

被災状況把握のための効率的な調査計画立案に向けた取り組み

鈴木大和・野呂智之・神山嬢子・阪上雅之・國友 優

1. はじめに

平成23年3月東北地方太平洋沖地震や平成28年4月熊本地震では、広域にわたって多数の土砂災害が発生し、その発生状況の把握のための調査に相当の時間を要した^{1),2)}。被災状況を早期に把握することは、救助・捜索活動、応急対策等への人材、資機材、技術等をどの程度どこに投入するか判断にとって極めて重要である。

最近の防災分野では、従来の航空機やヘリコプター（以下「航空機等」という。）による調査に加えて人工衛星の利用も進められ、夜間や悪天候時にも使用可能な合成開口レーダ（以下「SAR」という。）の研究開発が進み、災害時の活用実績が増えてきている³⁾。このように、災害時の初動調査に利用できるリモートセンシング技術は多様化しつつあるが、使用可能な機器（以下「リソース」という。）の数には制限があり、観測に適した条件やタイミングは使用する技術によって異なるため、それらを効率的に統合運用することは特に大規模災害時の混乱した状況下では困難である。

一方、これまで我が国の建設分野においては、生産性向上のために必要な重機等の数、サイクルタイム等をもとに、工程を計画・管理する技術が構築されてきた。特に、最適な機材の配置や生産工程の分析等の技術⁴⁾は、各種リモートセンシング技術のオペレーション（以下「調査計画」という。）を考える際に有効である。したがって、被災状況把握のための調査においても戦略的な計画を作成し、その進捗管理をすることで迅速に被災状況を把握することができると考えられる。

そこで本稿では、従来の防災分野であり考えられてこなかった着想を持って、大規模災害発生直後の調査における生産性向上を目的とした効率的な調査計画を立案するためのアルゴリズムを試作し、かつその計画をスケジューリングするため

の「調査計画立案支援システム（Mission Planning Support System、以下「MiPSS」という。）」の開発を試みたので、その内容について報告する。

2. 調査計画立案アルゴリズム

2.1 アルゴリズム設計の基本

一般的に大地震等が発生した直後に被害が生じている恐れのある箇所を正確に推定し、ピンポイントで調査対象地域を決定することは困難であり、現状では被害を引き起こす可能性が高いと考えられる外力を受けた範囲を調査対象地域として、網羅的に調査する方法を採用するほかない。このような方法で調査する場合には、まず一定の外力を受けた範囲全体を探索する必要がある。このため、ここでは最も早く調査対象地域全体を観測することを最適（使用するセンサは大規模な崩壊地を把握可能な概ね10m以下の分解能であるセンサを基本としつつ、観測にかかるコストは考慮しない。）とした。すなわち、極力重複することを避けて空白範囲を埋めることを優先する考え方を調査計画立案アルゴリズム設計の基本とした。

2.2 各センサと各プラットフォームの特性

観測に用いるセンサは光学観測・SAR観測（以下「センサ」という。）があり、更にそれらセンサを搭載するプラットフォームには人工衛星・航空機等（以下「プラットフォーム」という。）がある。センサやプラットフォームによって観測に適した条件や特徴があるため、各特性を踏まえた調査計画の効率性を確保する必要がある。

表-1にセンサの特性を示した。光学観測は画像の視認性が良いため判読も容易であるが、夜間や悪天候時には使用できない。SAR観測は時間帯や気象の影響を受けないが、画像の判読に専門技術と時間を要する。

次に、各プラットフォームの特性について整理した結果が表-2である。人工衛星は一度に広域を観測することが可能であるが、軌道位置により観測できるタイミングがある。航空機等は観測範囲

が限定的であるが、機動性に優れている。

したがって、天候が良好な日中の場合には、センサ種別を問わず人工衛星を最大限に利用しつつ、人工衛星が観測できない地域を航空機等で補完することが最も望ましく、悪天候あるいは夜間の場合には、SARを搭載した人工衛星により観測を行い、残った地域についてはSARを搭載した航空機等により観測することが最適と考えられる。

