

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 1 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300304

研究課題名(和文)衛星SARを用いた多地域対応型遺跡探査技術に関する研究

研究課題名(英文)A study on universally applicable archaeological site exploration technology using space-borne SAR

研究代表者

恵多谷 雅弘 (Etaya, Masahiro)

東海大学・情報技術センター・主任技師

研究者番号：60398758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,900,000円

研究成果の概要(和文)：地中透過性をもつことからエジプトの砂漠領域の遺跡探査で有効性が実証されている衛星搭載合成開口レーダ(SAR)の観測データを砂漠以外の地域に応用した結果、ALOS/PALSARとLandsat 7号/ETM+の画像特徴量から特定したナイルデルタの遺跡の有望地点においてヘレニズム時代のテル状遺跡の発見に成功した。さらに、同技術を世界各地の様々な遺跡に応用するために中国関中平原に分布する遺跡群を対象にグランド・トゥールースと衛星SARの有効性評価を行った結果、古代エジプトと古代中国の遺跡分布や立地環境に多くの共通点が見出され、そのうち秦～唐代の大型墳丘墓はL-bandのSARで識別可能であった。

研究成果の概要(英文)：It is proved that space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) can be a powerful tool to detect subsurface archaeological site in the desert of Egypt. Space-borne SAR was newly applied to detect undiscovered archaeological site distributing over the area except the desert. As a result of the image analysis using ALOS/PALSAR and Landsat7/ETM+, a trace of undiscovered Hellenistic archaeological site named Site No.52 was found in the Nile delta. Additionally, Grand Truth and usefulness evaluation of space-borne SAR were carried out in Egypt and China as an experiment to apply the same method to various places of the world except the desert. The results show that there are many common points in distribution and location environment of archaeological site between the both countries and L band space-borne SAR makes possible a highly efficient archaeological survey for the large mound tombs of Chinese emperors during the Qin to Tang dynasties.

研究分野：文化財科学

キーワード：衛星 SAR 遺跡探査

1. 研究開始当初の背景

近年、衛星搭載センサの高性能化が進んだことによって、砂漠や密林の下に埋もれた古代遺跡や古環境の調査・研究に衛星データが活用されるようになってきた。研究代表者らはピラミッドなどの古代遺跡が分布するエジプト・ナイル川流域を対象に衛星データの考古学的応用研究を 1990 年代から推進しており、これまでの研究成果として特に L バンド HH 偏波の衛星搭載 SAR (Synthetic Aperture Radar) が砂漠下に埋もれた未発見遺跡の探査に極めて有効であることを実証してきた。一方、本研究の新たな課題として同手法の砂漠以外の地域における有効性の検証がある。L バンド SAR は極めて乾燥した砂漠で地中透過性をもつことからエジプトの砂漠を対象とした遺跡調査には有効であるが、遺跡の立地環境や形状が異なる他の地域での有効性はまだ実証されていない。

そうしたなか、ナイルデルタにおける最新の調査で、我が国の衛星 ALOS (だいち) に搭載された L バンド SAR (フェーズドアレイ方式合成開口レーダ: PALSAR) が砂漠以外に存在する遺跡の検出も可能であることが分かってきた。検出可能と考えられているのは、地表の大部分をシルト製土器片や赤褐色の煉瓦片が覆うナイルデルタのテル状遺跡群である。土器片、煉瓦片等の遺物が地表に散乱する遺跡形態は、エジプトに限らず、世界各地で普遍的に観察される未発見あるいは未調査遺跡の典型的な残存パターンの一つであることから、本研究によってそれらの遺跡検出における衛星 SAR の有効性を実証していくことで、広域を対象とした考古学調査での大幅な効率化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、地中透過性を有することから未発見遺跡の検出に大きな期待がある SAR の観測データを用いて、世界各地の考古学調査に有効な効率的かつ汎用性の高い遺跡探査手法を開発することを目的とする。研究の最重要課題は、エジプト学史上初となる地中遺跡発見に成功した手法を、条件が異なる他の地域の調査でも有用な多地域対応型の遺跡探査技術に改良するための方法論の検討とそれによる技術的体系の確立である。

