

衛星リモートセンシング技術の活用

主に熱・ガス・噴出物に関する観測と解析について

東京大学地震研究所
火山噴火予知研究センター
金子隆之

本日の内容

—「総合基本施策の中間取りまとめ」と「論点」より抜粋・整理—

火山活動評価のための基礎情報に関する調査及び研究

1. 連続的な観測データに基づく数十年単位の活動の状態把握

火山活動の状態の把握と予測に関する基盤的・機動的調査及び研究

2. 噴火現象の検知・自動解析に基づき、噴火の時刻、場所、規模、様式を即時把握する手法

3. 噴火推移やハザードを即時かつ継続的に把握するための手法

技術的進歩の取込み

4. 観測技術の進歩によるリモートセンシング技術のさらなる活用

1. 連続的な観測データに基づく数十年単位の活動の状態把握

赤外観測の立場

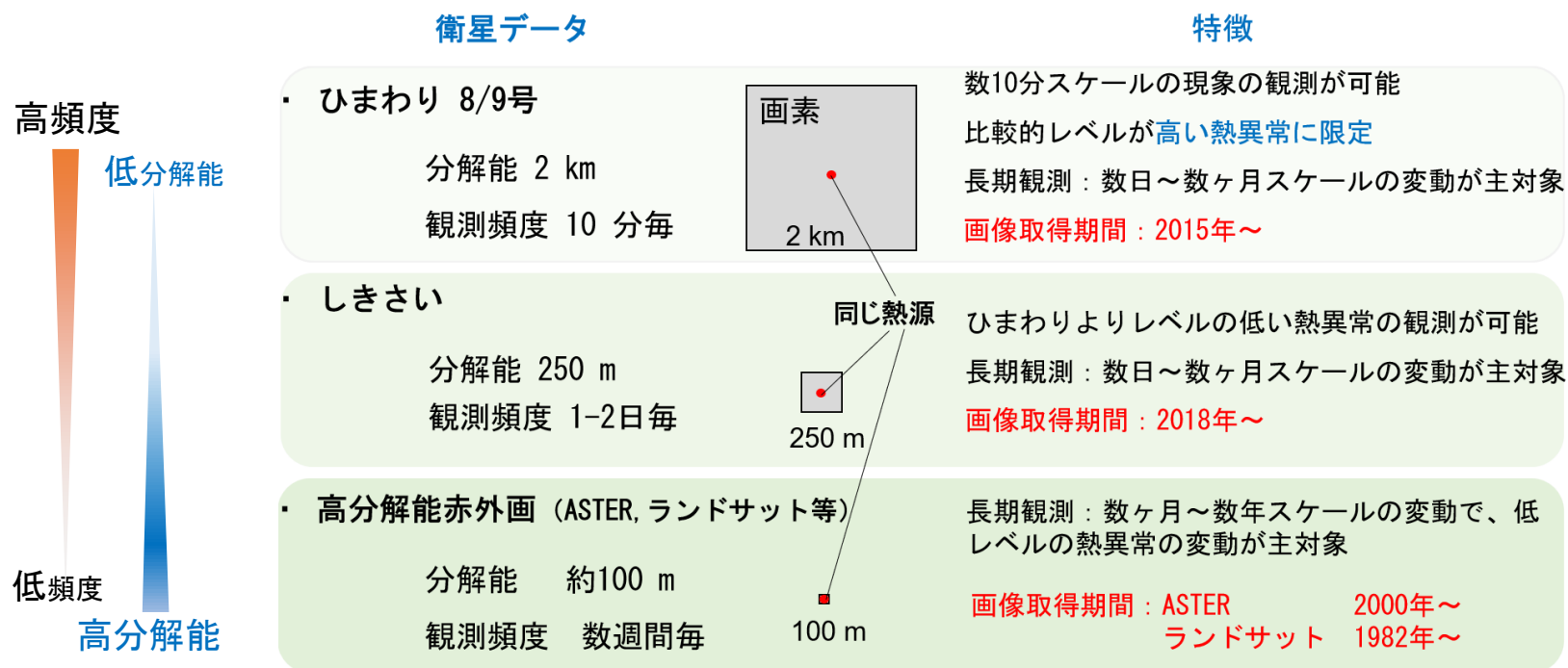
”状態把握”・・・熱的状态から活動パターンや噴火の前兆を調べる

高い熱異常が見られる時 = 活発期

マグマが地表へ噴出（噴火） あるいは マグマが浅部に達している（近く噴火の可能性） 時期

使用する赤外画像

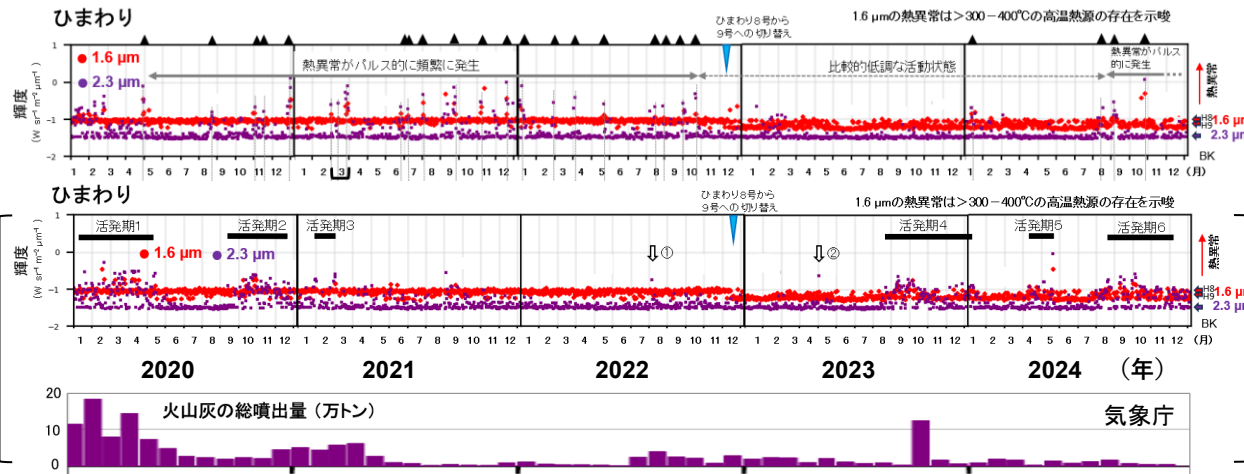
熱異常は、時間・空間的に多様性に富むため、
この観測には様々なタイプの赤外画像を利用する必要がある



