

# 宇宙機・衛星開発へのMBSEの適用

井上 禎一郎\*  
Teiichiro Inoue

久保田 博之\*  
Hiroyuki Kubota

平山 芳和†  
Yoshikazu Hirayama

玉越 大資\*  
Daisuke Tamakoshi

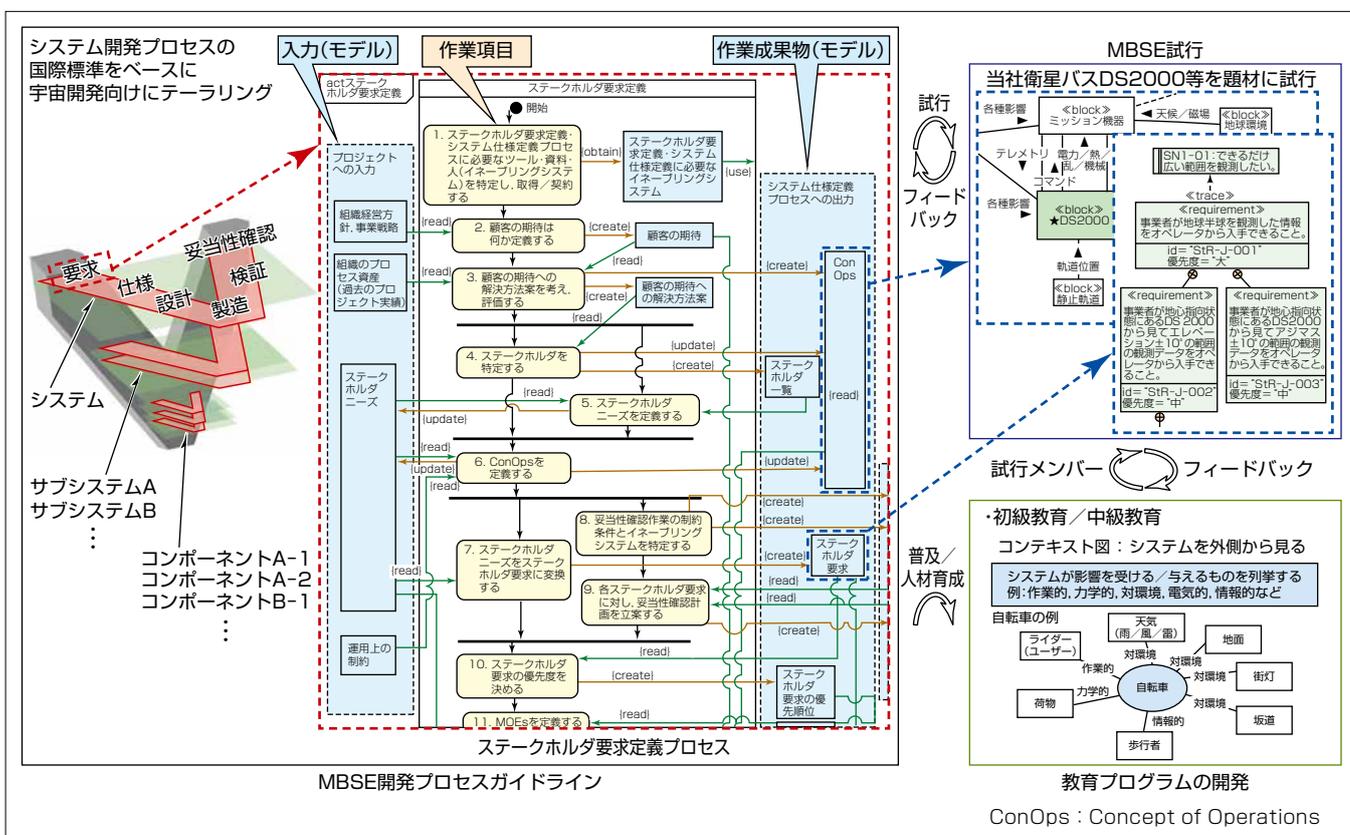
Application of Model-Based Systems Engineering to Spacecraft and Satellite System Development

