

B08 超大型宇宙構造物における結合機構に関する考察

石村 康生 (早稲田大学)

Kosei Ishimura (Waseda. Univ.)

1. はじめに

現在, 宇宙空間における最大の人工物は, 国際宇宙ステーションであり, 全長 100m を超える. このような長大な構造物を一度の打ち上げで構築することは難しく, 複数回に分けて打ち上げ, 軌道上で組み立てる必要がある. また, 組立においては, 構造物同士の結合機構が必要となる.

これに関連して, モジュール構造物の結合による超大型宇宙構造物の構築法が提案されている^[1-7]. しかしながら, シミュレーションによるものと比べて, 実際のハードウェアに関するものは非常に少ない^[3-7]. 一方で, ロボットの分野においては, 再構成可能モジュールロボットという枠組みで様々なハードウェアに対する研究がある^[8,9]. しかしながら, 結合機構に対する要求は明確でなく, 個々の事例の提示が多い. サーベイ論文でも, ジェンダーの有無や結合力による分類とそれに付随した利点・欠点の提示にとどまっている. そこで, 本研究では, 結合機構に要求される機能を整理し, 定義することを目的とする.

2. Aerospace Mechanisms Symposium の分析

2.1 AMS における Docking/Latch の研究開発傾向

まず, 宇宙構造物における結合機構のサーベイとして, NASA 主催の Aerospace Mechanisms Symposium (AMS) の 1966 年の初回から 2018 年の 44 回までの文献調査を実施した. 同様の学会としては, European Space Mechanisms & Tribology Symposium などがあるが, ここでは AMS のみを対象とした.

その結果, 結合機構関連の論文として, Latches/Clamps /Docking に関する論文が 58 篇, そのうち, Docking/Berthing 関連が 25 篇, Assembly 関連が 8 篇, HRM や展開構造物のラッチが 19 篇あった. 1 年あたりの論文数の変遷を図 1 に示す.

Apollo/Soyuz から International Space Stations (ISS) に移行する 1970-80 年代に初めの山があり, 2000 年代に ISS のまとめやデブリ除去衛星のドッキングなどの論文で論文数が再度増加している. 結合に関する論文のほとんどは ISS 関連であり, そのほかの結合機構を扱ったものは非常に少なかった. ISS に関係する結合は, Lab と呼ばれる居住・実験モジュールの結合と, トラスを Lab に組付ける結合, トラス同士の結合の 3 種類に大別される (図 2)^[10,11]. Lab の結合は, 内圧容器の結合という点や, 結合後の通路の確保が必要という特殊性が存在する. また各種改良を経ているものの, Apollo 時代のドッキング機構からの設計コンセプトがベースとなっている. 後者の 2 つは, アライメントガイドや, キャプチャラッチなどの要素技術は共通のものが使われている. 次節では, これらの結合機構の設計要求についてまとめる.

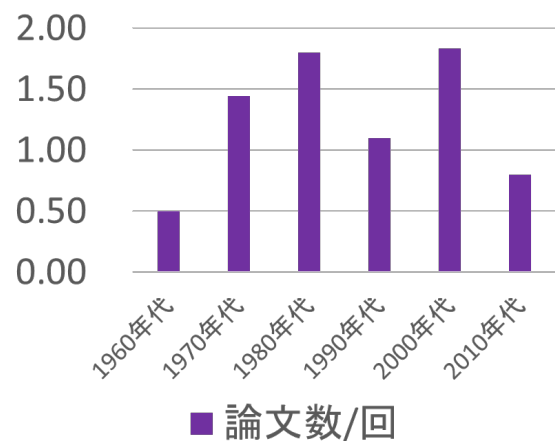
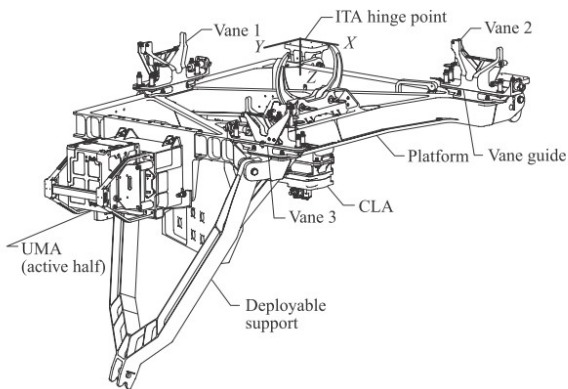