● 活動の状態把握の例

① 諏訪之瀬島、桜島の活動(ひまわり) — 火山ごとに独自の活動パターンがある

諏訪之瀬島



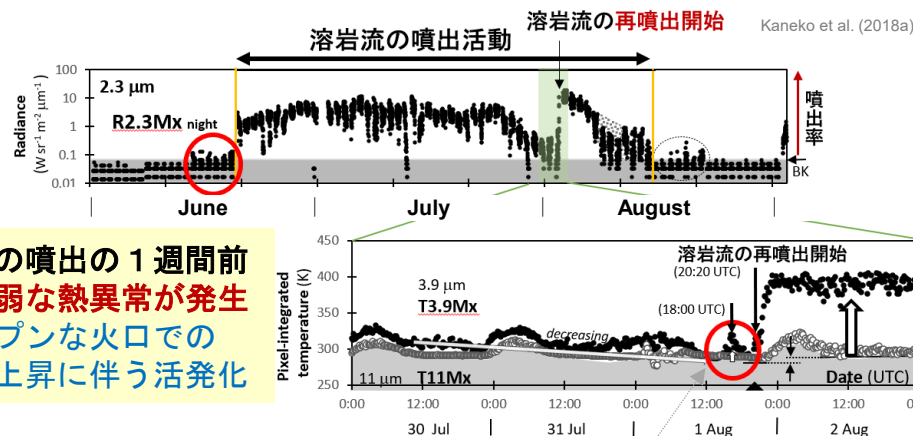
パルス的に活発期(=熱異常)発生

数ヶ月ほど熱異常が継続する活発期が、繰り返し発生している

活発期には火山灰の放出量が多い

● 前兆現象の例(短期)

② 2015年ラウン火山噴火の例(ひまわり)

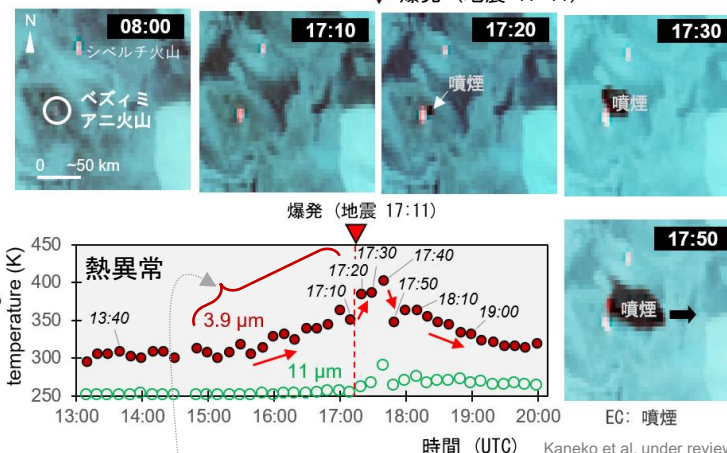


溶岩流の噴出の1週間前から微弱な熱異常が発生
⇒オープンな火口でのマグマ上昇に伴う活発化

再噴出の2-3時間程前に小さな熱異常のパルスが発生
⇒キャップロックの吹飛ばし?

③ 2019年3月15日ベズィミアニ火山噴火の例(ひまわり)

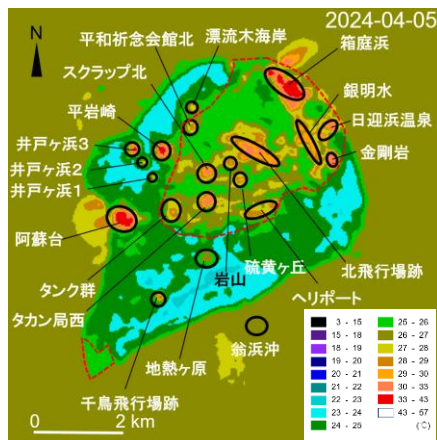
地震を伴う爆発的噴火が発生 ▼ 爆発(地震 17:11)



爆発的噴火に2時間ほど先行して熱異常の上昇が起きている
⇒粘性高い溶岩が噴出し、減圧脱ガスが進行し、爆発発生

● 活動の状態把握の例

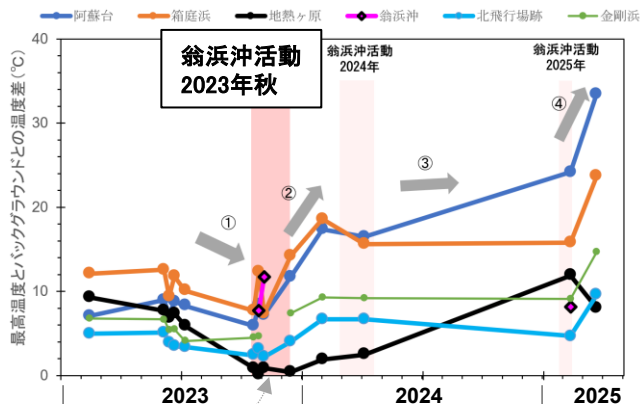
① 硫黄島における熱異常域の分布とその時間変化 (ランドサット)



21か所の局所的熱異常域が
識別される

● 前兆現象の例 (長期)