3. 研究の方法

本研究では、エジプト・メンフィスネクロポリスにおいて砂漠地帯に埋もれた未発見遺跡検出に成功した JERS-1 (ふよう 1 号)、SIR-C (Shuttle Imaging Radar Mission-C) などの L バンド衛星 SAR データを、条件が異なる世界の様々な地域の考古学調査で応用可能な技術とするため、3 年間の計画で以下の 2 項目を実施した。

(1) ナイルデルタをテストサイトとして、L バンド衛星 SAR データ、高分解能衛星画像、考

古学情報 (特に古代における都市の空間構造や自然環境)、地形データ、地質データ等の多次元情報を用い、砂漠以外の地域に存在する古代エジプト遺跡の衛星データ特徴量および立地環境理解を通して、それらの探査に有効な衛星 SAR の応用手法の開発を行った。

(2) メンフィスネクロポリス、ナイルデルタ、ルクソールに分布する古代エジプト遺跡 (テストサイト 1) および関中平原に分布する秦～唐代の古代中国遺跡 (テストサイト 2) を対象に、リモートセンシング、エジプト考古学、中国史、中国考古学、地質学などの専門家で構成される分野横断型の調査チームが合同調査を実施しながら両サイトに分布する様々な遺跡の実態、共通点、相違点を多角的に検証した。

(3) 砂漠領域に分布する古代エジプト遺跡の探査で有効性が実証されている衛星 SAR を古代中国遺跡の探査に応用するための可能性を検討・評価した。

4. 研究成果

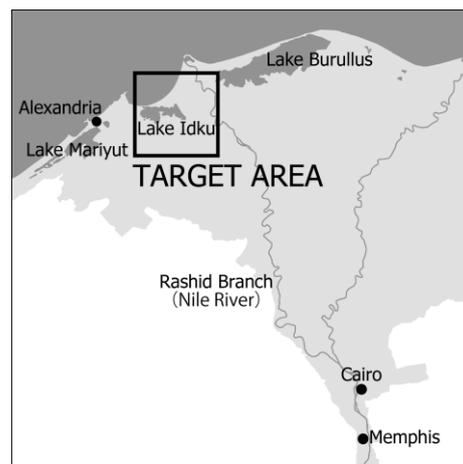


図 1. 調査対象地域

(1) ナイルデルタのラシッド支流沿岸とその西方地域 (図 1) には、ナイル川の氾濫が及ばないマウンド (アラビア語でテル) 上におおむね神殿を中心とした煉瓦遺構、土器片、墳墓群、草地などで構成されるヘレニズム時代遺跡が多数存在しているが、そうしたテル状遺跡の分布を ALOS/PALSAR が特徴的に捉えていることが分かってきた。そこで対象地域観測した 2 シーンの PALSAR 画像 (2007 年 8 月 17 日及び同年 9 月 3 日撮影、HH 偏波: 図 2) からテル状遺跡の後方散乱係数を計測すると $-20\text{dB} \sim -22\text{dB}$ の低い値であり、 -4dB から -14dB 前後の値を示す周囲の農地や集落などとは明確な差異が認められた。その一方で、テル状遺跡の後方散乱特性は、水域 (河川、湖沼、養魚場等) の特性と区別しにくく、未知のテル状遺跡の存在を PALSAR 画像単独で同定するのは困難と予測された。

以上の理由から、本研究では PALSAR 画像に

Landsat7号ETM+画像(2002年6月17日撮影: 図3)の分光輝度情報を新たに組み合わせた多チャンネル画像を作成し、最尤法による分類処理を行うことで、既知のテル状遺跡と同等の特徴量を有する未知遺跡の有望地点を抽出した。その結果、未知遺跡の有望地点はAl-Zaghaiba村を中心としたイドゥク湖南岸に集中していることが確認された(図4)。

一方、イドゥク湖南岸は、CORONA、QuickBirdなどの多時期光学センサ画像の比較判読によると、北西方向に伸びる半島状の丘陵地がかつて形成されていた場所であり、ナイル川の氾濫が及ばないテル状遺跡の立地条件を満たしていた。しかしながら、そうした丘陵地はこの45年間の土地開発によって殆どが削平され、現在は農耕地、果樹園、養魚場などへと大きく変貌している事も判明した。そこで、さらにWorldView-2の最新の高分解能光学センサ画像を入手し、未知遺跡の有望地点を対象にCORONA画像、QuickBird画像との比較判読を再度実施することで、新たな遺跡発見が期待できる未開発の丘陵地の有無を確認することにした。

