

森林計画学会誌 別刷

*Reprinted from*

Japanese Journal of Forest Planning

Vol. 37 No. 1

March 2003

## 論文

# 京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発 —地上レーザスキャナによる点群モデルを用いた計測手法の検討—

米 康充\*\*\*・小熊 宏之\*・山形与志樹\*

米 康充・小熊宏之・山形与志樹：京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発 —地上レーザスキャナによる点群モデルを用いた計測手法の検討— 森林計画誌 37:21~30, 2003 京都議定書に関わる吸収源モニタリングシステムの構築を行うことを視野に入れ、地上設置レーザスキャナによる林分調査方法の検討を行った。スキャン計測点の点群データを円柱でモデリングする手法を用いて、本数・胸高直径・立木位置の測定精度・精度の検証を行った。立木位置の精度は8cm以内であった。DBHについてはスキャナに近い立木であれば精度1cm、精度4.3cm以内で計測可能であった。よって、本手法は小面積の林分調査に利用可能であり、リモートセンシングのツールとして小面積の林分を数多く調査する場合に有効であると考えられた。しかし、計測可能木の割合は20~80%程度であり、材積・炭素重量を求めるには問題があった。今後、不可視木の影響を除去する方法の検討や、航空機センサーなどと連携した調査手法の検討が必要であると考えられた。

Yasumichi YONE, Hiroyuki OGUMA and Yoshiki YAMAGATA : Development of Measurement System for the Carbon Sinks under the Kyoto Protocol-Measurement of 3D Imaging Sensor Data using the Method of Cylinder Reconstruction Model from Range Points. Jpn. J. For. Plan. 37:21-30, 2003

To develop a monitoring system for the carbon sinks under the Kyoto Protocol, we examined a method of forest stand measurement using a 3D imaging sensor. The tree number, DBH and coordinate of trees were measured by the method of cylinder reconstruction, and the accuracy and precision were examined. The precision of coordinate was less than 8cm. In a short distance from the scanner, the precision of DBH was less than 1cm, and accuracy was less than 4.3cm. These results of coordinate and DBH had accuracy and precision sufficient to measure the forest stand as for as in a small area. Thus, this method is effective as a tool for remote sensing to investigate stands in small area and many sites. However, since the observed tree number was only 20-80% of the actual value, the estimated stem volume and carbon weight were not reliable. The next step of this study is to develop a method to remove the influence of non-counted trees, and combination with airborne sensing technology.

### 1. はじめに

1997年、気候変動枠組み条約第3回締約国会議(COP3)では、温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書が採択された。さらに、COP6再開会合(2001年7月;ドイツ・ボン)においては、京都議定書の実施ルールに関する「包括的合意」という名の部分合意(以下、ボン合意)が採択された。さらに、COP7において批准のために必要となる運用細則の詰め交渉がなされ、各国が2002年の発効に向けて批准のための準備をすすめている。(山形ら, 2001a)

この交渉のプロセスの中で、特に大きな課題として継続的に議論されたのが、森林・農業の吸収源活動の

取り扱いである。ここで、日本政府は1990年比3.7%の吸収量を目指していたが、それを上回る約3.9%がボン合意で認められた。

ところで、このような吸収源を算入するにあたっての課題として挙げられるのは、モニタリングやインベントリー評価体制の構築である。その主な内容は、排出・吸収量の推計をするための国内制度を2007年までに整備しなければならないこと、排出・吸収インベントリーに京都議定書を遵守したことを明らかにする情報を含めなくてはいけないこと、専門家審査チームがインベントリー情報をレビューすることである。

このように、炭素吸収量がクレジットとして認められる可能性があることや、専門家審査チームのレビュー

\* 国立環境研究所 National Institute of Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki 305-8506  
\*\* 株式会社パスコ PASCO CORPORATION, Meguro-ku, Tokyo 153-0043

に適応する必要があることなどから、吸収源モニタリングシステムを構築し、排出・吸収源インベントリーを詳細に精度良く整備・評価していく必要がある。ここで吸収量評価手法に不確実性がある場合、セーフサイドまで割り引くことになっていることなどから、精度よく評価を行う手法を開発することで、吸収量が最大限評価される様にする必要がある。ただし、吸収量を精度よく評価できたとしても、そこで得られた吸収量の価値以上に評価・整備にコストがかかれば精度を向上させる意味がない。よって開発する手法には精度と共に低コスト化が必要となり、山形ら (2001b) はこのような方法としてリモートセンシングの計測手法の役割を論じている。

リモートセンシングによるデータは、広範囲・低コスト・均質・定期的なデータの取得が可能であり、目的の空間スケールに応じて衛星によるデータ、航空機によるデータが利用できる。現地計測のデータは、これらリモートセンシングによるデータ解析のために必要な裏付けとなる。以上のことからリモートセンシング計測の精度を上げる必要があるが、そのためには、グラウンドトゥールズとしての現地計測をできるだけ

多く行うことが重要と考えられる。しかし、現地計測を従来の手法で行うには時間と労力がかかり、多くの計測を行うのは困難であるため、現地計測を容易に行う方法を検討する必要がある。

