

二時期の空中写真と衛星画像による自動変化抽出手法の開発 Development of Automatic Change Detection Method Using Aerial Photo and Satellite Image

基本図情報部 笹川啓¹・田代ゆかり・石塚麻奈・柴田光博²

National Mapping Department

SASAGAWA Akira, TASHIRO Yukari, ISHITSUKA Mana, SHIBATA Mitsuhiro

要 旨

国土地理院では、地図更新候補箇所を効率的に選定する目的で、撮影時期の異なる空中写真から変化箇所を自動抽出する技術開発を行っている。本稿では、諸元の異なる空中写真と衛星画像を使用した自動変化抽出手法について、特に、画像間の明るさや色調等の違いに対して頑健に抽出できるような仕組み（エッジ情報に基づく類似度の導入）について詳細を解説するとともに、茨城県のつくば地区及び土浦地区の2つの検証地区において、実際に自動抽出された二時期画像間の変化に対し、目視による判読検証を行った結果を報告する。

1. はじめに

国土地理院では、平成 21 年度から日本全国を対象とした電子国土基本図（地図情報）の整備事業を開始し、平成 25 年度に整備が完了、現在はその更新作業を行っている。

電子国土基本図（地図情報）は、原則として都市計画区域では地図情報レベル 2500 で、都市計画区域外では地図情報レベル 25000 で整備更新が行われている。その更新にあたっては地方公共団体による都市計画基図や、国土交通省の各地方整備局等と連携して収集を行う道路更新資料を使用しているが、効率的な地図更新を行うため、日本全国に対してどこがどれだけ地図修正が必要かを把握することが大きな課題となっている。

本研究では、上記の地図更新箇所の効率的な把握を目指して、諸元の異なる空中写真と衛星画像を使用した自動変化抽出手法の開発及び評価を行ったことから、これらを本稿で報告するとともに、今後の改善指針等をまとめる。

2. 自動変化抽出手法の基本アイデア

2.1 エッジ画像の導入

二時期画像を用いた自動変化抽出手法については、近年人工知能（AI）を用いる手法を中心に、二時期画像の差分に基づく手法等、様々な手法が考案されているが、本研究では「学習等の初期コストが不要」「二時期画像間の明るさ等の違いに頑健」の2点に重きを置いて検討した結果、図-1 のとおり、二時期画像のエッジ（カラー画像から白黒画像に変換後、

急峻に画素値が変化する箇所）情報に基づく手法を採用した。

図-1 の上画像は、同一場所で住宅が建設された前後の衛星画像又は空中写真の例であり、下画像はこれらのエッジを抽出した画像である。抽出されたエッジの明るさに二時期画像間で大きな違いは無い一方で、住宅建設後の画像上には新規建造物に伴うエッジが抽出されているが、住宅建設前の画像ではエッジが抽出されていない。このような、二つのエッジ画像を利用して地図更新の対象となるエリアを自動抽出するというのが、本研究での基本的アイデアである。



図-1 諸元の異なる二時期のエッジ画像

2.2 エッジ画像間の類似度を導入

実際の自動変化抽出を行う際には、変化の有無を何らかの尺度で定義する必要がある。本研究では、エッジ画像間の類似度として、後述する2つのエッジベクトル間の角度に着目した類似度を導入した。

