

## デジタル変革(DX)と宇宙領域での軍事活動

防衛研究所主任研究官 福島 康仁<sup>1</sup>

### はじめに

新型コロナウイルスの感染拡大により経済・社会活動は多くの面で停滞を余儀なくされている。そうした中、逆に進展をみせ始めているのが企業や行政によるデジタル変革(DX)への取り組みである。DXは先端的なデジタル技術の単なる活用を意味するのではなく、そうした技術の活用を通じて組織の体制や文化、活動のあり方が変容することを指す。DXに取り組む目的は、例えば企業の場合は競争上の優位性を作り出すことにある<sup>i</sup>。さらに個々の組織によるDXはやがて社会全体の変革をもたらすと考えられており、日本では「Society 5.0」を実現する原動力になると期待されている<sup>ii</sup>。

現状、DXという言葉の使用は経済界とその関係省庁が中心である。だが、宇宙利用や軍事活動も社会的営みの一部であることを考えれば、DXによる社会変革の波が宇宙領域での軍事活動にも及ぶ可能性は否定できない。すでに宇宙利用の分野では情報通信技術の活用を通じてイノベーションをもたらそうとする動きがある<sup>iii</sup>。軍事分野では軍民両用技術に注目が集まっており、とりわけ民生技術の軍事転用が顕著になっている。こうした中、例えば米宇宙軍(USSF)はDXという概念を明確に意識しながら、イノベーションの加速を目的として「デジタルな軍隊」の構築を進めている<sup>iv</sup>。

このような状況を念頭に置くと、今後、宇宙の軍事利用について考察する際は、DXが与える影響を考慮していく必要がある。すなわち、主として民間企業により生み出される先端的なデジタル技術やサービスを各国の軍隊がどのように宇宙領域で活用しようとしているのか、また、そうした活用を通じて軍事組織の体制や文化、活動のあり方にどのような変容が起き得るのかに目を向ける必要がある。

もっとも、ある取り組みがデジタル化にとどまるのか、それともDXへと発展し組織の体制や文化、活動のあり方にまで変容をもたらすのかは、実際に変革が起きた後でなければ判断できない。この点、軍事宇宙活動における先端的なデジタル技術の活用は構想や研究・開発、実証試験の段階にとどまっているものが多い。

そのため本稿では軍事組織による宇宙領域での先端的なデジタル技術の活用事例(主に米国の取り組み)に着目し、それらがDXへと発展した場合の意義を予備的に考察する。あわせて、DXに向けた取り組みがもたらし得る余波について考える。

<sup>1</sup> 本稿の見解は個人的なものであり、所属する組織を代表するものではありません。

## 1. 先端的なデジタル技術の活用事例

### 1-1. モノのインターネット(IoT)

宇宙領域での軍事活動において活用が始まっている先端的なデジタル技術の1つがIoTである。民間では、多数同時接続を可能とする5Gの普及と相まって、自動車や家電、製造機械などのインターネット接続が大幅に拡大すると見込まれている。米国防省はIoTに関して「我々の周囲で実用化されているにもかかわらず、軍では未だに実現していない」(ローパー空軍次官補[取得・技術・兵站担当][当時])との問題意識に基づき、軍事に関するモノのインターネット(IoMT)の構築を進めている<sup>v</sup>。

