

反射型及び透過型マイクロ波計測装置の開発と草地における計測方法

誌名	草地試験場研究報告
ISSN	03850196
著者	佐藤, 健次 田中, 米 西村, 文彦 野本, 達郎 原島, 徳一 梨木, 守 井上, 慶一
巻/号	41号
掲載ページ	p. 45-52
発行年月	1989年3月

反射型及び透過型マイクロ波計測装置の開発と 草地における計測方法

佐藤健次・田中 米¹⁾・西村文彦¹⁾・野本達郎²⁾・
原島徳一・梨木 守³⁾・井上慶一⁴⁾

放牧利用部 草地管理研究室

¹⁾ アジア航測株式会社

²⁾ 退職

³⁾ 現 東北農業試験場 草地部

⁴⁾ 飼料生産利用部 栽培工学研究室

(昭和63年10月31日受理)

要 旨

佐藤健次・田中 米・西村文彦・野本達郎・原島徳一・梨木 守・井上慶一
(1989)：反射型及び透過型マイクロ波計測装置の開発と草地における計測方法。
草地試研報 41：45～52。

マイクロ波による牧草類の量的及び形態的な評価を行うために、1985～1987年の間、試験を行った。本報では一連の研究で、試作して用いたマイクロ波計測装置と主要な計測方法について検討した。

1) 反射型は、主要な機能がコンピュータコントロールされており、L、S、C及びXバンド用のフラットアンテナを上方向に駆動しながら計測する。受信される波形状のマイクロ波をもとに解析する。本装置で草地の量的及び形態的情報を入手できる見通しを得た。

2) 透過型は、コンピュータコントロールのもとでCバンド用フラットアンテナを用い、群落の側面方向から土壌の影響を軽減あるいは除去して計測できる。このことは、量的因子を中心として、地上レベルでのマイクロリモートセンシングとして有効性が高いとみられた。

キーワード：反射型、透過型、マイクロ波計測装置、フラットアンテナ、マイクロ波、草地、草量、形態、リモートセンシング

緒 言

農業分野におけるマイクロ波リモートセンシング (Remote Sensing) は、植物体の表面散乱に依存する可視光・近赤外域リモートセンシング (棟方・芝山1985) と異なり、canopy (草冠、樹冠) 内に透過できる波長域を扱うために、農業生産に関わる植物群落内の乾物などの量的あるいは形態的情報を得られる可能性が高い。

しかし、現在のところ、農業分野では、畑作物 (Bush and Ulaby 1987; Thomas et al 1981; 堀江・田中1985)、草類 (Young et al 1981) 及び樹木 (Murata et al 1987) などに関する報告のように、実験データの集積とそのためのマイクロ波センサの試作・開発の研究が平行的に行われている。計測対象植物ごとに最適な計測条件 (広沢1986) における、解析的な研究は十分といえない。

著者らは、1985年から、マイクロ波センサの試作・

改良を加えながら、主に牧草類を対象としたマイクロ波の反応を検討し、マイクロ波による牧草類の量的及び形態的な評価を試みている (佐藤ら 1987)。

本報では、試作した装置と測定方法の概要について報告する。なお、本研究は、大型別枠研究「グリーンエネルギー計画」として、1985～1987年の間実施した。

計測の原理及び方法

1. マイクロ波計測の原理と計測方法

本研究では、主にCバンド(4.0～8.0GHz)の周波数帯のマイクロ波を使用し、Fig. 1.のように、牧草類に連続的に放射しながら計測した。ここでは、便宜的に反射型(reflection type)と透過型(penetration type)と称する2装置における計測の原理と計測方法について説明する。Fig. 2.に反射型(a)及び透過型(b)の計測装置を用いた状況を示した。