エッジベクトルとは、エッジ画像の画素値をクラス分けし、各クラスの頻度分布をベクトル化したものであるが、具体例を以下に説明する。

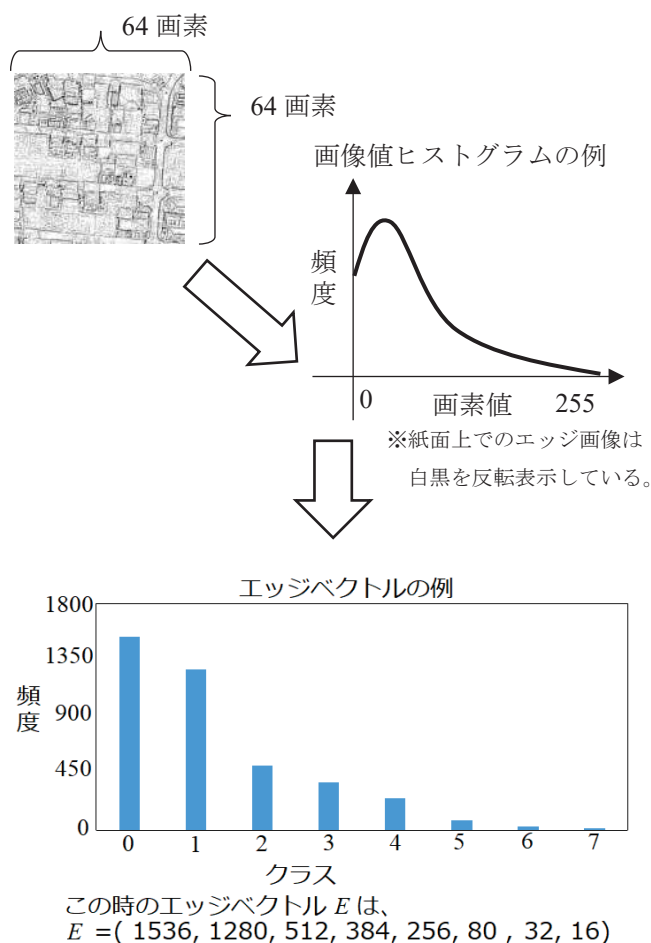


図-2 エッジベクトルの算出例

表-1 エッジ抽出画像のクラスターリング

画素値	クラス番号	画素値	クラス番号
0~31	0	128~159	4
32~63	1	160~191	5
64~95	2	192~223	6
96~127	3	224~255	7

図-2 にエッジベクトルの算出例を示す。本研究では、8bit/画素(256階調)の64画素×64画素であるエッジ画像を入力として、この画素値ヒストグラムを算出する。これを、表-1 に従い256階調の画素値かを8つにクラス化したものを、8次元のエッジベクトルとする。

本研究では二時期（空中写真と衛星画像）の正射画像で処理を行うものであるから、同じ64画素×64画素の領域では、空中写真からエッジベクトル E_a が、衛星画像からエッジベクトル E_s が、それぞれ8次元で算出される。

この2本のエッジベクトルについては、図-2 中の

棒グラフで示したクラス分布が似ていれば変化は無く、クラス分布が大きく異なるようであれば変化があるとみなすことができる。よって、本研究では2つのエッジベクトルのクラス分布が似ているか似ていないか（類似度）の尺度として、8次元上で2つのエッジベクトルの成す角度を θ とした時の $\cos\theta$ を採用した。

$$\cos\theta = \frac{E_s \cdot E_a}{|E_s| \cdot |E_a|}$$

なお、 $\cos\theta$ の取り得る範囲は-1.0~+1.0 であるが、図-3 のとおり、2つのベクトルの成す角度が開く（クラス分布の形状が異なる）と、 $\cos\theta$ の値が小さくなる一方で、2つのベクトルの成す角度が 0° に近いとき（2つのエッジベクトルのクラス分布が似た形状の時）は、 $\cos\theta$ が+1.0 に近い値を取る。

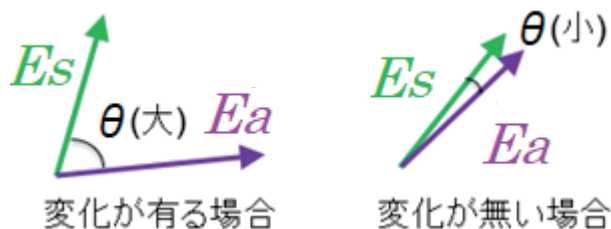


図-3 変化の有無と2つのエッジベクトル間の関係

3. 自動変化抽出手法の流れ

次ページの図-4 に、本研究における自動変化抽出の処理フローを示す。

大まかな流れとしては、正射化かつ地理院地図の仕様に基きタイル化されたズームレベル (ZL) 16 及び ZL17 の二時期画像に対して、それぞれのエッジ画像を生成し、前章で説明した類似度計算を行う。この類似度計算に基づき、変化量を示す変化抽出画像が、ZL16 と ZL17 で別々に生成される。この2種類の変化抽出画像を合成処理することにより、最終的な合成変化抽出画像を生成する。

なお、前章で説明した類似度算出を ZL16 及び ZL17 の異なる解像度の画像に適用させているのは、ZL の高い画像の方が、細かい地物がはっきり見えるため、車両の有無／植生や土地の季節変化／電子国土基本図（地図情報）の取得基準に満たない小変化等を、極力誤抽出しないことを意図したものである。