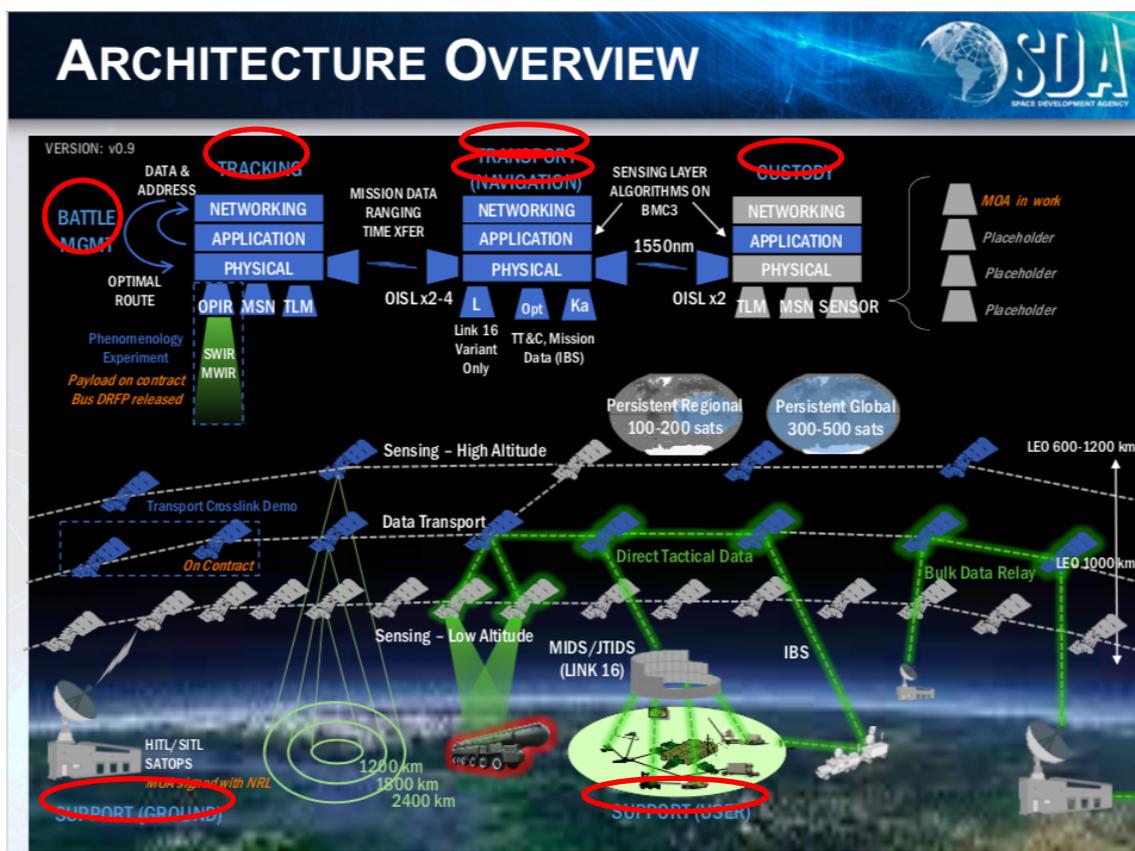
具体的には統合全領域指揮統制(JADC2)と呼ばれるIoMTの整備である。JADC2は文字通り、あらゆる軍種(陸軍、海軍、海兵隊、空軍、USSF、沿岸警備隊)と領域(陸、海、空、宇宙、サイバー)をまたいだ指揮統制を意味する。その実現のために米国防省は各種のセンサーや兵器プラットフォーム、指揮統制システムの間でデータの迅速な伝達を可能にする方法を模索している。

JADC2には宇宙領域が含まれていることから分かる通り、衛星を用いたIoTという側面がある。例えば米空軍はJADC2の中核となる先進戦闘管理システム(ABMS)の宇宙要素として商用衛星通信を活用する方針である。衛星通信サービスを提供する企業の候補としてはSESガバメントソリューションズ社とスペースX社が選定されている<sup>vi</sup>。注目すべきは、老舗のSESガバメントソリューションズ社に加えて、スペースX社が選ばれたことである。スペースX社は低軌道上で大規模な衛星群(メガコンステレーション)を編成し、スターリンクと呼ばれる高速かつ低遅延のインターネットサービスを提供する計画である。実現すれば、衛星通信業界とインターネット業界に新たな潮流をもたらす事業である。

米空軍がスターリンクの利用を検討していることは、民間によるイノベーションを活用する動きである。スペースX社は2020年末までに1000機近い衛星をスターリンク用に打上げており、同年中に米国やカナダでの試験的なサービスを開始した。2021年も衛星の打上げを続け、世界各地の人口密集地域でのサービスを始める予定である。スターリンクの構築が順調に進めば、米国防省がIoMTの一部として利用する基盤が整うことになる。

商用衛星通信に加えて、国防省宇宙開発局(SDA)が構想する国防宇宙アーキテクチャ(NDSA)の運搬層(Transport Layer)も、JADC2の宇宙要素として機能する予定である。SDAは研究・工学担当の国防次官室の下に2019年に設置された新しい組織であり、民間で進むイノベーションを国防省の宇宙利用に取り込むことを使命としている<sup>vii</sup>。SDAはNDSAとして7つの層(運搬、戦闘管理、追尾、監督、抑止、航法、支援)を構想しているが、当面は抑止層を除く6層の整備を優先している(下図参照)。

