

**Measurement method for 3-dimensional structure
of forest canopies**

with the laser plane range-finding method

レーザ光切断法を用いた3次元林冠測定法



田 中 隆 文

TANAKA Takafumi

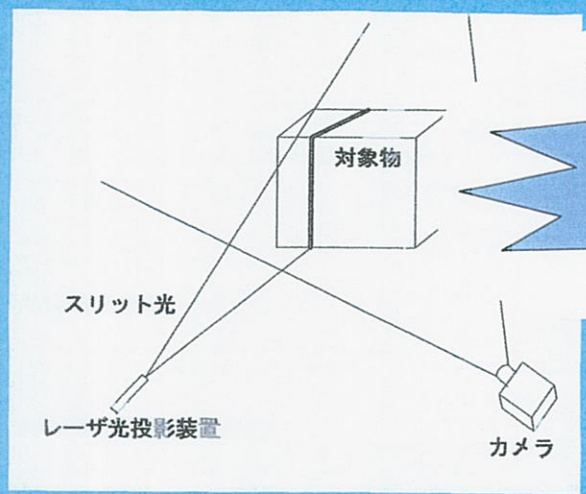
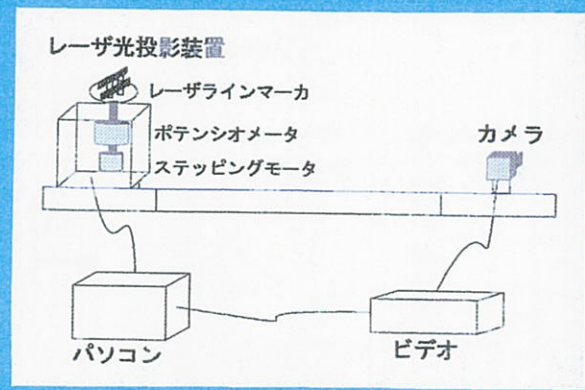
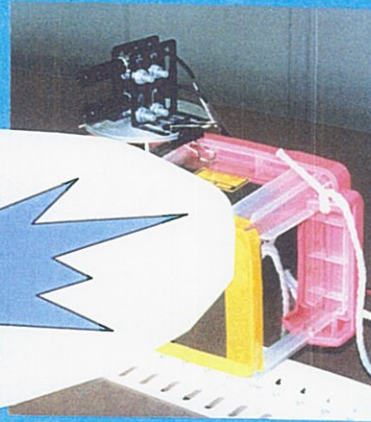
(Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Japan.)

d43034a@cc.nagoya-u.ac.jp

2 0 0 2 Feb.

Ver. 1a

Laser 光測定法の概要 — 原理 —



レーザー光とカメラによる対象物の測定
(数百枚の画像)

＜画像の計算機への取り込み＞

画像処理
ノイズ除去
↓
2値化 (レーザー光検出)
↓
レンズの歪み修正

座標計算

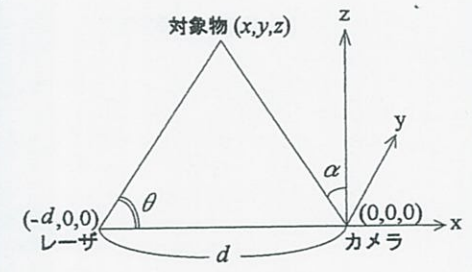
3次元座標上での再構成
(グラフィックとして出力)

解析

1. 樹木位置
2. 林分構造図
3. 林冠DEM

測定データの流れ

レーザー光切断法の原理 (三角測量)



【必要な情報】
 d : レーザとカメラとの距離
 θ : レーザ角度
 α : カメラの中心軸からの水平角
 β : カメラの中心軸からの高低角

【測定方法】
 ←既知
 ←ポテンシオメータ
 ←画像上の横座標
 ←画像上の縦座標

$$z = d / (1 / \tan \theta - \tan \alpha)$$

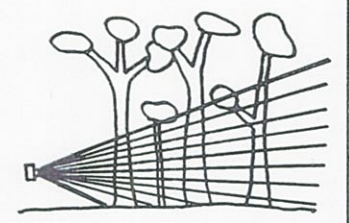
$$x = z \cdot \tan \alpha$$

$$y = (z^2 + x^2)^{1/2} \cdot \tan \beta$$

実験

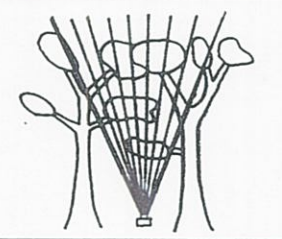
1. 林床で横方向

- ・ 樹木位置、幹の形 (直径) の把握
- ↑
＜実測値と比べ検証＞



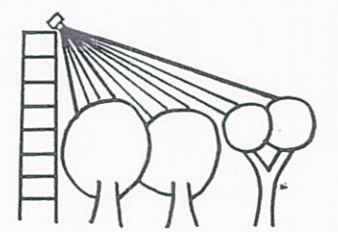
2. 林床から鉛直上方向

- ・ 葉層の構造の検討



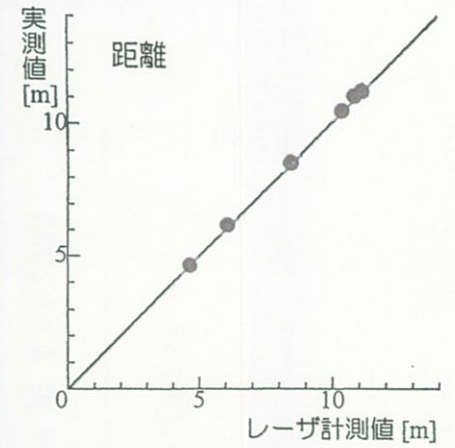
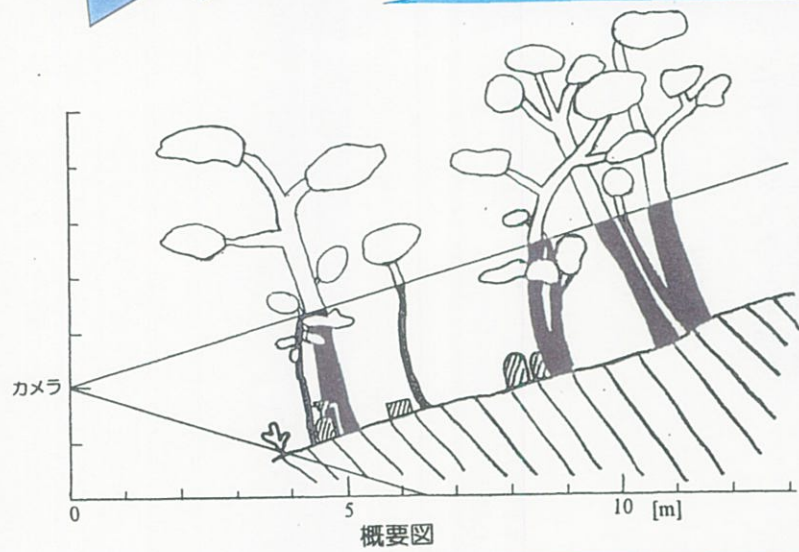
3. 檜の上から斜め下方向

