

地球環境の衛星モニタリングに関する研究

Research on the satellite monitoring technology for the global environment

(研究期間 平成 14~16 年度)

環境研究部 緑化生態研究室
Environment Department
Landscape and Ecology Division

室長 藤原 宣夫
Head Nobuo FUJIWARA
主任研究官 山岸 裕
Senior Researcher Yutaka YAMAGISHI

We aimed to develop techniques for quantifying the atmospheric CO₂ stocked by trees in urban area, using the IKONOS images and airborne-laser-scanner data. We chose a method using the height and number of trees as the promising one from various methods of the quantifying CO₂. And we tried to calculate the height and the number of trees in Tokyo metropolitan Koganei Park and a neighboring residential area. Then, how to correct the measurement error of the results which were calculated was examined.

〔研究目的及び経緯〕

都市の緑地は、生活にうるおいやすらぎを与える資源として重要である。近年は、植物のCO₂吸収による地球温暖化防止への寄与、植物の蒸発散作用等によるヒートアイランド現象の緩和、避難空間の形成や延焼防止等による防災性の向上など都市緑地のもつ多様な機能が注目されてきており、とくに、植物のCO₂吸収による地球温暖化防止への寄与は、気候変動枠組み条約締結国会議の動向と絡み、大きな期待が寄せられている。

植物によるCO₂の吸収を施策として進めるためには、植生のモニタリングによるCO₂固定量の算定が必要とされるが、住宅地等の小規模緑地が多くの面積をしめる都市緑地においては、調査精度との関係からCO₂固定量算定に航空機以外のリモートセンシングデータを用いることは困難とされていた。しかし、近年、航空写真に匹敵する画像が得られる高分解能人工衛星画像や、航空機搭載型レーザープロファイラー（以下、「航空機LP」という。）が実用化され、緑地を三次元的に計測することが可能になってきているなど、リモートセンシング技術の発展はめざましく、その利用が期待されるようになった。

このような背景のもと、本研究では、衛星データ利用に向けた検討の一環として、高分解能人工衛星IKONOS画像等の利用による都市緑地のCO₂固定量モニタリング技術の開発に着手した。

CO₂固定量の算定には、樹冠面積、材積、樹高と本数などに原単位を乗じる方法や、植生指標NDVIなどから直接算出する方法が提案されているが、都市内緑地に適用する方法としては、樹高と本数、植生指標NDVIから算出する方法が有望と考えられる。

そのため、平成 14 年度は、IKONOS 画像と航空機 LP データから樹高と本数の算定を試行し、その精度を

検証した。その結果、IKONOS 画像と航空機 LP を用いた樹木本数及び樹高の計測は、樹高はやや低めに計測され、樹木本数は大幅に少なく算定される傾向が認められた。しかし、抽出精度を向上させるためには、樹林形態毎に誤差の傾向が異なるため、計測の際の画像処理において必要となる Local Maximum Filtering 処理において、窓領域サイズを変化させるなどの手法改良や現地調査地点等サンプル数を増やした検討が必要であると考えられた。

そのため、平成 15 年度は、現地調査地点を追加し、平成 14 年度データも含めて、これらの誤差の大きさ、方向、分布を確認し、補正方法を検討した。

〔研究方法〕

調査のフローチャートを、図-1 に示す。調査対象地域は、図-2 に示す東京都小金井公園の開園区域（77ha）及び周辺住宅地とした。図中の A~L は、公園管理上のブロック区分、St.1~5 は、平成 14 年度に実施した現地調査地点、丸数字の St.①~⑭は平成 15 年度に実施した現地調査地点である。なお、本研究で使用したデータ及び資料を表-1 に示す。

〔研究結果及び考察〕

(1) IKONOS 画像データによる植生被覆域の抽出

IKONOS 画像（デジタルオルソ・ライト）データを入力し、赤色域と近赤外域の比演算処理によって植生指標 NDVI を算出し、二値化することによって植生被覆域を抽出した（図-3）。

(2) レーザープロファイラーによる地物高マップの作成

航空機LPデータ^{注1)}より作成された表-1 に示す市販の 1mメッシュ及び 2mメッシュのDSM : Digital Surface ModelとDEM : Digital Elevation Modelを入手