そこで本研究では、現地計測の中でも「リモートセンシングのグラウンドトゥールズとして使用する」こと、「炭素蓄積量推定を行う」ことを目的としたプロット調査を容易に行う方法を検討することとした。「リモートセンシングのグラウンドトゥールズとして使用する」ために、リモートセンシングで取得されたデータと対応付けをする必要があり、そのためには立木位置の測定が必要になる。また、「炭素蓄積量推定を行う」ためにはバイオマスとの相関が強く、またそのための変換の資料 (材積表等) が多くある胸高直径の測定が重要となる。

そのような方法としては、回転カメラによる方法 (鷹尾, 1991)、魚眼レンズ撮影による方法 (米, 1995)、レーザープロジェクターによる方法 (Tanaka *et. al.*, 1998)、レーザーポインターによる方法 (菅藤, 1999) などが試みられてきた。さらには近年計測用として用いられるようになってきた地上設置レーザスキャナを用



図-1 Cyrax2500概観

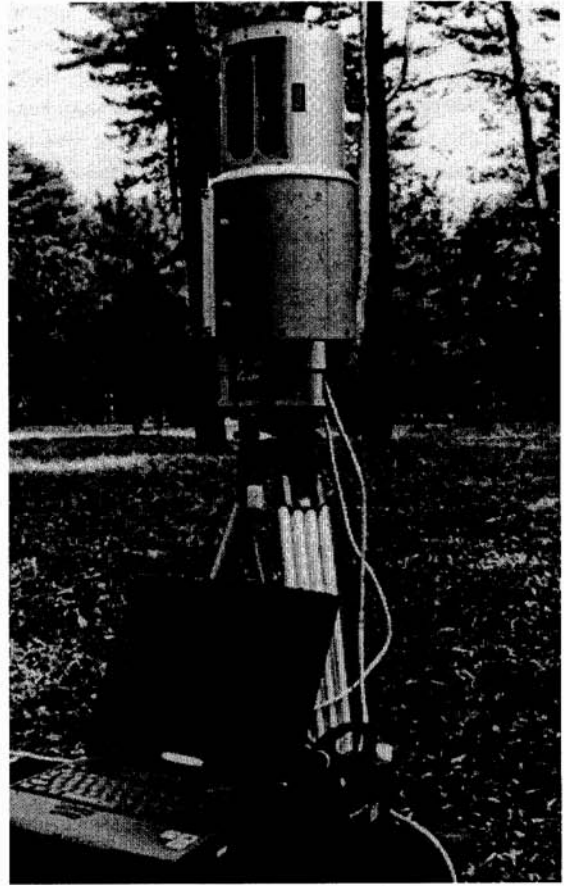


図-2 RIEGL LMS-Z210概観

い、林冠高調査を行う方法（大政ら，2001 吉村，2001），林分調査を行う方法（林ら，2001）が試みられている。地上設置レーザスキャナによる方法は，データ取得の容易さから林分の遠隔計測装置としては最も有望な方法の一つであると考えられる。

しかし，林らの方法では，立木断面のエッジを抽出する方法でスキャナ本体の設置高と同じ高さの立木直径の計測に成功しているものの，スキャナの設置高以外は計測できないため，傾斜地での胸高直径の計測や上部直径などの計測には利用できない。そこで，本研究ではスキャナにより計測された点群を円柱でモデル化する手法を試み，胸高直径および立木位置の計測精度の検証を行うこととした。

## II. 使用したスキャナ

データ取得には，Cyra Technologies社Cyrax2500（図-1）およびRIEGL社LMS-Z210（図-2）を使用した。表-1に両スキャナの主な特徴を表す。両者の特徴を比較すると，LMS-Z210は広範囲のデータ取得を高速に取得することができるのに対し，Cyrax2500は限られた範囲を高精度に取得できるのが特徴である（田代，2001）。また両レーザスキャナには，スキャナ操作及びデータ取得のためのソフトウェアがあり，データの解析・処理などの機能も備えている。Cyrax2500用ソフトウェアはCyclone3.0，LMS-Z210用ソフトウェアは3DRiSCANである。3DRiSCANは，

複数観測データの座標登録・座標変換・データフィルタ機能を持つが，3Dモデル化機能は持っていない。Cycloneは，これらの機能に加え汎用の3Dモデル化機能を装備している。今回計測された点群データはCyclone・RIEGL共にCyclone3.0によって3Dモデル化処理を行った。

## III. 調査地

調査は，茨城県つくば市にある国立環境研究所敷地内のアカマツ林（*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.）において行った。林内に60m×45mのプロットを設定し，DBH（胸高直径）8cm以上の個体について立木位置，DBHを測定した。また，DBH階級別の代表木について樹高を測定した。DBHは調査者の胸高（地上約1.2m）の位置にてエスロン製巻尺を用いて測定し，立木位置はトータルステーションを用いて計測した（図-3）。トータルステーションの反射鏡は立木胸高位置の一定方位に密着させ計測した後，DBHを用いて立木中心位置を算出した。樹高の測定にあたっては，樹高測定器（OPTI-LOGIC社製LASER RANGEFINDER 400LH）を用いた。

