$$

ただし、 α, γ はそれぞれ軌道面内と軌道面外の回転角、 Q_α と Q_γ は無次元化された一般化力 (空気力モーメント) を示し、 $(\)'$ は真近点離角 θ に関する微分を示す。

軌道面内 (ピッチ) と軌道面外 (ロール) 回転の周期はそれぞれ軌道周期の $\sqrt{3}$ 倍および 2 倍である。この振り子型の運動に重ね合される高周波振動は、比較的振幅が小さく、したがって全体としてのテザー形状は直線からあまりふれない。しかし、傾斜角をもった軌道では、前述のように空力トルクにより軌道面外つまりロール運動が励起されうる。

筆者ら⁹⁾は、簡単なモデル (母船、副衛星ともに質点、テザーは質量無しバネ) で、重力場については J_2 項まで考慮、空気力は無視し、テザー繰出し長さも 100 m と短い場合について、

$$T = -k(L - L_0) - c\dot{L} \quad (2)$$

ただし、 L_0 はテザーのノミナル長さ、 $L, \dot{L}$ はテザー長さおよびその時間変化率、 k, c は係数なる張力制御を行って、軌道面内、軌道面外の運動とも長時間にわたって安定であることを示した。

一般的に、位置保持制御には、張力制御や長さ変化率制御などが必要と考えられる。

4.2 テザーのノミナル長さが変化する場合 副衛星の繰出しや巻取り時に相当するが、運動方程式は時変定数をもつ。一定長さの場合と同じ仮定の下で、軌道面内および面外の回転運動は次のように記述される⁷⁾

$$\alpha'' + 2(L'/L)(\alpha' + 1) + 3\alpha = Q_\alpha \quad (3a)$$

$$\gamma'' + 2(L'/L)\gamma' + 4\gamma = Q_\gamma \quad (3b)$$

(3)式と(1)式を比べると、 L'/L に比例する項が加わっている。長さが増加している繰出し時なら、 L'/L は正であり、(3)式には正減衰項 (positive damping term) があることになり、他方、長さが減少している巻取り時には L'/L は負であるから、負減衰項 (negative damping term) があることになる。したがって、繰出しは回転運動を安定化させる傾向があり、巻取りは逆に回転運動を不安定化させることが、定性的に言える。

4.2.1 繰出し (Deployment) 繰出しには、何らかの力を副衛星に与える必要があり、バネによる押出しや小型のスラスト等が考えられる。繰出しのストラテジとしては、テザーを母船から出して自由に漂うに任せた後に、副衛星を何らかの方法で放出しテザーが伸び切るまで自由飛行をさせ、以後は十分にエネルギーが消散してしまうまで、伸びと縮みを繰り返させると

いう受動的な方法⁹⁾も提案されているが、以下に示すようにテザーの張力制御等の能動制御を行うのが通常であると考えられ¹⁰⁾、八坂¹¹⁾の研究もある。

$$T = K_1 L + C_1 \dot{L} + K_2 L_c \quad (4)$$

ただし、 L_c はコマンド長さ、 K_1, K_2, C_1 は係数である。 L_c は最終の長さが達成されるまで段階的に変えられる。Rupp¹⁰⁾は、 Ω を軌道角速度、 m_s を副衛星の質量とすると、 $K_2 = K_1 - 3m_s\Omega^2$ 、 $K_1 = 6m_s\Omega^2$ または $7m_s\Omega^2$ 、 C_1 は縦方向の伸び振動を臨界減衰させるように選び、繰出しおよび巻取りの数値シミュレーションで、効果的に軌道面内運動を減衰させた。

4.2.2 巻取り (Retrieval) 巻取りは、次式に示すようにコマンド長さ L_c を時間 (または真近点離角 θ) とともに減少するように与えることで実施できる。

$$\dot{L}_c = cL_c, \quad c < 0 \quad (5)$$

前述のように、巻取り時は本質的に不安定であり、振動運動はもちろん回転運動についても張力制御や $\dot{L}$ を制御する長さ変化率制御則等の能動制御が必要である。しかし、これらの制御則は軌道面外運動に対しては効果的ではなく、たとえば次式に示すような非線形張力制御則¹²⁾

$$T = T_0 + K_l l + K_v l' + K_r \gamma^2 \quad (6)$$

ただし、 $l = L_c/L - 1$

が検討されている。

その他、テザー長さが短くなる巻取りの最終段階では張力がきわめて小さくなり、縦振動のためにゼロになることさえありうるので、張力制御は困難となる。この問題を解決するためには、テザーの長さ方向に沿ったスラストを取り付けて重力傾度力によるテザー張力を補強したり、テザーの横方向に力を発生できるスラストを取り付けて、巻取り過程の安定化と迅速化を図るという提案もある¹³⁾。

