

リモートセンシング画像と GPS を活用したタイ南部の津波被害調査

山崎文雄¹⁾，松岡昌志²⁾

1)正会員 千葉大学 工学部 都市環境システム学科，教授

2)正会員 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター，チームリーダー

1 はじめに

2004年12月26日00:58(UTC)にスマトラ島沖を震源とするマグニチュード $M_w=9.0$ の地震が発生し、インド洋の広範な地域において、史上最大といえる津波災害を引き起こした。アンダマン海に面したタイ南部では、地震発生から約2時間後に高さ10m を越える津波が押し寄せ、パンガー県、プーケット県、クラビ県などのリゾート地や漁村が甚大な被害を被った。タイ政府が3月9日時点で確認した人的被害は、死者5,395人、行方不明2,932人である。確認された死者の内訳はタイ人が1,926人、外国人が1,953人、身元不明が1,516人であり、クリスマスから年末の休暇を過ごしに来た外国人が多数犠牲になったのが、この災害のタイにおける大きな特色である。

津波災害の状況が明らかになるにつれ、国際的な枠組みでの調査が必要との認識で、筆者らは以前より災害リモートセンシングに関して、合同調査(Eguchi et al., 2000)や国際ワークショップを行ってきた米国多領域地震工学センター(MCEER)の研究者達と連絡を取るとともに、タイの地震工学研究者に合同調査を呼びかけた。その結果、日本から筆者2人、米国からは MCEER の費用で ImageCat 社の Shubharoop Ghosh 博士が、タイからはアジア工科大学院(AIT)の Pennung Warnitchai 助教授、タイ空間情報リモートセンシング局(GISTDA)の Supapis さんと Siam さんが参加、これに GISTDA に JICA シニアボランティアとして派遣されている本澤雅彦博士が加わった日米タイ3カ国の合同調査チームとなった(図1(a))。

本調査の大きな目的は、人工衛星画像から被災地域を判読するための、現地確認(グラウンド・トゥールズ)データを収集することである。このために調査においては、複数の解像度の人工衛星画像を地図として利用するとともに、GPS と連動したデジタルカメラとデジタルビデオを持参し(図1(b))、位置付きの写真や動画を取得した。調査は、1月7日にバンコクで打ち合わせとデータ収集を行ったあと、8日から11日までの丸4日間、カオラック、プーケット島、ピピ島などの被災地域を調査した。以下に、人工衛星画像との対応をとりながら、この現地調査の結果について報告する。なお英文の速報は、すでに MCEER の Web ページに掲載されている(Ghosh et al., 2005)。



