

4-5 多目的用の森林観測システムの開発

朴 昊澤（(財)科学技術交流財団）

1. 研究の目的と概要

森林は様々な種類の樹木が群植している空間である。同一種にしても幹や枝の形態が異なり、さらに葉量も違うため森林毎に特有の空間構造を表している。このような複雑な林分構造は、一次的に森林の光及び水分環境に影響し、その森林特有の気象及び生態環境を作り出す。一方、森林内で行われている水文・生態学的プロセスは森林周辺域とも相互作用を行っているため、地域環境形成にも大きく影響する。このように森林構造の役割の重要性に対する認識から森林構造を定量化する研究が数多く行われていたが、いまだに満足すべき観測技術や機器が確立されていない状況である。例えば、森林流域内の立木密度の測定は人手に頼る非効率的な方法から得られている。葉量は葉を直接蒸し取る方法、木を切って破壊的に測る方法、及び高価の機械を用いて測る方法などがある。破壊的方法は正確な葉量が得られるが、観測の継続性が得られない。一方、LAI-2000などのような機器は簡便であるが、高価であり、葉量以外の情報は得られない弱点がある。また、樹木の胸高直径や成長量の測定もほとんど人力に依存している状況である。このような現実を考慮した時、森林構造に関する様々な情報提供ができる機器や技術を開発する必要がある。

フェーズ I ではある一定面積内に存在している樹木の成長量を把握するための周囲長計測装置や樹幹形状計測装置と樹木の周囲環境の経年変化を把握するための位置関係を示すマップ作成装置の開発を行った。フェーズ I で開発した装置は樹冠に関する満足すべき情報が得られないため、フェーズ II ではレーザ光切断法を用いて広域における樹冠のサイズの分布、葉量やその鉛直分布、樹冠の形状などの樹冠構造情報と樹冠の分光反射特性を同時計測する技術を開発した。

2. フェーズ I の成果

2-1. 目的及び目標

樹木の生長量は森林内の微気象環境や水分環境に対する依存度が高く、時間性や空間性が非常に大きい。そのため、樹木成長量の推定は精度が要される部分であって、従来のように人力観測から得られた情報はサイエンス的な要求を満たしてくれない場合が多い。例えば、流域の水やCO₂収支データを用いて林分成長を推定する場合、水やCO₂のダイナミックスを秒のスケールで観測を行いその実態を解明している。そのように樹木成長と水文プロセスは深い相互関係をもっているにも関わらず、まず両者のデータは精度面において補完性が欠けている。さらに、森林流域における水文プロセスの空間分布を予測する数値モデルにおいても立木密度、樹木の空間分布及び林分構造は必須不可欠なデータであるが、その要求が満たされないのが現状である。このような現状を踏まえてフェーズ I では、樹木の形状と一定面積内の立木の位置を精度よく観測できる装置を開発し、その機能性を検証することを研究の目的とした。

2-2. 方法及び結果

開発した周囲長計測装置の取付けの有効な設定条件と周囲長の変化をみるため、愛知県工業技術センター内の2樹種について計測を行った。4月初めから6月半ばまではシラカシに設置し、戻しバネの強さを替えた場合と従来のアルミバンド上に設置した場合を検証した。6月半ばから7月半ばまではクスノキに設置し、戻しバネの強さを替えた場合と線材を替えた場合を検証した。7月半ばから8

月半ばまではシラカシに設置し、温度補正の必要性和高さ方向の展開を行った。8月半ばから9月半ばまではクスノキに設置し、高さ方向の展開を行った。

樹木取付け型樹幹形状計測装置の操作性と幹の外形を全周にわたり詳細にとらえ樹種や環境による違いを計測するため、愛知県工業技術センター内と実験フィールドであるトヨタフォレストヒルズで3樹種について、6月半ばから11月半ばまで計測を行った。構内のシラカシについては3本について3～4回、実験フィールドのコナラとアベマキについてはそれぞれ1本について最大7回計測を実施した。さらに、簡易立木位置図作成装置を開発し、トヨタフォレストヒルズで観測を実施しデータのCAD化と3次元表示を行った。

図1は、温度変化による周囲長の変化への影響をみるためシラカシとコナラの伐採木に計測装置を取り付けた時の変化様子である。温度差6.8℃（2001/7/28 4:50 24.6℃、2001/7/29 13:10 31.4℃）でコナラ伐採木は0.01mmと周囲長の変化はほとんどなく、その間シラカシ立木では日中減少し、夕方から夜中にかけて増加するパターンがみられた。またシラカシでも温度差2.9℃（2001/7/29 5:30 25.1℃、2001/7/29 10:30 28.0℃）で周囲長の変化はみられないので簡易的に温度変化による計測装置への影響はないと考えられるが、詳しくはワイヤの線膨張係数を熱機械分析装置（TMA）等により測定する必要がある。また、クスノキでは温度差15.1℃（2001/7/14 4:30 25.4℃、2001/7/14 16:10 40.5℃）で周囲長の変化はみられなかった。

