

# 時系列光学衛星データを用いた 海外の都市鉄道沿線の開発状況の把握 —市街化と再開発状況特定方法の検討—

山根 華織<sup>1</sup>・森地 茂<sup>2</sup>・稲村 肇<sup>3</sup>・日比野 直彦<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京建設プロジェクトマネジメントオフィス

(〒141-0031 東京都品川区西五反田 3-5-8 JR 目黒 MARC ビル)

E-mail:k-yamane@jreast.co.jp

<sup>2</sup>名誉会員 政策研究大学院大学名誉教授 大学院政策研究科 (〒160-8677 東京都港区六本木 7-22-1)

E-mail:smorichi.pl@grips.ac.jp

<sup>3</sup>名誉会員 東北工業大学名誉教授 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

E-mail:hajime.inamura@gmail.com

<sup>4</sup>正会員 政策研究大学院大学教授 大学院政策研究科 (〒160-8677 東京都港区六本木 7-22-1)

E-mail:hibino@grips.ac.jp

都市が膨張する際には、郊外が市街化され、既に市街地になっている地域では再開発が行われる。このような都市の膨張に対して、農地もしくは市街地という区分のみでは、都心部の既に都市化が進んでいる地域での再開発を判別することが困難である。本研究では、正確な土地利用データがない発展途上国において、光学衛星データを用いて市街地の再開発地域を特定するための手法の提案により、今後のアジアでの鉄道建設の意思決定者の判断に資する知見を提供することを目的としている。この手法で NDVI と市街地のデータに対する判別分析の結果から算出した合成変量を組合せ、マッピングすることにより、視覚的かつ定量的に市街地の再開発地域の推移を把握することが可能となった。

**Key Words:** urban railway, urban development, optical satellite, NDVI, redevelopment

## 1. はじめに

### (1) 本研究の背景と目的

近年、アジアの大都市では、都市鉄道の建設が進められており、公的資金・ノウハウの不足のため、都市鉄道事業に PPP 事業を導入する傾向があるが、それらの事業の多くは成功したとは言い難い。リマニラやバンコクでは、容量不足の鉄道整備により、車両・駅はピーク時には既に規定人数を超えた人々で溢れかえるような状況である。<sup>2,3)</sup>

アジアでは都市鉄道建設の意思決定の際に、鉄道事業は初期の利益が出にくいいため、沿線の都市開発事業の利益に過剰に期待している傾向がある。一方で、既往研究において、駅周辺の開発が進むまでに要する時間は 15 年から 30 年以上という長期間を必要とし、段階的に整備を実施した箇所については、それ以上の長い時間を要していることが明らかになっている。アジアの都市鉄道

プロジェクトで見られる「鉄道の初期赤字を開発利益によって補填する」というスキームの成立が困難であると考えられている。また、これまでに多く開業しているアジアの都市鉄道の駅周辺開発状況は十分に分析されていない状況である。アジアの中でも、バンコクの鉄道沿線開発に関する既往研究においても、農地から市街地への開発について、一部の路線に限った分析となっている。

また、都市が膨張する際には、郊外が市街化され、既に市街地になっている地域では再開発が行われる。このような都市の膨張に対して、農地もしくは市街地という区分のみでは、都心部の既に都市化が進んでいる地域での再開発を判別することが困難である。

そこで、本研究においては、正確な土地利用データのない発展途上国における都市開発の進展状況を光学衛星データを用いて分析し、鉄道整備と沿線開発の関連性の分析や、市街化した部分の更なる開発を把握するための方法を確立することにより、アジアの鉄道建設意思決定

者の判断に資する知見を得ることを目的としている。

## (2) 本研究の構成

本研究では、アジア地域の都市鉄道沿線の開発についての知見を得るため、開発実態の調査方法の深度化を行った。2章では既往研究の整理と本研究の位置付けを行う。3章では無作為標本に対する NDVI による緑地・市街地の判別精度の検証を行う。4章では、市街地のデータを用いた判別分析による精度分析を行う。5章では、バンコク全域や都市鉄道沿線の開発推移の分析と市街地の再開発地域の特定方法の検討を行う。最後に結論と今後の課題を示す。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

駅周辺の開発に関する研究として、西川<sup>4)</sup>は日本の新幹線駅 92 駅について都市計画と整備実施の両面から駅周辺開発の規模とプロセス、駅ごとの特徴について分析を行っており、県庁所在地相当の人口規模の都市では、駅周辺の商業地域の容積率拡大等の土地の高度利用が確認されている。一方で、土地区画整理事業範囲の開発では、都市人口規模が大きい都市で必ずしも速く進展するとは限らないことや、駅周辺で土地区画整理事業を一括的に実施し、開発を進めた箇所では、約 9 割の土地が整備されるまでに 15 年から 30 年以上という長期にわたり、駅周辺開発には長い時間を要することを明らかにした。

小森<sup>5)</sup>は日本の都市鉄道で主に近年開業した鉄道路線を対象とし、開業後の需要の増減の要因の分析を行った結果、開業後の需要の増加の要因は、沿線居住者の利用の増加によるものであり、鉄道開業後に鉄道利用目的で新たに引っ越した人が増加していることを明らかにした。

松下<sup>6)</sup>はバンコクのブルーライン、MRT3 号線、高雄メトロを対象とし、各事業における関係主体の財務諸表や運営に関するデータより、運営・経営状況を分析し、関係主体の財務シュミレーションから顕在化したリスクの影響を定量化した結果、開業初期の需要が定着するまでの需要予測の分析が不十分であることを明らかにした。

アジアにおける駅周辺開発に関連する既往研究として、福田<sup>7)</sup>はタイのバンコクの軌道系公共交通機関沿線における土地開発の実態について調査し、エアポートレールリンク周辺地域では自動車でのアクセスを前提とした開発、パープルライン周辺地域では、パープルライン計画後に急速な住宅地の開発が始まり、開業以前に既に多くの土地が開発されていることを明らかにしている。

このように、日本での駅周辺開発に着目した研究は多く存在するが、アジア地域を調査し、定量的に沿線開発を整理することや、市街地の再開発地域を定量的に特定

するという観点の研究は限られている。そこで本研究では、アジア地域における都市鉄道沿線開発と、市街地の再開発に焦点を当て、実態調査を行うとともに調査手法を確立する。

## 3. 無作為抽出標本を用いた NDVI による緑地・市街地の判別精度の検証

既往の研究では、Google Earth Engine<sup>7)</sup> (以下 GEE) と Colaboratory<sup>9)</sup> を使用し、衛星の選択・データの取得・正規化植生指標の計算・正規化植生指標の地図上の表示を行っていた。

正規化植生指標<sup>10)</sup>とは、Normalized Difference Vegetation Index : NDVI という植生が可視領域の光を吸収し、近赤外領域の光を強く反射するという特性を用いている指標であり、計算式を(1)に示す。

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R) \quad (1)$$

ここで、IR : 近赤外領域の反射率

R : 可視領域の赤の反射率

NDVI は -1~1 の値をとり、地表に植物が多いほど大きく、建物・道路等は小さい値を示す。データを使用する Landsat は USGS と NASA が共同で開発し、打ち上げた地球観測衛星で、開発状況の推移を確認するという、長期間でのデータ取得を目的としているため、Landsat5 は 1984 年~2013 年の期間であり、Landsat8 は 2013 年~現在までである。Landsat4 以降は、30m の解像度で 2 週間に 1 回地表を撮影している。既往の研究では、教師データとして Landsat5・Landsat8 どちらの期間も任意に選定した農地 50 地点・市街地 50 地点の時系列データを使用している。

