

## B-5 1 温室効果ガスの人為的な排出源・吸収源に関する研究

### (1) CO<sub>2</sub>の排出・吸収に関する研究

#### ⑤温・亜寒帯林のバイオマス量計測に関する研究

研究代表者	森林総合研究所林業経営部	天野正博
(委託先)	愛媛大学農学部	末田達彦
	平成8-10年度合計予算額	10,896千円
	(平成10年度予算額	4,996千円)

#### 要旨

京都議定書において吸収源の評価を排出量削減の目標に組み入れることが定められたのに伴い、吸収量の指標となる炭素ストックの変化量は森林バイオマスの変化量を計測することによって算出されることになった。一方、同議定書は炭素ストックの変化量を計測するにあたって透明かつ検証可能な方法を採用することを要求している。バイオマス量を計測する通常の方法は、幹材積を計測した後に一定のパラメータを掛けてバイオマス量に換算して求めている。この値についてクロスチェックを行えるようなバイオマス計測方法を開発し、得られたデータの検証を行う必要がある。そこで、航空機に搭載した赤外線レーザー測距儀を用いて得られた森林の断面プロフィールから直接かつ広域にバイオマス量を計測する方法を開発し、幹材積にパラメータを掛けて簡易に算出したバイオマス量のクロスチェックを行えるような方法を検討した。具体的にはカナダの亜寒帯林を対象に調査を実施するとともに、バイオマス量の算定プロセスを明らかにした。

調査対象には、カナダ、アルバータ州中部のEdmontonからサスカチュワン州北部のCluff Lakeに至る南北約600kmのトランセクトをとり、この区間で航空に搭載した赤外線レーザー測距による植生断面の測定とその検証のための地上調査を行った。航空レーザー測距システムは新しいリモートセンシングの方法で、航空機に搭載したレーザー測距儀により航空機から地表までの対地高度を高頻度で得ることができる。地表面プロフィールには、純然たる地面(地形面)からの反射と、植生表面からの反射が混在しているが、前者だけを抽出したうえで連続的な地形面を推定し、これを地表面プロフィールから差し引くことで、植生断面のプロフィールを得た。航空レーザー測距の対照とするため、航跡直下に位置する14の代表的な森林に調査プロットを設け、森林バイオマス量を実測した。プロットは一辺が樹高に等しい正方形とし、各プロットで、すべての立木の胸高直径を測ったうえ、大径木1本、中径木2本、小径木1本の計4本のサンプル木を伐倒し、その樹高、胸高直径、幹材積、枝量および葉重量を測定した。これらのグラントゥールースデータと森林植生の縦断面プロフィールから、森林バイオマス量を

推定できることを明らかにした。

[キーワード] 赤外線レーザー測距儀、森林蓄積、北方林、植生プロフィール

## 1. 序

近年における森林資源管理がこれまでと大きく異なるのは、木材資源としてのみならず森林の減少と温暖化との関係についても視野に入れなくてはならないことである。これら2つの問題に対応するためのもっとも効果的な方法は、広域に分布する森林資源を迅速にかつ正確に調査できる手法を確立することであり、これによって上記の2つの問題に対応できるような資源管理のための意志決定が可能となる。つまり、森林資源に関する精度の高い情報の整備は森林管理を適切に行う上で不可欠である。一方、地上調査を主体とする従来の森林資源調査は人手がかかりときには危険でもあるが、資源管理上で非常に重要な要素であるが故に、多大な経費を掛けて実施されてきた。しかし、近年のリモートセンシング技術の発展に伴い、航空写真や衛星データがある程度は地上調査を肩代わりしつつある。ただ、航空写真には肉眼による判読作業が伴うため、相変わらず多くの人手が必要とされる。さらに、こうしたリモートセンシング技術では森林蓄積の推定は困難である。

この研究課題ではこうした問題点を解決するために赤外線レーザー測距儀(ALA)の新しい用途として、森林資源調査への適応を検討した。1997年の夏にカナダ北部において約600kmにわたって南北に航空機搭載の赤外線レーザー測距儀を用いた植生の縦断面プロフィールを作成し、これを分析用のデータとして森林の蓄積やバイオマスデータの推定作業を行った。

## 2. 研究目的

本研究は、航空機に搭載したレーザー測距儀による森林縦断面の測定から広域的な森林の蓄積を高精度で測定することを究極の目的としている。本格的な適用研究として、カナダのプレーリー北部から亜寒帯林北部まで植生帯を越えて600 kmにわたる長大なトランセクトを対象に、このレーザープロフィール法による森林蓄積量の推定値の有効性を検証するとともに、森林植生の縦断面プロフィールから森林蓄積量までの換算システムを明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 研究の対象地