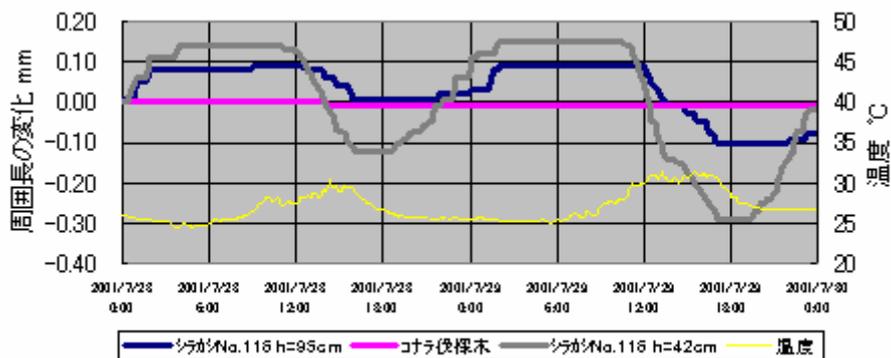


図1. シラカシ等の周囲長の変化 2001年7月28日00:00基準

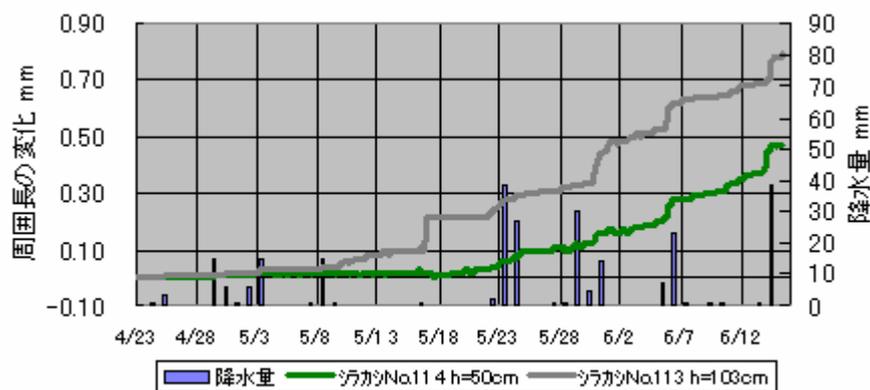


図2. シラカシの周囲長の変化 2001年4/23基準

図2は2001年4月23日から6月15日の愛知県工業技術センター内にあるシラカシの周囲長の変化の様子を示したもので、対象木シラカシNo.113は樹高6.2m、胸高直径14.3cm、取付位置高さ103cmで、シラカシNo.114は樹高6.2m、胸高直径14.7cm、取付位置高さ103cmである。また、測定間隔は10分で、降水量については北北西約20Km離れた名古屋のデータで正午の値を参考にした。周囲長の変化の始まりは10日程度の違いはあるが、しばらく降雨がなかった（4月2日から4月22日ま

での総降水量は9mm)後、5日間降雨があった(4月29日から5月3日までの総降水量は43mm)後しばらくして変化が見られ始めた。周囲長の変化は計測装置の取付位置高さの違いはあるものの、シラカシ No.113 で0.59mm/30日(5/8~6/7)、シラカシ No.114 で0.45mm/26日(5/19~6/14)で直径の伸びに換算するとそれぞれ $6.2\mu\text{m}/1\text{日}$ 、 $5.5\mu\text{m}/1\text{日}$ であった。他と比較して急激な周囲長の変化はシラカシ No.113 で5月30日17:10~翌1:20、6月5日19:00~21:50、6月14日0:00~9:10に、シラカシ No.114 で5月16日18:20~22:20、5月30日15:30~翌7:00、6月5日16:40~22:10、6月14日8:30~12:00にみられ、しばらく降雨がなかった後の雨で増える傾向がみられる。また変化の時間帯は夕方から朝方のパターンが多い。

図3は、同一樹木における計測機器の高さ方向の取付位置の違いによる周囲長の変化の様子である。周囲長の変化はシラカシ No. 116 取付位置高さ42cm、取付位置直径15.4cmで2.58mm/12日(8/7~8/19)、シラカシ No. 116 取付位置高さ164cm、取付位置直径13.2cmで2.02mm/12日(8/7~8/19)、シラカシ No. 116 取付位置高さ252cm、取付位置直径8.7cmで1.08mm/12日(8/7~8/19)で直径の伸びに換算するとそれぞれ $68\mu\text{m}/1\text{日}$ 、 $54\mu\text{m}/1\text{日}$ 、 $29\mu\text{m}/1\text{日}$ であった。また、光合成物質の移動速度の違いとみられる各部位での変化開始・終了時間の違いもみられた。周囲長の変化開始・終了時間は8月16日から翌日が19:00~3:30(取付位置高さ42cm)、17:40~2:40(取付位置高さ164cm)、18:30~2:20(取付位置高さ254cm)で、8月17日から翌日が19:00~5:10(取付位置高さ42cm)、18:00~3:50(取付位置高さ164cm)、18:00~5:00(取付位置高さ254cm)で、8月18日から翌日が19:40~5:10(取付位置高さ42cm)、19:20~5:30(取付位置高さ164cm)、17:50~5:00(取付位置高さ254cm)で取付位置高さが低いほど変化開始・終了時間が1時間ほど遅れる。