図：国防宇宙アーキテクチャ構想(抑止層を除く)<sup>viii</sup>



注：赤枠は筆者挿入。

このうち運搬層の役割はデータを運ぶことにある。運搬層は、高帯域かつ低遅延の戦術データリンクを提供する通信衛星群であり、リンク 16 などにより F-35 戦闘機や PAC-3 地対空誘導弾といった各種のアセットに直接接続する計画である<sup>ix</sup>。2020 年、エスパー国防長官(当時)は全軍種が JADC2 への接続に運搬層を利用するように指示した<sup>x</sup>。SDA は 2026 年までに数百機の衛星を打上げて、米軍が全世界で運搬層を使用できるようにする予定である<sup>xi</sup>。

それでは衛星を用いた IoT、すなわち JADC2 の導入が DX へと発展した場合、どのような優位性が米国防省にもたらされる可能性があるのか。まず留意しなければならないのは、JADC2 には「全領域」という言葉が含まれている通り、宇宙領域単独ではなく他領域と一体となって機能することが想定されていることである。見方を変えれば、「全領域」という言葉が示しているのは宇宙領域が他の領域と同等に JADC2 の不可欠な構成要素として位置付けられているということである。衛星通信は見通し線外とのデータ共有を可能とするものであり、かつ地上の通信インフラが整っていない場所での通信や移動体(車両や航空機、艦艇など)による通信にも利用可能であることから、JADC2 において不可欠な役割を果たすことになる。

具体的に JADC2 が米国防省にもたらし得る優位性としては下記が挙げられる。最も重要な

点として、米国防省は JADC2 により、戦略的競争相手と位置付ける中露に対して意思決定における優勢 (decision superiority) を獲得できると期待している<sup>xii</sup>。このことは実際の戦闘において、ターゲットの探知から攻撃、戦果の評価にいたるキルチェーンを敵よりも早く回転させられることを意味する。

さらに、NDSA 構想の運搬層が整備されれば、極超音速を含むミサイルへの対処能力も向上することになる。これは、同じ NDSA 構想の追尾層 (Tracking Layer) が運搬層との連携を前提としているためである。追尾層は赤外線センサによりミサイル発射の兆候察知・警戒・追尾・照準を担う衛星群である<sup>xiii</sup>。追尾層が収集したデータは、運搬層を介して兵器プラットフォームに伝達されミサイル迎撃が行われる。換言すれば、追尾層とあわせて運搬層の整備が順調に進めば、戦略的競争相手に対してミサイル防衛という観点での優位性を向上させることにつながる可能性がある。

なお、米国防省による衛星を用いた IoT の導入は、同盟国にも影響を与えることになる。米空軍と陸軍は JADC2 を CJADC2 として (C は同盟国間での連携を指す [Combined] の頭文字)、同盟国・パートナー国との戦術的なデータ共有にも活用する方針を示し始めている<sup>xiv</sup>。日本に関して言えば、衛星群による極超音速滑空兵器の探知・追尾で米国との連携を検討していることから<sup>xv</sup>、追尾層のみならず運搬層の整備状況にも注意を払っていく必要がある。

## 1-2. 人工知能 (AI)

AI も宇宙領域での軍事活動において活用が始まっている先端的なデジタル技術である。民間では機械学習の一種である深層学習の実用化が進み、第 3 次 AI ブームが到来している。こうした中、米 SDA は NDSA の戦闘管理層 (Battle Management Layer) として、戦闘管理・指揮統制・通信 (BMC3) の自動化を AI などにより実現する計画である<sup>xvi</sup>。