ALAを用いて作成したプロフィールの場所はカルガリー州の州都、エドモントンからワンダリングリバー、フォートマクマレーを経由してサスカチュワン州クラフレイクに

いたる571kmのトランセクトである (Fig. 1)。この地域は広大な北方林が存在していることと、ALAでの計測作業が容易であること、グランドトゥルースを行うにあたって車でアクセスが可能なことから選択された。

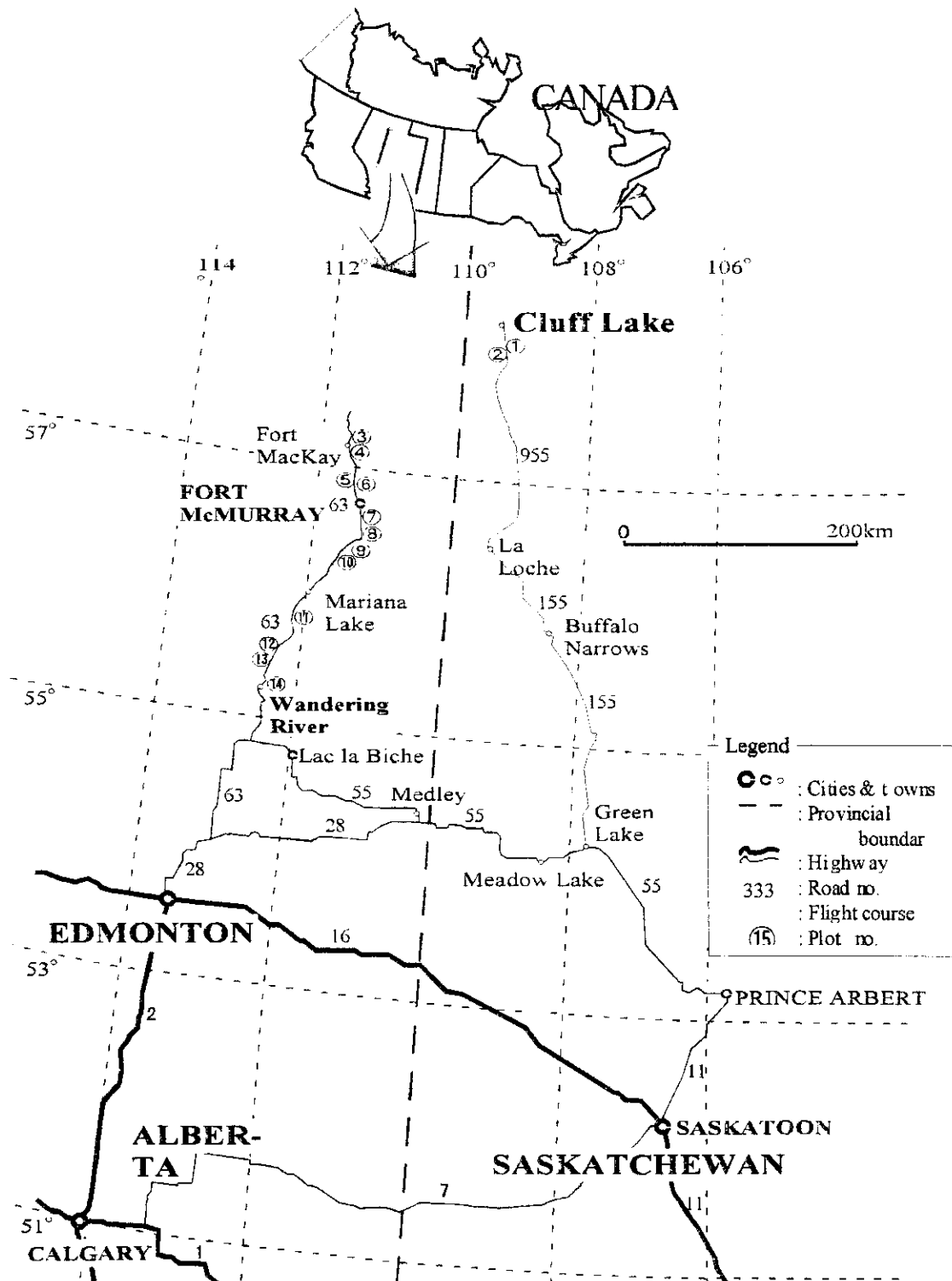


Fig. 1: Study site with laser profiling course and sample plots

トランセクトは2つの生態系タイプに分けられる。トランセクトの南側1/4はAspen Parklandと呼ばれるプレーリーから北方林への移行帯で、北側3/4は北方林帯である。元来のAspen Parklandは、ポプラ(*Populus tremuloides*)の群落が生息するプレーリーであるが、現在では草地の大半が農地化されている。他方、北方林帯は大半が自然の山火事によって更新する単純同齢の天然林で、主な樹種は上記のポプラのほかジャックパイン(*Pinus banksiana*)、ブラックスプルース(*Picea mariana*)、ホワイトスプルース(*Picea glauca*)の4樹種である。北方林帯ではこれら4樹種が山火事再生林の特性的な分布であるパッチ上の同齢林の塊が適当に各組合わさった形で分布している。一見したところ、山火事後の再生樹種はその地での種子の有無や土壌の湿度によって決まっているようである。ジャックパインが乾いた砂質土壌、ブラックスプルースが湿った土地で優勢種として存在するのに対し、ポプラやホワイトスプルースは両者の中間的なところに存在し、しばしば2層の林冠を形成する。この場合、当初はポプラが上層林冠を占めるが、ホワイトスプルースの方がポプラより長く生きるため最終的にはホワイトスプルースが優勢種になる。このように当地域には様々な森林タイプがあるが、Fig. 2に示すように自然環境条件や山火事後の経過年数に応じて10種類のことなる森林タイプとして整理できる。もちろん、この分類は生態学的には単純すぎるがここでの研究目的からすれば十分な区分である。