反射型の計測では、Fig. 1.の(a)のように、送信

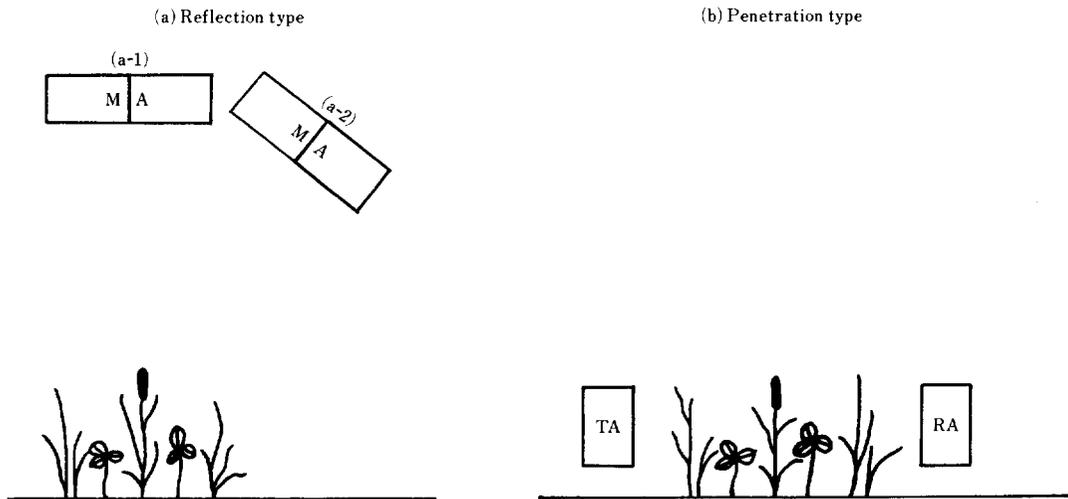


Fig. 1. Configuration of antennas of the reflection and penetration type systems for grassland.
 MA : multiband (L, S, C and X bands) antennas for transmission and reception
 TA : antenna for transmission, RA : antenna for reception.
 (a-1) : vertical measurement, (a-2) : inclined measurement.



(a) Reflection type system



(b) Penetration type system

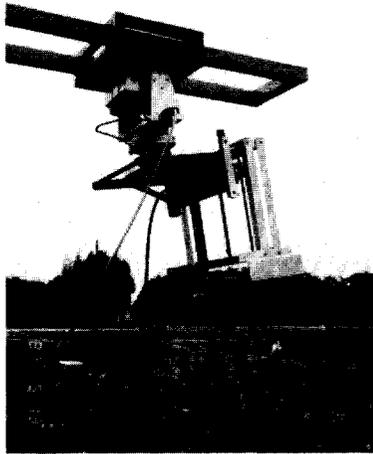
Fig. 2. Operation of the reflection type system and penetration type system.

アンテナから放射されたマイクロ波エネルギーと、測定対象の牧草類や地表面で散乱反射して受信されたマイクロ波エネルギーとの変化量から、牧草類の種類や量的な違いを推定することが計測原理となっている。実際には、放射されるマイクロ波送信電力と散乱反射した受信電力の値、あるいはこの電力値から求めた散乱係数によって、測定対象物の情報を得た。

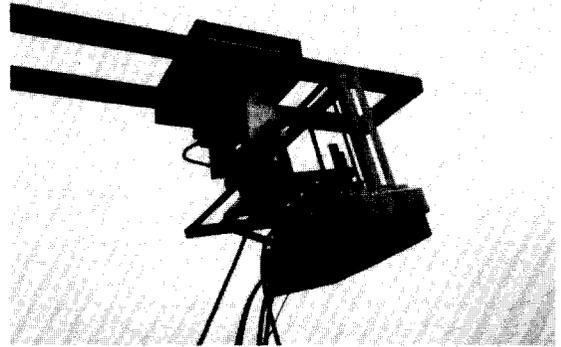
この型では、牧草類の上方向約 1.5 m に、真上 (a-1) あるいは約 10° の傾斜 (a-2) を与えてマルチバンドアンテナを固定後、6.15 GHz のマイクロ波を連続的に放射しながらアンテナを上方向に 1 秒当たり 1 cm の

定速度で駆動させ計測した。Fig. 3. に計測の開始時 (a) と終了時 (b) のアンテナの状況を示した。この方法では、受信電力が波動現象を起す (淵本ら 1988) のでデータは 1 回の測定につき波動現象の 3 波長分をコンピュータに入力し、解析した。

透過型の計測原理は、Fig. 1. の (b) のように、送信アンテナ (TA) から放射されたエネルギーと、牧草類を透過し、受信アンテナ (RA) に到達したマイクロ波エネルギーとの変化量から牧草類の量的あるいは形態的な違いを推定することにある。ここでも、マイクロ波は電力値と電力値から求めた散乱係数によって評価した。



(a) Start



(b) End

Fig. 3. Multiband antennas of the reflection type system in operation.