### (1) 分析データ

本研究においては、教師データとして、バンコクの Siam 駅を中心とした 40km 四方圏内で無作為に抽出した 200 地点を対象とする。

### (2) NDVI の判別精度の検証

この 200 地点分の土地利用種別について、まず Google Earth Pro を使用し、各地点の過去の航空写真から土地利用種別を確認していき、その中で緑地・市街地と判定ができたものを抽出し、その地点の IR, R を取得し NDVI を算出する。その地点数を表-1 に示す。

表-1 緑地・市街地の地点数

緑地・市街地 2021年8月時点	地点数		
	合計	内訳	
		変化あり	変化なし
緑地	44	5	39
市街地	105	126	51
合計	149	131	90

既往の研究では、航空写真から、予め30m四方内が農地のままの地点・市街地のままの地点・農地から市街地へ変化した地点を確認した上で任意で地点を選定しているが、本研究においては無作為に選定した地点から緑地・市街地を抽出することにより、実際に広域的に開発状況の実態を把握する際に近い状況のサンプルで精度を検証することを目的としている。

光学衛星データにはデータ取得時の天候や季節によって誤差が生じるため、誤判定対策として、2年間で計測されたNDVIの最大値を取ることとする。そのデータ数を表-2に示す。

算出したNDVIの確立密度分布を図-1に示す。緑地・市街地で曲線の山が確認でき、曲線同士の交点のNDVIの値(Landsat5: 0.527, Landsat8: 0.570)を判別の境界値とすると、正答率はLandsat5では緑地が68.53%, 市街地が66.63%, Landsat8では緑地が71.48%, 70.67%となり、既往の研究で教師データによって検証した際の精度よりも低くなっていることが読み取れる。

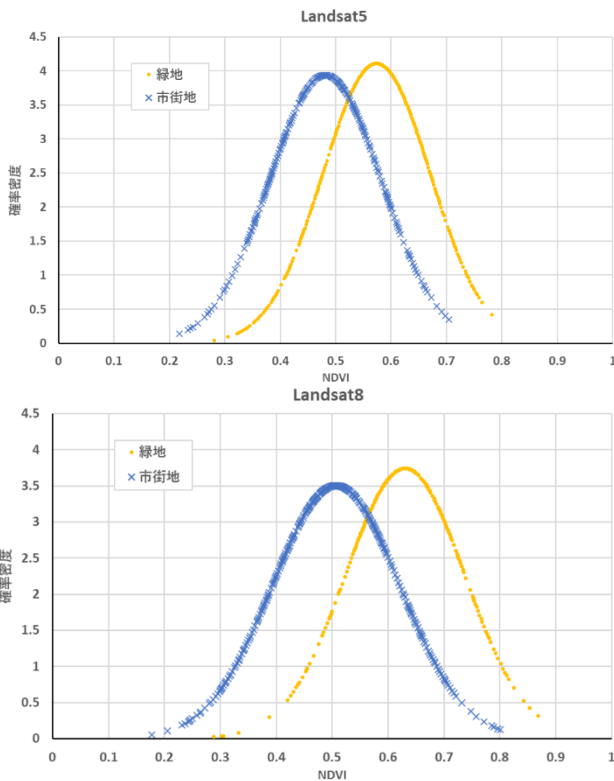


図-1 NDVIの確立密度分布



図-2 市街地の種別(例)※Google Earth Engine より引用

#### 4. 市街地のデータを用いた判別分析による精度分析

緑地・市街地はNDVIの指標を用いて十分に判別可能であることが確認できているため、次のステップとして、再開発状況の時系列変化を把握するため、Landsatで取得できる各波長帯のデータを用いた判別分析により、市街地の中でも高層(3階以上の建物)・低層(2階以下の建物)の種別の判別について検討を行う。

##### 4.1 判別に使用するデータ・方法

対象は市街地における種別の判別ということで、まず航空写真を確認し、2021年10月時点で高層・低層(緑少なめ・緑多め)と判断できる地点をそれぞれ100地点ずつ選定し、その地点の2000年から2020年までのデータを用いる。例を図-2に示す。

各地点について、表-3、表-4に記載の各波長帯の表面反射率や表面温度を取得し、それを説明変数として判別分析を行い、判別関数を算出し、その合成変量の閾値によって高層・低層を判別する。判別分析の方法としては、Excelの分析ツールの回帰分析を用いて行う。

表-2 時系列データ数(2年間最大値データ)

種別	Landsat5	Landsat8
緑地	698	386
市街地	509	745
合計	1207	1131

表-3 Landsat5のバンドの種類<sup>11)</sup>

バンド名	波長帯(μm)	内容
SR_B1	0.45-0.52	バンド1(青)の表面反射率
SR_B2	0.52-0.60	バンド2(緑)の表面反射率
SR_B3	0.63-0.69	バンド3(赤)の表面反射率
SR_B4	0.77-0.90	バンド4(近赤外線)表面反射率
SR_B5	1.55-1.75	バンド5(短波赤外線1)表面反射率
SR_B7	2.08-2.35	バンド7(短波赤外線2)表面反射率
ST_B6	10.40-12.50	バンド6(熱赤外)表面温度

表-4 Landsat8のバンドの種類<sup>12)</sup>

バンド名	波長帯(μm)	内容
SR_B2	0.452-0.512	バンド2(青)の表面反射率
SR_B3	0.533-0.590	バンド3(緑)の表面反射率
SR_B4	0.636-0.673	バンド4(赤)の表面反射率
SR_B5	0.851-0.879	バンド5(近赤外線)表面反射率
SR_B6	1.566-1.651	バンド6(短波赤外線1)表面反射率
SR_B7	2.107-2.294	バンド7(短波赤外線2)表面反射率
ST_B10	10.60-11.19	バンド10(熱赤外)の表面温度