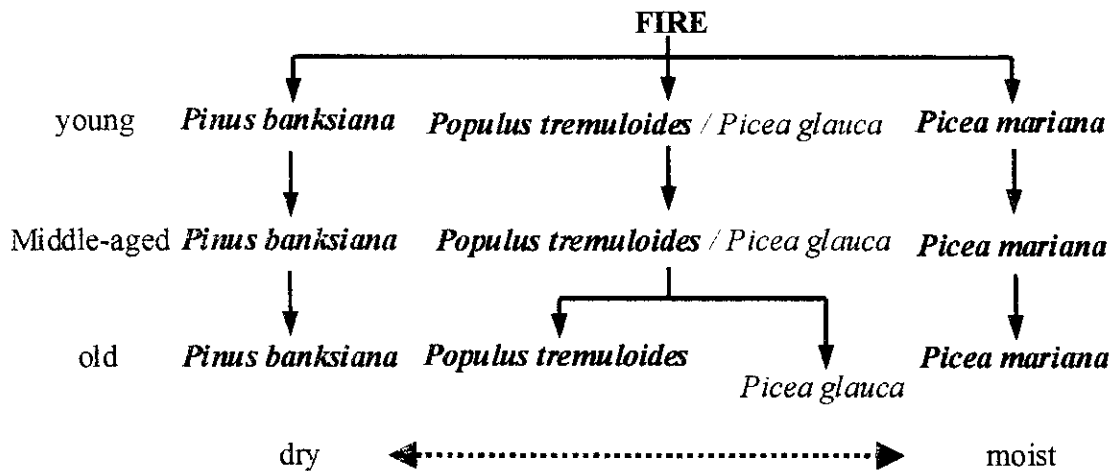


Fig. 2: Types of forest stand distinguished in selection of sample plots

### 3. 2 航空レーザー測距システム

航空レーザー測距システムの主要な構成要素はFig. 3に示した形になる。この航空レーザー測距による計測システムには、GPS (Ground Positioning System) 受信機、赤外線レーザー測距儀、およびVTR (Video Tape Recorder)を用いる。赤外線レーザー測距儀は最高20,000Hzの頻度で赤外線レーザーのパルスを出し、航空機と地表対象物間の距離を計測する

。この頻度を水平方向で換算すると、航跡に沿って1cm単位でレーザービームを發して地標高を計測することが可能である。GPSで航空機の三次元位置を捉え、レーザー測距儀で航空機と地表物との間の距離を測定する。GPSが記録した航空機の航跡上での地上高からレーザーの測距値を差し引くことで、連続的な地表面のプロフィールが得られる。この地表面プロフィールから地形面のプロフィールを差し引くことにより植生断面のプロフィールが得られるが、その縦断面積が森林蓄積と高い相関を持っている（末田・福嶋、1998）。VTRは、グランドトゥルースを取るための地上調査地点を同定するのに便利である。得られた植生断面のプロフィールに統計的処理を加えることにより、森林構造の特性を表す主要なパラメータを作成することも可能である。例えば、森林樹冠のフーリエ解析からパワースペクトルを作ると、その最大値の一つと樹冠径の平均との間に相関のあることが解る。この樹冠径と胸高直径の間には相関があり、森林蓄積に対しても同様である。林分高と立木密度が増せば森林蓄積と樹冠プロフィールの断面積も増加するので、両者の間には回帰関係が存在する。

