

博士論文

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

中 村 太 一

博士論文

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

2016年5月

中 村 太 一

目次

1. 序論	1
1.1 衛星災害観測の概観	3
1.2 衛星災害観測における課題	12
1.3 本研究の目的	16
1.4 本論文の構成	17
2. サービスサビリティ関数の導出	19
2.1 サービスサビリティ関数の定義	21
2.2 サービスサビリティを構成するパラメータ	22
2.3 サービスサビリティの算出	26
2.4 主要パラメータ算出にあたっての前提条件	27
3. 感度解析	33
3.1 前提条件	35
3.2 太陽同期準回帰軌道: Case-1	38
3.3 太陽同期軌道と傾斜軌道の組合せ: Case-2	42
3.4 全て傾斜軌道の場合: Case-3	48
3.5 感度解析結果のまとめ	49
4. 最適コンステレーションの構築	51
4.1 最適コンステレーションの構築プロセス	53
4.2 日本域における最適化	55
4.3 アジア域における検討	72
5. 災害対応におけるバリエーション	77
5.1 災害観測に必要な視認性レベル	79
5.2 災害対応ケーススタディ	84
5.3 視認性のモデル化と向上策	95
6. サービスサビリティの応用	101
6.1 小型衛星との組み合わせ検討	103
6.2 コストモデルとの組み合わせ	109

7. 結論	115
7.1 結論	117
7.2 今後の展望	118
謝辞	121
参考文献	123

目次

図 1.1-1	災害サイクルと衛星情報の活用	3
図 1.1-2	電磁波の波長帯による呼称	4
図 1.1-3	マイクロ波のバンド名と周波数・波長	4
図 1.1-4	代表的な災害観測衛星	4
図 1.1-5	災害時における GIS の利用概念	6
図 1.1-6	国際災害チャータの発動手順	7
図 1.1-7	国際災害チャータによるネパール地震の観測・解析例	8
図 1.1-8	アーカイブ画像との差分抽出による被災箇所把握のコンセプト	9
図 1.1-9	小笠原硫黄島の地殻変動解析事例	10
図 1.1-10	水害時の浸水範囲に関する実証実験の例	10
図 1.1-11	土砂災害に関する解析事例	11
図 1.2-1	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）	14
図 1.4-1	各章の記述関係	17
図 2.2-1	サービサビリティ関数に関するパラメータの系統関係	22
図 2.2-2	サービサビリティ関数に関するパラメータの空間上の関係	23
図 2.2-3	時間軸における各パラメータの位置付け	24
図 2.3-1	モンテカルロシミュレーションによるサービサビリティの計算	26
図 2.4-1	観測可能距離の例	29
図 2.4-2	観測幅と被災距離、観測目標誤差の関係	30
図 2.4-3	画素数と検知確率の関係	32
図 3.1-1	ノミナルケース（ALOS-2 相当機 1 機のケース）	37
図 3.2-1	LST12:00 におけるサービサビリティ	39
図 3.2-2	LST6:00/12:00 におけるサービサビリティ	40
図 3.2-3	4 機ケースにおける LST 組合せとサービサビリティの関係	40
図 3.2-4	1 機、2 機、4 機の場合の LST 分散ケースにおけるサービサビリティ	41
図 3.2-5	衛星機数/LST とサービサビリティ（Case-1）	41
図 3.3-1	軌道面相対角（軌道面差）のイメージ	43
図 3.3-2	軌道面差とサービサビリティ（時間軸グラフ）	44
図 3.3-3	軌道面差とサービサビリティの関係	44
図 3.3-4	衛星高度と観測可能距離	45
図 3.3-5	軌道高度とサービサビリティ（Case-2）	47
図 3.3-6	軌道高度とサービサビリティ（Case-2）の時間応答	47

図 3.4-1	軌道面差とサービスサビリティの関係 (Case-3)	48
図 3.5-1	Case-1~3 の代表ケース	49
図 3.5-2	地上所要時間に対する感度	49
図 4.1-1	最適コンステレーションの構築プロセス	53
図 4.2-1	Case-2: 太陽同期 2 機+傾斜軌道 2 機における軌道傾斜角の影響	56
図 4.2-2	Case-3: 傾斜軌道 4 機における軌道傾斜角の影響	57
図 4.2-3	日本域候補ケースによる 3 地点での時間軸波形	59
図 4.2-4	衛星視野と陰および倒れ込みの関係	60
図 4.2-5	山岳地形による道路画像の遮蔽例 (高知自動車道)	61
図 4.2-6	視認性係数を用いた地形多様性への対応力の評価	69
図 4.2-7	地形多様性への対応力 (時間軸グラフ)	71
図 4.3-1	アジア域におけるサービスサビリティ	73
図 4.3-2	7 地点解の地形多様性への対応力	75
図 4.3-3	6 地点解の地形多様性への対応力	75
図 4.3-4	9 時間後サービスサビリティでの評価例	76
図 5.1-1	災害応急対応フェーズワークフローと観測ニーズ	80
図 5.1-2	NIIRS 対応画像の例	82
図 5.2-1	STEP1 対応: Case-2($i=42$) サービスサビリティ	84
図 5.2-2	2015 年 9 月常総水害時の観測例	85
図 5.2-3	浸水域の実測による浸水予測シミュレーション精度向上の概念	86
図 5.2-4	商用 SAR (分解能 1m 級) 相当衛星によるサービスサビリティ	89
図 5.2-5	分解能とポインティング: ALOS-3 相当衛星	90
図 5.2-6	ALOS-3 相当衛星によるサービスサビリティ	91
図 5.2-7	分解能とポインティング: 商用光学 (分解能 30cm 級) 相当衛星	93
図 5.2-8	商用光学 (分解能 30cm 級) 相当衛星によるサービスサビリティ	93
図 5.2-9	災害対応 STEP1~3 に対応したサービスサビリティグラフの纏め	94
図 5.3-1	検知確率 P_{∞} と視認性係数 v_i のモデル化	96
図 5.3-2	Case-2(42) の NIIRS を一段階落とした場合のサービスサビリティ	97
図 5.3-3	発災前後のデータ提供の関係 (SAR 観測の事例)	98
図 6.1-1	想定する小型衛星の観測パラメータ	104
図 6.1-2	小型衛星組み合わせ時のサービスサビリティ【想定条件 1】	104
図 6.1-3	小型衛星組み合わせ時のサービスサビリティ【想定条件 1、2】	106

図 6.1-4	小型衛星組み合わせ時のサービスビリティ【想定条件 1、2、3】	107
図 6.2-1	単位コストあたりのサービスビリティ【適用例 1】	110
図 6.2-2	単位コストあたりのサービスビリティ【適用例 1、2】	111
図 6.2-3	小型衛星の寿命とコスト上限の関係	113

表目次

表 1.1-1	主な観測衛星の事例（光学衛星）	5
表 1.1-2	主な観測衛星の事例（SAR 衛星）	5
表 1.2-1	東日本大震災における行政対応と衛星観測のタイムライン	13
表 2.4-1	過去災害分析に基づく観測幅の目安	30
表 2.4-2	検知・認識・識別(DRI)の概念	31
表 3.1-1	衛星モデル・地上局モデル	35
表 3.1-2	サービサビリティ関連パラメータ	35
表 3.2-1	太陽同期軌道（Case-1）に関する検討ケース一覧	39
表 3.3-1	太陽同期 2 機+傾斜軌道 2 機（Case-2）に関する検討ケース一覧	42
表 3.3-2	観測可能距離（代表値）	45
表 3.3-3	運用中衛星の高度	46
表 3.4-1	傾斜軌道 4 機（Case-3）に関する検討ケース一覧	48
表 4.2-1	Case-2 における設定条件とサービサビリティ値一覧	56
表 4.2-2	Case-3 における設定条件とサービサビリティ値一覧	57
表 4.2-3	日本域における一次評価	58
表 4.2-4	高知自動車道例における ALOS-2 SAR 画像データ	67
表 4.2-5	日本国土における地形・傾斜度別面積比率	69
表 4.2-6	ALOS-2 のビーム区分と入射角／傾斜角	69
表 4.2-7	ALOS-2 のビーム区分と倒れ込み	70
表 4.3-1	アジア域におけるサービサビリティ結果一覧	74
表 4.3-2	アジア域サービサビリティ検討のサマリ	76
表 5.1-1	NIIRS と災害対応 STEP との関係	83
表 5.2-1	商用 SAR（分解能 1m 級）相当衛星の衛星・地上局設定	87
表 5.2-2	ALOS-3 相当衛星の衛星・地上局設定	88
表 5.2-3	サービサビリティパラメータ設定	88
表 5.2-4	商用光学（分解能 30cm 級）相当衛星の衛星・地上局設定	92
表 5.2-5	サービサビリティパラメータ設定	92
表 6.1-1	想定する小型衛星の観測パラメータ	104
表 6.1-2	想定条件 1 に基づく解析ケース一覧	105
表 6.1-3	想定条件 2 に基づく解析ケース一覧	106
表 6.1-4	想定条件 3 に基づく解析ケース一覧	108

表 6.2-1	総コストの比較【適用例 1】	110
表 6.2-2	総コストの比較【適用例 2】	111

記号一覧

記号	名称・意味	ページ
S	サービサビリティ関数	21
s	サービサビリティ (値)	21
P	被災地域観測確率	21
\mathbf{r}_d	被災地点位置	21
t_d	発災後経過時間	21
v	視認性・判読性効果係数	21
v_i	視認性・判読性効果係数 (個別衛星毎の係数)	21
n	衛星機数	22
i	衛星番号	22
T_A	衛星ターンアラウンド時間	22
Δt_g	地上所要時間	22
T_{AC}	送信待ち時間	23
T_{AS}	撮像待ち時間	23
T_{AD}	受信待ち時間	23
Δt_{g1}	計画時間	24
Δt_{g2}	処理・判読時間	24
f_i	衛星信頼度	25
c	晴天率	25
N	シミュレーションケース数	26
N_d	ターンアラウンド完了ケース数	26
t_c	コマンド設定完了後経過時間	26
\mathbf{r}_{si}	衛星軌道位置	28
r	動径	28
f	真近点離角	28
e	離心率	28
a	軌道半径	28
a_e	地球半径	28
γ	観測可能入射角	28
γ_{\max}	最大入射角	28
γ_{\min}	最小入射角	28
δ	視線方向角	28
R_i	観測可能距離	28
\mathbf{r}_{Gi}	衛星地表面直下点	28
\mathbf{r}_g	地上局配置	28
W_i	観測幅	30
D_r	被災距離	30
α	撮像目標誤差	30
P_{∞}	検知確率	31
n	画素数	31
n_{50}	検知確率 50% の画素数	31
i	軌道傾斜角	44
h	衛星高度	44

記号	名称・意味	ページ
α_m	山地・丘陵地比率	68
v_i^{new}	換算視認性係数	68
θ	傾斜角	60
z	頭頂部高さ	60
y	倒れ込み長さ	60
$[N]$	NIIRS 値	95
q	単位コストあたりサービスバリエーション	110
q_{max}	単位コストあたりサービスバリエーション最大値	112
\mathbf{x}	小型衛星の（太陽同期衛星との）等価コスト	112
\mathbf{x}'	小型衛星の本来コスト	112
M_s	太陽同期衛星の寿命	112
M_x	小型衛星の寿命	112

1. 序論

1. 序論

1.1 衛星災害観測の概観

災害に関する情報収集手段としては、住民・被災者からの通報（119番等）、防災機関等による現地踏査、航空機やヘリコプタによる空撮等がある。衛星による災害観測（以下、「衛星災害観測」と称す）は航空機やヘリコプタと同様、上空から被災状況を俯瞰できる重要な情報源であり、更に広域観測や繰り返し観測が可能といった特徴を有する。

図 1.1-1 に示すとおり、衛星は災害サイクルのあらゆるフェーズにおいて活用可能であり、例えば次のような用途がある。¹⁾

予防・減災フェーズ：危険地域の確認 ⇒ 防災計画・ハザードマップの策定

応急対応フェーズ：発災後の被災状況把握 ⇒ 救助・救援活動

復旧・復興フェーズ：復旧・土地利用状況のモニタ ⇒ 復興計画へのフィードバック

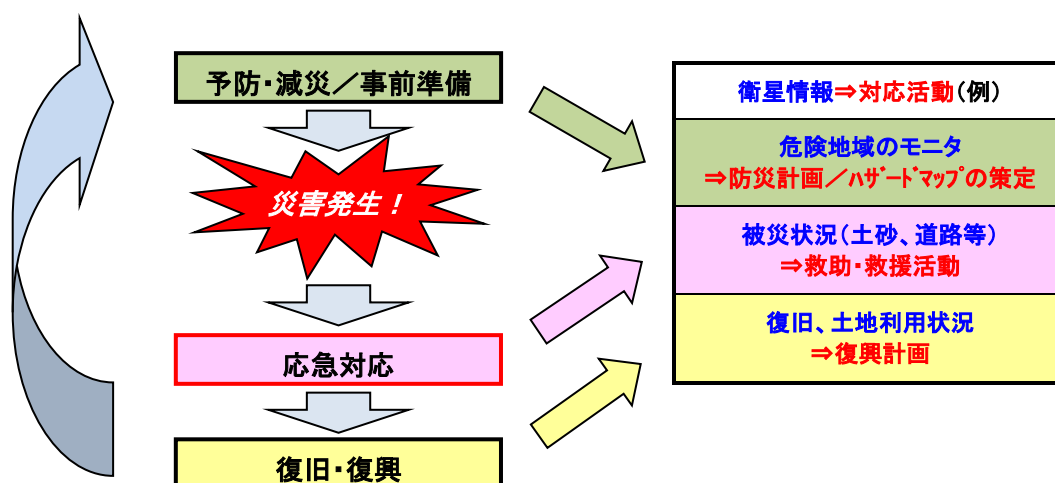


図 1.1-1 災害サイクルと衛星情報の活用 ¹⁾を基に加工

衛星災害観測が現実的な情報源となってきた要因としては、下記 1)～4)に示す通り、これまでのリモートセンシング技術の基盤²⁻⁷⁾の上に、GIS(Geographic Information System)等の情報技術の進展が衛星データ利用を促進し日常の観測衛星利用が普及してきたこと、並びに国内外での「災害共助」活動実績が蓄積してきたこと等が挙げられる。

1) リモートセンシング技術の利用

災害による被災状況の観測には、図 1.1-2 に示す波長帯の内、陸域の観測に適した可視光～近赤外波長による光学センサ、並びにマイクロ波による電波センサを用いたものが多い。前者においては、単一波長帯を検出するパンクロマティックセンサと、複数波長帯を検出するマルチスペクトルセンサがあり、この他に赤外領域を観測するものもある。

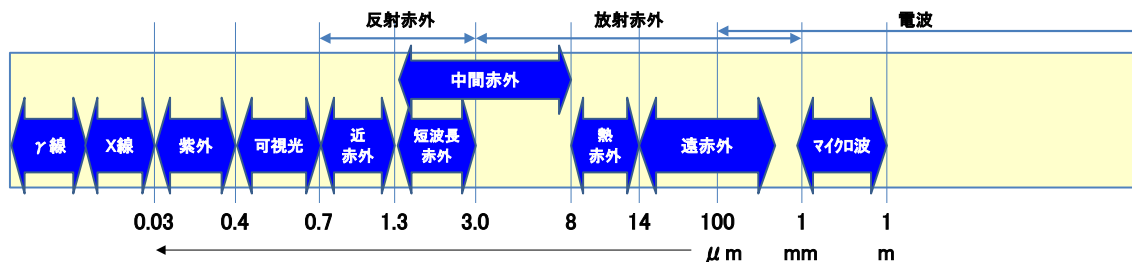


図 1.1-2 電磁波の波長帯による呼称 ³⁾より引用

また電波センサとしては、能動的に電波を照射しその反射波を観測する合成開口レーダ (SAR : Synthetic Aperture Radar) が主に用いられ、衛星観測では図 1.1-3 に示す L 帯～X 帯周波数の利用例が多い。

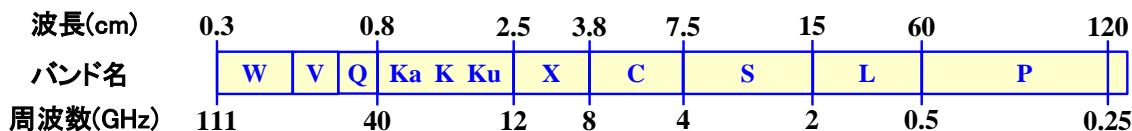


図 1.1-3 マイクロ波のバンド名と周波数・波長 ³⁾より引用

図 1.1-4 には、災害観測を行う代表的な観測衛星である陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS: Advanced Land Observation Satellite)、並びに、同「だいち 2号」(ALOS-2)を示す。また、これらを含め、これまでに打ち上げられた主な光学衛星の事例を表 1.1-1 に、SAR 衛星の事例を表 1.1-2 に示す。同表が示すように、最近の衛星では光学センサの分解能は数十 cm 程度、SAR 衛星の場合は 1m 以下のものも多く使われている。



(a) ALOS (光学/SAR衛星)



(b) ALOS-2 (SAR衛星)

図 1.1-4 代表的な災害観測衛星

表 1.1-1 主な観測衛星の事例（光学衛星） 8)等を基に編集

国	衛星名	打上年	終了年*	高度 (km)	波長帯**	分解能 (m)	備考
日本	JERS-1	1992	1998	570	MS	18~24	SARを搭載
	ALOS	2006	2011	692	PAN	2.5	SARを搭載
					MS	10	
ASNARO-1	2014		504	PAN	0.5		
				MS	2		
米国	Landsat-4, 5	1982/1984	2001/2013	705	MS	30	SWIR/TIR***も観測
	Landsat-7,8	1999/2013		705	PAN	15	SWIR/TIR***も観測
					MS	30	
	IKONOS-2	1999	2015	681	PAN	0.82	
					MS	3.2	
	QuickBird	2001	2015	450	PAN	0.61	
					MS	2.4	
	GeoEye-1	2008		681	PAN	0.41	
					MS	1.64	
WorldView-1	2007		496	PAN	0.5		
WorldView-2	2009		770	PAN	0.46		
				MS	1.85		
WorldView-3	2014		617	PAN	0.31	WV-4を計画 SWIR***も観測	
				MS	1.24		
フランス	SPOT1,2,3	1986/1990/1993	2001/2009 /1996	822	PAN	10	
					MS	20	
	SPOT-4	1998	2013	832	PAN	10	SWIR***も観測
					MS	20	
	SPOT-5	2002	2015	832	PAN	3.5, 5	SWIR***も観測
MS					10		
SPOT-6,7	2012/2014		694	PAN	1.5		
				MS	8		
Pleiades-HR (1A / 1B)	2011/2012		694	PAN	0.5		
				MS	2.8		
イスラエル	EROS-B	2006		500	PAN	0.7	
ドイツ	RapidEye(5機)	2008(同時打上げ)		630	MS	6.5	
欧州	Sentinel-2A (4機)	2015		786	MS	10~20	3機(2B~2D)は計画中
英国	DMC-3 (3機)	2015(同時打上げ)		650	PAN	1	
					MS	4	
台湾	FORMOSAT-2	2004		891	PAN	2	
中国	ZY-1-2C	2011		781	PAN	2.36, 5	
					MS	10	
ロシア	Kanopus-V N1	2012		510	PAN	2.1	
					MS	10.5	
韓国	KOMPSAT-3	2012		685	PAN	0.7	TIR***も観測
					MS	2.8	
	KOMPSAT-3A	2015		528	PAN	0.55	
MS					2.2		
インド	CartoSat-2A,2B,2C (5機)	2008/2010/2016		635	PAN	0.8	2機(2D, 2E)は計画中
					MS	2	

*終了年空欄は運用中 **PAN: パンクロマティック, MS: マルチスペクトル ***SWIR: 短波長赤外, TIR: 熱赤外

表 1.1-2 主な観測衛星の事例（SAR衛星） 8)等を基に編集

国	衛星名	打上年	終了年*	高度 (km)	周波数帯	分解能 (m)	備考
日本	JERS-1	1992	1998	570	L	18	光学も搭載
	ALOS	2006	2011	692	L	10	光学も搭載
					L	1~3	
ALOS-2	2014		628	L	1~3	TIR***も観測	
欧州	ERS-1, 2	1991/1995	2000/2011	780	C	26~30	
	ENVISAT	2002	2012	800	C	28	他センサ相乗り
	Sentinel-1A / 1B (4機)	2014/2016		693	C	5	2機(1C/1D)は計画中
カナダ	RADARSAT-1	1995	2013	798	C	9~11	
	RADARSAT-2	2007		798	C	3	
ドイツ	TerraSAR-X	2007		514	X	1~2	2機で編隊飛行
	TanDEM-X	2010		514	X	1~2	
イタリヤ	COSMO-Skymed (4機)	2007(2機)/ 2008/2010		620	X	< 1	
インド	RISAT-1	2012		536	C	< 1	
	RISAT-2	2009		550	X	< 1	
中国	HJ-1C	2012		500	S	20	
韓国	KOMPSAT-5	2013		550	X	1	

*終了年空欄は運用中

***TIR: 熱赤外

2) GIS の普及

GIS(地理情報システム)とは、位置情報を持ったデータ（空間データ）をコンピュータ上で重ね合わせ、情報を視覚的に表示することで、高度な分析や迅速な判断を可能にするためのシステムである。今日では空間上の位置を含む様々な情報（地理空間情報）を電子的に処理する情報システムの総称として用いられる。図 1.1-5 には、災害時における GIS の利用概念を示す。

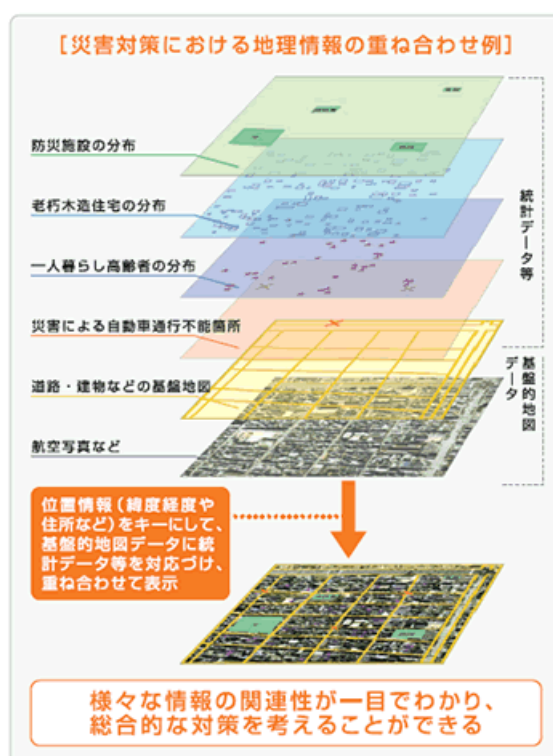


図 1.1-5 災害時における GIS の利用概念 ⁹⁾より引用

我が国においては 2007 年に制定された地理空間情報活用推進基本法の下、地理院地図（電子国土 Web）¹⁰⁾の整備を始めとし、各種の位置情報を有機的に統合・活用するための施策が取られ、衛星画像についても航空写真等と共に、GIS 構成要素の一環として整備・活用が進められている。

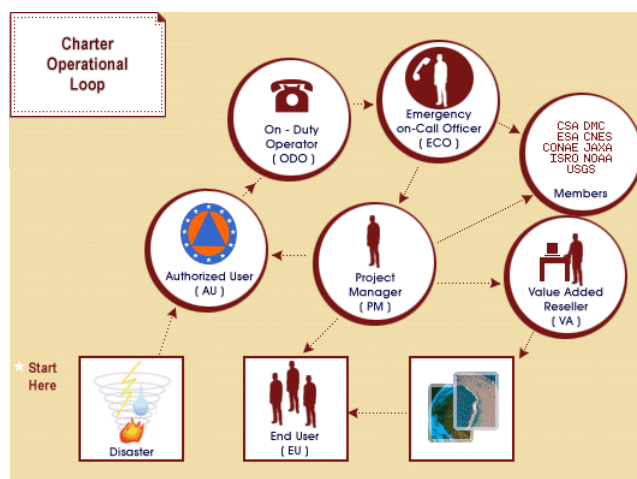
これと並行して、民生分野においても Google 社等が提供する地図サービスの背景画像として衛星画像利用は広く普及しており、もはや日常生活に浸透した存在になっている。

また、衛星画像の加工や情報抽出を行い、これを GIS に提供するための各種アプリケーション¹¹⁾もその操作性や処理性能等を日進月歩で向上させており、総じて衛星画像を利用するための環境は、広く定着してきたと言える。今後、災害時における本格活用が期待される。¹²⁻¹³⁾

3) 国際災害チャータ¹⁴⁻¹⁵⁾

正式名称は「自然または技術的な災害時における宇宙施設の調和された利用を達成するための協力に関する憲章」(Charter On Cooperation To Achieve The Coordinated Use Of Space Facilities In The Event Of Natural Or Technological Disasters)といい、2000年の発足以来、2016年5月現在で、欧州宇宙機関(ESA)、米国海洋大気庁(NOAA)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)等の22宇宙機関が参加している。

災害発生国の要請に基づき衛星観測情報を提供する互助的枠組みであり、その発動手順は図1.1-6のような流れとなっている。即ち、災害当事国の防災機関(AU: Authorized User)の要請により、受付窓口(ODO: On-Duty Operator、イタリアに常設)経由、輪番制の緊急オンコール担当官(ECO: Emergency on-Call Officer)が、当該災害に対する衛星観測を司るプロジェクトマネージャ(PM)を協力機関の中から任命する。以降は、PMが対応可能なメンバ機関との間で衛星観測計画を調整し、必要に応じて付加価値再販業者(VAR: Value Added Reseller)による加工を経て、被災国であるエンドユーザ(EU)に対して衛星観測情報を配信する。



©International Charter

図 1.1-6 国際災害チャータの発動手順¹⁴⁾

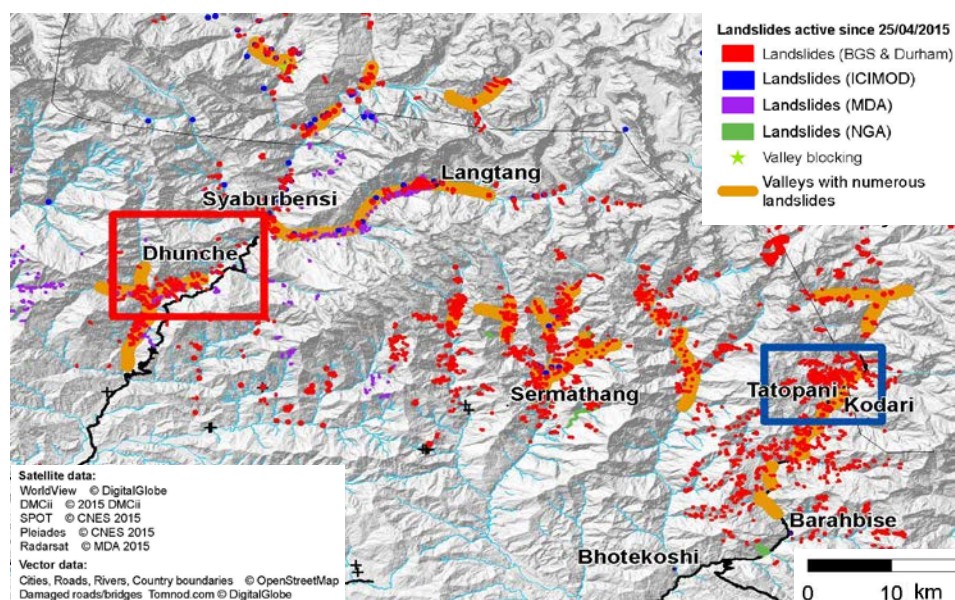
ここに日本における AU は内閣府であり、観測に対応するメンバ機関は JAXA である。尚、本活動は参加機関の実情に応じたベストエフォートに基づく互助的枠組みであり、参加機関を拘束するものではない。

また、VAR としては米国地質調査所 (USGS: U.S. Geological Survey)、衛星に基づく危機情報センター(ZKI: Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation、ドイツ)、遠隔画像情報配信機関(Sertit: Service régional de traitement d'image et de télédétection、フランス)等があり、緊急衛星地図作成(SEM; Satellite-based Emergency Mapping)等の活動を行っている。災害発生

国内、特に発展途上国等においては地図情報が未整備又は入手困難な場合もあり、このように被災地域の特定と同時に、衛星画像による地図作成まで含めて行うことが多い。

尚、国際協力の枠組みであるため、元々時差があること、更には緊急衛星地図作成等まで行う場合が多いことから、全般には撮像から情報提供までに1日以上～数日程度かかるのが一般的である。

国際災害チャータによる観測例として、2015年4月25日に発生したネパール地震における観測及び解析例を図1.1-7に示す。チャータの発動に対して、複数機関による複数衛星の画像解析結果を畳重し、2015年5月8日に発行したものである。



© International Charter/©British Geographical Survey/©Durham University/Carduf University/University of East Anglia

— チャータ発動 530/531 に対する解析結果（一部を抜粋） —

図 1.1-7 国際災害チャータによるネパール地震の観測・解析例¹⁴⁾

4) だいち防災利用実証実験

国際災害チャータでは各国の各種衛星を用いて応急的に災害観測が行われるのに対し、「防災のための地球観測衛星等の利用に関する検討会」（2005～2006年度）を通じて開始された、陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）による防災利用実証実験^{1), 16-17)}は、我が国保有の衛星を用いて、災害種別等に対応した衛星画像利用の実証的検討を体系的に行うものである。現在は「だいち2号」（ALOS-2）に引き継がれ、活動を継続している。¹⁸⁻²⁴⁾ 主な検討事例を以下に示す。

① 地震災害対応

地震災害発生時における被害状況の早期把握のための解析手法の検討と、インタフェロメトリを用いた地殻変動解析（断層線の解明等）の両面での検討が進められている。

前者においては図 1.1-8 に示すようなアーカイブ画像との差分抽出による被災箇所分布の把握が有力手法の一つである。

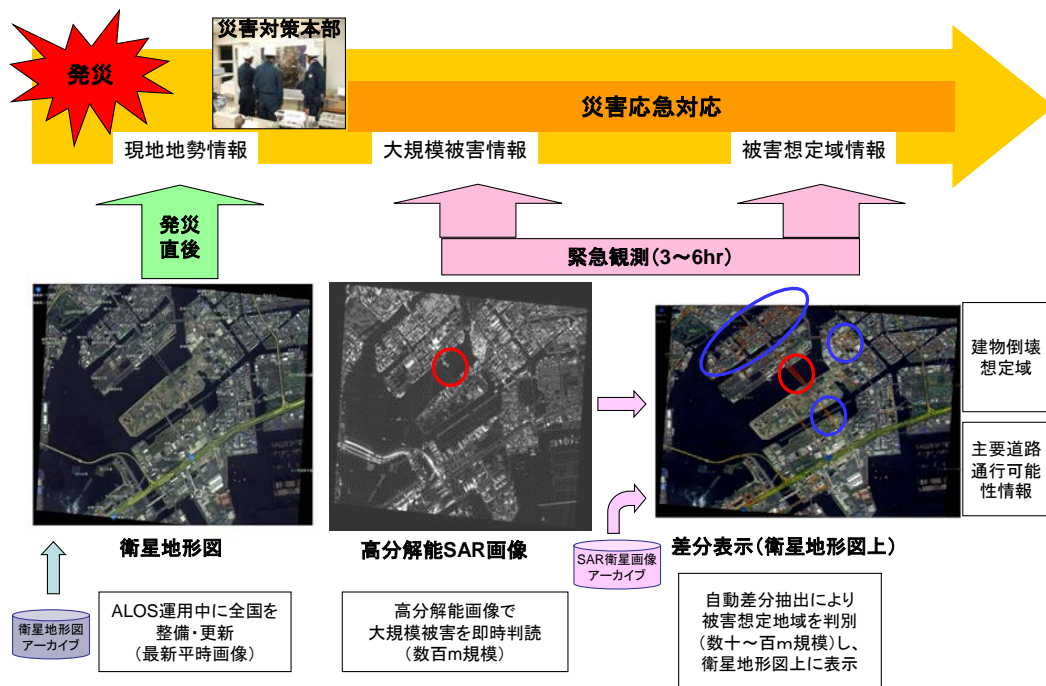
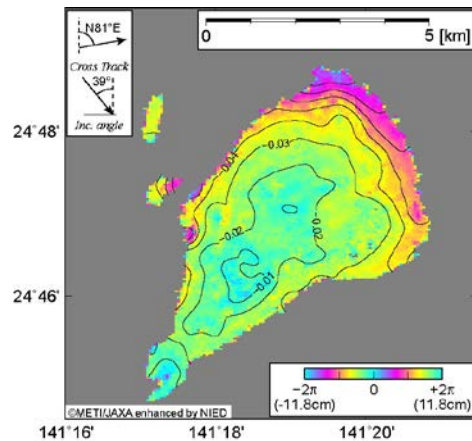


図 1.1-8 アーカイブ画像との差分抽出による被災箇所把握のコンセプト^{1), 17)}

② 火山災害対応

我が国は110の火山を有する火山国であり、噴火に伴う山体形状変化や降灰分布の確認において衛星観測は有効である。また、地震災害と同様、インタフェロメトリによる地殻変動解析は火山活動の変化・予兆等を早期に把握する上でも重要なデータとなっており、気象庁の火山噴火予知連絡会においても定期的に報告されている。図 1.1-9 は「だいち」PALSAR 画像に基づく小笠原硫黄島に関する報告事例²⁵⁾の一つである。



©JAXA/METI enhanced by NIED

2008年12月17日から2009年2月1日まで：防災科学技術研究所による

図 1.1-9 小笠原硫黄島の地殻変動解析事例²⁵⁾

③ 水害対応

水害は我が国の災害において人的、金額的被害の大きなものである。衛星観測は広域に亘る浸水範囲の確認には有効であり、平成 27(2015)年 9 月関東・東北豪雨における観測事例は第 5 章において示すとおりである。このような大規模水害に加え、中規模以下の河川氾濫への適用可能性についても実証実験が行われている。中小河川は観測装置の整備が十分ではなく、特に夜間・悪天候時には衛星観測が期待される場所であるが、一方では水はけが早いことから実時間でデータ取得が困難である。図 1.1-10 は JAXA と岐阜県が「だいち」を用いて行った実験²⁶⁾の一つであり、これによれば、数百 m～数 km 程度の範囲において衛星観測結果と地上確認結果が一致することが分かる。

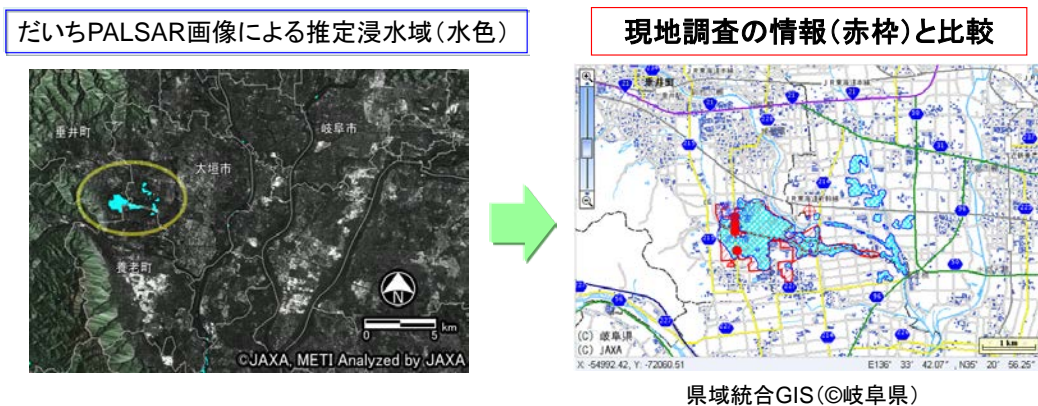


図 1.1-10 水害時の浸水範囲に関する実証実験の例^{17), 26)}

尚、後述する東日本大震災においては、津波による湛水に関して被災把握・分析評価が多数なされており²⁷⁻²⁸⁾、今後の防災に反映すべき貴重な知見となっている。

④ 土砂災害対応

土砂災害は長期に亘る地盤変位や土砂堆積等が、地震や風水害をきっかけとして発生することが多い。このため山間地等における斜面崩壊や土砂堆積等の長期・継続観測を積み重ね、発災時には崩落個所の特定に繋げることが期待される。このような視点の下に ALOS 並びにその後継機である ALOS-2 を用いた実証検討が行われている。図 1.1-11 は、平成 26(2014)年 8 月豪雨による広島土砂災害に対する ALOS-2 画像による解析事例²⁹⁾である。図の例では SAR 偏波観測処理を工夫することにより土砂崩れ箇所（左上の図の点線部分）が鮮明化できることを示している。