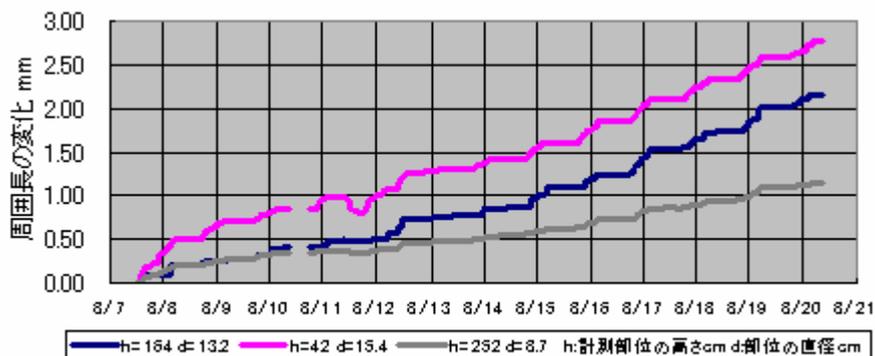


図3. シラカシNo.116の周囲長の変化 2001年8月7日12:00基準

愛知県工業技術センター内のシラカシについて6月28日から11月22日の間に、シラカシ1(116)取付け高さ140cm、取付け部周囲長41.2cmでは4.02mm、シラカシ2(115)取付け高さ105cm、取付け部周囲長40.5cmでは3.01mm、シラカシ3(122)取付け高さ73cm、取付け部周囲長44.2cmでは1.99mmの変化がみられ、トヨタフォレストヒルズのコナラについて6月13日から10月24日の間に、コナラ(中部)取付け高さ117cm、取付け部周囲長52.0cmでは0.67mm、アベマキについて6月13日から11月13日の間に、アベマキ(中部)取付け高さ120cm、取付け部周囲長51.4cmでは0.79mmの変化がみられた。ほぼ独立木の状態の構内と光条件の厳しい森の中では3~5倍の半径変化の違いがみられることがわかった。

幹の形状の変化については、フォレストヒルズのコナラとアベマキでは期間中の平均半径の変化が1mm未満で明瞭な違いはみられなかったが、愛知県工業技術センター内のシラカシでは図4のように最大5倍程度の放射方向の部位による形状の変化がみられ、光環境の違いより成長が均一でないことがわかった。

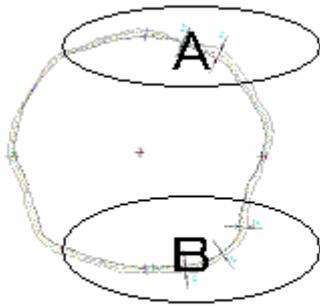


図4-1 シラカシ2の放射方向の形状変化

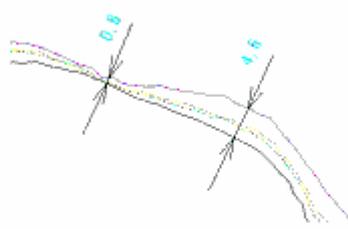


図4-2A A部の拡大

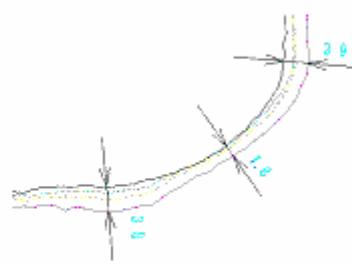
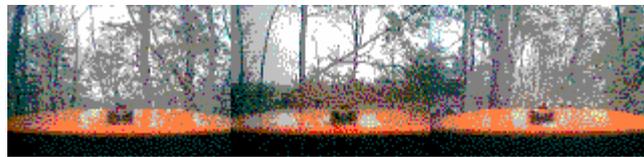


図4-2B B部の拡大

簡易立木位置図作成装置の計測精度においてレーザ距離計の仕様上の精度は距離で±5cm、方位角で±1度であるので、距離が3mの場合測距精度は1/30、測角精度は約1/28、距離が10mの場合測距精度は1/100、測角精度は約1/28となるが、全体の精度は低精度の測定により決定されるので約1/28となる。今回開発した装置の検証のため室内で壁を計測した場合の精度は表3-1より1/28から1/267であり、巻尺を使用した従来法による簡易的な測定精度は1/10から1/20であった。森林の測量でよく使われるコンパス測量の精度が約1/100であることを考えると、さらに分解能のよい距離計・方位角センサが望まれる。

計測前に図5のような方位45°毎の画像をPCカメラで記録しておけば、後でそれらをつなぎ合わせて360°回転するパノラマ画像が作成可能で、また連続的に取られた斜距離、天頂角を元に高低差を求めデータをCAD化することにより、従来の平面図のみでなく図6のような上面図、正面図、側面図の作成が可能になり、それを図7のように立体的に視点を替えて見ることが可能となった。



