

## 地球観測センサの小型化ビジョン

東京大学大学院 工学系研究科 川島 高弘・岩崎 晃  
宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 木村 俊義・水谷 忠均

過去10年間で多岐にわたる質量約100kg以下の地球観測用超小型衛星が実現された。一方で多くの超小型衛星はデモンストレーション段階に留まり本来の目的であるコンステレーション観測に至っていない。理由として小型軽量化が強調される一方で、従来型センサと比較したセンサ性能の優劣が体系だって整理されておらず、結果として各超小型衛星の位置づけが曖昧となっている点あげられる。本稿では代表的な超小型衛星について汎用的なセンサモデルに基づくシミュレーションによりセンサ性能を検証するとともに、従来型センサと比較して維持、あるいは低下を許容する性能を整理した。その過程で小型軽量化を実現する主要技術も抽出した。分析結果に基づき各種超小型衛星を、従来型衛星との共存型、補完型、先行技術実証型に類型化し位置づけを明確にした。最後にこれら事例に基づく分析フローを地球観測センサの小型化ビジョンとして一般化した。

### 1. はじめに

過去10年間に超小型衛星に搭載された地球観測センサの技術は飛躍的に向上し、種類も高分解能光学イメージャ、雲・降雨レーダ、合成開口レーダ等多岐にわたる。第1表にセンサ種類ごとに地球観測センサ技術の実現性の推移を示す<sup>1)</sup>。2012年時点では実現性があるセンサは赤外サウンダや海色分光計等、一部に限られていたが2019年時点ではライダーを除くすべての種類のセンサが実現可能となった。なお、本稿における超小型衛星とは総質量が約100kg以下の衛星と定義される。

各種超小型衛星のデモンストレーションフライトが実現された一方で、超小型衛星の最大のメリットであるコンステレーション観測による実用化の段階に進んだ超小型衛星はPlanet DoveシリーズやCapella X-SARなどわずかにとどまっている。理由として小型軽量

化が強調される一方で、従来型センサと比較したセンサ性能の優劣が体系だって整理されておらず、結果として従来型衛星に対する超小型衛星の位置づけが曖昧である点あげられる<sup>1)</sup>。

本稿では第1表に示した中で Planet Dove、TEMPEST-D、RainCube、Capella X-SARの4つの代表的な超小型衛星について、汎用的なセンサモデルに基づくシミュレーションを行いセンサ性能を検証するとともに、従来型センサと比較して維持、あるいは低下を許容する性能を整理することにより従来型衛星に対する超小型衛星の位置づけを明確にする。

### 2. 検討の手法

超小型衛星に搭載された地球観測センサの性能と、中大型衛星に搭載された従来型の地

第1表 超小型地球観測衛星の実現性<sup>1)</sup>

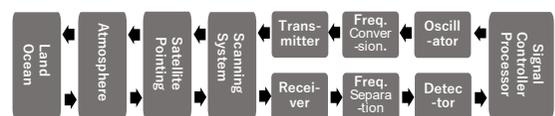
センサ種類	2012年	2019年	プロジェクト名 ( ) は打上げ年
大気化学センサ	△	○	PICASSO (2020)
赤外サウンダ	○	○	CIRAS (開発中)
雲・降雨レーダ	×	○	RainCube (2018)
地球熱輻射計	○	○	RAVAN (2016) , CSIM-FD (2018) , PREFIRE (開発中)
高分解能 光学イメージャ	×	○	Planet Dove (2013~)
合成開口レーダ	×	○	Capella X-SAR (2020) , ICEYE (2018)
マルチ・ハイパー スペクトルセンサ	△	○	AstroDigital Landmapper (2017)
マイクロ波 放射計・サウンダ	△	○	TEMPEST-D (2018) , TROPICS (2021)
ライダー	×	△	TOMCAT (構想中)
海色分光計	○	○	SeaHawk (2018)
レーダ高度計	×	○	SNoOPI (開発中)
レーダ散乱計	×	○	CYGNSS (2016)