4.3 テザーが緩んだ後の挙動 2章で述べたように、緩んだ状態のテザー (いわゆる slack 状態) はもはや力を伝達せず、その両端に繋がれた 2 物体はその後再びテザーがノミナル長さを回復するまで互いに自由に運動し、母船と副衛星との衝突のおそれもある。この問題を取り扱っている例は比較的少ないが、たとえば、Gullhorn¹⁴⁾はテザー切断 (tether break) や巻取り機構の不具合 (reel jam) によって張力がゼロとなった状態 (de-tensioned) での挙動をシミュレートできる "SLACK 3" と名づけたプログラムを開発している。テザーは質点要素によって離散化されており、スラスト噴射も可能など、かなり複雑なモデルを用いている。一方、筆者ら^{15,16)}は 4.1 節で述べたのと同じ簡単なモデルを用い、テザー長さ (系のモデルから、母船と副衛星との相対距離) の時間変化率の初期値に + (伸

び) または - (縮み) の値を与えて人工的に緩み現象を起こして, slack 後の 2 物体の挙動について若干の検討を行った。それにより, 2 物体の相対距離の履歴はテザーのバネ係数の値によって大きく異なるけれども, 緩んだ後直ちに衝突に至るのではなく, 緊急時のテザー切断やスラスト噴射などの操作の余裕がありうるという結果を得た。しかし, “SLACK 3” のようなより精密なモデルによる, さまざまな初期条件での挙動についての詳細な検討が必要なのはいうまでもない。

5. 数値シミュレーションの問題点

これまで述べてきたように, デザーステムのモデリングにはさまざまな考慮が必要である。それが決定しプログラミングも終了し, 数値シミュレーションを実施する際の大きな問題の一つは, 所要計算時間が一般的に長いことである。それに関しては, “computer time to real time greater than one” の表現がされるくらいである¹⁷⁾。これは, 一つには軌道運動とそれ以外の回転および振動運動の周期が大きく異なること, もう一つはさらに, テザーシステムがいわゆる ‘stiff’ system であって, 連成している回転運動と振動運動の時定数が大きく異なっていることによる。前者については, 回転および振動運動の軌道運動への影響はほぼ無視しうるとして軌道運動は別に独立に計算する方法が採られるのが普通である⁷⁾。後者については, テザー長さが短いときにとりわけ深刻であり, 対策を立てるのがより困難である。この問題を解決するためには, 高速のアルゴリズムを開発したり, 複数の時間スケールを含んだ摂動法を使う必要があるかもしれないとの示唆がある¹⁾。

6. テザーシステムの運動の地上実験

テザーシステムの挙動の, 地上での実験的シミュレーションはきわめて困難であり, 報告例は少ない。わずかな例を挙げると, Austin と Bauer¹⁸⁾ は, 重力の影響を消去するためのモデル吊下げシステムを考案し, 宇宙基地と平衡錘をケーブル (テザー) で結んで回転させる人工重力発生用システムの実験を行い, ピッチ, ロール, ヨーの振動数を計測した。実測および計算された振動数の間の一致はきわめて良好であったと報告されている。ほかに, テザー長さが変化する場合には, Fujii, Tashiro¹⁹⁾ の, テザーを繰り出す衛星の運動をシミュレートした例が 1 件報告されている。

最近ではこのほかに, NASA Ames Research Center が中心になって研究を進めている KITE (Kinetic Isolation Tether Experiment) の例がある²⁰⁾。これ

(a) KITE システム地上実験装置概観

(b) 重力傾度力を模擬する方法

第2図 テザーシステムの地上実験の一例²⁰⁾

は, テザーの一端に副衛星を, 他端には母船を繋ぐのであるが, 母船へのテザーの結合点をその質量中心からずらして張力によるトルクを発生させ, かつ質量中心からの距離を制御することで母船の姿勢制御を行おうとするシステムである。第2図に示すように, 母船モデルを自己搭載のガスによって平滑なテーブル上に浮上させ (並進 2, 回転 1 自由度), テザーの他端は壁に固定されている。テーブルは水平面からわずかに傾けられ (傾斜角 $\mu \approx 2$ arc-minutes で, テザーを約 2 km 繰り出した場合に相当), 重力傾度によってテザーに働く張力を模擬している。

7. あとがき

テザーシステムのダイナミクスについて簡単に概観した。テザーシステムの応用範囲はきわめて広く, それぞれのシステムに見合った力学モデルが考えられよう。しかし, 地上での挙動の実験がきわめて困難である以上, 開発につなげるためには, 今後膨大な数値シミュレーションの必要があることはもちろん, 宇宙での実験が不可欠である。