以下、本章では下記項目についての処理の詳細を述べる。

- ・エッジ抽出
- ・2画像間の類似度計算・変化抽出画像生成
- ・統合変化抽出画像の生成

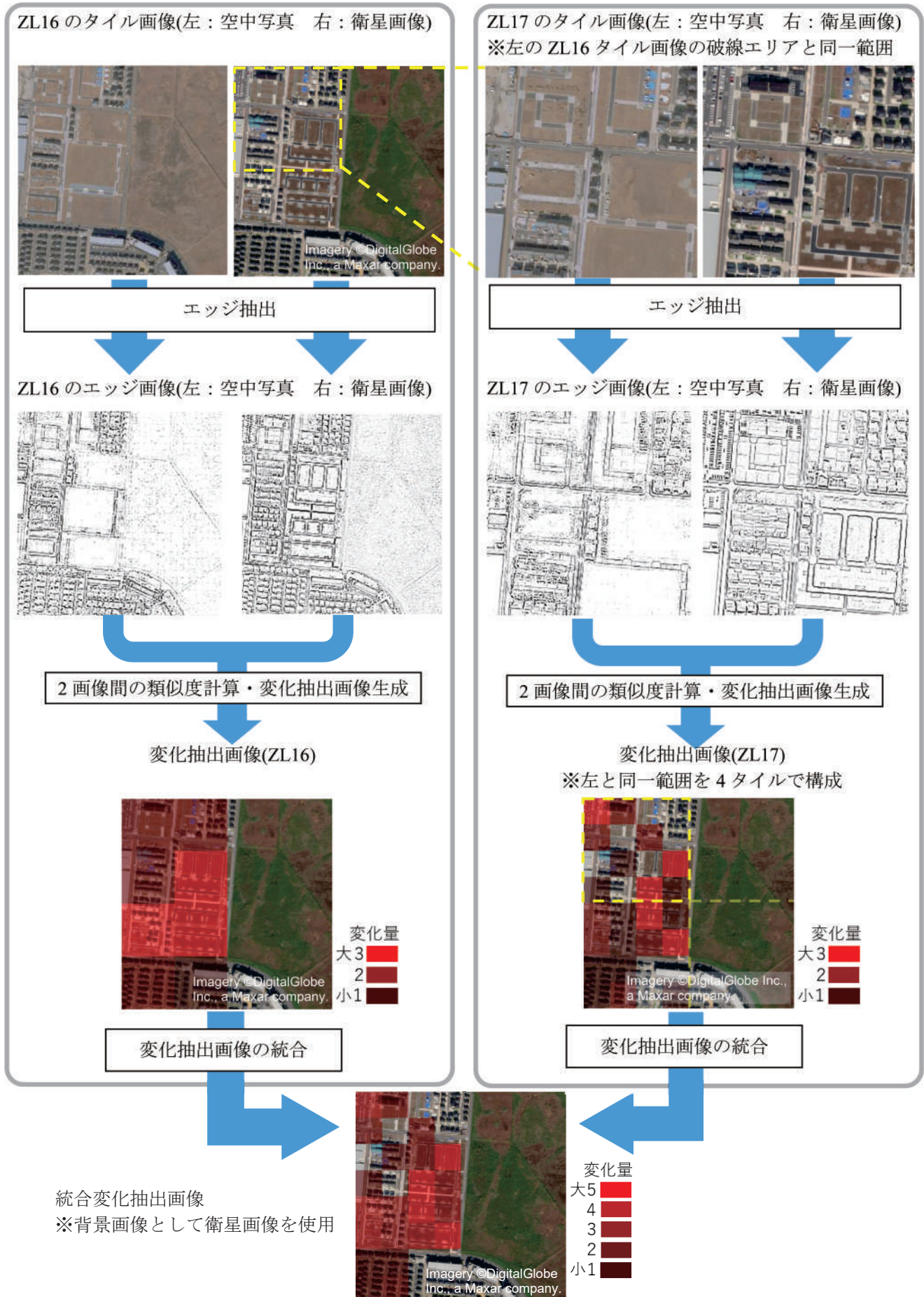


図-4 自動変化抽出の処理フロー

3.1 エッジ抽出

本研究でのエッジ抽出においては、画像の縦横方向のみでなく、斜め方向のエッジも抽出できるように 3 画素×3 画素の 8 近傍ラプラシアンフィルタを用いた。

表-2 に 3 画素×3 画素のラプラシアンフィルタのカーネルを示す。このカーネルから、エッジ画像の画素値は、各隣接画素値の総和-中心画素値×8 であることがわかる。つまり、2 つのエッジ画像間の変化を捉える本手法の抽出品質は、2 つの入力画像の明るさには直接的に依存せず、隣接画素の画素値変化の急峻性に依存する。よって、2 画像間の画素値の差分を取るような手法と比較すると、2 画像間の明るさの違いには頑健な手法と言える。

一方で、2 画像間で隣接画素の画素値変化の急峻性に大きな差異がある場合（例えば、一時期目がアナログ航空カメラで撮影された画像で、二時期目がデジタル航空カメラで撮影された画像）は、抽出品質が大幅に劣化することが予想される。

表-2 3 画素×3 画素のラプラシアンフィルタのカーネル

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

3.2 2 画像間の類似度計算・変化抽出画像生成

2 画像間の類似度計算として、2.2 節でも述べた通り、一時期目と二時期目のエッジ画像を 64 画素×64 画素の領域毎に 2 つのエッジベクトルを算出し、この 2 つのエッジベクトルによる $\cos\theta$ の計算を行う。本研究では、 $\cos\theta$ の値に応じて表-3 に従って変化抽出画像の色を決定する。