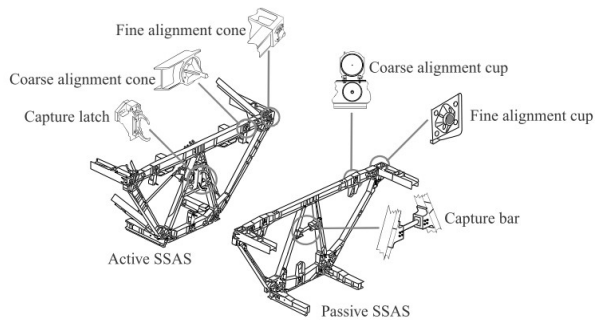
図 1 結合(ドッキング・ラッチ)関連の論文数の変遷



(a) Docking Mechanism^[10]



(b) Payload Attachment System^[11]



(c) Segment-to-Segment Attachment Systems^[11]

図 2 ISS における代表的な結合機構

2.2 結合機構における留意事項

NASA において、Docking と Berthing は明確に区別されている。Docking は、“誘導制御システムによって、チェイサーをターゲットのドッキングインターフェースの要求範囲内の状態に制御すること”と定義されており、Berthing は、“誘導制御システムが、理想的には相対速度・角速度をゼロにして、チェイサーを所定の位置・姿勢に制御する。その後、マニピュレータ（マニピュレータの搭載位置は、チェイサーおよびターゲットのどちらかに特定しない）が保持し、最終位

置まで移行する。”という一連の動作として定義されている。大きな差異は、マニピュレータという構造的なもので結合されるフェーズを経るかどうかである。

宇宙空間は無重力と言われるが、実際には、重力傾斜力が存在する。そのため、チェイサーとの相対速度を 0 に保つためには、特殊な配位を除き、微小ではあるが力を必要とする。よって、Docking においてはチェイサーとの相対速度を 0 とするためには、常時制御が必要であり、燃料リソースを必要とする。一方で、Berthing においては、マニピュレータで捕獲した後は、チェイサーとの相対速度を 0 に保つことに燃料リソースを必要としない。よって、最終的なチェイサーの位置制御では、Docking と比して Berthing では時間的な制約がゆるく、準静的な動作が可能となる。

一方で、Berthing においては、チェイサーの位置制御の前段階として、マニピュレータによるチェイサーの捕獲という操作がある。そのため、そのタイミングにおいて相対位置・速度制御が必要であることは Docking と同様である。しかし、マニピュレータによる捕獲は、操作する慣性がチェイサーと比べて小さく、マニピュレータが十分な自由度を有する場合は、簡単かつ安全性にすぐれていると考えられる。

上記をまとめると、Berthing は、マニピュレータという一般的にはチェイサーよりも慣性が小さくかつ多機能な機構を用いることで、Docking とくらべてより簡単かつ信頼性が高いと考えられる。ただし、システムの複雑さや結合手順の増加というデメリットが存在する。

2.3 結合機構における機能要求

過去の開発事例をもとに、結合において実際に必要な機能要求をまとめると、(1) 結合する 2 物体の配置、(2) 結合、(3) 結合状態の維持、(4) 分離 の 4 つに分けられる。それぞれの機能に対する詳細なパラメータを表 1 にまとめる。Docking や Berthing は機能要求における(1)の配置フェーズの差異と考えられる。

Docking と Berthing によって若干の差異はあるものの、典型的な結合操作(表 1 の(1),(2))のイメージを図 3 にまとめる。捕獲では、まず許容初期相対位置

誤差および許容初期相対姿勢誤差, 許容初期速度/許容初期角速度の状態(捕獲領域)になったことを確認する. その後, 捕獲シーケンスに移行し, 捕獲を開始する. 初期運動量・角運動量を減衰させる段階(減衰領域)を経た後, 結合に向けて位置・姿勢を調整する(アライメント領域). その後, 結合シーケンスに移行し, 半恒久的な結合(結合力・剛性の維持)を遂行する. 上記の操作中において, 異常が発生した時に, 停止・逆行可能な機能を要求とするかは, 検討が必要である. 更に, これらの操作は, 自律遂行, 宇宙飛行士によるマニュアル操作, 自律遂行を基本とするがオプションとしてのマニュアル操作(冗長)などのバリエーションが存在することに留意が必要である.