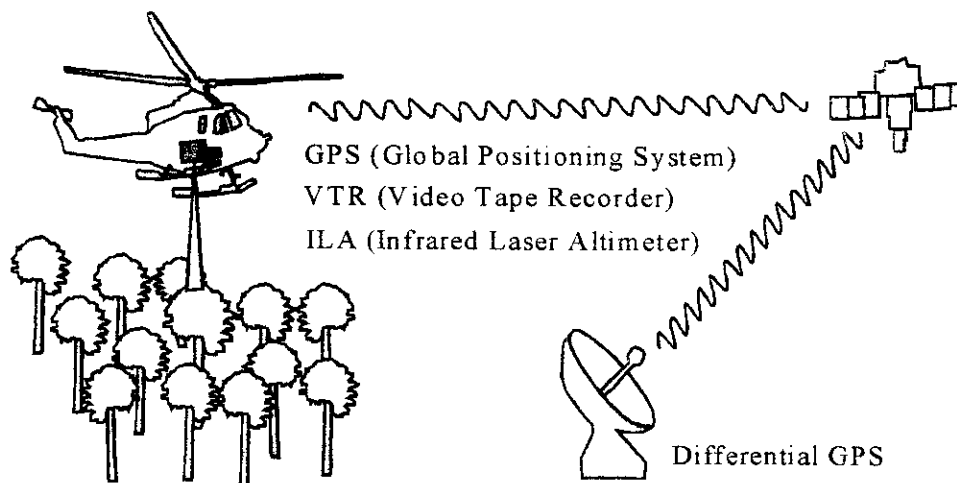


Fig. 3: Airborne Laser Altimetry (ALA) system

カナダの調査地においては時速140kmで巡航する航空機から2,000Hzの頻度で赤外線レーザーを照射し、1.9cmの水平間隔でプロフィールを計測した。もともと、この間隔ではデータ量が膨大になり記憶媒体の物理的容量を遙かに超えてしまい、すべての測定値を保持すればデータ回収のため一回の飛行距離が短くなる。そこでデータ量を圧縮するため連続した25個の測定値をひとつのグループとし、このグループの中で一、二位の最大値と最低値の三つの値だけを保持して記憶を節約し、測定距離を伸ばすという方針を取った。この結果、平均の測定間隔は $1.9\text{ cm} \times 25 = 49\text{ cm}$ となった。

ALAを搭載した航空機は短時間で広い地域をカバーすることが出来る。さらに、ALAにより植生の地上高を連続且つ正確な情報として得られる上に、これらの数値標高データはそのままコンピュータにより自動的に数学的処理を施すことができる。このようにA

LAは他の森林資源調査方法に比べ非常に優れた資源調査手段といえよう。各手法の比較についてTable 1に示す。

Tab. 1: General comparison among forest survey methodologies

	Individual Tree Information	Tree Height	Coverage	Data Retrieval	Data Processing	Cover Classification
Ground Survey	◎	△	×	×	△	×
Aerial Photogrammetry	○	△	○	○	×	◎
Satellite Imagery	×	×	◎	◎	◎	○
Laser Altimetry	○	◎	○	◎	◎	△