記号の意味：○ 実現性有り (Feasible)、△ 課題がある (Problematic)、× 実現性なし (Infeasible)

球観測センサの性能を比較検討する際の手法を述べる。文献等の公知情報に基づいた異なるセンサ間の性能比較は、前提条件や算出方法等が異なるため公平に論じることが難しい場合が多い。

本稿では、公平を期すために比較対象のセンサを汎用的なセンサモデルに基づき、入射輝度等の前提条件を揃えて設計パラメーターのみ変更することによりセンサ性能のシミュレーションを行なう手法を採用した。センサ性能とセンサハードウェアの関係を示すにあたり最も直感的な方法は、観測信号の入出力フローに従ってセンサハードウェアを構成する各要素を一連の機能ブロックセットとしてセンサモデルを構築することである。このことによりセンサ性能を実現するにあたっての

クリティカル要素や小型化にあたって主要な技術を抽出することが可能となる。第1図に、受動/能動センサ、光学/電波センサに適用可能な信号の流れに沿った汎用的な機能ブロックを示す。本稿ではこれをシグナルチェーンと呼ぶ。以降、シグナルチェーンを各センサ方式に従い具体化して性能シミュレーションを実施する。なお、センサ性能を導出する数式は本稿の範囲外であるため省略する。

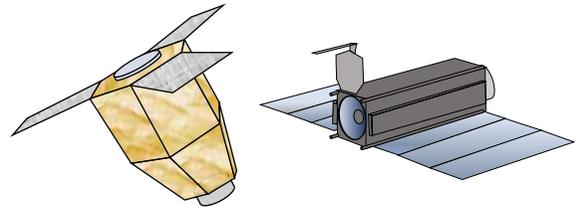


第1図 シグナルチェーン

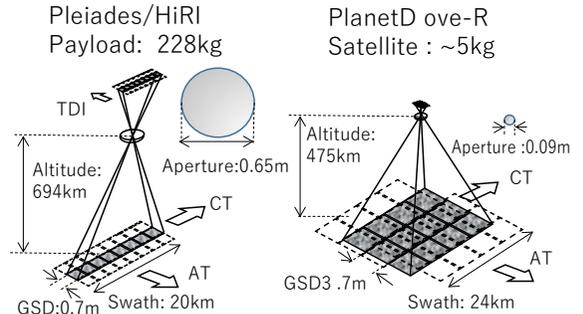
### 3. 各センサ方式における性能検討結果

3.1 高分解能光学イメージャ 超小型衛星に搭載された高分解能光学イメージャの代表例は、Planet Doveシリーズの第二世代として2018年以降に打ち上げられているDove-Rであり、対応する従来型センサの例は2011年打ち上げのPleiades/High Resolution Imager (HiRI)とした。Pleiades/HiRIの質量は228kgである一方、Planet Dove-Rの衛星全体の質量は約5kgである。衛星全体では1/100程度の大規模な軽量化が実現された。第2図に両センサの外観図を示す。第3図に両センサの観測ジオメトリを示す。走査方法に関し、Pleiadesではリニアアレイ検出器を衛星進行 (Along Track : AT) 方向に走査するプッシュブラスキャンが採用された。さらに、信号対雑音比 (SNR) を向上するため通常運用モードで13段のTime Delay Integration (TDI) 機能を有するカスタムメイドの検出器が用いられた<sup>2)</sup>。一方、Planet Dove-Rでは、民生品として一般的な2次元アレイ検出器を用いたプッシュフレームスキャンが採用されている。Planet Dove-Rの詳細な設計情報は公開されていないが、SNRを高めるために衛星の移動を考慮して9個の画像を地上処理で加算していると推定される<sup>3)</sup>。