方位0°

方位90°

図5 PCカメラによるパノラマ画像

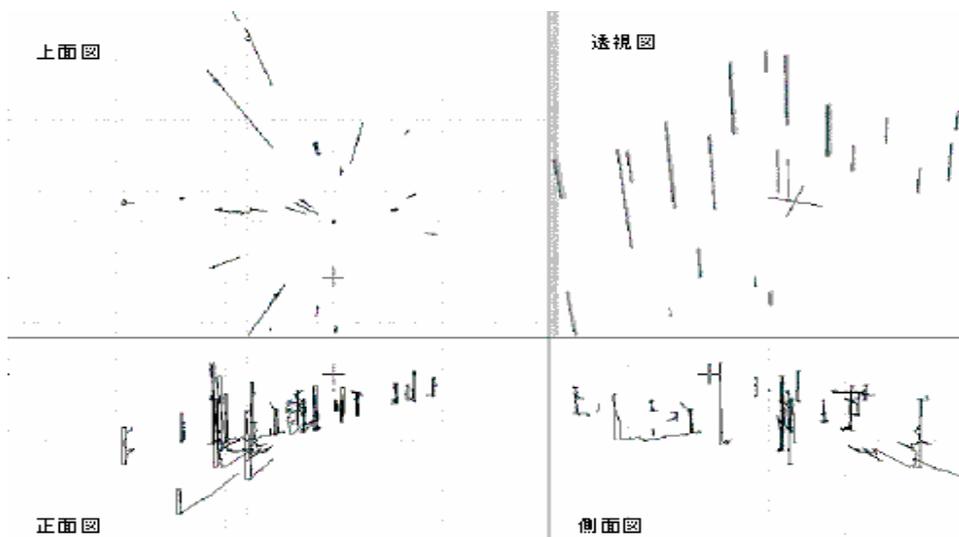


図6 フィールドデータの3次元化



図7 視点の移動

2-3. 考察及びフェーズⅠのまとめ

樹木周囲長計測装置を用いてトヨタフォレストヒルズのコナラとアベマキを対象にした観測では、観測期間中それらの平均半径の変化は1 mm 以下で明確な違いは見られなかったが、愛知県工業技術センター内のシラカシでは最大5倍程度の放射方向の部位による不均等な形状の変化が見られた。森林内の光環境は場所により相当異なるため、樹木の生長も場所によるその違いが明確にみられる。そのような森林の空間的特徴を考慮した時、樹木周囲長計測装置は細かいスケールにおける樹木成長及び形状に関する多数の情報の提供ができ、より詳細なスケールにおいて森林構造の変化が水文プロセスに及ぼす影響の評価が可能になるに間違いない。

簡易立木位置図作成装置をトヨタフォレストヒルズに持ち込み観測を行った結果、約 1/30 の精度で立木の位置図作成が可能になった。森林流域における水文学的諸プロセスの各収支を評価するためには長期観測が必須的に要される。そのようなことを考慮する時、当然林分構造に関する長期データは欠けてはいけない部分である。近年、地球温暖化による気候変化が水、エネルギーおよび CO₂ 収支に及ぼす影響を評価するにあたっては数年間の長期観測を通してその実態を解析し、今後の対策を探っている。しかし、水や CO₂ の交換が行っている実際のその場である樹木の構造に関するデータは精度的に荒いか、揃っていないのが現状である。そのような意味で今回開発した樹木周囲長計測装置や立木位置図作成装置は現在研究者らの要求に充分答えられる能力をもっている。

森林内の地形は凸凹が激しいため、測定の効率を高めるためには装置の軽量化や小型化を実現する必要がある。さらに、森林ではなかなか電力が簡単に手に入らないし、大面積を対象に計測を行う場合も電源確保が最優先の課題である。そういった意味では当装置は改善すべき課題が残されている。

3. フェーズⅡの成果

3-1. 目的及び目標

葉や枝などで構成されている樹冠は複雑な構造を持っている。特に、地形の影響による凸凹が激しいと特徴つけられている森林の樹冠は、放射、エネルギー及び水文過程に大きく影響する。そのような過程に対する樹冠の影響を評価するため、樹冠観測法に関する様々な研究が行われた。従来、樹冠観測は破壊的なサンプリング法を用いたのが主であったが、樹冠の時間変化の特徴を考慮するとき、その方法はあまり望ましくない。そのため、非破壊的な測定法が要求される

そのような事情を踏まえた上、2つの波長のレーザー光を用いて樹冠を非破壊的に測定し、樹冠の3次元構造及び正規化植生指標 (NDVI) の情報を提供するレーザー光切断法を開発した。レーザー光切断法を用いて非破壊的に樹冠の観測を行っても観測データから葉、枝などを区別するのはなかなか難しい。

したがって、フェーズ II では 2 つの異なる波長の反射光の情報を用いて葉と枝を区別する方法と樹冠構造に関するデータの中で一番要求される葉面積指数 (LAI) を森林内外の光環境及びレーザ光切断法により取得した画像分析を通して推定する方法の開発を研究の目的とした。

3-2. 方法及び結果

レーザ光切断法は林冠の表面におけるレーザ反射点のみではなくポアラス的な林冠内部でのレーザ反射点もすべて測定の対象とすることができる。レーザ光切断法は、対象物に投影したスリット状のレーザ光が対象物により切断されるプロファイル像を CCD カメラで撮像し、三角測量原理に基づいて 3 次元座標を得るものである。スリット光を対象物全体に走査し対象物の形状を求めることができる。

立方体のような単純な閉曲面体を例にすれば、投射したスリット状のレーザ光は対象物により切断され、対象物表面上の反射点はその形状に対応した曲線として CCD カメラに撮像される。この個々の反射点とレーザ光の光源、それと CCD カメラの 3 点を結ぶ三角形に着目し (図 8)、レーザ光の光源と CCD カメラとの距離 x 、レーザ光の投影角度 θ 、CCD カメラから反射点への視軸の水平角 α 及び高低角 β の値が得られるなら、三角測量の原理からその反射点の 3 次元座標を求めることができる。