注1) 航空機 LP によりレーザーを照射し、樹冠表面で反射して最初に戻ってくるものを first pulse、地表面で反射して最後に戻ってくるものを last pulse とよび、first pulse データを用いて作成されたものを DSM、last pulse を用いて作成されたものを DEM という。

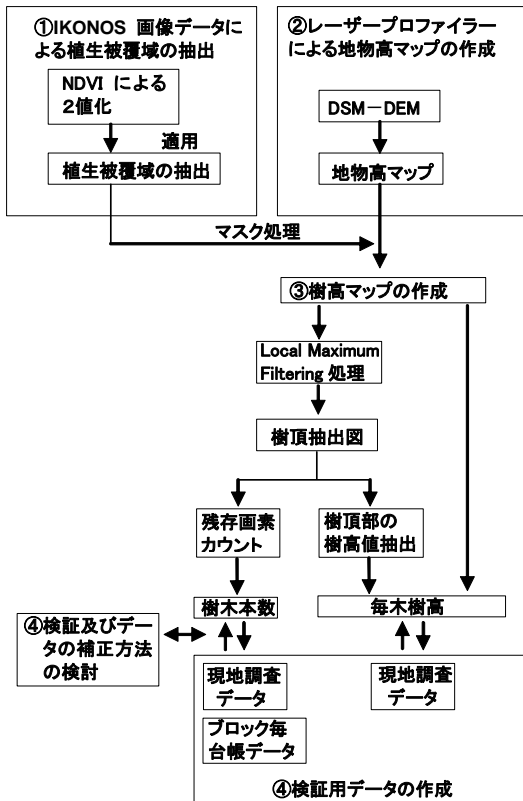


図-1 調査のフローチャート

表-1 調査で使ったデータ及び資料

データ種別	名称	商品名等	本研究における位置づけ	観測年月日	発行元等
衛星画像	IKONOS	マルチスペクトルデジタルオルソライト	高分解能人工衛星	2000.09.21	日本スペースイメージング(株)
レーザープロファイラデータ	Ramse	Level2(DSM)	2mメッシュDSM	2001.09.24~25	国際航業(株)
		Level3(DEM)	2mメッシュDEM	2001.09.24~25	国際航業(株)
	good-3d	Surface Model	1mメッシュDSM	2002.07.26~27	朝日航洋(株)
公園台帳(樹木調査、図面集)	(記載項目)樹木位置、樹種、樹高、幹周、最大枝幅	樹木地上データ	1996~1998	東京都西部公園緑地事務所より借用	

し、DSMとDEMの差分処理によって地物高マップを作成した。

(3) 樹高マップの作成

地物高マップを(1)で得られた植生被覆域でマスクすることによって樹木とそれ以外の地物に分離し、樹高マップを作成した。なお、樹高マップは、1mメッシュと2mメッシュそれぞれにおいて作成した。

(4) 樹木本数・樹高の算定と検証

①検証用データの作成

検証用データは、各St.における現地調査結果に加え、ブロック別に検討するために公園管理者が有している公園台帳に記載されている毎木データを用いた。表-2は、現地調査地点の樹林形態である。また、現地調査結果は、樹高マップと比較可能なようにGISデータ化した。