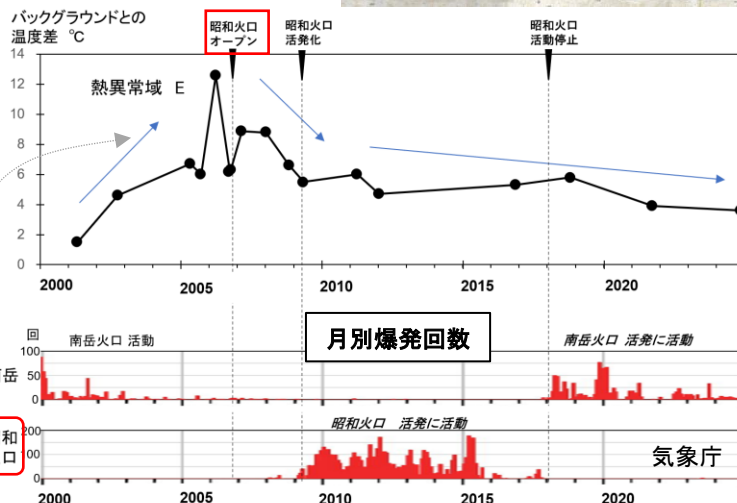
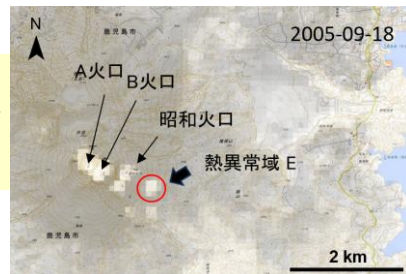
2023年秋の翁浜沖イベントの前に、多くの熱異常域の温度が低下



各熱異常域の温度は、連動して変化
している
全体として、2025年に向けて上昇傾
向にある (放熱量も同様)

② 桜島における熱異常域の分布とその時間変化 (ASTER)

山頂火口群に加え、東
斜面中腹に熱異常域が
ある (熱異常域 E)



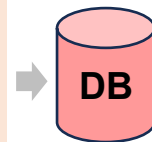
昭和火口の活動に先行して、熱異常域 E の温度が上昇
していることが認められる

前兆現象ともとらえられる (今後の検討が必要)

衛星データに基づく数十年単位の活動状態の把握

現状：少数例の試験的解析が実施 — 有用な情報が得られることが確認

今後：多数例の調査を行い、系統的な整理を進め (噴火状況、地上観測データとの比較を含む)、
データベース化を図る必要がある。



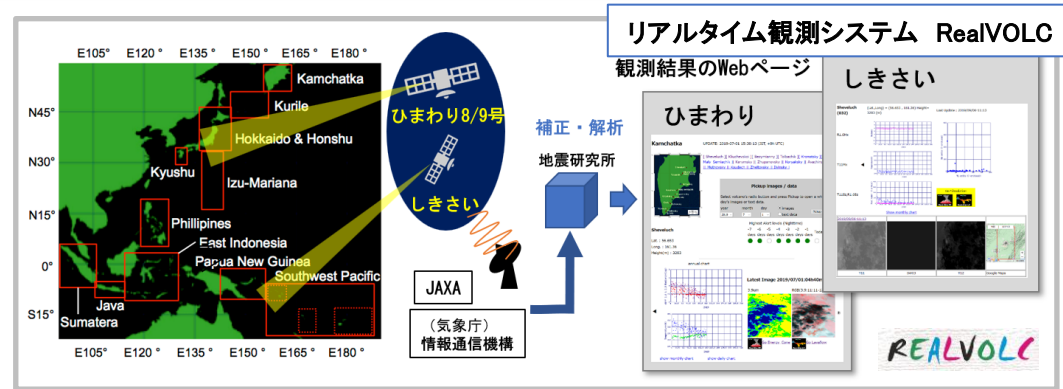
→ このような手法によって基礎情報を収集し、各火山の個性を予め把握することは、リアルタイム観測データを解釈する際に重要となる

2. 噴火現象の検知・自動解析に基づき、噴火の時刻、場所、規模、様式を即時把握する手法

即時把握のためには…

衛星データの転送から、解析処理まで、
リアルタイムで処理するシステム
を開発・運用することが必要となる

現状では、
例： RealVOLC
ひまわり、しきさい



各項目ごとに、有効な方法について、現状と課題を整理

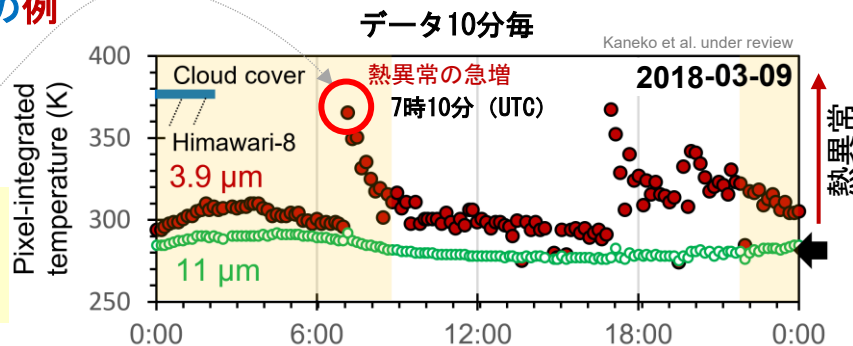
(1) 噴火時刻

利用衛星画像	即時性	自動解析	備考
・ ひまわり	1-2 時間	実施例あり	高い時間分解能。マグマ噴火に限定
・ しきさい	数時間	可能	観測頻度が低い
・ 高分解能画像 可視、赤外画像	> 日～週	実施例あり	観測頻度や天候の影響により、即時継続的把握は困難

● 新燃岳2018年の噴火の例 (ひまわり)

3月9日に最初の
ブルカノ式噴火が発生

ひまわりデータから
発生時刻：
7時0分～10分の間 (UTC)