◎ superior ← → inferior ×

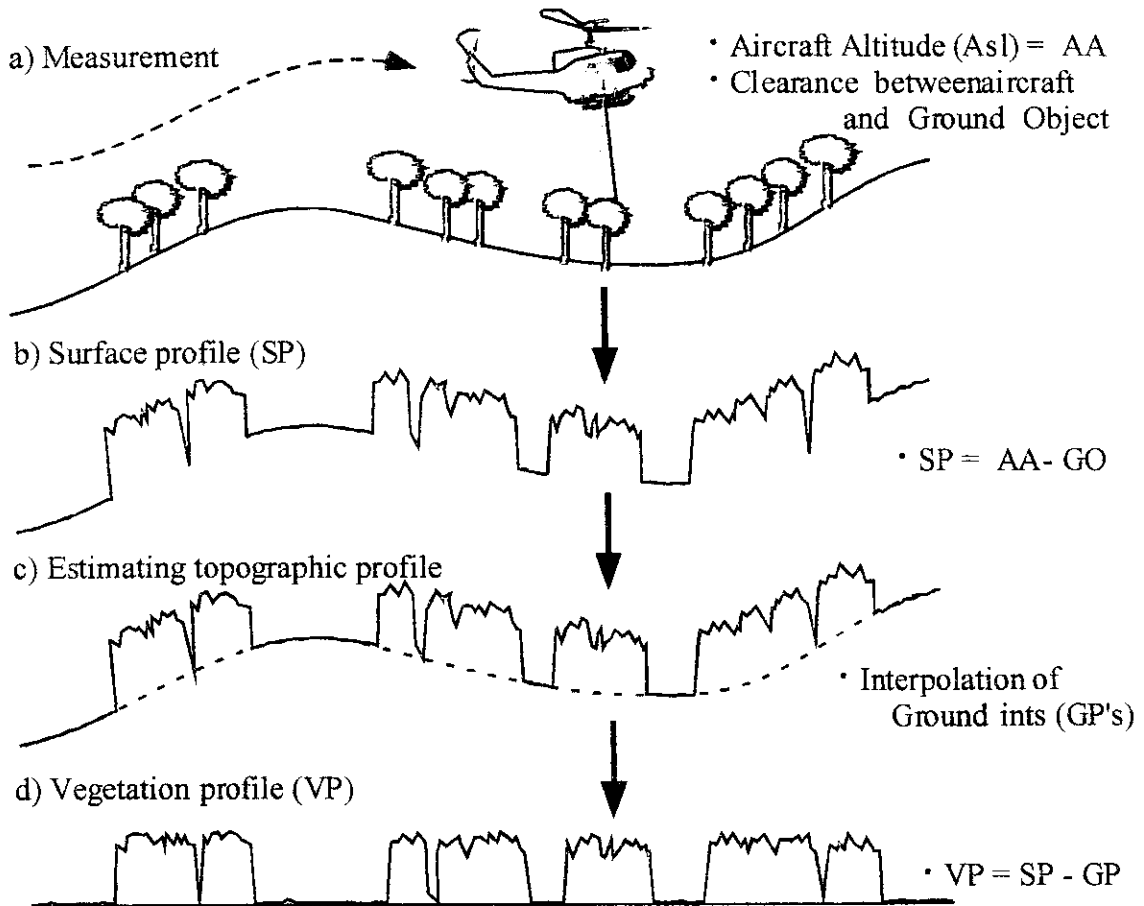


Fig. 4: Vegetation profile derivation process

### 3. 3 植生プロフィールの生成

樹冠プロフィールの作成の流れをFig. 4に示す。まず、GPSでモニターされた飛行高

度からALAで得られた航空機から地表高までの距離を差し引く (a) と、地表植生プロフィールが得られる (b)。このプロフィールは部分的には樹冠プロフィールであったりあるいは地面のプロフィールであったりする。植生の間隙を縫って地面に到達した部分が断続的に地表植生プロフィールのなかで得られているが、これらを内挿して地表プロフィールを連続化する (c)。つづいて、この地表を表すプロフィールをもとの地表植生プロフィールから引いてやることにより、植生プロフィールを得ることができる (d)。このプロフィールが樹木や森林に関する情報を分析するための基礎情報となる。

### 3. 4 森林蓄積の推定

ここでの分析は森林の蓄積は樹冠断面プロフィールの断面積に比例しているという前提でなされている。地上調査は実際の森林蓄積と樹冠断面プロフィールの断面積との間に想定したような相関が実際にあるかどうかを確かめるために実施された。しかし、ALAの計測した航跡上の厳密な線上において実際に地上調査を行うことは技術的に難しい。そこで多少の厳密性は失うが、レーザーで得られたプロフィールと類似した森林構造をもつサンプルプロットで、森林蓄積と樹冠断面プロフィールの断面積との関係を調べた。

全部で14の地上調査プロットが航跡に沿って設定され、森林蓄積の計測作業を実施した。それらはFig. 2に示した10の異なる森林タイプを代表するようにした。森林蓄積の推定には通常のサンプル調査法かビッターリッヒ法のどちらか、あるいは双方が実施された。通常のサンプル調査法は人手と時間がかかるが正確な森林の蓄積推定値を得ることができる。一方、ビッターリッヒ法は精度が劣るものの迅速に森林の蓄積推定値を得ることができる。両者の相関を見るために両方の調査方法を9つの調査点で実施し、ビッターリッヒ法のみを実施した3つの調査点の蓄積推定精度を上げるのに適用された。残りの2つの調査点ではサンプル調査法だけが実施された。

調査プロットの大きさは林齢によって異なるが、正方プロットの一辺の長さが概ね森林高を超えるように心がけた。各プロット内では、全木の胸高直径と樹高を測定したほか、これら二変数から材積推定が可能ないように、大径木一本、中径木二本、小径木一本を伐倒し、7~23カ所の幹の部位での直径を測ることにより、スマーリアン式を用いて精密な材積値を求めた。また、単木の葉面積を実測し、毎木調査の結果とあわせて林分蓄積と林分葉面積などを得た。