(a) 現地調査チームメンバー



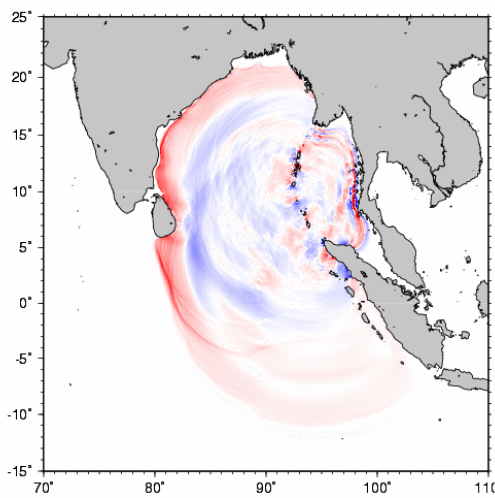
(b) ビデオによるパノラマ VIEWS 撮影の様子

図1 現地調査チームと調査風景

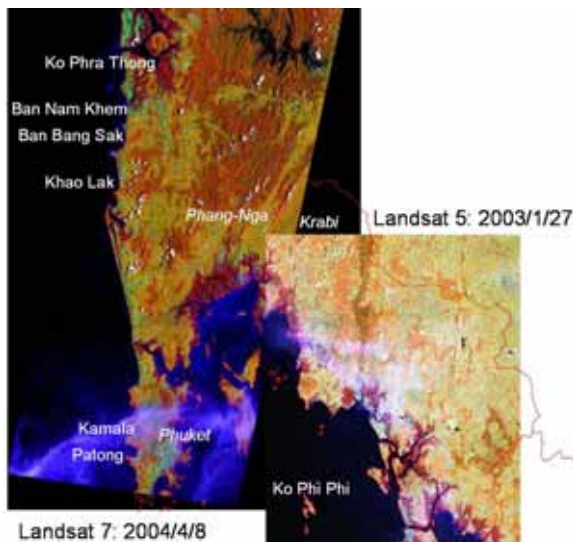
2 調査地域と調査概要

本調査チームによるタイ南部の現地調査地域の広域衛星画像と GPS 連動写真の撮影位置を図2に示す。調査初日の1月7日には、パンガー(Phang-Nga)県のカオラック(Khao Lak)周辺を車で回り調査した。翌日はプーケット島から高速船をチャーターしてクラビ(Krabi)県のピピ島(Ko Phi Phi Don)と Ko Khai Nai および Ko Khai Nok という小島を調査した。3日目は再びパンガー県に向かい、初日に行くことのできなかった中部の Ban Nam Khen や Ban Bang Sak などの地区を見るとともに、津波で壊滅した北部の Ko Phra Thong の漁村に小舟で渡り調査した。4日目はプーケット島内の Kamala, Patong, Karon, Kata などの西岸のビーチを調査した。

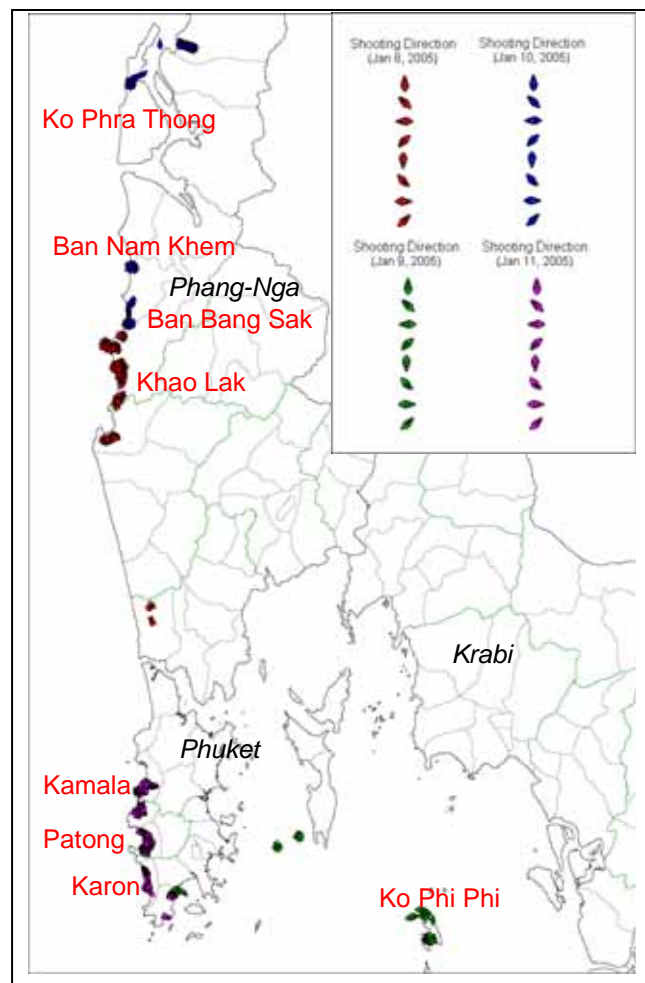
タイ南部の津波の遡上高さに関しては、科学研究費補助金による調査(松富, 2005)によれば、平均的にはカオラックで6-10m, プーケット島西岸で3-6m, ピピ島の波源側に開いた湾で6m 程度と報告されている。本調査チームも津波遡上高さの測定を当初考えていたが、水準測量機器を持たなかったため、遡上や滞留の痕跡を位置つき写真に記録するにとどめ、広域の被災状況を衛星画像と対応しながら、地上からの動画と静止画に残すことに専念した。なお、山崎は2月中旬に、松岡は3月中旬に再びプーケット島とカオラックを訪れ、追加調査を行っている。