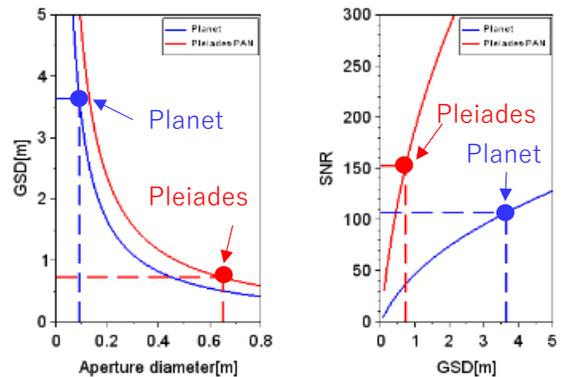
第4図 (左) に、シミュレーションに基づく地上サンプリング距離 (GSD) と有効開口径の関係を示す。便宜上、GSDは集光光学部の回折限界によって決定される地上の分解能と同じであると想定した。このためGSDは有効開口径に反比例する。Pleiades と Planet Dove-Rで設計曲線が異なる理由は衛星高度の違いに起因する。前者が高度694kmに対し後者は高度475kmである。設計曲線上の丸印がそれぞれのセンサの設計点を示し、Pleiadesでは口径0.65mに対しGSDは0.7m、Planet Dove-Rは口径0.09mに対しGSDは3.7mである。



第2図 Pleiades (左) とPlanet Dove-R (右)の外観図



第3図 高分解能イメージャの観測ジオメトリ  
左: Pleiades、右: Planet Dove-R



第4図 シミュレーションに基づく設計曲線  
左: GSDと開口の関係、  
右: SNRとGSDの関係

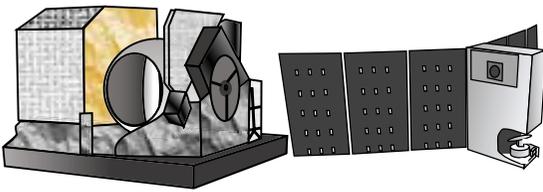
第4図 (右) は、SNRとGSDの関係を示す。前述の通り有効開口径はGSDに反比例すると想定した。有効開口径増大とGSD縮小の効果が相殺した結果、入射光子数は積分時間に比例する。積分時間はGSDを衛星対地速度で割った値である。SNRは入射光子数の平方根にほぼ等しいとみなされるため、結果として

第4図(右)に示すようにSNRはGSDの平方根にほぼ比例する。PleiadesとPlanet Dove-Rの設計曲線の違いは、主に検出器ピッチの違いによる光学系全体のスケールの違いとTDI段数(あるいはデジタル加算数)の違いに起因する。検出器ピッチはPleiadesの場合の $13\mu\text{m}$ に対しPlanet Dove-Rの場合 $5.5\mu\text{m}$ でありほぼ1/2である。第4図(右)よりPleiadesの場合はTDIにより、Planet Dove-Rの場合はデジタル加算によりいずれもSNRは100以上と満たすよう設計されていることがわかる。なお、Planet Dove-Rの場合、デジタル加算前の2次元画像の膨大な容量のデータを地上にダウンリンクする必要がある。このことが低軌道衛星としてはほぼ最速である1.7Gbpsのダウンリンクレート<sup>4)</sup>が実現された動機の一つと考える。

**3.2 マイクロ波サウンダ** 超小型衛星に搭載されたマイクロ波サウンダの代表例は2018年に打ち上げられたTemporal Experiment for Storms and Tropical Systems – Demonstration (TEMPEST-D)であり、対応する従来型センサの例は2006年打上のMeteorological Operational Satellite Program of Europe (MetOp)に搭載されたMicrowave Humidity Sounder (MHS)とした。第5図に両センサの外観図を示す。MHSの質量は63kgである一方でTEMPEST-Dの衛星質量は約14kgでありMHSの1/5程度である。第6図に両センサの観測ジオメトリを示す。TEMPEST-Dのアンテナサイズは0.07mでありMHSの0.22mの約1/3である。また、TEMPEST-Dの衛星高度は400kmであり、MHSの高度820kmの約1/2である。アンテナ小型化に伴うビーム幅の拡大と高度低下に伴うフットプリントサイズ縮小の効果が相殺され、TEMPEST-Dの直下フットプリントサイズは25kmと、MHSの18kmの1.5倍以下に