②樹高の算定及び検証

樹高の算定と検証は、現地調査による単木単位の樹

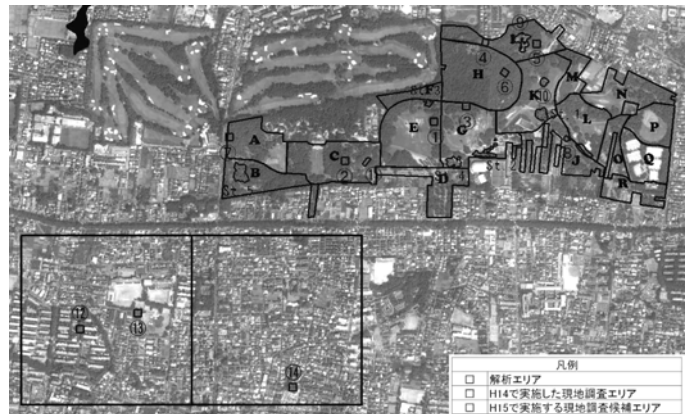


図-2 調査対象地域

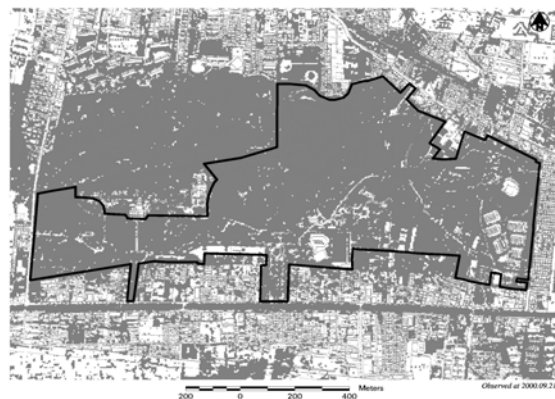


図-3 植生被覆域の抽出

表-2 現地調査地点の樹林形態

年	St.No.	場所	面積	樹林形態							
				単木	樹林	樹林構造			針葉樹	広葉樹	
						単一林	混交林	単層林	複層林		
H14	H14 St.1	公園:K	2,069m ²		○						
	H14 St.2	公園:G	1,779m ²	○							
	H14 St.3	公園:E	723m ²		○	○				○	
	H14 St.4	公園:G	1,974m ²		○		○				○
	H14 St.5	公園:B	3,501m ²		○	○		○			○
H15	H15 St.①	公園:E	30m×30m		○	○		○			○
	H15 St.②	公園:C	30m×30m		○		○		○	○	
	H15 St.③	公園:G	30m×30m		○	○		○			○
	H15 St.④	公園:I	30m×30m		○		○			○	○
	H15 St.⑤	公園:I	30m×30m		○	○		○			○
	H15 St.⑥	公園:H	30m×30m		○		○	○			○
	H15 St.⑦	公園:A	30m×30m		○		○		○		○
	H15 St.⑧	公園:J,L			○						○
	H15 St.⑨	公園:I			○						○
	H15 St.⑩	公園:K			○						○
	H15 St.⑪	公園:C			○						○
	H15 St.⑫	住宅地	30m×30m		○						○
	H15 St.⑬	住宅地	30m×30m		○		○	○			○
	H15 St.⑭	住宅地	30m×30m		○		○		○	○	○
計				6	13	5	8	8	5	5	14

高を対象として行った。

・単木樹高

単木樹高については、現地調査で得られた毎木の樹高値を真値として、IKONOS画像及び航空機LPから得られた樹高マップと比較した。なお、グリッドデータ化する以前の点群LPデータが、現地調査樹木に明らかに当たっていない場合はそのデータは、検証用データから削除した。本数は、平成14年度の125本に

平成 15 年度の 350 本を加えた 475 本である。

その結果、樹高マップでは、低めに計測される傾向にあり、実測値との誤差は、平均で、1m メッシュでは-2.05m、2m メッシュでは-1.60m であり、1m メッシュの方がより低めに計測される傾向にあった（表-3、図-4）。標準偏差は、1m メッシュは 4.01、2m メッシュは 3.88 と 1m メッシュの方がばらつきが大きかった。しかし、平均値の標準誤差は N が 475 本と比較的大きいこともあり、1m メッシュ、2m メッシュともに、0.18 と比較的安定しており、95%の信頼区間でも平均値が 1m メッシュ、2m メッシュとも 1m 以上マイナス側にあることが確認された（表-3）。このような傾向は、レーザーが樹頂にあたらなために生じるものと考えられる。

樹林形態では、1m メッシュ、2m メッシュそれぞれ、単木・樹林、単一林・混交林、単層林・複層林、針葉樹・広葉樹間で比較を行い、平均値の差の検定を行った。その結果、単木・樹林では、1m メッシュ、2m メッシュとも単木の方がより低く計測され有意差が認められた。単一林・混交林では、1m メッシュ、2m メッシュとも単一林の方がより低く計測され、それぞれ危険率 1% で有意差が認められた。単層林・複層林では、1m メッシュ、2m メッシュとも単層林の方がより低く計測され、それぞれ危険率 1% で有意差が認められた。針葉樹・広葉樹では、1m メッシュでは、広葉樹の方がより低く計測されたが、危険率 5% では有意差は認