- ・ 樹冠上部の表面形状の推定

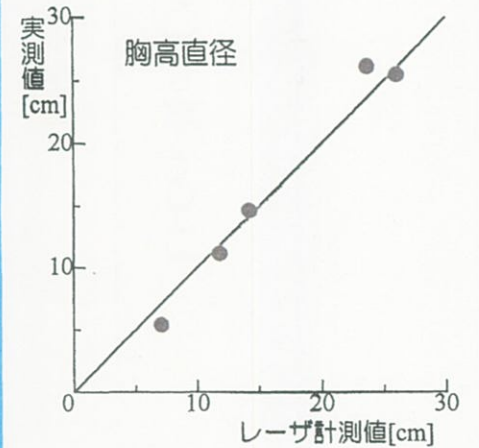
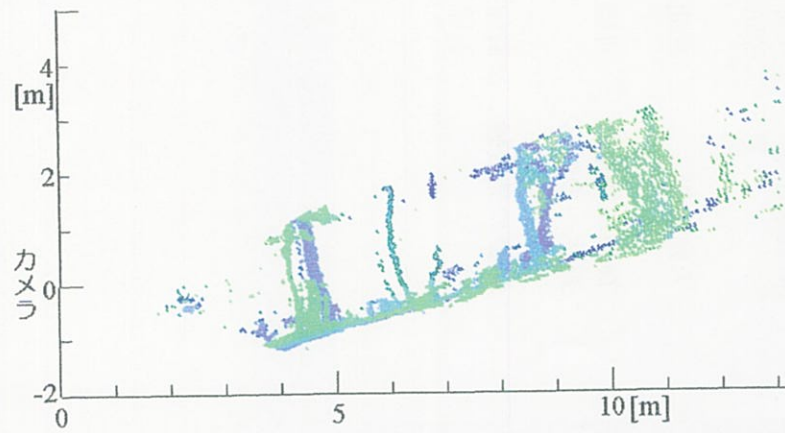


Ver. 1

検証 一



レーザ計測値と実測値との比較
1) 樹木のカメラからの距離



レーザ計測値と実測値との比較
2) 胸高直径

Li-Cor 製の LAI-2000 機との比較表

	本研究手法	Li-Cor 製 LAI-2000
基本原理	光切断法 (三角測量)	Gap fraction method
計測項目	葉・枝・幹の 三次元座標 (Active 型)	5つの高低角範囲毎の 相対照度 (放射光遮蔽値) (Passive 型)
算出項目	葉の3d領域 樹木位置	L A I
精 度	数センチ CCD カメラの 性能に依存	?
価格 (万円)	50~500	150~200
有利な点	距離情報あり	世界中で測定例が多い
前提条件	葉群内の 葉の密度は一定	葉の傾斜角分布 (全空間) 全空間にランダムに存在
天候条件	夜間 (風弱)	曇天時
複雑な構造の 森林への対応	可能	?
今後の発展性	樹種判別 (分光特性) 索道・ヘリへの搭載	?

Ver. 1b

森林水文

- ・ 蒸発散
- ・ 樹冠遮断

森林3次元構造の情報



葉、枝の空間的配置
樹冠形状

ポアラス
葉群・クラスタ構造

生態学的手法

- ・ 層別刈取り ← 1次元, 数十cm間隔
- ・ さいの目刈取り (Kurachi, 1986) ← 破壊的,
- ・ PCM法 (隅田, 1990) ← 労力多
- ・ 魚眼レンズ (Koike, 1985) ← 自動化? 広域への適用性?

画像計測法

- ・ モアレ ← 屋外? 森林への適用性?
- ・ 実態視 ← 複雑な対象

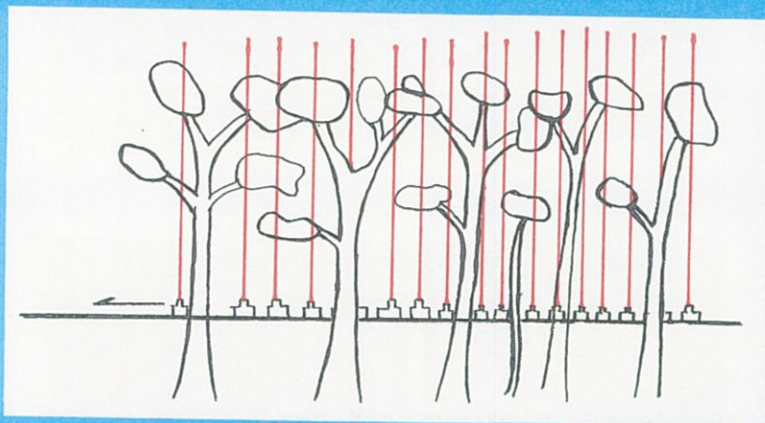
・ 光切断法 (山口, 1996) 自動・非破壊 but 定点

目的: 山口の回転走査型光切断法を移動走査型に改良
実際のキャノピーの斜面縦断測定を実施

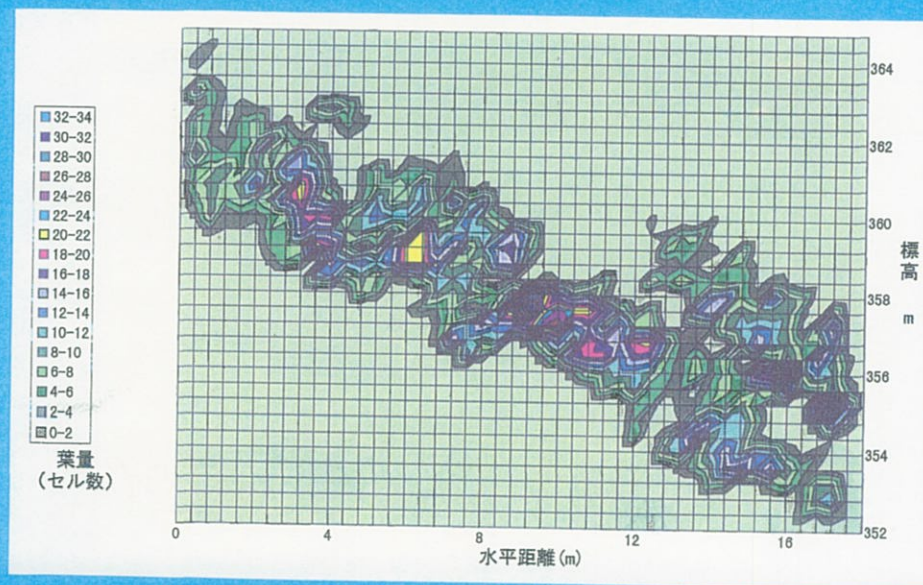
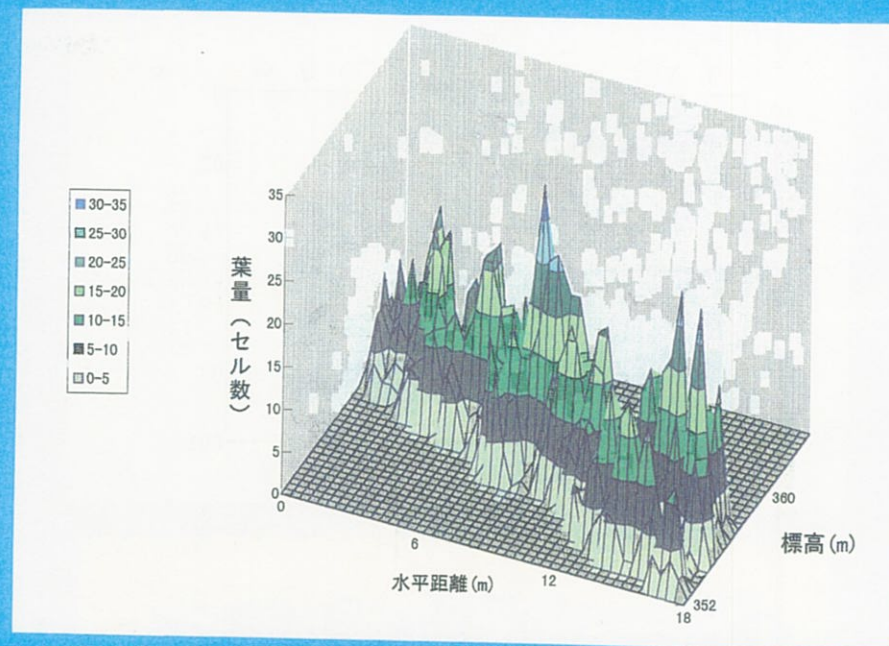
現地実験