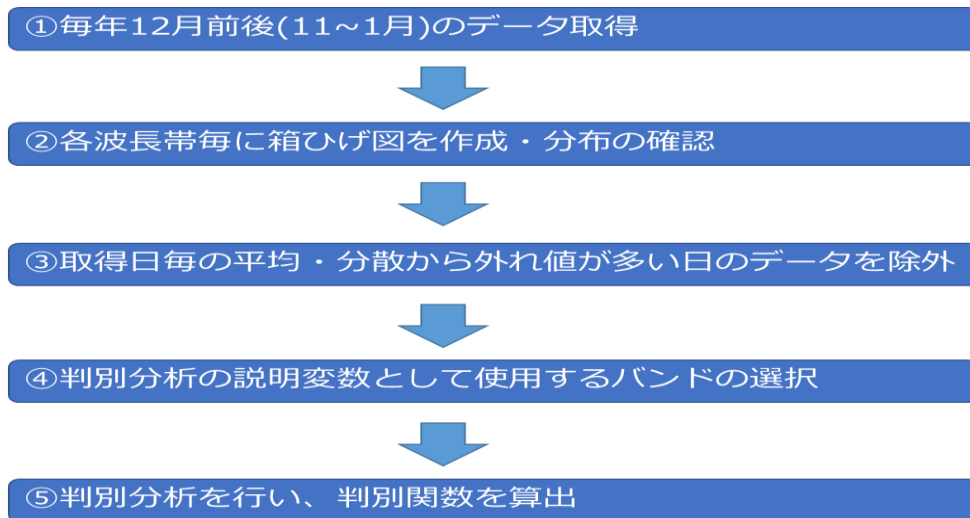


図-3 判別関数決定までのフロー図

#### 4.2 判別関数決定までの流れ

判別関数の決定までに、教師データのスクリーニングや説明変数の適切な組合せの選定を行う。図-3に判別関数決定までのフロー図を示す。

まず、毎年12月前後(11~1月)の Landsat5・8の各波長帯のデータを取得し、波長帯毎に箱ひげ図を作成し、分布域の確認を行い、正常な分布域の見当をつける。続いて、取得日毎のデータの平均・分散の散布図を作成し、平均の平均±標準誤差以内もしくは分散の分散±標準誤差以内に収まらない、外れ値が多い日のデータを除外する。ここまでの段階で判別関数の教師データのスクリーニングを行い、次の段階として、判別関数の説明変数として使用するバンドの組合せを、t値・決定係数・判別関数の係数といった指標から判断し、その安定性の高い組合せで行うことを決定し、判別関数を算出する。

#### 4.3 判別精度向上に向けた対策

4.2の判別関数決定までの各段階で、判別関数の精度向上に向けた取組みとして、季節変動・気候・データ取得時間帯の影響への対策を行う。

##### (1) 季節変動・雲の影響への対策

Landsatから取得できる表面反射率・表面温度のデータには、季節変動や雲の発生の影響を受けやすい波長帯のものも含まれている。そこで、雲が発生しにくい、つまり降水量の少ない月のデータをもとに判別関数を導出することで、季節変動や雲の発生による影響を最小限にできるのではないかと仮定し、時期による判別の精度への影響を検証した。降水量が最も少ない12月と少し増加した段階の3月・4月の可視光・近赤外・短波赤外1・2・熱赤外の表面反射率・表面温度のデータを用い、決定係数・判別率を比較した結果を表-5に示す。12月のデータで判別分析を行った場合に決定係数・判別率

表-5 月別の決定係数・判別率の比較

地点数	12月	3月	4月
高層	75		
低層	198		
決定係数	12月	3月	4月
重決定 R2	0.511	0.357	0.327
補正 R2	0.498	0.352	0.311
判別率(%)	12月	3月	4月
高層	84.06	79.13	74.49
低層	88.81	79.52	78.24

率とともに精度が高くなったことから、12月前後のデータを使用することとした。そこで、Landsat5の期間では2008年12月18日、Landsat8の期間では2020年12月19日のデータを使用し判別分析を行ったところ、高層・低層ともに80%を超える判別率であった。

しかし、最終的に再開発状況の時系列変化を分析することを考慮すると、このように単年度のデータの少ないサンプルを教師データとすることや緑・赤のバンドの係数の符号がLandsat5,8で逆転していること、短波赤外1・2のt値がLandsat8では低い等の懸念があった。

##### (2) 天候・取得時間帯による影響への対策

###### a) 該当する日の推定

(1)では年単位での季節変動等の影響への対策を検討し、12月前後に取得したデータを用いることとした。次の段階として、視点を狭めた場合、日単位では、天候が雨天や曇天の際の雲の発生の影響や取得時間帯の違いによる可視光や熱赤外への影響への対策が必要となる。天候や取得時間帯で各波長帯の表面反射率・表面温度の分布に差が表れ、判別関数に影響があると仮定し、次の検証を行った。毎年12月の波長帯毎に箱ひげ図を作成し、分布域を確認すると同時に、(1)でLandsat5の期間では2008年12月18日、Landsat8の期間では2020年12月

19 日のデータを使用し導出した判別関数から算出した合成変量のマッピング結果を出力し、箱ひげ図の分布域に異常値がある日とマッピング結果で一面赤い等の異常なマッピング画像になった日に関連性はないか比較を行った。例として、Landsat8 の各波長帯の箱ひげ図を図-4 に、マッピング結果を図-5 に示す。箱ひげ図より、Landsat5・8 とともに熱赤外以外の波長帯では、同じ日で分布域が異なるもしくは分布幅が広がっており、その日は、マッピング結果が一面赤くなっている日と一致している。この結果より、各バンドの値の分布から、天候や時間帯の影響を受けている日を割り出せると推察できる。

b) 該当する日の数値的な特定方法の検討

a) で推定した、天候や時間帯の影響を受けている日を機械的に特定するために、各波長帯の高層・低層に分け、各取得日の平均・分散の散布図を図-6 のように作成

し、取得日の平均が平均の平均標準偏差および分散が分散の平均標準偏差となる日付を除外対象とすることとする。

(3) 判別関数の説明変数として使用する波長帯の検討

(1)(2) で判別関数を算出するための教師データのスクリーニングを行い、季節・天候・時間帯の影響が少ないデータで、判別関数の説明変数として用いる波長帯の組合せについて検討を行う。汎用性を考慮し、複数年データで導出した判別関数を各年に適用することを念頭に置き、スクリーニング後に残った全データ(複数年データ)を教師データとして判別分析を行った場合と、取得日毎に判別分析を行った場合で t 値・決定係数・判別関数の係数を比較し、各指標の安定性について分析を行う。初めに全波長帯(青・緑・赤・近赤外・短波赤外 1・2・熱赤外)を説明変数とした時の各指標の安定性を確認した

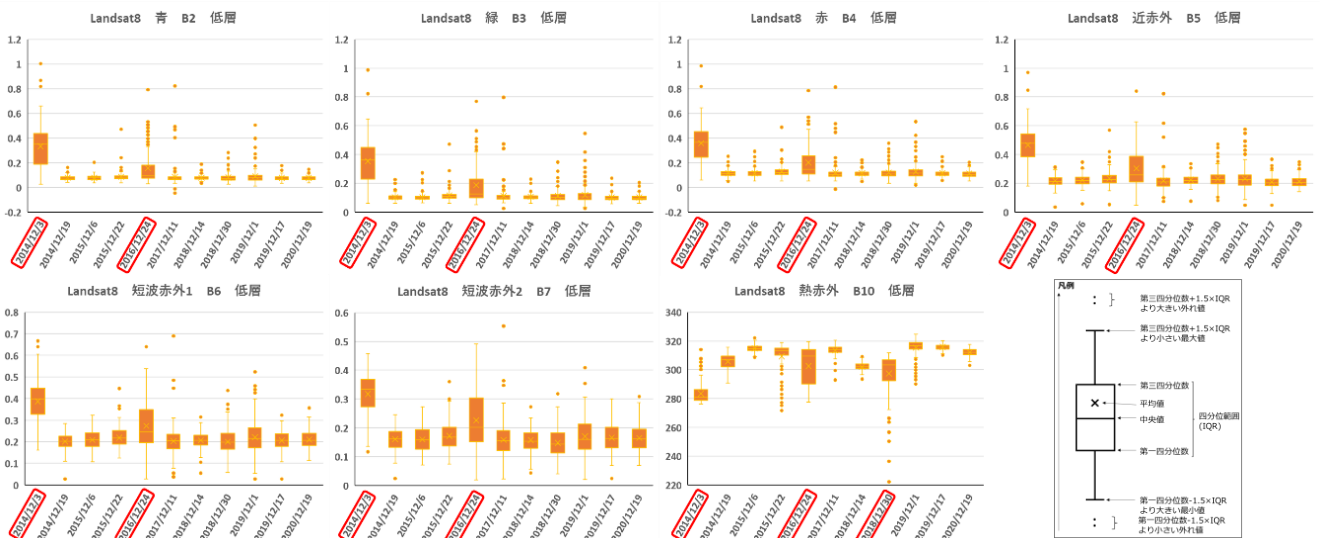


図-4 Landsat8 の箱ひげ図(毎年 12 月)