以上の結果、イドゥク湖南岸のKom al-Diba'a遺跡近傍の遺跡空白領域に位置する果樹園内で、今現在も残存する黄色砂と草地の土地被覆から成る遺丘Site No. 52の存在が新たに確認された。海拔約6mの小丘上には構築物の痕跡とも考えられる直線構造がWorldView-2画像で判読されたことからグラ

ンド・トゥルス(Ground Truth=衛星データの地上検証調査:以下GTと呼ぶ)を実施した結果、これまで報告されていないヘレニズム時代のものと推定されるテル状遺跡の存在が発見された。そこには煉瓦構築物などの上部構造は残っていないが、考古学的な地表観察でヘレニズム時代の重要遺構の存在を示唆する方形状の地表痕跡が確認されている(図5)。ナイルデルタを対象に、未報告のテル状遺跡の存在を衛星データによって発見したのは本例がエジプト学史上初めてとなる。

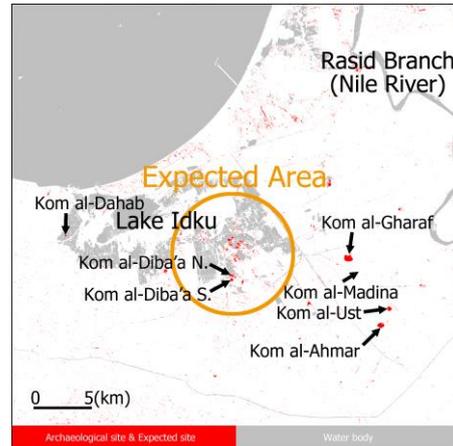


図4. 遺跡の有望地点: ■ (赤い領域)



図5. Site No. 52で発見した遺構の痕跡

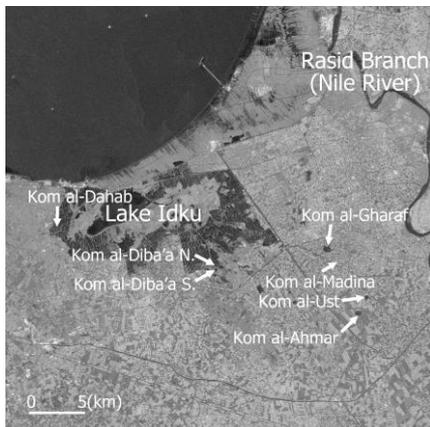


図2. ALOS/PALSAR (HH偏波) 画像

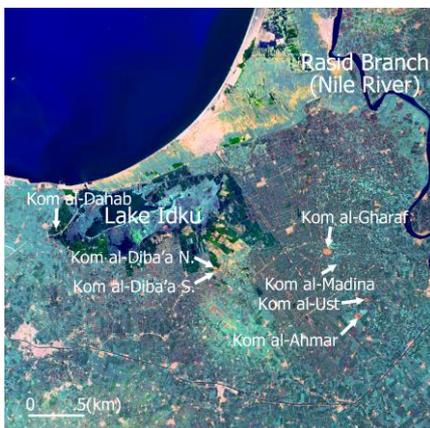


図3. Landsat7号ETM+画像

(2)メンフィスネクロポリスの砂漠領域を対象としたエジプト王朝時代遺跡の探査で既に有効性が確認されているLバンドSARデータを砂漠以外の地域での探査に応用するためには、世界の様々な遺跡の立地条件や特徴を理解し、それをSARの特徴量と関連付けていくことが不可欠である。本研究では、テストサイト1およびテストサイト2に分布するピラミッドや皇帝陵などの代表的遺建造物を中心に、衛星SAR(ALOS/PALSARまたはALOS-2/PALSAR-2)および高分解能衛星画像から選定した調査地点のGTを合計5回実施した。GTでは、まず両サイトの遺跡の現況、立地環境、形態的特徴、建造された時代的背景などを含めた比較検討と情報共有を調査チーム全員で行いながら、古代エジプト遺跡と古代中国遺跡の特に共通点に着目した検証と意見交換を行った。その中から、本研究