この型の計測では，土壌の影響を取り除き，牧草類の反射・吸収をみるために，送・受信アンテナを地上 10 cm に設定し，5.6 GHz のマイクロ波を連続放射しながら行った。アンテナ間の距離は，牧草群落の高さ及び現存量によって変えた。受信電力のデータは，定点計測の場合には 1 点を，走行しながらの移動計測の場合には，m 当たり 2.5 点をコンピュータに入力した。

散乱係数 σ^0 は，観測対象物の散乱体が地面のように平面状に広がった物体として計測されるという前提で算出され，単位面積当たりの平均的な散乱断面積を表す微分散乱係数である。この係数は，次式で求め，対数をとって [dB] で表示した。

$$\sigma^0 = \frac{4\pi}{g^2} \cdot \frac{R^2}{ab} \cdot \frac{1}{\sec\theta} \cdot \frac{W_{ar}}{W_t}$$

σ^0 : 散乱係数， g : 利得係数， R : 送受信アンテナと対象物体との距離 (m)， ab : アンテナの実開口面積 (m^2)， θ : 観測天頂角， W_{ar} : 平均受信電力 (w)， W_t : 送信電力 (w)。

なお，今後のデータの取り扱いにおいて，マイクロ波の波形を電圧値で表示することもあるが，これは受信器が受信波の電力に比例した電圧を出力するため，マイクロ波の電力が電圧値で表示されることによる。散乱係数は，別のプログラムにより，電圧値から逆算した電力値で求めた。

2. 計測装置の概要

1) 反射型計測装置

反射型計測装置の概略的なブロック図を Fig. 4. に示した。

(1) マイクロコンピュータ (MC)

デスクトップコンピュータを使用した。メモリ容量 16 K~32 K バイトで，プログラム言語は，BASIC (グラフィクス・ステートメントは標準) である。データは，内蔵カセットテープドライブ (210 K バイト) で記録が可能であり，マイクロ波発生器 (MG) とデジタルボルトメータ (DV) の制御並びにマイクロ波受信器出力電圧自動読取の機能を持っている。

(2) マイクロ波発生器 (MG)

コンピュータに連結した希望するバンドのプラグインユニットを装着して用いた。プラグインユニットは，C バンド (4.0~8.0 GHz) と X バンド (8.0~12.4 GHz) 用，L バンド (1.0~2.0 GHz) と S バンド (2.0~4.0 GHz) 用の 2 種類がある。本研究では，牧草類に対する反応性について行った予備調査の結果から，主に 6.15 GHz の周波数を用いた。

(3) マルチバンドアンテナ (MA)

奥行 25 cm × 幅 54 cm × 高さ 8 cm の中に，フラット型アンテナを装着し，L, S, C 及び X バンドの受信・発信ができるように，小型化，軽量化を図った。主に使用した C バンドのアンテナ仕様は，中心周波数: 5.80 GHz，利得: 20 dB，ビーム幅: 30 deg，VSWR 1.2 である。アンテナ常数は， $f_0=5.8$ GHz のときに，開口面積: 110 cm^2 ，実開口面積: 52.8 cm^2 ，利得:

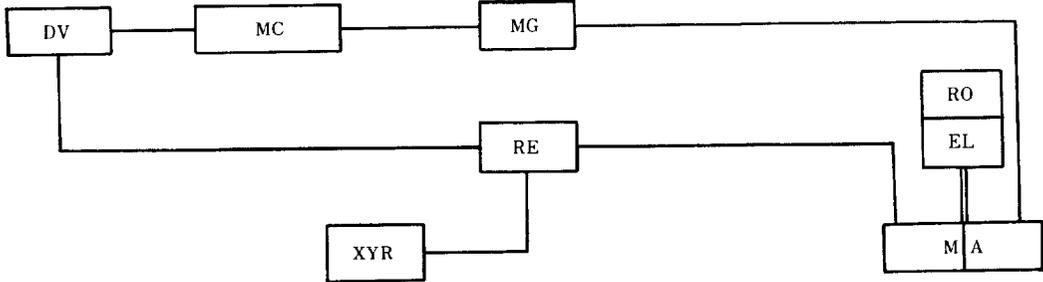


Fig. 4. Simplified block diagram of the reflection type system.