図-5 マッピング結果

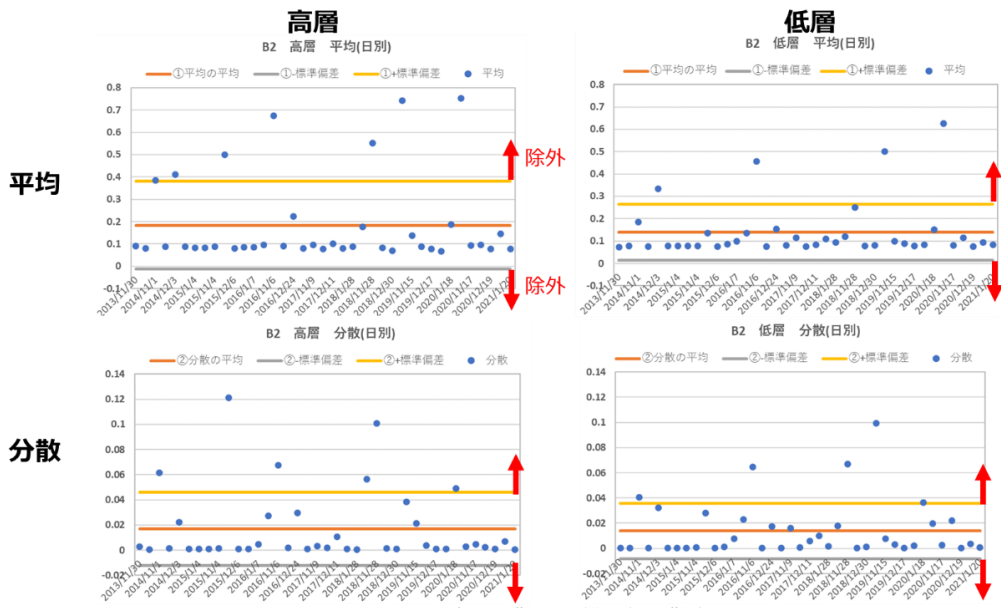


図-6 平均・分散の取得日毎の散布図

表-6 判別分析結果(全波長帯を説明変数とした場合) Landsat5

Landsat5

赤色の部分 t値：絶対値が2以下、決定係数：全取得日(左端)での値より小さい、係数：符号がマイナス

t値		全取得日	20001110	20001211	20031205	20041105	20041121	20041207	20041223	20050108	20060127	20061127	20061213	20061229	20070114	20070130	20081202	20081218	20090103	20090119	20091119	20101225	20111009
青	B1	-2.9168	-0.171	-1.29631	0.959034	0.904942	0.800817	-2.94109	-1.32389	-1.88119	-4.2114	1.48703	0.297411	0.734381	0.736995	2.359882	2.641062	-1.76596	-1.71621	1.494569	1.402716	1.828738	
緑	B2	10.22184	0.683686	1.831681	-0.32114	0.74236	0.732366	2.487932	3.068467	3.023225	4.669819	1.049561	0.992507	1.386045	2.015042	-0.84407	-0.73991	1.595889	2.643813	-0.20592	0.277297	0.85728	
赤	B3	-2.02001	-0.806068	-0.34474	1.904947	-0.02692	-0.04152	0.622081	1.059321	-0.84645	-0.18266	-1.08848	1.299585	0.215478	-0.09555	-0.78599	1.082974	1.746378	0.263382	0.050606	0.581942	-0.73987	-1.14736
近赤外	B4	-15.181	-3.30996	-2.64866	-3.88549	-2.94256	-3.67417	-3.99971	-5.48982	-4.51685	-5.32203	-3.23084	-3.42952	-3.24404	-4.2487	-0.01639	-3.872123	-6.14249	-2.84123	-5.7005	-2.87692	-2.51165	-1.45428
短波赤外1	B5	0.445678	0.692006	-1.25188	0.404783	-0.64249	-0.15338	-0.03013	0.76402	-0.59368	1.382211	-0.44414	1.076539	0.019695	1.386855	1.719686	0.765469	3.132976	-1.31022	0.880005	1.200674	-0.48062	0.284596
短波赤外2	B7	-6.11097	-2.09565	0.138696	-2.12131	-0.76886	-1.31326	-1.66361	-2.26864	-1.30592	-2.24812	-0.05018	-2.48855	-0.79404	-2.77889	-2.14404	-1.66868	-1.10819	0.878459	-1.8	-2.16941	0.032555	-0.79599
熱赤外	B6	5.634965	0.208136	-3.18425	-1.02636	-0.7569	-2.08161	-1.7413	-1.78218	-1.46337	-0.6139	-2.1561	0.692979	-1.83809	3.119539	-3.71195	-2.88678	-3.07856	-2.93912	-2.39125	3.208295	-2.50034	5.09246

t値

決定係数

係数

表-7 判別分析結果(緑・近赤外・短波赤外1を説明変数とした場合) Landsat5

Landsat5

赤色の部分 t値：絶対値が2以下、決定係数：全取得日(左端)での値より小さい、係数：符号がマイナス

t値		全取得日	20001110	20001211	20031205	20041105	20041121	20041207	20041223	20050108	20060127	20061127	20061213	20061229	20070114	20070130	20081202	20081218	20090103	20090119	20091119	20101225	20111009
青	B1	-2.12404	0.343581	0.990023	6.435223	8.489017	11.79517	10.02033	12.42452	9.441321	2.972365	9.673928	-1.08745	11.33548	-3.34226	24.59532	15.1118	15.00913	6.652628	15.95538	-4.72338	10.97741	-3.38963
緑	B2	-2.11531	-1.20679	-9.78464	9.116971	4.296306	6.139897	6.41931	-13.8518	-9.38918	-6.34107	10.23478	2.318765	5.164109	5.894481	15.28856	14.84379	-9.38162	-9.00915	9.074638	9.074638	1.25019	7.179719
赤	B3	-1.18855	4.910675	13.80292	-2.23025	5.997766	1.444428	4.556234	18.66763	22.46959	24.347	16.65879	1.445935	8.184029	12.24805	16.40285	-47.51757	-47.47107	10.21401	17.42619	-1.30938	1.657722	4.391638
近赤外	B4	-1.23682	2.70558	-1.11861	5.968279	-0.0916	-0.12287	2.032252	4.956629	-2.90359	-0.68495	-2.79961	4.11039	0.724983	-0.38769	-2.96903	2.715798	4.645647	0.758191	0.15793	1.38413	-1.7391	-2.44868
短波赤外1	B5	-2.29657	-5.23722	-3.9062	-5.74085	-4.09365	-4.55881	-6.62403	-9.1828	-6.57175	-8.71866	-4.29499	-5.80208	-5.27679	-7.45763	-8.84128	-5.36651	-9.39412	-8.83631	-8.38376	-4.53765	-3.14245	-1.91471
短波赤外2	B7	0.279592	2.513794	-4.19143	1.344838	-2.1661	-0.45752	-0.09708	2.258747	-1.489	4.41576	-1.99725	4.229369	0.071991	5.802177	6.029245	2.622371	10.99509	-4.30518	2.529477	4.625195	-1.17155	0.901082
熱赤外	B6	-3.48644	-7.15662	0.484301	-7.50247	-2.51425	-3.79796	-4.91871	-6.18965	-3.43401	-7.31563	-0.1489	-6.64551	-2.88676	-11.2384	-6.81037	-15.7297	-13.0733	2.652972	-4.65888	-7.93978	0.074521	-2.3591
熱赤外	B6	0.066242	0.003034	-0.02589	-0.01209	-0.03488	-0.029	-0.03643	-0.02696	-0.00676	-0.02903	0.005998	-0.03423	0.019688	-0.08056	-0.0463	-0.04625	-0.0188	-0.04321	0.017883	-0.0338	0.014281	