土砂災害は我が国においては日常的に起こり得るものであり、この他にも国土技術政策総合研究所³⁰⁻³¹⁾等において精力的に検討が行われている。

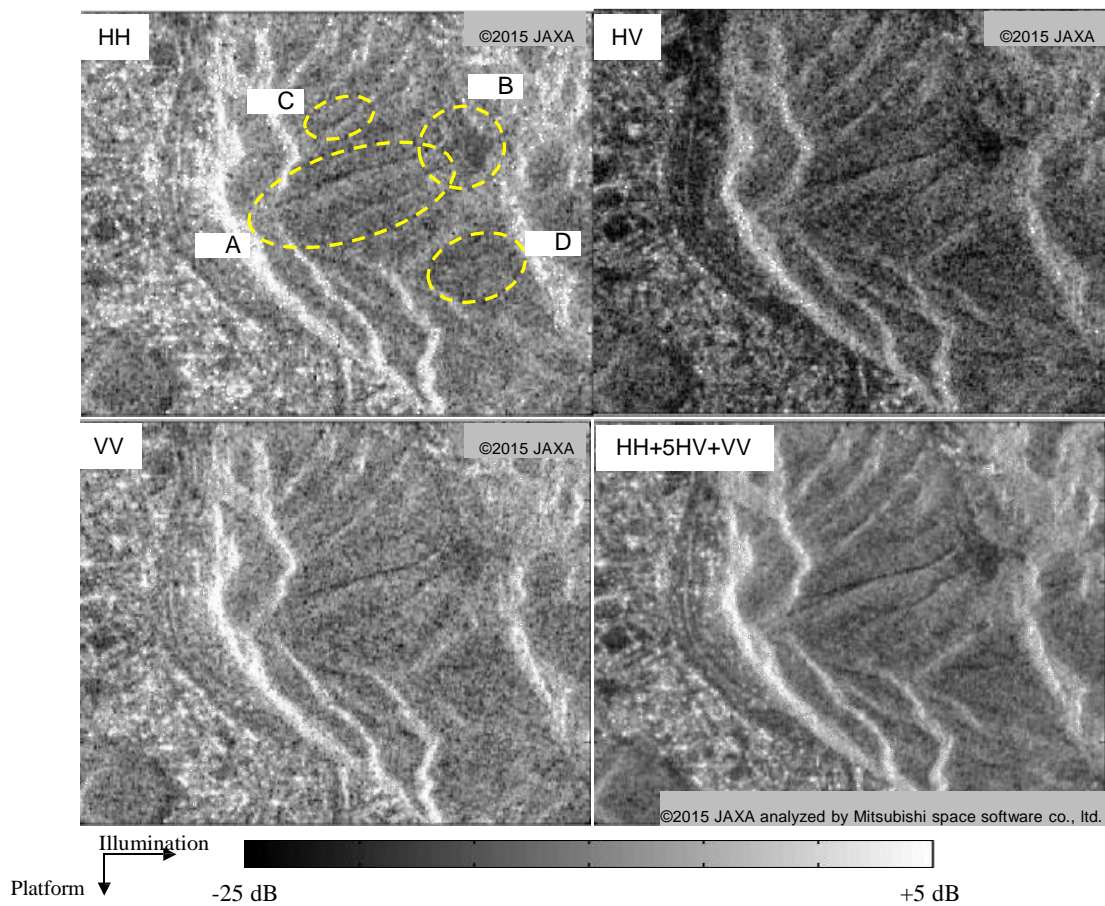


図 1.1-11 土砂災害に関する解析事例²⁹⁾

⑤ アーカイブデータの活用

上記の各種事例でも示したように、発災後の状況把握のためには次のような形で平時における対象地点の画像が使用される。

- 多様な手段により分析した情報を畳重するためのベースマップ
(図 1.1-7 では、RADARSAT 画像をベースとして各種情報を畳重している)
- SAR 差分抽出やインタフェロメトリ解析を行うためのアーカイブ
(図 1.1-8 では発災地点のアーカイブ使用を前提とし、図 1.1-9 は解析期間の最初の日の画像をアーカイブとしてインタフェロメトリ解析を行っている)
- 防災機関が発災後直ちに被災地の地勢や地形を把握するための画像マップ
(図 1.1-8 左端の「衛星地形図」は当該目的のために ALOS 光学画像に基づいて整備されたもの)

これら目的のために、対象地域に関する可能な限り網羅的且つ最新の撮像画像を取り揃えておくことも衛星災害観測上の重要な要求となっている。

1.2 衛星災害観測における課題

以上のような背景により、災害時における衛星観測データや情報提供に対する期待は益々高まってきている。2011年3月11日に発生した東日本大震災においては、多数の衛星によるデータが提供、活用された。

その一方で、関係者によるこれ迄の努力にも関わらず、防災・災害対応機関等（以下、「防災コミュニティ」）が実務において活用する衛星の整備には到っていない。衛星災害観測の有効性について、世の中全体の支持を得るためには、もう一段のハードルがあると認識する必要がある。このことを、以下の東日本大震災における応急対応フェーズの事例分析より考察する。

2011年3月11日14時46分に発生した東日本大震災は、東北太平洋沖のプレート境界で発生した海溝型地震によるもので、震源域は長さ約450km、幅約200km、沿岸部での津波浸水域は約561km²に及ぶ³²⁻³⁴。国内外衛星による緊急観測が実施され、ALOSによる観測が643シーン、国際災害チャータ等海外からの提供画像が約5000シーン³⁵に及ぶ³⁶⁻⁴⁶。

一方、東日本大震災は一部自治体の行政機能の喪失等もあり、災害状況の把握に時間を要した。災害発生後の数日間の行政の対応⁴⁷⁻⁵¹と上記衛星災害観測の実績を表1.2-1に示す。

同表からも分かるように、3月11日発災後の被災状況の把握は困難を極め、同日中は断片的状況把握、2日目は孤立地域との連絡回復に費やされ、実働部隊が被災地に入った3日目頃から現地情報が流通するようになったとされる⁵¹。

表 1.2-1 東日本大震災における行政対応と衛星観測のタイムライン

日時	政府・防災機関等の対応 ⁴⁷⁾⁻⁵¹⁾	衛星災害観測 ^{36-39), 45-46)}			
		センサ	主な衛星 ^{注1)} と観測地点	撮像時刻 ^{注2)}	公開日
3/11(金)	<p>14:46 地震発生</p> <p>15:14 緊急災害対策本部設置</p> <p>15:18 大船渡で8m以上の津波を観測</p> <p>15:24 国際災害チャータへ緊急観測要請 (原子力緊急事態宣言)</p> <p>21:05 政府調査団宮城県庁到着(ヘリ)⁴⁷⁾</p> <p>22:16 仙台で2~300人遺体発見報告 (首都圏で多くの帰宅難民)</p>				
3/12(土)	<p>5:00 陸前高田が壊滅の報告⁴⁸⁾</p> <p>6:00 現地対策本部設置</p> <p>9:48 孤立地域との連絡取れ始めた⁴⁷⁾</p> <p>11:36 自衛隊5万人態勢指示 (第5回緊急対本部会議)</p> <p>15:00 5大臣会議での輸送連携強化 (福島第一1号機で水素爆発)</p> <p>18:00 緊急輸送路東西11ルート確保⁴⁹⁾ (くしの歯作戦)</p> <p>19:00 宮城県内全市町村長との連絡確認⁵⁰⁾</p> <p>22:00頃 南三陸で1万人不明の誤報</p>	<p>光学 FORMOSAT-2 : 仙台、亶理</p> <p>光学 ALOS(PRISM/ AVNIR-2): 仙台</p> <p>光学 IKONOS-2 : 仙台空港</p> <p>光学 WorldView-2 : 仙台空港</p> <p>光学 SPOT-5 : 福島</p> <p>光学 Rapid Eye : 相馬</p> <p>SAR COSMO-Skymed : 岩手、宮城</p>	<p>9:15頃</p> <p>10:28頃</p> <p>10:30頃</p> <p>10:30頃</p> <p>10:30頃</p> <p>11:00頃</p> <p>17:27 -18:33</p>	<p>3/13</p> <p>3/13</p> <p>3/15*</p> <p>3/12*</p> <p>3/13*</p> <p>3/12*</p> <p>- 注3)</p>	
3/13(日)	<p>9:32 物資通行順次可能 東京-盛岡20時間 被災の惨状、逐次判明</p> <p>「発災後3日後位から情報が伝わるようになった。実働部隊が被災地に入って状況が変わった。如何に被災支援を求めているところに精鋭部隊を投入することができるか？」⁵¹⁾</p> <p>13:30 死者が万単位になる可能性(宮城県) (福島第一3号機で燃料棒の露出が進行)</p> <p>21:01 自衛隊10万人態勢指示 (第8回緊急対本部会議)</p>	<p>SAR RADARSAT-2 : 仙台</p> <p>SAR TerraSAR-X : 仙台</p> <p>光学 GeoEye-1 : 陸前高田</p> <p>光学 WorldView-2 : 大船渡</p> <p>光学 SPOT-5 : 南三陸</p> <p>光学 ALOS(AVNIR-2) : 新潟、長野</p> <p>光学 Rapid Eye : 岩手他</p> <p>SAR COSMO-Skymed : 宮古、仙台</p> <p>SAR TerraSAR-X : 仙台付近</p> <p>SAR ALOS(PALSAR) : 仙台、相馬</p>	<p>5:38頃</p> <p>5:43頃</p> <p>10:30頃</p> <p>10:30頃</p> <p>10:30頃</p> <p>11:09頃</p> <p>11:20頃</p> <p>17:45 -18:28</p> <p>18:00頃</p> <p>22:11</p>	<p>3/15*</p> <p>3/13</p> <p>3/18*</p> <p>3/16*</p> <p>3/14*</p> <p>3/13</p> <p>3/14*</p> <p>- 注3)</p> <p>3/13*</p> <p>3/14</p>	

注1) ALOSの()内はセンサ名。また、上記以外にLANDSAT-5, 7, THEOS, ASTER/TIR, Quickbird, EO-1等の観測あり

注2) 撮像時刻と公開日は日本時間(JST)。但し*は国際災害チャータによる(世界時:UT)

注3) "-"は現時点で不明

このような地上の壊滅状況下において、同じ時間軸での衛星災害観測実績を見た場合、その精力的な活動にも関わらず、発災から翌日までの間にデータの公開に至ったものは、表 1.2-1 右欄の下線部 2 件（公開日:3/12、但し国際標準時の可能性あり）のみであった。

これを図 1.2-1 のように図示すると、発災後 3 日目までの情報空白を、衛星観測によって埋めることができなかつたことが分かる。

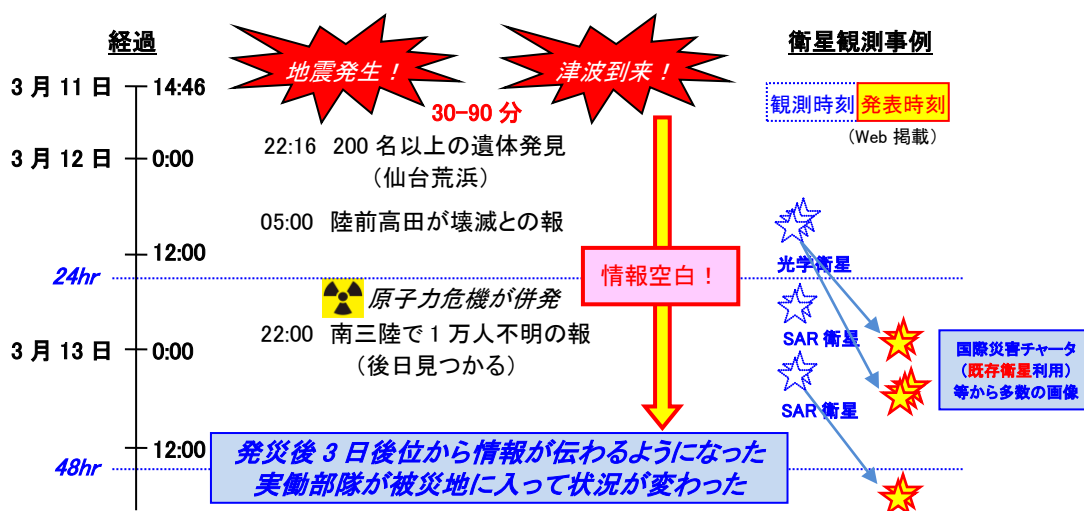


図 1.2-1 東日本大震災における地上被害と衛星観測のタイムライン (抜粋)

本来衛星観測は、災害時に地上が壊滅した場合においても、継続的に観測できることが利点とされており、また特に合成開口レーダ (SAR) による観測は、夜間・悪天候に関わらず観測可能なことから、航空機等が活用できない状況下、特に応急対応フェーズには力を発揮できるはずである。

それにも関わらず情報空白が生じた要因の一つには、衛星災害観測の大部分が、他の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にあると考えられる。本間⁵²⁾によれば光学衛星の73%は地方太陽時 (LST: Local Sun Time) 9時半-11時半、SAR衛星の94%はLST6時又は18時前後の軌道にある。このような観測時刻のアンバランスは、例えば商用光学衛星であれば、販売する画像の画質が最適となる撮像時刻から、また SAR衛星であれば、衛星システムにとって有利な電力及び熱入力となる軌道条件から由来するものと考えられる。

この問題は、衛星開発・運用に関わる関係者（以下「衛星コミュニティ」と称す）と、防災コミュニティとの関係として、次のように捉えることができる。

国際災害チャータ等において既存衛星に相乗りする形態は、衛星コミュニティから防災コミュニティに対して、一定の「現実解」を提供するものである。

その一方で、応急対応フェーズにおける情報空白期間短縮という、防災コミュニティにとっての最重要課題に対しては答えていない。

即ち、災害観測利用のために衛星システムを最適化させ、これを活用するという議論が、これまで両者の間では十分にはなされて来なかったという点が、問題の根源にあるものと推察される。

1.3 本研究の目的

本研究では、衛星の災害観測利用のうち、特に、これまで十分な議論がなされていない応急対応フェーズにおける衛星コンステレーションの「最適性」を検討の対象とする。

そもそも最適性を論じるためには評価指標が必要であり、災害観測衛星コンステレーションの評価のためには、

要件1. 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できる指標

要件2. 特に、防災コミュニティとの間で共有できる明快な指標

が必要である。

これまでの議論において、例えば、衛星コンステレーションによる撮像時間間隔などが「指標」的に示されることはあった。しかしながら、この数値では防災ユーザにとっての「いつ手元に情報が届くのか？」という疑問に対する答えにはならない。

また、衛星画像プロバイダ等からは画像の分解能や鮮明さがアピールされることもある。この場合も上記と同様「いつ届くのか？」に加え、「毎回その画質が期待できるのか？」との疑問を誘発する。

即ち、いずれの情報も「指標」と呼ぶには部分的、或いは断片的であり、「総合性」や「明快さ」に欠けるものである。

本研究の目的の第一は、衛星コンステレーションの「最適性」を論じるための基盤として、上記の要件1及び2を満たす指標を導出することにある。即ち、

目的1：衛星による観測能力として「衛星観測確率」を、地上での情報抽出能力として「視認性・判読性係数」を反映した総合的且つ明快な指標を導出する。

ここに本指標を「サービサビリティ関数」と呼称し、その定義は第2章において述べる。

また、本研究の目的の第二は、上記指標が使用に足ることを示すことである。即ち、

目的2：導出されたサービサビリティ関数がコンステレーションの最適化において適用可能であることを具体例により示す。

このような指標（サービサビリティ関数）を有することは、

- 現有システムの能力評価
- 構想・計画段階における最適コンステレーションの比較評価
- 既存システムと新規システムの組合せ評価

等の活用方法（効用）を実現するもので、災害応急対応に適した衛星災害観測システムの構築に資するものである。

1.4 本論文の構成

本論文では、第 1 章において上記のような衛星災害観測における課題と本研究の目的を示した上で、第 2 章において、上記課題の解決のため本研究で提案するサービサビリティ関数を導出し、その構成パラメータ及び算出方法について述べる。第 3 章では、SAR による応急対応フェーズにおける災害検知を題材に、主要パラメータに対する感度解析を行う。第 4 章では、本関数を評価指標としたコンステレーションの最適化検討を具体事例に基づいて実施し、これを通じ、本関数を用いた最適化フレームワークの構築が可能であることを実証する。第 5 章では、災害対応フェーズの範囲を広げた場合にもサービサビリティの考え方が適用可能であること、並びに、その際の対象物の視認性の取り扱い方についての考え方を示す。第 6 章では、本関数の応用性として、従来型衛星と小型衛星の組み合わせケーススタディと、コスト評価との組み合わせ検討例を示す。第 7 章は結論である。

尚、上記のうち、第 2 章は著者による文献 53)、第 3 章、及び第 5 章の一部 (5.3.2) 項) は文献 54) の成果を整理・体系化したもの、第 4 章、第 5 章の残りの部分、及び第 6 章は新たに加筆したものである。

以上による各章の記述関係は図 1.4-1 のとおりである。

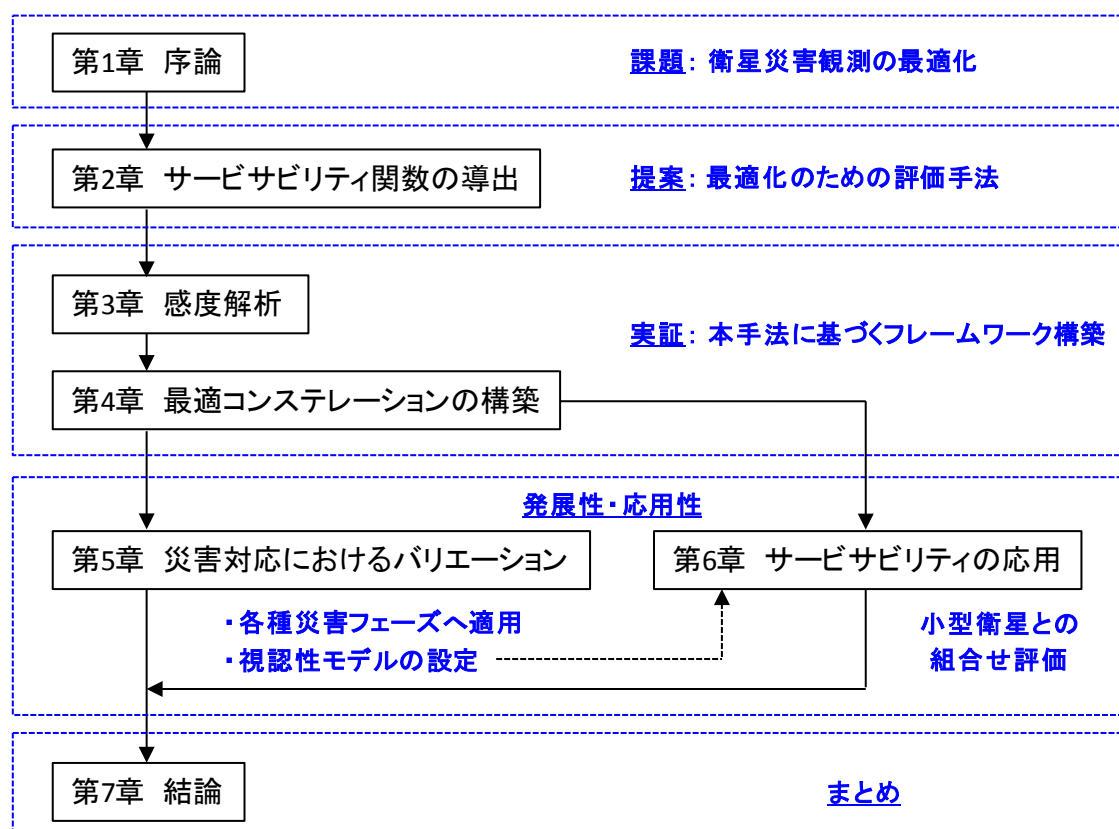


図 1.4-1 各章の記述関係

(空白)

2. サービスサビリティ関数の導出

2. サービスサビリティ関数の導出

2.1 サービスサビリティ関数の定義

災害観測コンステレーション最適化の考察にあつては、被災者、並びに彼らを救助する防災ユーザ視点での評価指標が必要である。ここで「防災ユーザ」とは、防災コミュニティのうち、特に救助部隊派遣に関わる防災機関等とする。災害は任意の地点で起こり得るため、我が国防災においては全国土範囲が対象地域である。

防災ユーザにとっての最大の関心は、

- 「一刻も早く被災箇所を把握し、救助部隊を派遣する。」

という点である。衛星災害観測は前段の「一刻も早い把握」に資するものであり、その評価指標の要件としては、

- 「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」

を適切に表すことが求められる。

後述するように、被災地域上空へ衛星が飛来し、そこを観測する（＝撮像し、データを地上に下ろす）可能性は、衛星軌道配置や、観測地点（＝被災地域）の天候統計量、地上局の配置等から、確率計算により求めることができる。

一方、得られた観測結果から被災箇所を特定する上では、撮像データの「視認性」或いはそこから情報抽出を行うための「判読性」が影響してくる。

即ち、算出された「被災地域観測確率」： P をベースとし、これを質的要素である「視認性・判読性効果係数」： \underline{v} によって補うことで、上記要件に叶う評価指標を組むことが可能であると考えられる。本論文ではこれを「サービスサビリティ関数」として定義する。

上記の考え方に基づけば、サービスサビリティ関数： S 、及びこれから求められるサービスサビリティ値： s は(2-1)式のように定義される。

$$s = S (P(\underline{r}_d, t_d), \underline{v}) \quad (2-1)$$

ここに被災地域観測確率： P は、被災地域の任意地点（被災地点）： \underline{r}_d と発災後経過時間： t_d の関数である。また、視認性・判読性効果係数： $\underline{v} = (v_1, \dots, v_n)^t$ は、衛星毎に異なる機数分の係数をベクトル表記したものである。

2.2 サービスビリティを構成するパラメータ

上記のように定義されたサービスビリティ関数:Sを構成するパラメータは図 2.2-1 に示す系統関係を有する。即ち、三つの系統から成る被災地域観測確率:Pの構成要素；

- 1) 軌道力学から求められる衛星ターンアラウンド時間： T_A 、及びその構成要素
- 2) 地上の運用要員並びに設備稼働に要する地上所要時間： Δt_g
- 3) その他考慮すべき確率、統計値

に、更に上記で定義した

- 4) 視認性・判読性効果係数： $\underline{v} = [v_i]^t$

が加わる。ここに衛星機数は n とし、個別の衛星は $i=1, \dots, n$ と表記した。尚、パラメータ間の空間上の関係は図 2.2-2 の通りである。

サービスビリティ関数: S

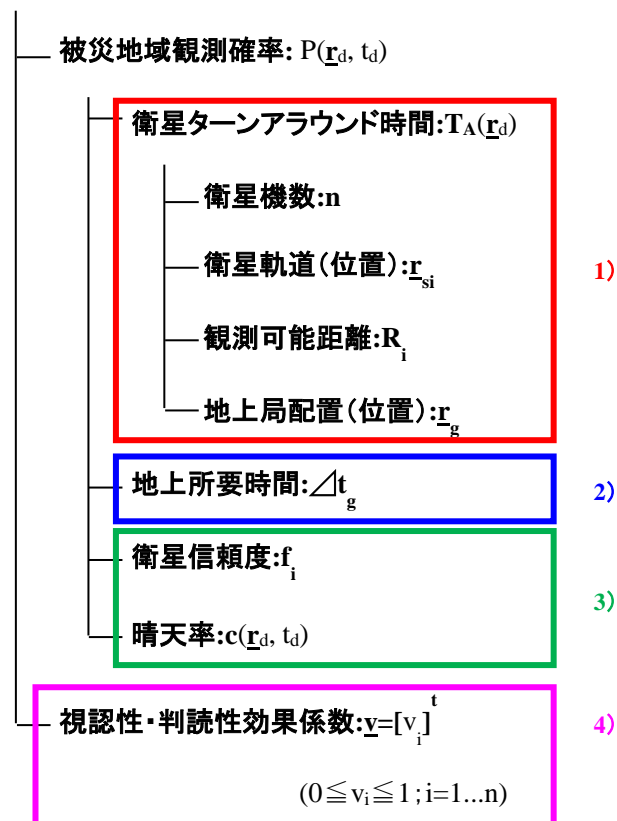


図 2.2-1 サービスビリティ関数に関するパラメータの系統関係

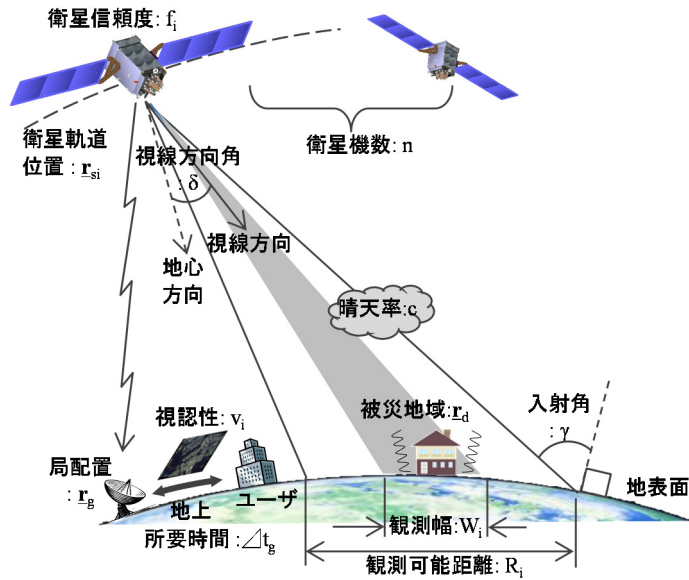


図 2.2-2 サービスバリティ関数に関するパラメータの空間上の関係

サービスバリティ関数は、これら性質の異なるパラメータにより計算されるものである。以下では、図 2.2-3 を用いてそれぞれの時間軸上における位置付けについて述べる。

1) 衛星ターンアラウンド時間: T_A

被災地域観測確率: P に直結する第一要素は、衛星への指令（コマンド）設定の完了から、最初の衛星画像受信までの時間、即ち衛星ターンアラウンド時間: T_A である。 T_A は被災地点: r_d 毎に計算される。また、2.3 項で述べるように、発災後経過時間: t_d における T_A 成立性の計算から被災地域観測確率: P が求まる。 T_A は、

- コマンド設定完了からコマンド送信までの送信待ち時間: T_{AC}
- コマンド送信から撮像までの撮像待ち時間: T_{AS}
- 撮像後、地上局でのデータ受信（ダウンロード）までの受信待ち時間: T_{AD}

の 3 要素に分割され、後述のようにいずれも軌道力学から計算することができる。これらにより、衛星ターンアラウンド時間: $T_A = T_{AC} + T_{AS} + T_{AD}$ が算出される。衛星が複数機（機数 = n ）ある場合は、各衛星に対するコマンド設定完了までは同時になされるが、その時々々の各衛星の位置関係により、撮像結果の地上局での受信タイミングは異なる。（図中、衛星 i によるものを T_{ACi} 、 T_{ASi} 、 T_{ADi} の如く識別） 以下においては、この内の最も早い衛星の受信タイミングをもって T_A として代表させる。

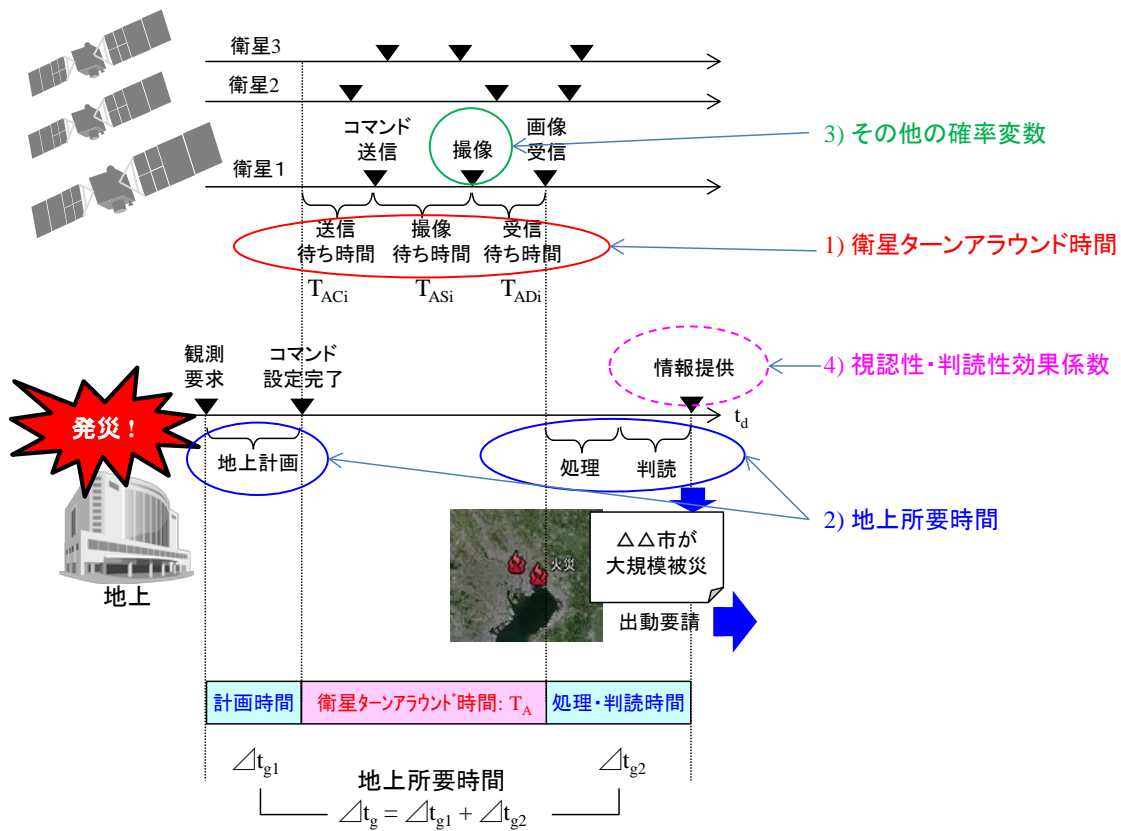


図 2.2-3 時間軸における各パラメータの位置付け

尚、一般に「観測」という用語は、上記の「撮像」と「受信」を併せた概念として用いられることが多い。以下においては、「撮像」と「受信」を一体的に論ずる場合、或いは敢えて区別する必要のない場合は「観測」と表現する。

2) 地上所要時間: Δt_g

- 発災後の観測要求から衛星へのコマンド設定完了までに要する計画時間: Δt_{g1}
- データ受信後の画像処理、判読分析に要する処理・判読時間: Δt_{g2}

の和である地上所要時間: Δt_g は、地上要員による運用のための所要時間（設備稼働を含む）であり、衛星の軌道運動とは独立のものである。

即ち、軌道運動に基づく衛星ターンアラウンド時間: T_A から算出される被災地域観測確率: P に対し、地上所要時間: Δt_g は空白時間の位置付けとなるため、計算上は P のサービスビリティグラフを Δt_g 分だけ時間軸方向に平行移動することで反映される。

3) その他の確率変数

① 衛星信頼度: f_i

衛星が被災地域上空に飛来しても撮像時点で衛星が生存していなければ観測できない。このような可能性を考察する場合には、衛星信頼度: f_i を衛星毎に設定する必要がある。本パラメータを設定する必要が想定されるケースとしては、

- 新規衛星計画時点での事業判断（打上げロケットの成功確率等も含む）
- 運用中衛星を災害観測コンステレーションへ組み込む際に寿命迄の残存確率を考慮

等が考えられる。尚、完成したコンステレーション自体の比較検討においては、本パラメータは 1 とおいて考察するのが適切であり、本論文の検討ケースでは原則としてこの考え方を取る。

② 晴天率: c

衛星が被災地域上空で撮像を行ったとしても、光学衛星の場合は雲により阻害される可能性を考慮する必要がある。本事象を表す値としては、気象庁サイト⁵⁵⁾で公開される地域毎の晴天率が代表的である。地球観測研究で用いられる被雲率⁵⁶⁾も活用可能である。これらは地域と時間（被災地点: \mathbf{r}_d 、発災後経過時間: t_d ）の関数となり、同一時刻に同一地点を通過する衛星間では共通である。本論文では、SAR 衛星の検討では $c=1$ 、光学衛星の検討では気象庁データに基づく晴天率を用いて、定数として本パラメータを扱う。

4) 視認性・判読性効果係数

衛星が被災地域を観測したとしても、画像の視認性や判読性の程度によって抽出された情報の有用性は影響を受ける。視認性・判読性効果係数（以下、視認性係数）: v_i は、これを反映するための指標であり、情報抽出視点での観測結果の活用可能性を表すパラメータとして位置付けることができる。後述のように、被災地域観測確率を補正しこれと同次元で論じるため、0~1 の値として定義する。

このようにサービスビリティは、発災後の観測要求から情報提供に至る全パラメータ、即ち、衛星の軌道運動、地上運用、各種確率・統計値、画像情報抽出に関わる 1)~4)までの要素を用いて、衛星情報の活用可能性を総合的に算出するものである。

図 2.3-1 は、3つの衛星についてターンアラウンド時間: T_{Ai} ($i=1\sim 3$)を計算した例である。コマンド設定完了後経過時間: $t_c:=t_{c0}, t_{c1}, t_{c2}$ と3つの時点で固定した場合、観測棄却(後述)の無い場合、次のように N_d がカウントされる。

t_{c0} の時点 : T_{Ai} ($i=1\sim 3$) $> t_{c0}$ につき N_d をカウントせず

t_{c1} の時点 : $T_{A1} < t_{c1}$ につき N_d を一つカウント

t_{c2} の時点 : $T_{A1}, T_{A2} < t_{c2}$ につき N_d を一つカウント

例えば、 t_{c1} の時点においては観測#1 が完了、即ち衛星 1 のターンアラウンド: T_{A1} が完結 ($T_{A1} < t_{c1}$) していることから、 N_d は+1 加算される。

その際、2.2 3)項で論じたその他の確率変数について、1 から当該確率を差し引いた分を N_d のカウントから棄却(観測棄却)すれば、同パラメータが計算に反映される。同様に、2.2 4)項の視認性係数についても、これに対応した一定ルールで棄却することによりサービスサビリティ計算に反映される。

このようにして、モンテカルロシミュレーションにより、 N_d を「有効情報の提供成立数」としてカウントすることができ、これを総数: N で除することにより、サービスサビリティ値: s を求めることができる。

$$s = N_d / N \quad (2-3)$$

尚、上記の計算では、図 2.2-3 におけるコマンド設定完了の時点を計算の起点としたが、サービスサビリティのグラフとしては、2.2 2)項による地上所要時間: Δt_g 相当分だけ平行移動することにより、発災後経過時間: t_d の軸上にて表すことができる。(発災時点とコマンド設定完了の差は計画時間: Δt_{g1} であるが、ユーザの手元に届くまでには処理・判読時間: Δt_{g2} が加算されるため、両者の合計を反映する)

2.4 主要パラメータ算出にあたっての前提条件

1) 衛星ターンアラウンド時間: T_A の算出

2.2 1)項にて述べたように、衛星ターンアラウンド時間: T_A は軌道力学計算により送信待ち時間: T_{AC} 、撮像待ち時間: T_{AS} 、受信待ち時間: T_{AD} の和として算出される。この内 T_{AS} は、衛星軌道位置、センサによる観測可能距離と被災地点の相対位置関係から定まる撮像時刻から算出され、 T_{AC} と T_{AD} は衛星軌道位置と地上局配置から定まるコマンド送信時刻、及びデータ受信時刻から算出される。

① 撮像時刻の計算

a) 衛星軌道位置: \mathbf{r}_{si}

個々の衛星 i はケプラーの楕円軌道方程式(2-4)、(2-5)による単純な軌道面内運動を行う。実際には J_2 項等による摂動が生じ、これを利用して太陽同期準回帰軌道⁵⁷⁻⁵⁸⁾等を形成する。

$$r = a(1 - e^2) / (1 + e \cos f) \quad (2-4)$$

$$(\mathbf{r}_{si})_K = [r \cos f, r \sin f, 0]^T \quad (2-5)$$

但し、 r : 動径、 f : 真近点離角、 a : 軌道半長径、 e : 離心率

ここにケプラー座標で表された衛星軌道位置: $(\mathbf{r}_{si})_K$ は、ケプラー／カルテシアン変換⁵⁹⁻⁶⁰⁾等を経て、衛星地表面直下点: \mathbf{r}_{Gi} として表わすことができる。

b) 観測可能距離: R_i

電子的・機械的・姿勢角変更等のセンサ視線変更手段によって撮像可能となる地表面上の面的な領域を、撮像可能領域と言い、一般的には衛星進行方向に平行な帯状範囲として規定されることが多い。以下ではこの帯状幅の長さを観測可能距離: R_i と称する。円軌道、且つ地球を球面近似した場合、 R_i は入射角: γ による次の関係式を用いて求められる。

$$R_i = a_e \{ \gamma_{\max} - \sin^{-1}((a_e/a) \sin \gamma_{\max}) - a_e \{ \gamma_{\min} - \sin^{-1}((a_e/a) \sin \gamma_{\min}) \} \} \quad (2-6)$$

但し、 a_e : 地球半径、 a : 軌道半径、 γ_{\max} : 最大入射角、 γ_{\min} : 最小入射角

視線方向角 δ を用いる場合は、次式で変換する。

$$\gamma = \sin^{-1}((a/a_e) \sin \delta) \quad (2-7)$$

一方衛星地表面直下点: \mathbf{r}_{Gi} は、上記 a) 項に基づき時々刻々計算され、 \mathbf{r}_{Gi} を中心に描いた撮像可能領域が被災地点: \mathbf{r}_d に到達する時刻、即ち撮像時刻を以って、撮像待ち時間: T_{AS} が計算される。

図 2.4-1 に SAR 衛星による典型的な撮像可能領域の例として、帯状領域のケースを示す。衛星進行方向に対する左右の帯状幅の長さが観測可能距離となる。

② コマンド送信時刻、データ受信時刻の計算

地上局配置: \mathbf{r}_g とその周りに形成される通信視野が決まると、衛星軌道位置: \mathbf{r}_{si} がこの視野内に入る時刻を以ってコマンド送信時刻、データ受信時刻が算出され、送信待ち時間: T_{AC} 、受信待ち時間: T_{AD} も計算される。データ中継衛星を経由する場合はこれも地上局の一つとして同様に扱う。複数の地上局を用いる場合は、 T_{AC} 、 T_{AD} が、それぞれ最短時間となる局を採用する。