DV : digital voltmeter, MC : microcomputer, MG : microwave generator, XYR : X-Y recorder, RE : receiver, MA : multiband (L, S, C and X bands) antennas, RO : rotator, EL : elevator.

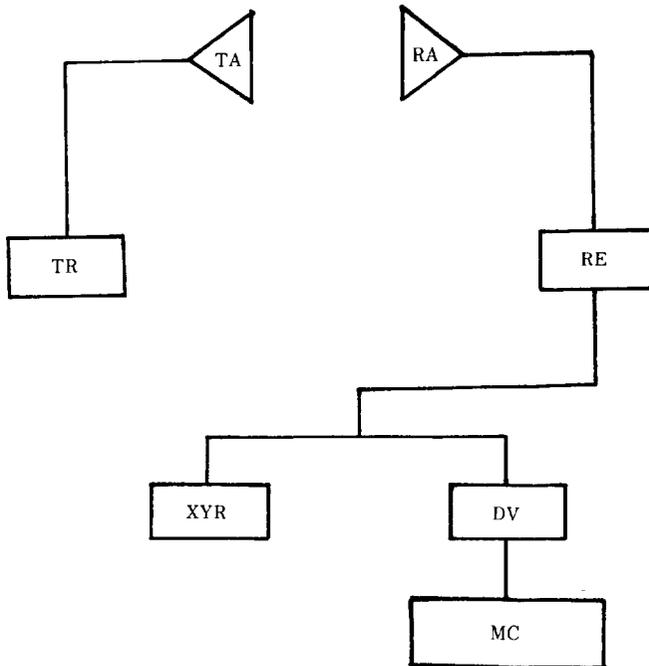


Fig. 5. Simplified block diagram of the penetration type system.

TA : antenna for transmission, RA : antenna for reception, TR : transmitter, XYR : X-Y recorder, DV : digital voltmeter, RE : receiver, MC : microcomputer.

14.0 dB, 利得係数 : 0.48, ビーム幅 $\theta_H = 29^\circ$ と $\theta_v = 32^\circ$ である。

(4) マイクロ波受信器 (RE)

本装置は、マルチバンドアンテナモジュールから送信され、受信されたマイクロ波を受信電力で表示するものである。受信は AM 検波形式をとり、受信周波数 0.1

～18 GHz, 受信感度 : 0～60 dBm max (ダイナミックレンジ) である。受信信号出力電圧は、D.C 0～1.0 V であり、システム化したボルツメータを通してマイクロコンピュータで処理した。

(5) デジタルボルツメータ (DV)

システム用に設計されたサンプルホールド機能を持ち、

1秒当たり5,000回の高速読み取りができる。マイクロ波受信器で受信したマイクロ波信号出力電圧(D.C.0~10V)をマイクロコンピュータを介して自動的に読み取ることはできるけれども、読み取った回数を記憶することはできない。ただし、読み取り回数を指定することは可能である。

(6) X-Yレコーダ(XYR)、レーダ回転機(RO)及びアンテナ昇降機(EL)

XYRは、4403型で、ファイバーペンにより専用ロール紙にインク書きする方式のものである。ROは、計測対象物に対するマルチバンドアンテナの発信・受信の角度を変えるものであり、この下にELを装着した。

2) 透過型計測装置

透過型計測装置の概略的なブロック図をFig. 5.に示した。マイクロコンピュータ(MC)とX-Yレコーダ(XYR)は、反射型と同じものを用いたので、ここではその他の装置について述べる。

マイクロ波発生器(MG)は発信周波数4~8GHz(Cバンド)を、連続波(CW)として発信する。マイ

クロ波受信器(RE)は、AM検波の受信型式をとり、受信周波数2~12GHz、受信感度100dB(Bレンジ)である。今回の計測では発信周波数を5.6GHzを中心として±0.5GHzの帯域に固定した。アンテナ(A)は、30×30cmのフラットアンテナで、周波数4~8GHzの水平、垂直偏波送信と水平、垂直偏波受信を行うことが可能であるが、今回は水平偏波送信と水平偏波受信を行う。アンテナ常数は、アンテナ開口面積:484cm²、利得係数:0.44、ビーム幅:15°である。デジタルボルトメータ(DV)は、HP3478Aを用い、HP85の制御の場合、1.4秒に、100個の測定値を読み込むことができる。