東京大学愛知演習林内の落葉広葉樹林

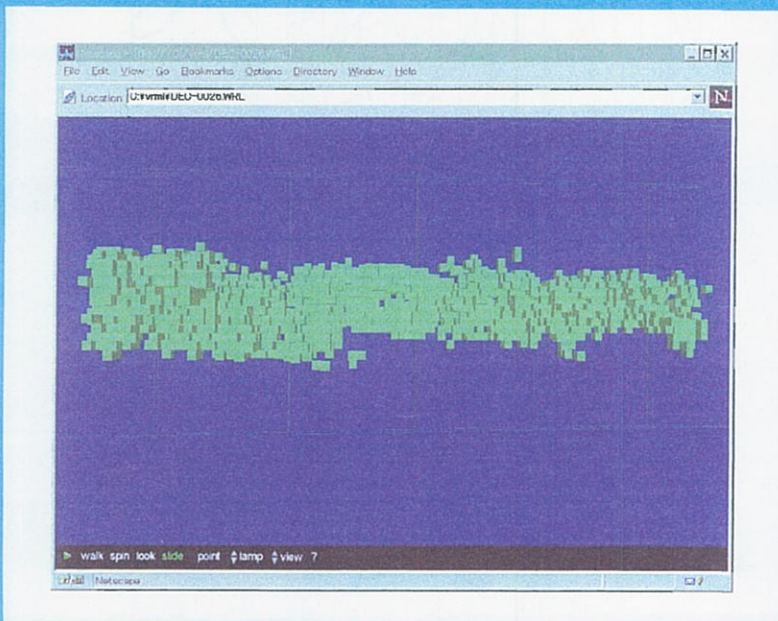
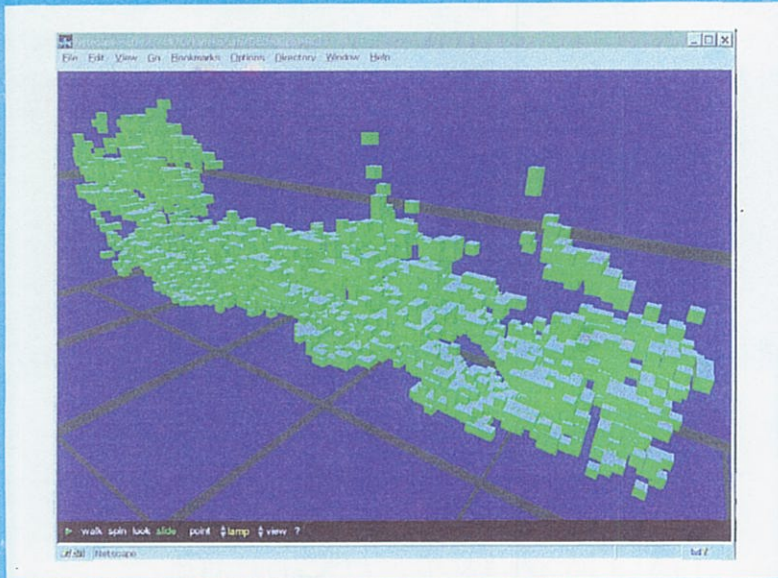
- ・斜面を縦断する長さ 22m のロープを設置
- ・カメラと Laser 射出装置の間隔は 180cm、
- ・移動走査間隔は 10cm



測定結果 高さ別葉量 (セル数) 頻度分布の斜面縦断図 40cm 層別刈り取りに模して表現



測定結果 三次元グラフィックス表示 (vrml 形式)
20cm 立方体セル 3913 個を用いて葉群を表現



応用

葉群の斜面縦断測定結果を用いて
林内光環境をシミュレート。

=> 葉の傾斜角・葉群内密度を単純に仮定したとき、
葉群の空間分布（実測値）で、林内光環境を
どの程度計算できるか？

Beer の式

吸光係数 $g = 0.45$,

セル内葉群密度 $dL = 0.5$ として

直達光を対象に計算

< 林床の相対直達照度の分布の例 >

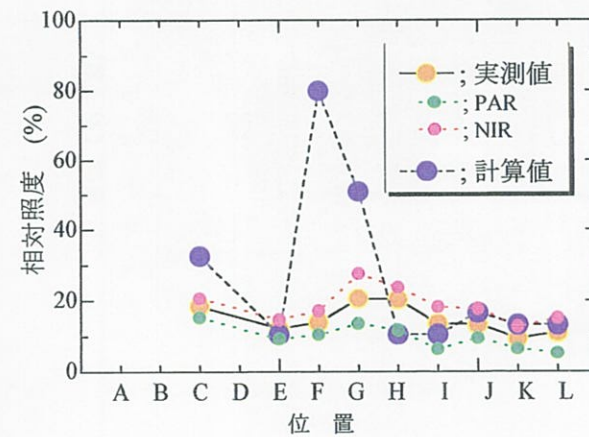
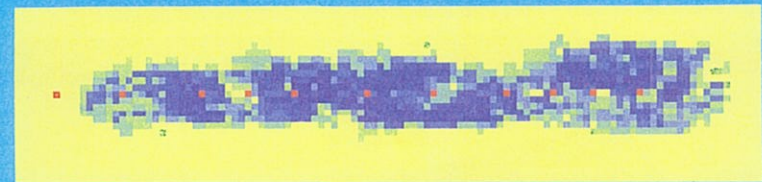


図 林床の相対直達照度計算値と実測値の比較

実測値はLI-1800で測定
計算値は、葉の吸光係数; $g=0.45$,
20cmセル内LAI; $dL=0.5$

Ver. 2

Laser 光切断法を用いた林冠構造

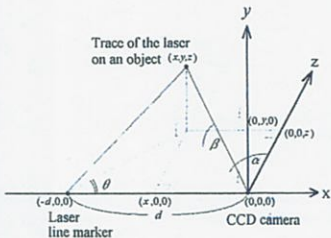
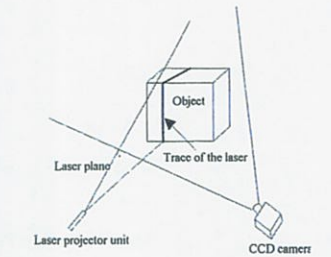
林冠構造構成要素の

Ver. 2

手法：Laser 光切断法（多波長アクティブリモートセンシング）

原理：（3 d 座標の測定）
 （同化部・非同化部の区別）

→ 三角測量,
 → 赤・近赤反射特性



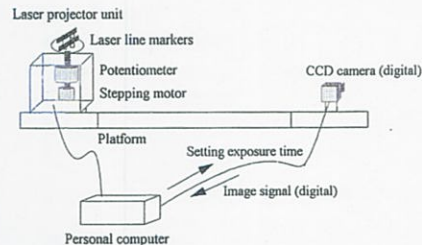
$$x = z \tan \alpha \quad (1)$$

$$y = \sqrt{x^2 + z^2} \tan \beta \quad (2)$$

$$z = d / (1 / \tan \theta - \tan \alpha) \quad (3)$$

【測定システム】

- ・高感度可視近赤カメラ（EDC-1000U）
 露出時間を on-line 制御
 HDに直接出力
 画素数（1134×486）
- ・ハイトロテック社製 Laser 走査装置
 最小走査角度：0.05 度
 赤 Laser（685nm），近赤 Laser（830nm）
- ・パソコン（システム制御・データ記録用）