なお、本研究においてエッジベクトルは 8 次元で生成されるが、多くのエッジベクトルはクラス 0（最初の次元：非エッジ画素の頻度を表す）にベクトル内の係数が集中する。よって、図-5 のように 2 時期画像間で見た目には変化があるものの（右側の画像上部には、新規建造物が確認できる）、 $\cos\theta$ としては変化量が「無」と判定される事例が多いため、 $\cos\theta$ の計算にクラス 0 は入れずに、クラス 1 からクラス 7（2 次元目～8 次元目）を計算対象としている。この処理は、特にクラス 0 に大部分の係数が集中する画像に対する変化の抽出漏れを防ぐ効果がある。一方で、本研究の検証過程（検証地区：つくば地区及び土浦地区）にて確認したところ、顕著な誤抽出の増加は確認できなかったことから、クラス 0 を $\cos$ 値の算出に使用しないこととした。

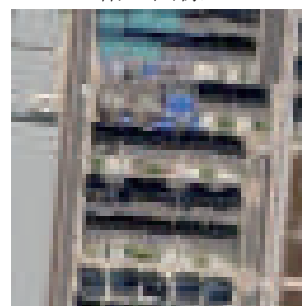
表-3 $\cos\theta$ （2 画像間類似度）と変化量の判定

$\cos\theta$ の値	変化量	変化抽出画像の色
0.95～1.00	無	透過
0.90～0.95	小	
0.80～0.90	中	
～0.80	大	

空中写真



衛星画像



空中写真のエッジベクトル：

$$E_a = (2761, 423, 308, 225, 163, 90, 52, 74)$$

衛星画像のエッジベクトル：

$$E_s = (2562, 255, 262, 229, 194, 163, 114, 317)$$

クラス 0 からクラス 7 を使用した 8D- $\cos\theta$: 0.993

クラス 1 からクラス 7 を使用した 7D- $\cos\theta$: 0.864

図-5 8 次元及び 7 次元での $\cos\theta$ の例

3.3 統合変化抽出画像の生成

ZL16 及び ZL17 の 2 つの変化抽出画像については、64 画素×64 画素（ZL16 ではおよそ 128m×128m、ZL17 では 64m×64m）毎に、変化が「無」「小」「中」「大」と判定されるが、本研究ではこの ZL16 と ZL17 の変化抽出画像を統合して、最終的に 1 つの統合変化抽出画像を生成する。この時、ZL16 と ZL17 の変化量から、統合変化抽出画像としての変化量を表-3 に従って決定している。また、表-3 中の色は、統合変化抽出画像内における該当する変化量をどの色で表示させているかを意味している。

表-3 統合変化抽出画像の変化量算出

統合変化抽出画像 の変化量 (変化無 0～5 変化大)			ZL17 変化抽出画像 の変化量			
			大	中	小	無
ZL16 変化 抽出 画像	変 化 量	大	5	4	3	2
		中	4	2	1	0
		小	3	1	0	0
		無	2	0	0	0

ZL16 及び ZL17 の変化抽出画像の傾向として、変化量が「小」のものは誤抽出が多くなる事が認められたので、統合変化抽出画像の変化量については、ZL16 か ZL17 の片方の変化量が「無」又は「小」の時に、ある程度統合変化抽出画像では変化量として小さい数字を与えるように重みをつけている。

4. 検証

本手法の有効性を確認するため、茨城県つくば市及び土浦市の2つの地区を検証地区として、地理院地図のシームレス写真レイヤーに掲載されている空中写真による正射画像（一時期目）と、高分解能衛星画像による正射画像（二時期目）を用いた検証を行った。

4.1 使用した画像の諸元

表-4 に使用した画像の諸元を示す。つくば地区及び土浦地区ともに、一時期目の画像として空中写真、二時期目として衛星画像を用いている。これは、令和3年度に打ち上げ予定のALOS-3(先進光学衛星)を見込んで、一時期目が地理院地図のシームレス写真レイヤーの画像、二時期目がALOS-3 画像という実際の業務での活用想定に合わせたものである。

空中写真と衛星画像ともに、正射画像を作成しスタイル化された ZL16 及び ZL17 のタイル画像を本手法の入力画像としている。

表-4 検証地区及び使用画像の諸元

検証地区	つくば地区	土浦地区
一時期目画像	空中写真（約 4km×4km）	
使用センサ	DMC II	DMC
撮影日時	2017 年 2 月	2008 年 5 月
二時期目画像	衛星画像（約 4km×4km）	
使用衛星	WorldView2	WorldView3
撮影日時	2017 年 10 月	2017 年 11 月
入力画像 の解像度	ZL16：約 200cm ZL17：約 100cm	
抽出変化の 単位面積	ZL16：64pix ² （約 128m×128m） ZL17：64pix ² （約 64m×64m） 統合：64pix ² （約 64m×64m）	

4.2 目視判読による検証結果

図-6 につくば地区と土浦地区に対する全体の自動変化抽出の結果を示す。本節では、自動変化抽出の結果として出力された両地区の統合変化抽出画像に対する抽出精度（正解率と抽出漏れ）を目視判読で検証した結果を報告する。