収まっている。上記の事実は、第7図(左)に示すシミュレーションに基づくフットプリントサイズと開口の設計曲線にも示されている。両センサの設計曲線の違いは高度の違いに起因する。なお、TEMPEST-Dでは衛星高度が低いため刈幅(swath)は825kmとMHSの2180kmに対し1/2~1/3である。この点は地表面のカバー率低下、ひいては時間分解能の低下につながる。

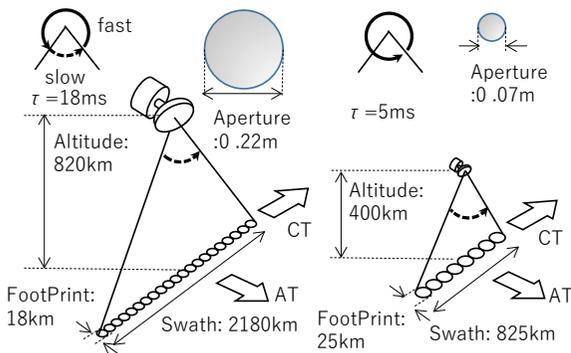
走査方法に関し、第6図に示す通りMHS、TEMPEST-Dともに衛星進行方向と直交する方向にアンテナを回転させるクロストラックスキャン方式を採用している。MHSは、視線方向が地球方向を指向している間、アンテナを低速に走査している<sup>5)</sup>。一方、TEMPEST-Dは等速走査と推定される。その結果、TEMPEST-Dでは1フットプリント当たり可能な積分時間( $\tau$ )は5msであり、MHSの積分時間18msの3分の1未満である<sup>6)</sup>。このことはTEMPEST-Dでは等価雑音温度差(NE $\Delta T$ )が大幅に増加する要因となり得る。ただし、TEMPEST-Dでは雑音指数が3.4dBと低ノイズの個体増幅器を採用し<sup>7)</sup>、周波数89GHzで使用されるマイクロ波放射計の標準的な雑音特性から推定されるMHSの5.2dBより大幅に小さい。このためTEMPEST-Dでは積分時間増大によるNE $\Delta T$ の劣化は雑音指数の改善により相殺され、NE $\Delta T$ は2.0KとMHSの1.5Kとほぼ同程度である。第7図(右)にシミュレーション結果に基づくNE $\Delta T$ と積分時間の設計曲線を示す。両センサの設計点も上記の事実を示している。なお、両センサの設計曲線の違いは雑音指数の違いに起因する。