また、USSF は、地球周回軌道上の人工物体の探知・追尾・識別といった宇宙領域認識に関わる活動に AI を導入し始めている。すでに USSF の前身である空軍宇宙コマンドが 2019 年から 2 年間の契約で、AI を用いた商業ソフトウェアの試験的利用に着手していた<sup>xvii</sup>。ソフトウェアはスリングショット・エアロスペース社が開発したオービタル・アトラスであり、大量のデータからパターンを見つけ出すことで人工物体同士の衝突予測などが可能であるとされる。今後、USSF は宇宙領域認識における AI の本格的な活用へと移る方針である。具体的には、宇宙領域認識に関して中核的な役割を担っている第 18 宇宙コントロール隊の指揮統制システムを 2022 年までに AI を用いたものに移行する予定である<sup>xviii</sup>。

米国の情報機関による宇宙分野での AI 利用も始まっている。宇宙や空から収集した画像の分析を担う国家地理空間情報局 (NGA) は、AI・自動化・拡張 (AAA) イニシアチブに着手した。NGA が AI の活用を始めた背景には、空軍のプロジェクト・メイブンを通じて、米軍内で AI の有用性についての認識が広まったことがあるといわれる<sup>xix</sup>。同プロジェクトを受注したグーグル社は、分析官が長い時間をかけて作成していたフルモーションビデオに由来する情報プロダクトを機械学習の適用により瞬時に作成することを可能にしたとされる<sup>xx</sup>。2018 年には NGA のプール副長官 (当時) が、同年末までに衛星や無人機で収集した全ての画像に AAA イニシ

アチブを適用する意向を明らかにした<sup>xxi</sup>。

それでは AI の活用が DX に発展した場合、どのような優位性が米国の国防組織や情報機関にもたらされ得るのか。AI の活用が進展すれば、宇宙ビッグデータの処理をより効率的かつ迅速に行うことが可能になり、その結果として状況認識や意思決定という点で米国は他国よりも優位に立つことができるかもしれない。

この点は前述した IoT とも密接な関係にある。IoT により集約される膨大なデータ、すなわちビッグデータを素早く処理する役割が AI にはある。米国防省が構築中の IoMT である JADC2 では、クラウドに集約したデータの処理を AI で行う計画である<sup>xxii</sup>。前述のとおり JADC2 の狙いは意思決定上の優勢を獲得することであり、そのためには迅速にデータを処理して敵対者よりも早くキルチェーンを回す必要がある。また、NDSA で収集されるデータも膨大であり、かつ対象となるのは限られた時間で対処しなければならないターゲット(例えば追尾層の場合はミサイル、監督層の場合はミサイル発射台付車両や艦艇)が中心である。このため AI を用いることで BMC3 の迅速化を図り、キルチェーンを効果的に機能させることが目指されている。

宇宙領域認識に関して USSF が AI を活用し始めた背景にも軌道情報のビッグデータ化がある。地球周回軌道の混雑が特に低軌道で進んでいる。これは 2000 年代後半に宇宙ゴミの大量発生事案(中国衛星破壊実験と米露衛星衝突事件)が起きたことに加えて、スペース X 社のように大規模衛星群の編成を計画する企業が相次いでいるためである<sup>xxiii</sup>。軌道情報というビッグデータの処理が AI により効率的かつ迅速に行えるようになれば、宇宙利用の安定性の維持にも貢献することになる。

衛星画像の処理に AI の活用が始まっている背景にもビッグデータ化という問題がある。NGA は例えば 2017 年の 1 年間で約 1200 万枚の画像を収集したことを明らかにしている<sup>xxiv</sup>。さらに NGA は収集する画像が今後ますます増加すると見込んでいる。要因の一つは NGA が商用衛星画像の入手先の多角化を図っていることにある。高分解能画像を少数の大型衛星により撮像し販売する企業(マクサー・テクノロジーズ社)のみならず、多数の小型衛星を運用することにより高頻度で画像を撮像し販売する企業のサービスも NGA は利用するようになってきている。例えば、プラネット社は地球観測用としては世界最多の 100 機超の衛星群を運用している。NGA のカーディロ長官(当時)によれば、プラネット社のサービスを考慮に入れた場合、作業の自動化を進めなければ全入手画像の分析に 600 万人の分析官を必要とする<sup>xxv</sup>。膨大な衛星画像の処理を NGA は AI などを用いて効率的かつ迅速に行いたい意向である。