2) 被災地域、観測幅、観測目標誤差の関係

被災地点: \mathbf{r}_d と観測可能距離: R_i との関係について1) ①項において論じた。以下においてこれらと被災地域の面的広がりとの関係を以下のように整理する。

まず、観測可能距離: R_i とはセンサ視線変更手段により選択的に到達可能な最大距離であって、対象地点上空の通過時間内にセンサの視野角や姿勢変更等により実際に撮像できる範囲は、これとは別に観測幅: W_i として定義される。図 2.4-1 に示したように、一般に W_i も衛星進行方向に平行する帯状の範囲として規定されることが多い。

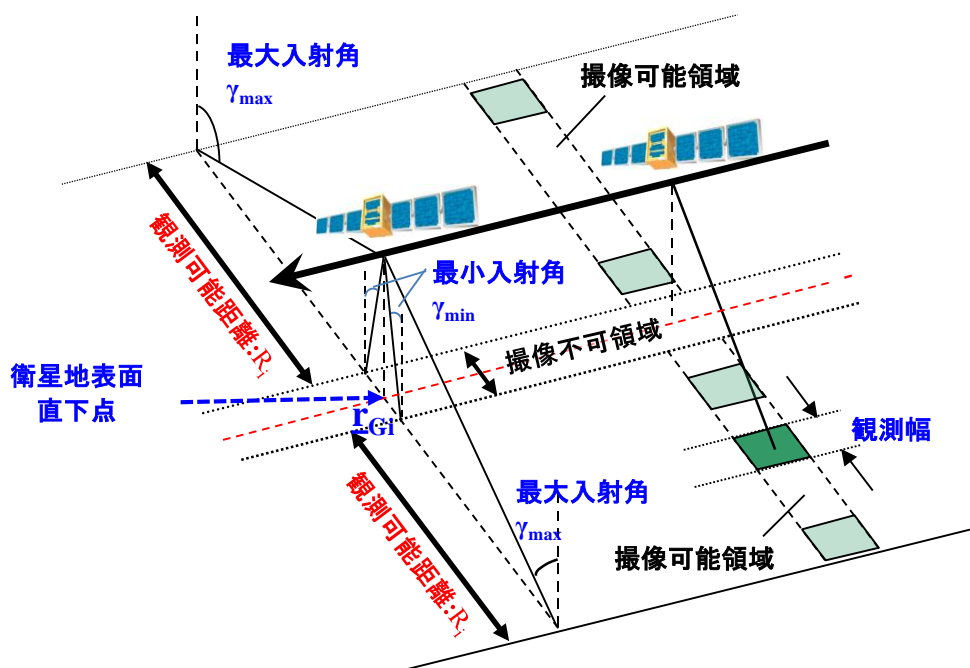
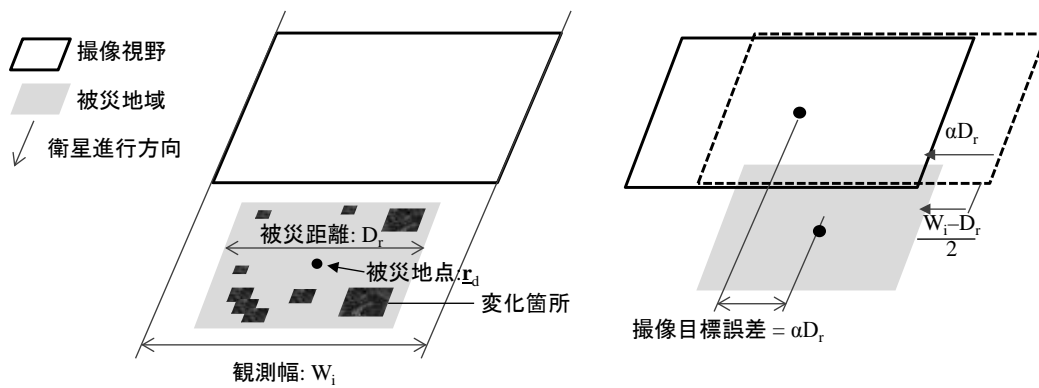


図 2.4-1 観測可能距離の例

ここで、発災に伴う破壊、崩壊と見られる変化発生場所を「変化箇所」、一定規模以上の被災個所の分布範囲を「被災地域」、その代表長を「被災距離: D_r 」と呼称する。また、被災地域の中心点を被災地点: \mathbf{r}_d と見做す。

以下の検討においては、図 2.4-2(a)に示すように被災距離: D_r に対して $W_i \geq D_r$ 、即ち一回の観測で被災地域を網羅することを前提とする。この考え方は、ALOS-2 衛星開発に先立ち「防災のための地球観測衛星等の利用に関する検討会¹⁶⁾」において、阪神大震災等の過去災害の分析の下に必要な観測幅を定めた(表 2.4-1 に代表例を示す)のと同様である。



(a) 観測幅と被災距離の関係 (b) 撮像目標誤差のある場合

図 2.4-2 観測幅と被災距離、観測目標誤差の関係

表 2.4-1 過去災害分析に基づく観測幅の目安¹⁶⁾より抜粋

地震災害: 40~70km	
	兵庫県南部地震(阪神大震災)[1995]
	宮城県北部地震[2003]
	新潟県中越地震[2005]、等
風水害: 30~50km	
	平成 16 年台風 23 号[2004]
	平成 17 年台風 14 号[2005]、等
火山災害: 20km 以上	
	雲仙岳噴火[1990]
	有珠山噴火[2000]、等

実際には発災時点で撮像目標を定めても、真の被災視点から外れる可能性が想定される。これを撮像目標誤差と称し、被災距離: D_r に対する比率を α として表すと図 2.4-2(b)により、 αD_r は $(W_i - D_r)/2$ より小さくなる必要があることが分かる。これより W_i に対する必要条件は次式のように求めることができる。

$$W_i \geq (1 + 2\alpha) D_r \quad (2-8)$$

以下の検討では、所与の衛星システム要件として(8)式が成立していることを前提とする。

3) 視認性・判読性効果係数（視認性係数）： v_i

視認性係数： v_i はユーザの感覚に依存するため、これを客観化する工夫が必要である。以下では、Johnson による「検知・認識・識別(DRI)」の概念⁶¹⁾を、表 2.4-2 に示すように災害事象向けに再定義して用いることとする。尚、同表において「検知」については変化抽出の前提となるアーカイブデータの存在を前提とした。アーカイブとしては、発災後の撮像画像と比較できる同一地点の光学衛星画像、航空機画像、各種 GIS 情報等が一般的である。

SAR 衛星の場合には同一軌道・同一撮像モードによるアーカイブが活用できる場合にはデータ間の変化抽出が可能となる（ALOS-2 において実証中）。

表 2.4-2 検知・認識・識別(DRI)の概念⁶¹⁾に基づき災害適用案を追記

DRI 区分	Johanson's Criteria	災害事象への適用案
検知 (D etection)	物体の存在を把握 (何かが存在する)	変化個所の抽出
認識 (R ecognition)	物体の種別の確認 (人か車等)	災害発生及び種別の確認
識別 (I dentification)	物体属性の特定 (男か女か、車の種別等)	被害の内容と程度の判断

災害応急対応を論じる本研究においては、表 2.4-2 における検知(D)を主たる対象とし、Johnson 及び派生研究⁶²⁾による画素数に対する検知確率を視認性係数： v_i として扱う。

即ち、Johnson's Criteria に基づく検知確率 50%の画素数 n_{50} (=2) に対して画素数 n の場合の検知確率： P_{∞} は(2-9)式で表され⁶²⁻⁶³⁾、図 2.4-3 のような曲線となる。

$$P_{\infty} = \frac{(n/n_{50})^{x_0}}{1 + (n/n_{50})^{x_0}} \quad (2-9)$$

但し、 $x_0 = 2.7 + 0.7(n/n_{50})$

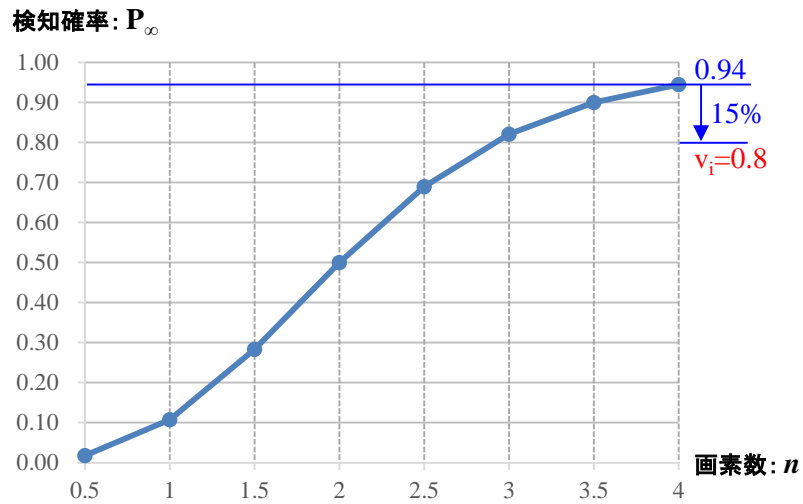


図 2.4-3 画素数と検知確率の関係

(9)式及び図 2.4-3 によれば画素数: $n=4$ の場合は検知確率: P_{∞} は約 0.94 となる。一般に、画質を規定するパラメータとしては画素数（分解能）が支配的であるが、これ以外にも、信号・雑音比（S/N 比）やコントラスト等の要因も 1~2 割程度あるとされる。本論文のシミュレーション検討においては、上記 0.94 に対して 15%程度の不確定性を見込んだ $v_i=0.8$ を視認性係数のノミナル値として計算に用いることとする。

これは、分解能 3m の衛星を想定した場合、12m 規模（4 画素相当）の被災箇所を検知する確率を 80%と見込むことに相当する。

また、上記のように検知確率: P_{∞} を視認性係数 v_i の設定論拠として採用したことにより、2.3 項の計算においては v_i についても確率変数と同様に扱うことが可能である。

尚、上記の前提は画素数（分解能）が支配的要因であることを前提としているが、これ以外のパラメータが支配的になるような撮像対象においては、画像シミュレーション等を用いた別途の設定が必要である。

3. 感度解析

3. 感度解析

3.1 前提条件

1) パラメータ

2章のように定義したサービサビリティ関数の主要パラメータについて、具体的ケースを想定し感度解析を行う。検討ケースとしては、発災後応急対応フェーズへの適用視点から、SAR衛星⁶⁴⁻⁶⁷⁾による災害発生検知を想定した設定とする。SAR衛星としては、災害観測を目的の一つとして開発され、広い観測入射角を有する PALSAR-2 を搭載する ALOS-2⁶⁸⁻⁷¹⁾ をモデルとした。表 3.1-1 を基本パラメータとして、個別条件は解析ケース毎に設定する。また、サービサビリティ関連のパラメータは、その考え方も含め表 3.1-2 のとおり設定する。

表 3.1-1 衛星モデル・地上局モデル⁶⁸⁻⁶⁹⁾

軌道*	太陽同期準回帰軌道
	軌道高度(h): 628km
	回帰日数: 14日
	降交点通過地方時: 12:00
搭載センサ/周波数	合成開口レーダ/Lバンド**
空間分解能	3m**
観測幅	50km**
観測可能入射角: γ (観測可能距離: R_i)	左右 8~70 deg (左右 1,165*** km@高度628km)
地上局等	勝浦局(管制/画像取得) 鳩山局(画像取得のみ) [通信仰角は5deg以上] データ中継衛星「こだま」 (管制/画像取得)

*個別軌道条件は対応するケース表による。軌道計算の定数項は理科年表⁷¹⁾による

**PALSAR-2 高分解能モードにおける値(参考値)

***第2章(2-6)式による

表 3.1-2 サービサビリティ関連パラメータ

パラメータ	値	設定論拠
衛星信頼度: f_i	1.0	コンステレーション成立状態での比較用
晴天率: c	1.0	SAR衛星であるため
視認性係数: v_i	0.8	第2章2.4項で設定した前提条件に基づく
地上所要時間: Δt_g	1.5 h	計画時間: $\Delta t_{g1}=0.5hr$ 、処理・判読時間: $\Delta t_{g2}=1.0hr$

2) ベンチマーク

以下において検討する衛星コンステレーションが到達すべき目標として、

- 発災 6 時間後の東京地点でのサービスサビリティ値として、**0.8 以上**
(以下「 $s \geq 0.8@6h/東京$ 」の如く表記)

をベンチマークに設定する。その論拠は、これまでの防災行政等における議論を踏まえ、次のとおりである。

- ① 国土交通省業務継続計画⁷³⁾によれば、首都直下地震の発生後 12 時間以内に緊急物資輸送業務を開始するとしており、その 1/2 程度の時間内に衛星観測情報を収集するとの設定はこれに整合すること
- ② 「首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画」⁷⁴⁾ 及び「南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画」⁷⁵⁾ (中央防災会議幹事会)によれば、発災後 12 時間より早い段階で緊急輸送ルートの通行可否状況の集約等を行うタイムラインが想定されており、これとも整合すること
- ③ 宇宙開発委員会での討議⁷⁶⁾においては、将来的に国内外の衛星を活用することによって、発災後数時間の間に 80% 程度の確率で衛星観測を行う可能性にも言及されていること (但し、これは第 2 章 2.2 項の衛星ターンアラウンド時間に対応した被災地域観測確率に相当するものである)

尚、上記の政府文書における 12 時間の中では、情報収集の段階と災害対応のための判断を行う段階がある。その意味で上記ベンチマークは前半 6 時間を情報収集の時間と見做して設定したものであるが、実際には後半の 6 時間においても情報の精度を上げるため情報収集が継続されると考えるのが順当である。以下の考察においても、上記ベンチマークに加え、このような視点を一部併用して行く。

3) ノミナルケースと感度解析ケース

1) 項のパラメータに基づいて、ノミナルケースとして太陽同期準回帰衛星である ALOS-2 相当機 1 機のサービスサビリティを求めたものを図 3.1-1 に示す。本ケースでは 6 時間後のサービスサビリティは 0.30 とベンチマークを大きく下回るが、これを出発点として機数並びに軌道パラメータ等に対する感度解析により、ベンチマークを満たす解を抽出して行く。

感度解析を行うケースとしては、代表例として以下の 3 ケースを設定した。

- Case-1 : 太陽同期準回帰軌道
- Case-2 : 太陽同期 + 傾斜軌道
- Case-3 : 傾斜軌道

ここに、太陽同期準回帰軌道は多くの観測衛星に採用された標準的な軌道であり、毎日定時に運用できる特徴がある。一方、傾斜軌道は特定地点での観測頻度を高めるために軌道傾斜角を適宜選択するものであり、この2種類の軌道、並びにその組み合わせケースを代表的な検討ケースとして選定したものである。

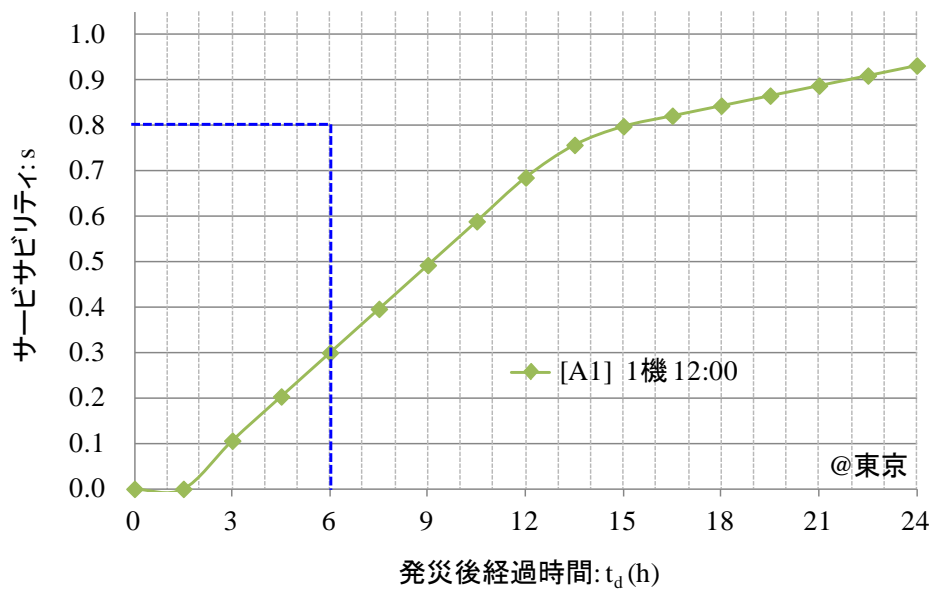


図 3.1-1 ノミナルケース (ALOS-2 相当機 1 機のケース)

3.2 太陽同期準回帰軌道: Case-1

本項では、ALOS-2 相当の衛星を太陽同期準回帰軌道（以下、特に区別の必要のない場合は太陽同期軌道と呼称する）へ複数配置した場合を想定して表 3.2-1 に示す検討を行った。3.1 3)項に示した ALOS-2 相当機 1 機を飛ばす場合を検討の出発点とし、図 3.2-1[A1]として再掲する。

同一軌道面内において、軌道上の面内位相（平均近点離角）差を等間隔に置く前提にて衛星機数を 2 機、3 機、4 機と増加させた場合が、同図[A2]、[A3]、[A4]である。図に示す通り、これらにおいては機数増に対するサービスバリエーションの向上感度は高くなく、4 機[A4]によるサービスバリエーションは、 $s=0.48@6h/東京$ に留まる。これは軌道面が被災地点上空に差し掛かるまでには、SAR 衛星の場合約 12 時間を要し、同一軌道面内、即ち同一の地方太陽時 (Local Sun Time: LST)へ衛星を配置した場合には、面内の全衛星がこの間一斉に待たされる形となるためと考えられる。

これに対し 2 つの軌道面に配置した場合との比較を図 3.2-2 に示す。上記 12:00 軌道への 2 機配備[A2]に比べ、6:00/12:00 への 2LST 配備[B2]では、被災地上空への軌道面会合頻度が 6 時間程度となるため立ち上りが早い。サービスバリエーションは $s=0.59@6h/東京$ と、上記の同一軌道面 4 機配備[A4]を上回る。

また、同じ 2 軌道面 (LST6:00/12:00) に各 2 機計 4 機を配備した場合を同図[B4]に示す。この場合のサービスバリエーションは $s=0.798@6h/東京$ となる。同様の考え方で更に軌道面を分散させた場合 (LST6:00/9:00/12:00/15:00 に各 1 機) を、同じ 4 機配備である上述の[A4]、[B4]と共に[C4]として図 3.2-3 に示す。この場合のサービスバリエーションは $s=0.85@6h/東京$ となる。

以上の検討から、太陽同期軌道においては 4 機を異なる LST に分散させることにより、ベンチマーク $s \geq 0.8@6h/東京$ が達成される。ちなみに 1 機、2 機、4 機における各最大数 LST 分散配備ケース ([A1]、[B2]、[C4]) の時間軸グラフを図 3.2-4 に示す。

機数/LST とサービスバリエーションの関係を図 3.2-5、及び表 3.2-1 の右欄に総括する。サービスバリエーションに対して感度の高い LST 分散を図った結果、4 衛星を 4LST に配備した[C4]においてベンチマーク $s \geq 0.8@6h/東京$ を満たすに至った。

以下では、この[C4]を太陽同期軌道(Case-1)における代表ケースとして参照する (表 3.2-1 の行番 7)。

表 3.2-1 太陽同期軌道 (Case-1)に関する検討ケース一覧

行 番	サブ ケース	設定内容	太陽同期準回帰軌道				サービサビリティ @6hr/東京	備考
			機 数	高 度 (km)	回 帰 日 数	LST (時刻)		
1	[A1]	太陽同期 1 機	1	628	14	12:00	0.30	
2	[A2]	太陽同期 2 機/同一 LST	2	628	14	12:00 (面内に 2 機*)	0.42	
3	[A3]	太陽同期 3 機/同一 LST	3	628	14	12:00 (面内に 3 機*)	0.46	
4	[A4]	太陽同期 4 機/同一 LST	4	628	14	12:00 (面内に 4 機*)	0.48	
5	[B2]	太陽同期 2 機/直交 LST	2	628	14	6:00/12:00	0.59	
6	[B4]	太陽同期 4 機/直交 LST	4	628	14	6:00/12:00 (面内に 2 機*)	0.798	
7	[C4]	太陽同期 4 機/個別 LST	4	628	14	6:00/9:00/ 12:00/15:00	0.85	Case-1 代表ケース

*面内に n 機の設定時は互いに 360deg/n の位相差に配置

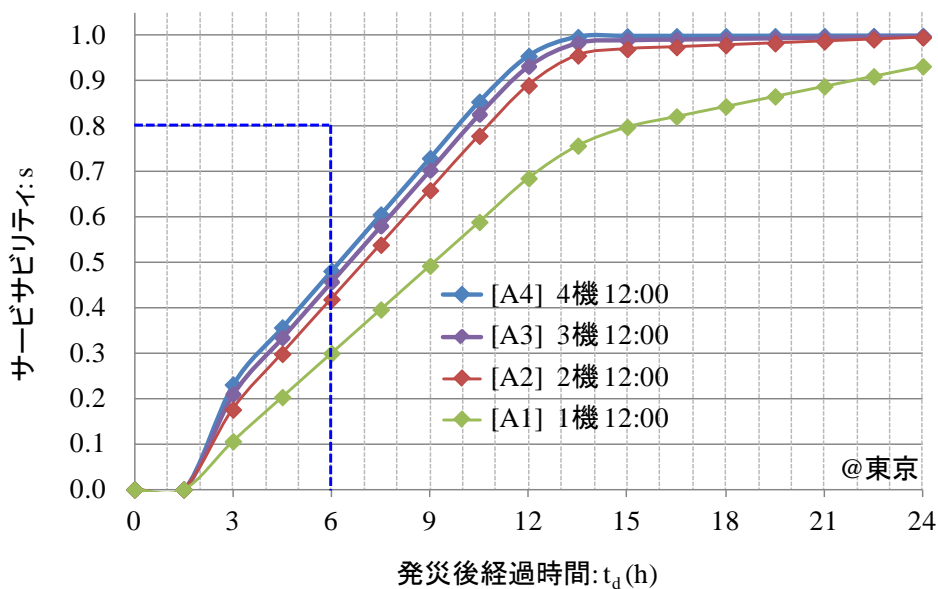


図 3.2-1 LST12:00 におけるサービサビリティ

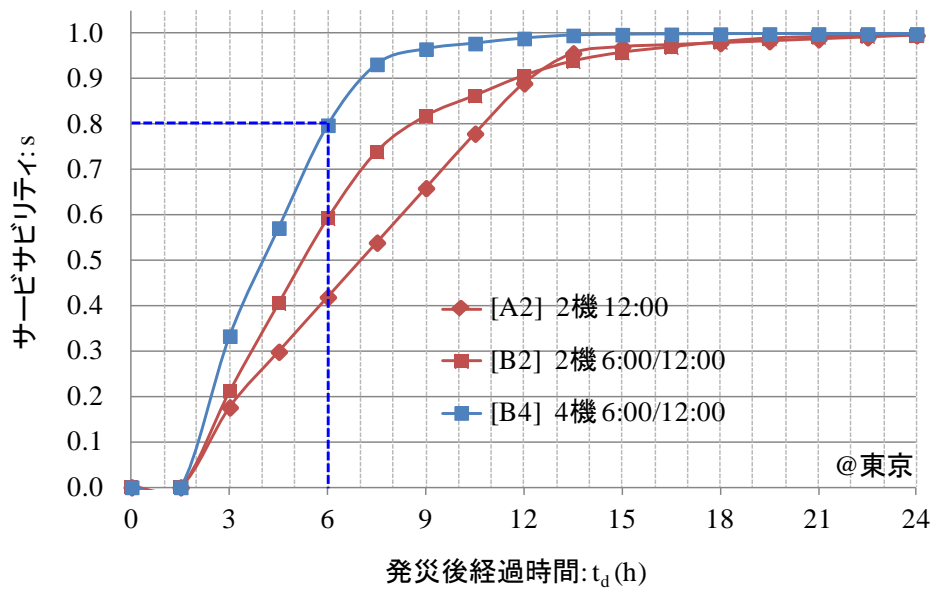


図 3.2-2 LST6:00/12:00 におけるサーバサビリティ

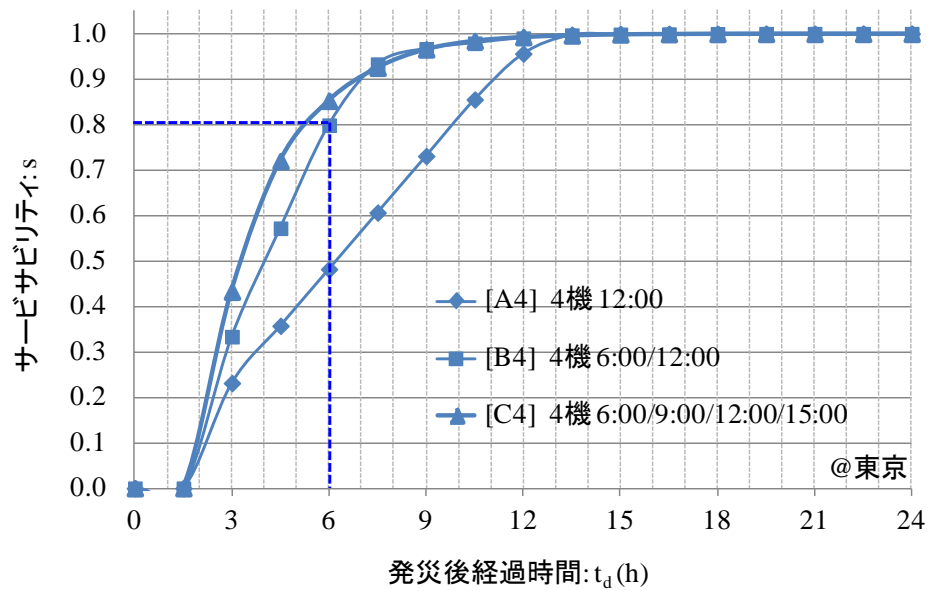


図 3.2-3 4機ケースにおける LST 組合せとサーバサビリティの関係

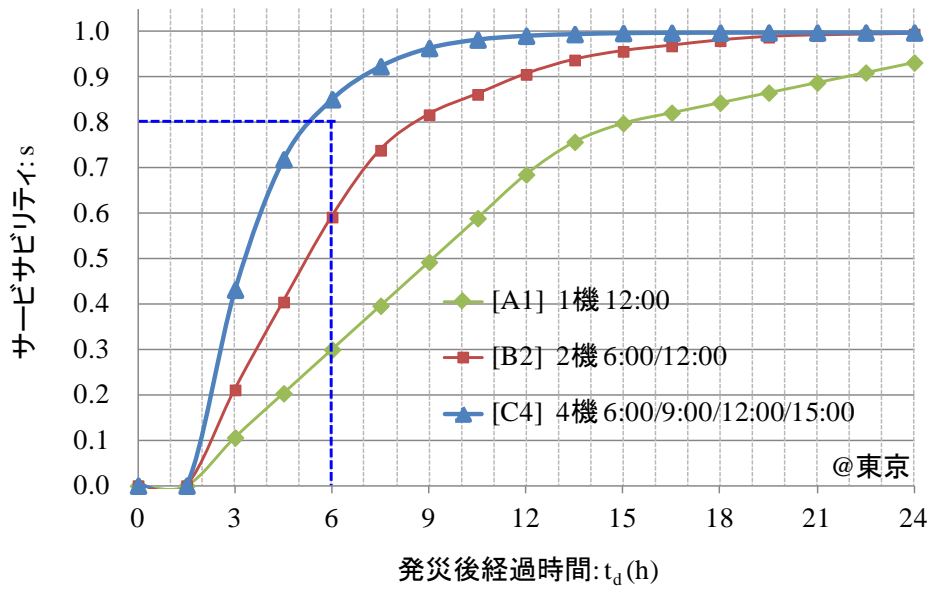


図 3.2-4 1機、2機、4機の場合のLST分散ケースにおけるサービスサビリティ

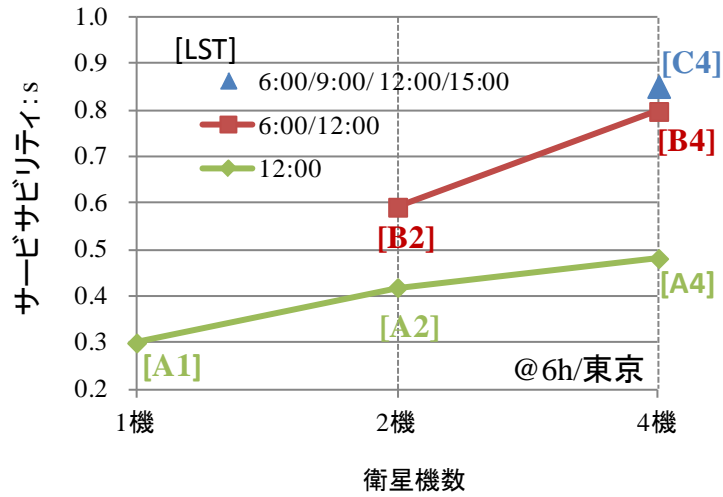


図 3.2-5 衛星機数/LST とサービスサビリティ (Case-1)

3.3 太陽同期軌道と傾斜軌道の組合せ: Case-2

3.2 項の検討の通り、サービスabilityに関するベンチマークを満たすためには太陽同期軌道においては4機の衛星が必要であることが分かった。以下では、4機コンステレーションを前提として、更にサービスabilityを高める観点からパラメータ感度を調べた。

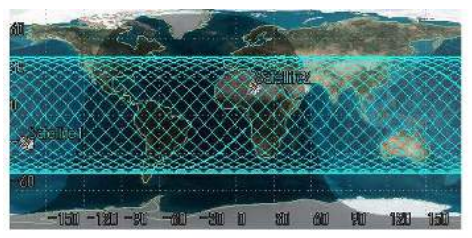
以下では衛星4機の内、2機を傾斜軌道に配備した太陽同期と傾斜軌道の組合せとして、表 3.3-1 について検討する。3.2 項の検討から、太陽同期2機はLSTを分散した6:00/12:00配備を前提とする。傾斜軌道2機の傾斜角は日本域をほぼカバーする46degに設定する。

表 3.3-1 太陽同期2機+傾斜軌道2機 (Case-2)に関する検討ケース一覧

行番	サブケース	設定内容	太陽同期準回帰軌道				傾斜軌道					サービスability		備考
			機数	高度(km)	回帰日数	LST(時刻)	機数	高度(km)	傾斜角(deg)	回帰日数	軌道面差(deg)	6時間後	12時間後	
1	軌道面差: 0deg	太陽同期2機/ 直交LST + 傾斜軌道2機/ 同一軌道面	2	628	14	6:00/ 12:00	2	628	46	14	0	0.80	0.97	
2	軌道面差: 90deg	太陽同期2機/ 同直交LST + 傾斜軌道2機/ 軌道面差90deg	2	628	14	6:00/ 12:00	2	628	46	14	90	0.88	0.99	
3	軌道面差: 180deg (高度: 628km)	太陽同期2機/ 直交LST + 傾斜軌道2機/ 軌道面差 180deg	2	628	14	6:00/ 12:00	2	628	46	14	180	0.94	1.00	
4	軌道面差: 180deg (高度: 509km)	太陽同期2機/ 直交LST + 傾斜軌道2機/ 軌道面差 180deg	2	628	14	6:00/ 12:00	2	509	46	14	180	0.91	1.00	
5	軌道面差: 180deg (高度: 751km)	太陽同期2機 直交LST + 傾斜軌道2機/ 軌道面差 180deg	2	628	14	6:00/ 12:00	2	751	46	14	180	0.97	1.00	Case-2 代表 ケース

1) 軌道面相對角についての検討

傾斜軌道についても軌道面分散に伴う感度が高いことが予想され、以下のように、傾斜軌道衛星 2 機についての軌道面相對角とサービサビリティとの関係を調べる。即ち、傾斜軌道に投入された 2 つの衛星は、図 3.3-1 に示すように同一地表面軌跡を描く場合(同図(a))であっても、軌道面相對角(これを軌道面差と称す。)は各種の値を取り得る。代表的な軌道面差として、(b1) 0deg (=同一軌道面)、(b2) 90deg、(b3) 180deg (最大軌道面差) の 3 条件についてサービサビリティを調べると、時間軸グラフは図 3.3-2、軌道面差との関係は図 3.3-3 のようになり、180deg 軌道面差の場合のサービサビリティが $s=0.94@6h/東京$ と、最も高くなる。



(a) 地表面軌跡



(b1) 0deg(同一軌道面) (b2) 90deg(中緯度で交差) (b3) 180deg(赤道で交差)

図 3.3-1 軌道面相對角(軌道面差)のイメージ*

*AGI 社ツールに基づき策定

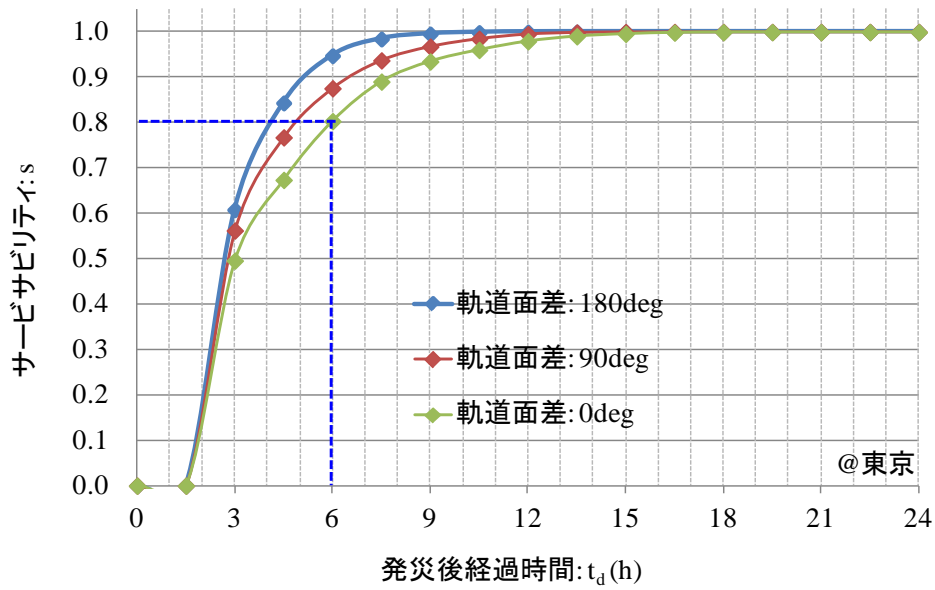


図 3.3-2 軌道面差とサービスサビリティ (時間軸グラフ)

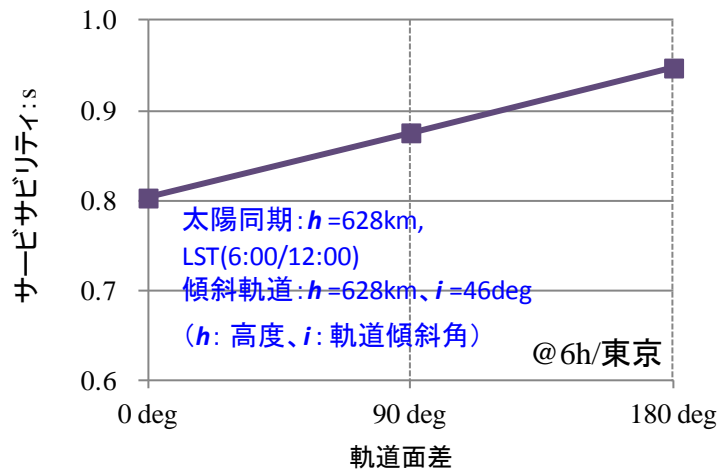


図 3.3-3 軌道面差とサービスサビリティの関係

2) 高度に関する検討

衛星軌道半径: a は、地球半径: a_e と軌道高度: h により

$$a = a_e + h$$

と置き換えられることから、第2章の(2-6)式は、

$$R_i = a_e \{ \gamma_{\max} - \sin^{-1}(1/(1+\varepsilon) \sin \gamma_{\max}) \} - a_e \{ \gamma_{\min} - \sin^{-1}(1/(1+\varepsilon) \sin \gamma_{\min}) \} \quad (3-1)$$

$$\varepsilon = h / a_e$$

として表される。即ち、衛星高度: h は、衛星の観測可能距離: R_i に直結し (図 3.3-4)、また視認性係数: v_i にも効いてくることから、サービスビリティに対する効果が大きいものと予想される。以下においては、本パラメータの扱いに対する考え方を示すと共に、その感度について調べる。

観測衛星を活用するにあたってはデータの継続性が重視される観点から、ここでは太陽同期衛星はアーカイブが活用できる ALOS-2 との同一軌道高度(628km)を原則とし、これと組み合わせる傾斜軌道衛星側の高度の方を変化させる。

軌道高度を ALOS-2(628km)から ± 2 割程度 (509km~751km) の変化を想定すると、(3-1)式により観測可能距離: R_i は表 3.3-2 のようになる。尚、表 3.3-3 に示すように、現在運用中の代表的な SAR 衛星の軌道高度はほぼこの範囲にあることから、現実的な想定と言える。