(a) 120分後の津波到達位置
(<http://staff.aist.go.jp/kenji.satake/animation.gif>)



(b) タイ南部の Landsat 画像と津波被災地域



(c) GPS 連動カメラの撮影位置と方向

図2 タイ南部の現地調査地域の広域衛星画像と GPS 連動写真の撮影位置

3 パンガー県北部・中部

パンガー県の北部は、中部や南部と異なり、漁村や農村が点在する地域である。図3はパンガー県北部から中部にかけての ASTER 衛星画像と津波被災状況を示している。ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)は、可視領域から熱赤外領域までに14バンドを有する日本の高性能光学センサーで、米国の TERRA 衛星に搭載されている。その解像度は、Bands 1～3 (0.52 - 0.86 μ m)の可視・近赤外領域が15m、Bands 4～9 (1.60 - 2.43 μ m)の短波長赤外領域が30m、Bands 10～14 (8.125 - 11.65 μ m)の熱赤外領域が90m である。図3(a)は ERSDAC のホームページ(http://www.ersdac.or.jp/todayData/EDS/00.1/pict_j.html)に掲載された津波から6日後のフォールスカラー画像である。赤く見えるのが植生の濃い地域であり、津波に襲われた沿岸域は、津波前のものに比べて赤い領域が大幅に後退している。

図3(b),(c)に示す Ban Nam Khen は、津波が港や集落を襲い、多数の住民の死者が出たところである。

図3(d),(e)に示すパンガー県の中部の Ban Bang Sak では、津波が海から約300m 離れた幹線道路を越えた丘まで遡上している。ここでは、遡上の限界が植物の状態や、津波により運ばれた浮遊物により明瞭に識別することができた。図3(f)は図3(g)に示す Princess Resort の海岸である。調査時点ではまだ瓦礫の撤去が行われておらず、津波直後の状況が残っていた。Princess Resort の一帯はホテルの2階屋根にまで津波襲撃の痕跡が残っており、最も大きな被害を受けた場所の1つである。



図3 パンガー県北部・中部の ASTER 衛星画像と津波被災状況。(a) ASTER 画像 (2004/12/31), (b) Ban Nam Khen の港, (c) Ban Nam Khen の村, (d) 破壊された建設中のホテル, (e) 津波の遡上限界。黄色い線で示している, (f) 瓦礫で埋まる海岸, (g) Princess Resort.

4 パンガー県カオラック

パンガー県中部のカオラックはタイ南部有数の高級リゾート地であり、とくにヨーロッパからの観光客が多い地域である。図4にカオラック周辺の IKONOS 衛星画像(2004/12/29)と被災状況を示す。IKONOS は1999年に打ち上げられた世界最初の商業用高解像度衛星で、可視領域(B,G,R)と近赤外(NIR)の4つのバンドが解像度4m、パンクロマティック・バンドが解像度1m である。これらをパンシャープンという方法で組み合わせると、この図に示すような解像度1m のカラー画像を作ることができる。シンガポール大学の CRISP (<http://www.crisp.nus.edu.sg/tsunami/tsunami.html>) やドイツ航空宇宙センター DLR (http://www.zki.caf.dlr.de/applications/2004/indian_ocean/indian_ocean_2004_en.html) などのホームページから、カオラック周辺の詳細な IKONOS 画像が公開されている。

図4(a)は Phakarang 岬周辺の IKONOS 画像であり、(b)に示す岬の先端部の Bamboo Orchid Resort は2方向からの津波に襲われ壊滅した。岬の先端の津波高さは局所的に15m にも上ると報告されている(http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/thailand/phuket_survey.html)。 (c)は屋根に打ち上げられた乗用車であるが IKONOS 画像を拡大すると、この車と思われる黒い数ピクセルを確認することができる。

(d)は Khao Lak 中部の気象局周辺である。(e)津波で流された橋や、(f) 破壊されたコテージなど、津波の破壊力を示す被害の跡が一面に広がっている。

(g)は Khao Lak 南部の Nang Thong beach 周辺である。(h) & (i) に示す Similana Resort やその北部の一帯のリゾートや商業施設は、1階の屋根までの高さの津波に襲われ、壊滅的な被害を受けている。