課題

精度、リアルタイム性の向上のため、**観測頻度2.5分のデータ**を利用したシステムの開発が重要

自動解析を進める上で…
ひまわりの光学系に起因したノイズ（太陽迷光等）の除去アルゴリズムの開発

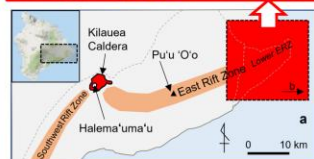
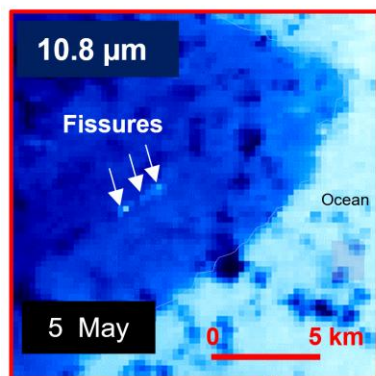
噴火時刻の推定には、ひまわりのデータが、正確で、リアルタイム性が高く有利

(2) 噴火場所・噴出物の分布

利用衛星画像	即時性	自動解析	備考
・ しきさい (赤外)	数時間	可能	分解能がやや低い 天候・噴煙の影響を強く受ける (頻度は高い)
・ 高分解能画像 可視、SAR画像	> 日～週	可能	詳しい場所の特定が可能 光学画像は天候・噴煙の影響を強く受ける

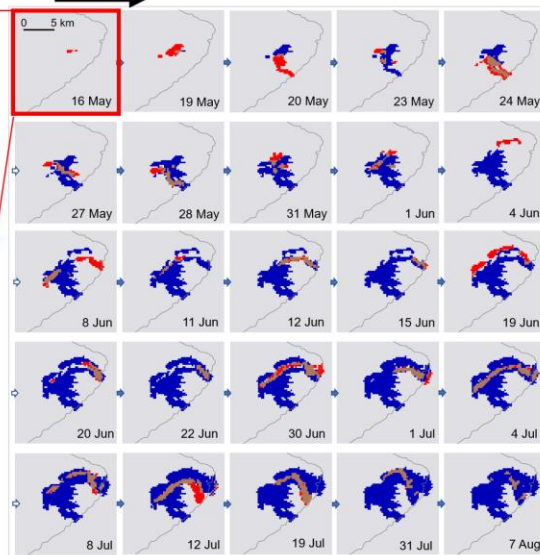
● キラウエア2018年の噴火の例 (しきさい) 観測頻度: 3-4 日

Kaneko et al. (2021)



5月5日の画像:

ERZ上に微弱な熱異常が発生していることがわかる
—最初の噴火発生場



5月16日～8月7日の画像:

溶岩流の被覆域が、徐々に拡大していく様子がわかる

課題

光学画像 (可視・赤外) では、雲や噴煙の影響を受け、地表面の観測できないことが多く起きる

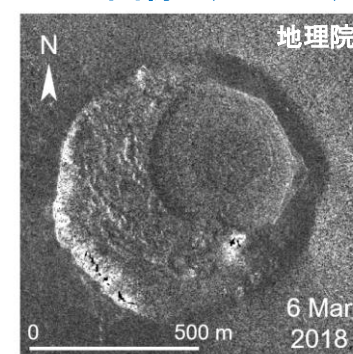
例: 新燃岳2018年の噴火 (3月6日の画像)

光学画像 (SPOT)



水蒸気噴煙に覆われ、溶岩が見えない

SAR画像 (ALOS-2)



噴煙や雲による被覆の影響を受けることなく、地表面の観察ができる

即時・継続的な場所・分布の把握には、SAR画像の利用が有効 (噴火場所の地形変化が微小なケースは、検出困難)
しきさい (赤外) は天候・噴煙の影響を受けるが、頻度が高いため、有効な情報源となり得る

<噴出量>

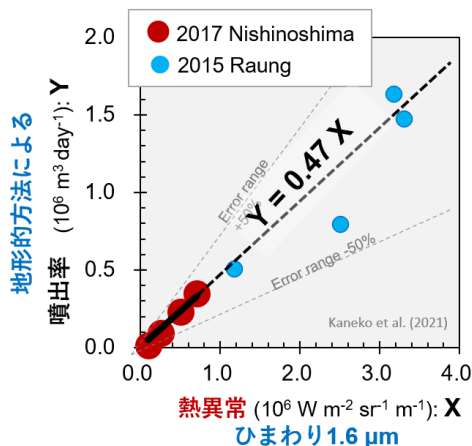
利用衛星画像	即時性	方法	自動解析	備考
・ 高分解能画像 可視	> 日～週	ステレオペアからDEM抽出	困難	ペア画像取得と処理には時間がかかる
・ 高分解能画像 可視／SAR画像	> 日～週	分布面積から、厚さを 仮定/ モデル推定して、噴出量を算 出(簡易的方法)	可能?	噴煙・雲の影響受けない SAR画像の利用が望ましい
・ しきさい	数時間	〃	可能	観測頻度が低い。噴煙・雲の影響あり

噴出量の即時・継続的推定には、噴煙・雲の影響を受けないSAR画像による簡易的な方法が有利 (＋ドローン：写真、LiDAR)

<噴出率>

・ 高分解能画像 可視／SAR画像	> 日～週	短い間隔で噴出量を繰返 して推定	可能?	噴煙・雲の影響を受けない SAR画像の利用が望ましい
・ ひまわり	1-2 時間	熱異常と噴出率の関係に基 づいて推定	容易	即時推定可→リアルタイ ムシミュレーションの入 力値として有望

● ひまわりの熱異常に基づく噴出率の推定方法 (低粘性溶岩流)



ひまわりー熱異常
↓
回帰式
↓
噴出率

リアルタイム
で推定可能

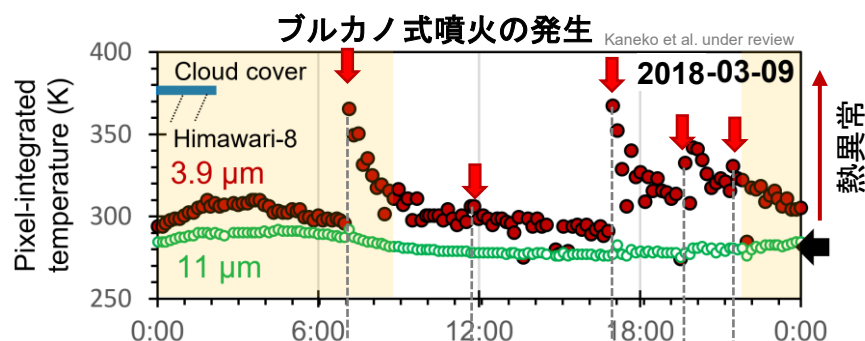
噴出率の推定には、SAR画像による簡易的な方法が利用できる。
即時性を要する場合は、ひまわりの熱異常を用いた方法が有効である。