調査地のha当たり本数・材積は374本/ha・278m<sup>3</sup>/haであった。林床は，定期的な草刈りにより強度に刈り払われているため，立木の根元までの見通しは良い。

表-1 Cyrax2500およびLMS-Z210の特性比較

システム	Cyrax2500	LMS-Z210
開発元	Cyra Technologies	RIEGL Laser Measurement Systems
位置精度	±6mm (1.5m~50m)	25mm
距離精度	±4mm	標準±25mm
計測範囲	最大100m (1.5m~50m推奨)	2m~350m
視野角 (FOV)	40° (水平) × 40° (垂直)	330° (水平) × 80° (垂直)
Laser pulse	1000points/sec.	MAX20000points/sec.
Laser Spot Size	≤6mm (0m~50m)	≤50mm (0m~50m)
波長	532nm	900nm
安全クラス	class 2	class 1
ソフトウェア	Cyclone3.0	3DRiSCAN

出典：田代（2001）に加筆

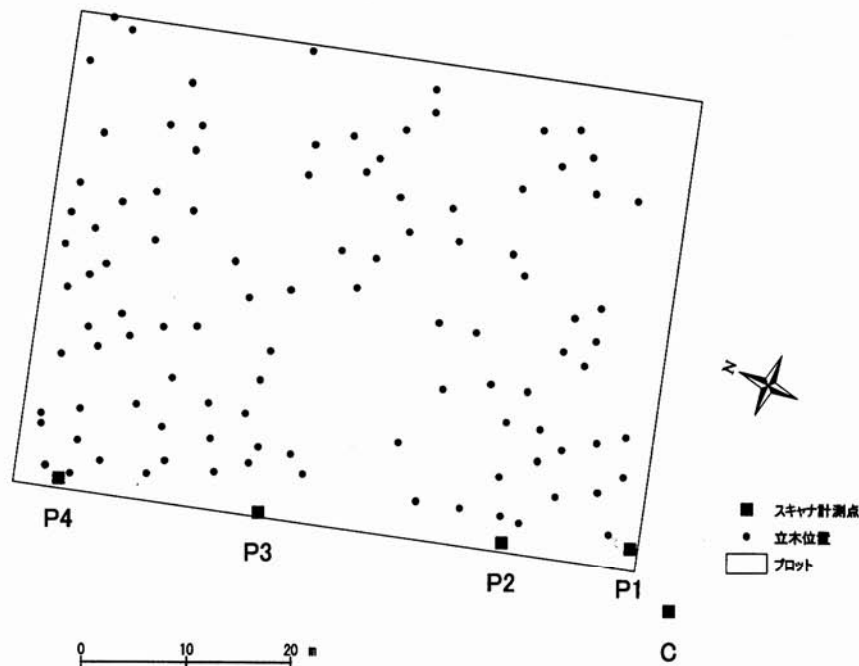


図-3 立木位置およびスキャナ観測点

#### IV. スキャナ計測結果の精度

##### 1. 方法

スキャナ計測は、機種による差異、スキャン解像度による差異を検証するためにCyrax2500（以下Cyraxと略す）とRIEGL LMS-Z210（以下RIEGLと略す）を調査地の図-3上の点Cおよび点P1に設置し計測を行った。RIEGLについては計測時の角度分解能による差異を検証するため、0.2gon（=0.18°）・0.08gon（=0.072°）の2つのモードにて計測を行った。また、1点からの計測では立木の陰になり、背後の立木が測定されないことが予測される。このため、複数点からの計測によって、計測可能木・精度にどのように変化するか検討するため、RIEGLについて4点（P1・P2・P3・P4）に設置して0.2gonモードで計測を行った。また、z座標はP1の観測高を1.2m（胸高）として、各点の測定を行った。データの解析には、CycloneおよびArcView、ArcGISを用いた。具体的な手順を次に示す。

- 1) スキャナ計測を行う。
- 2) 点群のデータより、地上高0.2m～2.2mを抽出する。
- 3) 抽出した点群データを、円柱モデルで近似する。
- 4) 近似した円柱の直径を胸高直径とする。また、円柱の中心線とz=1.2m平面との交点座標を立木位置とする。

5) 毎木調査による立木データに対して、スキャナ計測による立木データのうち最も近い立木を対応する立木とする。

6) 上記5)の結果、以下のものは除外する。

- ・対応するデータセット間の距離が1m以上のものは異なる立木と判断し、除外する。
- ・計測結果のDBHが1m以上の場合は、異常値として除外する。

7) 残ったスキャナ計測立木のx, y, DBHに対して、対応する毎木調査による計測立木のx, y, DBHを真値とみなし、双方間の誤差を求める。

計測の精度の評価には誤差の標準偏差を、確度の評価には誤差の平均を用いた。

##### 2. 結果と考察

計測結果の例を図-4に示す。

この例では、P1およびP2からの観測結果をそれぞれ赤と青の点群で三次元表示している。立木の胸高部分のみならず樹幹上部、枝、樹冠の一部まで座標が取得されていることがわかる。ただし、立木の陰になり計測できない部分もある。黄色で示した円柱は、0.2～2.2m部分の点群を円柱モデルで近似した結果である。