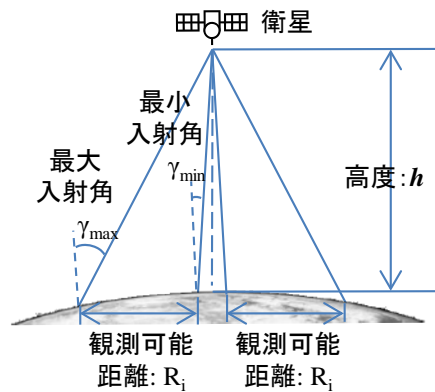


図 3.3-4 衛星高度と観測可能距離

表 3.3-2 観測可能距離 (代表値)

衛星高度: h (km)	観測可能距離: R_i (km)
509	993
628	1165
751	1329

表 3.3-3 運用中衛星の高度 ⁸⁾より抜粋

SAR 衛星	高度(km)
RADARSAT-2	798
ALOS-2	628
COSMO-Skymed	620
TerraSAR-X	514

軌道高度の変更を考察する場合には、次の 2 通りのアプローチが考えられる。

【アプローチ 1】：センサ性能不変の場合

既存センサをそのまま高度変更して用いる場合には、高度変更による観測可能距離： R_i の変化と視認性係数： v_i の変化がサービスサビリティにとって相反する（高度を上げると R_i が拡大しプラスに寄与するが、 v_i の悪化分はマイナスになる。高度を下げた場合はその逆）。図 3.3-5 のプロット[A]は、この相反する効果を相殺し、サービスサビリティが一定となる v_i をグラフ上にプロットしたものである。画像シミュレーション等による評価を通じて、これ以上の v_i の値が見込まれる場合は、軌道高度を上げる又は下げる判断を行えばよい。

即ち、既存センサを軌道高度変更により使用する際には、このような視認性係数とサービスサビリティの得失を予め評価しておくことが必要である。

【アプローチ 2】：視認性係数を維持する場合

一般に SAR センサ性能は衛星から供給される送信電力及びアンテナ利得により規定され、上記の高度範囲は表 3.3-2 にも示すように衛星設計による対応範囲内である。即ち、衛星システムでの吸収（電力増加やアンテナ利得向上）を前提として、高度を変えた場合にも視認性係数 $v_i=0.8$ が維持されるとの前提をおくことも可能である。

ここではアプローチ 2 の前提にて検討を進める。この場合、図 3.3-5 のプロット[B]、及び図 3.3-6 に示すように高度 751km において、サービスサビリティは $s=0.97@6h$ /東京に達する。以下では、これを太陽同期/傾斜軌道組合せ(Case-2)における代表ケースとして参照する。（表 3.3-1 の行番 5）

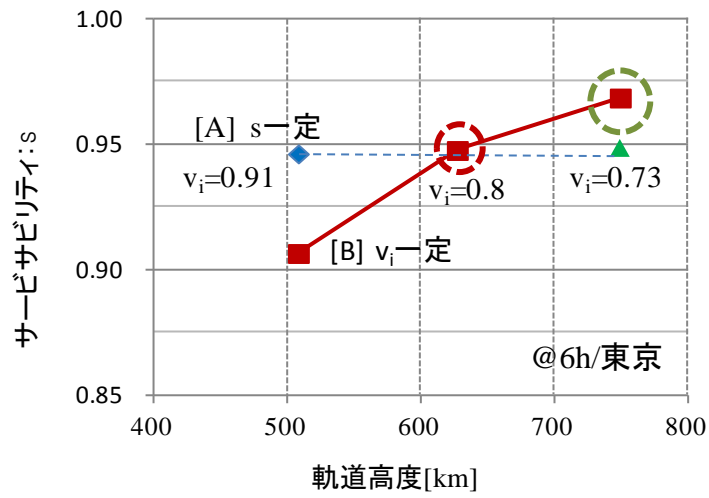


図 3.3-5 軌道高度とサービスサビリティ (Case-2)

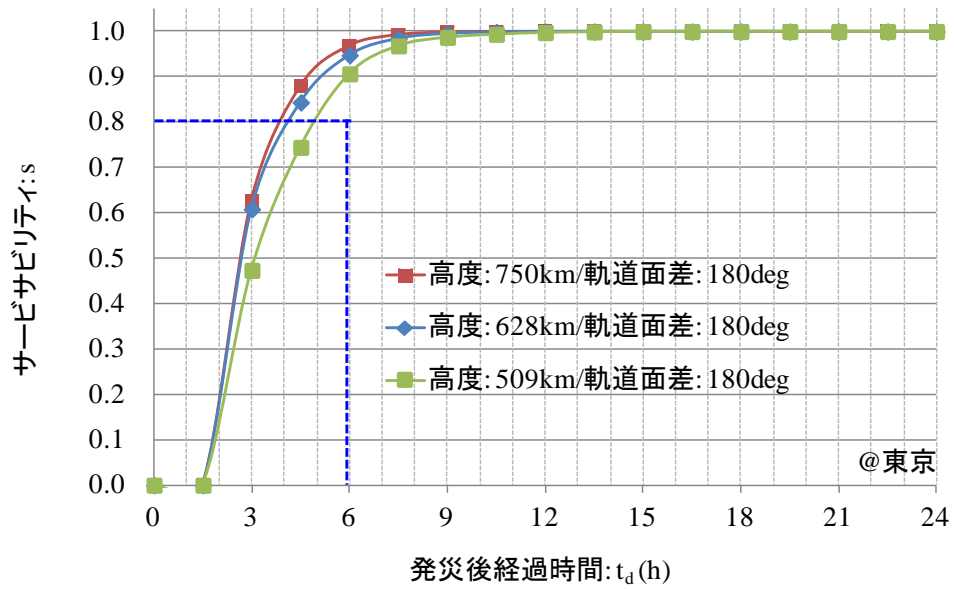


図 3.3-6 軌道高度とサービスサビリティ (Case-2) の時間応答

3.4 全て傾斜軌道の場合: Case-3

1) 軌道面相对角（軌道面差）についての検討

上記までの検討によれば、傾斜軌道を組み合わせることによりサービスバリエーションが大きく向上することが示された。これを発展させ、3.3項で得られた傾斜軌道（高度751km）を4機全てに適用したケースとして、

[A] 軌道面差 180deg の2面に各2機を半周回位相差で配置した場合

[B] 軌道面差 90deg ずつの4軌道面に配置した場合

について調べた。

図 3.4-1 に示すように、6時間後のサービスバリエーションは $s=0.99@6h/東京$ とほぼ同程度ながら、発災直後の即応性においては後者が優る。以下では、この4軌道面（各90deg面差）の配置を4機傾斜軌道(Case-3)における代表ケースとして参照する（表 3.4-1 の行番2）。

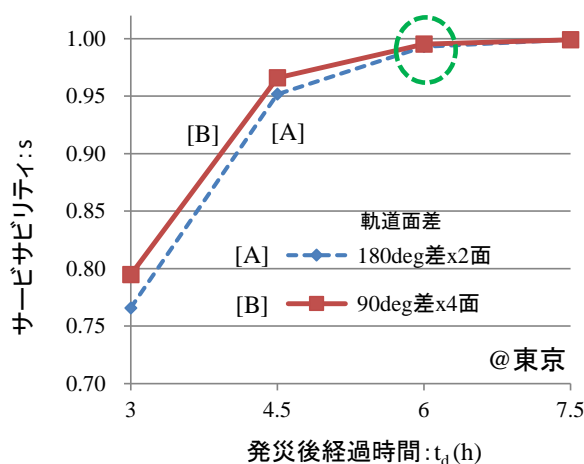


図 3.4-1 軌道面差とサービスバリエーションの関係 (Case-3)

表 3.4-1 傾斜軌道4機 (Case-3)に関する検討ケース一覧

行番	ケース名	ケース内容	傾斜軌道					サービスバリエーション @6hr/東京	備考
			機数	高度 (km)	傾斜角 (deg)	回帰 日数	軌道 面差 (deg)		
1	軌道面差: 180deg (各面に2機)	傾斜軌道4機/ 軌道面差 180deg (面内に2機*)	4	751	46	14	180	0.993	
2	軌道面差: 90deg (各面に1機)	傾斜軌道4機/ 軌道面差 90deg	4	751	46	14	90	0.995	Case-3 代表 ケース

*面内に n 機の設定時は互いに 360deg/n の位相差に配置

3.5 感度解析結果のまとめ

1) Case-1~3 のサマリ

以上の感度解析から抽出された、Case-1~Case-3 の代表ケースのサービスサビリティを 図 3.5-1 に示す。傾斜軌道を含む Case-2 と Case-3 においては、軌道傾斜角が日本（東京）に適合していることと、軌道高度を上げたことにより、高いサービスサビリティ値を示す結果に到った。

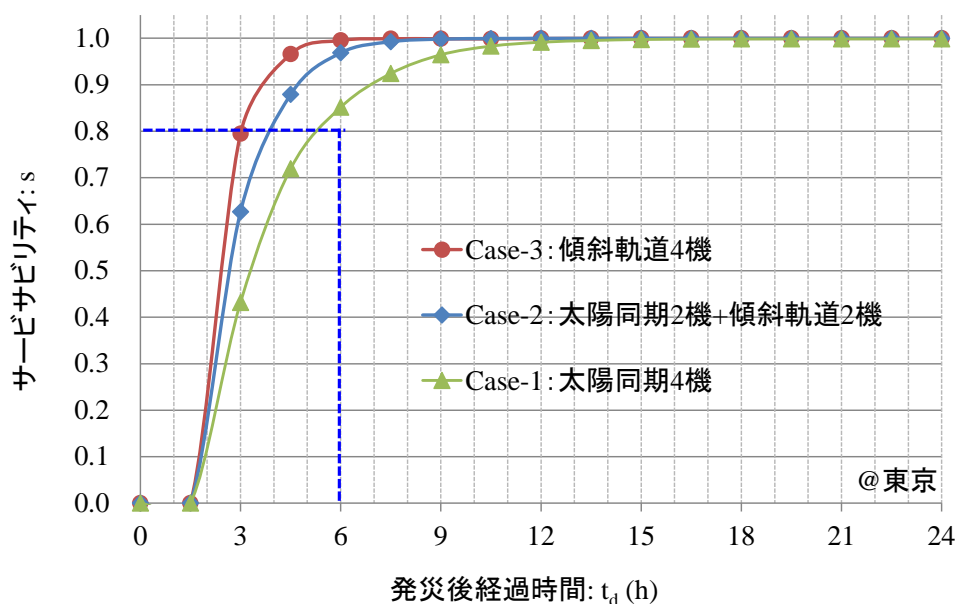


図 3.5-1 Case-1~3 の代表ケース

2) 地上所要時間に対する感度

上記の結果の内、サービスサビリティ波形の最も急峻な Case-3 と最もなだらかな Case-1 について、地上所要時間: Δt_g を 2 倍(=3hr)としてプロットしたものを図 3.5-2 (点線) に示す。

発災後 6hr 時点で単純評価した場合 Case-3 は OK、Case-1 は NG となる。

一方、サービスサビリティ値が 0.8 に届く時点と 6hr 時点の時間差から地上所要時間の許容余力を算出することにより、

Case-1 : 元のグラフ (実線) は 5.3hr 付近で $s=0.8$ に達しており、余力は約 0.7hr

$\Delta t_g=1.5hr$ に対して 47%

Case-3 : 元のグラフ (実線) は 3.0hr 付近で $s=0.8$ に達しており、余力は約 3.0hr

$\Delta t_g=1.5hr$ に対して 200%

のように評価することもできる。

上記では、発災後 6hr 時点をベンチマークとして余力を試算したが、どの時点を基準とするかはユーザからの要求より異なる。例えば、即応性が最重要視されるミッションにおいて 3 時間時点を基準として評価すれば、Case-3 であっても余力は 0 である。そのような場合は、 Δt_g の僅かの誤差がミッション達成を左右する。即ち、極めて短時間での即応性を追求するようなケースになるほど、地上所要時間の見極めがクリティカルになる。

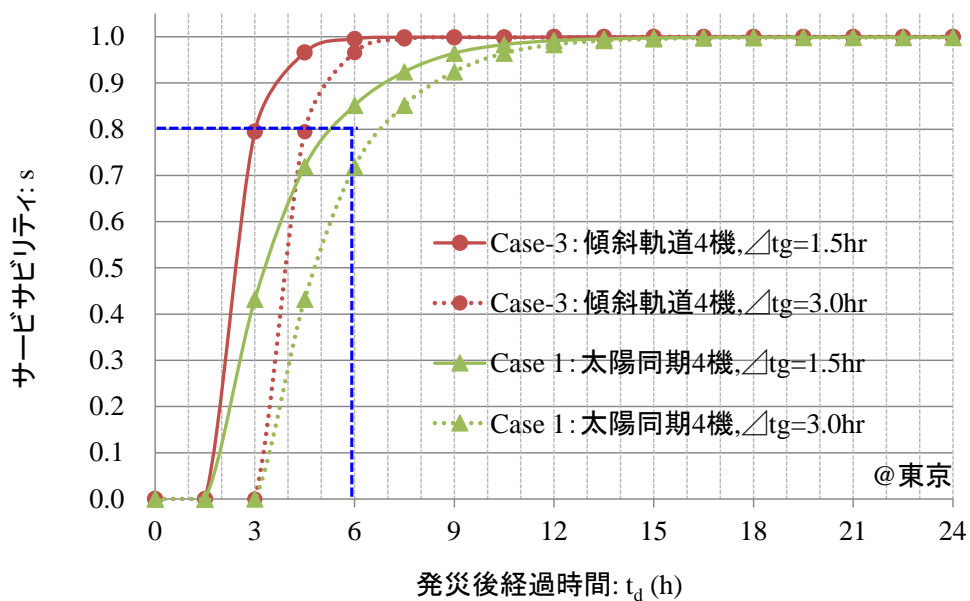


図 3.5-2 地上所要時間に対する感度

4. 最適コンステレーションの構築

4. 最適コンステレーションの構築

4.1 最適コンステレーションの構築プロセス

以下では、サービスabilityを評価関数として、対象地域において最適となる災害観測コンステレーションの構築検討を行う。そのプロセスを通じて、サービスability関数がコンステレーション最適化に適用し得ることを示す。尚、ここでの「最適化」とは「候補となる複数のコンステレーションのパラメトリック評価を通じて、最も有効性の高いものを抽出するプロセス」と定義する。

最適コンステレーションの構築プロセスを3段階に分けて示したものを図4.1-1に示す。

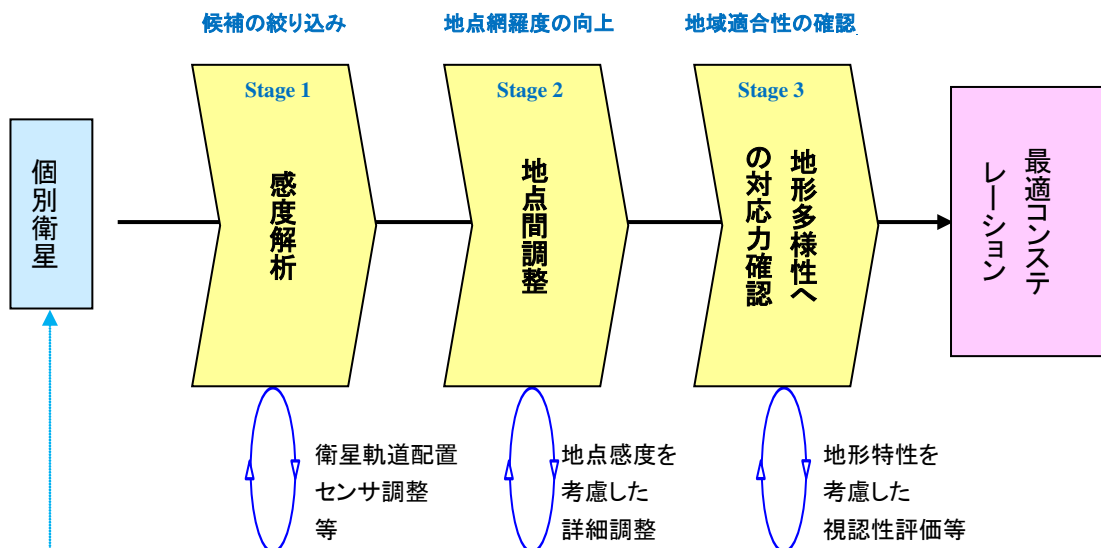


図 4.1-1 最適コンステレーションの構築プロセス

図 4.1-1 における各 Stage の考え方は次のとおりである。

Stage 1 : 感度解析

コンステレーション候補を絞り込む段階。コンステレーションに組み込む個別衛星モデルは予め準備（既存衛星の活用構想、新規衛星の概念設計等）されているものとする。この段階では対象地域の代表地点におけるサービスビリティ値を評価関数として、衛星軌道配置やセンサモデル等の主要パラメータについての感度解析を行いコンステレーション候補の絞り込みを行う。

Stage 2 : 地点間調整

Stage 1 が代表地点における検討であるのに対し、本段階では対象地域における地点網羅度を上げ、代表点以外に複数地点を加えてサービスビリティ値を評価し、特に地点感度の高いパラメータについての詳細調整を行う。例えば後述のように、傾斜軌道における軌道傾斜角は対象地点緯度と密接に関係しサービスビリティへの影響が大きいことから、詳細な見極めが必要となる。

Stage 3 : 地形多様性への対応力確認

Stage 2 における地表面と軌道との関係に基づく地点間調整に続き、本段階ではコンステレーションの対象地域への適合性を見通すため、地域内の地形特性を考慮した対応力についての考察、評価を行う。例えば、視認性係数の変動や、センサ視野の制約を検討モデルに反映する等の方法により、評価を実施する。

尚、これら各 Stage において検討を回した結果、一つ前の Stage に立ち戻る、或いはそもそも個別衛星の選択から見直す等、必要に応じ大きなフィードバックループをかけることになる。このような検討サイクルにより、最適コンステレーションを抽出して行く。

本論文においては、SAR コンステレーションによる応急対応をテーマとして、第 3 章において Stage 1 (感度解析) までを実施した。以下では日本域及びアジア域を対象に Stage 2、Stage 3 の検討を進め、それぞれにおける最適コンステレーションの抽出を行う。

4.2 日本域における最適化

1) Stage 1 : 感度解析

第3章の感度解析で抽出した Case-1 (太陽同期軌道 4 機)、Case-2 (太陽同期 2 機+傾斜軌道 2 機) 及び Case-3 (傾斜軌道 4 機) の各コンステレーションの代表ケースについて、日本域を対象とした比較評価を行う。評価にあたっては、第3章と同様、6 時間時点におけるサービサビリティ値を基準とする。

以下ではまず Stage 2 において、地点感度の高い傾斜軌道 (Case-2 と Case-3) の両ケースについて、最適な軌道傾斜角を選択した上で、日本域における最適解の一次選定を行う。その後に Stage 3 として、その解が日本域の地形特性への対応力を有するか評価する。

2) Stage 2 : 地点間調整

これまでの代表点東京 (北緯 35.7 度) に加えて、都道府県庁所在地の中から最北の札幌 (北緯 43.1 度) と最南の那覇 (北緯 26.2 度) を想定被災地として選定し、これら 3 地点におけるサービサビリティ値に基づき、地点間の調整を行う。

① Case-2 における最適軌道傾斜角

太陽同期 2 機+傾斜軌道 2 機の場合の東京、札幌、那覇 3 地点での軌道傾斜角に対するサービサビリティの変化を図 4.2-1 に、設定条件と結果の一覧を表 4.2-1 に示す。

これによれば、軌道傾斜角 $i=40\sim 50\text{deg}$ の範囲において、那覇のサービサビリティは急激に低下、東京は 49deg 付近まで漸増する。札幌は増加傾向であるも $i=43\sim 44\text{deg}$ 付近にて極小点が存在する。これは札幌 (北緯 43.1 度) が SAR 衛星の直下点、即ち観測可能な最小入射角: γ_{\min} 未満の不可視帯に入る頻度が他の傾斜角より相対的に多いためと考えられる。上記の傾斜角範囲において、3 地点間のサービサビリティ平均値は、概ね 0.925~0.95 の範囲において微減傾向なるも大きな有意差は無い。ここでは 3 地点間の相対差が最も少ない $i=42\text{deg}$ を選定し、Case-2($i=42$)と標記する ()内は軌道傾斜角)。

② Case-3 における最適軌道傾斜角

同様に、傾斜軌道 4 機の場合の東京、札幌、那覇 3 地点での軌道傾斜角に対するサービサビリティの変化を図 4.2-2 に、設定条件と結果の一覧を表 4.2-2 に示す。

このケースでは、同じ軌道傾斜角範囲において那覇のサービサビリティは微減であり 0.95 以上を維持、東京は 1.0 近くに張り付いている。札幌は $i=43\sim 44\text{deg}$ 付近にて Case-2 と同要因による大きな極小点が存在する。これは 4 機とも同じ傾斜軌道にあるため、直下点通過の影響がより強く傾向が表れたものと考えられる。ここで 1)と同様に $i=42\text{deg}$ を選定した場合、その直下に位置する地点において同様の大きな落ち込みが発生する。実際、函館における当該傾斜角でのサービサビリティをプロットすると、札幌における $i=43\sim 44\text{deg}$ の極小点とほぼ同様の値となる。本ケースにおいては極小点の発生が札幌以北になるように $i=45\text{deg}$ を選定し、Case-3($i=45$)と表記する。

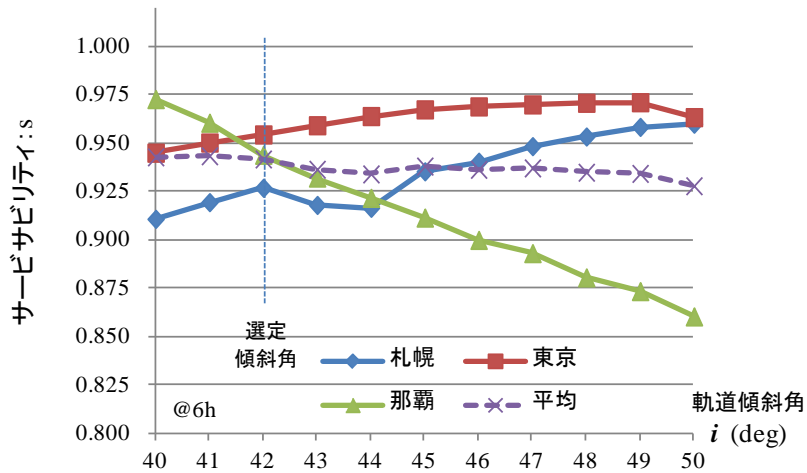


図 4.2-1 Case-2: 太陽同期 2 機+傾斜軌道 2 機における軌道傾斜角の影響

表 4.2-1 Case-2 における設定条件とサービスサビリティ値一覧

ケース番号	ケース名	太陽同期準回帰軌道				傾斜軌道					6時間後のサービスサビリティ			
		機数	高度 (km)	回帰日数	LST (時刻)	機数	高度 (km)	傾斜角 (deg)	回帰日数	軌道面差 (deg)	札幌	東京	那覇	3地点平均
Case-2 (i=40)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 40deg	2	628	14	6:00/12:00	2	748	40	14	180	0.911	0.945	0.973	0.943
Case-2 (i=41)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 41deg	2	628	14	6:00/12:00	2	748	41	14	180	0.919	0.950	0.960	0.943
Case-2 (i=42)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 42deg	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	0.927	0.954	0.944	0.942
Case-2 (i=43)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 43deg	2	628	14	6:00/12:00	2	749	43	14	180	0.918	0.959	0.932	0.936
Case-2 (i=44)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 44deg	2	628	14	6:00/12:00	2	750	44	14	180	0.916	0.964	0.921	0.934
Case-2 (i=45)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 45deg	2	628	14	6:00/12:00	2	750	45	14	180	0.935	0.967	0.911	0.938
Case-2 (i=46)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 46deg	2	628	14	6:00/12:00	2	751	46	14	180	0.940	0.969	0.900	0.936
Case-2 (i=47)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 47deg	2	628	14	6:00/12:00	2	752	47	14	180	0.948	0.970	0.893	0.937
Case-2 (i=48)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 48deg	2	628	14	6:00/12:00	2	753	48	14	180	0.953	0.971	0.880	0.935
Case-2 (i=49)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 49deg	2	628	14	6:00/12:00	2	754	49	14	180	0.958	0.971	0.873	0.934
Case-2 (i=50)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機 / 傾斜角 50deg	2	628	14	6:00/12:00	2	754	50	14	180	0.960	0.963	0.860	0.928

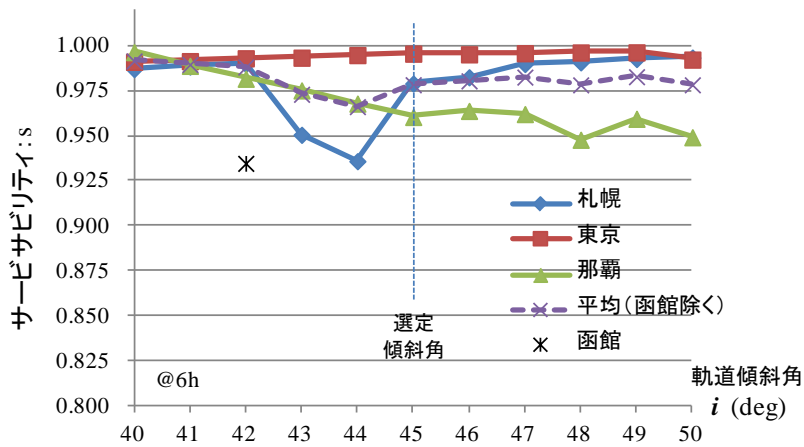


図 4.2-2 Case-3: 傾斜軌道 4 機における軌道傾斜角の影響

表 4.2-2 Case-3 における設定条件とサービサビリティ値一覧

ケース番号	ケース名	傾斜軌道					6 時間後のサービサビリティ			
		機数	高度 (km)	傾斜角 (deg)	回帰日数	軌道面差 (deg)	札幌	東京	那覇	3 地点平均
Case-3 (i=40)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 40deg	4	748	40	14	180	0.987	0.991	0.997	0.992
Case-3 (i=41)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 41deg	4	748	41	14	180	0.989	0.992	0.989	0.990
Case-3 (i=42)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 42deg	4	749	42	14	180	0.990	0.993	0.982	0.988
Case-3 (i=43)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 43deg	4	749	43	14	180	0.951	0.993	0.975	0.973
Case-3 (i=44)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 44deg	4	750	44	14	180	0.936	0.995	0.968	0.966
Case-3 (i=45)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 45deg	4	750	45	14	180	0.979	0.996	0.961	0.978
Case-3 (i=46)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 46deg	4	751	46	14	180	0.983	0.995	0.964	0.981
Case-3 (i=47)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 47deg	4	752	47	14	180	0.990	0.996	0.962	0.983
Case-3 (i=48)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 48deg	4	753	48	14	180	0.991	0.996	0.948	0.978
Case-3 (i=49)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 49deg	4	754	49	14	180	0.993	0.996	0.960	0.983
Case-3 (i=50)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 50deg	4	754	50	14	180	0.993	0.992	0.949	0.978

③ 日本域における一次評価

以上のように地点間調整を行った Case-2($i=42$)、Case-3($i=45$)と、Case-1 を含めて一次評価を実施した。結果一覧を表 4.2-3 に、国内 3 地点の時間軸波形を図 4.2-3 に示す。その評価内容は以下のとおりである。

Case-1 : 3 地点ともに $s \geq 0.8@6h$ となり、且つ地点間のばらつきも少ない。ALOS-2 アーカイブも使用でき、全体としてバランスのとれた解である。

Case-2 : 3 地点ともに $s \geq 0.9@6h$ となり、且つ地点間のばらつきも抑えられている。太陽同期衛星については ALOS-2 アーカイブも使用でき、総合的に優れた解である。

Case-3 : 3 地点ともに $s \geq 0.9@6h$ (1 に近い値) となり、即応性は最も高い。特に、東京では発災後 3 時間で 0.8 に達する点は特記される。但し他の 2 地点ではそこまで達せず、またアーカイブ使用不可なことから、同じく $s \geq 0.9@6h$ を満たす Case-2 が総合力で勝ると判断する。

総じて、観測の継続性を含む日本域全体への有用性の観点からは Case-2($i=42$)が推奨され、本ケースをここでの最適解とする。

表 4.2-3 日本域における一次評価

ケース番号	ケース名	3 時間後の サービスビリティ			6 時間後の サービスビリティ				ALOS-2 アーカイブ 使用可否
		札幌	東京	那覇	札幌	東京	那覇	3 地点平均	
Case-1	太陽同期 4 機/高度 628km	0.48	0.43	0.40	0.88	0.85	0.86	○0.86	○ 可
Case-2 ($i=42$)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機/傾斜角 42deg	0.57	0.59	0.56	0.93	0.95	0.94	●0.94	○ 可
Case-3 ($i=45$)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 45deg	0.65	0.80	0.63	0.98	1.00	0.96	●0.98	× 不可

0.9 以上
0.8 以上
可

即応性: ○

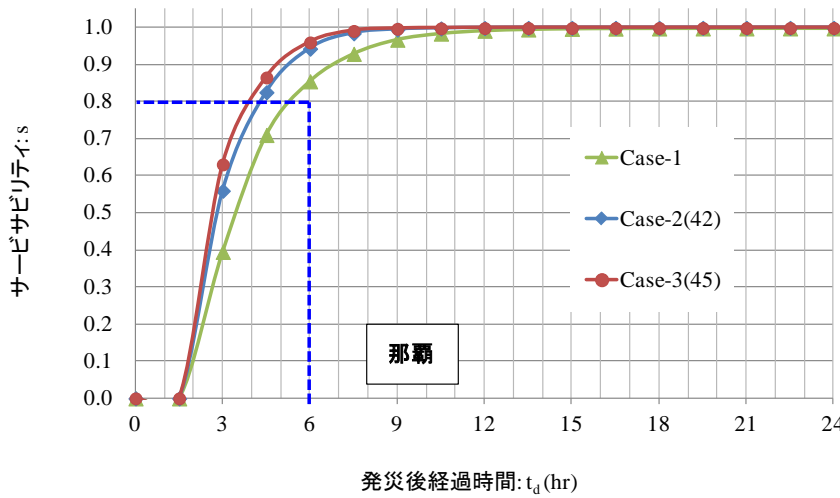
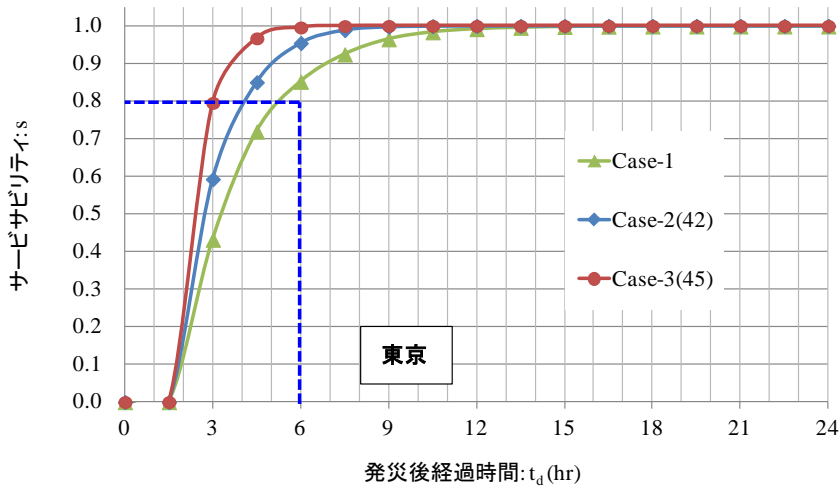
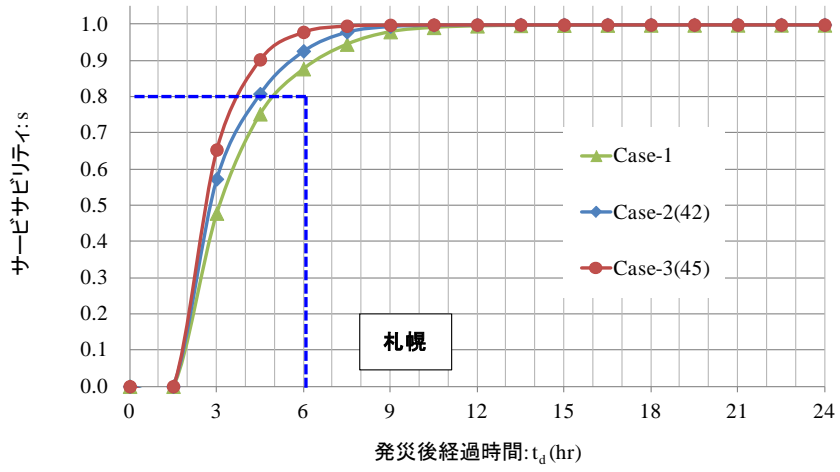


図 4.2-3 日本域候補ケースによる 3 地点での時間軸波形

3) Stage 3 : 地形多様性への対応力確認

以上においては東京、札幌、那覇の3都市部についてサービスリティ計算を行ったが、日本域全体への適用を考える場合、山地・丘陵地比率が72.8%⁷⁷⁾に上るという我が国の地形特性にも考慮の上、これに対する対応力を確認する必要がある。

斜面の多い山間部等では、図4.2-4に示す原理⁷⁸⁾により衛星視野からの陰(シャドウ)、更にSARの場合には倒れ込み(レイオーバ/フォアショートニング)が発生する。これにより、入射角 γ に対して観測される面積が減ることになる。

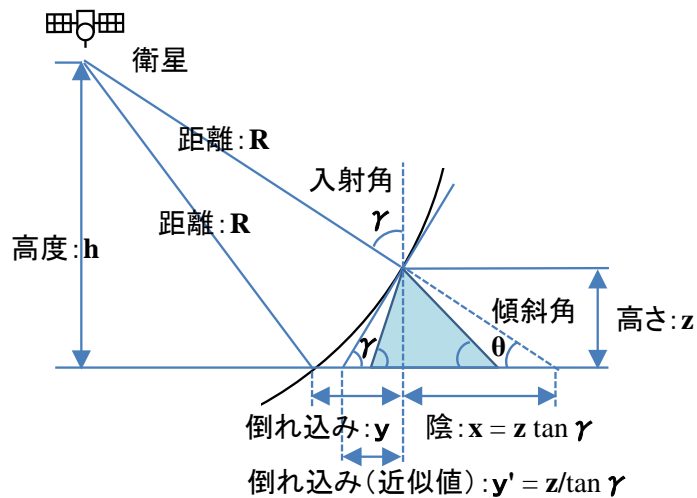


図 4.2-4 衛星視野と陰および倒れ込みの関係

特に倒れ込みは SAR 画像において不可避であり、入射角によっては対象地形の麓を越えた倒れ込みが発生し、麓部分の情報は失われる。災害時には幹線交通路に対する観測優先度が高い(第5章 5.1 項参照)が、谷底の集落や山あいを通る山間部の道路は、このような陰や倒れ込みの直接的な影響を受ける。

図4.2-5は、そのような事例として、四国山脈を縦貫する高知自動車道のALOS-2による撮像画像(入射角: $\gamma=33.2\text{deg}$ 、撮像データは表4.2-4のとおり)を示したものである。衛星軌道と平行した区間においては、倒れ込みにより道路の検知が難しくなっており、特に南北方向に道路が走る同図4/6(箇所:c)、5/6(箇所:d)では、道路を検知できる範囲は20%程度以下となっている。

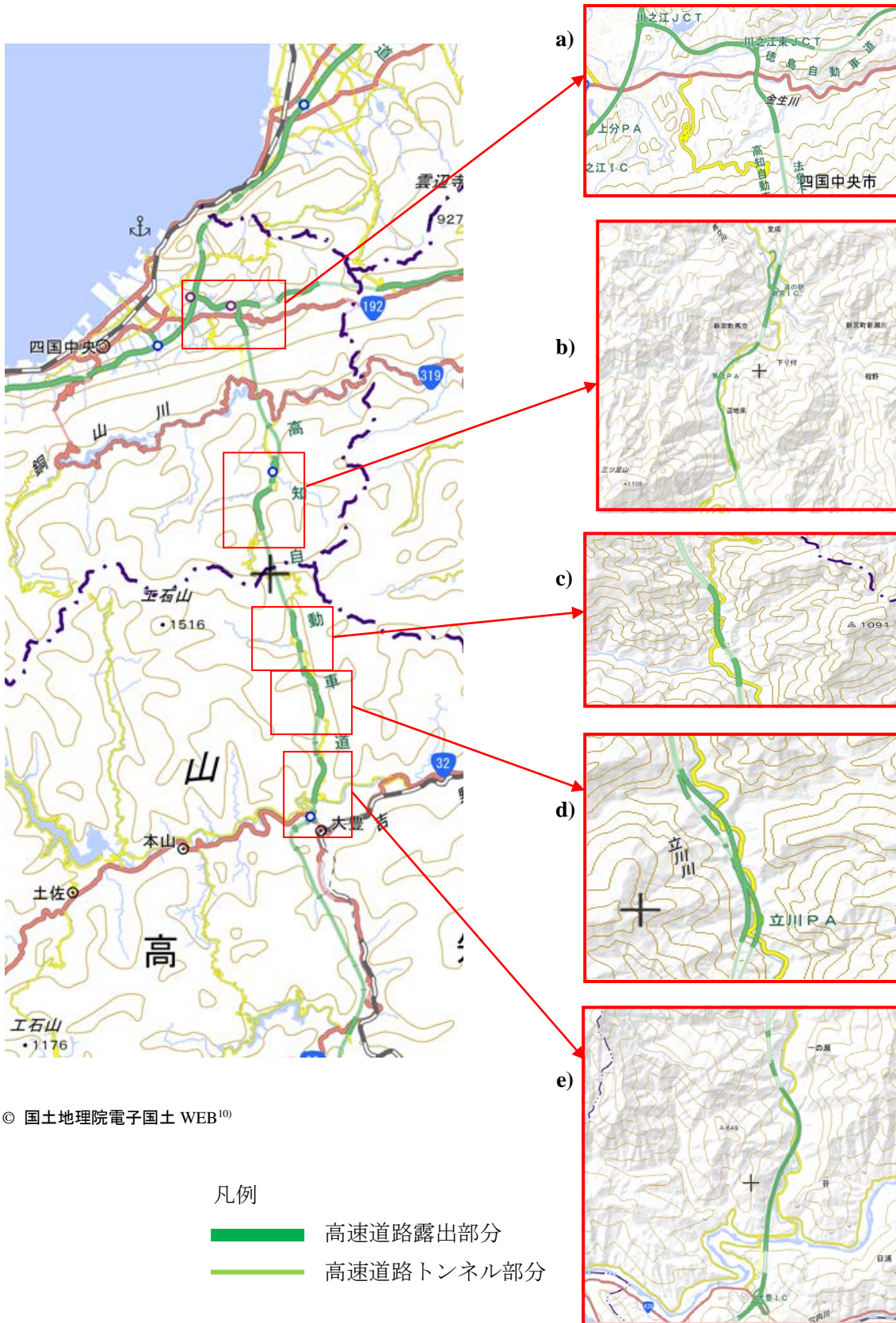


図 4.2-5 山岳地形による道路画像の遮蔽例 (高知自動車道) (1/6)