## 要旨

モデルベースシステムズエンジニアリング(MBSE)はデジタルの力と複数のモデルを利用することで複雑化するシステム開発を円滑に進めるための手法である。MBSEは欧米の航空宇宙業界で適用が進んでおり、今後MBSEの更なる発展が予想される。三菱電機鎌倉製作所でもこの潮流に注目しており、年々大規模・複雑化する宇宙機・衛星開発を円滑に進めるため、MBSE適用検討を行っている。MBSEを適用するに当たって、開発プロセスを成熟させること、モデルに関する知見を蓄積すること、エンジニアのスキルを向上させること、社内に手法を浸透させることに取り組んだ。MBSE開発はプロセスが確立していないため、システム開発の国際標準のプロセス等をベースに

鎌倉製作所のシステム開発の業務に合わせてカスタマイズし、各開発プロセスの作業項目や関連するモデルを定義し、MBSE開発プロセスをガイドライン化した。このガイドラインをベースに様々な製品を対象にシステムエンジニア、サブシステムエンジニア含め、繰り返し試行し、ガイドラインを洗練化した。また、MBSEを推進できるリーダーの育成を目的とした教育プログラムを開発し、教育を継続的に実施できるようにした。

今後もMBSEを宇宙機・衛星のデジタル化の柱と位置付けて、継続的に適用し、設計・製造の柔軟性の向上や更なる信頼性向上、開発期間の短縮、及び低コスト化につなげていく。



## 当社鎌倉製作所のMBSE適用ステップ：開発プロセスガイドライン作成、試行、教育

MBSEを適用するに当たって、宇宙機・衛星のシステム/サブシステム/コンポーネント開発の各プロセスの作業項目、作業への入力(モデル)、作業成果物(モデル)を定義した“MBSE開発プロセスガイドライン”を作成した。このガイドラインを使用し、様々な題材に対して“MBSE試行”を行い、得られた知見をガイドラインにフィードバックするとともに、“教育プログラムの開発”を行い、普及活動と人材育成に注力している。

## 1. ま え が き

システムズエンジニアリング(SE)は、部分最適化と全体最適化を同時に実現しながら、それらの最適な関係性を保つことで、遺漏なくシステム開発を行う工学手法である。この手法にモデルベースのアプローチを採用したMBSEを適用することで、大規模・複雑化していくシステムをより円滑に開発することが期待できる。

本稿では、宇宙機・衛星開発へのMBSEの適用について、その目的、適用に向けた課題と対策及びこれまでに得られた成果について示す。

## 2. MBSEとは

### 2.1 SE

SEとは、“システムを成功させるための複数の専門分野にまたがるアプローチと手段である”と定義されている<sup>(1)</sup>。昨今のシステムはその高い付加価値を実現するため、顧客からの複雑な要求に対してハードウェアやソフトウェア等幅広い領域にまたがる技術を統合してシステムを実現しなければならない。SEは各種専門分野の知識を融合し、このような複雑なシステムを成功に導くための手法を体系的に集約したものである。SEの起源は諸説あり、様々な発展を経ているが、現在ではISO/IEC(International Electrotechnical Commission)/IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)15288等に標準化されている。また、NASA(National Aeronautics and Space Administration)のSystems Engineering Handbook等、ドメインにひもづくプロセスも定義されており、欧米の航空宇宙産業では適用が既に定着化し、近年では自動車産業などにも適用が広がっている。

### 2.2 MBSE

近年、システムの大型化やネットワーク化などによって急速にシステムの複雑化が進んでおり、従来のSEだけでは解決できない問題が発生している。そこで、SEにモデルベース開発の考え方を適用したMBSEが注目を浴びている。

モデルとは表現したい対象物の構成や振る舞い、機能、役割分担などを示すものであり、古くから多様な分野で活用されている表現法である。システム開発では主に設計段階でシステムアーキテクチャの表現手法としてモデルが活用されてきた。システムの設計段階でのモデルの役割は、ステークホルダ間のコミュニケーション手段やシミュ

レーションによる設計検証の手段である。従来のシステム開発ではモデルを設計文書の補助ツールとして使用することが多く、設計成果物はドキュメントとして記録されていた。システムが大規模・複雑化すると、ドキュメントベースの開発では全体像の俯瞰(ふかん)が困難になるだけでなく、トレーサビリティ管理や成果物管理が複雑になってしまう。そこで、近年ドキュメントベースの開発からモデルベースの開発に移行することでトレーサビリティ管理や成果物管理を円滑に進めようとする動きがある。