## 2. DX に向けた取り組みがもたらす余波

### 2-1. サイバー領域の重要性増大

DX に向けた取り組みは余波ももたらし得る。一つは軍事宇宙活動を行う際のサイバー領域の重要性増大であり、宇宙システムのサイバーセキュリティを確保する必要性が高まる。民間の宇宙システムはサイバーセキュリティ対策が十分にはなされていない場合が多いといわれ、軍や情報機関による民間サービスの活用が増えれば、サイバーセキュリティ上のリスクも増大

する恐れがある<sup>xxvi</sup>。加えて、IoT は多数の機器で構成されるが、いずれか一つの機器でも不正なアクセスを許せば最終的にはシステム全体が乗っ取られる可能性がある<sup>xxvii</sup>。衛星を用いた IoT も例外ではなく、特に大規模な衛星群の場合はサイバー攻撃の対象が飛躍的に増大することを意味する<sup>xxviii</sup>。既述のとおり米空軍は商用通信衛星も活用しながら IoMT の構築を進めようとしている。SDA も NDSA の運用に際して商用衛星の地上局も利用する方針である<sup>xxix</sup>。民間のイノベーションを積極的に取り込んでいくことは、米国防省に優位性のみならずリスクももたらす可能性がある。

IoT が有するサイバーセキュリティ上の脆弱性は、米国防省が取り組んでいる宇宙領域における任務保証 (mission assurance)、特に抗たん性 (resilience) の確保にも影響を与えかねない問題である。米国防省は個々の衛星を防護することには限界があるとして、少数の大型衛星にかわって多数の小型衛星を運用することで抗たん性を確保することを検討している。これは抗たん性の確保策の中でも「拡散」(proliferation) と呼ばれるアプローチであり、衛星破壊といった物理的攻撃に対しては高い抗たん性を確保できると期待されている。他方で、サイバーセキュリティ上の脆弱性に対応できなければ、最悪の場合、衛星群全体が機能不全に陥り任務保証は達成できないことになる<sup>xxx</sup>。

宇宙領域での軍事活動において AI の活用を進める際も、サイバーセキュリティは重要な問題となる。AI にはサイバー攻撃からの防御を助ける役割があると期待されているが、最近では AI の機能不全を狙ったサイバー攻撃が懸念されるようになってきている<sup>xxxi</sup>。例えば AI に入力するデータがサイバー攻撃により汚染されれば、分析結果も誤ったものとなる可能性が高い。

## 2-2. 電磁スペクトルの重要性増大

さらに、宇宙領域での軍事活動を行う際の電磁スペクトル (EMS) の重要性増大も DX に向けた取り組みがもたらす余波として想定できる。具体的には宇宙システムのうちリンクセグメントのセキュリティを確保する必要性の増大である<sup>xxxii</sup>。リンクセグメントは文字通り、宇宙セグメント (衛星など) と地上セグメント (地上局やユーザー端末など) の間や衛星同士を結ぶ役割を果たしており、宇宙システムはリンクセグメントなしには機能し得ない。

特に衛星を用いた IoT の場合、個々の機器単体ではなくシステム全体で機能することが想定されているが、機器間の連携はリンクセグメントを通じて行われる。米国防省が構想する極超音速兵器への対処を例に示せば、NDSA の追尾層が収集したデータはクロスリンクで運搬層へと伝達され、それを受けて運搬層がダウンリンクで地球上の兵器プラットフォームに迎撃に必要なデータを伝達する。こうした衛星間や衛星と地上間のリンクが脅かされれば、衛星を用いた IoT は機能しない。

宇宙システムのリンクセグメントへの具体的な脅威としては、電波妨害 (ジャミング) や通信傍受などがある<sup>xxxiii</sup>。これらは新しい脅威ではないが、電波妨害については妨害能力の拡散が世界的に顕著であり、かつ妨害は日常化している。通信傍受も珍しいものではないが、量子コンピュータの実用化が進めば、これまで解読困難と考えられていた暗号が解読されると懸念されている<sup>xxxiv</sup>。

## おわりに

本稿では軍事宇宙活動における先端的なデジタル技術の活用事例に着目し、それらが DX へと発展した場合の意義を予備的に考察した。具体的には、米国の国防組織や情報機関が宇宙領域で IoT や AI をいかに活用しようとしているのかという点に焦点を当てた。衛星を用いた IoT の導入が DX へと発展した場合、米国防省に意思決定上の優勢やミサイル防衛という観点での優位性がもたらされる可能性がある。また AI の活用が DX に発展した場合、状況認識や意思決定という点で米国は他国よりも優位に立つことができるかもしれない。