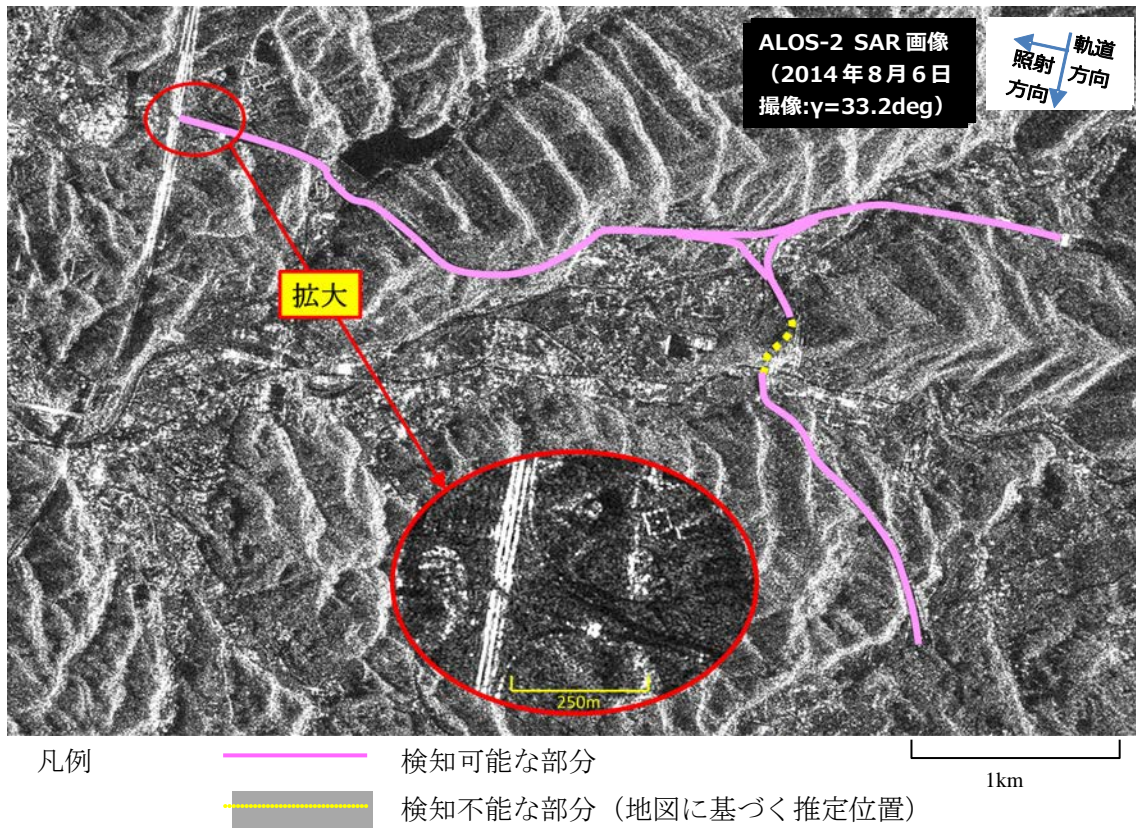


図 4.2-5 山岳地形による道路画像の遮蔽例 (高知自動車道) (2/6)

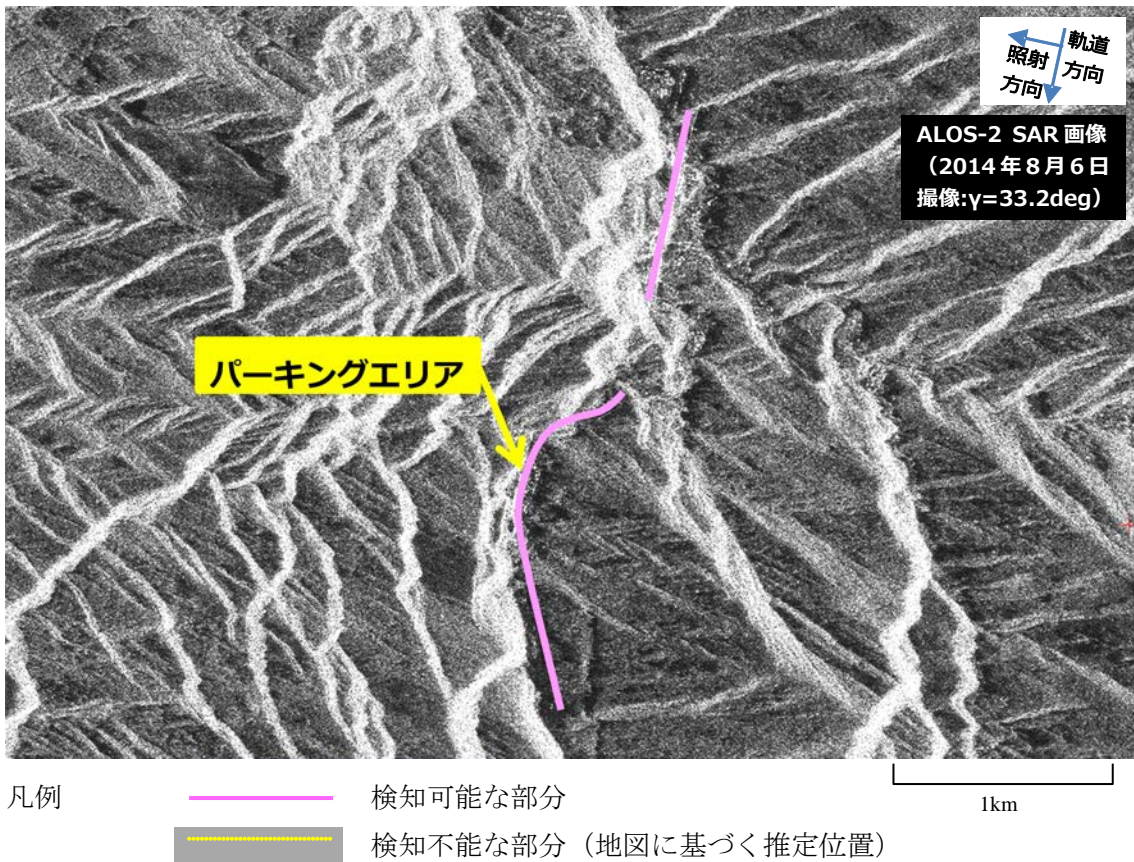
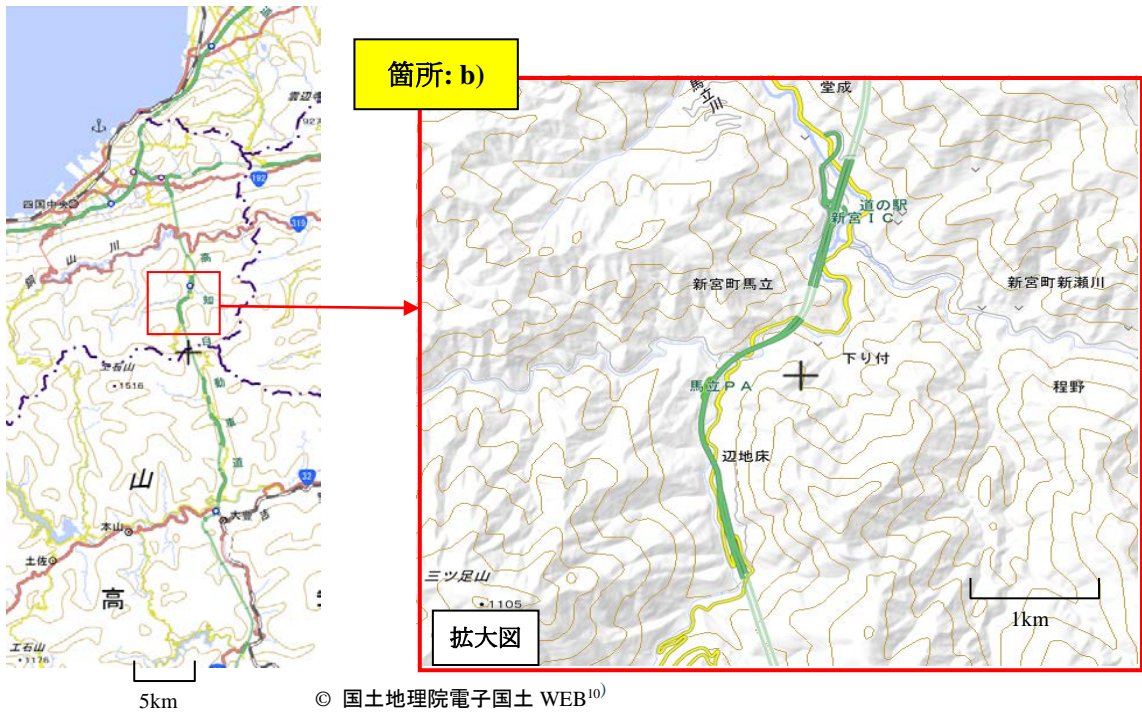
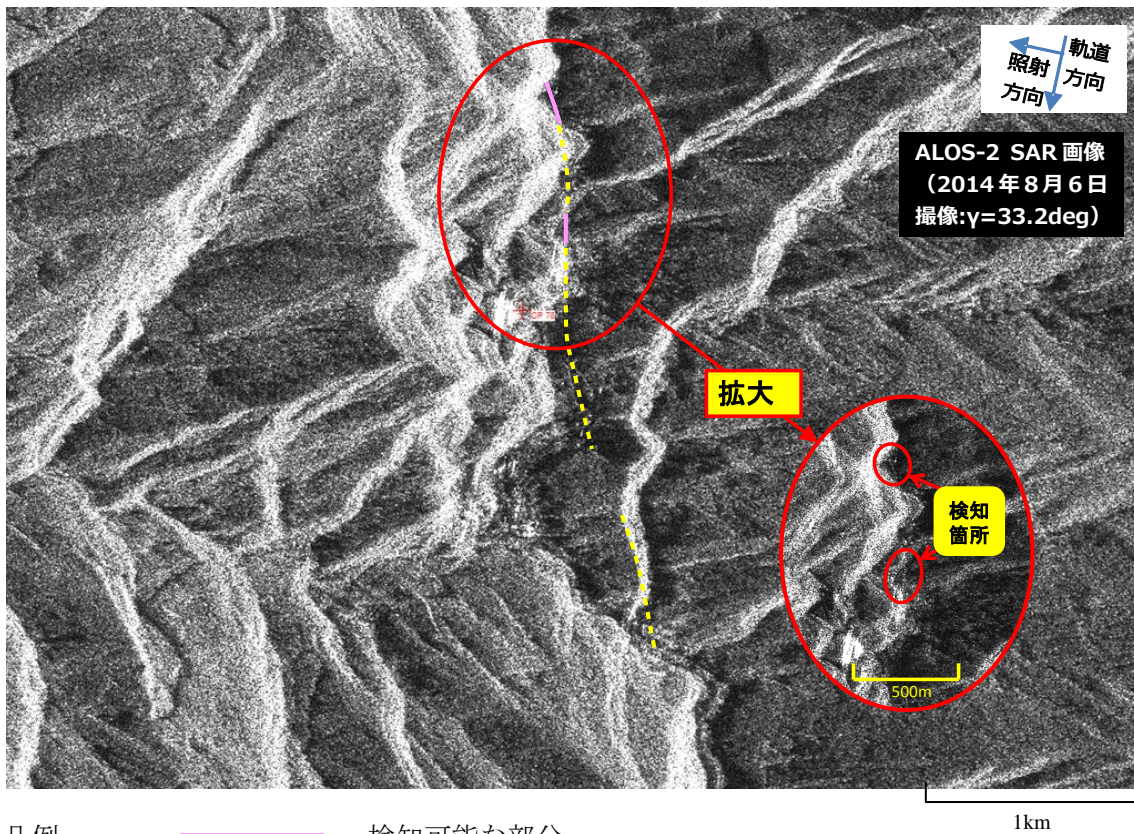
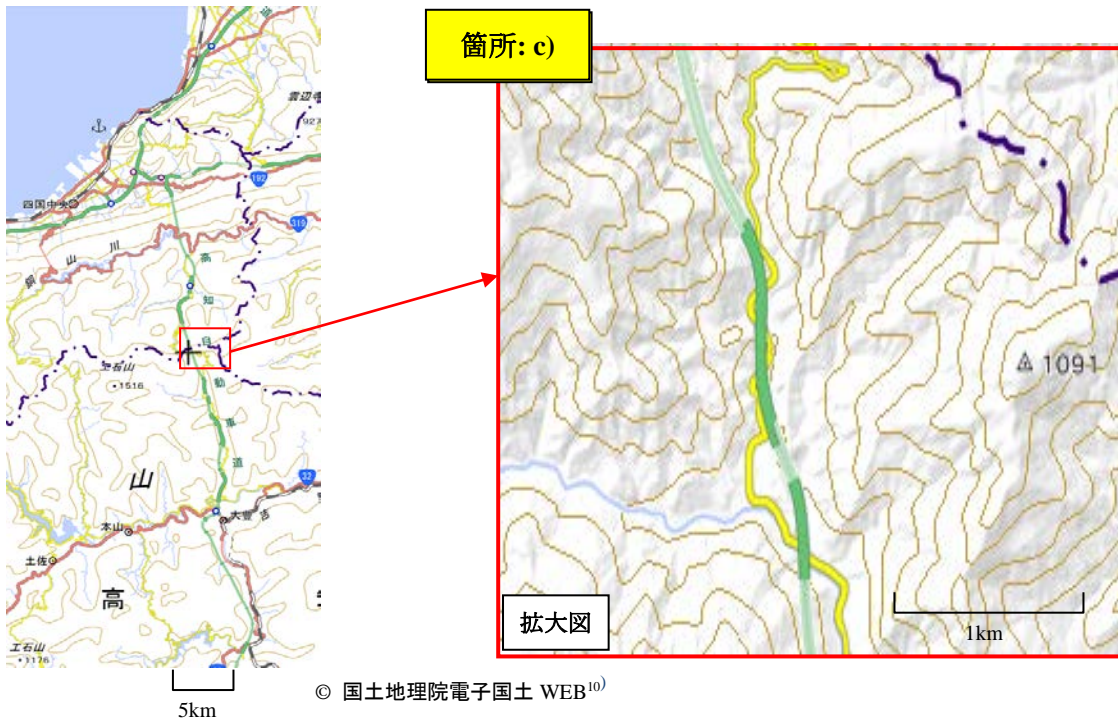


図 4.2-5 山岳地形による道路画像の遮蔽例 (高知自動車道) (3/6)



- 凡例
- 検知可能な部分
 - 検知不能な部分 (地図に基づく推定位置)

図 4.2-5 山岳地形による道路画像の遮蔽例 (高知自動車道) (4/6)

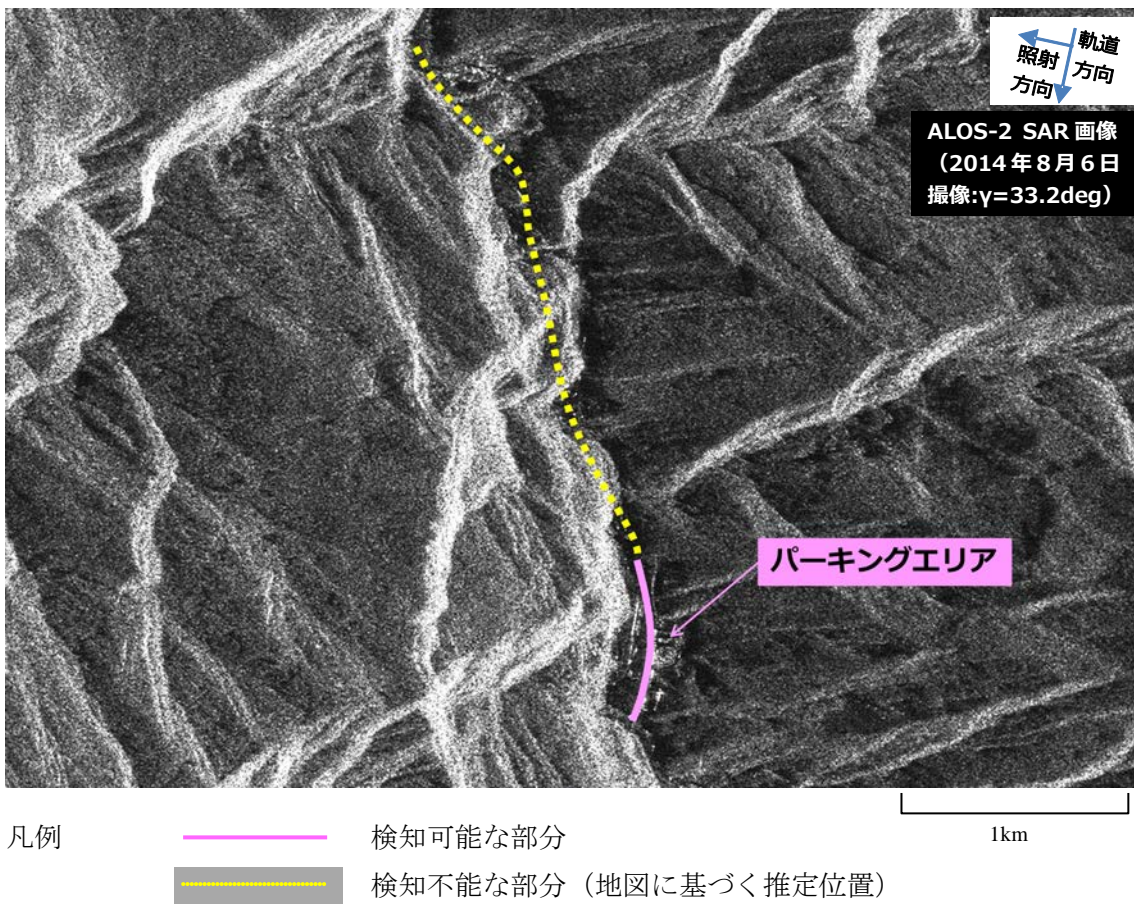


図 4.2-5 山岳地形による道路画像の遮蔽例 (高知自動車道) (5/6)

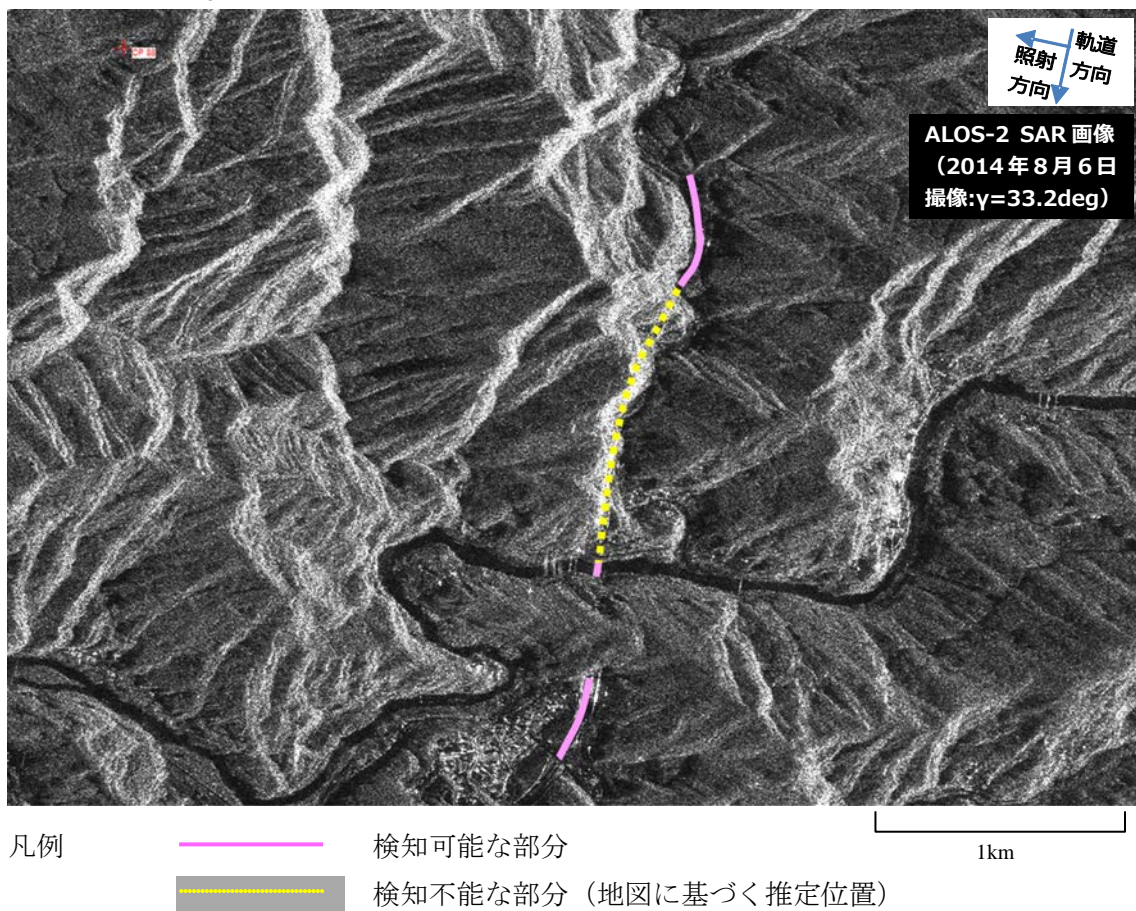
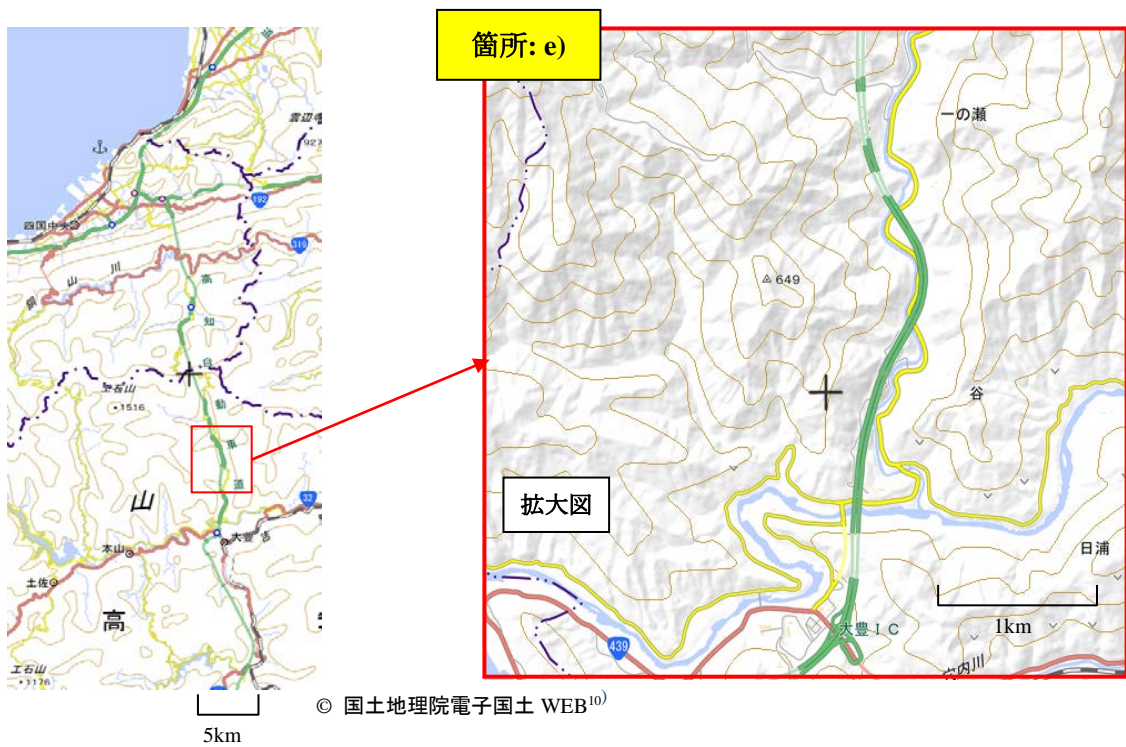


図 4.2-5 山岳地形による道路画像の遮蔽例 (高知自動車道) (6/6)

表 4.2-4 高知自動車道例における ALOS-2 SAR 画像データ

Odi_SceneId="SARD00000028194-00006-057-011"
Odi_SiteDateTime="PROCESS:JAPAN-JAXA-ALOS2-EICS 20160203 102419"
Scs_SceneID="ALOS2010942930-140806"
Scs_SceneShift="0"
Pds_ProductID="UBSR1.5RUD"
Pds_ResamplingMethod="CC"
Pds_UTM_ZoneNo="53"
Pds_PixelSpacing="2.500000"
Pds_OrbitDataPrecision="Precision"
Pds_AttitudeDataPrecision="Onboard"
Img_SceneCenterDateTime="20140806 03:11:23.837"
Img_SceneStartDateTime="20140806 03:11:18.836"
Img_SceneEndDateTime="20140806 03:11:28.837"
Img_ImageSceneCenterLatitude="33.964"
Img_ImageSceneCenterLongitude="133.499"
Img_ImageSceneLeftTopLatitude="34.314"
Img_ImageSceneLeftTopLongitude="133.274"
Img_ImageSceneRightTopLatitude="34.221"
Img_ImageSceneRightTopLongitude="133.879"
Img_ImageSceneLeftBottomLatitude="33.703"
Img_ImageSceneLeftBottomLongitude="133.138"
Img_ImageSceneRightBottomLatitude="33.610"
Img_ImageSceneRightBottomLongitude="133.739"
Img_FrameSceneCenterLatitude="33.962"
Img_FrameSceneCenterLongitude="133.508"
Img_FrameSceneLeftTopLatitude="34.315"
Img_FrameSceneLeftTopLongitude="133.273"
Img_FrameSceneRightTopLatitude="34.221"
Img_FrameSceneRightTopLongitude="133.879"
Img_FrameSceneLeftBottomLatitude="33.703"
Img_FrameSceneLeftBottomLongitude="133.138"
Img_FrameSceneRightBottomLatitude="33.609"
Img_FrameSceneRightBottomLongitude="133.740"
Img_OffNadirAngle="29.5"
Pdi_ProductDataSize="1203.8"
Pdi_CntOfL15ProductFileName="4"
Pdi_L15ProductFileName01="VOL-ALOS2010942930-140806-UBSR1.5RUD"
Pdi_L15ProductFileName02="LED-ALOS2010942930-140806-UBSR1.5RUD"
Pdi_L15ProductFileName03="IMG-HH-ALOS2010942930-140806-UBSR1.5RUD"
Pdi_L15ProductFileName04="TRL-ALOS2010942930-140806-UBSR1.5RUD"
Pdi_BitPixel="16"
Pdi_NoOfPixels_0="22729"
Pdi_NoOfLines_0="27598"
Pdi_ProductFormat="CEOS"
Ach_TimeCheck="GOOD"
Ach_AttitudeCheck="GOOD"
Ach_AbsoluteNavigationStatus=""
Ach_HouseKeepingDataCheck="GOOD"
Ach_OrbitCheck="GOOD"
Ach_OnBoardAttitudeCheck="GOOD"
Ach_LossLines="GOOD"
Ach_AbsoluteNavigationTime=""
Ach_PRF_Check=""
Ach_CalibrationDataCheck=""
Rad_PracticeResultCode="GOOD"
Lbi_Satellite="ALOS2"
Lbi_Sensor="SAR"
Lbi_ProcessLevel="1.5"
Lbi_ProcessFacility="EICS"
Lbi_ObservationDate="20140806"

以下においては、上記のような陰や倒れ込みの存在を考慮した場合の対応力を、次の2つの方法により評価する。

- ① 視認性係数のワーストケースとして反映しサービサビリティを見積もる方法
- ② 陰や倒れ込みを考慮した入射角設定によりサービサビリティ値を計算する方法

① 視認性係数ワーストケースへの反映

上記のように山間部においては軌道に直角方向の道路等は観測されるが、軌道に平行方向の場合はレイオーバーにより視認が極めて難しい場合がある。これを観測可能範囲の半減と見做し、次式により換算視認性係数: v_i^{new} をワーストケースとして再設定する。

$$v_i^{new} = \alpha_m v_i / 2 + (1 - \alpha_m) v_i \quad (4-1)$$

但し、 α_m : 山地・丘陵地比率、 v_i は当初値

ここに α_m は山地・丘陵地比率であり、この範囲においては視認性係数を半減と見做す。日本国土における統計値⁷⁾として $\alpha_m = 0.728$ を用いると、例えば次のように試算される。

- a) $v_i^{new} = 0.60$ (当初値 $v_i = 0.94$ を仮定した場合)
- b) $v_i^{new} = 0.51$ (当初値 $v_i = 0.8$ を仮定した場合)

上記の v_i 当初値とは、第2章 2.4.3)項で採用した検知確率に基づく v_i に対応するものである。b)の方は v_i 当初値設定時 ($v_i = 0.94$ から $v_i = 0.8$ を導く際) に15%の悪化を前提としていることから、(4-1)式と合わせると合計2段階の悪化を織り込んでいる。従って、a)をワースト値、b)を超ワースト値と言うこともできる。

図 4.2-6 は、2)項において一次選定した Case-2(42) において視認性係数を 0.8~0.5 まで変化させた場合の6時間後サービサビリティのプロット(東京、札幌、那覇3地点での平均値)である。上記の v_i^{new} において、($v_i^{new} = 0.51$ ではやや下回るものの)概ね $s = 0.8$ が確保されることから、本条件に基づけば「対応力あり」と判断し得るものと考えられる。

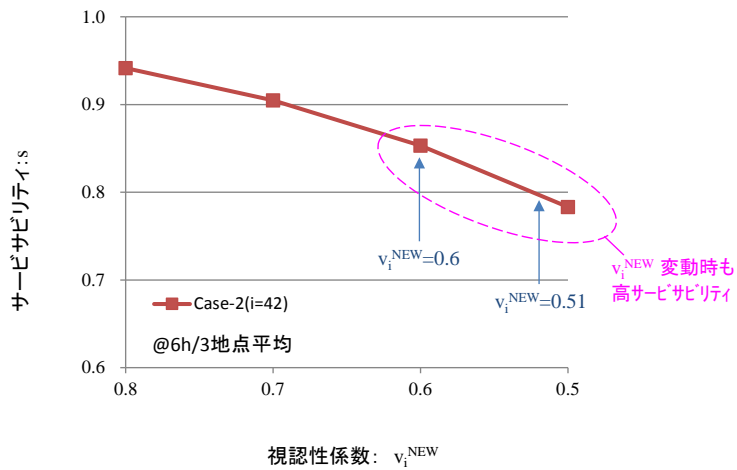


図 4.2-6 視認性係数を用いた地形多様性への対応力の評価

② 陰や倒れ込みを考慮した入射角設定による方法

日本統計年鑑(平成28年版)⁷⁹⁾によると、日本国土の地形・傾斜度別面積比率は表 4.2-5 のとおりである。これに対し ALOS-2 を例にとると、そのビーム区分は入射角に対して表 4.2-6 の通りである。

表 4.2-5 日本国土における地形・傾斜度別面積比率

番号	傾斜度	面積比率
(1)	20deg 未満	68.4%
(2)	20~30deg	23.3%
(3)	30deg 以上	8.3%

表 4.2-6 ALOS-2 のビーム区分と入射角/傾斜角

ビーム区分	入射角: γ (deg)	傾斜角: $\theta=90-\gamma$ (deg)
U1	8	72
	30	60
U2	44	46
	56	34
U3	64	26
	70	20

先に示した図 4.2-4 では、地表傾斜度（角 A）がビーム傾斜角： θ を上回っており、このような場合に陰が生じる。

表 4.2-5、表 4.2-6 によれば、ALOS-2 の全ビーム区分を使用した場合、陰無しで観測できるのは (1)傾斜度 20deg 未満の範囲となり、国土の 68.4%に相当する。ここから更に U5 を使用不可とし U1～U4 により観測するとした場合は、傾斜度 26deg まで、即ち国土の 82.4%（表 4.2-5 の(2)を内分し(1)に加算）程度をカバーする計算になる。このような考察に基づき、陰の発生しにくい条件設定として傾斜角の浅い（入射角の大きい）ビーム区分を除外してサービスビリティを計算し、対応力を評価する。以下では、U5 を除外して計算する。

陰が光学、SAR のいずれでも問題になるのに対し、倒れ込みは SAR において生ずる現象である。図 4.2-4 に示すように地上の凸部分の頭頂部高さを z 、倒れ込み長さを y とする時、軌道高度： $h \gg z$ につき、 y は近似的に $y' = z / \tan \gamma$ （ γ は入射角）となることから、倒れ込み比率： y/z は、

$$y/z = 1/\tan \gamma \quad (4-2)$$

と表され、ビーム区分との対応関係は表 4.2-7 のようになる。

倒れ込み長さ： y が地上凸部分の麓まで届かない場合がフォアショートニング、麓を越えて前方に出る場合がレイオーバである。（図 4.2-4 では角 $B \geq$ 入射角 γ であり、レイオーバが生じている。）

例えば、U1 ビームを使用除外（即ち、入射角 $\gamma \geq 30\text{deg}$ ）とした場合、角 $B < 30\text{deg}$ の範囲、即ち表 4.2-5 の(1)+(2)から、国土面積の 91.7%でレイオーバを回避できる計算となる。

表 4.2-7 ALOS-2 のビーム区分と倒れ込み

ビーム区分	入射角： γ (deg)	倒れ込み比率： y/z
U1	8	7.12
	30	1.73
U2	44	1.04
	56	0.67
U3	64	0.49
	70	0.36

倒れ込みを考慮した「対応力」を考察するにあたっては、ミッション要求と対象地域の地形特性からどの程度の倒れ込みを許容するかで決まってくる。上記 U1 を使用除外とした場合、U2 ビームの最小入射角 30deg において倒れ込み比率は 1.7 倍である。もしも 1.7 倍程度が許容不可で、1 倍程度に抑える必要がある場合は U2 まで除外する選択肢もあり得る。

以下においては、上記考察に基づく陰と倒れ込みの双方に対する対応力評価として、U1 と U5 ビーム区分を除外した場合の、Case-2(42)におけるサービスサビリティ値をワーストケースとして算出した。結果を図 4.2-7 に示す。本ケースは平地と山間部の区別をせず一律に観測範囲を狭めたこともあり、3 地点平均の 6 時間後サービスサビリティは $s=0.75$ と、①項 b) $v_i^{new}=0.51$ による検討結果（同図に併記）よりも低めに出ている。

この結果の許容可否については防災ユーザとの調整を踏まえて見極めることになるが、7 時間程度のところで $s=0.8$ を超えている。従って、第 3 章 3.1 項にて前提とした 12 時間以内の情報収集の観点からは許容され得る可能性が高いものと想定され、ここでは地形多様性を考慮した場合にも「対応力あり」と評価する。

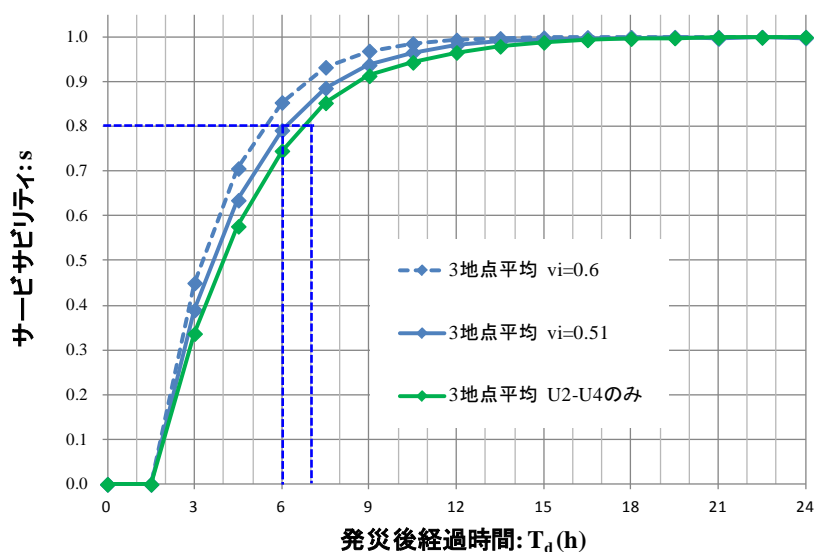


図 4.2-7 地形多様性への対応力（時間軸グラフ）

尚、「地形の多様性」は対象とする地域ごとに異なるものであるため、上記のいずれの方法を取るにせよ、その地域固有の地形特性を踏まえた上で、条件を設定する必要がある。また、対象点として必須の地点が山間地に存在するような場合は、本論文による計算手法の発展形として、第 2 章 2.4 1) 項の衛星ターンアラウンド時間の計算において、地表面の立体モデル (DEM) を導入することにより、固有地点での撮像時刻算出精度を高める等の対応も考えられる。

