

論文の内容の要旨

論文題目 衛星による災害観測能力の総合的評価手法の提案と
それに基づくコンステレーション設計に関する研究
氏名 中村 太一

衛星による災害観測（以下、衛星災害観測）は、航空機等と同様、上空から被災状況を俯瞰できる重要な情報源である。発災後応急対応時の被害把握に加え、復旧・復興、予防・減災のあらゆるフェーズにおいて活用可能で、国際災害チャータや陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS: Advanced Land Observation Satellite）による防災利用実績も蓄積されている。

その一方で2011年3月11日14時46分に発生した東日本大震災では、災害状況の把握に時間を要し、地上での情報空白を衛星観測により埋めるには至らなかった。図1に示すように、発災後の衛星観測実績によれば、発災からデータ公開迄に概ね2日を要している。

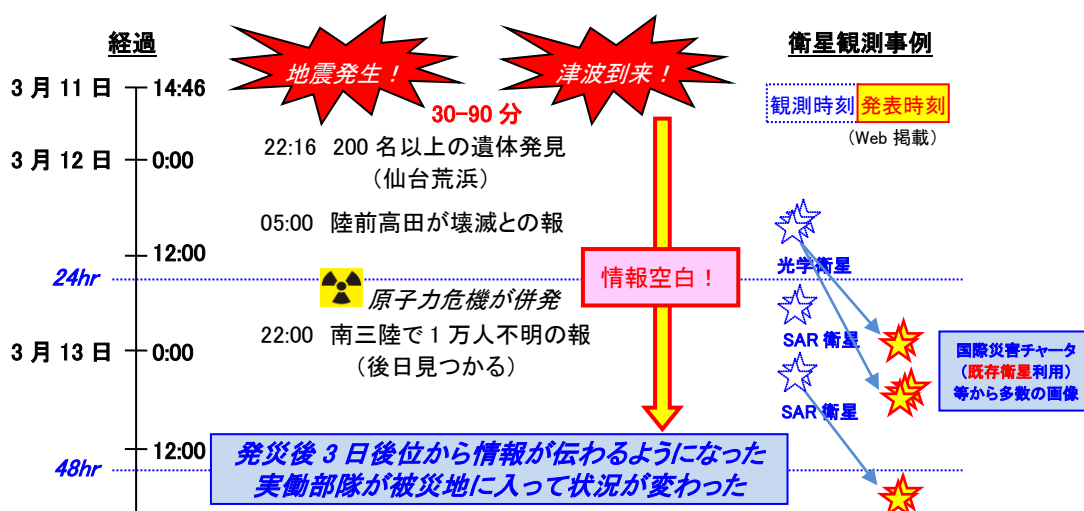


図1 東日本大震災における地上被害と衛星観測のタイムライン (抜粋)

本来衛星観測は、災害時の地上壊滅状況下でも継続観測できることが利点とされるが、それにも関わらず情報空白が生じた要因としては、衛星災害観測の大部分が他の利用用途のために最適化された既存衛星に相乗りして実施されていること、逆に言えば応急対応フェーズにおける情報空白期間短縮という最重要課題に「最適な」衛星活用の議論が、これまで十分にはなされてこなかった点が大きいと考えられる。

本研究では、この応急対応フェーズにおける観測衛星コンステレーションの「最適性」を論じるため、衛星による観測能力と地上での情報抽出能力を総合的に評価するための指標として、「サービサビリティ関数」の導入を提案する。

サービサビリティ関数は、「対象地域上の一地点で一定規模以上の災害が発生した際、被災地域上空に所定時間内に衛星が飛来・観測して、そこに分布する被災箇所を特定する

可能性」として定義される。即ち、被災地点: \mathbf{r}_d を発災後経過時間: t_d までに観測する可能性を表す「被災地域観測確率」: P と、被災箇所の特定可能性を表す観測データの「視認性・判読性効果係数（以下、視認性係数）」: \mathbf{v} の関数: S として、サービスバビリティ: s は、

$$s = S(P(\mathbf{r}_d, t_d), \mathbf{v})$$

と表される。その算出は、図2における、1)軌道力学に基づく衛星ターンアラウンド時間の計算に加え、2)空白時間に相当する地上所要時間や、3)その他の確率(晴天率や衛星信頼度)、更に4)0~1の値で表す視認性係数を反映することにより、モンテカルロシミュレーションによって求めることができる。