【測定手順（現場）】

所要時間；約 90 分，
 出力（記録データ）；約 500 MB

- 1) Laser 光を 1/4 度回転（走査）し走査角度をHDに記録
 - 2) 赤色 Laser 点灯
 - 3) 3 段階の露出時間で撮像
 - 4) 赤色反射輝度と CCD カメラ画素の縦・横座標をHDに記録
 - 5) 赤色 Laser 消灯
 - 6) 近赤 Laser 点灯
 - 7) 3 段階の露出時間で撮像
 - 8) 近赤反射輝度と CCD カメラ画素の縦・横座標をHDに記録
 - 9) 近赤 Laser 消灯
- 以上を数百回繰り返す。

【データの処理 1（3 d 座標の算出）】

所要時間；約 10 分，
 出力（座標データ）；約 15 MB

- ・ノイズ除去
- ・3次元座標の計算
- ・雲状画像による 3 d 表現

【データの処理 2（葉群・枝幹認識）】

所要時間；約 5 分，
 出力（方形区データ）；約 0.1 MB

- ・赤・近赤の反射輝度から NDVI 値の算出
- ・ラベリングによる領域抽出（逐次走査並列型伝播法）
- ・領域内の平均 NDVI 値の算出
- ・3 d 生産構造図の作成

Ver. 2

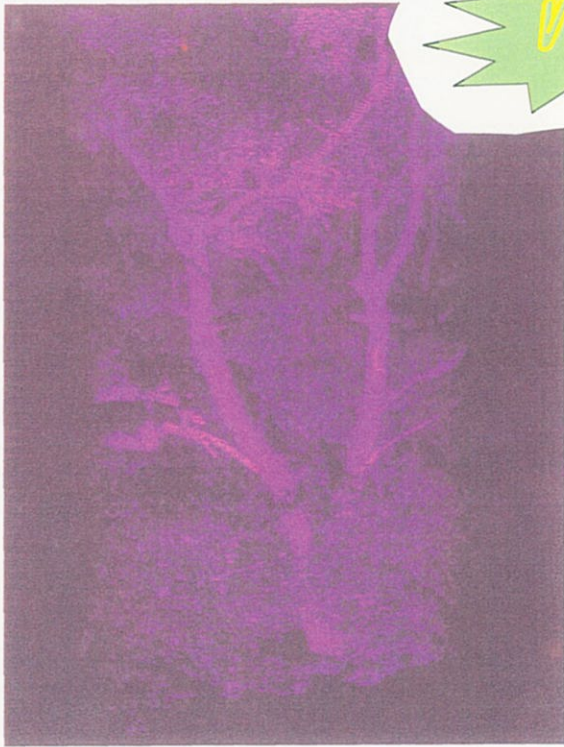


図-3 赤色 Laser (685nm) 反射輝度画像



図-4 近赤 Laser (830nm) 反射輝度画像



図-5 NDVI (正規化植生指標) 画像
 $NDVI = (IR-RED) / (IR+RED)$



図-6 領域化処理状況
逐次走査並列伝播法によるラベリング



図-7 領域内の平均 NDVI 値

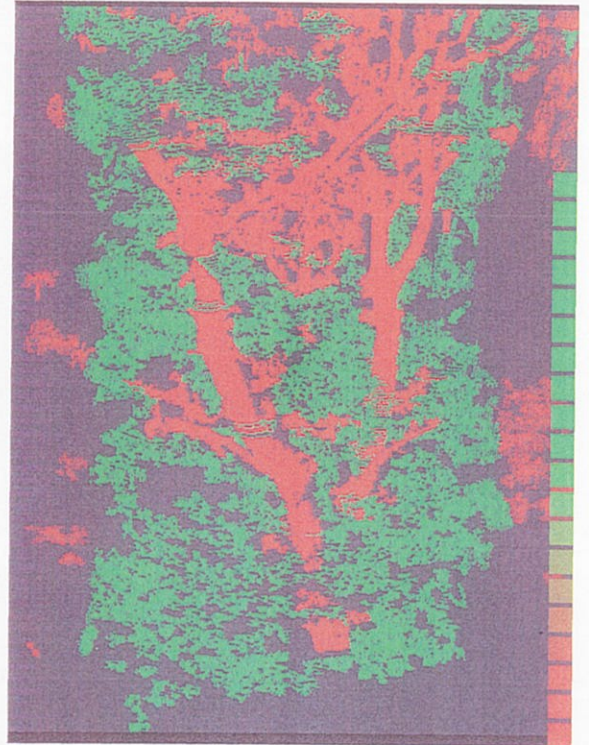


図-8 同化部・非同化部の自動判別
(領域内平均 NDVI 値を用いた 2 値化処理)

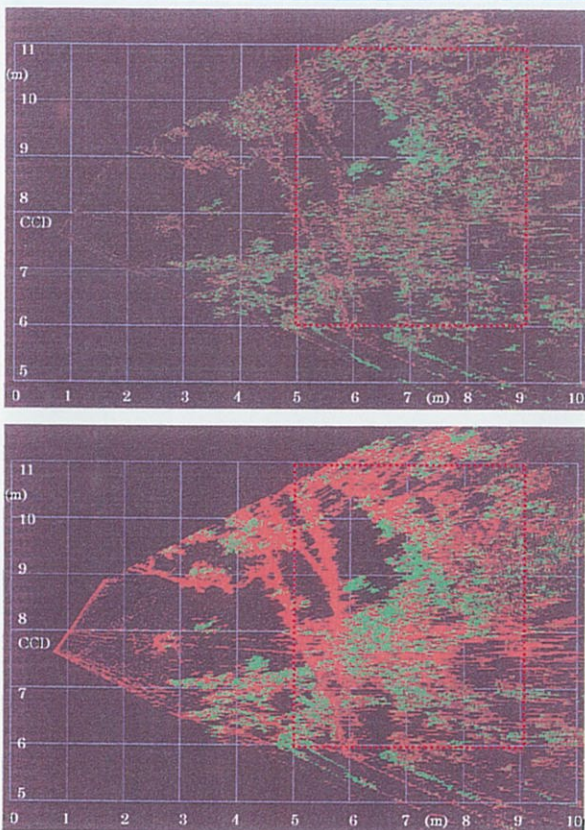


図-09 林冠の 3 d 測定点の側面図
(上図：個々の反射点の NDVI 値)
(下図：領域内平均 NDVI 値を用いた 2 値化)

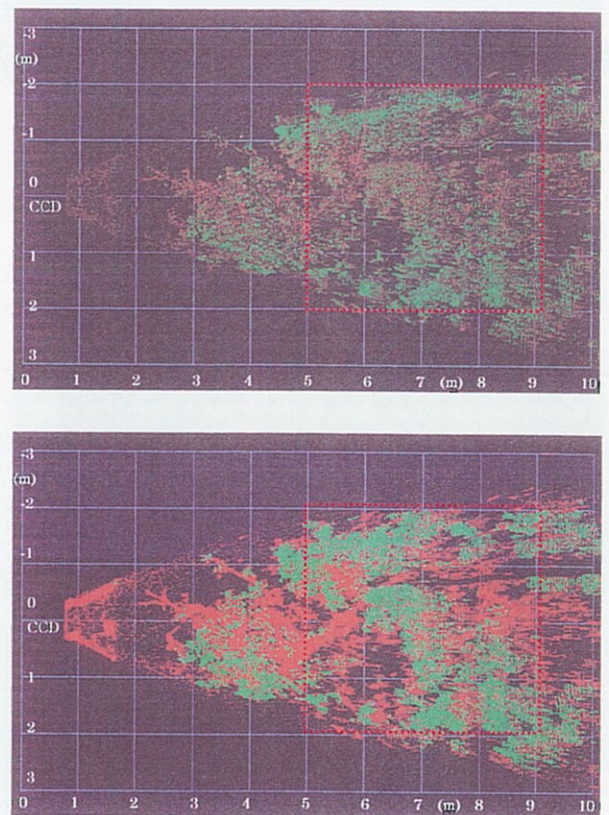


図-10 林冠の 3 d 測定結果 (平面図)
(上図：個々の反射点の NDVI 値)
(下図：領域内平均 NDVI 値を用いた 2 値化)