表 1 結合機構における機能要求(カッコ内は関連性能)

(1) 配置	<p>捕獲可能な許容初期相対位置誤差/許容初期相対姿勢誤差, 許容初期速度/許容初期角速度の状態になったことを確認できること.</p> <p>機器を破損せずに捕獲できること(必要動作時間, 必要エネルギー, 許容発生衝撃, 動的/準静的, 信頼性)</p> <p>捕獲後に相対位置/相対姿勢を制御できること(必要動作時間, 必要エネルギー, 信頼性)</p>
(2) 結合	<p>配置後, 所定の結合力・モーメントで結合できること(必要動作時間, 必要エネルギー, 信頼性, 動的/準静的)</p>
(3) 結合状態の維持	<p>結合後, 所定の結合力・モーメントによる結合状態を維持できること(必要エネルギー, 信頼性)</p> <p>結合後, 所定の剛性を維持できること(必要エネルギー, 信頼性)</p> <p>結合後, 所定の荷重に対して破損しないこと</p>
(4) 分離	<p>結合後, 結合中に分離できること(必要動作時間, 必要エネルギー, 信頼性, 動的/準静的, 分離後の位置/姿勢/速度/角速度)</p>

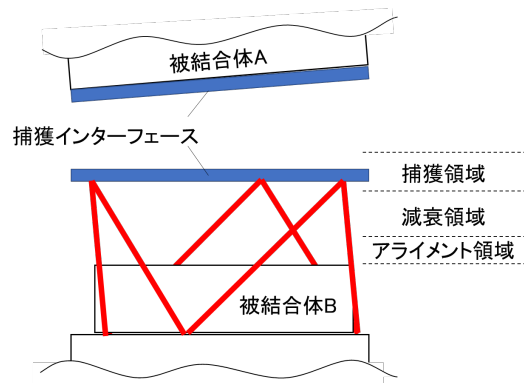


図 3 結合操作

2.4 結合機構における数値要求

結合機構において要求される許容初期相対位置誤差および許容初期相対姿勢誤差, 許容初期速度/許容初期角速度の例を表 2 に示す. Docking/Berthing の差異やチェイサーの質量, サイズでこれらの値は変わるものの, AMS で発表された結合機能の要求においては, 概ねこの程度の値となっていることが多い. この数値の下限は動作時間の制約や制御精度から決まり, 上限は現実的なスケールで吸収可能な運動量などから決まっていると考えられる.

表 2 許容初期相対位置・姿勢・速度・角速度 [12]

	MIR APAS	Freedom Berthing	Hermes Docking
横方向誤差[m]	0.2	0.08	0.05
Roll 角誤差 [deg]	4	1.5	1.5
Yaw/Pitch 角誤差 [deg]	4	1.5	1.5
軸方向速度 [m/s]	0.05-0.15	0.049	0.03
横方向速度 [m/s]	0.01-0.04	0.046	0.02
Roll 角速度 [deg/s]	0.4	0.52	0.2
Yaw/Pitch 角速度 [deg/s]	0.4	0.20	0.2

上記以外の主要な数値要求には, 剛性要求, 強度要求などが挙げられる. 剛性要求は通常, 姿勢・軌道制御系との干渉回避や許容変位から導出される. しかしながら, 超大型宇宙構造物の場合は, 姿勢・軌道制御系が膨大な分散アクチュエータから構成され,

従来の制御とは異なると予想される。そこで、剛性要求の導出においては、従来手法の直接的な適用が困難であることに留意されたい。また、強度要求としては、結合時の発生荷重、重力傾斜力、太陽輻射圧などの荷重条件に加えて、熱応力についても留意することが重要である。

3. 超大型構造物同士の結合における課題

前節では、AMS で公表された研究を中心に宇宙構造物の結合についてまとめた。しかしながら、これらの結合における被結合構造物は、Orbiter や展開前の SAP など、比較的剛な構造であった。また、結合インターフェースは被結合構造物の極めて狭い局所に限定され、結合後の構造は閉ループを含まない樹状構造である(図4)。これに対して、図5に示すような太陽発電衛星の例では、展開後の柔構造(一辺 100m オーダーのパネル)の複数辺を隣接構造と結合するといったことが想定されている。また、本システムでは、結合後の構造に多重の閉ループが含まれる。樹状構造よりも、このような多重の閉ループを含む構造のほうが、構造全体の剛性は上がることが期待される。しかしながら、不静定次数が高いため、結合部のミスアライメントによって大きな内部応力が発生することが予想される。

以上のことから、超大型構造物の結合においては、前節の表 1 の要求に加えて、(1)“柔構造”の移動・配置、(2)複数分散箇所での結合、(3)ミスアライメントに依存する内部応力の緩和といった課題を考慮する必要がある。