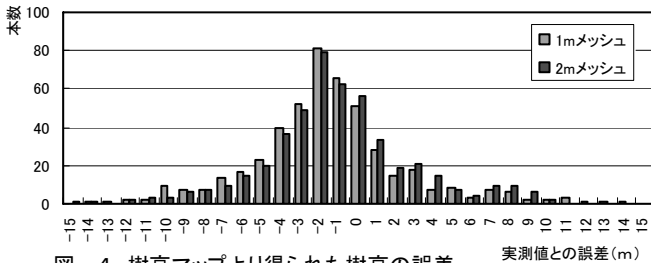


図-4 樹高マップより得られた樹高の誤差

表-3 樹高マップにより得られた樹高の誤差(基礎統計量)

	1mメッシュ	2mメッシュ
平均	-2.05	-1.60
標準偏差	4.01	3.88
平均の標準誤差	0.18	0.18
平均の上側95%信頼限界	-1.68	-1.25
平均の下側95%信頼限界	-2.41	-1.94
N	475	475

表-4 樹高マップにより得られた樹高の誤差(樹林形態別)

対象	使用データ	検証データ	基礎統計量	全樹木	樹林形態								特徴	
					単木	樹林	樹林構造				針葉樹	広葉樹		
							単一林	混交林	単層林	複層林				
単木 樹高	LP1m	現地調査結果 St.1~5、 St.①~④	平均(m)	-2.05	-2.71*	-1.90	-2.99**	-1.21	-2.90**	-0.66	-1.94	-2.10	単木、単一林、単層林が低めに計測され、有意差が認められた。針葉樹より広葉樹の方が低めに計測されたが、危険率5%では、有意差は認められなかった。	
			標準偏差	4.01	3.13	4.16	3.40	4.45	3.72	4.35	3.87	4.08		
			平均の標準誤差	0.18	0.34	0.21	0.28	0.29	0.25	0.33	0.31	0.23		
			N	475	84	391	152	239	217	174	156	319		
	LP2m		平均(m)	-1.60	-2.32**	-1.44	-2.95**	-0.48	-2.48**	-0.14	-2.69**	-1.06		全樹木で、1mメッシュより計測誤差が小さかった。単木、単一林、単層林、針葉樹が低めに計測され、有意差が認められた。
			標準偏差	3.88	3.23	3.99	3.75	3.85	3.84	3.80	4.44	3.46		
			平均の標準誤差	0.18	0.35	0.20	0.30	0.25	0.26	0.29	0.36	0.19		
			N	475	84	391	152	239	217	174	156	319		

注)**1%有意、*5%有意

められなかった。2m メッシュでは、針葉樹の方がより低く計測され、危険率 1% で有意差が認められた。なお、混交林、複層林において、誤差が小さくなっているが、これは、高木層の樹冠に遮られて反射し、高めに計測される低木層の誤差が、高木層の低めに計測される誤差を打消しあつたものと考えられる。(表-4)

・樹高計測誤差補正方法の検討

前述したように、LP による樹高計測は全体に実測値より低めに算出される傾向がある。これを補正するための方法を樹林形態との関連性も含め検討した。x 軸に LP による樹高計測値、y 軸に実測値を取り 2 変数の関係を見、表-5 のように直線による回帰式を作成した。1m メッシュでは、全体で、傾きが 0.8723 と 1 より小さく樹高の低い樹木ほど、よりマイナスの誤差が大きく計測される傾向にあった。これは、樹林形態別に比較した場合も傾きが 0.9 以下のものが多く同様であった。

2m メッシュでは、全体で傾きが、1.008 とほぼ 1 に近く、切片も、1.4937 と、誤差の平均-1.60 に絶対値が近く、LP による樹高計測値にある一定の数値をプラスすることである程度補正が可能であることが示唆された。また、樹林形態別に比較した場合も、傾きが、ほとんど 1 に近いものが多かったが、針葉樹では傾きも 0.858 と 1 より小さかったが、寄与率は 0.3674 と低かった。

③樹木本数の抽出及び検証

樹高マップに対し Local Maximum Filtering 処理を施し、樹木本数を抽出した。Local Maximum Filtering 処理とは、窓領域を走査し、窓領域内の最大値をとる画素のみ残す処理である。残った画素は 1 本の樹木の