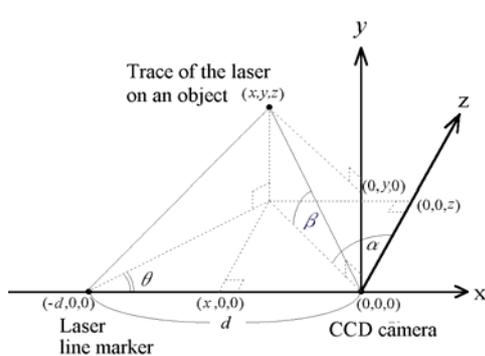


図 8. レーザ光切断法の測定原理

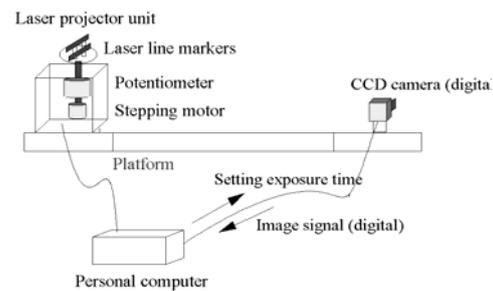


図 9. 測定装置の模式図

システムはレーザ投射装置、CCD カメラ、制御用パソコン、そしてレーザ投射装置と CCD カメラの相対的位置を固定する金属製架台の 4 つの部分から構成される (図 9)。レーザ投射装置には Audio-technica 社製のレーザラインマーカが 3 本搭載され (685 μ m、830 μ m)、ステッピングモータ (Copal 社製、SPG-20) により 0.25 度単位で走査角を回転し、ポテンシオメータ (Green 社製、CPP-45) でその走査角度を測定し、パソコンにその情報を入力する。CCD カメラ (Sony 社製、XCD-X700) は可視～近赤域に感度を持ち、撮像した画像はパソコンに記録する。パソコンは、ステッピングモータの制御、レーザラインマーカの点灯・消灯、ポテンシオメータから送付される走査角度の記録、画像の記録など、測定システムの全体の制御をすべて自動的に行う。本システムの測定精度は 20m 離れた対象物を測定する場合、レーザ光の走査方向では 9cm、その直角方向では 2cm (標準レンズ装着時) または 4cm (広角レンズ装着時) である

カメラがレーザ光の反射光を取る時、近距離にある葉からの反射光は飽和されたり、遠距離の反射光は感度が落ちてしまう問題があって葉と枝の区別ができなかった。そのような問題は、カメラから樹冠の対象物までの距離に対して補正を行い解決した。そこで用いた方法は、

- ケース 1) カメラから対象物までの距離は一定である
- ケース 2) 直線距離を用いる (図 11 のケース 2)

$$R_{Compensate\ d} = R_{Measured} \times (D / 10) \quad (1)$$

ケース 3) 距離の二乗を用いる (図 11 のケース 3)

$$R_{Compensate\ d} = R_{Measured} \times (D / 10)^2 \quad (2)$$

ケース 4) 距離の 1.5 乗を用いる (図 11 のケース 4)

$$R_{Compensate\ d} = R_{Measured} \times (D / 10)^{1.5} \quad (3)$$

測定はトヨタフォレストスタヒルズ内に設置された観測タワーの上端から樹冠を向けてレーザ光を走査し、その反射光をキャプチャーし解析を行った。



図 10A 赤色波長の反射光の画像

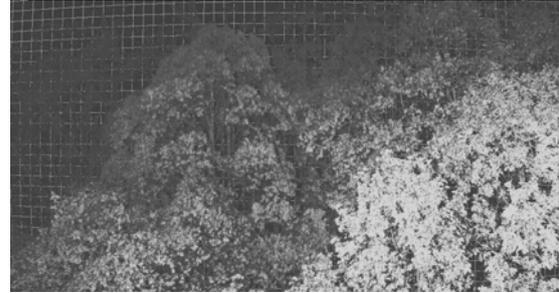


図 10B 赤外線波長の反射光の画像

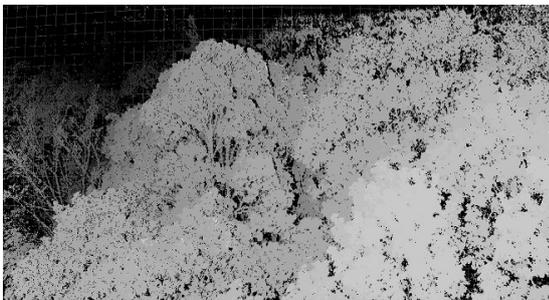


図 10C 10A と 10B の両図を合成した図

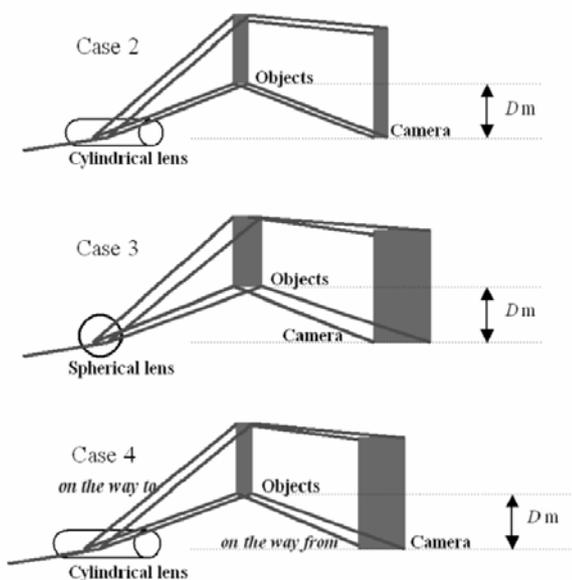


図 11 葉と枝を区別するため用いた方法

カメラ近いにある対象物は強く反射される傾向がある。そのため、枝から葉を区別するしきい値はカメラと対象物間の距離に依存する。したがって、枝から葉を区別するためには多様な距離に対する補正が必要であることを表す。

レーザ光が走査されたとき、レーザ光のトレースはレーザプロジェクタから対象物の距離によりいくつかに分けられる。図 10A と 10B は赤色と近赤外のレーザトレースの分析画像である。カメラの近い対象物はより強く反射される傾向がある。具体的には幹は赤色のレーザ光を、また葉は赤外線レーザ光を多く反射させる特性が明らかである。

CCD カメラがキャプチャーしたレーザ光の反射光を用いて樹冠の 3 次元座標を求めた。その結果が図 10C である。明るいグレーと暗いグレーはそれぞれカメラからの距離の近・遠を表す。