図4 パンガー県カオラック周辺の IKONOS 衛星画像(2004/12/29)と被災状況。青い点は位置つき写真の撮影位置、☆は図に示す写真撮影位置である。(a) Phakarang 岬、(b) 壊滅した Bamboo Orchid Resort、(c) 屋根に打ち上げられた車、(d) Khao Lak 中部の気象局周辺、(e) 津波で流された橋、(f) 破壊されたコテージ、(g) Khao Lak 南部の Nang Thong beach 周辺、(h) & (i) 津波で壊滅的な被害を受けた Similana Resort。

5 プーケット島

プーケット島では、地震発生の約2時間後にところにより5m を越える津波が、海岸線のビーチを次々に襲った。この津波襲来の様子は、観光客が撮影した幾つかのビデオ映像により、鮮明に記録されている。

プーケット島の津波高さは、西岸中部の Kamala ビーチと Patong ビーチで最も高く平均5m 前後、西岸南部の Karon ビーチや西岸北部の Bang Thao ビーチなどで平均4m 前後と報告されている。

図5は プーケット島の Kamala ビーチと Patong ビーチ周辺の Landsat 衛星画像(2004/12/3)と被災状況を示している。(b),(d),(f)は Kamala ビーチの住民が、津波襲来時に鉄筋コンクリート建物の3階から撮影した写真であり、津波が来襲し家の屋根まで覆うようになるところまでが、数枚の写真で写されている。これらの写真は、1月の調査でこの住民から本調査団に提供された。

(c),(e),(g)は2005/2/20に再度、この場所を訪問したときに、この建物の中に入れてもらい、ほぼ同じと思われる場所から撮影した写真である。津波前後の写真を比較すると、津波で流されて海側の家がなくなっていることが分かる。一方、山側の住宅は、鉄筋コンクリート造であるとともに、この3階建て建物の後にあるため津波の流速が小さくなったと思われ、軒近くまで浸水した割にはそのまま使用されていた。

プーケット島で一番の賑わいのある Patong ビーチは、海岸沿いの通りは大きな被害を受けていたが、山側へ行くと徐々に高度が高くなり、海から200m ほど内陸に入ると、浸水はしたが被害は殆ど受けていない。

プーケット島は雲がないことが少ないせいか、質の良い高解像度衛星画像は少ない。パングロマティックバンドで0.6m と解像度が最も高い QuickBird 衛星は、2005/1/2に Patong ビーチを含む地域を撮影したが、画質はあまり良好ではなかった。2005/1/5には再度撮影が行われ、Patong, Karon, Kata Yai のビーチを含む地域がほぼ雲がなく撮影された。また、事前画像としては、2002/3/23に Patong と Karon を含む質の良い画像が得られている。筆者らの日米チームではこれらの画像を共同購入したので、今後、これらの画像の比較解析により、津波浸水域の検証を行いたいと考えている。