機種および分解能の違いによる計測結果を表-2に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を図-5に示す。

胸高直径の測定誤差は、観測点から計測対象立木までの距離（以下対象範囲とする）にかかわらずCyraxの確度が1cm以内、精度が3.3cm以内となっている。これに対し、RIEGLは対象範囲20m未満で確度1cm以内、精度も4.3cm以内となっているものの、20m以上の範囲で確度・精度とも低下している。また、RIEGLの0.2gonと0.08gonを比較すると、0.08gonの方は計測可能木が多かったが、精度は悪くなっていた。0.2gonでは解像度の荒さから立木と判断できなかったものの中にも、0.08gonでは立木と判断できるものが存在したが、このような立木は小径木や他の立木の背後にあり、一部しか計測されていないものが多いため、精度の悪化を引き起こしたと考えられる。

計測本数率は、いずれも対象範囲20m未満で約70%観測できてはいるが、それ以上の範囲では半数以上が観測できていなかった。

位置精度は、2cm～8cm程度であり、特にCyraxでは4cm以内に収まっていた。

次に、測定地点の違いによる計測結果を表-3に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を図-6に示す

胸高直径は、対象範囲20m以内では精度が3.3cm以内であるが、対象範囲が広がるとP1を除き、確度・

精度ともに低下している傾向が見られる。計測本数率は対象範囲20mまでで、P1が約70%であり、他は約50%となっている。これはP1が林地と開放地の境界部であり視通が良いため、計測本数率が上がったと思われる。

次に、複数の観測点の点群データを用いて解析した計測結果を表-4に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を図-7に示す。

複数計測点からの観測により、計測本数率が向上しており、4箇所からの計測では、68.4%が計測可能であった。胸高直径の確度は3.6cm、精度は4.3cmとなった。また、計測対象範囲をそれぞれの計測点から20m未満とすることにより、計測本数率は84.8%になり、胸高直径の確度・精度も向上した。

以上のことから、胸高直径は、Cyraxの場合対象範囲が60m程度でもある程度の精度を持つが、RIEGLの0.08gon、0.2gonの場合のいずれも対象範囲を20m程度とするのが望ましいと考えられる。また、複数の観測点からの計測の場合も、対象範囲を各計測点から20m程度とすることで、計測本数率・胸高直径測定精度の向上を図ることができた。しかし、この場合でも計測本数率は約80%であり、また、確度がプラス方向にずれる傾向がある。



図-4 レーザスキャナによる観測結果の例

表-2 機種別の計測結果

機種および分解能	対象範囲	計測本数	計測本数率	位置精度 (cm)	DBH測定誤差 (cm)	
					確度	精度
Cylax	~ 20m	8	72.7%	1.7	-1.0	0.1
	20m ~ 40m	9	45.0%	3.3	-0.1	3.3
	40m ~ 60m	10	22.2%	2.8	0.5	2.1
Regle 0.08gon	~ 20m	13	72.2%	4.2	0.6	4.3
	20m ~ 40m	8	27.6%	2.6	2.4	8.4
	40m ~ 60m	5	11.1%	7.7	15.5	4.3
Regle 0.2gon	~ 20m	13	72.2%	4.3	0.7	3.3
	20m ~ 40m	7	24.1%	2.3	4.0	1.9
	40m ~ 60m	2	4.3%	5.1	-2.7	6.5