t値

決定係数

係数

ところ、表-6のように、t値は特に可視光のバンドが安定せず、近赤外は全取得日で絶対値が2以上を示し、決定係数はほとんどの取得日で複数年データを使用した場合よりも高い値を示している。判別関数の係数については、青・赤のバンドは符号の正負が安定しておらず、熱赤外が含まれると切片のばらつきが大きいことが確認でき、パラメータの安定性からは全波長帯で判別関数を導出するのは不適切だと考えられる。このように、全波長

帯でのパラメータ安定性の結果と青・赤・熱赤外は係数が安定しないことや、短波赤外1はNDBI(都市化指標)で用いられていることから、全波長帯から青・赤・短波赤外2・熱赤外のどの波長帯を除外した組合せの場合に、パラメータの安定性を担保しつつ精度高く判別ができるかを比較分析する。その結果、緑・近赤外・短波赤外1で判別分析を行った場合に、表-7のように、t値はどの波長帯の絶対値もほとんどが2以上で、決定係数は3/4

ほどの取得日で複数年データを使用した場合よりも高く、判別関数の係数ではどのバンドも係数の符号がほぼ一致しており、パラメータの安定性から、この緑・近赤外・短波赤外1の組合せが適切だと考えられ、判別関数は Landsat5 の期間は、次の式(2)で表される。

$$y = 0.751438 + 6.507585x_{B2} - 3.01046x_{B4} - 3.11735x_{B5} \quad (2)$$

ここで  $x_{B2}$  : 緑の波長帯の表面反射率

$x_{B4}$  : 近赤外の波長帯の表面反射率

$x_{B5}$  : 短波赤外1の波長帯の表面反射率

Landsat8 の期間は、次の式(3)で表される。

$$y = 0.786661 + 4.874511x_{B3} - 3.406015x_{B5} - 1.847341x_{B6} \quad (3)$$

ここで  $x_{B3}$  : 緑の波長帯の表面反射率

$x_{B5}$  : 近赤外の波長帯の表面反射率

$x_{B6}$  : 短波赤外1の波長帯の表面反射率

## 5. バンコクの都市鉄道沿線の開発推移の分析

既往の研究においては、対象をバンコクのブルーライン・パープルラインの一部のみとして、NDVI の指標により分析を行い、各沿線開業前から開発が進んでいたことを確認していた。今回は、図-7 のように現在開業している全路線の沿線(パープルライン・ブルーライン・BTS スクンビット線・BTS シーロム線・エアポートレールリンク・ゴールドライン・レッドライン)を対象として分析を行う。

### 5.1 NDVI による鉄道路線周辺の開発推移の分析

#### (1) 分析方法

時系列での開発進度の推移を定量的に把握するために、NDVI が 0.6 以上の地点に白、NDVI が 0.6 未満の地点に黒を割り当てて白黒で図化し、一度市街地化された場合、緑地に戻るものは少ないと仮定し、透過度 0.1 で画像を時系列順に重ねることとした。なお、ここでは透過度の

範囲は 0~1 であり、1 は透過なしを示す。閾値は、本研究でランダムサンプリングを用いて算出した値よりも教師データを用いて算出した 0.6 の方が正答率が高かったため、0.6 を使用する。これにより、白のピクセル数をカウントすることが可能になり、緑地等そのまま開発されていない地域を抽出することが可能となる。また、透過させて時系列順に画像を重ねることで、過去に市街化した地域の情報を付加することができる。これにより取得した jpeg 画像を画像編集・加工ソフトウェアの GIMP を使用し、白のピクセル数を確認し、総データ数から引くことで、市街化されている地域を抽出することができる。また、その時系列変化より、新規開発面積を計算することができ、開発進度を定量的に表現・比較することが可能となる。

#### (2) 路線別の開発推移

上記の方法により、バンコクの Siam 駅を中心とした 40km 圏内にある既存の鉄道沿線を対象として開発の確認を行う。図-8 に示す例の通り、各沿線周辺約 2km,4km,6km 範囲をグリッドで分割し、市街地増加率の

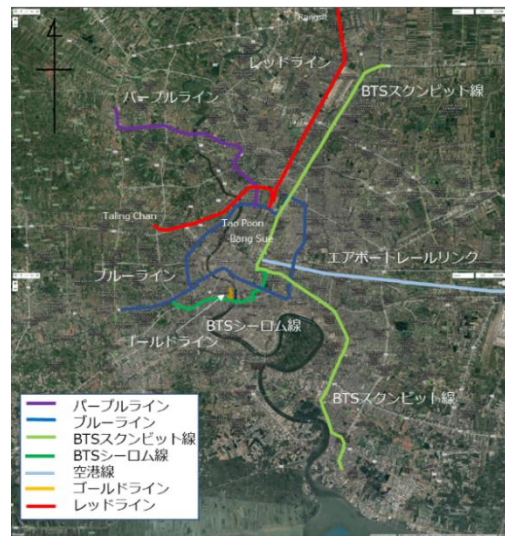


図-7 分析対象路線

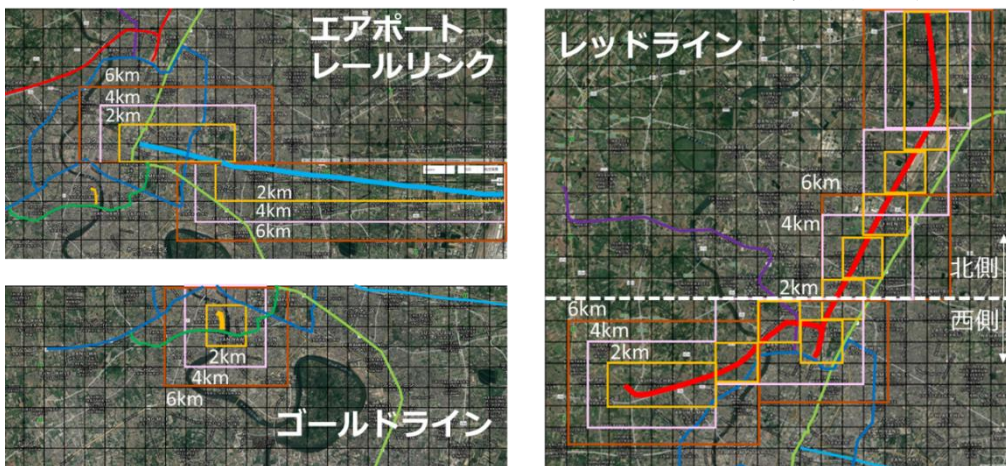


図-8 鉄道路線周辺約 2km,4km,6km 範囲(例)