とはいえ、米国の取り組みは構想や研究・開発、実証試験の段階に基本的にはとどまっており、実際に DX へと発展するのか否かは分からない。DX の定義に示されているとおり組織の体制や文化、活動のあり方が変容してはじめてデジタル技術の活用を通じた変革が起きたと判断できる。米国防当局も、国防分野のイノベーションには技術のみならず作戦や組織面での取り組みが不可欠であると認識している<sup>xxxv</sup>。米国防当局が今後、先端的なデジタル技術を効果的に活用するために、いかなる作戦構想を策定し、かつ組織を改編していくのかという点を注視する必要がある。

さらに言えば、仮に技術、作戦、組織体制の全ての側面で米国の国防組織に変革が起きたとしても、それが優位性につながるかは分からない。そもそも優位性は相対的な概念であり、実際に優位性を獲得できるか否かは他者との関係で決まる。米国が戦略的競争相手と位置付ける中露も先端的なデジタル技術の活用に取り組んでいる。米国が優位性を獲得するためには DX に向けた施策を中露よりも迅速に、かつ絶え間なく行っていかなければならない。

本稿ではまた、DX に向けた取り組みがもたらし得る余波も考察した。具体的にはサイバー領域と EMS の重要性が増すと考えられ、宇宙システムのサイバーセキュリティとリンクセグメントのセキュリティを確保することがこれまで以上に必要となる。

この点は米国政府も問題意識を深めており、2020 年にはホワイトハウスが宇宙政策指令第 5 号として「宇宙システムのサイバーセキュリティ原則」を公表した。2021 年度には空軍の関連要員 1130 人ほどが USSF に移籍することも発表されている。米国防省はまた、とりわけ中露による電子戦能力の向上を念頭に、EMS における優勢を獲得することの重要性を再認識するようになっている<sup>xxxvi</sup>。2020 年に米国防省が公表した「EMS 優勢戦略」では、現代戦において EMS での優勢は空や陸、海、宇宙、サイバー空間での優勢獲得における先行指標であり基本要素であるとの認識が示された<sup>xxxvii</sup>。ホワイトハウスが 2020 年に公表した「国家宇宙政策」でも、EMS の保護のために妨害探知能力の向上などを行うことが明記されている。

本稿の冒頭で触れた通り民生技術の軍事転用が世界的に顕著になっており、もはや安全保障(特に軍事)の動向を注視しているだけでは安全保障の先行きを見通せない時代が到来している。こうした中では民間で進む先端的なデジタル技術の研究開発や活用に目を向けるとともに、それらが宇宙領域を含む安全保障全般に与える影響を考えていくことが欠かせない。あわせて、宇宙と他領域の一体化が進んでいることから、今後、宇宙領域での軍事活動を考える際は、これまで以上に他領域との関係性を考慮していかなければならない。