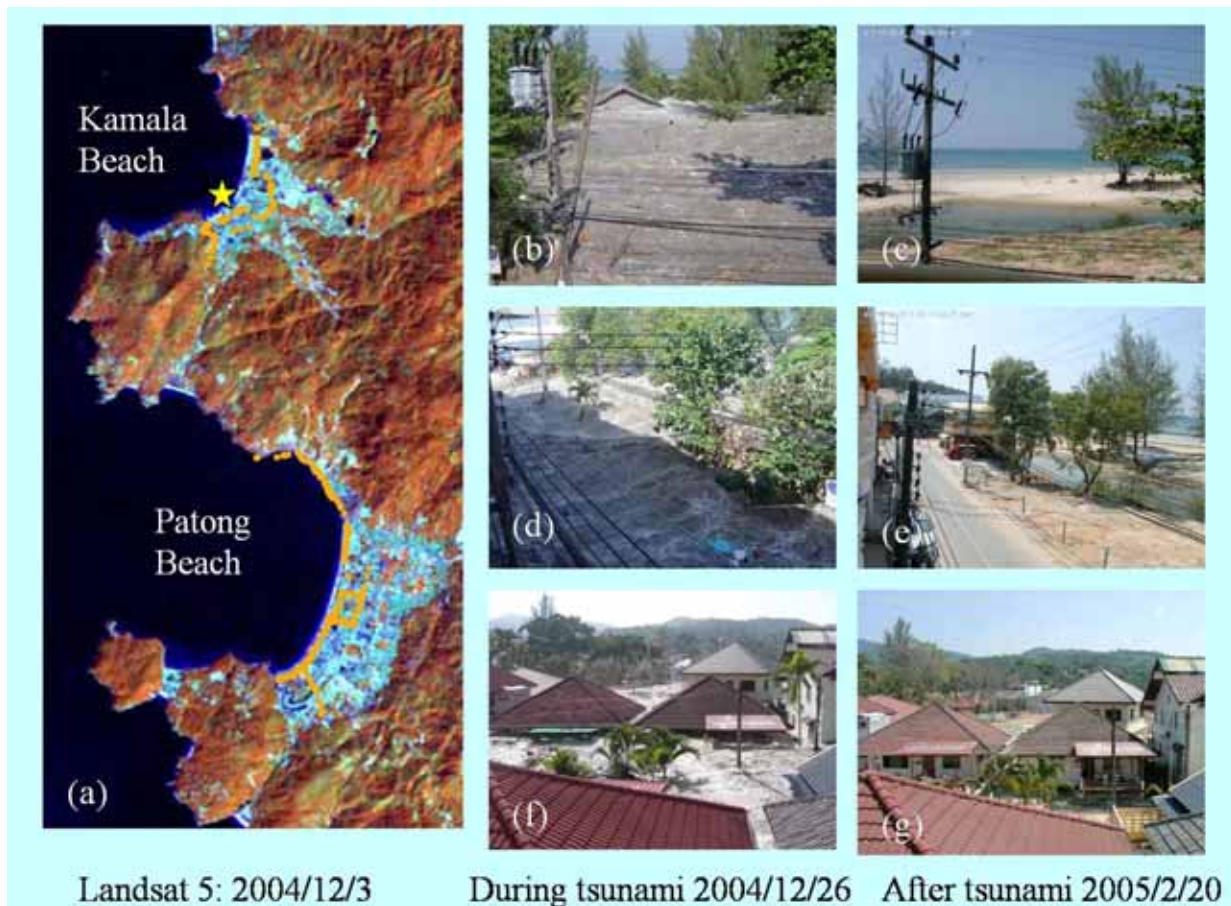


図5 プーケット島の Kamala Beach と Patong Beach 周辺の Landsat 衛星画像(2004/12/3)と被災状況。(b),(d),(f)は Kamala Beach の住民が津波襲来時に鉄筋コンクリート建物の3階から撮影した写真である。(c),(e),(g)は2005/2/20に同じ場所から撮影したもの。

6 ピピ島

クラビ県のピピ島(Ko Phi Phi Don)はアンダマン海に浮かぶリゾートの島である。津波の波源域から見て、丁度、プーケット島の影を外れる位置にあるため、最高で6m 程度の津波に襲われた。図6 ピピ島周辺のLandsat 衛星画像(2003/1/27)と被災状況写真を示す。ピピ島の中心である Ton Sai 地区は、南北2つの山岳島の間を砂州が結ぶような位置に広がっている。標高2-3m 程度の南北の幅が約150m の平地であるため、津波に襲われたら逃げ場がない。津波は最初に北の湾から襲ってきて、その後、より高い津波が南の湾から Ton Sai 地区を襲った。この地区では鉄筋コンクリートのホテルが数棟残ったのみで、他の建物は木造の平屋ないし2階建てであるため、津波により大破している。中心にある Cabana ホテルの3階からは、観光客により津波襲来の様子がビデオで撮影されており、1階の天井まで津波が浸水していることが分かる。

(b) & (c)は島北部の Laem Tong 地区の様子である。この地区も建物の床上まで浸水し、木造のバンガローなどは大破しているが、被害は Ton Sai 地区に比べると小さい。