確認を行った。結果の市街地増加率の推移を図-9に示す。

a) パープルライン沿線

他の沿線と比較し市街地増加率が高く、あまり開発されていないエリアであることが推察される。

b) ブルーライン沿線

2010年頃～市街地増加率が少し鈍化していることが読み取れる。

c) BTS スクンビット線

北側の方が南側よりも市街地増加率が高いということが読み取れる。

d) BTS シーロム線

沿線周辺 2km, 4km, 6km とどれも増加率があまり変わらず、都市部を走っている路線ということもあり、既に開発されている部分が多かった可能性があるかと推察される。

e) エアポートレールリンク

この路線のみ、市街地増加率が 2km>4km>6km となっており、早い段階から沿線から遠い部分から開発されていた可能性がある。

f) レッドライン

南側の方が市街地増加率が高く、傾きも緩やかであることが読み取れる。

g) ゴールドライン

2012年以降はほぼ横ばいとなっており、他の沿線と比

較し、増加率が小さくなっていることが読み取れる。これは、他の路線の沿線でもあることや、都市部のため、予め開発がある程度進んでおり、開発の余地が少なかったこと等が要因として考えられる。

(3) まとめ

図-9より、パープルラインはどの範囲でも市街地増加率が高く、ゴールドラインは市街地増加率が最も低くなっている。また、2010年頃～市街地増加率が鈍化する路線が多いが、これは GDP 増加率の鈍化等による影響が考えられる。

5.2 NDVI と判別関数の組合せによる可視化方法の検討

次に、NDVI と 4.で導出した判別関数から算出した合成変数を組合せ、マッピングすることで、市街地の再開発地域を特定する方法の検討を行う。

(1) 分析方法

この方法は、以下①～⑤の処理を Google Earth Engine 上で行いマッピングすることで、緑地・市街地(高層・低層)を色により分類し、各開発行為の進捗を時系列で把握するものである。

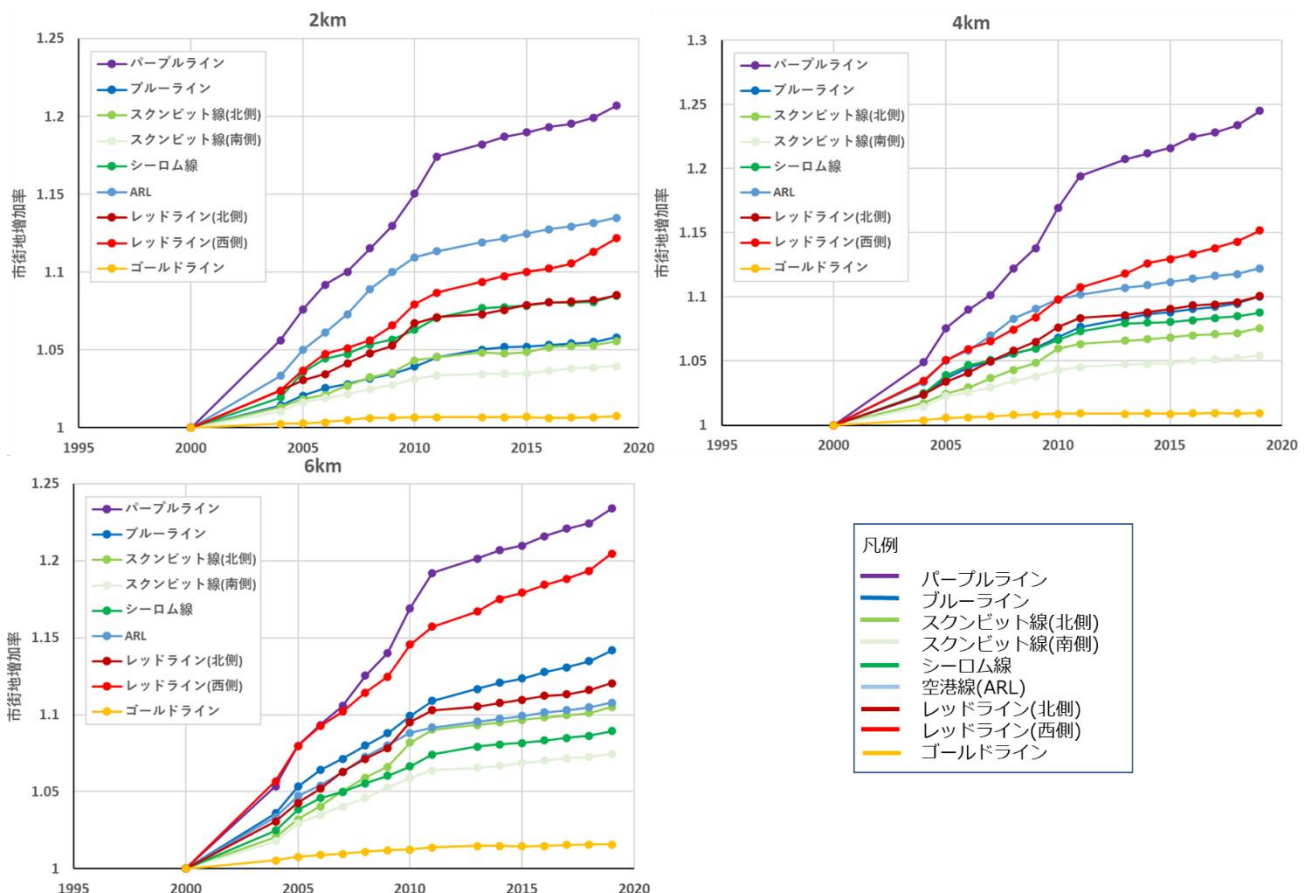


図-9 鉄道路線周辺約2km,4km,6km範囲の市街地増加率

図-10 に分析順序のイメージ図を示す。

a) NDVI マッピング

まず、5.1 の方法と同様に NDVI を算出し、白 (#FFFFFF)・緑(#00FF00)の2色で緑地・市街地をマッピングを行う。

b) 時系列順の重ね合わせ

2000 年を基準とし、2000 年から t 年まで時系列順に重ねたものを t 年の画像として、1 枚の画像に合成する。

c) 配色の入れ替え

a) で取得した画像の色を入れ替え、緑地が緑、市街地が白となるように設定を変更する。

d) 合成変量マッピング

各波長帯の表面反射率を用い、4. で導出した判別関数

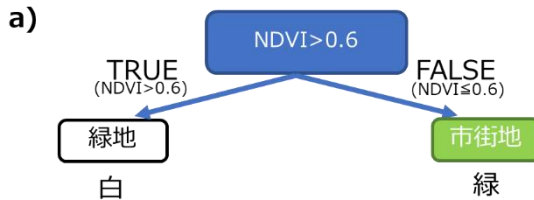
により合成変量を算出し、閾値以上を赤・閾値未満を白とし、透過度 0.1 でマッピングを行う。

e) NDVI・合成変量の重ね合わせ

b) で作成した画像に d) の画像を重ねたものを t 年の画像とすると、緑色は緑地・白色は低層・赤色は高層として表示され、市街化・再開発が進展している地域を視覚的に把握することが可能となる。