4.3 アジア域における検討

1) Stage 1：感度解析

以下では、対象範囲をアジア域まで広げた検討を行う。ここでは我が国がミッションを主導するようなケースを想定し、第 3 章において東京を代表点とした感度解析により抽出した Case-1～Case-3 の代表ケースを出発点として比較評価を行う。

2) Stage 2：地点間調整

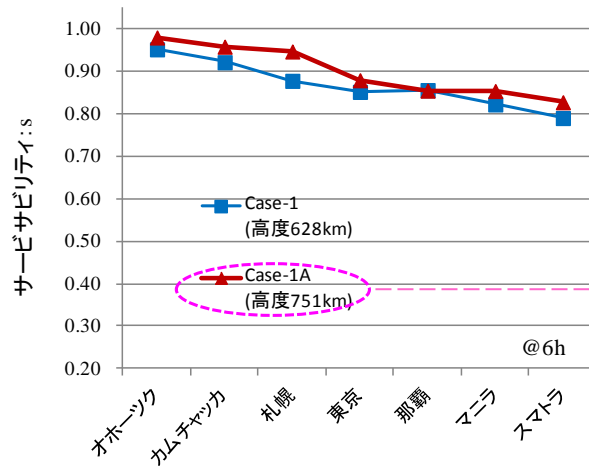
日本域の 3 地点に加えて、オホーツク（北緯 59.4 度）とカムチャッカ（北緯 53.1 度）、マニラ（北緯 14.6 度）とスマトラ（北緯 5.5 度）の計 7 地点を評価地点に設定する。日本域において検討した Case-1～3、並びに次の派生ケースを含めて考察する。

- ① Case-1：原ケース（高度 628km）、Case-1A（全衛星を高度 750km）
- ② Case-2：日本域で最適だった軌道傾斜角 $i=42\text{deg}$ に加え、 $i=15、30、60\text{ deg}$
- ③ Case-2：日本域で最適だった軌道傾斜角 $i=45\text{deg}$ に加え、 $i=15、30、60\text{ deg}$

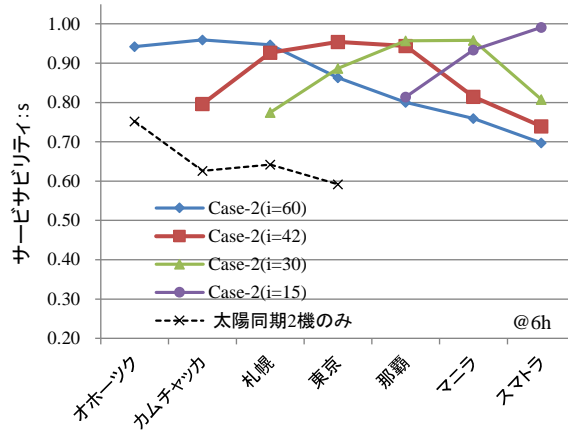
上記 7 地点での 6 時間後サービスサビリティを図 4.3-1 に、結果の一覧を表 4.3-1 に示す。以上から次のことが言える。

- ① Case-1
 - Case-1A（高度を 750km）において、 $s \geq 0.8@6\text{hr}$ /全 7 地点（7 地点解）
- ② Case-2
 - Case-2(42)は、北方／南方でサービスサビリティが低下する緯度依存性あり
 - Case-2(60)は、南方でサービスサビリティが低下する緯度依存性あり
 - Case-2(30)/Case-2(15)は、北方でサービスサビリティが低下する緯度依存性あり
 - 総じて、各緯度地点に適合する軌道傾斜角でのサービスサビリティは高いが、全地点共通での改善には至らない。
- ③ Case-3
 - Case-3(60)において、 $s \geq 0.8@6\text{hr}$ /全 7 地点（7 地点解）
 - Case-3(45)では、オホーツクを除く 6 地点において $s \geq 0.8@6\text{hr}$ （6 地点解）
 - 総じて、4 軌道面への分散効果により、南方でのサービスサビリティが高く維持されている

① Case-1:
太陽同期 x4

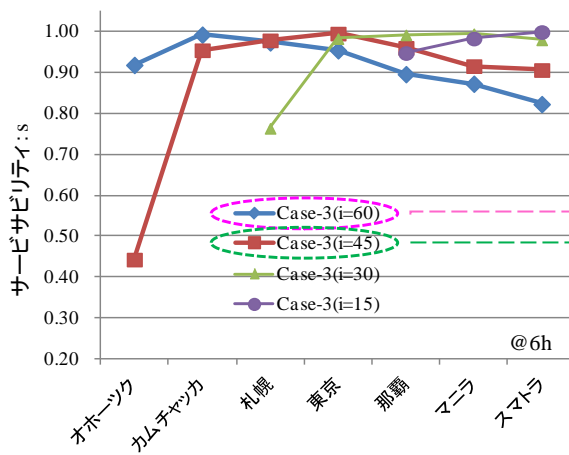


② Case-2:
太陽同期 x2
+ 傾斜軌道 x2



7 地点解
 $s > 0.8 @ 6h / 7$ 地点

③ Case-3:
傾斜軌道 x4



6 地点解
 $s > 0.8 @ 6h / 6$ 地点

図 4.3-1 アジア域におけるサービスサビリティ

表 4.3-1 アジア域におけるサービサビリティ結果一覧

ケース番号	ケース名	オホーツク	カムチャツカ	札幌	東京	那覇	マニラ	スマトラ	ALOS-2 アーカイブ 使用可否	
		北緯(deg)								
		59.4	53.1	43.1	35.7	26.2	14.6	5.5		
Case-1	太陽同期 4 機/高度 628km	0.95	0.92	0.88	0.85	0.86	0.82	0.79	可	
Case-1A	太陽同期 4 機/高度 747km	0.98	0.96	0.95	0.88	0.85	0.85	0.83	不可	
Case-2(<i>i</i> =60)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機/傾斜角 60deg	0.94	0.96	0.95	0.86	0.80	0.76	0.70	可	
Case-2(<i>i</i> =42)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機/傾斜角 42deg	<u>0.75</u>	0.80	0.93	0.95	0.94	0.81	0.74	可	
Case-2(<i>i</i> =30)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機/傾斜角 30deg	<u>0.75</u>	<u>0.63</u>	0.77	0.89	0.96	0.96	0.81	可	
Case-2(<i>i</i> =15)	太陽同期 2 機 + 傾斜軌道 2 機/傾斜角 15deg	<u>0.75</u>	<u>0.63</u>	<u>0.64</u>	<u>0.59</u>	0.81	0.93	0.99	可	
Case-3(<i>i</i> =60)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 60deg	0.92	0.99	0.97	0.95	0.90	0.87	0.82	不可	
Case-3(<i>i</i> =45)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 45deg	0.44	0.95	0.98	1.00	0.96	0.92	0.91	不可	
Case-3(<i>i</i> =30)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 30deg	傾斜軌道 では観測不可			0.76	0.98	0.99	1.00	0.98	不可
Case-3(<i>i</i> =15)	傾斜軌道 4 機/傾斜角 15deg	傾斜軌道 では観測不可				0.95	0.98	1.00	不可	
		0.9 以上			0.8 以上			可		

注1) 斜体字下線部は太陽同期 2 機のみによるサービサビリティ（傾斜軌道の観測限界による）

注2) Case-1A の高度は 747km を選択（太陽同期準回帰軌道の離散解）

3) Stage 3 : 地形多様性への対応力確認

アジア域は日本域に比べて格段に広く、またその地形特性も地域毎に大きく異なる。従って、本来はそれぞれの地域毎に個別に視認性係数への反映を行うべきところであるが、ここでは地形による影響を 4.2 3)①項で扱った a) $v_i^{new} = 0.60$ と仮定して、各地点での対応力を評価する。

図 4.3-2 によれば、7 地点解 (Case-1A と Case-3(60)) は $v_i = 0.6$ の場合において、特に南方域においてサービサビリティ 0.8 を大きく下回り、対応力を有しない。

一方、図 4.3-3 によれば 6 地点解である Case-3 (45) は (当初から除外のオホーツクを除き) $v_i = 0.6$ の場合においても 6 地点とも $s \geq 0.8 @ 6hr$ を維持しており、対応力を有すると言える。

即ち、本前提条件の場合は、オホーツクを除外するという次善解ながら Case-3(45) が抽出される。

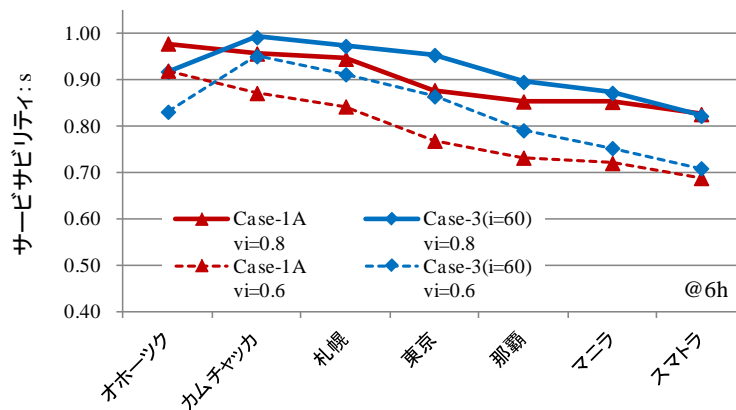


図 4.3-2 7 地点解の対応力

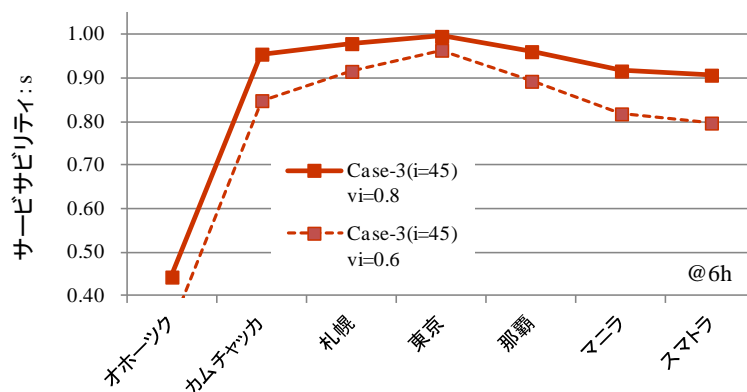


図 4.3-3 6 地点解の対応力

4) アジア域に関する考察

3) 項の考察においては、全7地点で対応力を満たす解は抽出されなかった。この検討を更に詰めるためには、地域毎の地形をより正確に反映したモデルを用いる方法もある。

他方、特に国際協力により実施する観測については、その前提条件を含めて見直すことも選択肢の一つである。(図 4.1-1 における Stage 1 以前への回帰)

第3章の感度解析においてサービサビリティベンチマークの前提とした「6時間後」は、国内における防災タイムラインから設定したものである。国外観測の場合にはその広域性に加え、国際機関間の連携のための所要時間も加味されることから、発災後の応急対応時間の考え方は、国内の場合とは異なってくると考えられる。例えば、仮に9時間後サービサビリティにより評価することとした場合、図 4.3-4 に示すように Case-2(42)が全ての地点において高い値となり、更に $v_i=0.6$ においても $s \geq 0.8$ を満たすことになる。

4.2 項において示した通り、Case-2(42) は日本域における最適解として抽出されたものである。アジア域において評価の前提条件を変えることにより、これを採用可能であるならば、国内における最適解が国際貢献上も有意義であることになり、一石二鳥となる。

尚、4.3 項でのアジア域の検討サマリを表 4.3-2 に示す。

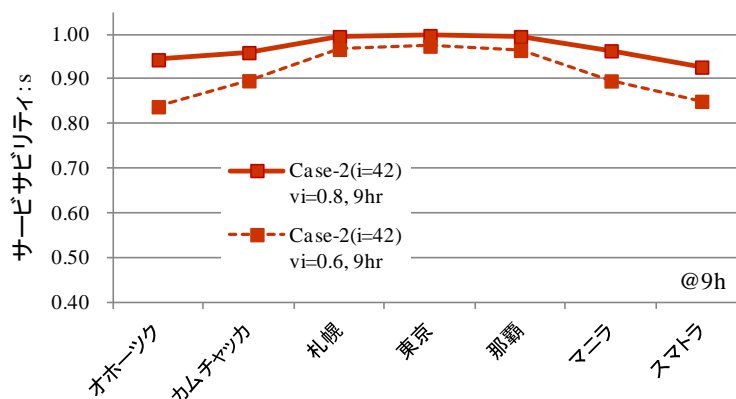


図 4.3-4 9時間後サービサビリティによる評価例

表 4.3-2 アジア域サービサビリティ検討のサマリ

	Stage 2: 地点間調整 オホーツク、カムチャッカ、札幌、東京、 那覇、マニラ、スマトラの7地点	Stage 3: 地形多様性への対応力 $v_i=0.6$ として評価	ベンチマークの変更 発災後9時間後で評価
Case-1	・スマトラで $s < 0.8 @ 6h$ ・高度750mとしたCase-1Aにより 7地点にて $s \geq 0.8 @ 6h$	・7地点を満たす解無し	N/A
Case-2	・ $i = 15, 30, 42, 60 \text{deg}$ の4軌道傾斜角 いずれも7地点を満たす解無し	N/A	・ $i = 42 \text{deg}$ が7地点において $s \geq 0.8 @ 9h$ (日本域最適解と一致) ・ $v_i=0.6$ において 対応力有り
Case-3	・ $i = 15, 30, 45, 60 \text{deg}$ の4軌道傾斜角 $i = 60 \Rightarrow 7$ 地点解 $i = 45 \Rightarrow 6$ 地点解(除オホーツク)	・左記の内、 $i = 45$ が6地点において $s \geq 0.8 @ 6h$ を維持	N/A

5. 災害対応におけるバリエーション

5. 災害対応におけるバリエーション

前章までにおいて、サービスバリエーション関数を評価指標として用いることにより、災害観測コンステレーション最適化のフレームワークが構築できることを示した。本章ではこのフレームワークに基づき、各種災害対応における個別の観測ニーズに対しても、サービスバリエーションによる評価の考え方が適用可能であることを示す。

5.1 災害観測に必要な視認性レベル

1) 災害応急対応フェーズワークフローと観測ニーズ

一般に、災害を含む大規模な緊急事象の発生時には、

- ① 広域全体像の把握
- ② 個別事象への対処

の順で対応がなされる。東日本大震災以降はこのような緊急事態への対処方法についての議論が各方面において行われ⁸⁰⁻⁸²⁾、政府の災害対応計画（第3章 3.1 項に示した文書⁷³⁻⁷⁵⁾等)にも反映されている。

災害発生時の場合、上記②の方法は災害事象毎に異なるものの、①の活動、並びに①の延長において実施される救援ルートの識別・確保（道路の啓開等）は、各災害共通に必要なプロセスであり、上記の政府計画にも明記されている。また、②のゴールである救助・救援活動についても、昨今の商用衛星分解能の向上（車の検知等が可能なレベル）により、衛星による貢献可能性が高まりつつある。

これら政府の策定方針や技術の進展状況等を踏まえ、本論文では災害応急対応のワークフローを図 5.1-1 に示す STEP1~3 の3段階に整理する。各 STEP における災害対応活動やこれに必要な衛星観測ニーズは、「防災のための地球観測衛星等の利用に関する検討会」（平成18年度）¹⁶⁾の検討結果との対応から、以下ようになる。

STEP1：災害全体像の把握

発災直後にどこで何が起きているかを把握する段階。地震災害であれば大規模建造物被害や大規模土砂崩れ等の分布、火山災害であれば火砕流・土石流の到達状況や火山灰の降灰分布、津波・水害であれば冠水域の分布等である。気象庁から発出される発災第一報（緊急地震速報、噴火速報、台風情報等）に基づき、防災対応機関の航空機、ヘリ等により観測される。

衛星観測に対するニーズとしては上記検討会における、

- ▶ 浸水域、冠水域の探索に必要な分解能要求：3~5m

等が挙げられる。

STEP 2：救援ルート確保

被災地域が明らかになると同時に、そこに至る交通路の使用可否判断、並びにこれに基づく救援ルートの確保が図られる。東日本大震災において実施された道路の啓開作業「くしの歯作戦⁴⁹⁾」が有名である。

この段階における衛星観測ニーズとしては、上記検討会における

- 通行可能ルートの特定に必要な分解能要求：1～2.5m

が代表例である。

STEP 3：救助・救援活動

啓開された交通路を通じ機材を投入し、人命救助や避難所への食糧・燃料補給等を行う。この段階の観測ニーズとしては、個別の被災状況について、特に人や自動車等のサイズでの検知が求められることから、ここでは、

- 被災車両の検知に必要な分解能要求：0.3～0.5m

を設定する。

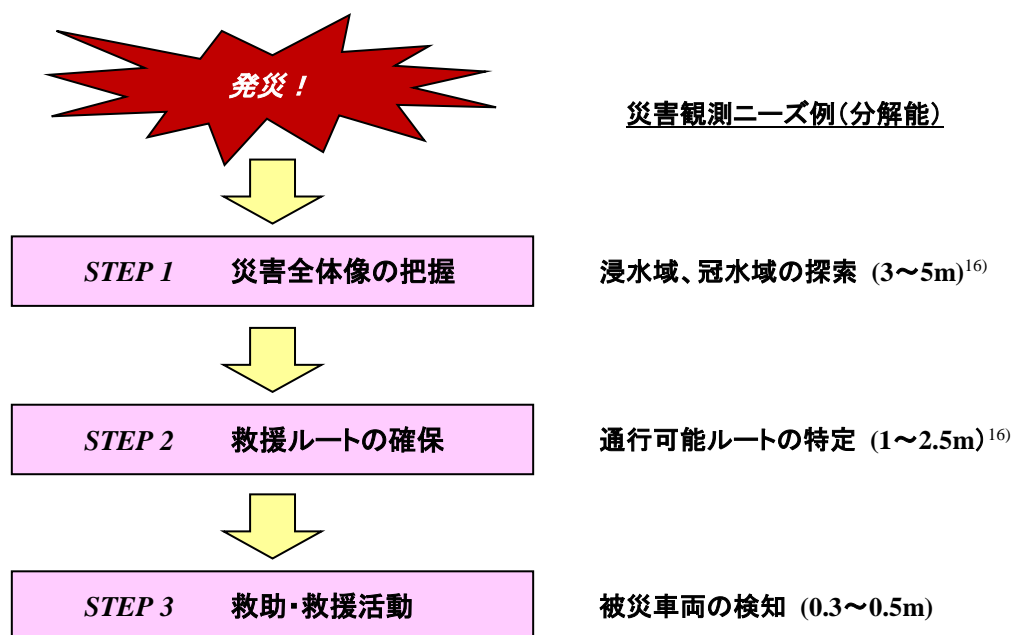


図 5.1-1 災害応急対応フェーズのワークフローと観測ニーズ

2) NIIRS との対応付け

1)においては、ワークフローの各 STEP における視認性要求を設定した。以下では、既存の視認性指標の代表例である NIIRS(National Image Interpretability Rating Scales)^{63,83-85)}との対応付けを行う。

NIIRS は、欧米のインテリジェンス分野において利用されている画像判読性に関する指標である。本指標に関する議論は 1970 年代に米国において始まり、画像に関するテクニカルなパラメータ（分解能、信号雑音比等々）のみでは、ユーザにとっての判読性を正確には表せないとして、画像の中からどのような情報が抽出できるかによって、0~9 の 10 分類により評価指標として整備されたものである。

近年では多数画像を統計処理して、NIIRS を分解能等のパラメータに基づく近似式(GIQE: General Image Quality Equation) で表す試みもなされている⁸⁶⁾。

NIIRS にはセンサ特性を考慮して、

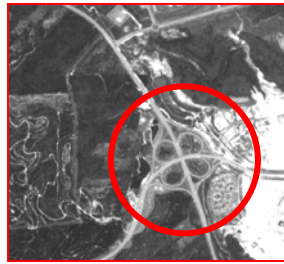
- Visible NIIRS（光学、主に軍事ターゲット）
- Civil NIIRS（光学、主に民生ターゲット）
- Radar NIIRS（SAR、主に軍事ターゲット）
- Infrared NIIRS（赤外、主に軍事ターゲット）
- Multispectral NIIRS（カラー、軍事・民生ターゲット混在）

等に分けられているが、Visible NIIRS と Civil NIIRS が一般的に用いられている。災害緊急時に見るべきターゲットは主に民生分野であり、且つ光学/SAR とともに共通に論じる観点から、以下では Civil NIIRS を中心に論じることとする。

Civil NIIRS に対応する代表的な画像例を図 5.1-2 に示す。



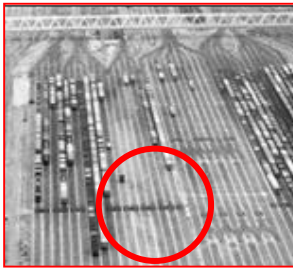
1



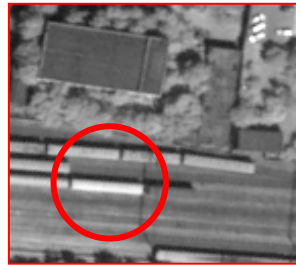
2



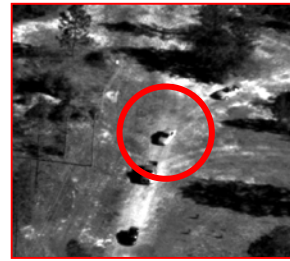
3



4



5



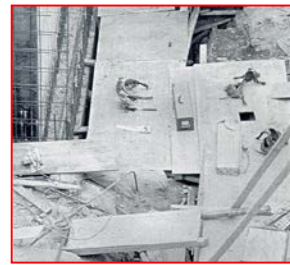
6



7



8



9

○ は表5.1-1の下線部に対応

図 5.1-2 NIIRS 対応画像の例⁸⁴⁻⁸⁵⁾ 及び一般公開画像より抜粋

Civil NIIRS 指標における判断基準（クライテリア）の中には、防災分野でも共用できるものが多数あり、またその概ねの分解能についても示されている⁸⁵⁾。これを参考に、1)項において定義した災害応急対応の各 STEP と、必要となる NIIRS レベルを対応付けたものを表 5.1-1 に示す。

尚、表中の GSD(Ground Sampled Distance)は、文献85)の中で GRD(Ground Resolved Distance)にて表記されているものを、

$$GSD \approx GRD/2$$

なる関係⁸⁷⁻⁸⁹⁾から換算したものである。

表 5.1-1 NIIRS と災害対応 STEP との関係

NIIRS	代表クライテリア ⁸³⁻⁸⁵⁾	概略 GSD (m)		災害対応フェーズとの対応関係
		範囲	平均	
2	大型建築物(病院、工場、等)を検知	2.25~4.5	3.4	STEP 1 (3~5m)
	<u>主要なハイウェイのインターチェンジの、クローバー形状の道路パターンを識別</u>			
3	形状とマーキングからヘリポートを検知	1.25~2.25	1.8	STEP 2 (1~2.5m)
	住宅地域で個々の家を検知			
4	<u>鉄道操作場又は鉄道用地内の空いている線路(列車なし)を数えることが出来る</u>	0.6~1.25	0.9	STEP 3 (0.3~0.5m)
	市街地でバスケットボールコート、テニスコート、バレーボールコートを検知			
5	車両保管庫の開いた区画ドアを検知	0.38~0.6	0.5	STEP 3 (0.3~0.5m)
	鉄道車両の貨車・機関車の種別を識別			
6	自動車の種別(セダンかワゴンか)を識別	0.2~0.38	0.3	STEP 3 (0.3~0.5m)
	荒廃地での人の歩行跡(道)を検知			

注) 下線部は、図 5.1-2 の画像中の赤丸部分に対応

表 5.1-1 によれば、災害応急対応フェーズの各 STEP の視認性要求と NIIRS 値の関係は、概ね下記ように対応付けられる。

- STEP1 : 分解能 3~5m ⇔ NIIRS=2
- STEP2 : 分解能 1~2.5m ⇔ NIIRS=3~4
- STEP3 : 分解能 0.3~0.5m ⇔ NIIRS=5~6

5.2 災害対応ケーススタディ

以下では、5.1 2)項で述べた NIIRS との対応関係も念頭に、各 STEP において活用し得る衛星・センサ仕様を想定の上、各 STEP 毎にサービスサビリティによる評価を行う。

1) STEP1 対応のケーススタディ: 災害全体像の把握

4 章までのシミュレーション検討は、ALOS-2 相当衛星 (分解能 3m) による災害検知を模擬したものである。4.2 項で日本域の最適解として抽出された Case-2($i=42$)を、図 5.2-1 に再掲する。

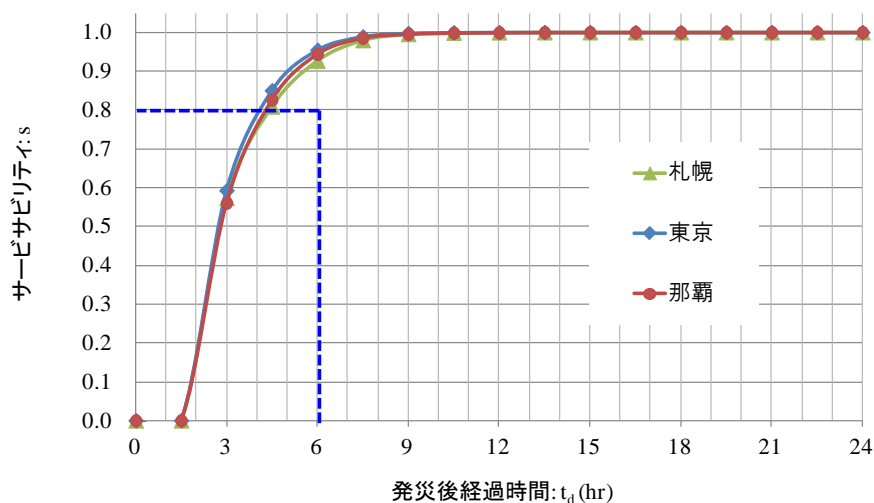


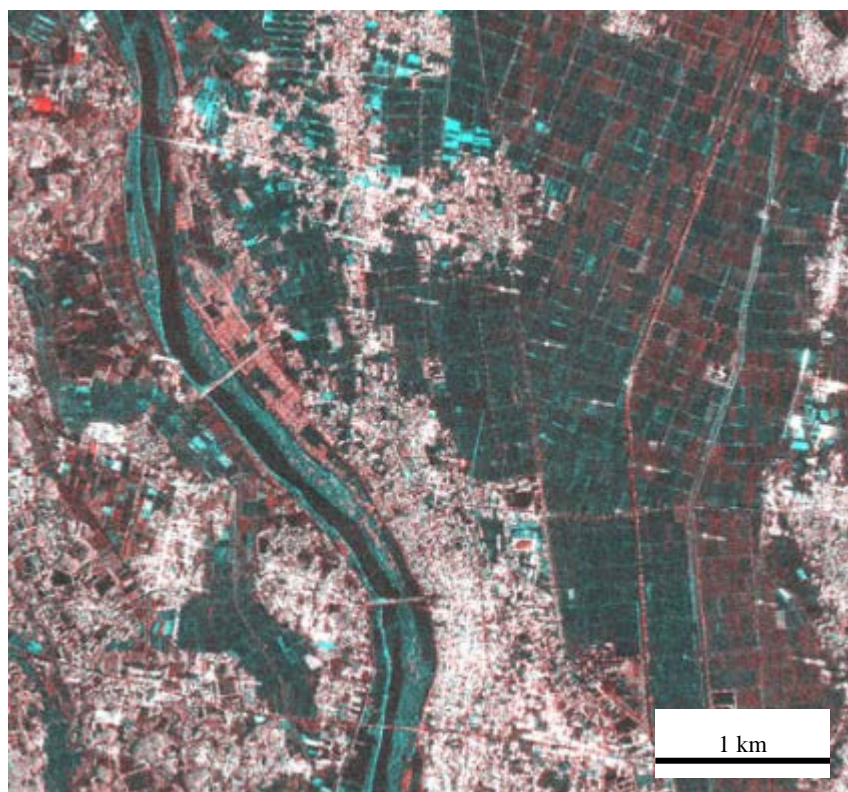
図 5.2-1 STEP1 対応: Case-2($i=42$) サービスサビリティ

第 4 章 4.2 3)項の図 4.2-5(2/6)によれば、川之江 JCT の形状がほぼ識別可能であり、ALOS-2 は表 5.1-1 に示した NIIRS=2 のクライテリアを満たすことが分かる。

また、本視認性レベルの画像が STEP1 のミッションである災害全体像の把握に寄与することを、図 5.2-2 の 2015 年 9 月常総水害 (平成 27 年 9 月関東・東北豪雨⁹⁰⁾) 時の観測例⁹¹⁾により説明する。

図は発災後撮影画像を、同一軌道・同一入射角・同一撮像モードによるアーカイブ画像とを R (赤色)、G (緑色)、B (青色) のカラー合成したものである。一定の散乱強度を有する発災前画像と、浸水後の (冠水により反射波が戻って来ないため暗い) 画像を畳重することにより、浸水が疑われるエリアが抽出される。このような変化箇所の分布は災害全体像の把握に大きく貢献するものである。

尚、ALOS-2 は実証段階にあるため、図中の変化抽出には稲刈り等による農地変化が混在している。今後、複数機コンステレーションによるアーカイブ更新周期の短縮化、並びに行政等の GIS データベースに基づく非災害上の土地利用変化の識別等により、真の災害変化部分の抽出精度を高められると考えられる。(5.3 2)項を参照)



JAXA EORC HP⁹¹⁾より引用

洪水前：2015年8月13日（赤色）
洪水後：9月10日午前11時43分頃（水色）
いずれも高分解能モード（分解能3m）

図 5.2-2 2015年9月常総水害時の観測例

尚、浸水域の検出精度が高まることは、シミュレーションによる浸水予測の精度向上に結び付く。例えば、利根川のような大規模河川において、破堤箇所からの浸水域の拡大について衛星により把握した最新状況とこれまでのシミュレーション結果を比較し、これを新たなシミュレーション条件に反映して、下流域での浸水予測の精度を高められる可能性がある。図 5.2-3 はその概念図である。

主要河川の破堤による浸水については、既に国土交通省のサイト⁹²⁾等においてシミュレーション機能が整備されつつあり、今後、衛星活用との連携が期待される。

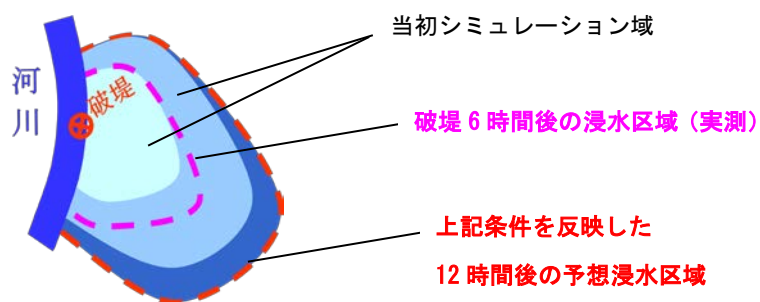


図 5.2-3 浸水域の実測による浸水予測シミュレーション精度向上の概念

2) STEP2 への対応ケーススタディ: 救援ルートの確保

STEP2 における視認性要求は、分解能 1~2.5m 程度である。以下では、本要求に対応し得る衛星モデルとして次の 2 ケースについて、サービサビリティシミュレーションを実施した。

- ① 商用 SAR (分解能 1m 級) 相当衛星による検知
- ② ALOS-3 相当の光学衛星による検知

ケース①対応の衛星・地上局設定を表 5.2-1、ケース②対応の衛星・地上局設定を表 5.2-2 に示す。サービサビリティパラメータ設定は①②共通で表 5.2-3 の通りであり、光学衛星の晴天率を除き、第 3 章の表 3.1-2 と同様である。

表 5.2-1 商用 SAR (分解能 1m 級) 相当衛星の衛星・地上局設定
(青字は COSMO-SkyMed⁹³⁻⁹⁴⁾から引用、他は本ケースにおける設定値)

軌道	軌道高度(h) : 620km Case-2(42)軌道による 4 機体制 (太陽同期準回帰軌道 2 機(6:00/12:00) + 傾斜軌道 2 機(傾斜角 42deg))
搭載センサ/周波数	合成開口レーダ/Xバンド*
空間分解能	1m*
観測幅	10km*
観測可能入射角: γ (観測可能距離: R_i)	左右 25~50 deg** (左右 376km***@高度 620km)
地上局等 (3 章と同条件を仮定)	勝浦局(管制/画像取得) 鳩山局(画像取得のみ) [通信仰角は 5deg 以上] データ中継衛星「こだま」(管制/画像取得)

* Spotlight mode(参考値)
**電子操作範囲の値
***第 2 章(2-6)式による

表 5.2-2 ALOS-3 相当衛星の衛星・地上局設定 ⁹⁵⁾

(青字は ALOS-3⁹⁵⁾から引用、他は本ケースにおける設定値)

軌道	太陽同期準回帰軌道 高度:618km 回帰日数:60 日
観測センサ	光学センサ
空間分解能	0.8m(直下)
観測幅: W_i	50km*
最大ホィンティング角: δ (観測可能距離: R_i)	$\pm 60\text{deg}$ ($\pm 1,315^{**}\text{km}$)

*参考値

**第 2 章(2-6), (2-7)式による

表 5.2-3 サービスビリティパラメータ設定

衛星信頼度: f_i	1.0
晴天率: c	1.0(SAR) / 0.46*(光学)
視認性/判読性係数: v_i	0.8
地上所要時間: $\triangle t_g$	1.5 h

*2012 年東京地方の統計値 ⁵⁵⁾による

① 商用 SAR（分解能 1m 級）相当衛星による検知

分解能 1m 級の商用 SAR 衛星には TerraSAR-X、COSMO-Skymed 等があるが、ここでは後者の Spotlight モードを参考に表 5.2-1 の如くパラメータ設定し、サービサビリティシミュレーションを行った。第 3 章にて日本域での最適解として抽出した Case-2(42)において 4 機とも入射角 25-50deg（上記衛星の電子的ビーム操作に対応）に設定し、サービサビリティを算出した。結果を図 5.2-4 に示す。

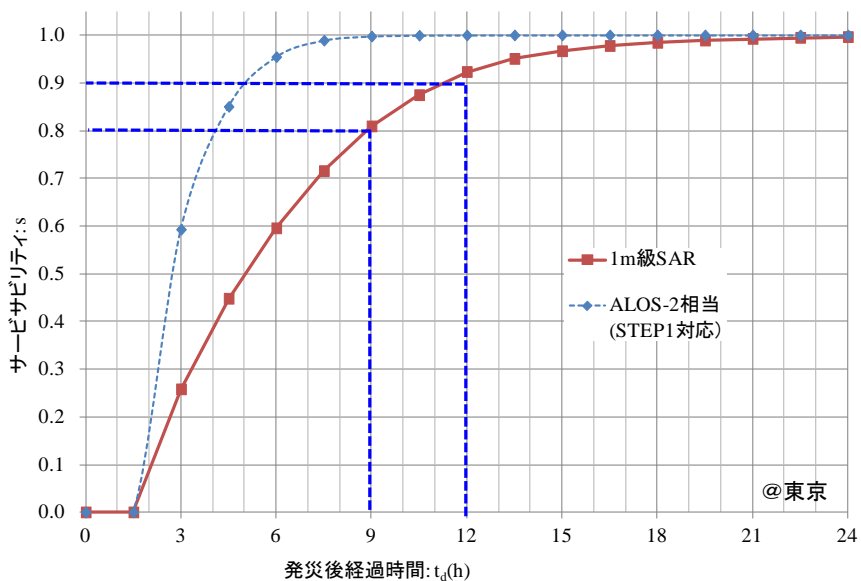


図 5.2-4 商用 SAR（分解能 1m 級）相当衛星によるサービサビリティ

上記グラフによれば、発災後 9 時間においてサービサビリティ 0.81、12 時間で 0.92 に達する。全体としては発災後 12 時間内での情報取得は可能であり、更なる最適化検討に値するものと考えられる。

但し、発災後 6 時間時点での網羅性は低く ($s=0.6$)、STEP1 のミッションまで代替させることは難しいものと思われる。

② ALOS-3 相当衛星による検知

直下分解能 1m 級の光学衛星としては、ALOS-3 衛星（計画時）の仕様を参考に表 5.2-2 の如くパラメータを設定し、サービサビリティシミュレーションを行った。

衛星軌道及び機数については、

- a) 4 機: 10:30/13:30 軌道に各 2 機
- b) 5 機 : 9:00/10:30/12:00/13:30/15:00 軌道（各 1 機）

の 2 通りを設定し、a)については晴天率 $c=1.0$ （視認性は $v_i=0.8$ ）の場合についてもシミュレーションした。b)について 9:00/15:00 ケースは通常使用される光学衛星の LST からは外れるが、使用可能なセンサが開発されることを前提とした。