- 
- <sup>i</sup> 経済産業省「デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン（DX 推進ガイドライン）」Ver. 1.0、2018年12月、2頁。
- <sup>ii</sup> 「Society 5.0」は、情報通信技術を最大限活用しサイバー空間とフィジカル空間を融合する超スマート社会である。「科学技術基本計画」2016年1月22日閣議決定、11頁。
- <sup>iii</sup> 例えば下記を参照。総務省宇宙×ICTに関する懇談会「宇宙×ICTに関する懇談会報告書～ICTが巻き起こす宇宙産業ビッグバン～」2017年8月。
- <sup>iv</sup> Theresa Hitchens, “EXCLUSIVE: Space Is at Heart of JADC2, Says Maj. Gen. Crider,” *Breaking Defense*, December 23, 2020, <https://breakingdefense.com/2020/12/exclusive-space-is-at-heart-of-jadc2-says-maj-gen-crider/>; John Morris, Shannon Pallone, Brian Denaro, Jim Horejsi, and Josh Train, “US Space Force Digital Engineering Ecosystem,” Space and Missile Systems Center, U.S. Space Force, 2020, p. 8; U.S. Space Force, *Chief of Space Operations’ Planning Guidance*, November 2020, p. 10.
- <sup>v</sup> Sandra Erwin, “SES to Provide Satellite Connectivity for U.S. Military ‘Internet of Things,’” *SpaceNews*, November 30, 2020, <https://spacenews.com/ses-to-provide-satellite-connectivity-for-u-s-military-internet-of-things/>. IoMTは必ずしも狭義のインターネット（The Internet）への接続を指すわけではない。
- <sup>vi</sup> Ibid.
- <sup>vii</sup> U.S. Department of Defense, *Remarks by Acting Secretary Shanahan at the 35th Space Symposium, Colorado Springs, Colorado*, April 9, 2019, <https://www.defense.gov/Newsroom/Transcripts/Transcript/Article/1809882/remarks-by-acting-secretary-shanahan-at-the-35th-space-symposium-colorado-sprin/>.
- <sup>viii</sup> 図は下記より転載。Theresa Hitchens, “SDA to Rent Commercial Ground Stations,” *Breaking Defense*, June 19, 2020, <https://breakingdefense.com/2020/06/sda-to-rent-commercial-ground-stations/>.
- <sup>ix</sup> Space Development Agency, U.S. Department of Defense, “Transport,” <https://www.sda.mil/transport/>; Lockheed Martin, “Lockheed Martin to Build 10 Small Satellite Mesh Network in Two Years,” September 1, 2020, <https://news.lockheedmartin.com/news-releases?item=128968>.
- <sup>x</sup> Theresa Hitchens, “Esper Orders SDA to Link C2 Networks for All-Domain Ops,” *Breaking Defense*, May 6, 2020, <https://breakingdefense.com/2020/05/esper-orders-sda-to-link-c2-networks-for-all-domain-ops/>.
- <sup>xi</sup> U.S. Department of Defense, “What’s with All the U.S. Space-Related Agencies?” *DOD News*, December 14, 2020, <https://www.defense.gov/Explore/Features/Story/Article/2446327/whats-with-all-the-us-space-related-agencies/>.
- <sup>xii</sup> Terrence J. O’Shaughnessy, “Decision Superiority Through Joint All-Domain Command and Control,” *Joint Force Quarterly*, Issue. 99, 4<sup>th</sup> Quarter 2020, p. 75; Theresa Hitchens, “Exclusive: J6 Says JADC2 Is a Strategy; Service Posture Reviews Coming,” *Breaking Defense*, January 4, 2021, <https://breakingdefense.com/2021/01/exclusive-j6-says-jadc2-is-a-strategy-service-posture-reviews-coming/>.
- <sup>xiii</sup> 追尾層は広角センサを搭載した衛星群と中角センサを搭載した衛星群（極超音速・弾道追尾宇宙センサ〔HBTSS〕）により構成される。まず広角センサを搭載した衛星がミサイル発射を探知・追尾し、HBTSSに収集したデータを伝達する。それを受けてHBTSSが中角の赤外線センサで火器管制用データを収集する。
- <sup>xiv</sup> Yasmin Tadjeh, “Challenges Loom for Joint All-Domain Command, Control,” *National*

---

*Defense*, December 8, 2020,

<https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2020/12/8/challenges-loom-for-joint-all-domain-command-control>.

<sup>xv</sup> 防衛省「防衛大臣記者会見 令和2年12月21日」

<https://www.mod.go.jp/j/press/kisha/2020/1221a.html>。

<sup>xvi</sup> Space Development Agency, U.S. Department of Defense, “Battle Management Command, Control, and Communication (BMC3),” <https://www.sda.mil/battle-management/>.

<sup>xvii</sup> Sandra Erwin, “Air Force Selects Slingshot Aerospace to Bring Artificial Intelligence into Space Surveillance,” *SpaceNews*, April 7, 2019, <https://spacenews.com/air-force-selects-slingshot-aerospace-to-bring-artificial-intelligence-into-space-surveillance/>.

<sup>xviii</sup> Sandra Erwin, “U.S. Military Keeps Sharp Eyes on Orbit as Congestion Grows,” *SpaceNews*, November 3, 2020, <https://spacenews.com/u-s-military-keeps-sharp-eyes-on-orbit-as-congestion-grows/>.