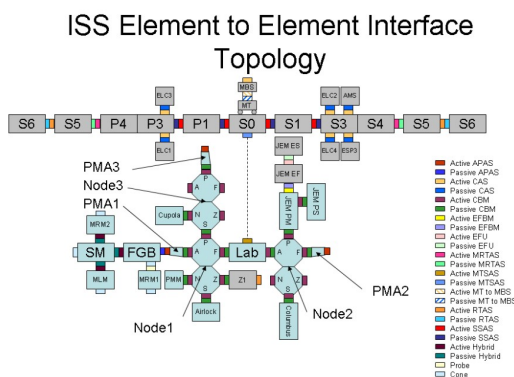


図4 ISS のトポロジー^[13]

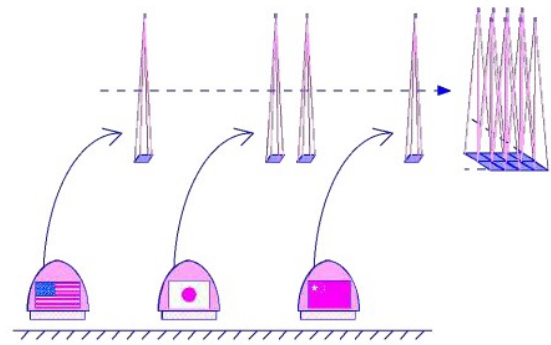


図5 分散型マルチテザーSPS の構築^[14]

4. まとめ

本論文では、過去の研究を元に結合機構に要求される機能を整理し、定義した。主要な機能は、配置、結合、結合維持、分離であるが、それぞれにおける設計されるべき各種性能を明らかにした。さらに、今後必要とされる超大型構造物の結合における新たな課題を提示した。

謝辞

本研究は、科研費 基盤(A) 18H03817 大型ゴッサマー宇宙構造物システムの構築理論と実現シナリオの探求、代表 宮崎康行(日大)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ukegawa, K. and Natori, M.C., "Self-Assembly of Hierarchical Modular Structure Systems," 16th Int'l. Conf. Adaptive Structures and Technologies (ICAST), 2005, pp. 86-93.
- [2] M. Nisser, D. Izzo, A. Borggraeffe, "An Electromagnetically Actuated, Self-Reconfigurable Space Structure," 2017-c-19, 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2017.
- [3] 請川, 岸本, 樋口, 名取, "モジュール型宇宙構造物の自己組立システムにおけるハードウェアデザイン," 第 51 宇宙科学技術連合講演会, 2007.
- [4] 山崎, 長澤, 山田, 奥野, 山川, 名取, "宇宙構造物シス

テムの分散型自動構築,” 第 58 宇宙科学技術連合講演会,
2014.

[5] Natori, M.C., Nagasawa, M., Yamada, J., Okuno, A., Yamakawa, H., Higuchi, K., and Kishimoto, N., “A Basic Construction Concept for Space Structure Systems Using Active Connecting Elements,” 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum, AIAA 2015-0683.

[6] 石村, 渡邊, 伊藤, 武井, 名取, “モジュール構造物の組立機構に関する検討,” 機械学会年次大会, 2018.

[7] A. Ekblaw, E. Shuter, J. Paradiso, “Self-Assembling Space Architecture: Tessellated shell structures for space habitats,” AIAA SciTech Forum, 2019.

[8] A. Brunete, A. Ranganath, S. Segovia, J. P. Frutos, M. Hernando, E. Gambao, “Current trends in reconfigurable modular robots design,” International Journal of Advanced Robotic Systems, May-June 2017.

[9] W. Saab, P. Racioppo, P. Ben-Tzvi, “A review of coupling mechanism designs for modular robots,” Robotica Vol.37, 2019, pp.378-403.

[10] Justin McFatter Karl Keiser, Timothy Rupp, "NASA Docking System Block 1: NASA's New Direct Electric Docking System Supporting ISS and Future Human Space Exploration," 44th Aerospace Mechanisms Symposium, 2018.

[11] International Space Station Evolution Data Book Revision A, NASA SP-2000-6109, 2000.

[12] J. J. Gonzalez-Vallejo, W. Fehse, A. Tobias, “A Multipurpose Model of Hermes-Columbus Docking Mechanism,” 26th Aerospace Mechanisms Symposium, 1992.

[13] J. Cook, V. Aksamentov, T. Hoffman, W. Bruner, “ISS Interface Mechanisms and their Heritage,” AIAA Space 2011 Conference & Exposition, AIAA 2011-7150.

[14] 佐々木, 田中, “新しいタイプのテザーSPS の検討,” 第 8 回 SPS シンポジウム, 2005.