測定例と考察

1. 反射型計測装置

Fig. 6.は、反射型計測装置の基本的な反応パターンを示したものである。1×1mのアルミ板(a)、アルミ板の上に直径10cm、厚さ5cmの平べいな石を置いた状態(b)及びアルミ板の上に生重1.5kgのヨモギ

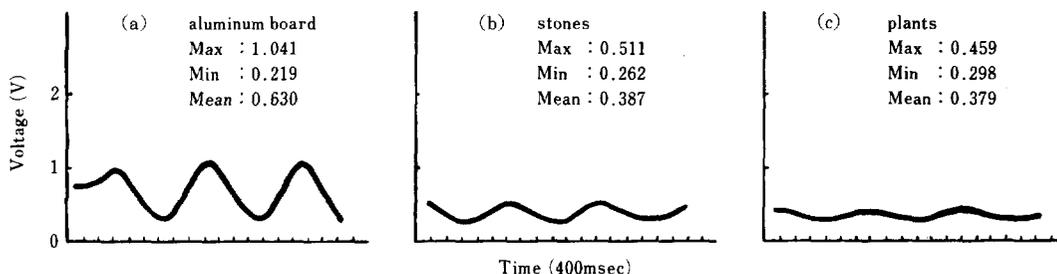


Fig. 6. Response patterns of an aluminum board (1 × 1 m), stones on the aluminum board and plants on the aluminum board in the reflection type system.

Table 1. Recording voltage and scattering coefficient using the reflection type system on grassland of tall fescue and orchardgrass

				Standing grass	Lodged grass	After cutting
Tall fescue	Recording voltage	Mean (V)		0.241	0.295	0.474
		Max - Min (V)		0.099	0.160	0.570
	Scattering coefficient	Max (dB)		- 12.95	- 12.23	- 8.35
		Mean (dB)		- 13.59	- 13.13	- 11.10
Orchard grass	Recording voltage	Mean (V)		0.277	0.310	0.359
		Max - Min (V)		0.236	0.153	0.439
	Scattering coefficient	Max (dB)		- 11.78	- 12.24	- 9.93
		Mean (dB)		- 13.15	- 12.91	- 12.03

を $30 \times 60 \text{ cm}^2$ 内に厚さ 7 cm で置いた状態 (c) に対して、垂直方向 1.5 m からマイクロ波を発信・受信したときの結果を示した。ここでみられる波形は、淵本ら (1988) と同様に、入射波と反射散乱波が同位相となることによる反応で、いわゆるブラッグ散乱効果に起因するものである。マイクロ波の反射は、石や植物体があるときよりもアルミ板だけのときが最もよく、物体の存在によってマイクロ波が散乱されていることが確認できる。また、この散乱は、石よりも植物体の方が明らかに大きかった。

Table 1. にトールフェスク草地とオーチャードグラス草地における計測結果を示した。この計測でも Fig. 6. 同様、波形のデータが得られたが、この表には受信電圧値 (V) においては、ブラッグ散乱効果の強弱差を示す最大値と最小値との差の値 (Max-Min) 及び平均値 (Mean)、散乱係数では最大値から求めた値 [Max (dB)] 及び平均値から求めた値 [Mean (dB)] を示した。トールフェスクの場合、受信電圧値は、立毛状態 (Standing grass) より倒圧状態 (Lodged grass) で高く、刈り取り後状態 (After cutting) で最も高くなった。この値から求めた散乱係数は、受信電圧値に対して逆の関係にあり、刈り取り後状態で散乱が最も小さかった。この傾向はオーチャードグラスにおいても認められた。ここでは同一草量の立毛状態と倒圧状態とで反応の強弱がみられ、このときの立毛及び倒圧状態の平均草高までの空間 (m^3) における生草重 (kg) は、トールフェスクの場合立毛状態で 1.22 kg/m^3 、倒圧状態で、 14.65 kg/m^3 、オーチャードグラスの場合、立毛状態で 0.96 kg/m^3 、倒圧状態で 9.64 kg/m^3 であった。これは、草量の立体空間における密度の効果が働いているためと考えられる。すなわち、マイクロ波の反応は倒圧状態のような高密度のときに大きく、逆に立毛状態のような低密度のときに小さくなったとみられる。この現象は、