表-5 LPによる樹高計測値と実測値との関係

	1mメッシュ		2mメッシュ	
	回帰式	寄与率	回帰式	寄与率
全体	$y = 0.8723x + 3.6254$	$R^2 = 0.639$	$y = 1.008x + 1.4937$	$R^2 = 0.6402$
単木	$y = 0.8844x + 4.4489$	$R^2 = 0.6198$	$y = 1.0437x + 0.9046$	$R^2 = 0.7308$
樹林	$y = 0.8412x + 3.8046$	$R^2 = 0.6121$	$y = 0.9924x + 1.6737$	$R^2 = 0.5601$
単一林	$y = 0.9196x + 3.0022$	$R^2 = 0.6188$	$y = 1.0111x + 1.4509$	$R^2 = 0.4937$
混交林	$y = 0.8069x + 4.0352$	$R^2 = 0.5739$	$y = 0.986x + 1.7291$	$R^2 = 0.5463$
単層林	$y = 0.8819x + 3.2039$	$R^2 = 0.6781$	$y = 0.9658x + 1.7702$	$R^2 = 0.6251$
複層林	$y = 0.7951x + 4.3802$	$R^2 = 0.5226$	$y = 1.0716x + 1.0356$	$R^2 = 0.4822$
針葉樹	$y = 0.9419x + 3.2905$	$R^2 = 0.6489$	$y = 0.858x + 5.3786$	$R^2 = 0.3674$
広葉樹	$y = 0.8415x + 3.7738$	$R^2 = 0.6206$	$y = 1.0183x + 0.7122$	$R^2 = 0.7228$

樹頂部とみなされるため、これをカウントすることで樹木本数が導出される(図-5)。しかし、抽出される本数は窓領域の大きさ(ウィンドウサイズ)に依存すると考えられる。そこで、ウィンドウサイズを変えながら樹木本数抽出を試み、樹木本数抽出誤差の確認を行った。なお、調査は、現地調査に基づく樹木本数を真値とした現地調査地点毎と公園台帳に記載されている樹木本数を真値としたA~Lの公園台帳調査ブロック毎に、樹木本数抽出率の確認を行った。

1mメッシュ、2mメッシュとも、図-6に示すようにウィンドウサイズが大きくなるほど抽出率が指数曲線的に低下する傾向が見受けられたが、抽出率変化曲線の傾きに違いが見られた。すなわち、1mメッシュは傾きが急であり、2mメッシュは緩やかであった。抽出率が100%に最も近くなるウィンドウサイズが、各地点での最適ウィンドウサイズといえる。この最適ウィンドウサイズは、メッシュサイズ毎に違いが見られた。1mメッシュでは、現地調査地点、調査ブロックとも5mが最適であった。2mメッシュでは、現地調査地点、調査ブロックとも4mの最小ウィンドウサイズ^{注2)}が最適であった。

樹林形態別(現地調査地点)では、全体での結果とほぼ同様であったが、単木では、1mメッシュ及び2m



図-5 樹高マップに基づく樹頂抽出図(2mメッシュの例)

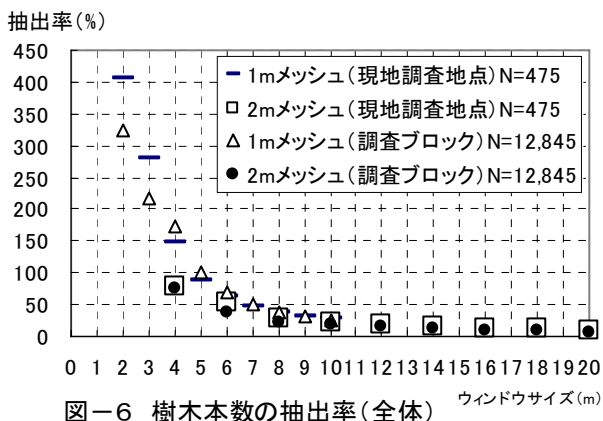


図-6 樹木本数の抽出率(全体)