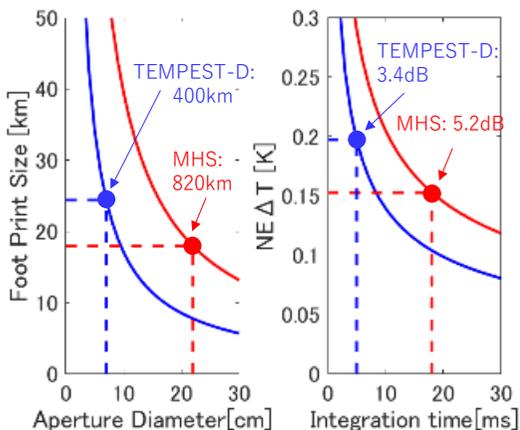
第5図 MHS (左) とTEMPEST-D (右) の外観図

MHS  
Payload: 63kg

Tempest-D  
Satellite: 14kg



第6図 MHS (左) とTEMPEST-D (右) の観測ジオメトリ



第7図 シミュレーションに基づく設計曲線  
左：フットプリントサイズと開口の関係、  
右：NE $\Delta$ Tと積分時間の関係

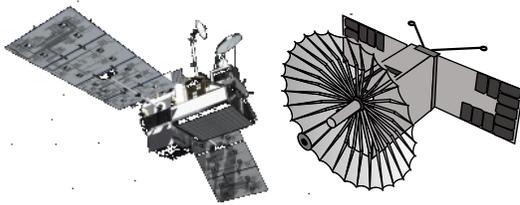
3.3 降雨レーダ 超小型衛星に搭載された降雨レーダの代表例は2018年に打ち上げられたRaincubeであり、対応する従来型センサの例は2014年に打ち上がった全球降水観測計画 (GPM) 主衛星に搭載された二周波降水レーダ (DPR) とした。第8図に両衛星の外観図を示す。DPRは降雨強度に応じてKaバンド (35.5GHz帯) とKuバンド (13.6GHz帯) の2種類のレーダで構成されている。一方、RaincubeはKaバンドのみであり強い降雨には対応していない。DPRのKaバンドレーダ質量は302kgである一方、RainCubeの衛星全体質量は5.5kgであり、DPRの約1/50であった。

第9図に両センサの観測ジオメトリを示す。RainCubeには主要な小型化技術として直径0.5mの展開型アンテナが搭載された。アンテナサイズが1.4m×1.1mであるDPR (Kaバンドレーダ) より小さいものの超小型衛星搭載用アンテナとしては比較的大きなサイズである。このためビーム幅の広がりも比較的抑えられRainCubeのフットプリントサイズは7.9kmとDPRの5kmに較べ約1.5倍に収まっている。但し、DPRはフェーズドアレイアンテナを用いて刈幅125kmにわたり電子走査を行うクロストラックスキャン機能を備えている。一方、RainCubeには走査機能自体がなく衛星直下方向のみの観測である。この点は地表面のカバー率低下、ひいては時間分解能の大幅な低下につながる。

RainCubeのレーダ送信出力は消費電力の制約から10Wであり、DPRのレーダ送信出力140Wの1/10以下である。このため検出可能な最小Z因子 (min Ze) が大幅に増大し降雨検出精度が低下する要因となり得る。対策として、RainCubeでは低い送信電力を補うために送信継続時間 ( $\tau$ ) を166  $\mu$ sとし<sup>8)</sup>、DPRの3.2  $\mu$ sと比較し大幅に拡張されている。この結果、RainCubeのmin Zeは第10図 (左) に

示すようにDPRとほぼ同じ15dBのmin Zeを実現した。なお、両者の設計曲線の違いはレーダ送信出力の違いに起因する。

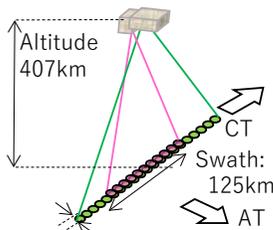
一方、送信継続時間が長いほど鉛直分解能( $\Delta Z$ )は低下する。このためRaincubeの場合、合成開口レーダで通常使用されるパルス圧縮技術を降雨レーダに適用し継続時間の増大と高い鉛直分解能を両立した<sup>8)</sup>。この結果、第10図(右)に示すようにRainCubeでは鉛直分解能250mを実現した。これはDPRの鉛直分解能500mと同等かそれ以上である。なお、両者の設計曲線の違いは通常のパルス信号か、あるいはパルス圧縮に対応したチャープ信号か、といった出力信号方式の違いに起因する。



第8図 GPM主衛星(左)とRainCube(右)の外観図

DPR  
Ka-bands ensor: 302kg

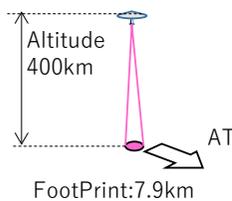
Phased array antenna  
Aperture:1.4m×1.1m