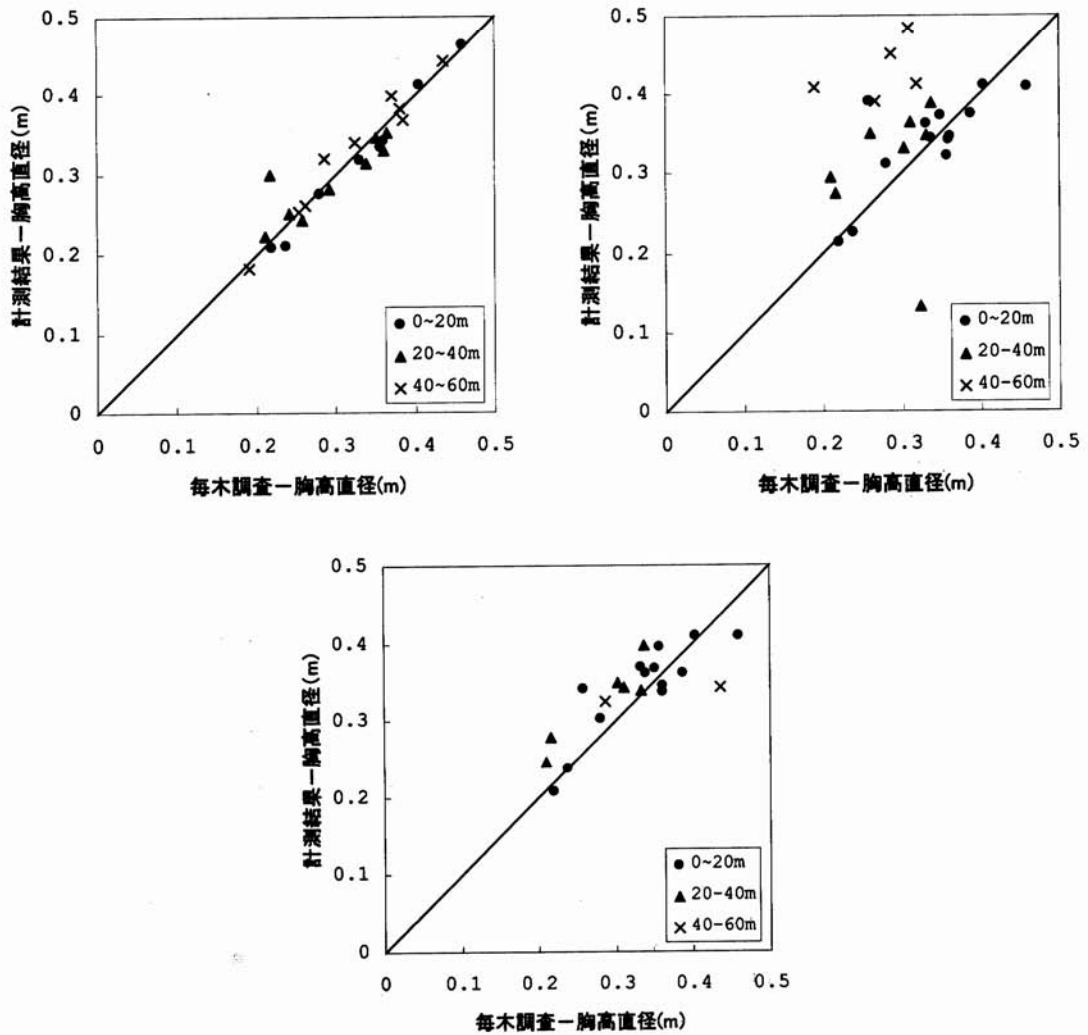


図-5 胸高直径の各計測値と実測値の比較  
(左: Cylax, 右: RIEGL 0.08gon, 下: RIEGL0.2gon)