STEP2 における視認性要求は分解能 1~2.5m 以内であることから、分解能とポインティングの関係を示す図 5.2-5 に基づき、ポインティング角を 55deg 以下に設定し計算を行った。結果を図 5.2-6 に示す。

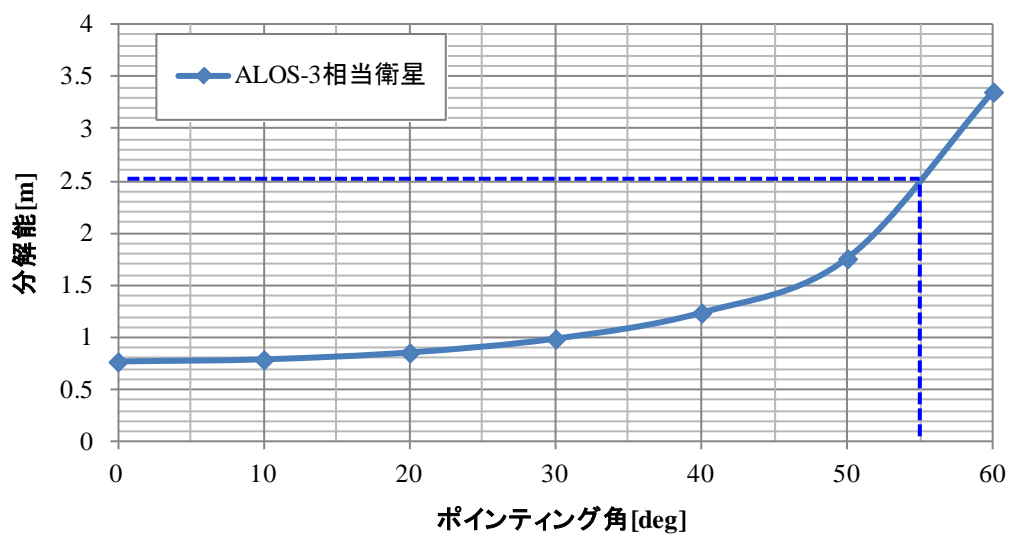


図 5.2-5 分解能とポインティング : ALOS-3 相当衛星

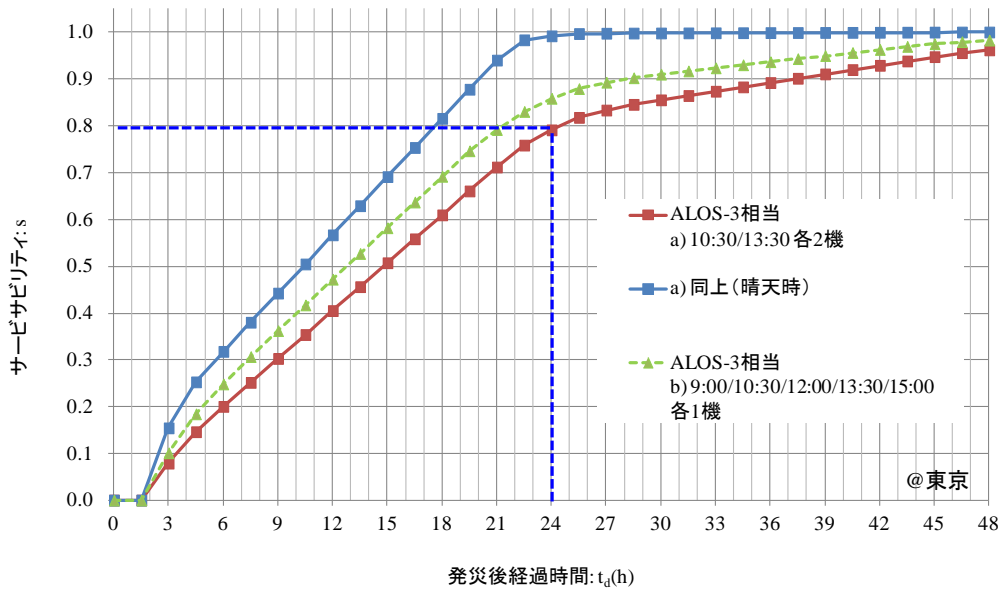


図 5.2-6 ALOS-3 相当衛星によるサービスサビリティ

上記グラフによれば、光学衛星は夜のパスでは観測できないことから、 $s=0.8$ に達するまでに a) b)ともに 24 時間程度を要している。a)と b)を比較すると、24 時間時点でのサービスサビリティの差は 0.5 程度と、機数（5 機）や新規開発要素の違いなどに比して大きな差異があるとは言えない。従って、既存技術で対応できるケース a)の採用が現実的である。

また、ケース a)について晴天時の場合の計算を実施したところ、 $s=0.8$ に達するのは 18 時間後であり、（即応性という点では十分ではないものの）24 時間時点においては $s=1.0$ 近くに達し、晴れていた場合の光学衛星の効果が大きいことが分かる。

総じて、24 時間の時間軸における情報取得には本コンステレーションは有効であると考えられるものの、発災後 6~12 時間の時間軸で見た場合は部分的な貢献に留まる。航空機等による観測を有機的に組み合わせる等して、効率的に被災地全体を網羅することが有効と考えられる。

3) STEP3 への対応ケーススタディ：救助・救援活動

STEP3 では被災車両の検知をミッション要求として、分解能 0.3~0.5m が視認性要求となる。以下では、商用光学（分解能 30cm 級）相当衛星によるサービサビリティシミュレーションを行った。現状、30cm 級分解能の商用衛星としては WorldView-3 が運用されているが、ここでは同衛星の公開情報に基づく値と表 5.2-2 の値を組み合わせ、表 5.2-4 のように設定した。サービサビリティに関する設定は表 5.2-5 のとおりである（表 5.2-3 と同じ）。

表 5.2-4 商用光学（分解能 30cm 級）相当衛星の衛星・地上局設定
 （青字は WorldView-3 DATA SHEET⁹⁾から引用、他は本ケースにおける設定値）

軌道	太陽同期準回帰軌道 高度: 617km 回帰日数: 60 日
観測センサ	光学センサ
空間分解能	0.31m(直下)
観測幅: W_i	13.1km*
最大ポインティング角: δ (観測可能距離: R_i)	$\pm 60\text{deg}$ ($\pm 1,314^{**}\text{km}$)

*参考値

**第 2 章(2-6), (2-7)式による

表 5.2-5 サービサビリティパラメータ設定

衛星信頼度: f_i	1.0
晴天率: c	0.46*
視認性/判読性係数: v_i	0.8
地上所要時間: Δt_g	1.5 h

*2012 年東京地方の統計値⁵⁵⁾による

2)項のケース②の結果も踏まえ、衛星機数及び軌道配置としては、

- 4 機: 10:30/13:30 軌道に各 2 機

とし、晴天率 $c=1.0$ のケースも併せて計算した。

また、STEP3 における視認性要求の前提が、分解能 0.3~0.5m 以内であることから、図 5.2-7 に基づき、ポインティング角は 40deg 以下に設定した。結果を図 5.2-8 に示す。

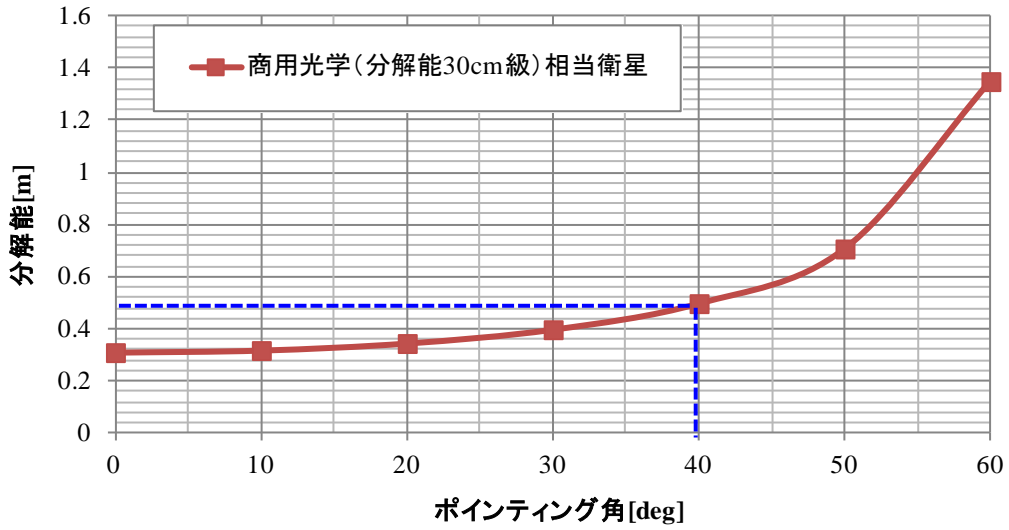


図 5.2-7 分解能とポインティング：商用光学（分解能 30cm 級）相当衛星

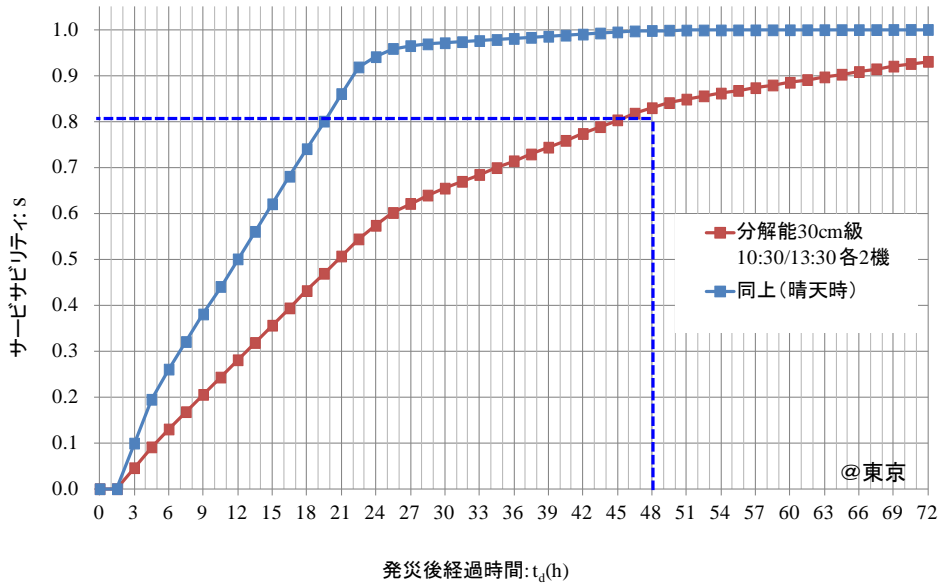


図 5.2-8 商用光学（分解能 30cm 級）相当衛星によるサービスビリティ

上記グラフによれば、 $s=0.8$ に達するまでに 48 時間程度を要する。但し、晴天時は 24 時間以内に $s=0.9$ に達し、その威力は増大する。

総じて、この時間軸内に本コンステレーションのみで網羅的に情報を賄うことは難しく、2)項ケース②と同様、航空機等による観測を有機的に組み合わせ、効率的に被災地全体を網羅することが有効である。

4) STEP1~STEP3 の検討のまとめ

上記において検討した各STEPにおける代表的なサービサビリティ波形を図5.2-9に示す。視認性要求⇒当該分解能を有する衛星・センサ仕様の想定⇒軌道、観測可能距離等の反映、という手順で、各STEP毎に求めたものである。STEP1 以外では、第3章で実施したような最適化はなされていないものの、大局的には以下のような傾向が読み取れる。

SAR 衛星が適用される STEP1~STEP2 は、3.1 項で示した 12 時間以内の情報収集という政府計画⁷³⁻⁷⁵⁾に対して整合可能性を有するサービサビリティ波形となっている。

これに対して、STEP2~STEP3 で使用される光学衛星の場合は、元々夜間撮像が出来ず、観測周期 24 時間に支配されることに加え、天候の良否や高分解能保持のためのポインティング制約があるため、24 時間~48 時間の時間軸での貢献となる。上述のように、高精度な光学衛星画像を有効に活かす観点からも、他手段との補完的運用が必要と考えられる。

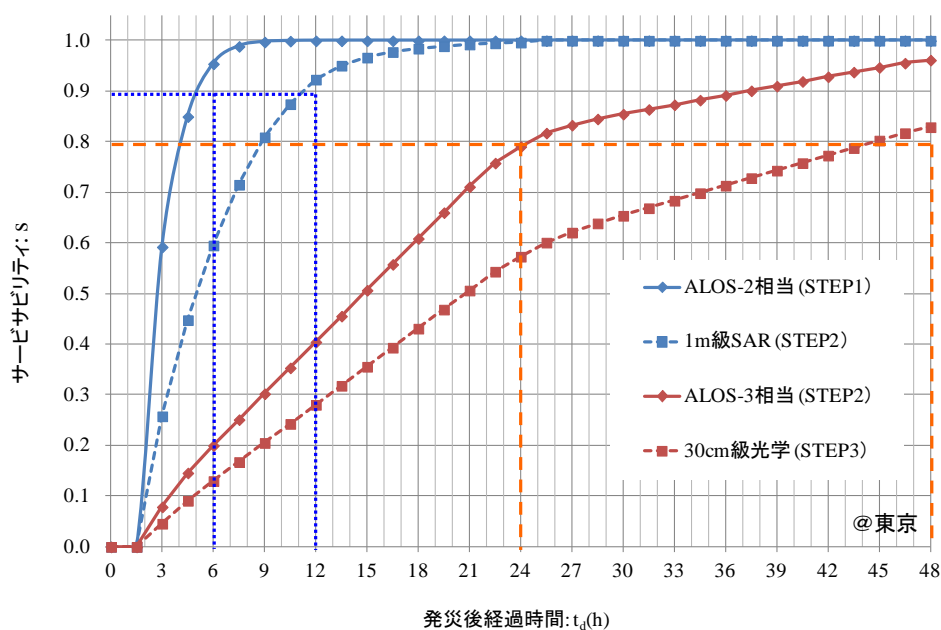


図 5.2-9 災害対応 STEP1~3 に対応したサービサビリティグラフの纏め

以上により、各種災害対応における個別の観測ニーズに対しても、サービサビリティによる評価により、要求への適否や改善課題について、時間軸上で具体的に検討可能であることが示された。

5.3 視認性のモデル化と向上策

本論文では、視認性要求に適合したセンサを用いることを前提とし、これにマージンを持たせて視認性係数としている。即ち、第2章 2.4 3)項で示したように、検知ミッションの場合は4画素相当でこれに対応した上で、検知確率の理論値に15%のマージンを見込んで視認性係数: $v_i=0.8$ を設定した。

一方、現実には必ずしも要求性能に満たないセンサを用いて観測にあたらねばならない場合も多い。それでは、そのような場合にはどのような考え方で視認性係数を設定すればよいであろうか？ 下記 1)項においてはそのような使い方を念頭に、NIIRS 値と分解能の関係を応用して視認性係数のモデル化を行った。

また視認性係数は、その正式名「視認性・判読性効果係数」が意味する通り、画像そのものの評価というよりは、観測画像（並びにその応用プロダクト）からの情報抽出の程度を評価するためのものである。特に災害応急対応のように、短時間で判断が求められる場合には、情報技術を駆使する等して情報抽出力を最大化させることが重要である。下記 2)項においては、そのような観点から、視認性の向上策について言及する。

1) 視認性係数のモデル化

第2章 2.4 3)項において、(2-9)式から導出される図 5.3-1 青線部に示す検知確率を視認性係数のモデルとして採用した。

$$P_{\infty} = \frac{(n/n_{50})^{x_0}}{1 + (n/n_{50})^{x_0}} \quad (2-9 ; \text{再掲})$$

但し、 $x_0 = 2.7 + 0.7(n/n_{50})$

n : 画素数、 n_{50} : 検出確率 50%に相当する画素数、 P_{∞} : 検出確率

図 5.3-1（青線部）によれば、

- ▶ グラフの右端において検知確率(0.94)≈1、その時の画素数比率は $n/n_{50}=2$
- ▶ グラフの中央において検知確率=0.5、その時の画素数比率は $n/n_{50}=1$

なる関係がある。一方、表 5.1-1 によれば、NIIRS 値が1段階下がると、分解能は概ね2倍（=画素数は半分）という関係にある。

即ち、NIIRS 値[N]が或る災害事象の検知要求を満たす（検知確率 ≈ 1 である）とすれば、（対応する分解能による）画素数比率は $n/n_{50}=2$ となる。そして半分の画素数比率 $n/n_{50}=1$ が NIIRS 値[$N-1$]に対応すると共に、その際の検知確率=0.5 となる。

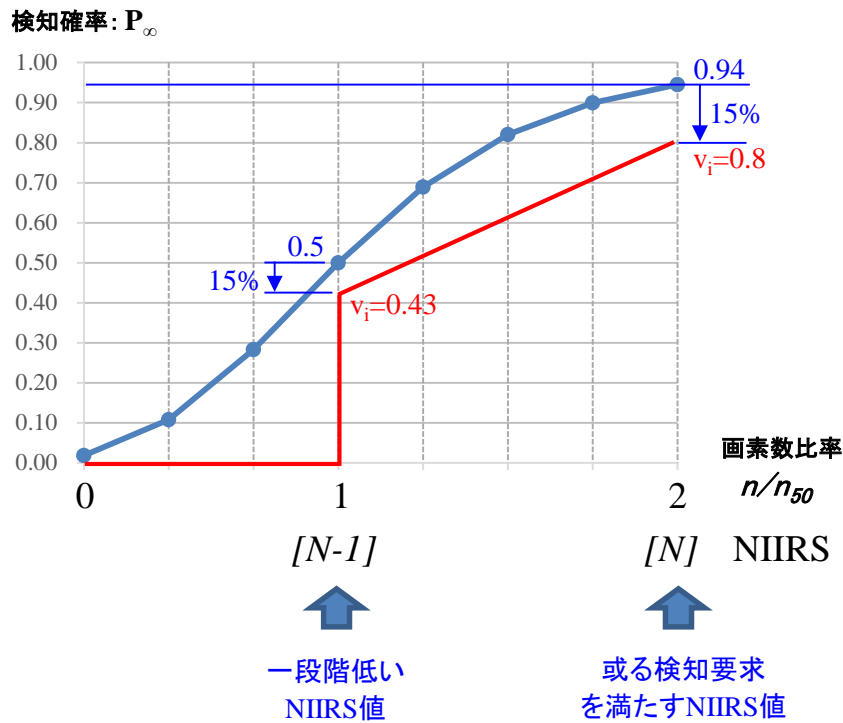


図 5.3-1 検知確率 P_{∞} と視認性係数 v_i のモデル化

第 2 章 3) 項においては、

➤ $P_{\infty}(n/n_{50}=2)=0.94$ に対して 15% の不確定性を見込み $v_i=0.8$ の如く視認性係数: v_i をモデル化した。これが NIIRS 値 $[N]$ に対応する。

NIIRS 値 $[N-1]$ の場合についても同様の考え方をとり、

➤ $P_{\infty}(n/n_{50}=1)=0.5$ に対して 15% の不確定性を見込み $v_i=0.43$ とし、また $n/n_{50}=2$ と $n/n_{50}=1$ の 2 点間を直線で結ぶモデルとする。

尚、災害緊急時に NIIRS 値 $[N-1]$ にも満たない ($n/n_{50} < 1$)、更に視認性の劣る画像を用いることは、オペレータの負荷状況を考慮すると現実的な選択ではない。この考え方を反映し、

➤ $n/n_{50} < 1$ の領域では $v_i=0$

とする。

以上の考え方を反映し、図 5.1-3 の赤線部のようなステップ形状関数として v_i をモデル化する。

上記の視認性モデルに基づき、第3章で抽出した Case-2(42) (NIIRS=2 相当) について $v_i=0.43$ 、即ち、NIIRS=1 相当の画像を用いた場合のサービスバリエーションシミュレーションを図 5.3-2 に示す。

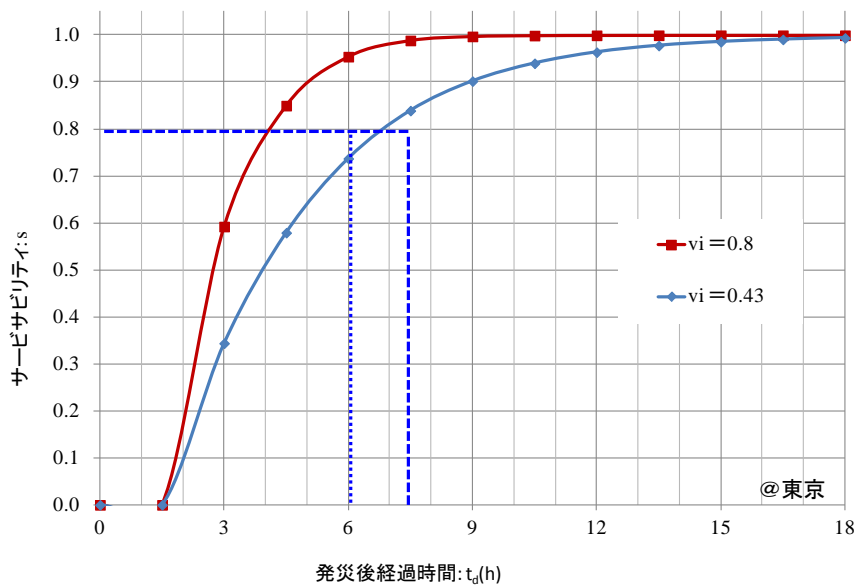


図 5.3-2 Case-2(42)の NIIRS を一段階落とした場合のサービスバリエーション

図 5.3-2 によれば、NIIRS を一段階落とした場合、 $s=0.74 < 0.8@6h$ となり、ベンチマークを満たさない。しかしながら 7.5 時間後には 0.8 を超えるため、3.1 項で示した 12 時間以内の情報収集においては、一定の寄与をし得るレベルにあると判断される。

このような検討を通じ、より視認性の低いセンサによるコンステレーションとのトレードオフが可能となり、コスト検討等に結びついていく。これについては第 6 章にて論じる。

2) 視認性の向上策

視認性係数（視認性・判読性効果係数）： v_i は、観測画像（並びにその応用プロダクト）から防災ユーザ（災害対応機関等）に対して提供する情報抽出の程度を示すものである。図 5.3-3（発災前後のデータ提供の関係）を用い、SAR 観測を事例として、 v_i を向上させるための方策について述べる。

大別して、災害対応機関に提供される情報は、①SAR 緊急撮像に基づく画像判読情報と②SAR アーカイブ等を用いた変化抽出による被災箇所検知情報に分けられ、いずれの場合もその提供情報の質が v_i で表される。

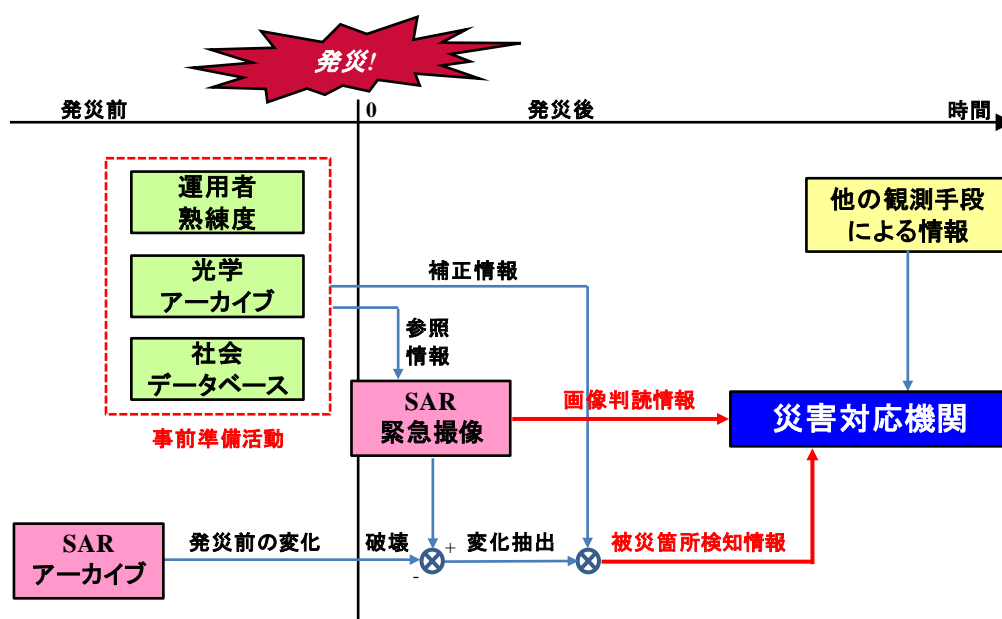


図 5.3-3 発災前後のデータ提供の関係（SAR 観測の事例）⁵⁴⁾

以下、図中に示す SAR 画像以外の要素（事前準備活動）も交え①、②それぞれについて v_i の向上策案を列举する。

① 画像判読情報の v_i 向上策

- SAR そのものの画質向上（H/W 性能、処理精度、入射角等の運用条件の改善等）
- 運用者熟練度の向上（SAR 判読の熟練度、地域に対する精通度、災害知識等）
- 光学アーカイブ画像の即時提供による判読支援（光学衛星、航空写真等）
- インフラ等の社会的情報提供による判読支援（ビル、道路等の建設・工事情報、農地の耕運・耕作・収穫等、季節に伴う落葉・濁水等、人為的廃棄物等）

この内、a) は NIIRS 評価等により v_i に反映できるが、b) - d) は直接評価手段が無い。今後、これら要素による v_i 向上についての実験データの取得が期待される。

② 被災箇所検知情報の v_i 向上策

- e) 変化抽出手法の改良 (ALOS-2 実証実験等を通じ実施)
- f) 運用者熟練度の向上 (①b) 項と同様だが、機械学習等の活用も今後の課題)
- g) 光学アーカイブ画像による補正 (特に SAR アーカイブ取得後、発災前の変化分)
- h) 社会的情報の最新値の提供 (①d) 項と同様だが、特に発災直前情報が重要)

上記と同様、e)については(画像ではないものの) NIIRS による抽出情報の評価は可能である。g)-h)については、SAR アーカイブに混在する発災前の変化分を除去する観点から最新性が重要である。データベース間の連携や GIS 表示等に関するプロトタイプング等を通じて、 v_i への効果を計測することが望まれる。今後、自動化/半自動化により速度・精度共に向上させ得る分野と考えられる。(精度向上のため処理時間を犠牲にすると、地上所要時間: Δt_g が増加し、サービスビリティが低下するので、速度・精度の同時追求が必要である。)

以上を総合すると、衛星やセンサ側からアプローチできるのは、a)と或いはe)であり、他の項は認知工学や情報処理工学的な知見が不可欠である。宇宙工学、リモセン工学以外の分野の知識も交えて、総合的な取り組みが期待される。

但し、最終的に視認性 v_i の改善としてフィードバックを行うにあたっては、防災向け NIIRS に相当する評価指標の充実は必須である。本指標の整備にあたっては、防災コミュニティと衛星コミュニティが協力して推進する必要がある。

(空白)

6. サービスabilityの応用

6. サービスabilityの応用

6.1 小型衛星との組み合わせ検討

衛星コンステレーションに係わる検討は各方面にてなされている⁹⁷⁻⁹⁸⁾が、実際に構築するにあたっては、全体コストを下げる観点から、衛星の一部を低コストの小型衛星で代替し得るかトレードオフが必要になる。このような検討においては、全体機能やミッション品質を落とさずに如何に代替案を組むかが課題となる。

この「全体機能やミッション品質」の部分のサービスabilityで代表させることにより、上記のようなトレードオフが可能になる。以下では、このような場合のサービスabilityの活用方法について、ケーススタディを用いて述べる。

ここに小型衛星としては「低価格衛星」を想定し、以下のように段階的に制約を増やし、その場合に当初サービスabilityを得るために必要な機数を検討した。

- 1) 想定条件1：小型衛星の性能制約を観測可能距離: R_i により代表させたケース
- 2) 想定条件2：更に視認性を低下させたケース
- 3) 想定条件3：更に信頼度も低下させたケース

1) 想定条件1に対する検討

① 想定条件1

第3章において日本域での最適解として抽出した、

Case-2($i=42$): 太陽同期衛星2機+傾斜軌道衛星2機 (傾斜角 42deg)

を検討の基準ケース (表 6.1-1 の[0]) とし、この内の傾斜軌道衛星2機を小型衛星で置き換えることを想定する。(太陽同期軌道衛星は、従前と同様の2機を使用)

SAR衛星の小型化については、各方面による取り組み⁹⁹⁻¹⁰²⁾がなされているが、ここではセンササイズや視野範囲等への影響を、観測可能距離: R_i による性能制約として代表させ、表 6.1-1 の[I][II]の2ケースを想定する。ここに観測可能距離: R_i は、ALOS-2相当衛星が有する5ビーム区分(表 4.2-6 参照)の内、2区分(U2+U3: ケース[I])及び1区分(U3: ケース[II])に相当する数値をそれぞれ仮定した。この範囲を図示すると図 6.1-1 のようになる。

表 6.1-1 想定する小型衛星の観測パラメータ

ケース	観測可能距離*: R_i (km)	入射角(deg)		(参考)	
		γ_{\min}	γ_{\max}	ALOS-2 のビーム区分	
[0]	Case-2($i=42$)	1326	8.0	70.0	全(U1~5)
[I]	小型 1	513	30.2	55.8	U2+U3
[II]	小型 2	342	44.3	55.8	U3

*軌道高度：750km

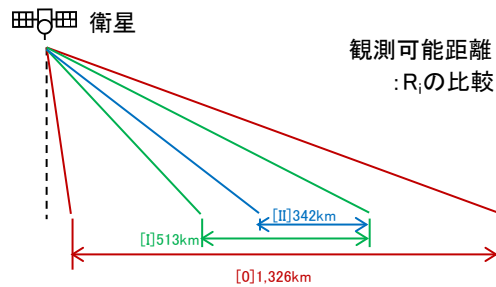


図 6.1-1 想定する小型衛星の観測可能距離

② 検討結果 1

ケース[I] [II]とも、基準ケース[0]と同じ傾斜軌道衛星 2 機を出発点として、機数を増やした結果、[I]の場合は小型衛星 4 機、[II]の場合は小型衛星 8 機を組み合わせることによりケース[0]における Case-2($i=42$)と同程度のサービスビリティが確保されとの結果を得た(図 6.1-2)。

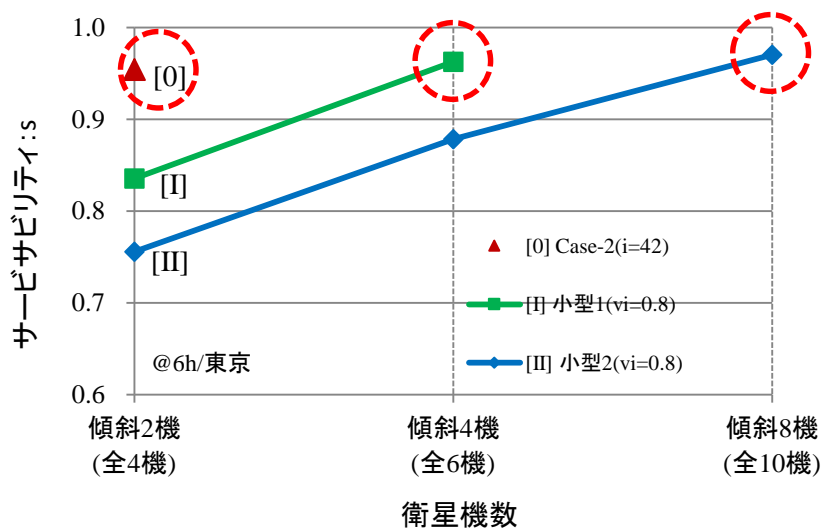


図 6.1-2 小型衛星組み合わせ時のサービスビリティ【想定条件 1】

尚、上記各ケースにおける設定条件は表 6.1-2 の通りである。

表 6.1-2 想定条件 1 に基づく解析ケース一覧

ケース	太陽同期準回帰軌道				傾斜軌道								
	機数	高度(km)	回帰日数	LST(時刻)	機数	高度(km)	傾斜角(deg)	回帰日数	軌道面差(deg)	入射角(deg)		観測可能距離 左右各(km)	視認性係数 \leq
										γ_{min}	γ_{max}		
[0]	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	8	70	1326	0.8
[I]	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	30.2	55.8	513	0.8
	2	628	14	6:00/12:00	4	749	42	14	90				0.8
[II]	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	44.3	55.8	342	0.8
	2	628	14	6:00/12:00	4	749	42	14	90				0.8
	2	628	14	6:00/12:00	8	749	42	14	45				0.8

2) 想定条件 2 に対する検討

① 想定条件 2

前記のケース[I][II]においては、小型衛星であることによる性能制約を観測可能距離 R_i に集約するとの仮定を置き、視認性等の他のパラメータは基準ケース[0]と同等の値を維持することを前提においた。実際には衛星を小型化することにより、センサのサイズや重量、衛星から供給できる電力等々、更なる制約を種々受け、当初と同等の視認性を確保できない可能性がある。この観点から、第 5 章 5.3 項で検討した NIIRS 対応値が一段階低下する、即ち視認性係数を $v_i=0.43$ とする前提を前記ケース[I][II]に対して追加し、これらをケース[I'][II']とする。

② 検討結果 2

想定条件 1 の検討と同様に基準ケース[0]と同じ傾斜軌道衛星 2 機を出発点として、機数を増やした結果、[I']の場合は小型衛星を 8 機、[II']の場合は小型衛星 16 機の組合せでケース[0]における Case-2($i=42$)と同程度のサービスビリティが確保されるとの結果を得た(図 6.1-3)。

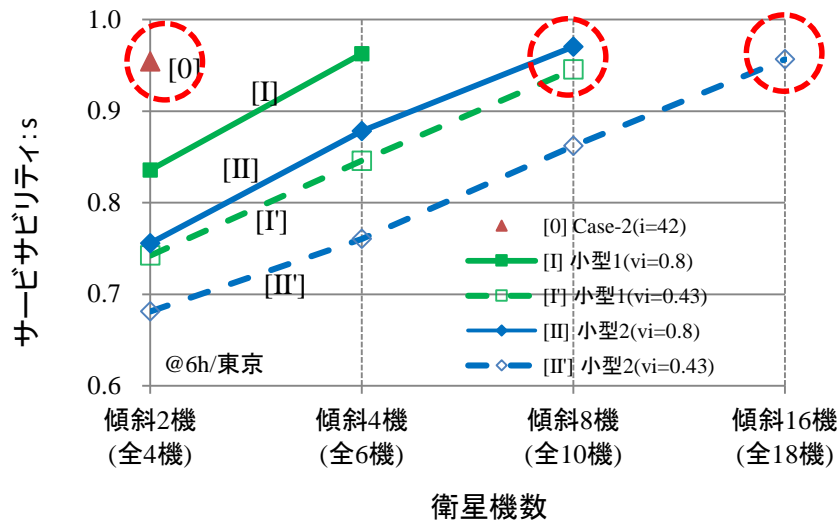


図 6.1-3 小型衛星組み合わせ時のサービスサビリティ【想定条件 1、2】

上記各ケースの設定条件は表 6.1-3 の通りである。

表 6.1-3 想定条件 2 に基づく解析ケース一覧

ケース	太陽同期準帰軌道				傾斜軌道								
	機数	高度(km)	帰日数	LST(時刻)	機数	高度(km)	傾斜角(deg)	帰日数	軌道面差(deg)	入射角(deg)		観測可能距離 左右各(km)	視認性係数 \leq
										γ_{min}	γ_{max}		
[I']	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	30.2	55.8	513	0.43
	2	628	14	6:00/12:00	4	749	42	14	90				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	8	749	42	14	45				0.43
[II']	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	44.3	55.8	342	0.43
	2	628	14	6:00/12:00	4	749	42	14	90				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	8	749	42	14	45				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	16	749	42	14	22.5				0.43

3) 想定条件 3 に対する検討

① 想定条件 3

想定条件 2 の検討の内、制約条件の厳しいケース[II']について、更に部品等の信頼度を落とした場合の条件を設定し、サービサビリティ及び機数との関係を調べる。

以下においては、5年後信頼度: $f_i=0.5$ の場合(ケース[II''-1])、 $f_i=0.3$ の場合(ケース[II''-1])の 2 つの場合について、衛星機数とサービサビリティの関係を検討した。^{注)}

注) 信頼性の考え方については、従来の標準的方式¹⁰³⁾から近年試みられている方式¹⁰⁴⁾まで各種あり、共通的な計算に使うための摺り合わせも今後必要と考えられる。

② 検討結果 3

これまでの検討と同様に、基準ケース[0]と同じ傾斜軌道衛星 2 機を出発点として、機数を順次増やして行くと、ケース[II''-1]の場合は小型衛星を 32 機、ケース[II''-1]の場合は小型衛星 64 機を組み合わせることにより、ケース[0]における Case-2($i=42$)と同程度のサービサビリティが確保されるとの結果を得た(図 6.1-4)。