表-1 センサの特性

種別	夜間や悪天候による影響	観測画像の視認性
光学観測	× 使用不可	○ 判読が容易
SAR観測	○ 影響なし	△ 判読に技術が必要

表-2 プラットフォームの特性

種別	撮像範囲 (km ² /min)	観測開始所要時間	夜間や悪天候による影響
人工衛星	○ 約20,909※1	△ 軌道に依存	○ 影響なし
航空機等	△ 約37※2	○ 高い機動力	△ 空港の状況次第

※1 ALOS-2を対象として周回速度と搭載センサの観測幅より算出
 ※2 Gulfstream-II を対象として観測時速度と搭載センサの観測幅より算出

2.3 調査計画立案アルゴリズムの構築

以上の結果を踏まえて、調査計画立案アルゴリズムの試作版を構築した (図-1)。

はじめに、調査計画の基本となる発災日時・計画範囲・計画期間を入力する。次に、入力した計画基本情報をもとに、センサおよびプラットフォームの選択の判断に資する環境条件および観測機器情報を取得する。取得した気象状況と暦の情報をもとに、光学観測が可能か否かを判断し、光学観測が可能な場合はセンサ種別を問わず使用可能なプラットフォームを最大限に動員し、光学観測ができない場合にはSARを搭載したプラットフォームに限定した計画を行う。

いずれの場合も、最初に人工衛星の軌道情報を基にした人工衛星の観測機会および観測可能な範囲を検索する。検索結果から決定者の意志決定により人工衛星による観測地域を決定する。人工衛星により観測できない地域が存在する場合には、その地域を航空機等の観測によって補完する。

以上のプロセスにより得られた調査計画を遂行する上での各タスクのクリティカル・パスを計算し、計画全体終了の見込み時刻を把握する。この結果、再計画の必要性がない場合には、観測要求により得られた観測結果の判読を行い、土砂災害が発生している恐れのある場所が特定される。

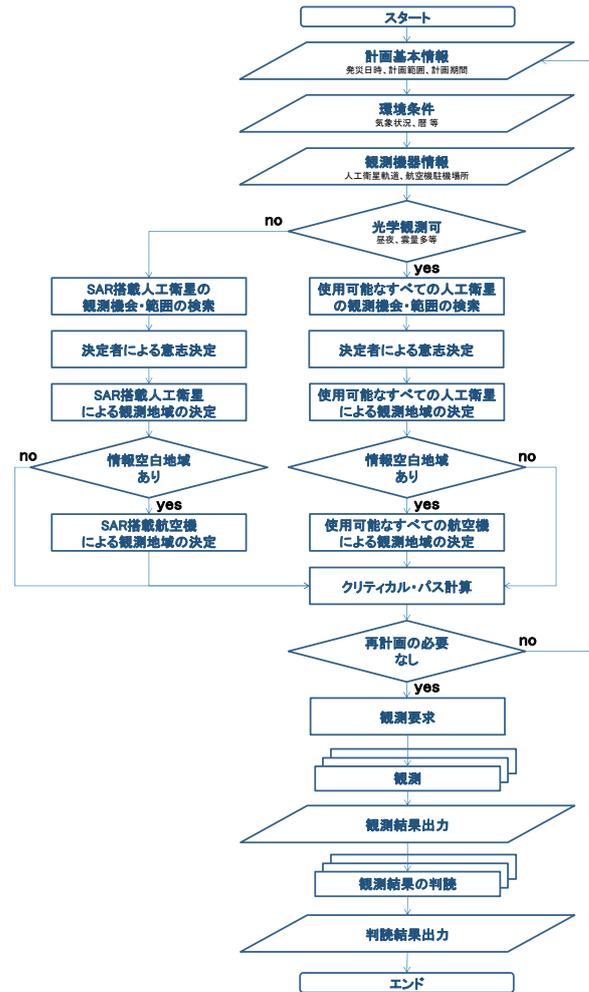


図-1 調査計画立案アルゴリズム (試作版)

3. MiPSS (試作版) の開発

3.1 システムの概要

図-1に示した調査計画立案アルゴリズムのうち、MiPSSが処理する範囲は、「計画基本情報」の入力から「クリティカル・パスの計算」までであり、順に「機会検索」、「タスキング支援」、「全体スケジュールリング」の各ツールにより処理を実行する。