1) 正解率

正解率については、つくば地区及び土浦地区の統合変化抽出画像において抽出された 15,000m² 以上の変化箇所（連続した 4 単位面積以上の変化）を対象に、その中の一部でも新規建設や滅失、地物の形状変化等の電子国土基本図での更新対象となるものが認められれば正解とし、更新対象にはならないものは不正解とした。

表-5 につくば地区と土浦地区の正解率と不正解率を記す。つくば地区、土浦地区ともに正解率は 60% 以上となった。なお、不正解となったものとしては、「建物」の影に起因すると思われるものが 2 か所（つくば地区 A）、「駐車場・道路」の車両配置に起因すると思われるものが 2 か所（つくば地区 B）、「水田」のテクスチャ変化に起因すると思われるものが 2 か所（土浦地区 A）、「水域」のテクスチャに起因すると思われるものが 1 か所（土浦地区 B）で、全部で 7 か所の誤抽出が確認できた。なお、これらの主な不正解の例を図-7 に示す。

表-5 判読検証の結果

検証地区	つくば地区	土浦地区
対象変化箇所数	10	9
正解の数	6	6
不正解の数	4	3
正解率	60%	67%
主な不正解例	車両配置 水田 影 水域	

2) 抽出漏れ

本研究は、地図更新の対象となる地物を 1 個 1 個抽出するものではなく、ある程度更新対象の地物が密集するエリアや大規模地物の抽出をターゲットとしているため、抽出漏れ検証の対象としては、宅地開発のような 15,000m² 以上の連続して変化するエリア、ショッピングセンター等の大規模建築物又は、路線長 100m 以上の新設道路のうち、全く自動変化抽出で抽出できなかったものを対象とした。

上記のようなエリアや地物を対象に目視判読検証を行ったところ、つくば地区では抽出漏れはなかったものの、土浦地区において片側 1 車線の新規道路が 2 つ抽出漏れしていることがわかった。図-8 にその 2 つを示す。