第一義的には、倒圧状態のときは、アルミ板からの反射に似た効果が働き、散乱が受信器の方向に集束するためと考えられる。

Fig. 7. に草量と散乱係数との関係を示した。草量が多いときにマイクロ波の散乱が大きく、マイクロ波の反射強度が弱くなった。草地に対するマイクロ波の反応は、原則的には刈り取り後のように草量が少なく地面から反射するときに大きく、草量が多いときほど小さくなると考えられる。

Fig. 1. の (a-1, 2) の計測方法における生育ステージ別の生草重と散乱係数との関係は、Table 2. に示した。草量と散乱係数との相関関係は栄養生長期では傾斜計測において、生殖生長期では草地の真上からの計測において負の相関関係 ($P < 0.01$) が認められた。したがって生育ステージが異なっても計測手法を変えることによって牧草量を推定できることが示された。

Young et al (1981) は、米国の自然草地において 8 ~ 18 GHz の波長帯とバイオマスとの関係をみている。CCIR に報告されている能動マイクロセンサの場合、

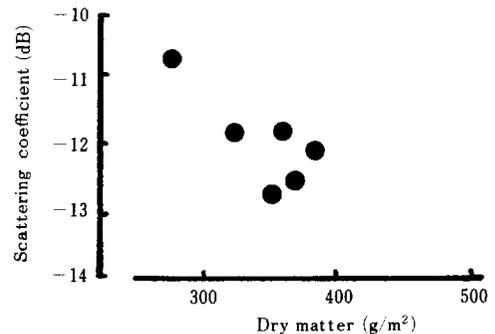


Fig. 7. Relationship between scattering coefficient and dry matter of grassland. (Correlation coefficient is -0.82)

Table 2. Correlation coefficients between scattering coefficient (dB) and fresh weight (g/m^2) of growth stage by vertical and inclined measurement

Measurement method	Vegetative Stage	Heading Stage
Vertical Measurement to the ground	-0.536	-0.450**
Inclined Measurement to the ground	-0.744**	-0.173

** is significant at $P < 0.01$.

Table 3. Recording voltage and scattering coefficient using the penetration type system on grassland composed mainly of orchard-grass and tall fescue.

Fresh weight ^{a)} (g)	Recording voltage (V)	Scattering coefficient (dB)
65.0	14.4	-17.50
94.2	13.7	-17.60
122.6	10.6	-18.13
224.6	9.4	-18.38
344.3	7.3	-18.89

Note ^{a)} numeral for 50 × 50 cm area.

植物を測定対象とする周波数は 17 GHz 付近となっている (古濱・岡本・増子 1988)。本研究の場合、両者より低い周波数 (長い波長) であるが、マイクロ波と草地における生草量などの量的あるいは空間密度的な形態を測定できる見通しが得られたと考える。

2. 透過型計測装置

Table 3. に、オーチャードグラスとトールフェスクの優占した混播草地における生草重、受信電圧値及び散乱係数を示した。反射型計測装置と同じように、草量が少なくなると受信電圧値、散乱係数とも大きな値を示し、草量が多くなるに従い受信電圧値、散乱係数は小さくなった。このことは、マイクロ波が草量に反応していることを示す。この装置による計測は、土壌水分の影響を強く受けることがあるという反射型 (佐藤ら 1987) の結果と比較して、土壌・土壌水分の影響を軽減あるいは除去できるメリットがあるので、今後の研究において成果が期待できよう。特に、地上レベルでのマイクロリモートセンシング技術では、本試験のような装置と計測方法が有効になってゆくものと考えられる。人工衛星のリモートセンシングの基礎研究として、Murata et al (1988) は樹木の透過特性 (penetration properties) をみている。このようなことは、植物を対象とする場 (森林、草地等) の散乱特性を十分に調べる上では、必然的なことなのかもしれない。