ただし、適用範囲を高粘性溶岩まで広げる必要がある

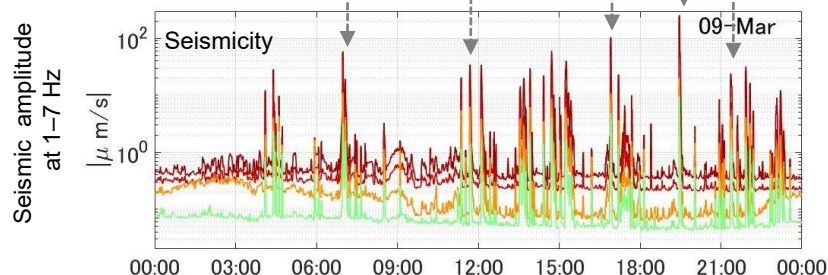
利用衛星画像	即時性	方法	自動解析
高分解能画像 可視／赤外／SAR画像	日～週	画像を判読	不要
ひまわり	1-2 時間	時間変化パターンに基づいて識別	不要

● ひまわりの熱異常の時間変化パターンに基づく噴火様式の識別の例

・ブルカノ式噴火（新燃岳2018年噴火）



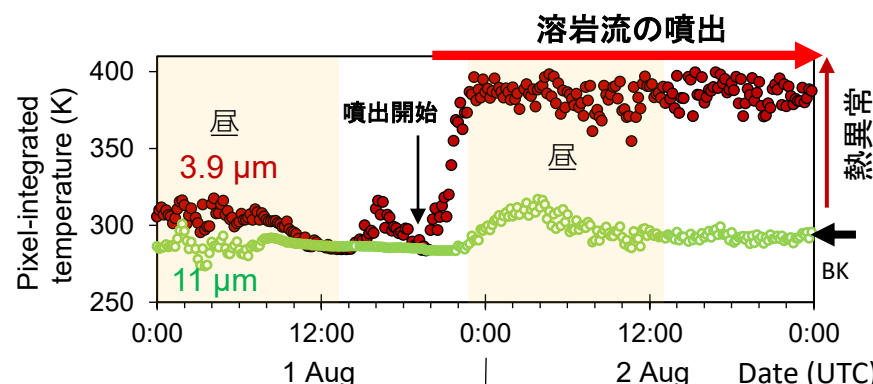
ブルカノ式噴火は、非対称の熱異常パターンを示す



熱異常から捉えたブルカノ式噴火の発生と地震活動はよく対応している

今後、熱異常と地震/空振を組合わせた新しい観測・解析の開発が重要となる

・溶岩流の噴出（ラウン火山2015年噴火）



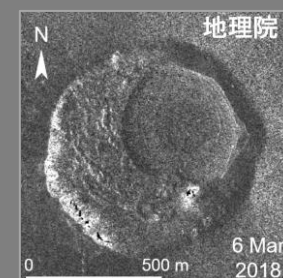
溶岩流の噴出は、一定レベルの高い熱異常が継続する

● 高分解能画像による噴火様式の識別の例

SAR画像 (ALOS-2)