3.1.1 機会検索ツール

プラットフォームが人工衛星であるセンサによる観測の機会検索を行う。発災日時、計画時間をテキストで入力し、計画範囲を読み込む。環境条件の情報と観測機器情報をもとに、対象とするプラットフォームに関する情報を選択もしくは入力する。公開されている人工衛星軌道情報を自動取得し、計画範囲に対する観測機会と範囲について数値的な計算により簡易検索を行う。この簡易検索結果や使用可能とした航空機とその駐機場所に関する情報等が含まれたパラメータファイルを出力する。なお、センサおよびプラットフォームに

関する情報は、平常時から初期値を最新の状態としておくことが望ましいが、変則的な運用を行うことも踏まえて手動入力に変更可能としている。

3.1.2 タスキング支援ツール

軍事的な軌道計算や空間解析・モデリング処理を得手とするソフトウェアである「Systems Tool Kit (米国AGI社が無償提供しているプログラム。以下「STK」という。)」をカスタマイズして各プラットフォームによる観測機会と範囲を視覚的に検討する(図-2)。利用しやすいようにカスタマイズされたSTKに、機会検索ツールより出力されたパラメータファイルを読み込む。計画範囲に対して人工衛星の観測開始時刻および終了時刻とその範囲を検索する。検索結果は二次元平面上とリストにより表示され、その中から任意の観測モードをリスト上で選択し、人工衛星による観測地域の決定を行う。その後、人工衛星だけでは観測しきれない地域がある場合には、航空機による観測範囲を指定する。積載している燃料を考慮した航続時間や離発着時刻と空港の運用時間に矛盾がない場合は、その範囲を航空機による観測地域として決定する。決定した観測計画の結果をファイルとして出力する。

3.1.3 全体スケジューリングツール

クリティカル・パス計算を行う「全体スケジューリングツール」により調査計画の各タスクのスケジューリングを検討する。STKより出力したファイルを「全体スケジューリングツール」に読み込む。予め整理した各機器の観測要求の締切り時間、データ取得までに所要する時間、判読にかかる時間等の各タスクのクリティカル・パスの計算を行う。計算結果から、遅延要因になり得るタスクを可視化して把握できるようにガントチャートで表示する(図-3)。

4. MiPSSによるシミュレーションの試行

4.1 想定災害のシナリオ

平成28年11月18日7時に大規模な地震が発生した場合を想定する。想定する地震は「南海トラフの巨大地震モデル検討会」が公表した地表震度分布図の中で最も大きな被害が想定されている陸側ケースとし、そのうち大規模な土砂災害が発生している可能性が高いと考えられる震度6弱以上の地域を計画範囲とした⁵⁾。発災日は関東以西の大

部分が厚い雨雲に覆われているためにSAR観測のみを適用する。これらの条件のもとで、早期に被災状況全容を把握するために発災から24時間を計画期間とした。

4.2 使用可能なプラットフォームとセンサ仕様

本シミュレーションに使用するプラットフォームとその諸元について表-3に示す。SAR搭載型人工衛星7基とSAR搭載型航空機1機である。

航空機は名古屋空港に駐機し、発災してから2時間後に離陸し、着陸後データの回収や給油等に2時間要した後、次の観測のための離陸ができることとした。なお、非常時のため航空機と空港のいずれも24時間運用可能と想定している。

表-3 使用するリソースの諸元

種別	機種名	運用	観測モード ^{※1}	数量	観測幅	センサ分解能
SAR 搭載型 人工衛星	ALOS-2	日本	STRIPMAP U2およびU3	1基	50km	3m
	TerraSAR-X	ドイツ	STRIPMAP strip_007~014	1基	30km	3m
	RADARSAT-2	カナダ	Wide-Fine FOW1~FOW3	1基	150km	8m
	COSMO-SkyMed	イタリア	Stripmap Himage H4-04~H4-19	4基 ^{※2}	40km	5m
SAR 搭載型 航空機	Gulfstream-II	日本	Pi-SAR2を搭載	1機	10km	0.3m