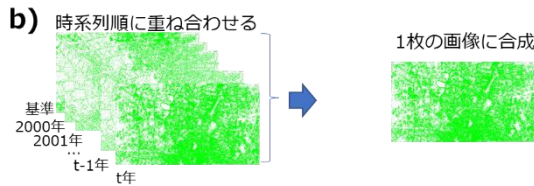
種別毎の開発面積の算出には、a)・b)・e) の白黒化して取得した画像の白の pixel 数を画像編集・加工ソフトウェアの GIMP で確認し、総データ数から除していくことで、緑地・市街地・市街地の内訳として高層・低層のデータ数を算出することが可能となる。

**NDVI マッピング**



NDVIの2年間の最大値で判定

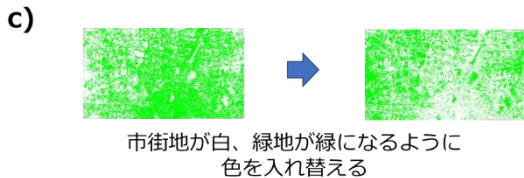
※雲があると値が下がってしまうことへの誤判定対策



基準年(2000年)から時系列順に重ね合わせる

※一度市街化した部分は緑地に戻らないと仮定  
⇒2001年以降の画像は透過させ重ねる

**配色の入れ替え**



市街地が白・緑地が緑になるよう色を入れ替え

※この後の合成変量の値のマッピング画像を重ねる際市街地の内の高層・低層は白黒で判別したいため

**合成変量マッピング**



毎年12月前後のデータで判定

※雲による影響への対策

**NDVI・合成変量の重ね合わせ**

e) c)まで処理した画像に、d)で処理した画像を重ね合わせる

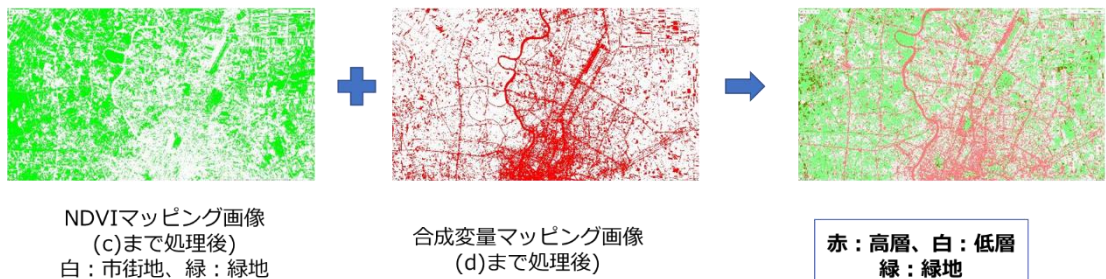


図-10 NDVI と判別関数の組合せ 分析フロー

(2) マッピング結果

2020年の Siam 駅から 40km 圏のマッピングの結果を 図-11 に示す. この方法では, 毎年写真を重ねると, 低層を示す白地の部分が高層の赤色に変わっていくことにより高層化を特定している. 図より, 緑地の部分が減少していることや, 白(低層)あるいは, 赤い高層の市街化している部分が拡大していることが視覚的に確認できる. 注意点としては, 道路や川等の水域は赤く表示されてしまうため, 市街化もしくは再開発地域の正確な面積とは差が生じてしまうが, 面積にほぼ変動はないものと仮定し, 各年の差分を取ることで, 市街地もしくは再開発地域の増加分を把握する分には問題ないと考えられる. 水域の部分は, 画像を出力する際にプログラム上で, 標高が低い部分は削除する記述を加えることで改善できる可能性がある. また, 高層・低層の教師データは, 高層は 3 階以上の建物・低層は 2 階以下の建物として分類しているが, 衛星データによる判別は高さを認定するものではないため, 低層の大きい建物や道路も高層と判定されている. 但し, 毎年新規再開発を差分として求めており, 市街化された地域の判定のみを行っているので, 市街地に新たな道路が建設されない限り, 再開発と判定しても誤りではないと考えた. 新たな道路については, 再開発判定されたピクセルの連続性などから, 建物と区別することは可能であるとマッピング結果からは想定できる.

また, 図-12 のように, Siam 駅を中心とし, Siam 駅から 0km 圏,10-20km 圏,20-30km 圏,30-40km 圏の距離帯での開発進捗を確認した結果として, 距離帯毎のエリア面積に対する占有率(市街地・高層)を 図-13 に示す. 市街地の占有率は中心部から離れるほど低くなる傾向があり, 高層の占有率は, 中心部から 20km 圏までは離れるほど低くなる傾向にあり, 20-30km 圏と 30-40km 圏では, どの年も高層の占有率はほぼ変わらない傾向にあり, 中心から 20-40km 圏では高層の建物は低密度で建設されていることが読み取れる.

6. おわりに

(1) 結論

本研究は, バンコク全域や都市鉄道沿線の開発推移の分析と市街地の再開発地域の特定方法の検討により, 各種開発行為の進展状況を明らかにするものである. 本研究で得られた知見を以下に示す.

a) NDVI を無作為抽出標本に適用した場合の精度

既往の研究で教師データによって検証した際の精度よりも低くなっているということが明らかになった.

b) 市街地のデータを用いた判別分析の精度

季節変動・気候・時間帯等を考慮したスクリーニングを事前に行い, 判別関数構築の教師データにするとともに

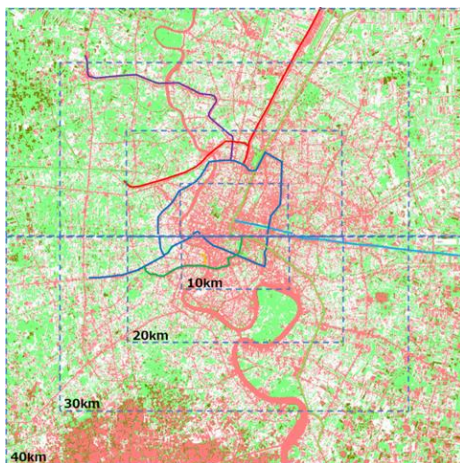


図-11 2020年マッピング結果(40km圏)  
市街地面積/エリア面積

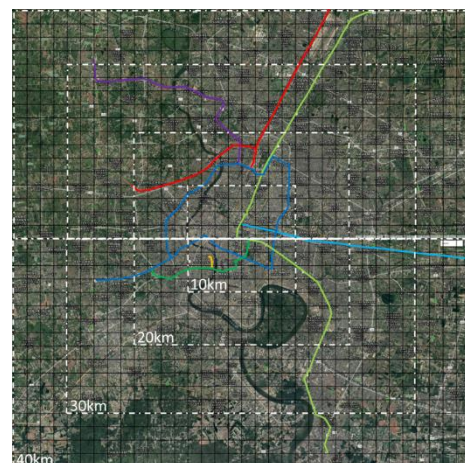
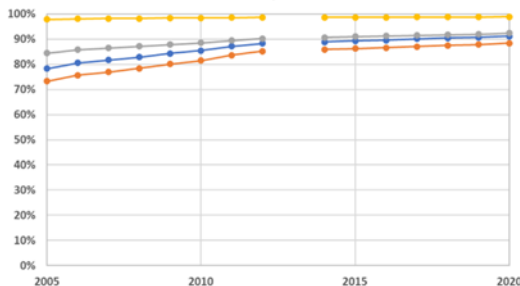