<sup>xix</sup> Sandra Erwin, “NGA Official: Artificial Intelligence Is Changing Everything, ‘We Need a Different Mentality’,” *SpaceNews*, May 13, 2018, <https://spacenews.com/nga-official-artificial-intelligence-is-changing-everything-we-need-a-different-mentality/>.

<sup>xx</sup> なお、2019年にグーグル社との契約は終了し、パラソティア社が新たに受注した。

<sup>xxi</sup> Erwin, “NGA Official: Artificial Intelligence Is Changing Everything, ‘We Need a Different Mentality’,” *SpaceNews*.

<sup>xxii</sup> John R. Hoehn, “Joint All-Domain Command and Control (JADC2),” *In Focus*, Congressional Research Service, Updated November 16, 2020, p. 1.

<sup>xxiii</sup> Erwin, “U.S. Military Keeps Sharp Eyes on Orbit as Congestion Grows,” *SpaceNews*.

<sup>xxiv</sup> Erwin, “NGA Official: Artificial Intelligence Is Changing Everything, ‘We Need a Different Mentality’,” *SpaceNews*.

<sup>xxv</sup> Sandra Erwin, “Q&A: Cardillo Touts Industry Partnerships as He Leaves NGA,” *SpaceNews*, February 3, 2019, <https://spacenews.com/qa-cardillo-touts-industry-partnerships-as-he-leaves-nga/>.

<sup>xxvi</sup> Gregory Falco, “Space System Cybersecurity: Challenges Ahead Translating Policy to Practice,” *SpaceNews*, November 16, 2020, <https://spacenews.com/op-ed-space-system-cybersecurity-challenges-ahead-translating-policy-to-practice/>; Brandon Bailey, Ryan J. Speelman, Prashant A. Doshi, Nicholas C. Cohen, and Wayne A. Wheeler, *Defending Spacecraft in the Cyber Domain*, Center for Space Policy and Strategy, Aerospace Corporation, November 2019, p. 5.

<sup>xxvii</sup> 佐々木雅英「宇宙×ICTの安心、安全対策」宇宙×ICTに関する懇談会、2017年2月22日。

<sup>xxviii</sup> 同上。

<sup>xxix</sup> Hitchens, “SDA to Rent Commercial Ground Stations,” *Breaking Defense*.

<sup>xxx</sup> Bailey, Speelman, Doshi, Cohen, and Wheeler, *Defending Spacecraft in the Cyber Domain*, p. 8.

<sup>xxxi</sup> Josephine Wolff, “How to Improve Cybersecurity for Artificial Intelligence,” Brookings Institution, June 9, 2020, <https://www.brookings.edu/research/how-to-improve-cybersecurity-for-artificial-intelligence/>.

<sup>xxxii</sup> 宇宙システムのリンクセグメントのセキュリティはサイバーセキュリティの一環として位置づけられる場合も多い。米国防省はEMSを陸、海、空、宇宙、サイバーと並ぶ独立した領域（domain）とはみなしていない。一方、日本政府は2018年に閣議決定した防衛計画の大綱において、EMSを独立した領域として位置づけている。

---

xxxiii なお、NDSA のクロスリンクに用いられる予定の光通信は、電波による通信に比して妨害と傍受への耐性が高い。

xxxiv 長島純「宇宙における量子暗号への挑戦と FIVE EYES との協力への道」笹川平和財団、2020 年 8 月 7 日、[https://www.spf.org/iina/articles/nagashima\\_03.html](https://www.spf.org/iina/articles/nagashima_03.html)。

xxxv 森聡「オバマ政権期における国防組織改編の模索—国防イノベーションの組織的側面」『国際安全保障』第 45 巻第 1 号、2017 年 6 月、26 頁；森聡「統合作戦構想と太平洋軍—マルチ・ドメイン・バトル構想の開発と導入」土屋大洋編著『アメリカ太平洋軍の研究—インド・太平洋の安全保障』千倉書房、2018 年、165 頁。

xxxvi 切通亮「電磁スペクトルにおける米国の軍事的課題と対応」『防衛研究所紀要』第 21 巻第 1 号、2018 年 12 月、99–120 頁。

xxxvii U.S. Department of Defense, *Department of Defense Electromagnetic Spectrum Superiority Strategy*, October 2020, p. 3.