※1 斜面の解析に適した入射角(30°~55°程度)に限定
 ※2 COSMO-SkyMedは同じ軌道上を異なる4基が周回

4.3 シミュレーション結果

人工衛星軌道情報から計画時間内に観測できる時間と地域を自動検索した。その結果、発災後約5時間後にALOS-2により九州地方東岸から紀伊半島西側までの範囲のうち50km幅の地域を観測することが可能であり、その約5時間後にはRADARSAT-2が四国地方東側から静岡県西側の範囲のうち150km幅の地域を観測できる。さらにその約1時間後に、TerraSAR-Xが紀伊半島全域のうち30km幅の地域を観測できることが分かった。これ以降、計画期間内に観測する人工衛星は存在しないため、重なりを最小として、より広域を観測することを優先して観測地域を決定した(図-2)。人工衛星による観測のみでは計画範囲を網羅することができないため、人工衛星による観測と並行してGulfstream-IIによる観測を試行した。まず、観測開始までの移動距離が短い(同じ航続時間の場合、より多くの面積を観測することが可能。)愛知県および静岡県沿岸地域を発災直

後の約6時間で観測する。名古屋空港に戻った後、2時間の駐機後に、観測できていない地域の中で航続可能時間内により多くの面積を観測することができる四国の南東地域を約6時間かけて観測することとした(図-2)。しかしながら、九州地方の予想被災地域については把握することができないため、計画時間を延長して再計画を行う必要があるという結果になる。

この調査計画のクリティカル・パス計算を行った結果、ALOS-2が撮像した範囲については、発災から10時間後(18日17時)に判読結果が出力できる予定であり、計画立案時点では観測注文締切まで1時間の余裕があることがわかる(図-3)。



図-2 シミュレーション結果

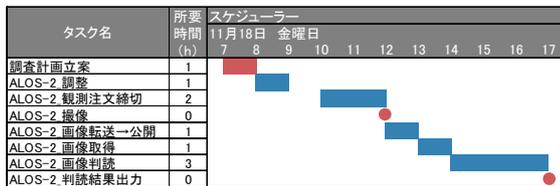


図-3 調査計画スケジュール (ALOS-2の一例)

5. おわりに

本稿ではリモートセンシング技術の効率的な統

合運用のため調査計画立案アルゴリズムを検討し、大規模災害時の初動調査を迅速に遂行するためMiPSSを試作した。

試作したMiPSSによりシミュレーションを行った結果、条件とした時間内に使用を想定した現在のリソースでは大規模災害発生時に対応できない可能性が示された。不測の自然災害に備えるためには、リソースを増強することと合わせて、撮像データの回収や判読スピードの向上などの時間短縮に向けた工夫とともに、判読精度の向上を図っていくことが必要である。また、より効率的な調査計画を立案するため、合理的な意志決定を数学的に導出する方法を研究する「オペレーションズ・リサーチ」を応用して、より効率的なアルゴリズムへの改良を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 国土交通省砂防部(今後の土砂災害対策を考える会): 東日本大震災を踏まえた今後の土砂災害対策のあり方(案)、http://www.mlit.go.jp/river/sabo/kongo_dosyasaigai.html, 2011
- 熊本県土木部砂防課: 土砂災害の被災状況について【被害概要版】平成28年熊本地震、2016
- 国土交通省国土技術政策総合研究所: 単偏波の高分解能SAR画像による河道閉塞箇所判読調査手法(案)、国総研資料第760号、2013
- 加藤雅樹、山田裕通、相澤りえ子: 製品在庫を中心とした生産システム全体の効率化およびコスト削減、オペレーションズ・リサーチ学会2010年春季研究発表会、pp.68~69、2010
- 内閣府(南海トラフの巨大地震モデル検討会): 地表震度分布陸側ケース、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120905_10.pdf, 2012
- 阪上雅之、國友優、松下一樹、鈴木大和、小川智也、吉川和男、彦坂修平、平松敏史: 災害時初動調査計画へのOR手法導入の試み、平成28年度砂防学会研究発表会概要集A、pp.42~43、2016

鈴木大和



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室研究員
Yamato SUZUKI

野呂智之



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室長
Tomoyuki NORO

神山嬢子



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室主任研究員
Joko KAMIYAMA

阪上雅之



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室交流研究員
Masayuki SAKAGAMI

國友 優



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室長、現 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課河川情報企画室長
Masaru KUNITOMO