・火口内での溶岩流噴出（新燃岳2018年噴火）

噴出物の形状・表面地形で判断



噴火様式の識別には、ひまわりによる方法は、リアルタイム性が高い点で利点がある。実際的には、高分解能画像と組合わけて利用

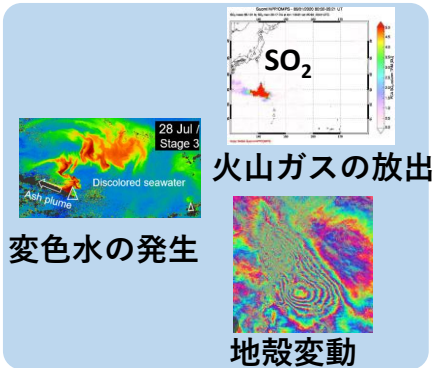
3. 噴火推移やハザードを即時かつ継続的に把握するための手法

噴火推移を把握する手法として、

衛星多項目観測 が有効

(1) 衛星多項目観測のコンセプト

必要に応じて
各種衛星データ

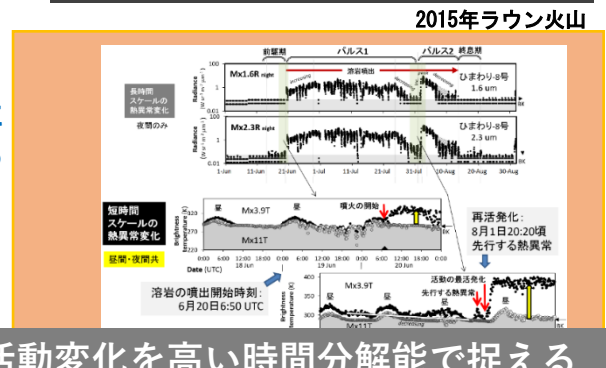


高分解能 画像
頻度：数週間毎・分解能：< 1 m



リアルタイム

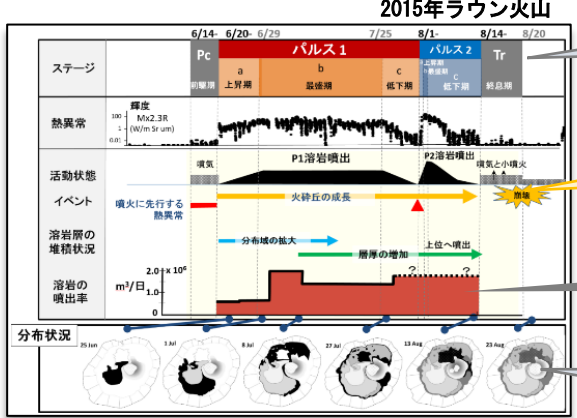
高頻度画像
ひまわり8号（しきさい画像）
頻度：10分毎・分解能：2 km



効果的に
組合せる

詳しい噴火推移を推定

噴火推移



高分解能画像で具体的な噴火状況を確認し、高頻度画像で活動変化を高い時間分解能で捉え、両者を効果的に組合せることによって、詳しい噴火推移を推定する

(2) 衛星多項目観測の例：2019－2020年西之島の活動

高分解能画像 ALOS-2 等

地質判読

・ 黒は新しい溶岩流

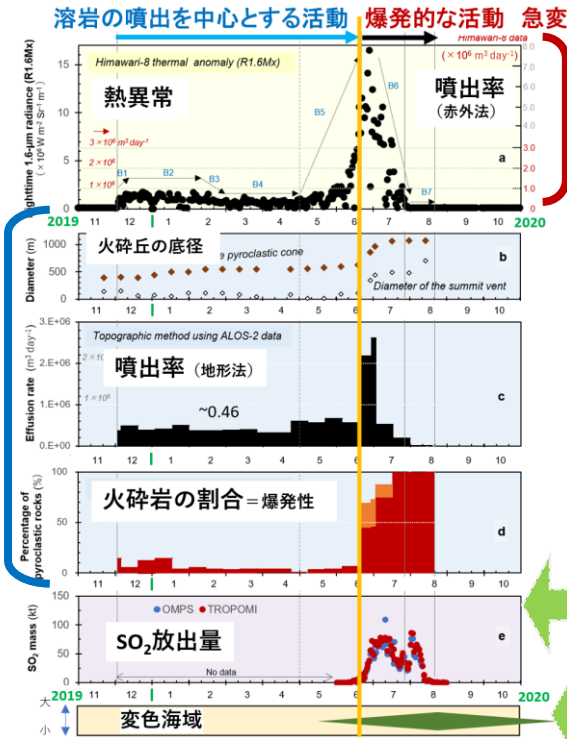
- ・ 火砕丘の底径、噴出率の時間変化推定
- ・ 溶岩の噴出を中心とする活動から爆発的な活動へ急変

時間

～14日毎



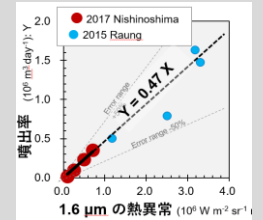
噴火に関する各種データの時間変化



高頻度画像 ひまわり8号

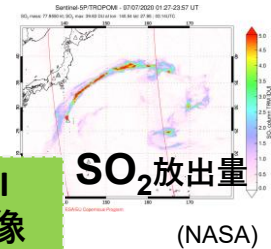
熱異常解析

熱異常に基づく
噴出率の推定
(目盛)

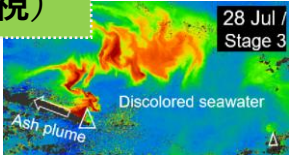


その他の画像

OMPS, TROPOMI
紫外センサー画像



しきさい (可視)

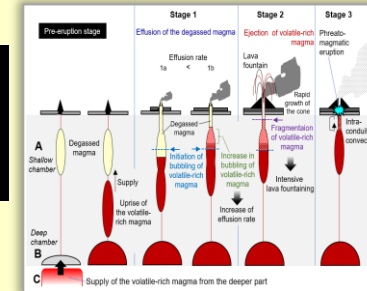


変色海域の発生状況
(JAXA)

活動の急変と前後して、熱異常、噴出率、OMPSとTROPOMIによるSO₂放出量が急増、しきさいによる変色海域が拡大している。

詳しい噴火推移と マグマシステムの 推定

Kaneko et al. (2022)



衛星
多項目
データ

熱異常解析＋地質判読

＋ SO₂放出量＋変色海域

を総合的に検討

総合基本施策：火山噴火推移やハザードの即時かつ継続的な把握 ⇒ 一連の作業を、リアルタイムで行う必要

4. 観測技術の進歩による リモートセンシング技術のさらなる活用

懸案

衛星多項目観測のリアルタイム化・高度化 — 技術的進歩を取り入れた開発を進めることで 実現に近づける

(1) 衛星**紫外センサー**のデータに基づく **SO₂ 放出率**の準リアルタイム観測システムの開発

火山の活動評価において、SO₂放出率は重要項目の1つであり、この観測システムの開発は不可欠

TROPOMI等の衛星**紫外センサー**で得られた
SO₂カラム量の空間分布

に対して

大気流跡線モデルによるインバージョン

を行うことで

高頻度な
SO₂ 放出率データを算出

例:

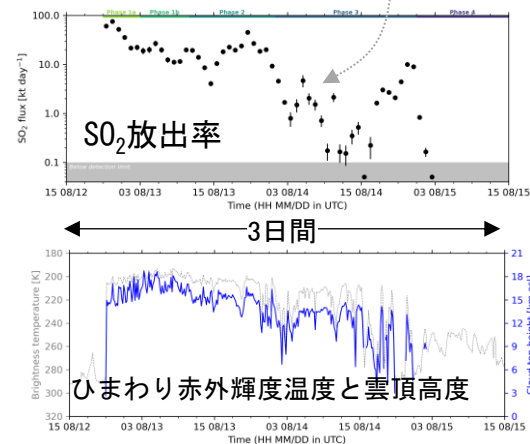
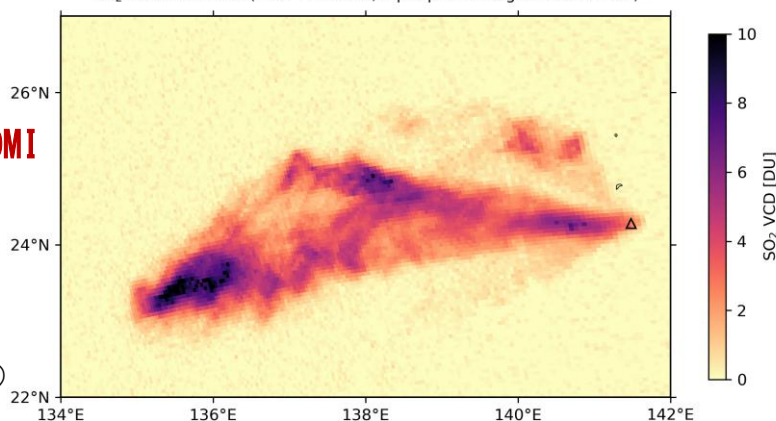
福徳岡ノ場2021年噴火