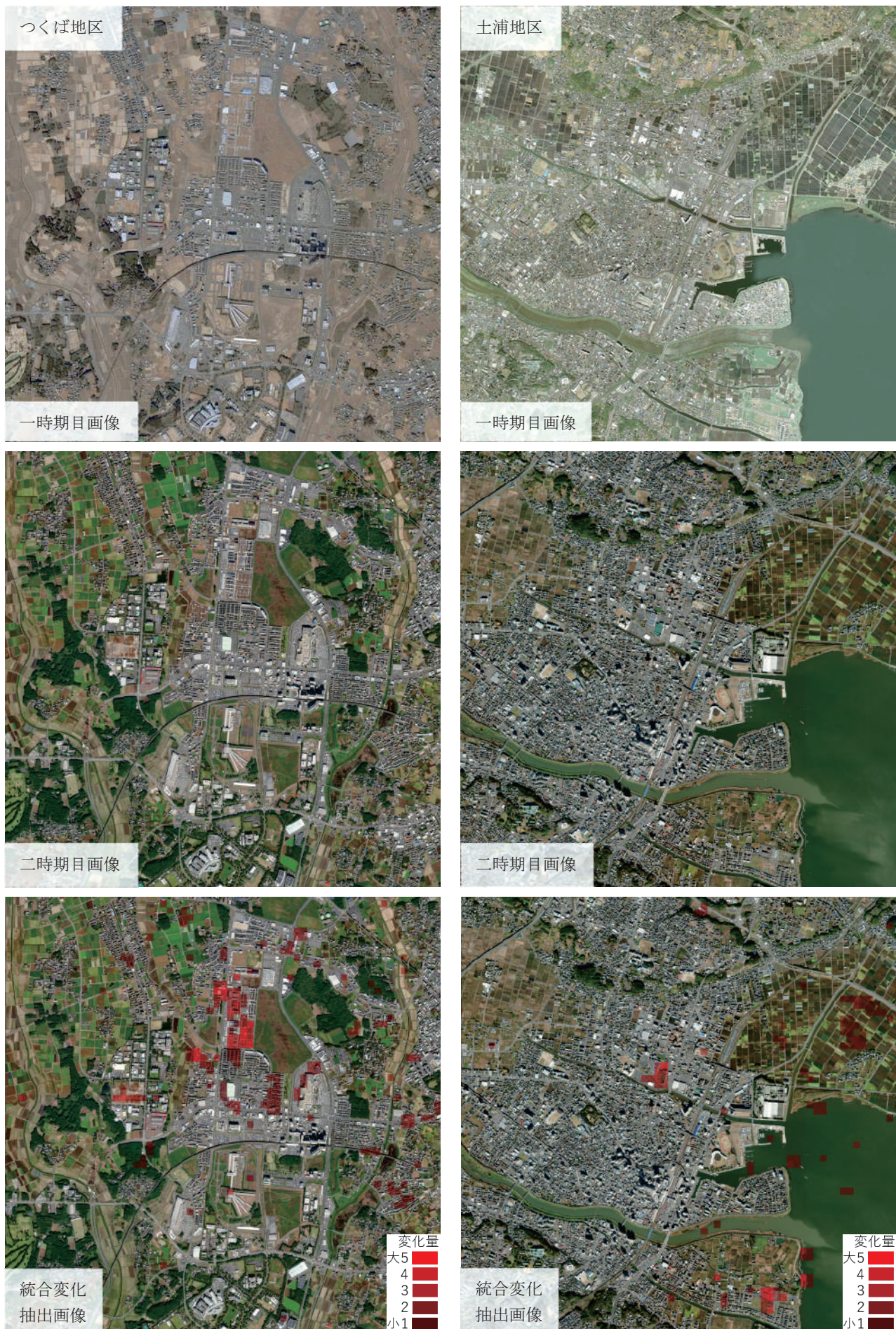


図-6 つくば地区・土浦地区の自動抽出結果（検証範囲全体）

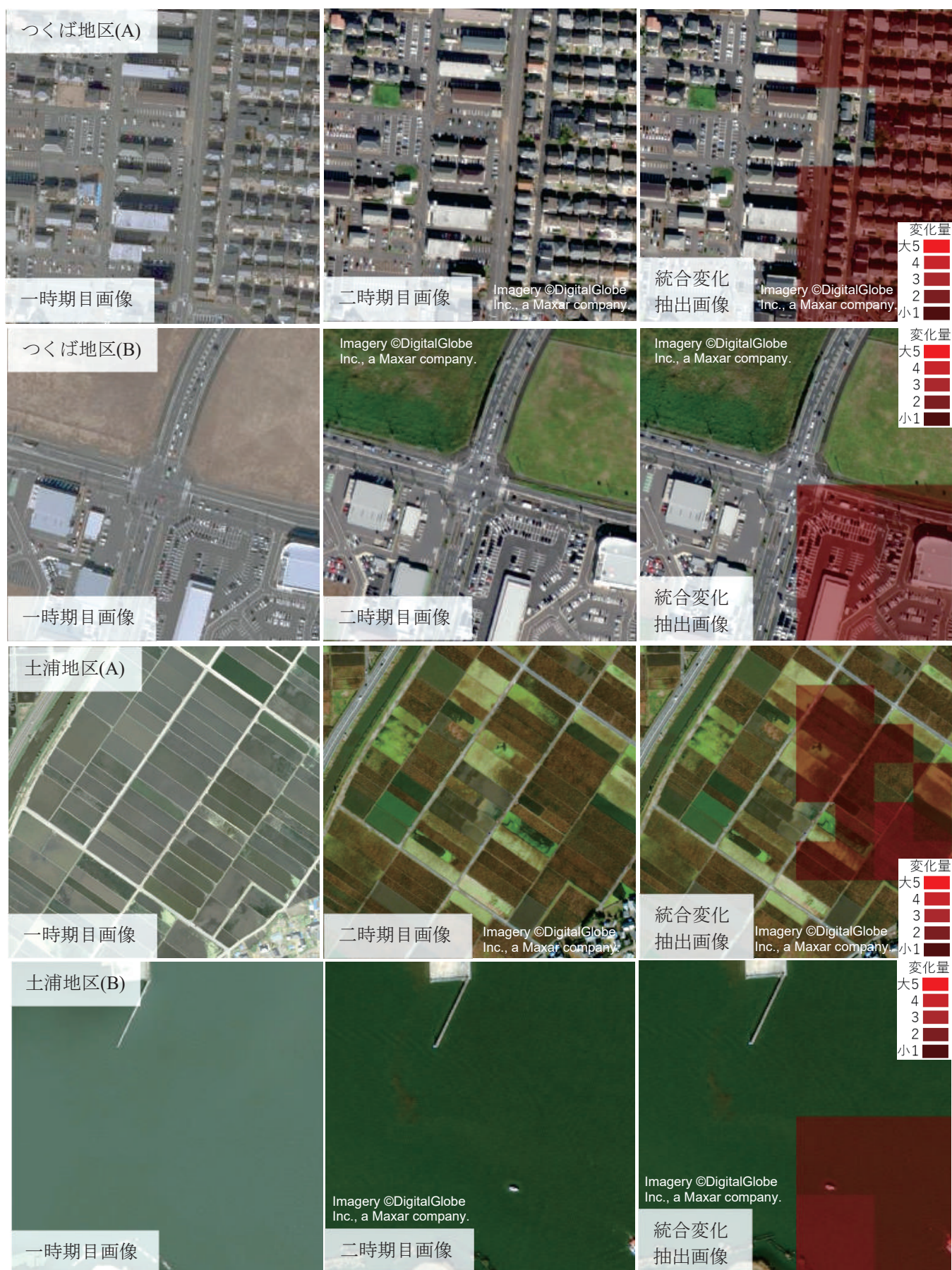


図-7 自動抽出結果が不正解（誤抽出）の実例



図-8 自動抽出結果に対する抽出漏れの実例

5. 評価と考察

本章では、本手法の処理時間や抽出精度に対する評価と工学的な考察を行い、本手法の抽出精度を改善するための指針を与える。最後に、これらを踏まえた実際の地図更新業務に対する位置付け等を提案する。