測定の時、100000 個以上の点が観測された。補正の効果を評価するため、CCD 画像から 50 個の点を選んだ (図 5 と 6 において空丸)。その 50 個の点はすべてが葉にあたるものと現場観測を通して判明された。さらに、幹と枝の 11 個の点を追加的に選んだ (図 12 と 13 において黒丸)。

4 つのケースに関する解析の結果は以下のようなものである。

ケース 1) カメラから対象物までの距離が一定であると仮定するならば、補正は一切要らない。葉からの赤色レーザ光の反射値は幹からの反射値とほぼ有意である。

ケース 2) レーザビームが距離に従って 1 つの方向において円柱型のレンズのように広がるなら (図 13)、レーザ光の反射値は直線距離により補正が可能になる (式 1)。幹からの赤色レーザの反射値は葉からの反射値よりもっと大きい (図 12)。その結果は、カメラ近いにある幹は遠い幹より強く反射されることを示す。この結果から、補正值は対象物とカメラ間の距離と非直線的な関係があるに間違いがないことが分かる。

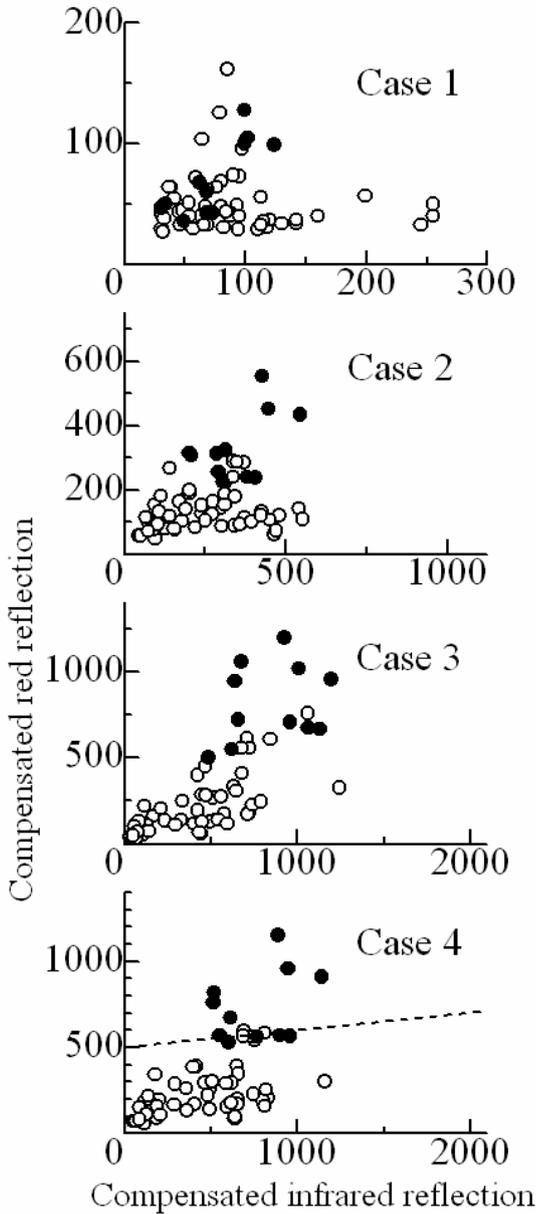


図 12 ケース 4 において赤色と近赤外反射光の補正值の比較

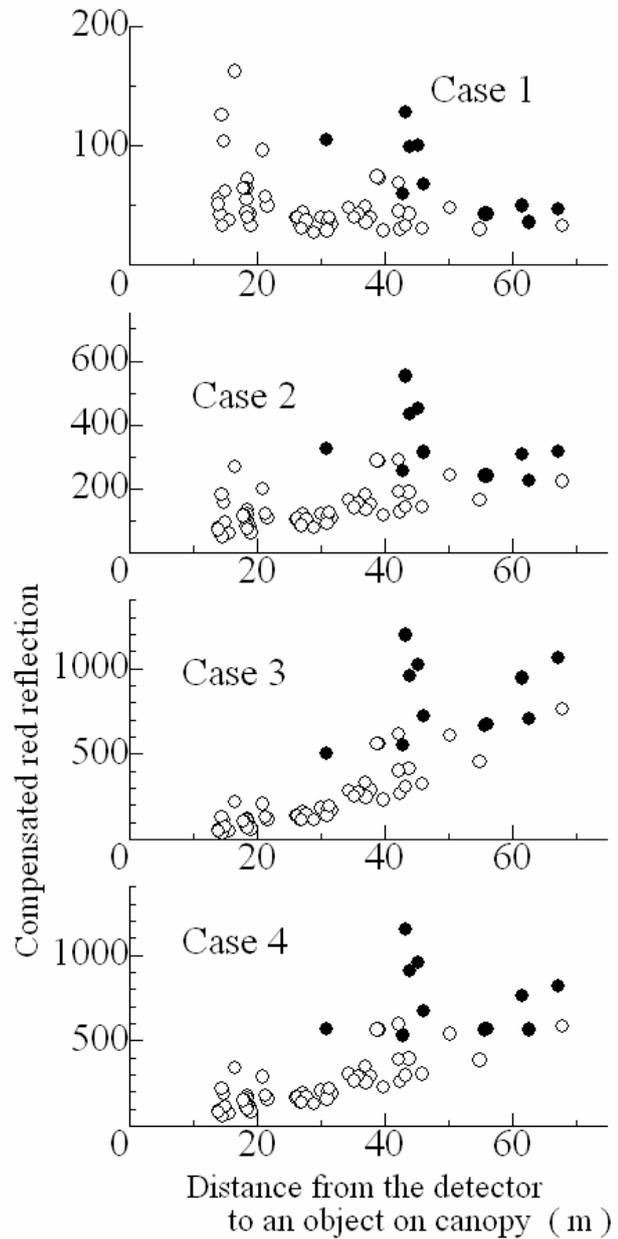


図 13 赤色補正值と対象物までの距離間の関係

ケース 3) 円柱型のレンズ代わりに球形のレンズが用いられた場合、レーザビームは一般的なビームのように距離に従って急進に分散する。そのような場合、レーザ光の反射値は距離の二乗によって調整されなければならない。基本的には円柱型のレンズが調整に用いられたが、トライの意味で距離の二乗の方法が適用された。カメラから遠い対象物は強い反射を表す結果が得られた (図 13)。この結果は、補正に対する効率的な値は距離の 1 次式 (直線) と 2 次式 (二乗) の間に分布することを示す。