の主題である遺跡探査技術の開発に関わる主な項目を以下にまとめた。

①古代エジプトの墓葬形式の変化は、古代中国での変化に共通している。ピラミッドは秦漢王朝（前 221～後 220）の皇帝陵、王家の谷の地下墓葬は隋（581～618）唐王朝（618～907）の自然の山陵の皇帝陵に相当する。

②、ピラミッドの外形と秦漢皇帝陵の方錐台形は近似している（図 3）。マスタバ墓から階段ピラミッド、屈折ピラミッド、真正ピラミッドへの変容過程は、中国の無丘墓から墳丘墓（秦、楚、齊、魏、趙、燕など）の変容過程と比較することができる。



図 3. ピラミッドと漢陵の配置と外形

③ピラミッド複合体（葬祭神殿、参道、河岸施設）の構造は始皇帝陵陵园における寝殿・便殿内外城、陪葬坑、陪葬墓、司馬道などの構造に類似している。特に河川と墓葬の位置関係の比較は検証すべき重要課題である。

④ピラミッドを人工的に造られた墳丘と見なすならば、ナイルを挟んで西のピラミッドコンプレックスと東のメンフィスのような位置関係は、渭河を挟んで北の漢陵と南の漢の長安の関係性とも類似している（図 4、5）。

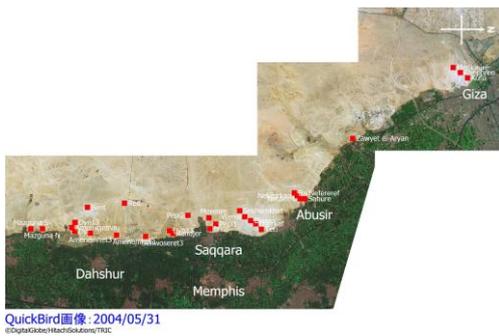


図 4. ピラミッドの分布 ■ (メンフィス)

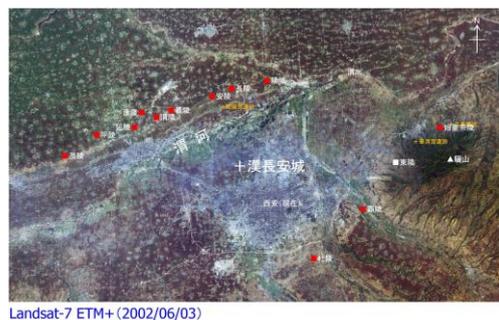


図 5. 漢陵の分布 ■ (関中平原)

⑤唐陵群は、関中平原の北辺の山並みを利用し、山陵—墓道（門闕・石像）—関中平原へ北から南へとつながるように配置された。このような盆地の縁の自然の高台を利用し墓を建設し、河を隔てて生者の世界と死者の世界を分ける構図は、ナイル川を挟んで東側のテーベ（ルクソール・カルナック神殿）、西側の王家の谷に見られる。



図 6. 唐光陵

⑥新王国時代テーベの墓地構造の中で、ナイル西岸に分布する諸王の葬祭殿へのアプローチとしてはナイルと繋がる運河が最も簡便な手段だったと考えられている。茂陵をはじめとする漢代陵墓群とそれに平行して流れる渭恵渠の位置関係は、そうしたテーベの遺跡空間との共通性を想起させる（図 7、8）。



図 7. ルクソール西岸の神殿と運河 (WorldView-2)



図 8. 漢陵と渭恵渠 (PALSAR-2)

⑦咸陽渭北地区の ALOS-2/PALSAR-2 (HH 偏波) 画像で渭水が屈曲している部分がいくつか確認できる（図 9）。この屈曲部分、すなわち渭水が滞留し、池を形成していた可能性のある場所と漢代陵墓や秦代咸陽宮の建設過程との関係を考える必要があり、特にナイル川と港の機能を持つピラミッドコンプレック