テザーシステムの挙動の宇宙空間での本格的実験の予定としては, SEDS (Small Expendable-tether Deployment System) の例が挙げられる²¹⁾。これは, NASA Marshall Space Flight Center が中心となって 1985 年から開発が進められているテザー使いすて

式 (最長 20 km のテザーは巻き戻さない) 小型繰出しシステムであって、1992~95 年にデルタロケット 2 段目のピギーバック衛星として打上げ予定とのことであるが²²⁾、昨年 9 月に筆者が訪問する機会があった当該研究所での担当者のお話では、1990 年予定とのことであった。アメリカ-イタリア共同開発の TSS (Tethered Satellite System) の宇宙実験は 1991 年とのことであり²³⁾、SEDS の実験が TSS に先駆けて行われることになる。当該実験では、テレビカメラも搭載されるとのこと、宇宙空間でのテザーの挙動を映像で詳細に観察できるものと考えられる。我が国においても近い将来に宇宙での実験が実現することを望んで止まない。

最後に、本稿執筆の機会を与えてくださった関係者各位に謝意を表したい。

参考文献

- Misra, A. K. and Modi, V. J.: Dynamics and Control of Tether Connected Two-Body Systems—A Brief Review, IAF Paper 82-315 (1982).
- 狼 嘉彰ほか: 柔軟宇宙構造物ダイナミクスの定式化について, 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-4 (1985).
- Venditti, F.: TSS Subsatellite Attitude Dynamics and Control Laws Verification Programs, Tether Dynamics Simulation, NASA CP-2458 (1987), pp. 187-218.
- 渡辺直行, 小野田淳次郎: 大気密度傾斜に因るテザード副衛星の不安定運動とその制御, 第 31 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (1987).
- 佐藤親俊, 柚原直弘: テザード衛星のステーションキーピング時の安定について, 第 31 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (1987).
- Jacchia, L. G.: SAO Special Report 332 (1971).
- Modi, V. J. and Misra, A. K.: Deployment Dynamics and Control of Tethered Satellite Systems, AIAA-78-1398 (1978).
- 吉村庄市, 岡本 修: テザード・ペイロードの挙動について—長時間シミュレーション, 第 32 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (1988).
- Kane, T. R. and Levinson, D. A.: Deployment of a Cable-Supported Payload from an Orbiting Spacecraft, J. Spacecraft Rockets, 14 (1977), pp. 409-413.
- Rupp, C. C.: A Tether Tension Control Law for Tethered Subsatellites Deployed Along Local Vertical, NASA TMX-64963 (1975).
- 八坂哲雄: テザー伸展のダイナミクス, 第 32 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (1988).
- Modi, V. J. et al.: On the Control of the Space Shuttle Based Tethered Systems, 32nd Congress of IAF, Sept. (1981).
- Banerjee, A. K. and Kane, T. R.: Tethered Satellite Retrieval with Thruster Augmented Control, AIAA-82-1421 (1982).
- Gullahorn, G. E.: SLACK3, Tether Dynamics Simulation, NASA CP-2458 (1987), pp. 125-139.
- 吉村庄市, 岡本 修, 山中龍夫: 微小重力環境を実現する為のペイロード・テザー系の運動について, 第 30 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (1986).
- 吉村庄市, 岡本 修, 山中龍夫: テザー技術の応用による微小重力環境の保持, 航空宇宙技術研究所昭和 63 年度研究発表会前刷集 (1988).
- Galaboff, Z. J.: Validation of TSS Engineering Simulation, Tether Dynamics Simulation, NASA CP-2458 (1987), pp. 219-233.
- Austin, F. and Bauer, E.: Scaled Dynamic Model of a Free Rotating Cable-Connected Space Station, J. Spacecraft Rockets, 7 (1970), pp. 1272-1274.
- Fujii, H. and Tashiro, S.: On Dynamics of Satellite Deploying a Tether, 10th IMACS World Congress, Montreal, Canada, Aug. (1982).
- Powell, J. D. et al.: Annual Report Kinetic Isolation Tether Experiment, submitted to NASA Ames Research Center by Guidance and Control Laboratory, Stanford University, Feb. (1988).
- Carroll, J. A. and Alexander, C. M.: The Small Expendable-tether Deployment System, Final Report on NASA SBIR to NASA Marshall Space Flight Center, Dec. (1987).
- Harris, L. A.: Comments on the "Early Experiment Validation" Session of the Second International Conference on Tethers in Space, AIAA-88-0535 (1988).
- Harrison, J. K.: Tethers in Space: A Broad Perspective, AIAA-88-0530 (1988).