MBSEは、このモデルによる成果物管理をSEに適用したもので、つまり、システム開発全体で成果物をドキュメントではなくモデルによって作成・管理する手法である。モデリング言語を用いた図的表現による意思疎通の促進やモデリングツールを用いたシミュレーションの活用等によって、複雑化するシステム開発を円滑に進めることを主眼としている。

欧米の航空宇宙産業ではデジタルエンジニアリングの一環としてこのMBSEの適用が定着化しつつあるため、SEと同様にMBSEも今後更なる発展が予想される。当社鎌倉製作所でもこの潮流に注目しており、MBSEの適用検討を進めている。そこで、3章にMBSEを宇宙機・衛星開発に適用する狙いと課題について述べる。

## 3. MBSE適用の狙いと課題

### 3.1 宇宙機・衛星開発の状況

鎌倉製作所では、測位衛星、通信衛星、地球観測衛星等、多くの宇宙機・衛星を開発してきた。これらの衛星は、宇宙利用や科学研究を実現するための手段であり、カーナビゲーション、衛星放送、気象予報、温室効果ガス観測などの民間ビジネス/公共サービス利用や宇宙科学の発展に寄与している。

近年、世界の宇宙ビジネスに目を向けると、衛星の提供するデータ(衛星データ)を地上の様々なデータと組み合わせ、IoT(Internet of Things)やAI等の最新技術を活用して新たなサービス・価値の創出が期待されている。それを支えるインフラとして高速・大容量通信のための衛星の大型化・高機能化、観測高頻度化のための複数小型衛星を協調させる衛星コンステレーションの実現などが求められている。また、宇宙科学分野では、月軌道に有人拠点を構築するゲートウェイや惑星探査など、より大規模で複雑かつフレキシブルなシステムが求められている。

効率的なシステム開発の手法としては、欧米の航空宇宙開発で標準になっているSEがあり、当社では1990年代から衛星システム開発にこれを適用している。しかし、既存

システムの再利用開発を繰り返す中で、すり合わせやボトムアップ指向の“モノづくり”になる傾向にあり、このような大規模・複雑化する新たなシステムを高品質・低コストで開発することには課題がある。

ここにモデルベースのアプローチを採用したMBSEを適用することで、デジタルの力と複数のモデルを組み合わせ、複雑なシステムの開発を円滑に進めるといことがMBSE適用の狙いである。

### 3.2 MBSE適用に向けての課題

宇宙機・衛星開発などの大規模システム開発は、**図1**の二元V字開発モデル(Dual Vee Model)に示すように、システム(宇宙機, 衛星レベル), サブシステム(制御系, 電源系など), コンポーネント(サブシステムを構成する計算機, センサなど)の3レイヤで開発が進められることが多い。宇宙機や衛星というシステムを技術分野ごとのサブシステムに分解し、それぞれのサブシステムを更にコンポーネントに分解する。分解することで複雑なシステムの制御をしながら開発するためである。それぞれのコンポーネントを開発し、サブシステムとしてインテグレートし、各サブシステムを大きなシステムにインテグレートする。また、開発レイヤごとに要求分析から妥当性確認のV字プロセスを実施している。MBSEの適用は、これらの全開発層の全プロセスをターゲットとするものである。