(d) から (g)は、Ton Sai 地区の写真である。ピピ島はほぼ壊滅的な被害を受けたため、入島が規制されていたが、津波から10日経った頃にやっと入れるようになった。災害対策本部が調査時点で集計した犠牲者は、この島だけで死者691人、行方不明者951人と極めて大きな数字であった。

ピピ島を調査した後、Ko Khai Nai および Ko Khai Nok という夜は無人となる小島を調査した。これらの島は、津波の波源域から見てプーケット島の影に入るように位置するため、津波の影響をあまり受けなかった。調査時点においても、既に欧米からのリゾート客が多数、ビーチで日光浴をしていた。



図6 ピピ島周辺の Landsat 衛星画像(2003/1/27)と被災状況。(a) Ko Phi Phi Don の調査地点と写真撮影位置、(b) & (c) Laem Tong 地区の様子。木造建物は壊れている、(d) 南から見た Ton Sai Bay、(e) 瓦礫の野焼きの様子、(f)津波による瓦礫で埋まる Ton Sai 地区の繁華街、(g) 商店の壁に残る津波による湛水を示す水位跡。

7 GPS と連動したビデオ映像：パノラマ VIEWS

ImageCat 社では、MCEER の研究プロジェクトとして VIEWS (Visualizing the Impacts of Earthquakes With Satellites)と名付けられた衛星画像に基づく災害把握システムの開発を行っている。これは図7に示すように、衛星画像を緯度・経度のついたベースマップとして PC 上に登録し、現地調査で移動しながらビデオを撮影する際には、その位置を GPS で取得する。このように取得されたビデオを衛星画像上で位置をリンクすることにより、VRS (virtual reconnaissance systems)として可視化することができる(Ghosh et al., 2005)。これまでに、2003年イラン Bam 地震(Adams et al., 2004)をはじめとして、2004年のハリケーン Charley と Ivan, それに2004年新潟県中越地震などの被害調査でこのシステムが使われてきた。

今回の調査では、米国側の持ち込んだビデオに加え、筆者らもそれぞれビデオカメラを持参したので、図1(b)に示すように、3台のビデオカメラにより同時に前方と左右方向を撮影した。この新しい広角の VIEWS を Panorama-VIEWS と名づけた。図7の3つビデオ画面が示すように、Panorama-VIEWS ではより広い視野での可視化が可能になった。車からの撮影の場合には、助手席と後部座席の左右に1台ずつの計3台のビデオにより、ビデオ取得を行った。災害現場の生々しい様子は、災害発生から時間が経つと失われていく。今後の教訓として災害の記録を残すためにも、また衛星画像などの現地確認データとしても、このような位置つきの映像は貴重なデータベースとなることが期待される。