5.1 処理時間

本節では、著者による処理環境での処理時間を計測した結果を報告する。

まず、表-6 に本手法を処理した主なマシンスペックを示す。なお、本手法では複数のコアやスレッドを同時使用はせず、中間ファイルや変化抽出画像への HDD に対する読み込みや書き込みも、並列では行っていない。

表-6 本手法の処理時間

PC モジュール	スペック
CPU	Core i5 8400 (コア数 6, スレッド数 6)
RAM	8GB
HDD	SATA HDD 250GB (7200 回転)

表-7 に、本手法の処理時間を示す。つくば地区と土浦地区ともに、同じ面積 (約 16km²: 4km×4km) で適用させているが、処理時間としてはほぼ同じであったので、ここではつくば地区の結果のみを示す。

なお、以下の表-7 の前提として、すでに 2 時期画像のタイル化処理までは終了しているものとする。

表-7 から、つくば地区 16km² での処理時間は、合計 1184 秒 (19 分 44 秒) かかるが、本手法を日本全国 (面積 38 万 km²) に適用させようとする、325 日かかることがわかる。本手法では、1 コア 1 スレッドでの処理を行っている、実用的には少なくとも複数コアでの処理が必要になると思われる。

表-7 本手法の処理時間 (つくば地区)

処理項目	処理時間	
	16km ²	【参考】 全国面積換算 (38 万 km ²)
エッジ抽出	302 秒	約 83 日
2 画像間の類似度計算・ 変化抽出画像生成	799 秒	約 219 日
統合変化抽出画像生成	83 秒	約 23 日
合計	1184 秒	約 325 日

5.2 抽出精度に対する考察

1) 誤抽出

4.2 節での結果のとおり、本手法は 60%~70% の正解率を達成しているが、誤抽出の類型からは、実際に画像上の変化が無い箇所を抽出しているわけではなく、地図更新の対象外となる画像上の変化（図-7 中だと、車両配置の違いや湖面上のボート有無）を抽出しているものが半分程度を占めている。

画像から変化抽出を行う場合は、これらは避けて通れない誤抽出の要因ではあるが、本手法ではこれらの地図更新とは関係の無い画像上の小さな変化による誤抽出低減のために、ZL16 及び ZL17 画像を入力して、それぞれの変化抽出画像を統合処理する処理を通して誤抽出の低減を図っていた。しかしながら、この処理で完全に誤抽出を排除することは困難であることから、郊外部の大規模駐車場や水域の誤抽出については、何か手立てが必要と思われる。

2) 抽出漏れ

抽出漏れについては、図-8 に示したとおり、道路（線上地物）の抽出漏れが確認できたが、これは図-9 に示すとおり変化抽出の最小単位である 64 画素×64 画素の中のごく一部にしか道路に起因するエッジがないことで起こる（二時期のエッジベクトルのクラス分布がそこまで変わらない）ものである。つまり本手法は、一定程度の面的な変化は捉えやすいものの、道路や河川のような線上地物の変化が手法の特性上捉えにくいことがわかる。

また、抽出漏れについては、2.2 節で述べた類似度計算の原理から、2 つのエッジベクトルが同じ方向を向いているかどうかを $\cos\theta$ の値のみで判定している。一方で、本手法では 2 つのエッジベクトルの大きさの違いには着目していない。抽出漏れの事例の一定程度は、図-10 のとおり、 $\cos\theta$ の値では変化として判定されないが、2 つのエッジベクトル長が一定程度異なることを利用して、抽出漏れを低減できる可能性がある。

5.3 実際の地図更新業務に対する位置付け提案

前節のとおり、本手法を 1 コアで処理しようとすると、日本全国に対する自動変化抽出で膨大な時間がかかってしまうが、複数コアを使う同時並行処理を行えば、その時間が短縮すると思われる。（正確には、ディスク書き込み等も同時並行で行われるため、コア数を X 倍にすれば、必ずしも処理時間が 1/X になるとは限らないことに留意する必要がある。）