Sentinel-5P/**TROPOMI**

(森田・他、2021)

S5P/TROPOMI SO₂ | Fukutoku-Oka-no-Ba | 2021-08-13 04:14-04:16 UTC

SO₂ mass: 9.776 kt (Max: 18.49 DU; Input plume height: 15.0 km asl)



紫外センサー（TROPOMI等）によりSO₂雲の検出と放出率の推定を行う
大規模噴火に限定せず、定常的な噴煙活動にともなうSO₂放出率の評価も行う

準リアルタイム処理システムを開発し、SO₂観測を衛星多項目観測に組込むことが重要

(2) 高分解能画像の観測頻度・リアルタイム性の向上

● 問題…噴煙や雲の影響

対策 1 : SAR衛星、とくに**小型SAR衛星**の利用が重要

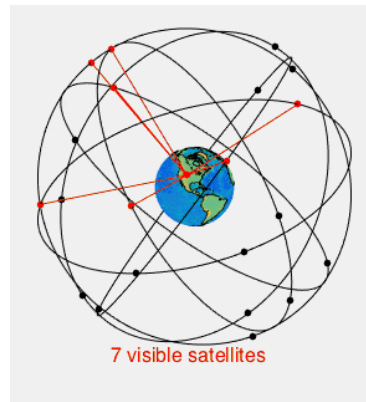
ALOS-2/4 の弱点

- ・ Lバンドのため地表面の描写力が低い
- ・ 頻度的には十分ではない

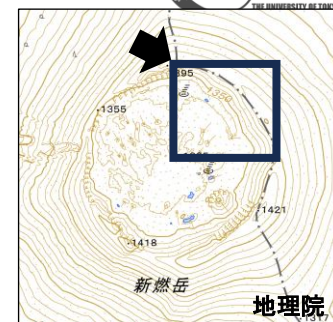


小型SAR衛星

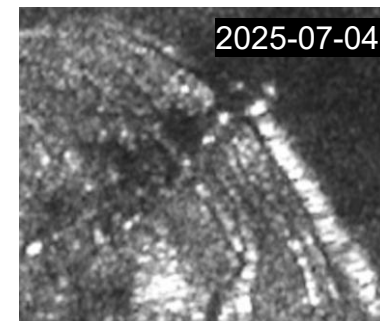
- ・ 近年、衛星数が **飛躍的に増えつつある**
例 : Umbra, ICEYE, Synspective, QPS研究所 等
- ・ CバンドやXバンド使用していることが多く、
地形が明瞭にとらえられ、判読に有利
- ・ コンステレーションを組み、**観測頻度が高い**
例、Umbra 同一地点を1日1回観測可



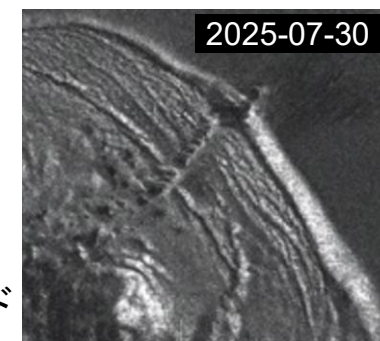
対策 2 : ドローンの併用



新燃岳 火口北東部



ALOS-4
Lバンド



地形が明瞭

Umbra
Xバンド

0 200 m

防災科研・東京大学

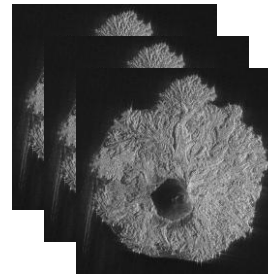
衛星コンステレーション
(Wikipedia)

● 問題…高分解画像の処理や地質判読に時間を要する

対策 3 :

AI等を活用した自動地質判読システムの開発
および関連処理の自動化・迅速化

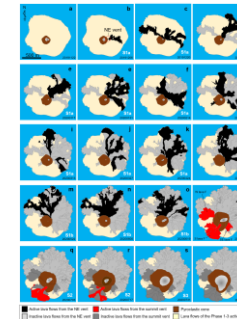
SAR画像



自動判読



地質判読図



(3) ひまわり・しきさいのシステムの開発と高度化

● 問題… ひまわりは、2030年度に10号に移行 観測頻度 2.5 分 のデータの方が観測に有利

対策 4 : ひまわり10号に対応した新システムを開発し、併せて観測頻度2.5分データの処理も行うようにする

● 問題…しきさいは、設計寿命の5年を2年経過している（2030年を越えて稼働する可能性もある）

対策 5 : 次期ミッション等の動向を探りつつ、新システムの開発等の対策を考える

(4) 今後の開発・運用・人材育成体制

● 問題…開発・運用の主体が大学では、安定的運用や継続性の保証はない。一方で、当該分野の人材育成のためには、大学が継続的に関与することが必要である。

対策 6 : 将来的には、国研等に当該分野を担当する部署を設置することが望まれる。ただし、その際も大学との連携による研究体制の構築が求められる。

(5) リアルタイム衛星多項目観測システム—運用時のイメージ

各種衛星画像のインテグレーションとリアルタイム処理により、現地調査の代替となり得るような、観測・解析システムを実現

リアルタイム衛星多項目観測システム

高頻度 リアルタイム観測

ひまわり (頻度: 2.5分毎)