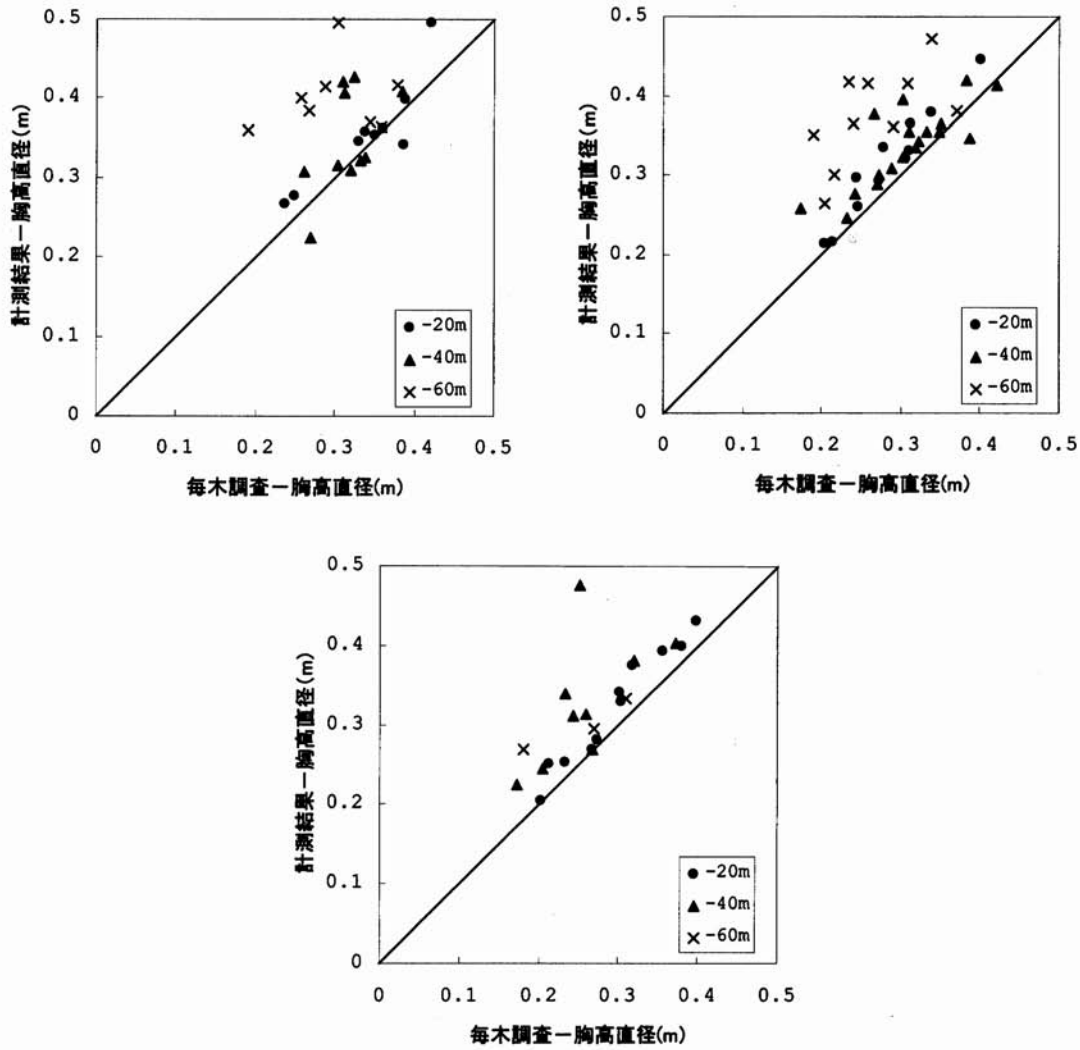


図-6 RIEGL0.2gonモードによる胸高直径の各計測値と実測値の比較  
(左:P2, 右:P3, 下:P4)

V. 材積・炭素重量の精度

1. 方法

材積は樹高曲線を作成(図-8)し, 下記の材積式(林野庁計画課編, 1970)を用いて求めた。

$$\log v = 1.863288 \log d + 1.004738 \log h - 4.249808$$

(4 ≤ d < 32)

$$\log v = 1.895653 \log d + 0.811988 \log h - 4.060353$$

(32 ≤ d < 42)

$$\log v = 2.002385 \log d + 0.888616 \log h - 4.347438$$

(42 ≤ d)

炭素重量の算出にあたっては, 松本ら(2001)の推定方法に従い容積密度の平均値, 拡大係数を用い次式で求めた。

$$Wc = \rho_0 \times V \times E \times C$$

Wc: 炭素重量 (tC)

$\rho_0$ : 容積密度 (t/m<sup>3</sup>, アカマツ 0.405)

V: 幹材積 (m<sup>3</sup>)

E: 拡大係数 (針葉樹: 1.7)

C: 炭素含有係数 (tC/t: 0.5)

2. 結果

ha当たり本数・材積・炭素重量は表-5のようになった。プロット全体でのスキャナによる計測結果は, 材積・炭素重量が75%と過小に計測されていた。プロットの中で計測点に近い20m部分のみに限った場合の計測結果は, 101.9%となった。



表-3 RIEGL0.2gonモードによる地点別の計測結果

機種	対象範囲	計測本数	計測本数率	位置精度 (cm)	DBH測定誤差 (cm)	
					確度	精度
P 1	~ 20m	13	72.2%	4.3	0.7	3.3
	20m ~ 40m	7	24.1%	2.3	4.0	1.9
	40m ~ 60m	2	4.3%	5.1	-2.7	6.5
P 2	~ 20m	10	47.6%	5.8	1.3	2.9
	20m ~ 40m	13	29.5%	2.5	4.8	5.8
	40m ~ 60m	4	12.1%	1.8	13.2	6.0
P 3	~ 20m	14	56.0%	2.4	3.4	2.3
	20m ~ 40m	25	39.1%	4	4.0	5.1
	40m ~ 60m	0	0.0%	-	-	-
P 4	~ 20m	15	55.6%	2.8	3.7	2.6
	20m ~ 40m	6	19.4%	3.9	8.7	7.1
	40m ~ 60m	2	4.8%	8.1	5.6	3.1

表-4 RIEGL0.2gonモードによる複数観測点の点群データを用いた計測結果

機種	対象範囲	計測本数	計測本数率	位置精度 (cm)	DBH測定誤差 (cm)	
					確度	精度
P 1	60m × 45m	22	21.8%	4.1	1.9	4.6
P 1・P 2	60m × 45m	42	41.6%	4.9	3.6	5.4
P 1・P 3	60m × 45m	51	50.5%	3.5	2.8	4.9
P 1・P 4	60m × 45m	46	45.5%	5.2	2.9	5.0
P 1~P 4	60m × 45m	69	68.4%	3.8	3.6	4.3
P 1~P 4	60m × 20m	44	84.8%	4.2	2.3	3.5