ビッターリッヒ法では林分材積は断面積、林分高と係数の積で評価される。現地調査では胸高断面積はスピーゲルレラスコープを用いて林分内の任意に選択された6~10地点で計測された。林分高はほぼ平均とみられる4~6本の標準木の平均樹高を用いた。林分係数についてはサンプル調査法で伐倒した木から得られた。

## 4. 結果・考察

### 4. 1 植生プロフィール

飛行コース全域での植生プロフィールはFig. 5に示したようになった。詳細な検討の結果、プレーリーに存在するAspen Parklandの代表的なパターンはFig. 6のようになり、最近火災にあった北方林はFig. 7のような形状を示し、そうでない成熟した北方林はFig. 8のようになっている。

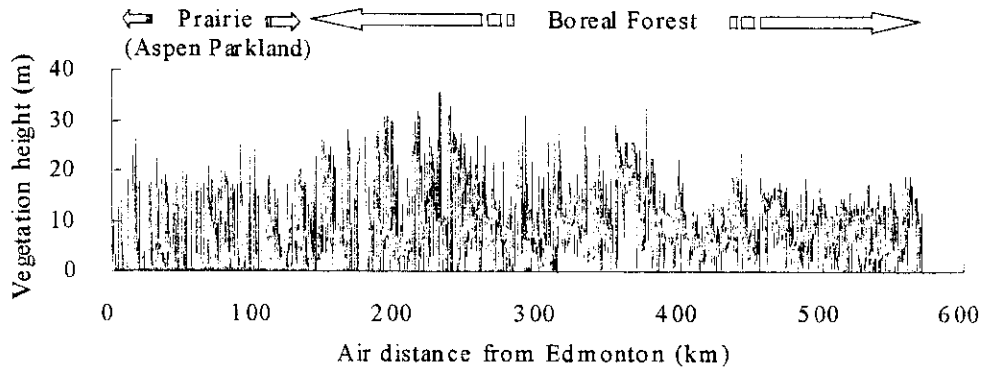


Fig. 5: Vegetation profile of entire flight course

Aspen Parklandはエドモントンからワンダリングリバーにかけてトランセクト全体の23% (140km) にわたり広がっている。そこから北方林帯が始まるが、エドモントンから270-310kmと500kmを越した地域でAspen Parklandと似たような分断された樹冠プロフィールの地域がある。前者は近年の大規模な森林火災地域の跡に散在する焼け残った小さな塊りの森林であり、後者は少し疎林のような形で森林が散在している沼沢地であった。どちらの場合においても小さなパッチ状に散在している森林の樹冠プロフィールはAspen Parklandと似た形状を示す。一方、成熟した北方林地帯は連続した樹冠構造からなり樹冠プロフィールも不連続にならない。

#### 4. 2 森林蓄積

地上調査によって得られた各調査林分の特徴はTable 2のようになっている。予想したように地上調査から算出された林分材積は樹冠プロフィールの断面積と高い相関を示した。したがって、600km全体の航跡に沿った森林の蓄積はFig. 9に示した林分材積と樹冠プロフィール断面積との回帰式を用いて推定することができた。Fig. 9では単位面積当たりの林分材積 $V$  ( $m^3/h a$ ) は飛行線100mあたりの樹冠プロフィール断面積 $S$  に対してプロットされている。表された回帰式は