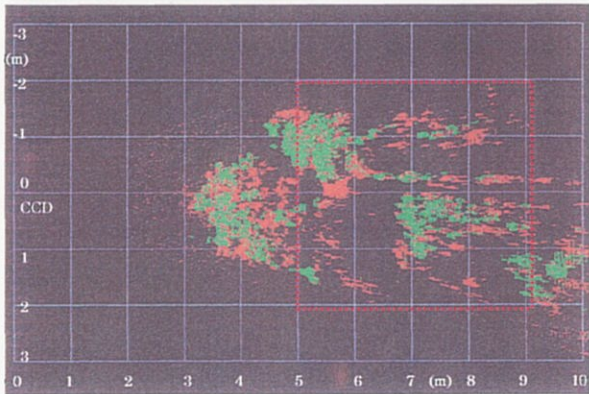
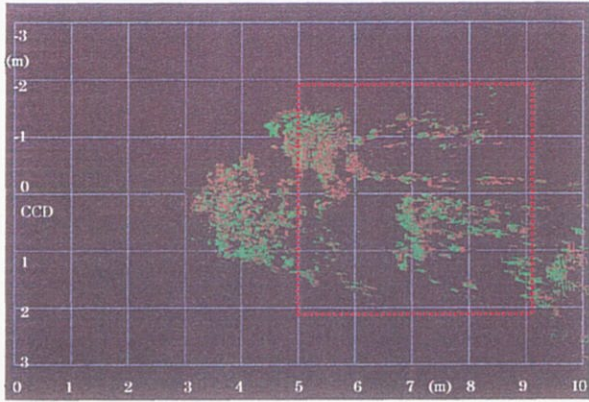


図-11 高さ6~7mの林冠の分布 (平面図)
 (上図: 個々の反射点のNDVI値)
 (下図: 領域内平均NDVI値を用いた2値化)

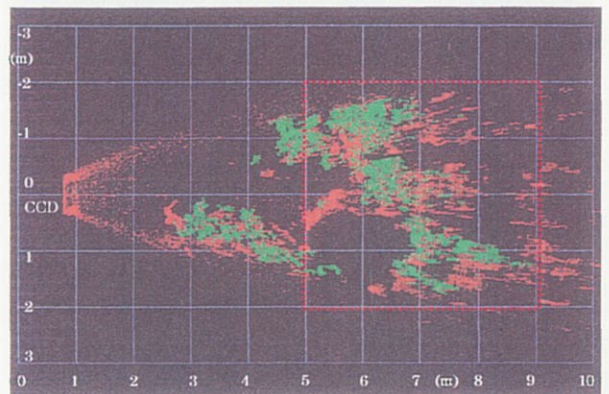
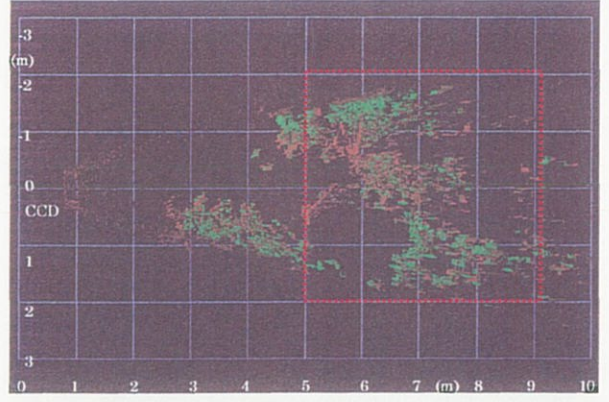


図-12 高さ7~8mの林冠の分布 (平面図)
 (上図: 個々の反射点のNDVI値)
 (下図: 領域内平均NDVI値を用いた2値化)

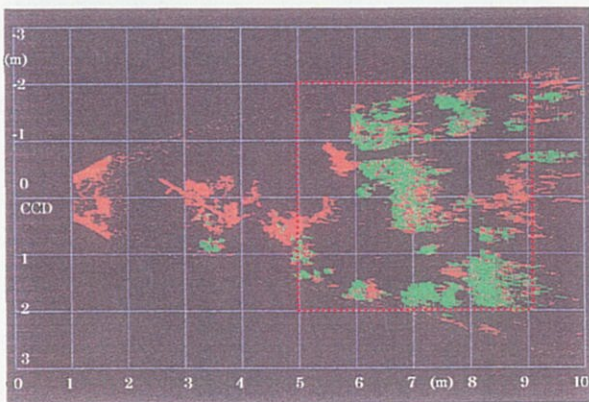
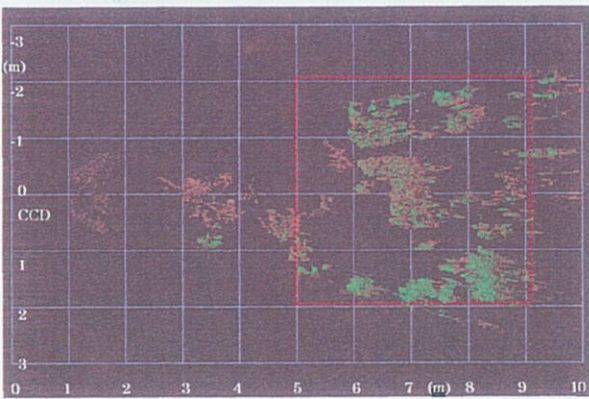


図-13 高さ8~9mの林冠の分布 (平面図)
 (上図: 個々の反射点のNDVI値)
 (下図: 領域内平均NDVI値を用いた2値化)

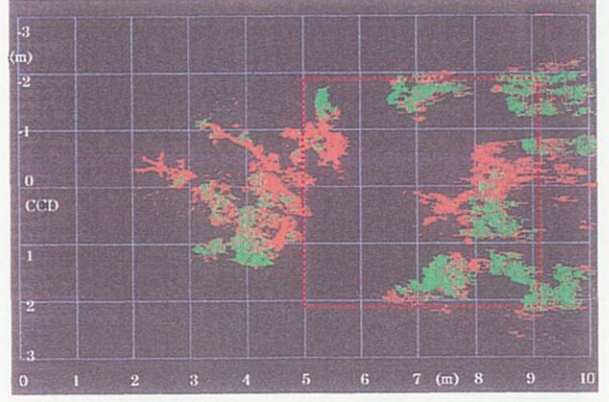
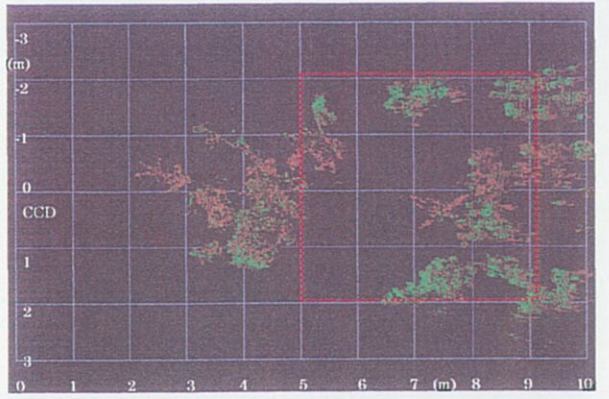