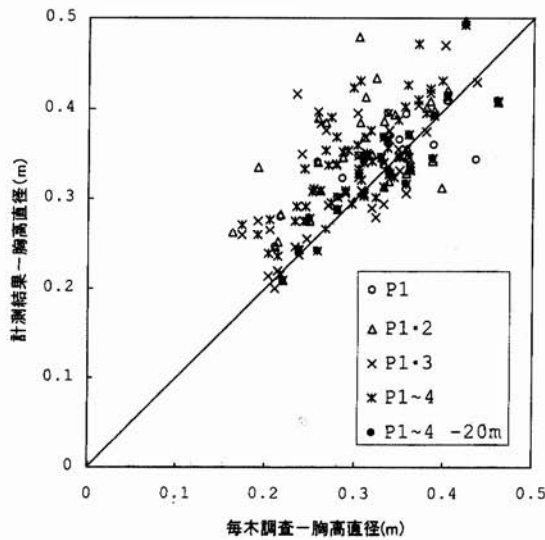


図-7 RIEGL 0.2gonモードによる胸高直径の各計測値と実測値の比較

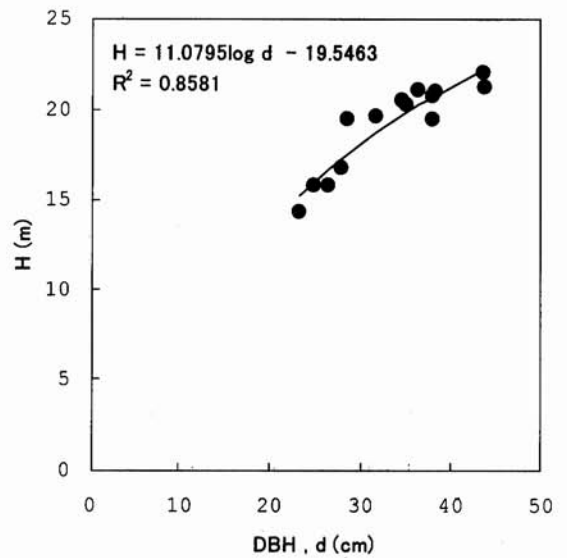


図-8 調査地の樹高曲線

## VI. 考 察

DBHの計測精度については、Cyraxが高い精度で計測可能であった。RIEGLの場合は解像度にかかわらず、スキャナ本体から20m範囲内では高い精度で計測可能だが、20m以上の範囲では精度が落ちる傾向があった。また確度もずれる傾向があった。RIEGLの場合、解像度が0.08gonの場合でも50m地点でのレーザーのピッチ間隔は6.3cmに、0.2gonの場合は、15.7cmになる。このような機器の制約の中、今回得られた測定誤差は15.7cm以下に納まっており、複数観測点からの点群データの合成および円柱による近似の方法は、精度向上に効果があったと考えられる。

確度のずれの原因としては、機器の系統的誤差、モデル化時の誤差が考えられるが、林らのエッジ法ではこのような確度のずれは報告されていない。よって、機器の誤差ではなく、モデル化時の誤差である可能性がある。Cycloneにおけるモデル化は、点群データにモデルを近似させることで行う。たとえば、観測点からの距離が50mでDBH30cmの立木を0.08gon解像度で測定した場合、立木上水平方向に照射されるレーザーの点数は4～5点である。点群の数が少ないと、個々の計測点の誤差が、モデルの近似結果に大きな影響をおよぼすと考えられる。また、計測対象物が立木という表面に凹凸があり形状も一定していない物体であることから、モデル化時に誤差が発生した可能性もある。このことから、今後林分調査に適応した点群モデル化手法を検討する必要があると考えられる。

立木位置座標については、誤差数cmであったが、通常の巻き尺を使った立木位置測定ではこれ以上の誤差が生じると思われるので、本手法は有効な手段であると考えられる。

材積・炭素重量の推定については、プロットの中で、計測点に近い20m部分のみに限った場合、精度が向上していた。しかしこれは、本数の過小評価傾向と胸高直径の過大評価傾向で相殺された結果であると考えられ、必ずしも精度良く計測されたとは考えられず、今後の検討が必要であろう。

次に、CyraxとRIEGLの林分調査への適応性を考える。立木位置調査については、CyraxとRIEGLのどちらを用いても精度良く計測できると考えられるが、胸高直径を計測する場合はCyrax程度の高精度・高密度が必要であると思われる。ただし、Cyraxは視野角が狭いため広範囲の林分調査にはRIEGLの方が適している。近年、RIEGLの精度・密度を高めた製品が発売されており、双方の特徴を兼ね備えたものとして期待される。また今回の結果ではスキャナ本体から20m範囲内では高い精度で計測可能であった。均一な林分では、この範囲内の調査でもある程度の精度は得られると考えられる。しかし、不均一な林分では、この範囲では不十分であると予測される。その様な林分で調査する場合は、調査時にあらかじめ空中写真等で林分状態を観察しておき、ランダムな点にスキャナを設置するのか、規則的に配置して大きなプロットとして調査を行うのか計画をたてる必要があると考えられる。

また、材積・炭素重量を精度良く求める為には、樹高の計測を行うか上部直径の計測が必要である。地上設置スキャナでは、梢端部を見通し特定することが困難なため、この樹高を取得することは難しい。しかし、近年航空機搭載型ライダーにより、地表面の標高と林冠面の標高を計測する手法があり(たとえばHyppä, 2001, 米ら, 2002など)、これを用いて樹高を測定することは可能と思われる。また、上部直径の計測は、今回用いた点群のモデル化手法により計測可能と思われる。したがって、さまざまな高さの上部直径を計測し、それぞれの断面積合計を算出することによって、材積表等のデータを用いなくても林分材積の計測を容易に行うことができる可能性がある。ただし、効率良く計測するためには、樹幹の形状特性にあわせたモデリング手法の開発が必要であろう。