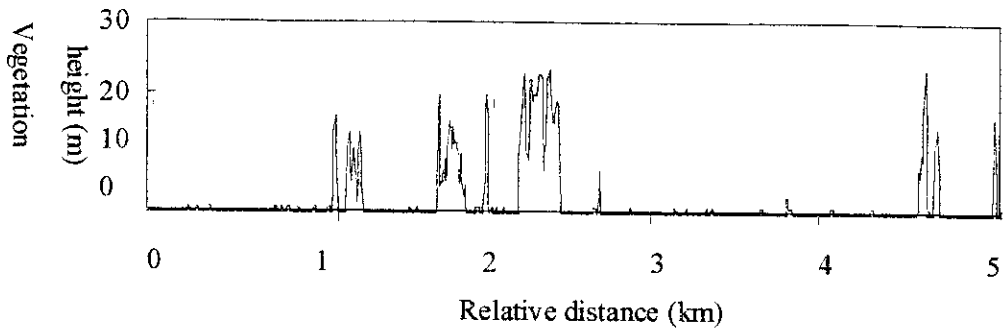


Fig. 6: Typical view (above) and vegetation profile (below) of aspen parkland

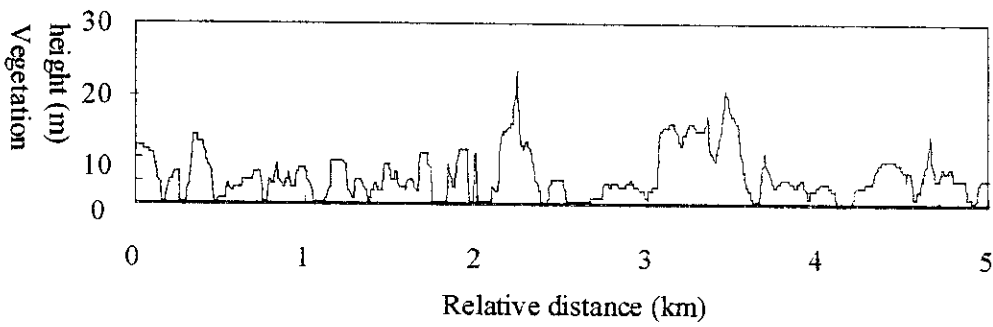


Fig. 7: Typical view (above) and vegetation profile (below) of burn parkland

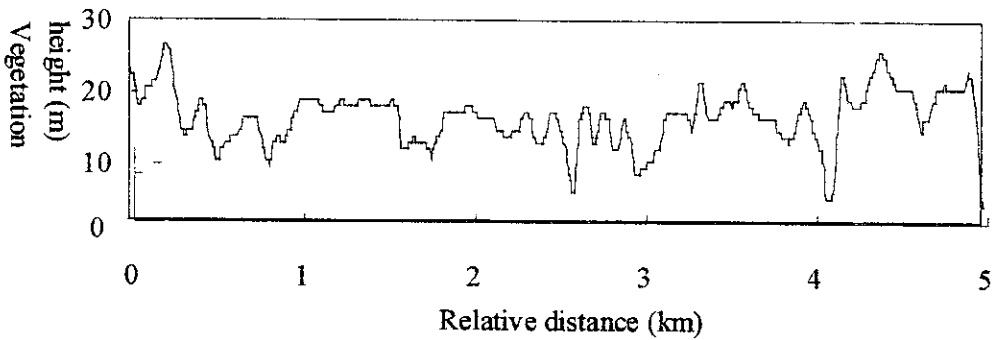


Fig. 8: Typical view (above) and vegetation profile (below) of green birch forest

$$V = a S^{1.5}$$

という形で表される。ここで樹冠プロフィール断面積は1.5の指数をもつ累乗式になり、両者の次元をみても指数1.5は理論的に一致する。この回帰式を用いて、600kmのトランセクト全体の森林蓄積を推定し図示したのが、Fig. 10である。算出方法としては、まず1km単位で樹冠プロフィール断面積を計算し、その1/10を100m単位でのSとして各地点での林分材積とした。結果としてAspen Parklandから北方林へ移行する地点において、Fig. 10では樹冠プロフィールを表したFig. 5よりも顕著に違いが現れた。

Tab. 2: Sample stand characteristics as measured on the ground

Plot No.	Canopy layer	Species <sup>*1</sup>	Stand age	Survey Method <sup>*2</sup>		Mean DBH (cm)	Stand Density (trees/ha)	Mean Tree Height (m)	Basal Area <sup>*3</sup> (m <sup>2</sup> /ha)	Stand Volume <sup>*4</sup> (m <sup>3</sup> /ha)
				Plot	Bit.					
1		Pb	Middle	○	○	6.3	2244	8.46	7.88	41.6
2		Pb	Old	○	○	12.5	936	9.64	12.35	81.2
3	upper	Pt	Middle	○	○	10.3	1844	14.15	16.19	98.5
	lower	Pg		○	○	6.9	1721	5.52	8.00	35.1
4		Pb	Middle	○	○	13.2	1161	14.26	17.62	119.3
5		Pm	Middle	○	○	4.5	8843	8.24	21.01	138.7
6		Pg	Old	○	○			26.62	45.56	565.8
7		Pt	Middle	○	○	11.6	3140	21.67	37.55	379.5
8		Pm	Young	○	○		22752	1.51	1.75	5.3
9		Pt	Old	○	○	7.4	5350	25.20	54.62	690.9
10		Pg	Old	○	○	21.0	1053	24.21	43.34	304.1
11		Pm	Old	○	○			13.99	41.31	298.5
12		Pb	Young	○	○	2.0	53191		18.87	65.2
13		Pt	Young	○	○	2.1	32663		12.96	58.4
14	upper	Pt	Middle		○			23.00	36.00	413.6
	lower	Pg			○			9.89	1.33	7.9

\*1 Pb: *Pinus banksiana*, Pt: *Populus tremuloides*, Pg: *Picea glauca*, Pm: *Picea mariana*

\*2 Plot: Sample Plot Method, Bit.: Bitterlich Method

\*3 Arithmetical sum of individual free basal areas as calculated from DBH whenever the sample plot method was used.