熱異常

しきさい

熱異常

TROPOMI

SO₂ 放出率

常時

高分解能 準リアルタイム観測

高分解能画像(SAR/可視/赤外画像)

ALOS-2/4, SPOT, WV, Landsat, Sentinel-2

小型SAR衛星

地形、表面状態

(必要に応じ ドローン観測)

緊急時

衛星
観測

他の観測

地上観測・観察データ

干渉SAR 地殻変動

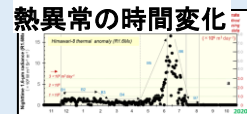
噴煙高度

変色海域

異常検出

解析

リアルタイム解析



常時

噴火前兆の検出

噴火の検出

異常検出

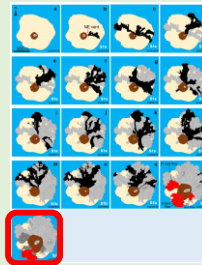
SO₂放出率の時間変化

画像

熱異常の分布
噴煙発生状況

高い時間分解能で活動変化を把握

準リアルタイム解析



緊急時

即時地質判読

・火口の位置
・噴出物の分布

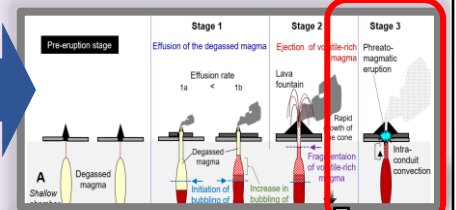
・噴出率の変化

過去数十年
DB

高い空間分解能で具体的な噴火状を把握

準リアルタイム衛星多項目解析

噴火推移の
即時・継続的把握



予測

現在

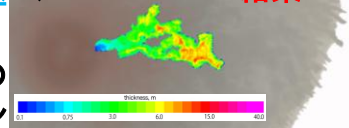
JVDN/WWW
観測データ・解析結果
の即時共有

JVDN・WWW

噴火場所
噴出率

結果

溶岩流・火砕流の
リアルタイムシミュレーション



「国際的な連携は不可欠」—衛星観測は海外展開が容易—
・国内と海外の類似火山・噴火の比較研究
・衛星観測を核（先鋒）とした海外との共同研究・防災連携等の推進

今後10年間の火山観測において重要性を増すであろう衛星リモートセンシング技術の活用について、「総合基本施策の中間取りまとめ」に示された方針に沿って、熱、火山ガス、噴出物の観測を中心に整理し、展望を示した。

- 火山活動評価のための数十年単位の火山活動の状態の把握として、分解能と観測頻度が異なる「ひまわり」、「しきさい」、高分解能画像（ASTER、ランドサット等）を組み合わせることで、熱的状态に基づいて活動パターンの違いや活動の前兆的現象を調べることができる。このような手法により、各火山の個性を予め把握することは、リアルタイム観測データを解釈する上で重要な基礎情報となる。今後、多数例の調査を行い、系統的な整理・検討（噴火状況や地上観測データとの比較を含む）を進め、データベース化を図る必要がある。
- 衛星データにより噴火現象の検知・自動解析に基づき、噴火の時刻、場所、規模、様式の即時把握を行う場合、各種衛星画像の特性を考慮した上で、適切な手法を用いて処理する必要がある。噴火発生の検知には、観測頻度の高いひまわりのデータが有効である。噴火の発生場所や噴出物分布の即時・継続的な把握には、噴煙や雲の影響を受けないSAR画像の利用が適している。他方で、しきさいは、頻度が高く、SAR画像では検知し難い地形変化の乏しい活動の検出に有効である。噴出率の即時・継続的な推定には、ひまわりの熱異常による方法、SAR画像による簡易的な方法が向いている。ひまわりによる方法はリアルタイム性が高く、緊急時にシミュレーションの入力値を迅速に決定する際にも利用できる。（ただし、高粘性溶岩への適用については、今後検討を進める必要がある）。
- 噴火状況や火山ハザードを把握するには、異なる性質をもつ複数の画像を効果的に組合わせた解析、すなわち衛星多項目観測が有効と考えられる。さらに、火山ハザードを即時・継続的に観測し、災害軽減に利用するためには、この衛星多項目観測のリアルタイム性を高め、関連するシステムを一体として運用することが重要となる。
- 衛星観測技術の進歩は著しい。この新しい技術を効果的に取り入れることで、衛星多項目観測のリアルタイム化の推進を図る。鍵となる高分解能画像のリアルタイム性向上のためには、観測頻度が高く地表面の描写能力の高い小型SAR衛星の活用が重要である。さらに、このような高分解能画像の即時地質判読には、AI等を利用した自動判読システムの開発や関連処理の自動化が必要となる。ひまわりについては、観測頻度2.5分の画像データを利用したシステムを開発し、噴火発生等の検知能力とリアルタイム性の向上を図るべきである。この開発については、2030年に運用が予定されているひまわり10号に向けたシステム開発と併せて進めることが合理的である。火山の活動評価において、SO₂放出率は最重要項目の1つである。このため、TROPOMI等の紫外センサーのデータを利用したSO₂の準リアルタイム観測システムを開発し、衛星多項目観測に含めて運用することが重要である。
- 開発・運用については、その主体が大学である場合、安定的な運用や継続性が必ずしも保証されるとは限らない。一方で、当該分野の人材育成の観点からは、大学が継続的に関与することが重要である。このようなことから、将来的には、国研等に当該分野を担当する部署を設置することが望ましい。しかし、その際も大学との連携による研究体制の構築が求められる。
- 中間取りまとめにおいて、「火山現象は発生頻度が低く、海外の火山の噴火事例を活用するなどの国際的な連携が不可欠」と記されている。衛星は地球規模で火山を観測している。このため、国内と海外の類似火山や噴火の比較研究、あるいは衛星観測を核（先鋒）とした国際的な共同研究や防災連携といった、海外火山を対象とするプロジェクトを比較的容易に立ち上げることができる。衛星リモートセンシングのメリットを生かし、海外火山研究への取り組みを推進すべきである。