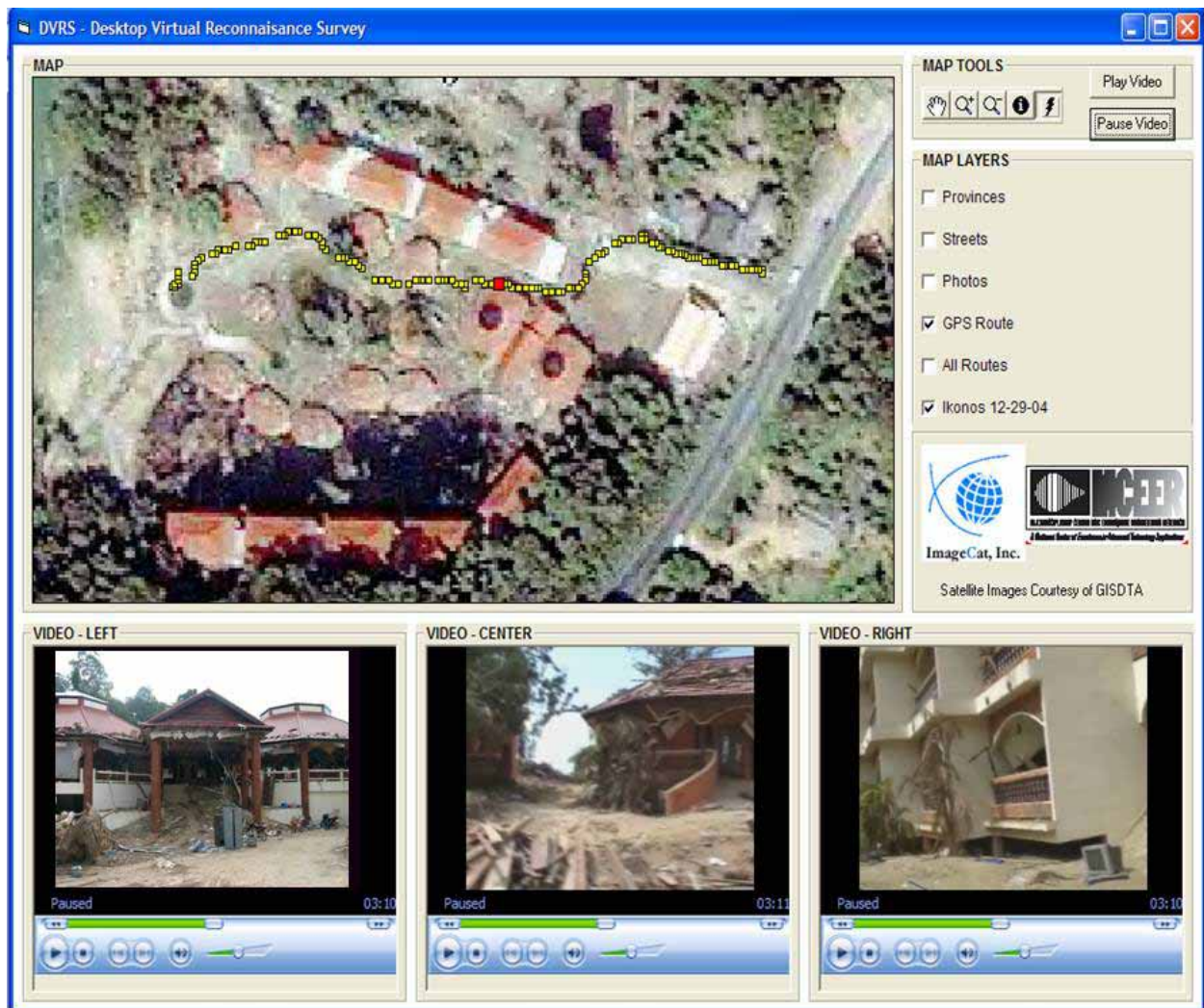


図7 IKONOS 衛星画像(2004/12/29)に重ねたビデオ撮影時の GPS 位置と3台のビデオによる動画の同時スナップショット。今回の調査ではこのように3台のビデオで同時に広角撮影を行い、パノラマ VIEWS と名づけた位置つきの動画データベースを構築した(Ghosh et al., 2005)。

8 津波被災地域の地表物質の分光反射特性

人工衛星の光学センサは、Landsat や ASTER などの中解像度のものも、IKONOS や QuickBird などの高解像度のものも、いずれも可視領域と近赤外領域の波長帯のセンサを有している。図8には、分光放射計を用いてプーケット島 Kata ビーチで2005/2/20に観測した植物の分光反射率を、QuickBird の4つのセンサの波長帯域と比較して示している。写真に示す緑色の芝生は津波後に植えられた新しいもので、可視赤色(R)から近赤外(NIR)の間で急激に反射率が上がるという植生の特徴をよく表している。一方、津波を被り黄色く変色した植物はこの特徴が弱まり、枯れた芝生はまったくこの特徴が失われている。このような観測データから見ても、津波を被った地域の植物は、分光反射特性が変わった可能性が高く、今後、人工衛星データによる浸水域の判定に利用できるものと思われる。