\*4 Stand volume is given by canopy layer for plots 3 and 14.

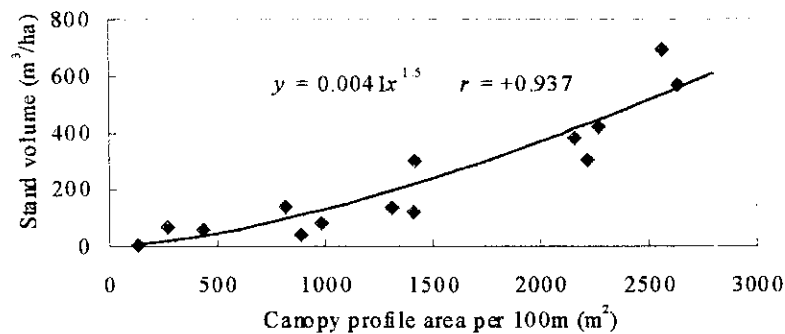


Fig. 9: Correlation between ground survey-generated stand volume and laser-generated canopy profile area

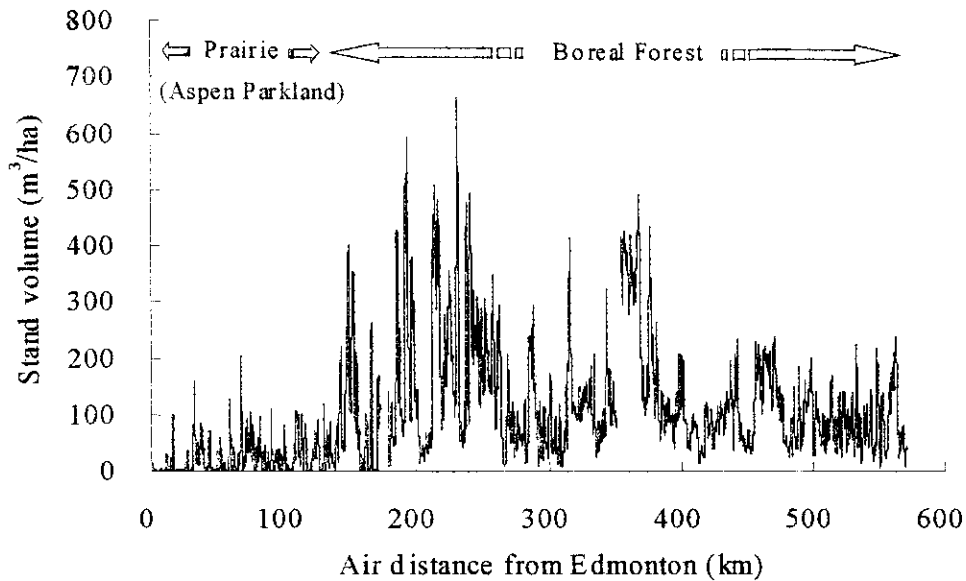


Fig. 10: Estimated stand stocking along flight course

## 5. 本研究で得られた成果

この研究においてALAを用いて生成した樹冠プロフィールが森林の蓄積と相関の高いことが解ったので、広域で森林蓄積を計測するには迅速に結果を得られることや精度の点からALAの望ましいことが明らかになった。ただ、当研究ではALAの適用が森林の蓄積だけになっているが、フーリエ解析を援用して森林の特性を表す他のパラメータ（樹冠径、胸高直径、葉面積指数）の算出も行う必要がある。さらに、ALAを用いた森林情報をグランドトゥールズデータとしてリモートセンシング情報と連携させることにより、応用性が一段と高まろう。

## 6. 引用文献

- 1) 末田・福嶋 (1998) 森林縦断面のフーリエ解析による現存量の推定. 広域的適用を目指した森林の間接計測手法開発と分散型データ処理技術手法の構築(平成7~9年度文部省科学研究費補助金基盤研究(A)(1)研究成果報告書). 14-26.
- 2) Tsuzuki, H., E. R. G. Abraham, T. Kusakabe, T. Yamamoto and T. Sweda (1998) Timber Cruising over Extensive Forest Area with Airborne Laser Altimeter. Proceeding of International Symposium on Global Concerns for Forest Resource Utilization. 746-756.
- 3) Sweda, T., T. Yamamoto and Z. Shibayama (1998) Airborne Infrared-laser Altimetry of Forest Canopy Profile for Extensive and Accurate Assessment of Timber Resource and Environmental Functions of Forests. Proceeding of International Symposium on Global Concerns for Forest Resource Utilization. 736-745.