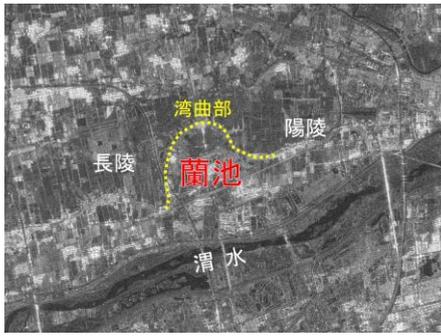


図 9. 蘭地の旧渭水の湾曲部 (PALSAR-2)

スのように、渭水→池(港湾機能)→漢代陵墓・秦代都市という構図もないだろうかという構想が考え得る。

⑧アレクサンドリアの海港はナイルデルタの支流の西にはずれた地に位置し、16世紀の古地図にはナイルの支流が城内を貫流している景観が描写されている。ファロス島は古代には参道(ヘプタスタディオン)で陸地とつながっていた。中国の類例として碣石、之罘、秦山島、連雲港などがある。

(3)砂漠以外の地域を対象とした遺跡探査における衛星 SAR の有効性について GT 実施地点ごとに3段階の検出難易度(A:可能、B:どちらとも言えない、C:困難)で評価すると以下ようになり、ナイルデルタのテル状遺跡(図10)や中国の大型墳丘墓がおおむね検出可能であるのに対して、自然の山を利用した唐陵のほとんどが検出困難であることが明らかになった。

①テストサイト1

Kom al-Gharaf	: A (PALSAR)
Kom al-Ust	: A (PALSAR)
Kom al-Ahmar	: A (PALSAR)
Kom al-Diba' a	: A (PALSAR)
Kom abu Mandur	: B (PALSAR)
Tanis	: A (PALSAR)
Heliopolis	: A (PALSAR)
Al-Fustat	: B (PALSAR)

②テストサイト2

始皇帝陵	: A (PALSAR-2)
咸陽宮	: C (PALSAR-2)
漢茂陵	: A (PALSAR-2)
漢平陵	: A (PALSAR-2)
漢延陵	: A (PALSAR-2)
漢康陵	: A (PALSAR-2)
漢渭陵	: A (PALSAR-2)
漢義陵	: A (PALSAR-2)
漢安陵	: A (PALSAR-2)
漢長陵	: A (PALSAR-2)
漢杜陵	: A (PALSAR-2)
漢霸陵	: C (PALSAR-2)
唐橋陵	: C (PALSAR-2)
唐景陵	: C (PALSAR-2)
唐光陵	: C (PALSAR-2)
唐乾陵	: B (PALSAR-2)
唐靖陵	: A (PALSAR-2)
唐建陵	: C (PALSAR-2)



図 10. Tanis (PALSAR)

※ () 内は使用した SAR データ

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4件)

- ① 惠多谷雅弘、"宇宙から遺跡を探查する=衛星リモートセンシングデータの考古学的応用="、光アライアンス Vol. 23No. 5, pp. 1-4、日本工業出版、2012年5月、査読無
- ② 惠多谷雅弘、"東海大学情報技術センター"、画像電子学会誌 Vol. 41, No. 3, pp. 302-303、日本画像電子学会、2012年5月、査読無
- ③ 惠多谷雅弘、中野良志、下田陽久、長谷川奏、エルサイドアッパーズザグループ、"多衛星データを用いた古代エジプト遺跡 Site No. 52 の発見について"、写真測量とリモートセンシング、Vol. 52, No. 4, pp. 200-206、2013、査読有
- ④ 惠多谷雅弘、鶴間和幸、中野良志、岩下晋治、小林次雄、村松弘一、黄曉芬、段清波、張衛星、衛星データを用いた秦始皇帝陵の陵園空間に関する一考察、中国考古学第 14 号、pp. 101-114、日本中国考古学会、2014、査読有

[学会発表] (計 7件)

- ① 長谷川奏、惠多谷雅弘、春山成子、"エジプト・西方デルタ調査-2010~2011年度の調査概要と成果-"、第19回ヘレニズム・イスラーム考古学研究会(奈良県立橿原考古学研究所)、2012年7月8日
- ② So Hasegawa, Masahiro Etaya, "Archaeological Research at West Delta: Remote Sensing Application in Hellenistic Roman Archaeology", The 4th Egyptian Japanese Joint Symposium on "Remote Sensing and Its Application; From Archaeology to Social Sciences", Cairo, 11-12September2012.
- ③ 惠多谷雅弘、鶴間和幸、"渭水流域から見た秦都咸陽・始皇帝陵の景観"、中国水利史研究会(兵庫県民会館)、2012年11月4日
- ④ 惠多谷雅弘、衛星リモートセンシングデータによる秦始皇帝陵の立地検討、リモ