ケース 4) レーザビームは対象物に対して走る距離に従って 1 方向に広がるが、反射するときには急進に分散される。そのような場合、距離は理論的に 1 と 2 の間の乗に増加する。従って、反射値は距離の 1.5 乗により補正可能であると仮定した。その結果が図 5 である。

地面に測定装置を設置し地上を向けてレーザ光を走査して、その反射光を CCD カメラで捕らえその画像をパソコンに入力した。レーザ光を 0.05° 間隔で走査し測定対象域をスキャンした。画像分析を行い樹冠の 3-D 構造からバイオマスの垂直分布を表した (図 14)。図 14 は対象物を真正面からみたイメージであり、図 15 はカメラの観点から下から上を見た時の図である。二つのイメージを用いて魚眼レンズから得られる同様のイメージを作り、LAI の計算に用いた。同一画像から赤色と赤外線画像が得られるため、それらも LAI 計算に用いた。



図 14. 3-D 画像から得られたキャノピバイオマスの鉛直分布

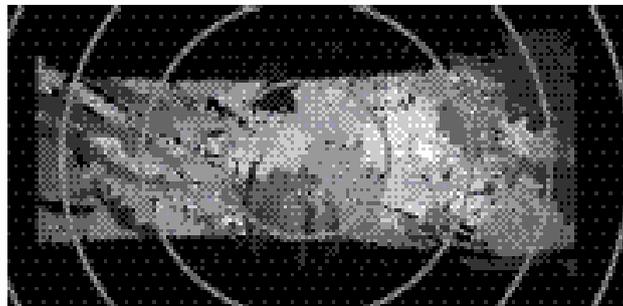


図 15. 下から上を見た時の樹冠構造画像。灰色の濃度の差は地面からの距離の差を現す。色が濃くなるほど距離は遠くなる。

画像内の各ピクセルにラベルを与えて葉と幹を区別する RSM (regional segmentation method) を開発した。ピクセル内の構成要素が同様であればラベルは同様になる。NDVI を 11 段階に区分して画像分析から得られた NDVI 値を初期値として用いた。RSM のプロセスは

1. 要素内のピクセル数の最小値と NDVI の境界値を決める
2. 1134×486 ピクセルの画像から条件 1 を満たすピクセルをサーチし、そのピクセルにラベル A をつける
3. ピクセル P1 周辺の 8 つのピクセルの中で、条件 1 と 2 を満たすピクセル P2 をサーチし、それにラベル A をつける
4. 8 つのピクセル全部を調べるまでステップ 2 を繰り返す
5. 条件 3 が妥当であれば、ステップ 1 に戻りラベリング作業を持続する

6. 条件 3 が不適切であれば、A ピクセル全てを取り消し、ステップ 1 に戻る
7. 画像内の全ピクセルをスキャンしてから NDVI の境界値を最小値まで引き下げ、作業を再開する
 - ・ 条件 1 ピクセルはラベリングされなく、その NDVI 値が境界値より大きい
 - ・ 条件 2 ピクセル P1 と P2 間スキャン角度の差が 1 より小さいか同様であるか
 - ・ 条件 3 A とラベリングされたピクセルの数が多すぎる

RSM の結果は図 16 で示す。そこで、同一要素のピクセルは同一の灰色を表す。要素の数が区別可能な灰色の数より多いため灰色が目立つ。各要素の平均 NDVI を調べて、各要素が葉か幹かを区別した(図 17)。各要素が区別できたら、各要素の特性に基づきそれぞれに対する 3-D 補正作業を行った。例えば、幹に対してはシリンダのように近似した。

画像分析から得られたイメージを用いる HRI (hemispherical range-finding image) は均質のキャノピと不均質のキャノピ間の差を定量化ができる。したがって、HRI を用いて LAI を推定する新方法を次のように提案する。

1. 通常の半球イメージを HRI と合成する
2. 不均質なキャノピであっても、一定の厚さでキャノピを分割する
3. Beer 式を用いて分割されたキャノピの放射強度を推定する
4. PCA のような方法を用いて分割したキャノピの LAI を計算する
5. キャノピ厚さを掛けて LAI を推定する