図-14 高さ9~10mの林冠の分布 (平面図)
 (上図: 個々の反射点のNDVI値)
 (下図: 領域内平均NDVI値を用いた2値化)

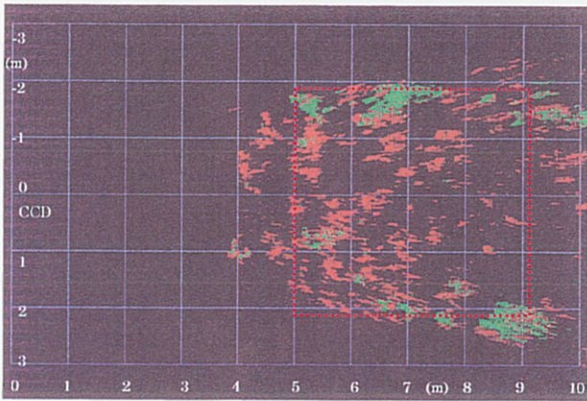
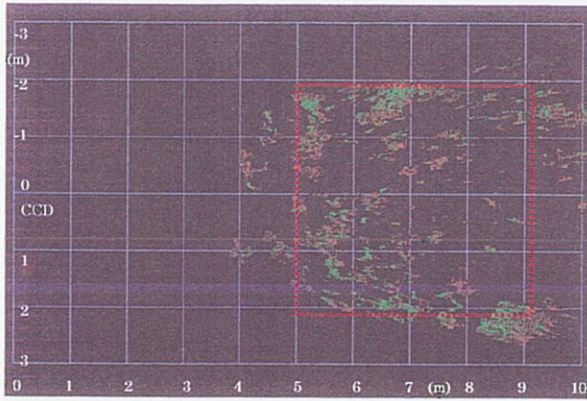


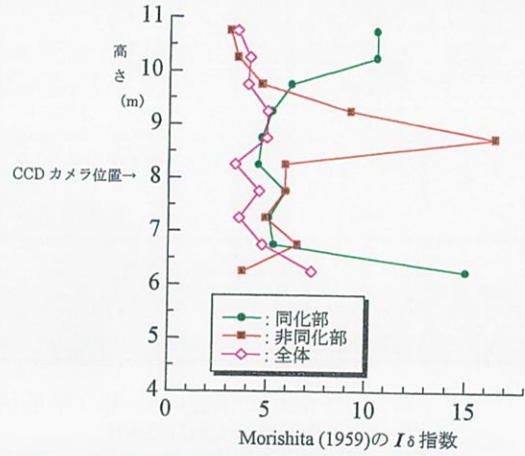
図-15 高さ10~11mの林冠の分布 (平面図)
 (上図: 個々の反射点のNDVI値)
 (下図: 領域内平均NDVI値を用いた2値化)

【適用例】

林冠構成要素の分布様式の解析

名古屋大構内のコナラ成木を供試木とし1998年8月6日夜に
 檜中段(8m高)から横方向にLaserを照射し樹冠構造を測定。
 図-9~15の赤枠内を50cm立方の方形区64個×10層に分割。
 各方形区に入る同化部・非同化部のLaser反射点をカウント。
 各層毎にMorishita(1959)の $I\delta$ 指数を用いて分布様式を検討。

$I\delta < 1$ 一様分布
 $I\delta = 1$ ランダム分布
 $I\delta > 1$ 集中分布



Ver. 3

【Background】

Canopy structure affects radiative and convective exchanges in the plant community.

Forest canopies consist of large numbers of leaves, shoots, twigs and branches, and their structure of forest canopy is usually complicated in its architecture.

In studies of flux on forests, [how to measure
how to describe] the forest canopy characteristics has been one of important and difficult problems.

Its 3-dimensional structure should be measured to clarify the effect of canopies on hydrological processes in the forest.

The measurement of canopy structure must be non-destructive to allow investigation of seasonal fluctuations in hydrological properties.

【Theory】

When a laser beam is projected onto an object, the illuminated trace of the beam is distorted on the surface of the object. The trace of a projected laser plane is detected on the image in a CCD camera.

Each point on the trace can form a triangle with the laser projector unit and CCD camera. Each pixel in the image of the CCD camera has its own α and β angles.

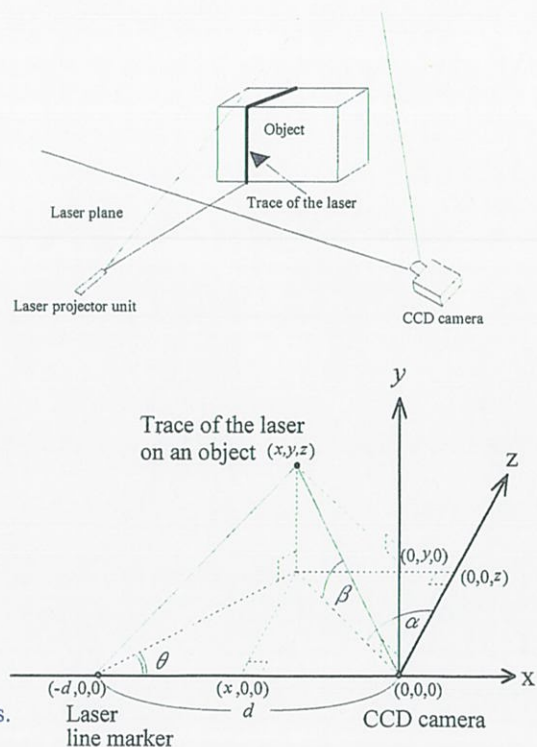
Knowing relevant camera and projector geometry, all points on the laser traces can be converted to 3-D data (x, y, z) by triangulation.

$$x = z \tan \alpha \quad (1)$$

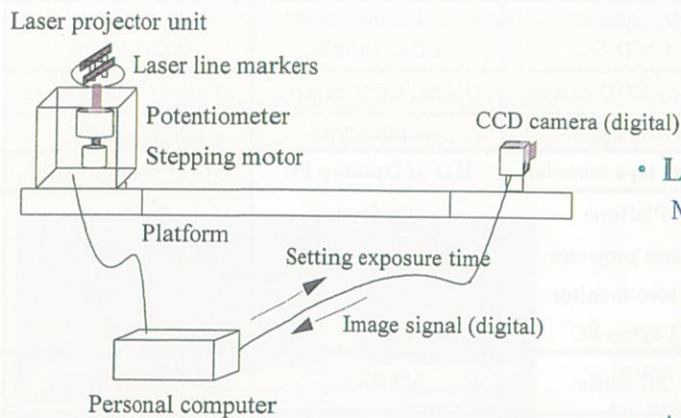
$$y = \sqrt{x^2 + z^2} \tan \beta \quad (2)$$

$$z = d / (1 / \tan \theta - \tan \alpha) \quad (3)$$

Scanning the laser plane over the objects produces thousands of scenes of reflected laser traces.



【 Measurement system (Ver.3) 】



- **Digital CCD camera**

Exposure-time controlled from PC
Capturing image into PC HD directly
Resolution ; 1024 x 768

- **Laser projector unit**

Minimum scanning angle : 0.05 deg.
Red Laser (685nm)
Infrared Laser (830nm)
Stepping motor rotates the line markers.
Potentiometer detects the precise angle

- **A notebook PC** (Sotec Co., e-note 600)

for controlling the system
for recording image from the camera

- **Platform** made of steel and aluminum on which the laser projector unit and the camera are mounted

【 Data acquisition *in situ* 】

Before acquiring the data, some preparation is necessary.

- 0-a) The platform holding the laser projector unit and the CCD camera must be fixed so as not to move during the acquisition process.
- 0-b) It is necessary to determine the starting and the ending angles of the laser plane needed to scan all the objects.