FootPrint:5km

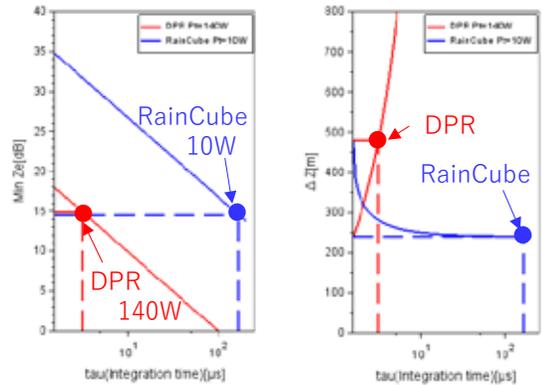
RainCube  
Satellite: 5.5kg

Deployment antenna  
Aperture:0.5m



FootPrint:7.9km

第9図 GPM主衛星(左)とRainCube(右)の観測ジオメトリ



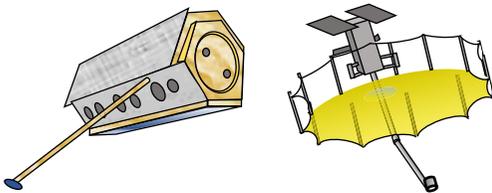
第10図 シミュレーションに基づく設計曲線  
左:送信継続時間と検出可能な最小Z因子(min Ze)の関係、  
右:送信継続時間と鉛直分解能( $\Delta Z$ )の関係

3.4 合成開口レーダ(SAR) 超小型衛星に搭載されたSARの代表例は、Capella X-SARであり、対応する従来型センサの例はTerraSAR-Xとした。第11図に両衛星の外観図を示す。TerraSAR-Xのペイロード質量394kgに対してCapella X-SARの衛星全体質量は約112kgであり、TerraSAR-Xの1/3未満である。第12図に両センサの観測ジオメトリを示す。Capella X-SARの帯域幅は500MHzであり<sup>9)</sup>、TerraSAR-Xの帯域幅300MHzより広い。このためCross Track (CT) 方向の地上分解能はTerraSAR-Xの0.85mに対しCapella X-SARでは0.5mと向上している。上記の事実は、第13図(左)のチャープ帯域幅と地上分解能(CT方向)の関係に示されている。なお、両衛星の高度はほぼ等しいため設計曲線もほぼ一致する。

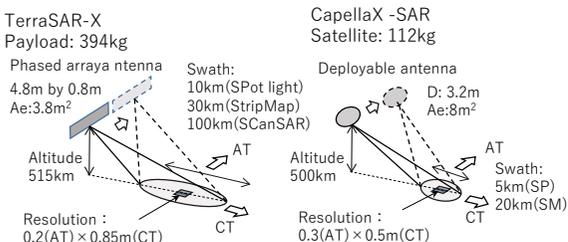
Capella X-SARでは直径3.2mの展開型アンテナを搭載しアンテナの大型化と軽量化を両立した。Capella X-SARのアンテナ面積は8m<sup>2</sup>とTerraSAR-Xの3.8m<sup>2</sup>と比較して2倍以上大きい。一方でCapella X-SARのレーダ送信出力は消費電力の制限により600Wと、TerraSAR-Xの2260Wの約1/4である。雑音等

価後方散乱係数（NESZ）の観点では大きなアンテナ面積と小さなレーダ送信出力が相殺され、Capella X-SARのNESZは約-20dBとほぼTerraSAR-Xに等しい。上記の事実は第13図（右）のアンテナ面積とNESZの関係に示されている。なお、両者の設計曲線の違いは主にレーダ送信出力の違いに起因する。

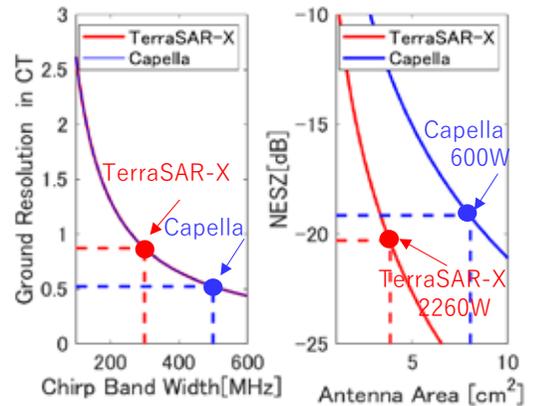
第12図に示した通りCapella X-SARのアンテナ形状は円形であり、CT方向に短い矩形のアンテナ形状を有するTerraSAR-Xと較べてCT方向のビーム幅は狭い。このためCapella X-SARのストリップマップモードにおける刈幅は20kmとTerraSAR-Xの30kmより狭い。さらに、TerraSAR-Xは電子走査が可能なフェーズドアレイアンテナを採用したためビームをCT方向に走査するスキャンSARモードがあり刈幅100kmを実現した。一方、Capella X-SARはスキャンSARモード自体が実装されていない。この点は地表面のカバー率低下、ひいては時間分解能の低下につながる。