MBSEを実際に適用するに当たって大きく次の課題がある。

#### (1) MBSE開発プロセスの成熟度

SEの開発プロセスは国際標準があり、広く一般化されているが、モデルベース開発の考え方を適用したMBSEの具体的な開発プロセスの標準はない(各社, 各組織依存)。

#### (2) MBSE知見の蓄積

種類が多数あるモデルをどのような目的で、どのプロセスに適用するかといった基準、効果事例が少ない(各社, 各組織でノウハウがあり、公開されていない)。

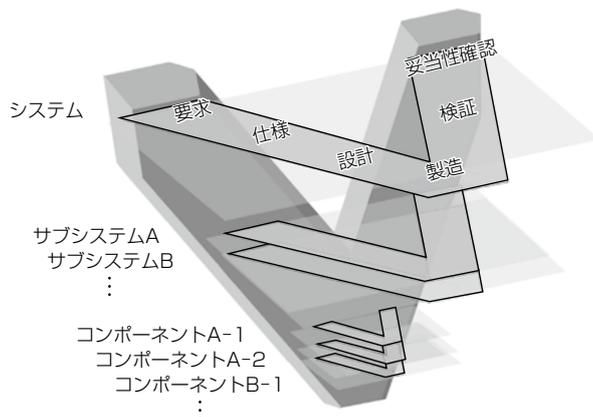


図1. 二元V字開発モデル

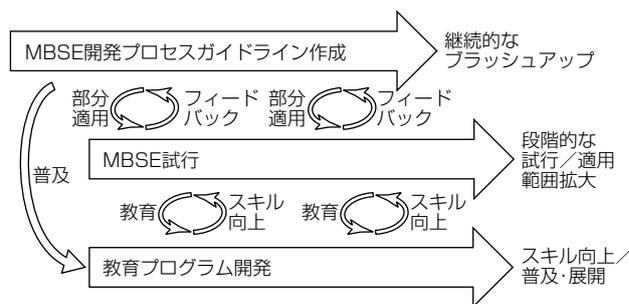


図2. MBSE適用ステップのイメージ

#### (3) SE/MBSEスキルの獲得

MBSEを取り扱うための開発スキルの前提としてSEスキルがある。SEスキルを向上させるとともに、MBSEを取り扱うためのスキル向上を促す必要がある。

#### (4) 変化への抵抗

従来のドキュメントベースの開発からモデルベースの開発になるため、適用を進めるためには、エンジニアや管理者、レビュー者のMBSEに対する知覚価値(MBSEに対して抱く品質や費用に対する総合的な価値)を向上させる必要がある。

これらの課題に対し、次に示す対策を立て、適用を進めている。**図2**は、MBSE適用ステップのイメージ図である。

課題(1)(2)への対策として、MBSE開発を支える土台となる、宇宙機・衛星開発の業務分析や試行(MBSE試行)を繰り返しながら社内標準開発プロセスの構築及び活用するモデルの検討(MBSE開発プロセスガイドライン作成)を行う。

課題(3)(4)への対策として、SE/MBSEスキル向上のための教育活動を充実化させる(教育プログラムの開発)。また、MBSEの試行繰り返し(MBSE試行)によって、適用メリットを検証しながら、段階的に試行・適用範囲を広げていくことで、物理的・心理的障壁を下げる。

このように、MBSE開発プロセスのガイドライン作成、試行/製品適用、教育を繰り返すことでMBSEの普及及びMBSEによるシステム開発の円滑化を進めている。

4章にMBSE適用に向けたステップでの実施事項を示す。

## 4. 宇宙機・衛星開発へのMBSE適用

### 4.1 MBSE開発プロセスガイドラインの作成

国際標準として定義されているISO15288, INCOSE (International Council on Systems Engineering), 及びNASAのシステム開発プロセスをベースに鎌倉製作所の宇宙の業務だけでなく、防衛の業務にも合わせてカスタマ

イズを進め、各開発プロセスの作業項目、及び作業に対する入力(モデル)と作業成果物(モデル)を定義し、MBSE開発プロセスをガイドライン化した。業務分析を進める中で各ドメイン(衛星システム/防衛システム等)で実施している設計のプロセスによって表現したいことが異なるため、効果的に利用できるモデルに違いがあることが判明した。そのため、宇宙・防衛システム開発全般に対し、共通的に適用できる粒度でのガイドラインの記載を心がけ、ドメイン依存部は、モデル記法や検討時の注意点などの細かな部分を知見としてまとめた。ガイドラインは図3に示すような作業フローに加え、詳細な注意点やモデル利用ガイドを含めて作成している。

#### 4.2 試 行

MBSE開発プロセスのガイドラインの検証、及び効果を確認することを目的に複数回の試行を繰り返した。試行は、汎用的な製品(自転車等)のほか、鎌倉製作所が製造する静止衛星用の標準バス“DS2000”の再設計、衛星に対す

る新規機能検討、防衛システムを対象にシステムエンジニア、サブシステムエンジニア含め、幅広く実施した。試行の中で、ガイドラインと実際の開発の作業との適合性や適用効果の確認、適用に伴う課題等を抽出した。