図-12 Siam 駅を中心とした距離帯(40km圏)  
高層面積/エリア面積

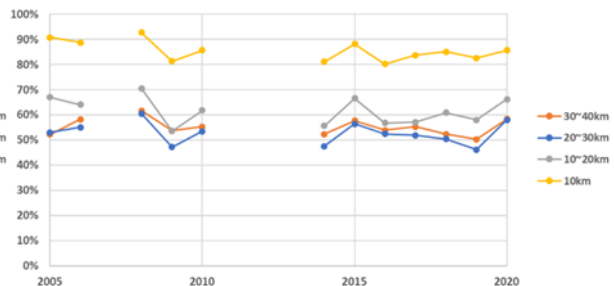


図-13 距離帯毎のエリア面積に対する占有率(市街地全体・高層)

に、説明変数を絞ることで、低層・高層の種別を精度高く判別できることが明らかになった。

#### c) NDVI マッピングによる沿線別開発推移の把握

NDVI による開発状況の把握を行い、エアポートレーリリンクは沿線から離れた地域が早期に開発されていることや、パープルラインは市街地増加率が最も高く、元々あまり開発されていなかった地域である可能性が明らかになった。

#### d) 市街地の再開発地域の特定方法

適用する都市の天候等の特性を踏まえ、スクリーニングしたデータで判別関数を算出し、NDVI と組み合わせることで、高層化している部分の進展状況の視覚的・数値的な把握が可能となった。

### (2) 今後の課題

今回は、Landsat5・8 とともに複数年で多くの教師データから判別関数を算出しているが、実際の適用を考え、パラメータの安定している2・3年のデータで判別関数を決定したとしても精度は十分に保てるかということや、判別の正誤が毎年安定しているかどうか、判別結果の安定性といった観点も考慮していくことで、さらなる効率性・汎用性の向上が期待できると考えられる。

また、緑地から市街地へ、市街地が低層から高層に変化することはあっても、これらの逆方向の変化は少ない。緑地と市街地の判定にはこの不可逆性をプロセスに組み込んでいる。低層から高層も同様に高層化の不可逆性を反映させたプロセスを組み込むことも今後検討したい。但し、一度高層と判定され、それが誤っている場合は、その後もずっと高層判定となるので、最初の高層判定が誤っている可能性が高いことを考慮に入れた判定プロセスを今後の検討に加えたい。

### REFERENCES

- 1) 菅生康史：アジア大都市における都市鉄道事業への PPP 導入の課題, 運輸総合研究所研究報告会, 2019.12. [Sugo, Y.: Problem for Urban Railway PPP Project in Asian Megacities, Japan Transport and Tourism Research Institute, 2019.12.] <https://www.jttri.or.jp/sympo46-16.pdf>
- 2) JICA：フィリピン国大都市圏における鉄道戦略調査（マニラ首都圏内の都市鉄道）, 2013.7. [Study on the Strategic Railways Networks for the Greater Capital Region in Republic of the Philippines, JICA Report, 2013.7.] <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12126611.pdf>
- 3) JICA：タイ国バンコク首都圏都市鉄道マスタープラン改定（M-MAP2）に係る情報収集・確認調査, 2019.3. [Information Gathering and Confirmation Survey for Mass Transit Master Plan Revision in Thailand Bangkok Metropolitan Region(M-MAP2), JICA Report, 2019.3.] <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12344735.pdf>
- 4) 西川晃司, 森地茂：新幹線駅周辺整備の変遷とアジア諸国における新幹線建設への示唆, 第58回土木計画学研究発表会・講演集, 2018. [Nishikawa, K. and Morichi, S.: Analysis of urban development around the Japanese high speed railway stations, *Proceedings of Infrastructure Planning*, Vol58, 2018.]
- 5) 小森賢, 森地茂：都市鉄道の開業後における需要増減の要因分析, 第61回土木計画学研究発表会・講演集, 2020. [Komori, M. and Morichi, S.: Factors impacting passenger demand trend after urban railway operation, *Proceedings of Infrastructure Planning*, Vol61, 2020.]
- 6) 松下英稔, 森地茂, 井上聡史：アジアの都市鉄道 PPP 事業における定量的リスク分析, 第57回土木計画学研究・講演集, 2018. [Matsushita, H. Morichi, S. and Inoue S.: Quantitative risk analysis of PPP urban railway projects in ASIA, *Proceedings of Infrastructure Planning*, Vol57, 2018.]
- 7) 福田敦：バンコクの軌道系公共交通機関沿線における土地開発の実態～限界と可能性～, IBS Annual Report 研究活動報告, 2017. [Fukuda, A.: Current Situation of Land Development in the Area along Rail Based Public Transport Systems in Bangkok -Limit and Possibility-, IBS Annual Report, 2017.] <https://www.ibs.or.jp/wp-content/uploads/2017/06/s2017-4-2.pdf>
- 8) Google Earth Engine : [https://www.google.com/intl/ja\\_ALL/earth/education/tools/google-earth-engine/](https://www.google.com/intl/ja_ALL/earth/education/tools/google-earth-engine/)
- 9) 小林秀樹：クラウドベースの地理空間データ解析プラットフォーム「Google Earth Engine」, 日本リモートセンシング学会, vol.38, No.2, pp.125-130, 2018.4. [Kobayashi, H.: Geospatial data analysis on Google Earth Engine, *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, Vol38, No.2, pp.125-130, 2018.]
- 10) Colaboratory : <https://colab.research.google.com/>
- 11) Earth Engine Data Catalog of Landsat5 : [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LT05\\_C02\\_T1\\_L2#bands](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C02_T1_L2#bands)
- 12) Earth Engine Data Catalog of Landsat8 : [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LC08\\_C02\\_T1\\_L2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2)

(Received September ?, 2022)

UNDERSTANDING URBAN DEVELOPMENT STATUS ALONG URBAN  
RAILWAY LINES OVERSEAS USING OPTICAL SATELITE DATA  
-STUDY OF URBANIZATION AND REDEVELOPMENT STATUS  
IDENTIFICATION METHODS-

Kaori YAMANE, Shigeru MORICHI, Hajime INAMURA and Naohiko HIBINO

When a city expands, the suburbs are urbanized and redevelopment takes place in areas that have already been urbanized. In the case of such urban expansion, it is difficult to distinguish between redevelopment in urbanized areas in the city center based only on the classification of agricultural land or urban areas. The purpose of this study is to propose a method for identifying urban redevelopment areas using optical satellite data in developing countries where accurate land use data is not available, and to provide knowledge that will contribute to the decisions of decision makers for future railroad construction in Asia. It was possible to visually and quantitatively grasp the transition of redevelopment areas in urban areas by combining and mapping synthetic variables calculated from the results of discriminant analysis of NDVI and urban area data.

**Key Words:** *urban railway, urban development, optical satellite, NDVI, redevelopment*