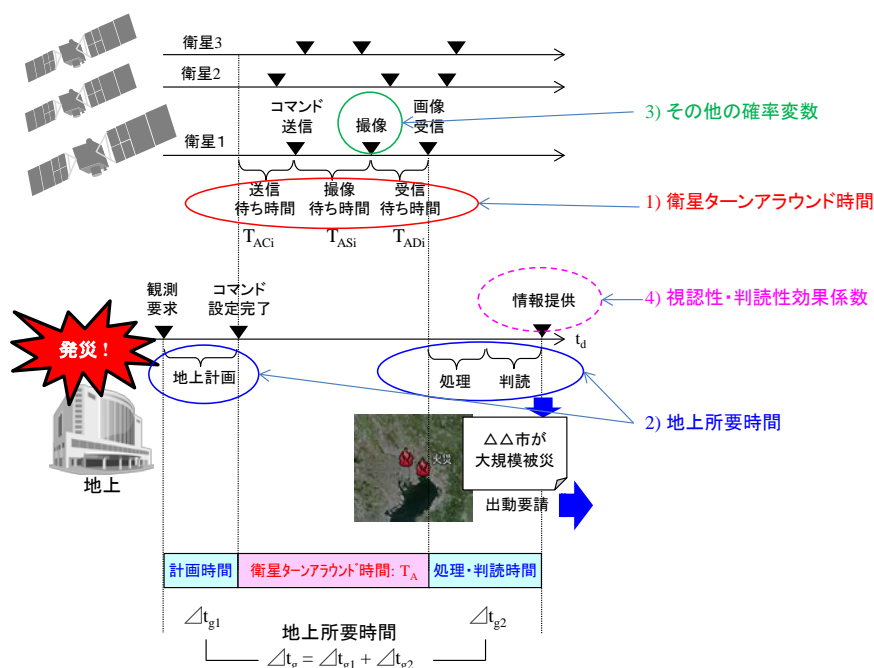


図2 サービスバビリティの計算に関わるパラメータ

以上の準備の下に、サービスバビリティを指標としたコンステレーションのトレードオフを行い、本関数を用いた最適解の導出が可能であることを具体例により示す。検討対象としては、応急対応フェーズへの適用のため、全天候且つ昼夜使用可能な合成開口レーダ(SAR)衛星による災害発生検知を想定し、広い観測入射角を有する「だいち2号」(ALOS-2)相当をモデルとした。また、ベンチマークとしては、これまでの中央防災会議や宇宙開発委員会等の議論も踏まえ、発災6時間後における対象地点でのサービスバビリティ値として、0.8以上(「 $s \geq 0.8 @ 6h / \text{東京}$ 」の如く表記)を到達目標とした。その上で、図3に示すように、最適コンステレーション構築プロセスとして、代表地点での検討を複数地点範囲に広げ、更に対象地域における地形特性の考慮、という順序で段階的に絞込みを行った。

尚、ここでの「最適化」とは「複数の候補コンステレーションのパラメトリック評価を通じ、最も有効性の高いものを抽出するプロセス」を意味する。結果は以下の通りである。

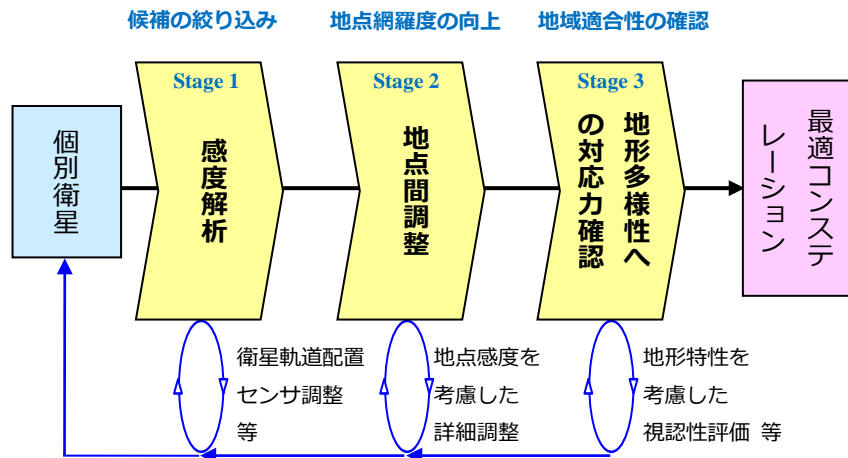


図3 最適コンステレーションの構築プロセス

Stage1: 感度解析

東京を代表地点とし、ベンチマークを達成する機数として①太陽同期準回帰コンステレーションによる4機を算出。更に同じく4機の組み合わせとして、②2機を傾斜軌道にした場合、及び③4機とも傾斜軌道とした場合、についても軌道面等に対する感度を調べ、6時間後サービスサビリティに基づき候補コンステレーションを抽出した。

Stage2: 地点間調整

上記候補ケースについて、日本域を対象に東京、札幌、那覇の3地点を網羅した評価を実施。特に傾斜軌道については地点緯度に対する最適軌道傾斜角も精査した。この結果、6時間後サービスサビリティの3地点平均が0.9を超え、且つALOS-2アーカイブの適用性も担保される太陽同期2機と傾斜軌道2機のケースを選定した。

Stage3: 地形多様性への対応力確認

上記選定ケースに対し、山地の多い日本域での対応力の確認を次の2つの方法で実施。1)山地区間では衛星軌道に平行する方向の観測は視認性が半減するとの前提を置き、視認性係数に反映する方法、2)山地の傾斜度と影の発生度合い、及び許容される倒れ込み率を勘案し、ビーム範囲を制限する方法、いずれの場合もサービスサビリティ0.8を上回るまでに6時間を若干超えるものの、対応力の範囲内であると判断した。