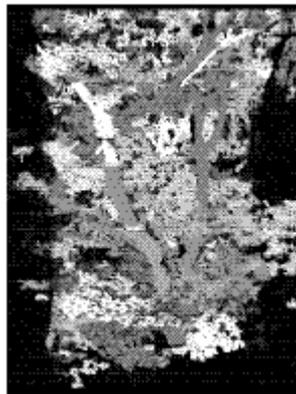


図 16. RSM 作業の結果

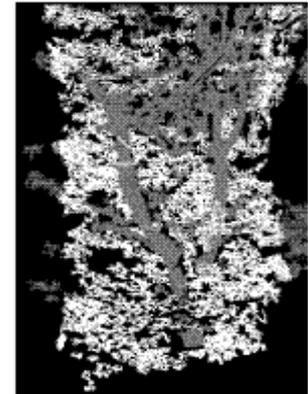


図 17. NDVI により葉と幹を区別した結果

この方法は葉の clumping が明らかなキャノピへの適用が有効である。この方法の有効性を検証するためにレーザ光切断法により観測が行われた同一場所で、1600×1200 の解像度をもつ魚眼レンズ付のデジタルカメラで写真を撮り、画像分析を行った。HRI が対象にする面積が通常のカメラが取る面積より狭いため、HRI が捕らえていない部分をデジタルカメラで取った画像でマスキングを行った(図 18)。その画像を 4 つのリングに分け、LAI を計算した結果 2.49 の値が得られた。

カメラからキャノピ要素までの距離を用いて、各ピクセル放射強度を 1m 単位で数値化した。放射強度は Beer 式で計算した。図 19 がその結果である。LAI-2000 のアルゴリズムを用いて計算したキャノピ 1m の LAI は 1.35 であった。キャノピ厚さ 2.51m に 1.35 を掛けた結果、LAI は 3.39 であった。

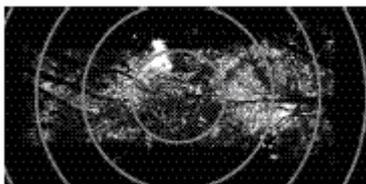


図 18. 放射強度の分布を示すイメージ

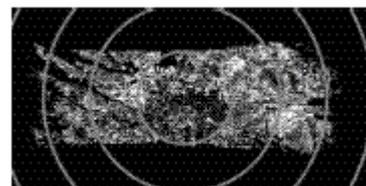


図 19. 数値化した放射強度の分布図

3-3. 考察及びフェーズ II のまとめ

カメラが捕らえる物体のレーザ反射光の強さは距離に依存する。例えば、カメラ近いにある物体

の反射光は強く、遠い物体の反射光の弱い。そのような場合、反射光の画像から葉と枝を区別するのは大変難しい。しかし、カメラと物体間の距離を用いてレーザ光の反射度を補正すれば、葉と枝の区別が可能になることに着目し研究を行った。その結果、レーザ光の反射度は対象物までの距離の 1.5 乗で補正されたとき、その結果は満足であった。

撮影した画像を一定の大きさのピクセルに区分し、各ピクセルにラベルを与えて葉と幹を区別する RSM (regional segmentation method)を開発した。例えば、ピクセル内の構成要素が同様であればラベルは同様であると仮定した。NDVI を 11 段階に区分して画像分析から得られた NDVI 値を初期値として用いて、RSM アルゴリズムを通して葉と幹を区別した。区別作業後には、各要素の特性に基づきそれぞれに対する 3-D 補正作業を行い、肉眼でも葉と枝が区別できるように画像を可視化した。レーザ光切断法から得られた画像を分析して観測した領域の葉面積指数を推定するため、林内外の光環境と魚眼レンズ画像を用いる方法を考案した。開発した方法を用いてある観測領域の葉面積指数を推定した結果、3.39 の値が得られた。3.39 を魚眼レンズ法と LAI-2000 から得られた葉面積指数の値と比較した結果、その値は妥当であると判断された。

4. 成果の達成度

フェーズ I では、樹木の周囲長計測装置及び樹幹形状計測装置を製作し、野外実験を行い使用条件の改善及び取得データの精度を検証した。木が密植しているトヨタフォレストヒルズ内のコナラとアベマキを対象にして樹木周囲長計測装置を用いた観測では、観測期間中それらの平均半径の変化は 1 mm 以下で明確な違いが見られなかった。しかし、木が散在している愛知県工業技術センター内のシラカシでは最大 5 倍程度の放射方向の部位による不均等な形状の変化が見られたことなど樹木の生育環境の違いがその成長量にどのように影響しているかが精度よく観測できた。斜面の起伏が激しく林分密度も高いなど観測環境がよくないトヨタフォレストヒルズにおいて簡易立木位置図作成装置はある一定面積内に存在する樹木を約 1/30 の精度で立木の位置図を作成する成果が得られた。しかし、これらの装置は、軽量化、小型化などの実用性高い装置への開発ができないまま、その測定力の検証の段階で研究が中断された。フェーズ II では従来の方法や技術としてはなかなか得られなかった樹冠の数値情報を非破壊的に測定するレーザ光切断法を開発した。レーザ光切断法はノートパソコンを導入してデータ取得時間の短縮と量の増大を図った。さらに、デジタルカメラを用いてレーザ光の反射光に対する感度を高めた。観測上において遠距離と近距離に存在する葉や枝の測定を可能にすると同時にそれらの区別を可能にする技術と測定領域の葉面積指数を推定する方法を開発し、その応用性を検証し、実用性を確認した。

5. 今後の課題

レーザ光切断法は従来の方法としてはなかなか得られない多数の情報が簡単に得られる高いポテンシャルを所有しているが、測定が夜間に限られるという大きな問題が残っている。レーザ光を昼間にも使用可能な波長のものに交換することやそのレーザ光に感度を持つカメラを導入するなどを通してその問題を克服していく必要がある。レーザ光切断法は森林構造の時間性に対しては精度よく表現したが、空間性に対しては応用力が制限される問題がある。地球温暖化や人為的影響による森林構造の変化が森林流域内の諸プロセスに及ぼす影響を解明するためにはまず樹冠構造に関する広域的情報の入手が必須不可欠であることから広域測定に関するレーザ光切断法の能力を高める必要がある。