メッシュともに、6mが最適なウィンドウサイズであった(表-5)。

ブロック別では、2mメッシュでは、ほとんど全てのブロックで、4mの最小ウィンドウサイズが最適であり、かつ過小抽出する傾向にあったが、4mのウィンドウサイズで見ると、表-6は、大まかにブロック毎の樹林形態を区分したものであるが、E、G、Kの樹林が低密度のブロックでは過大抽出する傾向が見られた(表-6、表-7)。1mメッシュでは、4mにピークがあり、それより大きい方向にバラツキがあり、全体では5mで抽出率が100%に近づいている。また、E、G、Kの樹林が低密度のブロックでは、2mメッシュと同様に、4mのウィンドウサイズでは過大抽出する傾向が見られ、最適な抽出率を得るにはそれぞれ、8、9、6mとがウィンドウサイズを大きくする必要があった。(図-6、表-6、表-7)

表-5 最適ウィンドウサイズ及び抽出率(樹林形態別)

樹林構造	樹木本数	メッシュ	最適ウィンドウサイズ(m)及び抽出率(%)				
			3	4	5	6	7
単木	84	1m	448.8	247.6	134.5	100.0	70.2
		2m		146.4		92.9	
樹林	391	1m	241.9	128.4		79.0	56.3
		2m		65.0		43.2	
単一林	152	1m	252.0	132.9		88.8	65.1
		2m		82.9		46.1	46.7
混交林	239	1m	235.6	125.5	72.8	50.6	36.8
		2m		53.6		41.4	
単層林	217	1m	283.4	159.4	101.4	70.5	50.2
		2m		82.0		49.8	
複層林	174	1m	190.2		51.1	38.5	28.7
		2m		43.7		35.1	
針葉樹	156	1m	138.5	80.1	51.9	43.6	36.5
		2m		67.3		48.7	
広葉樹	319	1m	347.0	183.4	106.9	74.0	50.5
		2m		85.3		53.6	

表-6 樹林形態区分(ブロック毎)

ブロック	単層林		複層林	
	高密度	低密度	高密度	低密度
ブロック	B、D、F	A、C、E、G	H、I、J、L	Kブロック

表-7 最適ウィンドウサイズ及び抽出率(ブロック別)

ブロック	台帳樹木本数	メッシュ	最適ウィンドウサイズ(m)及び抽出率(%)							
			3	4	5	6	7	8	9	
A	782	1m	205.8	158.8	91.4	61.3	42.8	33.1	25.3	
		2m		62.7		29.4		18.5		
B	1,096	1m	243.3	111.8	64.6	44.6	32.1	23.4	17.5	
		2m		51.0		29.2		15.1		
C	860	1m	318.1	196.2	113.8	77.6	54.2	44.4	36.2	
		2m		87.9		48.3		27.6		
D	685	1m	152.8	87.6	55.6	40.1	31.4	25.7	20.7	
		2m		41.2		28.3		16.8		
E	583	1m	316.5	453.7	256.8	178.4	123.3	99.1	78.4	
		2m		141.3		45.5		28.3		
F	494	1m	132.6	68.6	41.7	33.2	23.9	19.4	15.4	
		2m		52.8		27.9		14.8		
G	400	1m	463.8	549.5	318.0	209.8	148.0	119.5	91.8	
		2m		190.3		80.0		47.5		
H	3,588	1m	136.8	72.1	41.4	29.9	21.3	17.4	14.0	
		2m		40.5		27.2		13.7		
I	1,588	1m	122.1	67.3	40.9	28.7	21.1	16.9	13.0	
		2m		37.3		23.3		12.7		
J	1,255	1m	111.8	101.0	58.6	39.5	27.8	21.4	16.8	
		2m		47.6		21.8		13.5		
K	672	1m	223.2	290.8	164.7	115.2	76.5	60.7	48.4	
		2m		111.5		36.0		22.6		
L	840	1m	145.7	144.9	85.4	58.2	38.8	28.8	23.0	
		2m		57.6		26.3		13.8		
小計	11	1m	1	5	3	1		1	1	
		2m		11		1				

注2) 1mメッシュ、2mメッシュとも窓領域を走査するためには、最低4コマ必要であり、ウィンドウサイズは、1mメッシュでは2m×2m、2mメッシュでは4m×4mが最小となる。