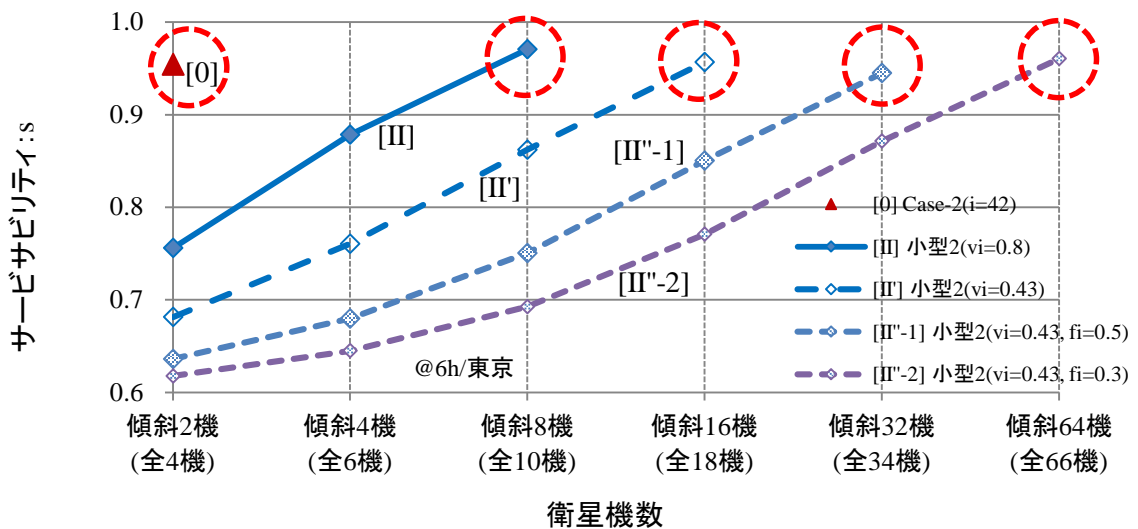


図 6.1-4 小型衛星組み合わせ時のサービサビリティ【想定条件 1、2、3】

上記各ケースの設定条件は表 6.1-4 の通りである。尚、傾斜軌道において 16 機以上の場合は軌道面差を細かくしても軌道分散効果が少ない（＝同一軌道面内に近づく）ことから、22.5deg のままとした。

表 6.1-4 想定条件 3 に基づく解析ケース一覧

ケース	太陽同期準回帰軌道				傾斜軌道								
	機数	高度(km)	回帰日数	LST(時刻)	機数	高度(km)	傾斜角(deg)	回帰日数	軌道面差(deg)	入射角(deg)		観測可能距離 左右各(km)	視認性係数 \leq
										γ_{min}	γ_{max}		
[II'-1] $f_i=0.5^*$	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	44.3	55.8	342	0.43
	2	628	14	6:00/12:00	4	749	42	14	90				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	8	749	42	14	45				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	16	749	42	14	22.5				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	32	749	42	14	22.5				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	64	749	42	14	22.5				0.43
[II'-2] $f_i=0.3^*$	2	628	14	6:00/12:00	2	749	42	14	180	44.3	55.8	342	0.43
	2	628	14	6:00/12:00	4	749	42	14	90				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	8	749	42	14	45				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	16	749	42	14	22.5				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	32	749	42	14	22.5				0.43
	2	628	14	6:00/12:00	64	749	42	14	22.5				0.43

* f_i は5年後の信頼度として定義

以上のように、当初コンステレーションの一部を小型衛星に置き換えた場合、小型衛星の機数を調整することで、当初サービスビリティを達成するための代替コンステレーション案を求めることができる。

上記の検討においては、小型衛星＝低価格衛星を前提として想定条件 1～3 まで段階的に制約を増やし、当初サービスビリティを得るために必要な機数を検討した。一方において、小型衛星の中にはコスト以外にも性能面での優位性を持つものも考えられ、必ずしも制約が多くなる方向のみとは言えない。そのような場合には上記パラメータ検討の延長において当該パラメータを組み込むか、或いは上記の結果からの外挿・内挿による推定値としてサービスビリティを求めればよい。

求められた代替コンステレーションと当初コンステレーションの間で総コスト、開発・整備スケジュール、運用性等の評価項目についてのトレードオフを行い、採用案を決定することになる。

6.2 コストモデルとの組み合わせ

6.1 項においては、当初コンステレーションに対して同等のサービスバリエーションを実現する代替コンステレーションを求め、各種トレードオフに供する活用方法を示した。この場合、サービスバリエーションが一定のレンジに入っていれば、総コストの低い案が加点評価される。このような検討はある程度の精度でコストが予測できる段階において可能である。

これに対し、計画立案の初期段階において、小型衛星の最大のメリットとされるコスト優位性を引き出すための検討手段として、コストモデルとサービスバリエーションの組み合わせに基づき、コスト目標値の設定そのものにフィードバックする使い方が考えられる。即ち、当初コンステレーションと代替コンステレーションについて、単位コストあたりのサービスバリエーションを比較し、その結果から後者における改善目標を定める方法である。

6.1 項で用いた想定条件にコストモデルを加味した検討を以下に示す。

1) 適用例 1

前記【想定条件 1】において、各衛星の観測可能距離： R_i 比によりコストが定まるとしたコストモデルを仮定すると、各衛星のコストは、

[0] ALOS-2 相当機：1 単位

[I] 小型 1：0.39 単位

[II] 小型 2：0.26 単位

となり、また総コストは表 6.2-1 のようになる。

表 6.2-1 総コストの比較【適用例 1】

ケース	太陽同期		傾斜軌道		総コスト
	単価	機数	単価	機数	
[0] Case-2($i=42$)	1	2	1	2	4.00
[I] 小型 1	1	2	0.39	4	3.55
[II] 小型 2	1	2	0.26	8	4.06

上記 3 ケースについて、単位コストあたりサービスサビリティ： q を比較すると、図 6.2-1 のようになる。同図によれば、ケース [I] は [0] に対し一定のコスト優位性を示すのに対し、ケース [II] は [0] と殆ど変わらず、また更に 2 割コストダウンしても [I] に及ばない。

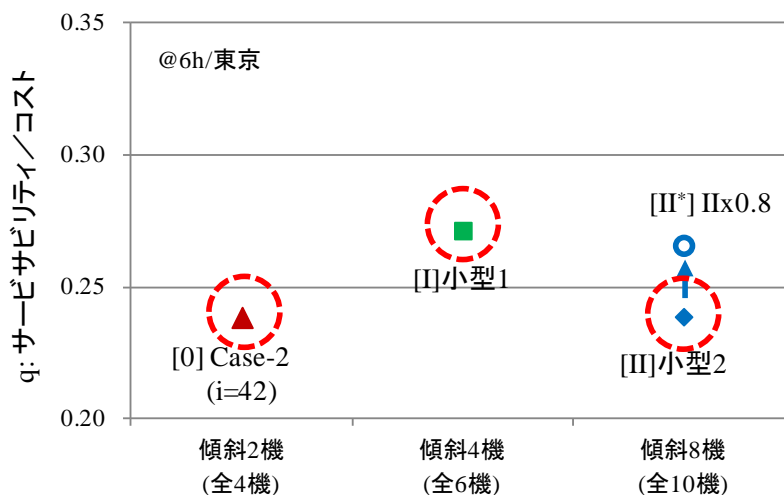


図 6.2-1 単位コストあたりのサービスサビリティ【適用例 1】

本結果に対して次に実施すべき検討としては、①ケース [I] コストの妥当性検討の深掘り、又は、②ケース [II] における改善可能性の検討 (R_i の拡大等) である。(コストモデルそのものは予め適用性判断がなされていることが前提であるが、必要に応じそこに遡ることも選択肢である。)

2) 適用例 2

前記【想定ケース 2】における[I'] [II']のコストが[I] [II]衛星コストから更に v_i 比で下がる
と仮定したコストモデルを仮定する。 v_i 比=0.43/0.8 とすると、各衛星コストは、

[0] ALOS-2 相当機 : 1 単位

[I'] 小型 1 : 0.21 単位

[II'] 小型 2 : 0.14 単位

となり、また総コストは表 6.2-2 のとおりとなる。

表 6.2-2 総コストの比較【適用例 2】

ケース	太陽同期		傾斜軌道		総コスト
	単価	機数	単価	機数	
[0] Case-2($i=42$)	1	2	1	2	4.00
[I'] 小型 1	1	2	0.21	8	3.66
[II'] 小型 2	1	2	0.14	16	4.22

上記 3 ケースについて、単位コストあたりのサービスサビリティ: q を適用例 1 の結果と共に図 6.2-2 にプロットする。

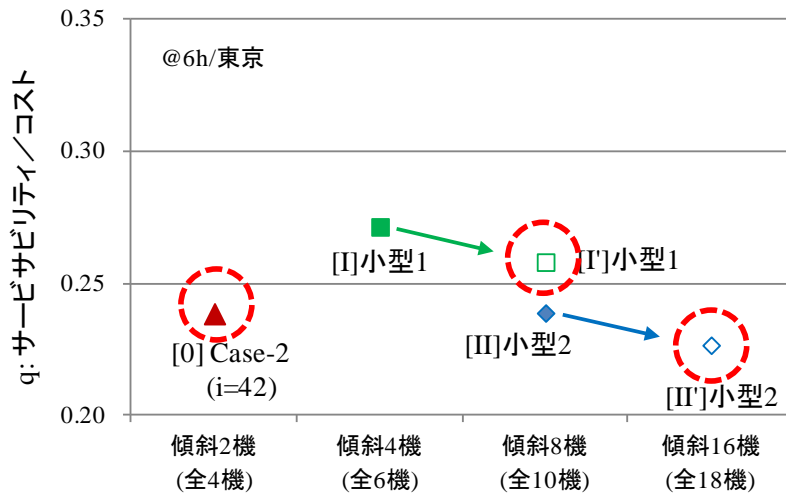


図 6.2-2 単位コストあたりのサービスサビリティ【適用例 1、2】

コンステレーションの計画検討段階でこのような結果を得た場合、まずコストモデルそのものの妥当性（本事例の場合であれば v_i 比で設定したことの妥当性等）を再検証すると共に、よりコスト削減効果のある衛星/センサコンセプトに立ち戻った検討が必要となる。

3) 適用例 3

上記の考え方を一歩進め、コンステレーションの計画検討段階において小型衛星のコスト目標算出に適用する考え方を示す。

適用例 1、2 におけるコスト算出モデルが正しいことを前提とすれば、上記検討の中でコストあたりサービスビリティ: q が最も高いのは、ケース[I] (傾斜軌道 4 機) の場合であり、概ね 0.27 程度である (図 6.2-1 による)。これを q_{\max} とおき、想定条件 3 における傾斜軌道衛星 (小型衛星) の機数を n 、1 機あたりコストを x 、更に太陽同期衛星 (従来型) のコストを 1 単位とおけば、当該コンステレーションのコスト目標は、

$$s / (2 + nx) \ll q_{\max} \quad (6-1)$$

即ち、

$$x \ll (s/q_{\max} - 2) / n \quad (6-2)$$

として設定される。

図 6.1-4 によれば (赤丸囲み部分)、

ケース[II'-1]において、 $n=32$ 、 $s=0.94$ により、 $x \ll 0.046$

ケース[II'-2]において、 $n=64$ 、 $s=0.96$ により、 $x \ll 0.024$

がそれぞれのコンステレーションにおける傾斜軌道衛星 1 機あたりの目標コストとなり、太陽同期衛星の 2 桁低い値となる。

尚、ここに x は、太陽同期衛星 (従来型) の寿命: M_s 、傾斜軌道衛星 (小型衛星) の寿命: M_x との寿命差に基づき、傾斜軌道衛星本来のコスト x' を換算した (太陽同期衛星との) 等価コストである。

$$x = x' (M_s / M_x) \quad (6-3)$$

従って、式(6-2)に(6-3)を代入することにより、

$$x' \ll (M_x / M_s) (s/q_{\max} - 2) / n \quad (6-4)$$

を得る。太陽同期衛星 (従来型) の寿命: M_s を 5 年とし、(6-4)式に基づき傾斜軌道衛星の本来コスト x' の上限を、寿命: M_x の関数 (不等式) として求めると、図 6.2-3 のようになる。

図 6.2-3 のケーススタディによれば、従来型衛星の寿命: $M_s=5$ 年、小型衛星の信頼度: $f_i=0.3 \sim 0.5$ とする時、3 年寿命の小型衛星本来コスト x' が、0.014~0.028 より大幅に低ければ、競争力を持つと読み取ることができる。このような考察を行うことにより、競争力を持ち得る小型衛星のコスト範囲を見極めることができる。

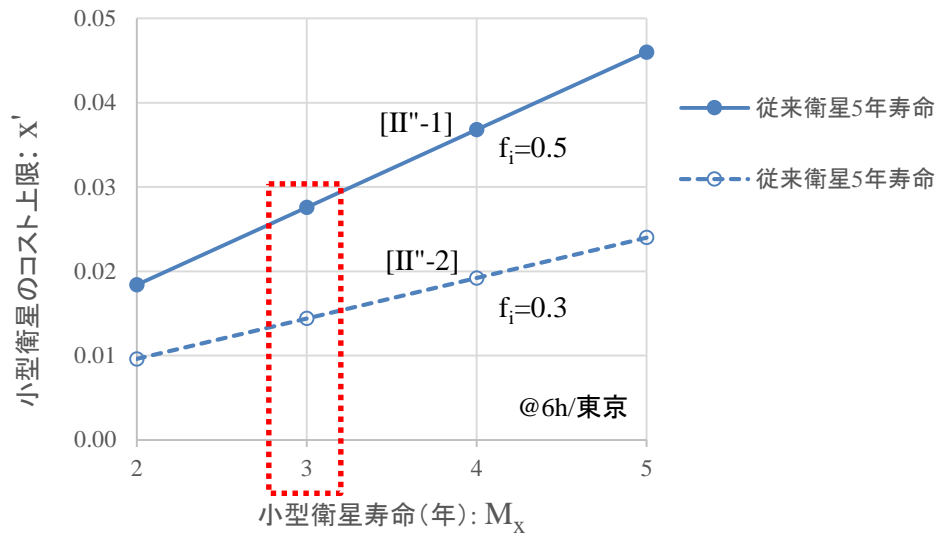


図 6.2-3 小型衛星の寿命とコスト上限の関係

尚、小型衛星の本来コスト \mathbf{x}' の中には、衛星そのもののコスト: \mathbf{x}'_s に加え、打上げコスト: \mathbf{x}'_L 並びに運用コスト: \mathbf{x}'_o があり、

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x}'_s + \mathbf{x}'_L + \mathbf{x}'_o \quad (6-5)$$

となることに留意する必要がある。

(空白)

7. 結論

7. 結論

7.1 結論

本論文では、発災直後の災害応急対応フェーズの情報空白期において、観測衛星コンステレーションが最大限の貢献を行う可能性を論じるため、まず、

- 1) 衛星能力と地上での情報抽出能力の総合評価が可能で、且つ防災ユーザと共有できる明快な指標として、被災地における衛星観測確率と観測結果の視認性・判読性を表す係数から成るサービサビリティ関数の概念を導出した。その上で、同関数を構成するパラメータの位置付けと検討上の前提条件について示した。
- 2) その定義の下、SAR 衛星による応急対応期の被災箇所検知を検討対象として、発災後 6 時間のサービサビリティ値 0.8 以上をベンチマークとした感度解析を主要コンステレーションについて行い、候補の絞り込みを行った。
- 3) これを出発点に、サービサビリティを評価関数とした、①感度解析、②地点間調整、③地形多様性への対応力確認の 3 段階による最適コンステレーションの構築フレームワークを設定した。そして、感度解析から抽出されたコンステレーション候補に対し日本域、アジア域を具体例とした最適解抽出プロセスを示し、それが適用可能であることを実証した。

次に、このようなサービ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示すため、

- 4) 災害対応時に想定されるワークフローの各段階での観測ニーズの実現性を、サービサビリティの時間軸グラフにより示した。この際、各観測ニーズを視認性に関する既存の指標(NIIRS)との関係で整理し、更にこれを視認性・判読性係数のモデルに反映する考え方についても示した。

最後に、これらの検討に立脚したサービサビリティ関数の応用について、

- 5) サービサビリティを評価関数とすることで、大型衛星と小型衛星の組み合わせによるコンステレーショントレードオフが実施可能となることを例示した。
- 6) 更に、単位コストあたりのサービサビリティにより比較評価することにより、対象とする小型衛星におけるコスト目標を設定し得ることを示した。

以上により、サービサビリティ関数という概念を導入することにより、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り、またそれが各種災害対応への発展性、並びに小型衛星を含むトレードオフやコスト目標設定への応用性を有することが示された。

7.2 今後の展望

サービスビリティの概念は、発災直後のオペレーション開始から、観測データに基づいて抽出された情報が防災ユーザの手元に届くまでの、End to End プロセスにおける全てのパラメータを包含し、それを一つの評価関数で表すものである。

これにより、太陽同期衛星と傾斜軌道衛星、それらの組み合わせコンステレーション、或いは大型衛星と小型衛星、それらの組み合わせコンステレーションといった、これまで異質のものとされ相互評価が難しかったコンステレーション間の比較評価が可能となる。言い換えると、これまで互いの主張が必ずしも交わらなかった各種コンステレーションの議論が同じ土俵の上で実施可能になった、いわば「他流試合」の土俵が形成されたことを意味する。

そのような比較評価を行うにあたっては、前提となる個々のパラメータ設定やシミュレーション条件等の妥当性がポイントとなる。即ち「条件設定や評価視点の一本化」が議論の中心に来ることとなり、それこそが将来にサービスビリティを導入することの意義である。

そして、そのための環境を整備し、サービスビリティの活用のすそ野を拓げて行くためには、以下のような活動が必要と考えられる。

1) 判読評価レファレンスの整備

視認性・判読性係数の設定論拠として活用できる判読レファレンスの構築が急務である。まずは画像シミュレーション等を駆使して、地震、火山、水害等々の個別災害事象毎に、災害対応ミッション（変化の検知、道路通行可否判断等々）の遂行可能程度を表す点数付けが必要である。

その際、災害事象間の横通し（同じ点数であれば、同じ視認性レベルにあること）も必要である。この観点から、我が国固有内容も含め、災害事象に特化した NIIRS 相当評価基準の整備が有効であると考えられる。

2) 関連する技術知見を取り込んだ条件設定

第6章に述べた通り、視認性・判読性係数は最終的な情報抽出の視点で設定すべきものである。その観点からは、単なる画像の評価に留まらず、認知工学や情報処理工学等の知見も反映し、事前準備活動（運用者の熟練、アーカイブ画像や社会インフラデータの整備等）の効果も含めた検討・評価が不可欠である。

また、地震時の即時被害予測や、ソーシャルネットワーキングサービス(SNS)等を駆使した被災地推定により、地上所要時間（特に計画時間）の大幅な短縮も見込まれる。このような最新技術を常にパラメータに反映させて行くことが重要である。

3) サービスビリティ定義の発展・拡張

また、防災関係者との議論を通じ、場合によってサービスビリティの定義自体を見直すことも考えられる。例えば、本論文では被災地点の観測1回によってサービ

サビリティ計算のカウンタとしたが、複数回の観測ニーズが見込まれるような場合には、これに適したカウンタ方法を導入することも考えられる。

或いは、サービスサビリティを限りなく1に近づける要求がユーザ側にある場合、乖離値: $1 - s$ を指標に用いる方が、目標が明確になる可能性もある。

4) コンステレーション実装視点の反映

本論文では、サービスサビリティ向上のためには、出来るだけ多くの軌道面に衛星を配置することが有効であるとの結果を得た。しかしながら、コンステレーションの実装にあたっては、理想的な軌道配置を組むことが難しい場合も想定される。

例えば、平時利用ニーズの少ない軌道面への配置確保のために、既存コンステレーションを軌道変更する、新規衛星を1機追加する、他の事業主体の衛星を編入・代用する等の代替案の中から、次善の選択を行うような場合もあり得る。

このような時にこそ、サービスサビリティ関数を用いて、候補案毎に異なるパラメータの影響度（上記の例であれば、既存衛星の残存信頼度の反映、非協力的コンステレーションによる地上所要時間の増大等）を定量化し、現実にもつた実装条件の設定を通じて、決定案を絞り込んで行くプロセスが期待できる。

5) 航空機観測との組み合わせ検討

サービスサビリティの概念は、航空機による災害観測にも適用可能であり、衛星と航空機の組み合わせによる最適解の追求は、今後の重要課題である。その検討ためには、航空機観測について、被災地域外の空港からの出発・到着時間、航続距離、航続時間内の観測可能範囲、上空からの視認性等々をモデル化し、衛星観測と一体で評価するための条件整理が不可欠である。

尚、サービスサビリティ検討に加え、このような衛星と航空機の一体検討を発災前に詰めておくことは防災活動上の意義も大きい。例えば、発災日時を各種想定することで、その後の所定時間内における使用可能な衛星・航空機と、観測可能範囲等の条件も大きく変わることから、具体的イメージの下に連携活動が可能となる。

6) 平時ミッションとのバランス検討

災害観測コンステレーションは、平時においては他のミッションにも活用される。その際、当該ミッションに対しても、観測確率と視認性相当の係数によりサービスサビリティ評価を行っておくことで、平時と災害時の両サービスサビリティのバランスをとった衛星整備を行うことに結び付く。

従来のような「災害『にも』使える」観測衛星整備から脱却し、平時ミッションと災害観測ミッションの双方についてバランスをとった衛星活用を進める上でも、サービスサビリティを用いた達成度評価が有効である。

“Service”という言葉の原義を辿ると、「神への奉仕」＝「公的な服務」という意味に行き着く。災害対応という国民の安全確保任務こそ将にこの原義に適うものであり、その任務の達成度を測るサービサビリティ関数は、極めて厳粛な役割を担うものであると言える。

サービサビリティ関数の積極的活用を通じて、衛星技術が有する能力を明確にし、災害に強い社会の実現に向けて貢献して行く所存である。

謝辞

本論文を纏めるにあたっては東京大学 中須賀真一教授にサービサビリティの概念構築を始め多大なるご指導並びに助言を頂き、また六川修一教授、岩崎晃教授、土屋武司教授、船瀬龍准教授からも多方面に亘るご助言を賜った。災害対応専門家の立場からは、元日本大学教授 西川肇氏、人と未来防災センター研究主幹 宇田川真之氏より建設的なコメントを多数頂戴した。画像利用の面からは、元陸上自衛隊一等陸佐 坂本興紀氏、元航空自衛隊一等空佐 佐藤眞實氏、青山学院大学教授 鷺見和彦氏、並びに米国 Draper 研究所 John M. Irvine 博士より多くの知見を頂いた。

衛星災害観測の観点では、宇宙航空研究開発機構 本間正修氏、滝口太氏、内藤一郎氏、三菱電機(株) 麻生紀子氏、西川孝典氏、岡田祐氏、杉田幹浩氏、有井基文氏、江村尚紀氏、田口育子氏、藤井昭彦氏、末谷貴憲氏、山岸宣比古氏、工藤美恒氏、他各位より、貴重なコメントの数々を頂いた。

これら技術的知見や助言以外にも、家族からの日夜の応援と、多くの先輩諸氏、友人達からの激励を頂いた。特に、元空将補 故 原充男氏には論文への取り組み開始にあたり、強く背中を押して頂いたことを申し添える。

多くの皆様からのご指導、ご鞭撻の下、本論文の完成に至りました。ここに改めまして、篤く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中村 太一: 「だいち」による防災利用実証活動と今後の構想、土木学会第 10 回地震災害マネジメントセミナー, 2009
- 2) James B. Campbell, Randolph H. Wynne: Introduction to Remote Sensing 5th Edition, Guilford Press, 2011
- 3) 日本リモートセンシング学会: 基礎からのリモートセンシング, 理工図書, 2011
<http://www2.cr.chiba-u.jp/ta.rssj.ppt/>
- 4) 日本リモートセンシング学会: 国土マネジメント・国土防災の観点からの衛星データ活用ガイドライン, 2009
- 5) 坂田俊文: 坂田俊文が語る日本でのリモートセンシングの活動とその裏側, pp.165-168, リモート・センシング技術センター, 2015
- 6) 増子 治信: 宇宙からの高分解能観測とその利用, 科学技術振興機構 HP, 2009
http://scienceportal.jst.go.jp/columns/opinion/20090507_01.html# (2016/3/6 ダウンロード)
- 7) 松岡 昌志: リモートセンシング, 土木学会・地震災害マネジメントセミナー 開催 10 年記念シンポジウム, 2010
- 8) 衛星総覧, リモート・センシング技術センターHP, <https://www.restec.or.jp/satellite> (2016/3/6 ダウンロード)
- 9) 国土交通省 HP: GIS・地理空間情報活用への取組
http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000041.html (2016/3/6 ダウンロード)
- 10) 国土地理院 地理院地図(電子国土 Web) , <http://maps.gsi.go.jp/help/> (2016/3/6 ダウンロード)
- 11) 地球観測データ利用ビジネスコミュニティ (BizEarth) HP:宇宙カタログ, 2015
<http://remosen.jp/index.php/> (2016/3/6 ダウンロード)
- 12) 中央防災会議: 防災対策推進検討会議 最終報告, p.11, 2012
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/suishinkaigi/> (2014/8/15 ダウンロード)
- 13) Google Crisis Response HP: 東日本大震災と情報, インターネット, Google, 2012
<http://www.google.org/crisisresponse/kiroku311/> (2014/8/15 ダウンロード)
- 14) 国際災害チャータ HP: <https://www.disasterscharter.org/web/guest/activating-the-charter> (2016/3/12 ダウンロード)
- 15) 辻野 照久: 国際災害チャーターの活動動向, 科学技術動向 147 号, 2014
- 16) 防災のための地球観測衛星等の利用に関する検討会 (文部科学省、内閣府): 防災のための地球観測衛星システム等の構築及び運用の進め方について, 2006
- 17) 中村太一, 滝口 太, 石館和奈, 滝澤親一: 災害監視衛星に向けた防災利用実証構想, 平成 20 年度東京大学地震研究所共同利用研究集会「SAR・赤外センサによる地震・火山・地盤変動の監視・解析」, 2008

- 18) 文部科学省: 地球観測衛星の防災のための利用に関する取組状況の報告, 宇宙政策委員会 宇宙民生利用部会 第7回/第8回会合, 2015
- 19) 鈴木 新一: だいち2号の運用状況, 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」データ利用シンポジウム, 2015
- 20) 島田 政信: だいち2号の校正検証・利用研究, 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」データ利用シンポジウム, 2015
- 21) 宮崎景太: だいち2号の防災対応の取り組み, 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」データ利用シンポジウム, 2015
- 22) 藤原智: 国土地理院によるだいち2号の災害対策への活用, 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」データ利用シンポジウム, 2015
- 23) 佐藤弘行: ダムのモニタリングの検討事例, 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」データ利用シンポジウム, 2015
- 24) 遠藤 勉 他: 衛星搭載型合成開口レーダの利用技術, 三菱電機技報, 2015
- 25) 防災科学技術研究所 (小澤 拓, 上田 英樹): PALSAR 干渉解析による小笠原硫黄島の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報 第102号, 2010
- 26) 本間 正修: 衛星を用いた水害観測の取り組みについて, 中央防災会議 大規模水害対策に関する専門調査会 (第12回), 2008
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/daikibosugai/12/index.html>
 (2016/3/6 ダウンロード)
- 27) 沢田 治雄: 東日本大震災対応で見えてきた課題, 新たな宇宙からの地球観測を考えるワークショップ, 2011
- 28) 有井 基文 他: Applicability of SAR to Marine Debris Surveillance After the Great East Japan Earthquake, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, vol. 7, No.5, 2014
- 29) 有井基文他: Landslide Monitoring Using ALOS-1 AND 2 Data, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015
- 30) 水野正樹, 神山嬢子, 江川真史, 佐藤匠, 蒲原潤一: 2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所判読調査手法(案), 国土技術政策総合研究所資料, No.791, pp.1-32, 2014
- 31) 神山 嬢子、江川 真史、國友 優: 人工衛星 SAR 画像による河道閉塞箇所の緊急判読調査手法の提案, 国土交通省国土技術研究会論文集, pp.13-17, 2014
- 32) 内閣府: 防災白書 (平成 23 年度版), 2011
- 33) 国土交通省: 国土交通白書, 2011
- 34) 気象庁: 気象業務はいま, 2011
- 35) JAXA: 東日本大震災対応報告書, 2011
- 36) JAXA HP: 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)による東日本大震災の緊急観測結果, 2011,

- http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/gallery/lib_data/j3disaster_11.htm
(2014/8/15 ダウンロード)
- 37) だいち防災 WEB: 【地震】 東日本大震災, 2011
[https://bousai.jaxa.jp/2011/03/11/2011-03-11-【地震】 東日本大震災/](https://bousai.jaxa.jp/2011/03/11/2011-03-11-【地震】東日本大震災/)
(2014/8/15 ダウンロード)
- 38) 国際災害チャータ HP: Earthquake in Japan, 2011
<https://www.disasterscharter.org/web/guest/-/article-id/ACT-359> (2016/3/12 ダウンロード)
- 39) 岩崎 晃, 宮谷 聡、中須賀 真一: Satellite contributions to disaster monitoring - Japanese Earthquake and Tsunami Case in 2011 - , 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2012
- 40) 五味 淳: 東日本大震災への JAXA の対応について, 第 10 回宇宙開発委員会, 2011
- 41) 本間 正修: 災害に対する人工衛星の働き, 国土地理院報告会, 2011
- 42) 麻生紀子、相澤 研吾: 地球観測衛星による防災利用実証活動と東日本大震災への対応, 防災分野における地理空間情報の利活用推進のための基盤整備ワーキンググループ (第 5 回) , 内閣府, 2011
- 43) 滝口 太: だいちと東日本大震災, 第 3 回 ALOS-2/3 利用ワークショップ, 2011
- 44) 古田 竜一: 複数の地球観測衛星を用いた防災利用, RESTEC 技術成果報告会 2012
- 45) 日本スペースイメージング HP: 東日本大震災特設サイト, 2011
http://www.spaceimaging.co.jp/EastJapanEarthquake/record_collection/tabid/577/Default.aspx
(2013/4/15 ダウンロード)
- 46) パスコ HP: 平成 23 年東日本大震災に関する情報, 2011
http://www.pasco.co.jp/disaster_info/110311/ (2014/8/15 ダウンロード)
- 47) 小滝 晃: 東日本大震災 緊急災害対策本部の 90 日, 2013
- 48) 消防庁 HP: 東日本大震災記録集, 2013
http://www.fdma.go.jp/concern/publication/higashinihondaishinsai_kirokushu/
(2014/8/15 ダウンロード)
- 49) 国土交通省 HP: 「くしの歯」作戦について, 2011
http://www.thr.mlit.go.jp/road/jisinkannrenjouhou_110311/kushinohasakusen.html
(2014/8/15 ダウンロード)
- 50) 宮城県 HP: 宮城県災害対策本部 議事要旨, 2011
<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kikitaisaku/kb-1saigaitaisakuhonbukaigitop.html>
(2014/8/15 ダウンロード)
- 51) 内閣府: 東日本大震災における災害応急対策に関する検討会 (第 1 回) 議事概要, 2011
<http://www.bousai.go.jp/oukyu/higashinihon/> (2014/8/15 ダウンロード)
- 52) 本間 正修: Overview of New Technology for Improving Disaster Management, IAA Climate Change and Disaster Management Conference, 2015

- 53) 中村 太一: 衛星による災害観測能力の総合的評価について (第一報), pp.143-149, 日本航空宇宙学会論文集(第 63 巻第 4 号), 2015
- 54) 中村 太一: Tradeoff Studies on Total Serviceability Evaluation for Disaster Monitoring by Satellites, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technologies Japan, Vol. 14, No. ists30, 2016
- 55) 気象庁 HP: 過去の気象データ検索, 2012
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> (2014/8/15 ダウンロード)
- 56) 片山 晴善: 地域ごとの時間による被雲率の違いについて,
第 2 回 ALOS-2/3 利用ワークショップ, 2010
- 57) 航空宇宙工学便覧 (第 3 版), 丸善, 2005
- 58) 虎尾 正久: 宇宙航行の数学, 森北出版, 1970
- 59) 天体位置表、海上保安庁, 2010
- 60) 長沢 工: 天体の位置計算 (増補版), 地人書館, 2001
- 61) John Johnson: Analysis of image forming systems, Image Intensifier Symposium, 1958
- 62) Norman Kopeika: "A system engineering approach to imaging", pp.336-345, SPIE Optical Engineering Press, 1998
- 63) Jon C. Leachtenauer, Ronald G. Driggers: Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems, Artech House Publishers, 2001
- 64) 大内 和夫: 合成開口レーダの基礎, 2004
- 65) 日本写真測量学会: 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 1998
- 66) 合成開口レーダ (SAR), 資源観測解析センター, 1992
- 67) 資源・環境観測解析センター: ERSDAC PALSAR プロダクト SAR 処理アルゴリズム解説書, 2005
- 68) 鈴木 新一: 陸域観測技術衛星(ALOS-2)観測シナリオ, 第 4 回 ALOS-2/3 利用ワークショップ, 2012
- 69) 勘角 幸弘: ALOS-2 の開発状況, 第 4 回 ALOS-2/3 利用ワークショップ, 2012
- 70) 岡田 宏之: 防災対応シナリオ, 第 4 回 ALOS-2/3 利用ワークショップ, 2012
- 71) 針生 健一 他: 陸域観測技術衛星 2 号(ALOS-2) 最先端 L バンド SAR による高精度な地球観測を目指して, 三菱電機技報, 2011
- 72) 理科年表, 丸善, 2015
- 73) 国土交通省: 業務継続計画第 3 版, p.15, 2014
- 74) 中央防災会議幹事会: 首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画, 2016
- 75) 中央防災会議幹事会: 南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画, 2015
- 76) 宇宙開発委員会 HP: 宇宙開発に関する重要な研究開発の評価災害監視衛星システム

- SAR 衛星プロジェクトの事前評価結果 (案), 平成 20 年宇宙開発委員会第 9 回推進部会,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/uchuu/gijiroku/h20/suishin/08082706/005/003.htm
 (2015/12/24 ダウンロード)
- 77) 日本国勢図会, 第 73 版, 矢野恒太記念会, 2015, p.41
- 78) 航空機搭載 SAR(Pi-SAR-L2) 画像判読事例集, JAXA, 2013
- 79) 第 65 回日本統計年鑑, 1-8 都道府県・地形・傾斜度別面積, 総務省, 2016
- 80) 防衛省防衛研究所: 大規模災害における軍事組織の役割, 安全保障国際シンポジウム,
 2011
- 81) 務台 俊介: 3.11 以降の日本の危機管理を問う, 晃洋書房, 2013
- 82) 日本医師会: 緊急時総合調整システム(Incident Command System) 基本ガイドブック,
 2014
- 83) John M. Irvine, National Imagery Interpretability Rating Scales (NIIRS):Overview and
 Methodology, International Society for Optics and Photonics(SPIE), 1997
- 84) Imagery Resolution Assessments and Reporting Standards (IRARS) Committee:
http://fas.org/irp/imint/niirs_c/index.html (2016/3/6 ダウンロード)
- 85) **Federation of American Scientists (FAS):**
<http://fas.org/irp/imint/niirs.htm> (2016/3/6 ダウンロード)
- 86) Doug Griffith: General Image Quality Equation (GIQE), Civil Commercial Imagery Evaluation
 Workshop, 2012
- 87) Taejung Kim: Automated Image Interpretability Assessment by Edge Profile Analysis of
 Natural Targets, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Annual Conference,
 2010
- 88) Taejung Kim: Automated Assessment of NIIRS and GRD of High Resolution Satellite Images
 through Edge Profile Analysis of Natural Targets, Civil Commercial Imagery Evaluation
 Workshop, 2011
- 89) Rick Heidner: Resolution Metrics for Space-Based Imagery NOAA Advisory Committee On
 Commercial Remote Sensing (ACCRES), 2014
- 90) 内閣府: 水害時の避難・応急対策の今後の在り方について (報告), 水害時の避難・応
 急対策検討ワーキンググループ, 2016
- 91) JAXA EORC HP: [速報]「だいち 2 号」による台風 18 号 (温帯低気圧) の影響による豪
 雨の緊急観測について, 2015
http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jdis_pal2_typ18_20150910.htm
 (2016/3/6 ダウンロード)
- 92) 国土交通省地点別浸水シミュレーション検索システム (浸水ナビ)
<http://suiboumap.gsi.go.jp/> (2016/3/6 ダウンロード)
- 93) COSMO-SkyMed System Description & User Guide, ASI-CSM-ENG -RS-093-A, 2007, p.6.

- 94) COSMO-SkyMed SAR Products Handbook, ASI-CSM-ENG -RS-092-A, 2007, p.12.
- 95) 今井 浩子 他: PRISM-2 概要と画像・DSM シミュレーション, 第4回 ALOS-2/3 利用ワークショップ, 2012
- 96) WorldView-3 DATA SHEET: DigitalGlobe HP, <https://www.digitalglobe.com/>
(2016/3/6 ダウンロード)
- 97) Lloyd Wood: Introduction to Satellite Constellations, International Space University, 2006
- 98) 機械システム振興協会: 複数衛星連携システムに関する調査研究報告書 (要旨), 2010
- 99) 横田 裕也 他: Newly developed X-band SAR system onboard Japanese small satellite “ASNARO-2”, Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2013
- 100) 中村 聖平、辻 雅生、中野 陽介: 合成開口レーダ(SAR)の最新技術の動向, 三菱電機技報, 2014
- 101) 木村 恒一 他: 総合宇宙利用システムの普及を促進する小型SAR衛星技術, NEC技報, 2011
- 102) 白坂 成功: オンデマンド即時観測が可能な小型合成開口レーダ衛星システム, 内閣府「革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)」HP,
<http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/about-kakushin.html> (2016/3/6 ダウンロード)
- 103) JAXA: 信頼性プログラム標準、JMR-004C, 2016
- 104) 白坂成功、石橋金徳、中須賀真一: 超小型衛星のための「ほどよし信頼性工学」の検討 (設計・開発手法), スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, 2011