試行の結果、MBSEプロセス自体の改善に資する知見を品質向上の観点(ベテランが暗黙的に実施しており、この試行で明確化された作業内容や手順等)、効率化の観点(モデル/ツール等による作業量削減、期間短縮方法等)から得ることができた。今後のプロセス上の課題(再利用開発と新規技術開発ではプロセスの適用方法や難易度、効果に違いがある等)についても洗い出すことができた。得られた知見、課題を踏まえ、今後の試行や製品適用に向けてガイドラインを洗練化させていく。また、試行対象の一つであったDS2000は再利用開発が中心であり、多くの設計資産があるものの、ベテランエンジニアの暗黙知も含まれている。検討を進める中でそのノウハウを少しずつ解きほぐし、モデル化することで、設計の理解を深められるなどの副次的効果も得られた。

各プロセスの詳細な作業フローを定義

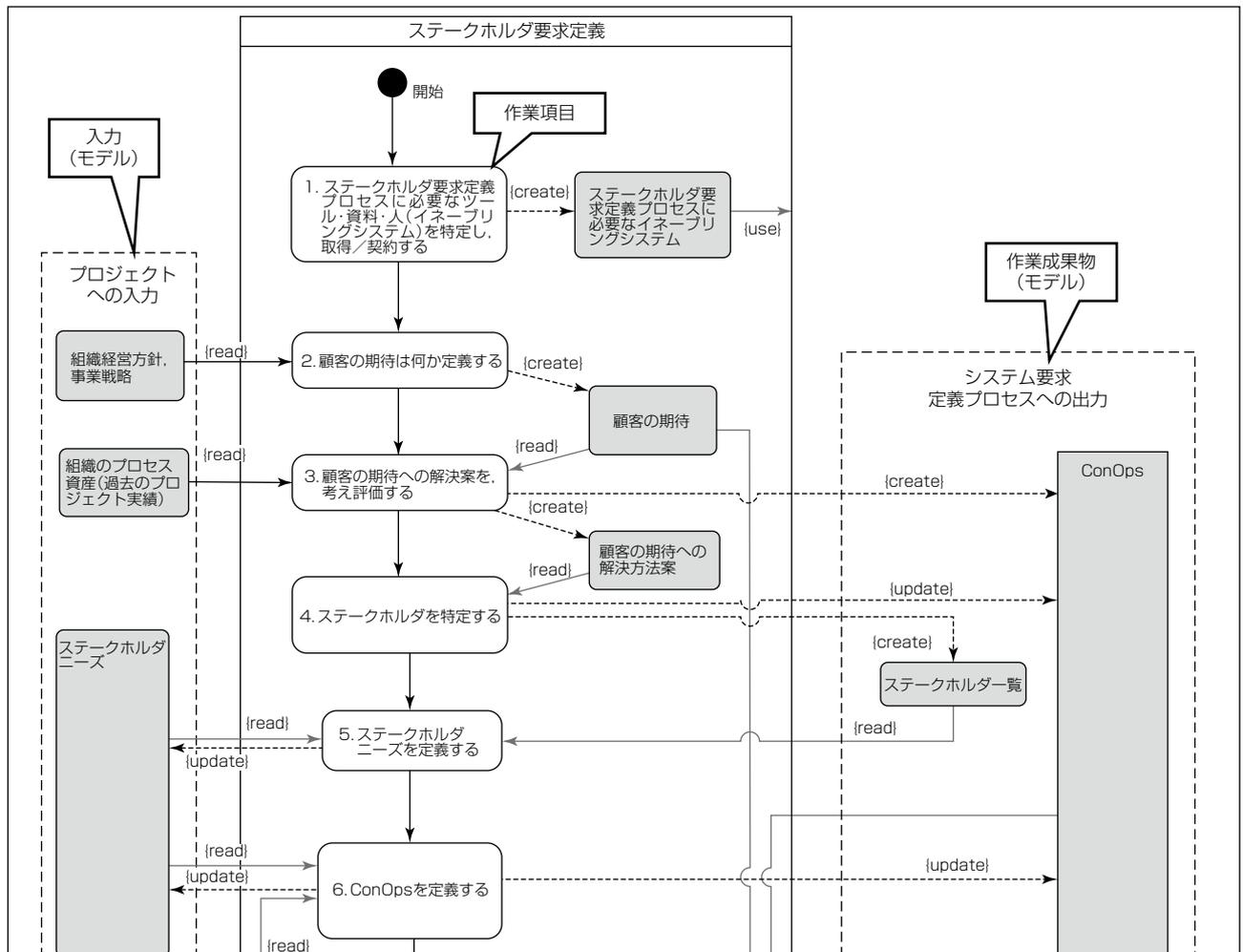


図3. 作業フローのガイドライン

### 4.3 教 育

MBSEを適用していくためには、SEスキルとMBSEスキルを習得した上でMBSEの適用を推進するとともに組織の啓蒙(けいもう)を図るリーダーの育成が必要になる。鎌倉製作所では、MBSE普及とリーダー育成のため、教育段階を初級、中級に分類し、段階的な育成を計画した。どちらもSEを意識した教育であり、SEを理解した上で“モデル”を活用する内容としている。初級教育は若手層を対象に広く実施し、SE/MBSEの基礎を学ぶことを目的にしている。中級教育はMBSE適用の中心となって牽引(けんいん)し得る人材やプロジェクトリーダーに対して実施し、SE/MBSEを各々の職場に持ち帰り、自身の業務やプロジェクトに活用・フィードバックを行えるレベルを目指している。マネジメント層の理解を得ながら教育活動の普及を図ることが重要である。

## 5. 効 果

MBSEの適用を通して、SE、及びモデル化による効果が得られている。

SEでは、顧客のニーズ、要求を起点として、仕様を整え、概念設計、物理設計と進めていく。製品を製造して、どのように使うか、という“もの”が主体ではなく、顧客が何を実現したいのか、という“こと”が主体となる開発と親和性がある。過去に開発した衛星をベースにできることだけを提案していくのではなく、顧客が真に実現したいことを追求し、新しいソリューションや価値を生み出すことにつながる。衛星のコンステレーション、月や火星利用など、宇宙開発は新たな局面を迎えつつあり、新しいプロジェクト、システム開発にはSEの効果が大きい。