The data acquisition steps were automatically executed at night as follows:

- 1) rotate the pair of laser line markers by the given angle using the stepping motor;
- 2) measure the angle θ of the laser plane precisely with the potentiometer;
- 3) turn on and project the visible red color laser on the objects;
- 4) capture the camera image into the PC hard disk under 3 kind of exposure times;
- 5) turn off the visible red color laser;
- 6) turn on and project the near-infrared laser on the objects;
- 7) capture the camera image into the PC hard disk under 3 kind of exposure times;
- 8) turn off the near-infrared laser;
- 9) move the stepping angle by 0.05 degrees, return to step 1), until the angle of laser plane reaches the final angle;

【Comparison with our previous method】

	Ver. 1 Tanaka et al. (1998)	Ver. 2	Ver. 3 Current Version
Camera	RF system, CMD-5C	Electrim, EDC-1000U	Sony, XCD-X700
Interface to PC	Analog CCD camera video signal	Digital CCD camera peculiar type	Digital CCD camera IEEE-1394
Image recorder	Video tape recorder	HD of Desktop PC	HD of Notebook PC
Other compositions of the system	Platform Laser projector Video monitor Laptop PC	Platform Laser projector	Platform Laser projector
Controlling soft (original)	PC Basic	MS-DOS	Windows 98 SE
Rate for capturing image	(off line)	slow	fast
Resolution of radiation intensity	poor	not bad, but easily saturated	good
Distinguishing foliage from branches	only theory (not practical)	Depending on the situation	practical useful

【Comparison with other methods】

	This author's method (A laser plane range- finding method)	Ranging systems that measure the time or phase difference of laser beams	LAI-2000	the stratified clip technique Monsi & Saeki (1953)
non-destructivity	○	○	○	×
3-D structure	○	△	△	△
Multi layer canopy	○	×	△	○
distinguishing foliage from branches	○	×	×	○
cost	○	×	△	△
applicable for broad area	△	○	△	×

Laser ranging systems that measure the time or phase difference of laser beams, were used to obtain 2- or 3- dimensional sections of forest canopy, but the method is inefficient in measuring porous canopy because it must select only one of many vague reflecting laser waves; the selection is usually executed without further analysis by the hardware of the system.

Though there are some **other acquisition methods in the field of vision technology**, for example, **moiré fringe** methods. almost all of them are inappropriate for outdoor situations such as forest canopies.

Passive stereoscopic methods have been tested for determining shapes of forest canopy; they can detect the surface layer relative easily, but are weak in measuring foliage inside a porous canopy because they allow confusion when matching a pair of scenes of porous objects

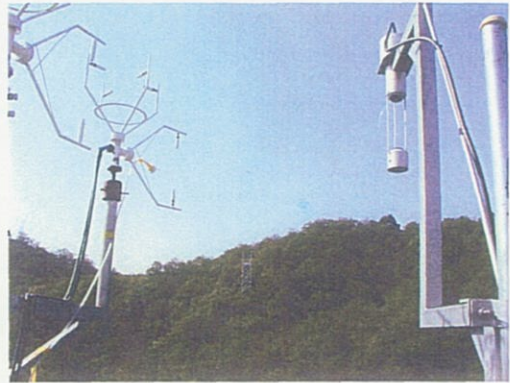
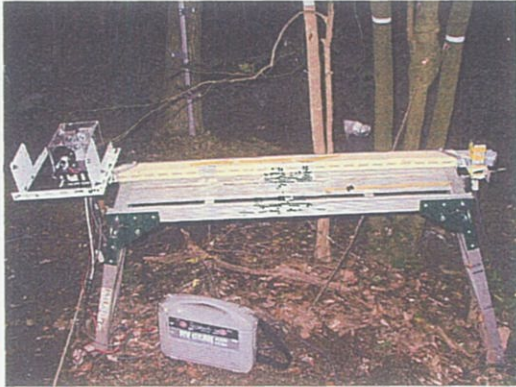
【Applications to measuring real canopy structures】

Location:

A real forest located in Toyota City in the central of Japan.
(near a scaffold tower for sensible and latent heat flux).

Vegetation:

A crown-closed, mixed stand of broad-leaf trees,
dominated by *Quercus serrata* Thunb. trees (15 m).

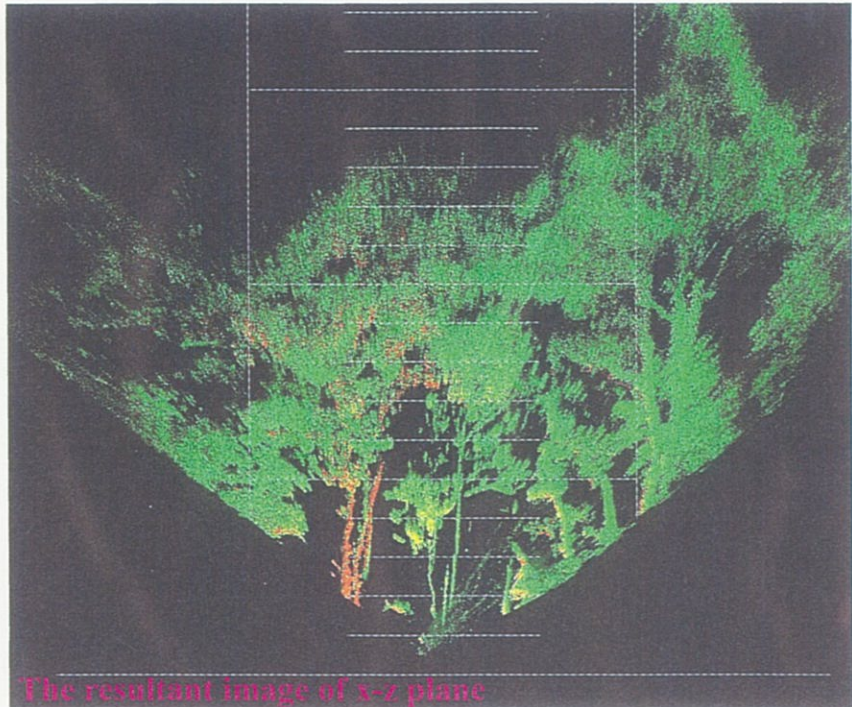


Laser planes were scanned projecting
from below the canopy looking upward
to measure positions of canopy foliage.

The data-acquisition was executed automatically at night.
(2300 step, about 100 minutes)