以上、反射型及び透過型計測装置の概要、並びに両装置による計測方法について調査例を示しながら述べた。今後、草地におけるマイクロ波の反応について検討を加えて行きたいと考えている。

謝 辞

本研究の実施に当たり、当場村松副男技官及び阿部六雄技官の多大の協力を得た。また、本報告の取りまとめに当たっては手島道明放牧利用部長に校閲を賜った。ここに謝意を表する。

引 用 文 献

- Bush T.F. and F.T. Ulaby (1978): An evaluation of radar as a crop classifier. *Remote Sens. Environ* 7: 15~36.
- 古濱洋治・岡本謙一・増子治信 (1986): 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング. 電子通信学会. 東京. 20~23.
- 淵本正隆・田中 米・富村周平・西村文彦 (1988): マイクロ波利用による植物センサの開発. 農林水産省技術会議事務局編. 植物個体群の生産構造と光エネルギー利用機能の解明. 東京. 184~219.
- 広沢春任 (1986): マイクロ波シグネチャの研究. 日本リモートセンシング学会 6 (3): 257~266.
- 堀江正樹・田中 米 (1985): 畑作物のマイクロ波情報写真測量とリモートセンシング 24 (特集号 I): 51~55.
- 棟方 研・芝山道郎 (1985): 作物群落用反射スペクトル解析装置の開発. 第 1 報圃場作物用ダブルビーム分光測定装置の試作. 日作紀 54 (1): 15~21.
- Murata M., Aiba H. and Nakada K. (1987): Experimental results of L-band microwave penetration properties of trees. *Proc. Commission Number VII Joint Session of IUFRO and ISPRS.*: 75~84.
- 佐藤健次・原島徳一・梨木 守・野本達郎・西村文彦・田中米 (1987). 作物群落用マイクロ波レーダの応用 (1) 牧草類における反応. 日草誌 33 (別): 316~317.
- Thomas W.B., Edward T.K. and Jean L.S. (1981): Microwave radar response to canopy moisture, leaf area index, and dry weight of wheat, corn and sorghum. *Remote Sens. Environ.* 11: 207~220.
- Young S.K., Richard K.M., Khalid S. and Janet E.B. (1981): Surface-based radar scatterometer study of Kansas rangeland. *Remote Sens. Environ.* 11: 253~365.

Utilization of the Reflection and Penetration Type Systems Using the
Microwave as the Method of Measurement in Grasslands

Kenzi SATO, Yone TANAKA¹⁾, Fumihiko NISHIMURA¹⁾, Tatsuro NOMOTO,
Norikazu HARASHIMA, Mamoru NASHIKI²⁾ and Keiichi INOUE³⁾

Department of Grazing Animal Production and ³⁾*Department of
Forage Production and Utilization*

*National Grassland Research Institute, Nishinasuno,
Tochigi 329-27 Japan*

Present Address: ¹⁾*Asia Air Survey Co., Ltd. 2-16 Tsurumaki, 5-chome,
Setagaya-ku Tokyo 154*

²⁾*Tohoku National Agricultural Experiment Station
Morioka, Iwate 020-01*

Received October 31, 1988

ABSTRACT

Sato, K., Y. Tanaka, F. Nishimura, T. Nomoto, N. Harashima, M. Nashiki and K. Inoue. (1989): Utilization of the reflection and penetration type systems using the microwave as the method of measurement in grasslands. Bull. Natl. Grassl. Res. Inst. 41 : 45~52.

The utilization of two types of instruments using microwave (L,S,C and X bands), for the development of nondestructive methods for the determination of the biomass and morphological status of grassland was evaluated.

1) The reflection type instrument enables to measure the reflectance from the grassland. This type which is controlled by a desktop computer, has flat multiband (L,S,C and X bands) antennas that move from the start of the measurements to the end. The collected data represented by periodical waves can be analyzed by a computer and stored on a digital cassette tape. This system supplied information on biomass and morphological status of the grassland.

2) The penetration type instrument controlled by a computer, has a transmitter and a receiver so arranged as to enable to measure the transmission of the C-band microwave through grass. The transmission and reception were performed both using flat antennas. This system which enables to analyze the quantitative factors which decrease the effect of the ground on the grassland may be used as a micro-remote sensing.