モデル化は、コミュニケーションの観点で大きな効果が得られる。行間を読むという表現があるように自然言語で記述したものは、曖昧さを含みやすい。これに対して、形式化したモデルを使った記述では、曖昧さを低減できるだけでなく、矛盾や漏れ、抜けを見つけやすいという効果が

ある。モデルを利用したコミュニケーションを行うことによって、顧客や開発者間の共通理解を促進でき、円滑に開発を進めることができる。また、モデルでシミュレーションができるツールも数多く開発されてきており、それらを活用することで、上流での検証、プロトタイプでのデモンストレーションが実現できる。

## 6. む す び

宇宙機・衛星開発へのMBSEの適用について述べた。現在は、部分的に適用し、実開発で得られたノウハウをガイドラインに反映しつつ、プロセスの改善を進めている。

当社では、MBSEに加え、モデルベース開発(MBD)の適用も進めている。MBDとは、シミュレーション技術を取り入れた開発手法であり、モデルを用いて従来開発の各工程を改善し、品質や開発効率を上げる手法である。モデルで記述してシミュレーションを実行し、ソフトウェアコードを自動生成することも可能になる。宇宙機・衛星開発への適用も進んでいるが、将来的にはMBSEとMBDとを連携させ、開発全体をモデル化することを検討している。今後は、適用範囲を拡大していくとともに、地上システムなどを含めた総合システムへのMBSEの適用、MBDとの連携・融合を進めていく。

これらMBSE、MBDなどを含むデジタルライゼーション、さらにDX(デジタルトランスフォーメーション)は、様々な産業で推進されている。宇宙産業でも、「宇宙基本計画」(令和2年6月30日閣議決定)で、デジタル化が重要な要素であるとされている。当社の宇宙事業分野では、本稿で示してきたMBSEをデジタル化の柱と位置付けて適用を進めていく。今後も宇宙機・衛星へ継続的に適用し、設計・製造の柔軟性の向上や更なる信頼性向上、開発期間の短縮、及び低コスト化につなげていく。

## 参 考 文 献

- (1) JCOSEホームページ  
<https://www.jcose.org>