Run 01 : Oct. 31, 2001

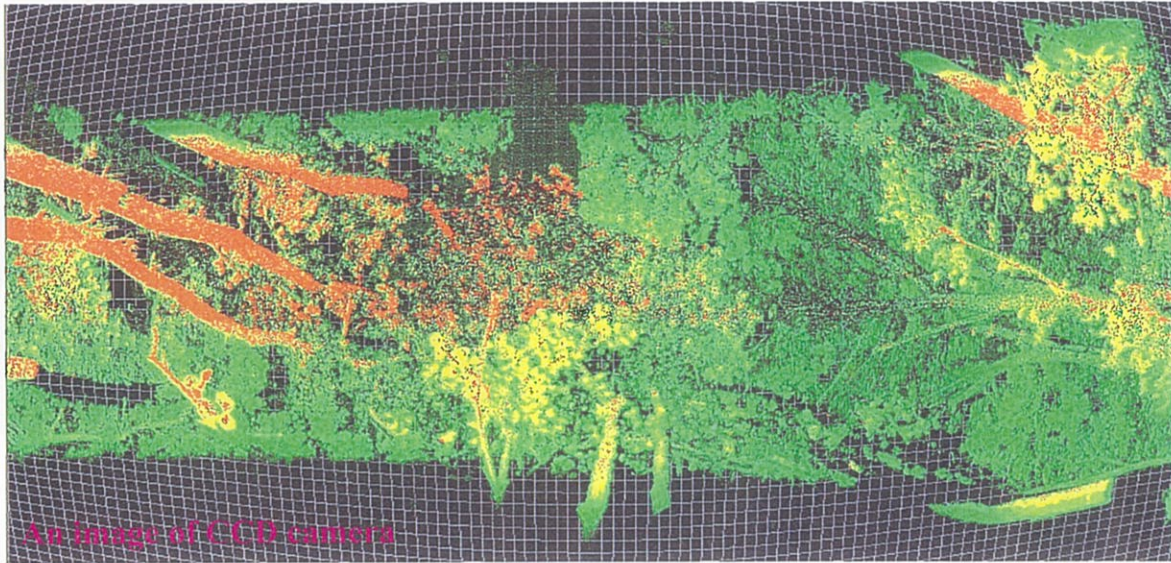
【 Results 】



The resultant image of x-z plane

Both visible and infrared laser were used,
the 3-D data of canopy could allowed us
to distinguish foliage form branches and trunks successfully.

【 Results 】

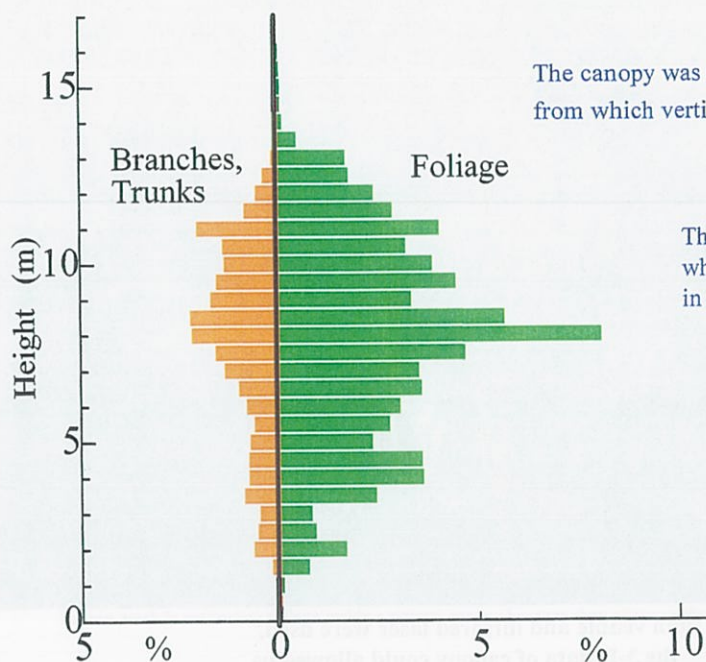


The 3-D data of canopy allowed us to distinguish foliage successfully from branches and trunks using the properties of their reflection spectra.

Green and Brown color mean, respectively, foliage and branches or trunks.

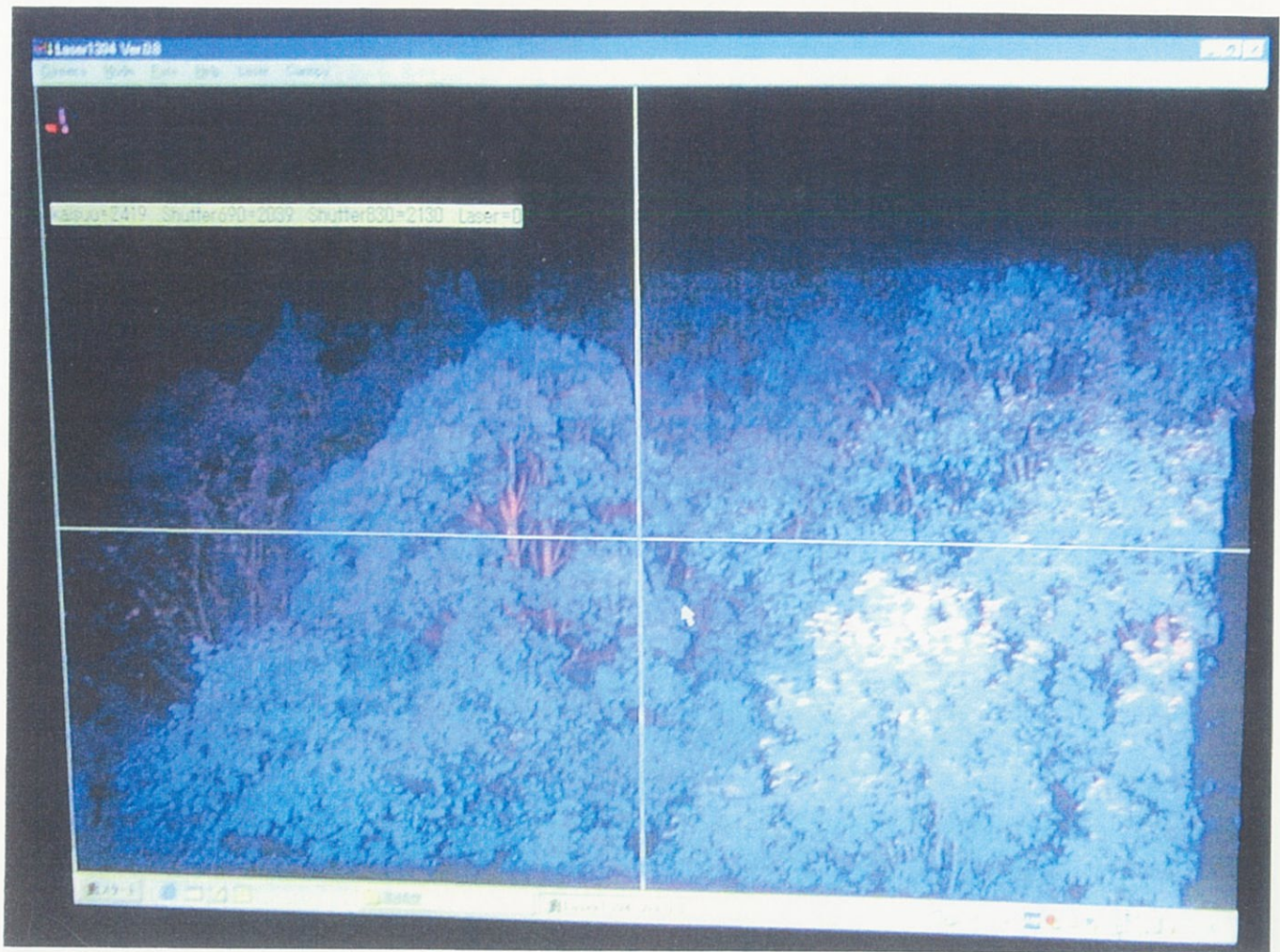
Light and dark color mean, respectively, close to and far from the viewpoint.

【 The resulting fig. of "production structure" 】



The canopy was reconstructed using the measured 3-D data, from which vertical distribution of biomass was obtained.

The vertical distribution of biomass is shown, which contained foliage, branches and trunks in the horizontal space of 10m x 5 m.



Forest Hydrologist

Assoc. Prof. TANAKA, Takafumi

Graduate School of Bioagricultural Sciences,
Nagoya University, 464-8601
Tel.&Fax. +81-52-789-5745
E-mail d43034a@cc.nagoya-u.ac.jp



名古屋大学大学院生命農学研究科
地域資源管理学講座 水土保持学分野

助教授 田 中 隆 文

〒464-8601 名古屋市千種区不老町
Tel.&Fax. 052-789-5745 (917441)
E-mail d43034a@cc.nagoya-u.ac.jp