## VII. ま と め

衛星・航空機によるリモートセンシングのためのグラウンドトゥールズとしての林分調査を、簡便にかつ精度よく計測する方法の開発を目的として、地上レー

表-5 ha当たり本数・材積・炭素重量

調査方法	プロット範囲	本数 (/ha)	材積 (m <sup>3</sup> /ha)	炭素重量 (tC/km <sup>2</sup> )
毎木調査	60m × 45m	374	276.9	9532.3
	60m × 20m	433	333.9	11494.8
RIEGL P 1～P 4 (0.2gon)	60m × 45m	256	208.7	7185.7
	60m × 20m	367	340.2	11710.9

ザスキャナ計測および点群を円柱モデル化する手法で精度検証を行った。また、計測結果より材積・炭素重量を算出した結果の精度の検討も行った。立木座標は良い精度で計測可能であった。立木毎の樹高や樹冠幅などを計測・評価するために、航空機や高解像度衛星によるリモートセンシングを用いることを想定した場合、トゥルース調査には計測結果と立木個体との対応付けが必要と考えられ、このためには立木位置の正確さが必要である。この点、本手法は立木位置を精度良く計測できるため、有効な手段であると考えられた。また、DBHについてもスキャナから約20m以内の範囲であれば良い精度で計測することができるため、トゥルースとして小面積の林分を数多く調査する場合にも有効であると思われた。しかし、計測可能木の割合については不可視木の影響が大きく、そのまま材積・炭素重量を求めるには問題があった。

以上の様な条件はあるが、地上設置スキャナによる計測そのものは簡便であるため、実用化にむけてこれらの問題を解決していく必要がある。今後地上設置スキャナによる林分調査の実用化には以下の点に留意する必要があると考えられる。

- 1) 胸高～上部に至る点群を立木の特性にあわせてモデル化する手法の検討
- 2) レーザスキャナの特性に合わせたPoint Sampling法の検討
- 3) 傾斜地や下層植生が密な林分での計測方法の検討  
また、吸収源モニタリングシステムとして構築するためには、各種航空機センサーや衛星画像等のデータとのリンクやこれらデータへの外挿手法の検討を行っていく必要がある。

## 謝 辞

Cyraxのデータの取得、Cyrax・RIEGLのデータ処理に関しては、株式会社バスコの田代和彦氏・洲浜智幸氏に、毎木調査に際しては、国立環境研究所の武田知巳氏・中路達郎氏のご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

## 引用文献

大政謙次・吉見健司・沖一雄・日坂章・植西マイケル  
高照 (2001) 可搬型イメージングライダーによる樹木の  
リモートセンシング—樹冠高の推定—, 日本リモ  
ートセンシング学会学術講演会論文集 30: 131-132.  
林 真智・沼田洋一・小熊宏之・山形与志樹 (2001)  
リモートセンシングデータを利用した林分構造の計  
測. 写真測量とリモートセンシング 40 (3): 41-46.

J. Hyppä, O. Kelle, M. Lehikoinen, and M. Inkinen  
(2001) A Segmentation-Based Method to Retrieve  
Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height  
Models Produced by Laser Scanners. IEEE  
Transactions on Geoscience and Remote Sensing  
39: 969-975.

菅藤 武 (1999) 赤色レーザーポインターを利用した  
樹幹の任意高指示・測定装置および任意直径の遠隔  
的測定装置の考案. 日林誌81 (1): 85-88.

松本光朗 (2001) 日本の森林による炭素蓄積量と炭素  
吸収量, 森林科学 33: 30-36.

林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表東日本編, 日本林  
業調査会, 東京.

鷹尾 元 (1991) 回転カメラによる立木位置と胸高直  
径の測定精度. 日林論102: 139-142.

T. Tanaka, J. Yamaguchi, and Y. Takeda (1998)  
Measurement of forest canopy structure with a  
laser plane range-finding method -development  
of a measurement system and applications to  
real forest. Agricultural and Forest Meteorology  
91: 149-160.

田代和彦 (2001) 地上据え置き型レーザ三次元計測.  
画像による三次元計測: 27-37 社団法人日本写真  
測量学会, 東京.

山形与志樹・山田和人 (2000) 京都議定書における吸  
収源プロジェクトに関する国際的動向. 国立環境研  
究所地球環境研究センター, 茨城県.

山形与志樹・小熊宏之・土田 聡・関根秀真・六川修  
一 (2001a) 京都議定書で評価される吸収源活動の  
モニタリングと認証に関わるリモートセンシング計  
測手法の役割. 日本リモートセンシング学会誌, 21  
(1): 43-57.

山形与志樹・石井敦 (2001b) 京都議定書における吸  
収源: ポン合意とその政策的含意. CGER-REPORT:  
19pp. 国立環境研究所, 茨城県.

米 康充 (1995) 魚眼レンズ撮影による森林調査—平  
地林における立木位置, 胸高直径, 樹高の測定—.  
日林論106: 167-168.

米 康充・小熊宏之・山形与志樹 (2002) 京都議定書  
に関わる吸収源計測システムの開発—航空機Lidar  
によるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測  
精度の検証—. 日本リモートセンシング学会誌, 22  
(5): 531-543.

吉村充則 (2001) 林冠プロセスと空間スケール. 科学:  
1210-1216.

(2002年2月4日受付)

(2003年2月3日受理)