尚、同様のプロセスにより対象をアジア域に広めた場合の最適コンステレーションの絞り込みについても併せて検討を行った。

図3のプロセスは、対象ミッションに応じた各Stage検討における詳細度の調整や、前段のStage、或いは最初的前提条件（個別衛星仕様等）に立ち戻る自由度を有しており、サービスサビリティを評価関数とした最適コンステレーションの構築フレームワークとして活用可能なものである。

上記の検討に加え、更にこのようなサービスサビリティ関数による評価が、各種災害対応

においても発展的に活用可能であることを、災害対応ワークフローに基づく各段階の観測ニーズの実現性検討として示した。上記までの検討(被災箇所の検知)を STEP1 とすれば、次の段階は救援ルート確保 (STEP2)、救助・救援活動 (STEP3) と続く。これらの各 STEP における必要分解能と、対応する既存衛星仕様等に基づき、サービスサビリティによる解析結果を示した。この結果、サービスサビリティが 0.8 を超えるには、STEP2 において 9 時間 (分解能 1m 級商用 SAR 相当衛星)、乃至 24 時間 (ALOS3 相当光学衛星) を要し、STEP3 では 48 時間 (分解能 0.3m 級商用光学相当衛星) を要するとの結果を得た。これによれば、SAR 衛星の場合には災害対応ワークフローの時間軸に適合し得るが、光学衛星の場合には他の観測手段との分担 (発災時の衛星配置や天候条件等による) を基本とするのが適切と言える。

またこの検討において、各 STEP における観測ニーズを視認性に関する既存の指標(NIIRS) と対応付けて整理し、更にこれを視認性係数モデルに反映する考え方についても示した。

サービスサビリティの応用検討としては、従来実施されてこなかった既存衛星と小型衛星の組み合わせトレードオフへの適用方法を示した。結果の一例を図 4 に示す。図は、上記にて選定した太陽同期 2 機と傾斜軌道 2 機のケースにおいて、傾斜軌道衛星を多数の (性能の制約された) 小型衛星で置き換えるに必要な機数を、サービスサビリティを評価関数として算出したものである。この結果から、更に既存衛星の場合と同等サービスサビリティを得るための小型衛星のコスト目標も併せて算出した。

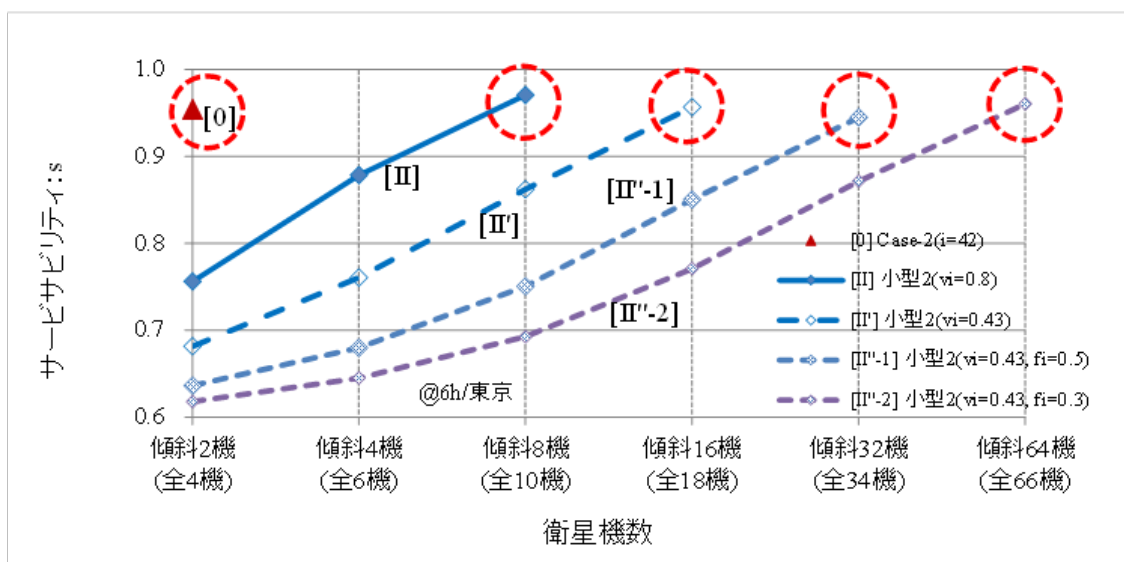


図 4 小型衛星組み合わせ時のサービスサビリティ

以上によって、サービスサビリティ関数の導入により、災害観測を目的とした衛星コンステレーションの最適化検討が可能となること、更にこれを発展、応用することで各種災害対応検討や、小型衛星を含むトレードオフやコスト目標設定へと結び付くことが示された。