いずれにしても、この処理時間の問題をある程度解決して、日本全国なり都市計画区域外なり、ある程度限定された地区でも現実的な時間で処理できる



図-9 64 画素×64 画素に含まれる新規道路の実例

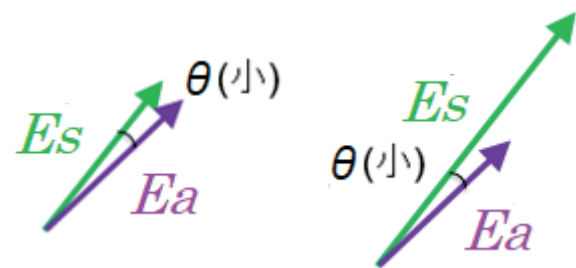


図-10 本手法の $\cos\theta$ では変化無しと判定される（両方）が、ベクトル長が異なるパターン（右）

のであれば、変化箇所と自動抽出された中での正解率が 60% と言え、他に何も情報の無い地域に対する地図更新を行う際の優先順位決定に寄与できると思われる。

6. まとめと今後の予定

本研究では、諸元の異なる空中写真と衛星画像を使用して、2 つのエッジベクトルのクラス分布と $\cos\theta$ による類似度計算に基づく自動変化抽出手法の詳細を述べた上で、茨城県のつくば地区及び土浦地区の実画像を用いて抽出精度を検証した。その結果、両地区ともに 60% 台の正解率を達成した。一方、土浦地区においては 2 箇所の新規道路に対する抽出漏れが判明した。

また、本手法は全国規模での実施となると処理時間面で課題は存在するが、CPU で複数コアを用いることで処理時間短縮が見込まれる。さらに、2 つのエッジベクトルの類似度計算にベクトル長の情報を用いることで、抽出漏れを低減できる可能性がある。

今後は、令和 4 年に ALOS-3 が打ち上げられる予定であるため、実際の ALOS-3 画像で同様の変化抽出検証を行うとともに、処理の高速化や正解率の改善を実現させた上で、実際の地図更新業務での活用を想定した業務フローの検討を行いたい。

（公開日：令和 3 年 8 月 12 日）

参 考 文 献

- 笹川啓, 水田良幸, 小井土今朝己, 田中宏明 (2007) : ALOS-PRISM 正射画像による自動変化抽出の試み, 写真測量学会平成 19 年度年次学術講演会, 89-90.
- 笹川啓, 渡辺金一郎, 中島最郎, 中島浩子, 小井土今朝己 (2007) : 二時期の空中写真を使用した自動変化抽出, 写真測量学会平成 19 年度秋季学術講演会, 45-48.
- A. Sasagawa (2007) : Automatic Change Detection Using Pair of PRISM Triplet Images, Proc. The First Joint PI symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto, 24-38.
- A. Sasagawa, K. Watanabe, S. Nakajima, K. Koido, H. Ohno, H. Fujimura (2008) : Automatic Change Detection Based on Pixel-change and DSM-change, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, Vol. XXXVII, Part B7, 1645-1650.
- https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/7_pdf/10_ThS-18/20.pdf (accessed 8 Feb. 2021).
- 笹川啓, 渡辺金一郎, 中島最郎, 大野裕幸 (2008) : 二時期の空中写真を用いた新規建築物の自動外周線発生の試み, 写真測量学会平成 20 年度秋季学術講演会, 179-180.
- 笹川啓 (2013) : 2 時期のだいち-PRISM 画像を用いた自動変化抽出の検討, 地図-空間表現の科学-, Vol51, No.2, 11-14.
- A. Sasagawa, Emmanuel Baltsavias, Sultan Kocaman Aksakal, Jan Dirk Wegner (2013) : Investigation on automatic change detection using pixel-changes and DSM-changes with ALOS-PRISM triplet images, Proceedings of the ISPRS2013-SSG, Vol. XL-7/W2, 213-217.
- <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-7-W2/213/2013/isprsarchives-XL-7-W2-213-2013.pdf> (accessed 8 Feb. 2021).
- 笹川啓, Emmanuel Baltsavias, Sultan Kocaman Aksakal (2014) : 二時期の ALOS-PRISM 画像による自動変化抽出及び自動図化の検討, 写真測量学会平成 26 年度秋季学術講演会, 135-136.
- 笹川啓, 野口真弓, 菅井秀翔 (2018) : 衛星画像と空中写真を用いた二時期の自動変化抽出の試み, 写真測量学会平成 30 年度秋季学術講演会, 58-61.
- Akira SASAGAWA, Shuto SUGAI, Mayumi NOGUCHI (2019) : Automatic Change Detection Based on Edge Information Using Two Different Types of Ortho Image, Proceedings of the International Cartographic Association, 2, 2019. (ICC2019)
- <https://www.proc-int-cartogr-assoc.net/2/111/2019/ica-proc-2-111-2019.pdf> (accessed 8 Feb. 2021).
- 笹川啓, 菅井秀翔, 関口泰徳 (2019) : エッジ情報を用いた二時期正射画像の自動変化抽出に対する目視判読検証, 写真測量学会令和元年度秋季学術講演会, 129-132.