第11図 TerraSAR-X (左) と Capella X-SAR (右) の外観図



第12図 TerraSAR-X (左) と Capella X-SAR (右) の観測ジオメトリ



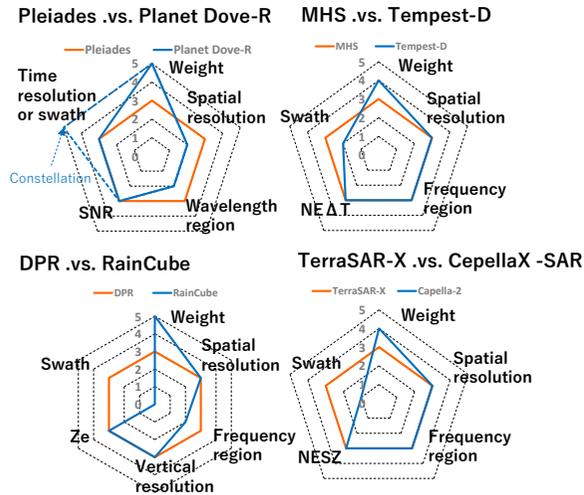
第13図 シミュレーションに基づく設計曲線  
左：チャープ帯域幅と地上分解能（CT方向）の関係、  
右：アンテナ面積と雑音等価後方散乱係数（NESZ）の関係

#### 4. 各センサの特徴

第3章で述べた分析により明らかとなった各超小型衛星搭載センサの特徴を述べる。第14図は各超小型衛星搭載センサの性能と質量を、対応する従来型センサと比較して相対的なスコアとして示したレーダチャートである。

Planet Dove-R：空間分解能を中程度の3.7mに設定し、細ピッチ検出器を用いて光学システム全体を縮小することにより大幅な小型化・質量低減を実現した。2次元画像を高速にダウンリンクし地上におけるデータ処理によりデジタル加算するプッシュフレーム撮像を実現した。このことによりSNRを従来型センサ並みに維持した。これまでのところ、Planet Doveシリーズは300機を超えるコンステレーション観測により、3.7m空間分解能で全球陸域のあらゆる箇所の画像を毎日取得可能という独自のポジションを確立している。いわば従来衛星との共存型である。

TEMPEST-D：対応する従来型センサと質量・センサ性能ともに比較的近い。アンテナ小型



第14図 超小型衛星搭載センサの特徴  
 スコアの意味：対応する従来センサの性能に対する相対値。  
 0：機能無、1：1/10以下で劣る、2：1/10～1/2の範囲で劣る。  
 3：1/2～2倍の範囲、4：2倍～10倍の範囲、5：10倍以上優れる。

化と衛星高度低下といったシステム最適化による空間分解能の維持、プリアンプ低雑音化といった漸進的な技術改良によるNEΔTの維持を実現した。対応する従来型センサと観測方式も似ているためデータの親和性も高く、従来型センサとの異種コンステレーション等が想定される。いわば従来衛星の補完型といえる。

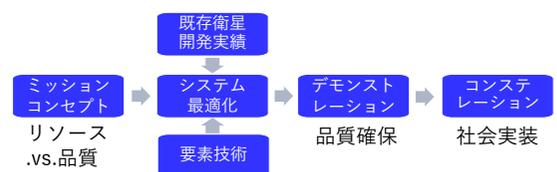
**RainCube**：展開アンテナやパルス圧縮技術など、他の分野で開発された技術を降雨レーダに新規導入することにより、大幅な軽量化と、従来型センサに匹敵する空間・垂直分解能および検出可能な最小Z因子を実現した。一方、走査機能が削除され時間分解能は大幅に低下した。観測手法を従来型センサから革新したことから将来の実用衛星への技術移行を指向した先行技術実証型といえる。