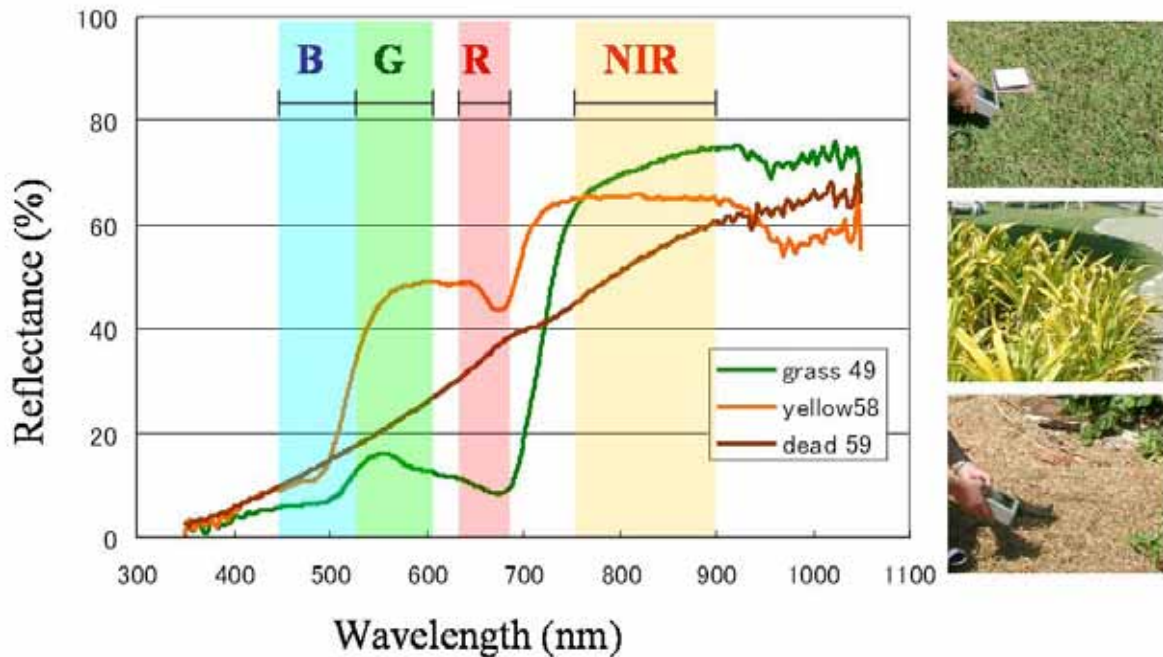


図8 プーケット島 Kata ビーチで観測した植物の分光反射率。緑色の芝生は津波後に植えられたもの、黄色い植物は津波を被り変色したもの、枯れた芝生は津波を被って枯れたもの。

8 おわりに

タイおよび米国の研究者と合同で、2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震・津波によるタイ南部の被害状況の現地調査を行った。とくに高解像度および中解像度の人工衛星画像をベースマップとして、カオラック、プーケット島、ピビ島などの被災地域について、GPS と連動したデジタル写真やデジタルビデオの撮影を行った。また3つのビデオ映像を用いたパノラマ VIEWS システムを開発した。さらに、津波浸水域の人工衛星データによる推定のための確認用データとして、分光放射計による植生等の分光反射率の観測も行った。今後、タイ・米国の研究者と協力して、広域の津波被害マップ構築を進めていきたいと考えている。

参考文献

- Adams, B.J., Huyck, C.K., Mansouri, B.: Streamlining Post-Earthquake Data Collection and Damage Assessment in Bam, Using VIEWS (Visualizing the Impacts of Earthquakes with Satellite Images), MCEER Earthquake Reconnaissance Investigation, 2004. <http://mceer.buffalo.edu/research/bam/page1.asp>
- Eguchi, R.T., Huyck, C.K., Houshmand, B., Mansouri, B., Shinozuka, M., Yamazaki, F., Matsuoka, M.: The Marmara Earthquake: A View from Space, The Marmara, Turkey Earthquake of August 17, 1999: Reconnaissance Report, Technical Report MCEER-00-0001, 2000.3, pp. 151-169
- Ghosh, S., Huyck, C.K., Adams, B.J., Eguchi, R.T., Yamazaki, F., Matsuoka, M.: Preliminary Field Report: Post-Tsunami Urban Damage Survey in Thailand, Using the VIEWS Reconnaissance System, 2005.1, <http://mceer.buffalo.edu/>
- 松富英夫：タイの Khao Lak と Phuket 島における2004年北スマトラ島沖地震津波の速報，土木学会誌，90巻，3号，2005.3，pp. 48-50.