ートセンシングデータを活用した東アジア古代史研究国際シンポジウム (学習院大学)、2013年11月16日

- ⑤ 惠多谷雅弘、宇宙考古学の成果と新たな展開、日本リモートセンシング学会第57回 (平成26年度秋季) 学術講演会特別セッション「宇宙考古学の新たな展開」(京都大学宇治おうばくプラザ)、2014年11月7日
- ⑥ 惠多谷雅弘、宇宙考古学の新たな展開、学習院大学国際研究教育機構国際シンポジウム「陝西省考古発見の最前線」(学習院大学国際会議場)、2014年12月20日
- ⑦ 惠多谷雅弘、衛星データの考古学的応用事例について、陵墓考古学国際研究集会 (中国西安市陝西省考古研究院)、2014年8月21日

[図書] (計 5件)

- ① Masahiro Etaya, Environmental Research on Archaeological Sites in Western Delta using Satellite Data, Sate-Egitto vol. 4, pp.13-14, 2012
- ② Masahiro Etaya, Using PRISM/DSM for Environmental Studies of Archaeological Sites, Sate-Egitto vol. 5, pp.7-8, 2013
- ③ 鶴間和幸、惠多谷雅弘監修、“宇宙と地下からのメッセージ～秦始皇帝陵とその自然環境”、学習院大学東洋文化研究所叢書、株式会社D-CODE、2013年3月31日
- ④ Masahiro Etaya, Spectral Features of Landsat8 OLI Data for Sites of Kom Abu Mandur and Kom al-Ahmar, Sate-Egitto vol. 6, pp.6-7, 2014
- ⑤ 山花京子、惠多谷雅弘、葛巻徹、宮原俊一、中野良志、竹田多麻子、伊井さえこ、“悠久のナイルーファラオと民の歴史(山花京子監修、東海大学・横浜ユーラシア文化館共編)”、東海大学出版部、2015年1月31日

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

- ① 惠多谷雅弘、宇宙から見つめる古代中国 (その1)、Science Portal China、http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/1310/r1310_etaya1.html、独立行政法人科学技術振興機構・中国総合研究交流センター編、2013年10月
- ② 惠多谷雅弘、宇宙から見つめる古代中国 (その2)、Science Portal China、http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/1310/r1310_etaya2.html、独立行政法人

科学技術振興機構・中国総合研究交流センター編、2013年10月

- ③ 宇宙から探る遺跡と古環境：衛星 SAR を用いた多地域対応型遺跡探査技術に関する研究、
<http://www.tric.u-tokai.ac.jp/isite/jproject.html>
- ④ 宇宙から探る遺跡と古環境：衛星によるナイルデルタの古代エジプト遺跡 Site No.52 の発見について、
<http://www.tric.u-tokai.ac.jp/isite/jproject.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

惠多谷 雅弘 (ETAYA MASAHIRO)
東海大学・情報技術センター・主任技師
研究者番号：60398758

(2) 研究分担者

下田 陽久 (SHIMODA HARUHISA)
東海大学・総合科学技術研究所・教授
研究者番号：20056245
長谷川 奏 (HASEGAWA SO)
早稲田大学・総合研究機構・客員上級研究員
研究者番号：80318831
鶴間 和幸 (TSURUMA KAZUYUKI)
学習院大学・文学部・教授
研究者番号：50143144

(1) 連携研究者

村松 弘一 (MURAMATSU KOICHI)
学習院大学・学長付国際研究交流オフィス・教授
研究者番号：70365071
黄 曉芬 (KOH GYOUNFEN)
東亜大学・人間科学部・教授
研究者番号：20330722

<衛星画像クレジット>

本研究に使用した ALOS および ALOS-2 データは、ALOS データ利用公募型共同研究 (宇宙航空研究開発機構) によって提供されたものである。

©JAXA/MITI /RESTEC/TRIC