**Capella X-SAR**：展開アンテナの導入による軽量化を実現する一方、刈幅より空間分解能お

よびNESZを優先するシステム最適化を行った。特定の関心領域の撮像を重視するといった独自のポジションを確立し、Planet Dove-Rと同じく従来衛星との共存型といえる。

## 5. 小型化ビジョン

第4章まで超小型衛星の実例を分析し、センサ性能の検証と小型化技術の抽出を行い、各衛星の類型化を行った。上記の分析フローを遡ることにより第15図に示すような小型化ビジョンとして一般化することが可能である。すなわち、最初のミッションコンセプトを確立する段階で従来衛星と共存型／補完型／先行技術実証型といった位置づけを明確にし、リソース制約下で維持あるいは低下を許



第15図 地球観測センサの小型化ビジョン

容するセンサ性能仕様（品質）を決定する。仕様を実現すべく従来衛星の開発実績を利活用しながらシステム最適化を行い、必要に応じて小型化のための新規要素技術を導入する。そしてデモンストレーションフライトによりセンサ性能を実証（品質確保）し、コンステレーション観測により社会実装を実現する。このようにミッション構想段階において社会実装まで見越した戦略を立てることが超小型衛星を地球観測の体系に組み込むにあたって重要である。

## 6. まとめ

本稿では代表的な超小型衛星に搭載された地球観測センサの性能について汎用的なセンサモデルに基づくシミュレーションにより検証し従来型センサと比較した。その結果、従来型センサと比較し維持あるいは低下を許容するセンサ性能が明らかとなった。また、上記の過程で小型化を実現する主要技術も抽出した。分析結果に基づき各種超小型衛星を、従来型衛星との共存型、補完型、先行技術実証型に類型化し位置づけを明確にした。最後にこれら実例に基づく分析フローから、超小型衛星を社会実装するにあたっての小型化ビジョンとして一般化した。

## 謝辞

本研究は国立研究開発法人連携講座フロンティア宇宙工学研究拠点（地球観測センサ科学研究拠点）の資金で実施した。本講座の運用および支援を頂いている関係各位に深謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Stephens, G. et al., 2020. The Emerging Technological Revolution in Earth Observations, Bulletin of the American Meteorological Society, 101, 3, E274-285
- 2) G. Blanchet et al., PLEIADES-HR INNOVATIVE TECHNIQUES FOR RADIOMETRIC IMAGE QUALITY COMMISSIONING, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIX-B1, 2012
- 3) Aati, S. et al., 2020. Optimization of Optical Image Geometric Modeling, Application to Topography Extraction and Topographic Change Measurements Using PlanetScope and SkySat Imagery. Remote Sens., 12, pp. 3418.
- 4) Devaraj, K., The Cubesat With One Of The World's Fastest Satellite Radios, B14, 2019 <https://www.planet.com/pulse/b14-the-cubesat-with-one-of-the-worlds-fastest-satellite-radios/>
- 5) ESA, 2006. MHS scanning principle, [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2006/06/MHS\\_scanning\\_principle](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2006/06/MHS_scanning_principle)
- 6) Berg W. et al., Calibration and Validation of the TEMPEST-D CubeSat Radiometer, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59, 6, pp. 4904-4914, 2021
- 7) S. Padmanabhan et al., TEMPEST-D Radiometer: Instrument Description and Prelaunch Calibration, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59, 12, pp. 10213-10226, 2021
- 8) Peral E. et al., RainCube: the first ever radar measurements from a CubeSat in space, J. of Applied Remote Sensing, 13 (3) , 032504, 2019
- 9) CAPELLA SPACE, 2020. SAR SYSTEM PERFORMANCE, ver.2.0, [https://vekom.com/wp-content/uploads/2020/12/Capella\\_Space\\_SAR\\_System\\_Performance.pdf](https://vekom.com/wp-content/uploads/2020/12/Capella_Space_SAR_System_Performance.pdf)