

収量予測・情報処理・環境

ランドサット TM データを用いた九州地域におけるイネ科牧草の収量予測

脇山恭行*・井上恒久・小山信明

(九州農業試験場)

要旨:九州久住高原において、4カ年のランドサット TM データを用いてイネ科牧草の一番草の収量予測を試みた。重回帰モデルによる収量予測式を導くために、使用する説明変数を検討した。RVI, NDVI, TM 4 バンドと牧草収量との間には、いずれも高い相関がみられた。衛星観測日から採草日までズレがあるため、その期間の牧草の生育量を表す指標についても検討した。その結果、観測日から採草日までの平均気温と収量との間に相関がみられた。以上のことから、予測式の説明変数に、RVI, NDVI, TM 4 のいずれか 1 つと観測日から採草日までの有効積算気温の 2 変数を用いた場合、さらにこれらの変数に他の TM バンドを組み合わせた場合の重回帰分析を行った。解析の結果、RVI, NDVI, TM 4 のいずれも、TM 2 と有効積算気温を組み合わせた予測式が比較的高い寄与率を示した。今回は、TM 4, TM 2 および有効積算気温を用いた重回帰式が最良であった ($r^2=0.64\sim0.72$)。これら各年次の予測式を他年次に適用して再現性の検討を行ったが、再現性は低かった。そこで、実用化のための予測式の精度向上の方法および再現性の低い原因について考察した。気温に影響を与える採草地の標高および採草地の傾斜、方位角度を考慮した積算日射量と収量との間に、相関はみられなかった。観測日から採草日までの牧草の生育量をその期間の有効積算気温で表したが、代わりに生育モデルを用いた予測が有効であると思われた。また、衛星観測時の大気の影響が示唆され、大気補正の導入も必要と考えられた。

キーワード:イネ科牧草, 収量予測, 植生指数, 有効積算気温, ランドサット TM データ。

衛星リモートセンシング手法は、広域の情報の把握が容易であり、農業情報の収集において重要な技術である。作物の収量予測については、多数の衛星データおよび作物で試みられている。深山ら (1983) は、水稻を対象にランドサット MSS データを用いて寄与率の高い収量予測式を導き、予測式にもとづいて北海道における冷害年の収量分布図を作成した。渡辺 (1988) は、九州佐賀平野において、ランドサット MSS データを用いた水稻の収量予測が可能であることを報告している。秋山ら (1985) は、栃木県西那須野町において、牧草の収量予測をランドサット MSS データを用いて行い、寄与率の高い重回帰式が得られたことを報告している。これらの報告の多くは、寄与率の高い収量予測式を示している。しかし、いずれも単年次の解析にとどまっている。これに対して、志賀・安積 (1995) は、多年次のランドサット TM データを用いて、北海道における水稻の収量推定を行った。また、池田ら (1993) は、北海道十勝平野において、多年次のランドサット TM データを用いて牧草の収量予測を行い、再現性の高い予測式を提案している。

国内における、作物の収量推定を目的とした衛星リモートセンシングデータの解析例は、北海道が多く九州では渡辺 (1988) の解析例しかみあたらない。衛星リモートセンシング技術を実用段階まで向上させるためには、研究事例の積み重ねが必要である。そこで、本研究では多年次のランドサット TM データを用いて、九州久住高原におけるイネ科牧草の収量予測を試みた。

材料と方法

1. 研究対象とした採草地

本研究は、大分県久住高原に位置する大分県畜産試験場の採草地において実施した。採草地の配置図を第 1 図に示した。対象とする採草地の標高は、700~820 m, 1 区画の面積は、1.0~4.5 ha, 傾斜角度は 1~3°, 方位角度は、-73°~3° (南を 0°, 西を+, 東を-とする) であった。採草地の牧草は年 3 回収穫されるが、質、量とも最も優れ、5 月下旬に刈り取られる一番草を収量予測の対象とした。採草地には、マメ科牧草も若干観察されたが、大部分はイタリアンライグラス、オーチャードグラス、トールフェスクのイネ科牧草が優占していた。

2. ランドサット TM データからの採草地の CCT 値の抽出

使用したランドサット TM データ (パス・ロウ: 112-37) は、1989 年 4 月 27 日、1990 年 5 月 16 日、1992 年 5 月 21 日、1996 年 5 月 16 日に観測された 4 シーンである。いずれのシーンも雲量 10% 以下で、対象地域周辺では雲はみられなかった。各採草地の衛星観測値 (CCT 値) の抽出は、幾何補正した TM 画像を採草地の配置図に重ね合わせ、目視により採草地を識別し、採草地ごとの平均 CCT 値を求めた。その際、採草地と土地利用の異なる区域が含まれるピクセルは除いた。以上の幾何補正等の画像解析には、テラマー社の画像解析ソフト、マイクロイメー

ジを用いた。

3. イネ科牧草の収量予測式の作成

本研究でのイネ科牧草の収量予測は、重回帰モデルによった。すなわち重回帰式の目的変数は牧草の乾物収量、説明変数には比植生指数 (RVI)、正規化植生指数 (NDVI)、各 TM バンドを用いた。ただし、TM 6 バンドは他の TM バンドと解像度が異なるため使用しなかった。RVI は NIR/R 、NDVI は $(NIR-R)/(NIR+R)$ と表される。ここで、NIR は近赤外域の波長帯で TM 4 バンド、R は赤色域の波長帯で TM 3 バンドである。また、衛星の観測日から採草日まで採草地によって 3~40 日の期間のズレがあり、その間の牧草の生育量を表す指標も説明変数に用いた。第 1 表には、各年次の採草日を示した。生育量を表す指標については、大分県畜産試験場 (北緯 33°03′, 東経 131°16′, 標高 680 m) の気温および竹田地域気象観測所 (北緯 32°57′, 東経 131°23′, 標高 250 m) の日照時間と降水量を用いて、1987 年から 1996 年の牧草収量との相関を調べ、相関の高いものを指標とした。牧草の乾物収量は、刈り取ってから自然乾燥により水分含量が 20% ほどになったものを採草地ごとにタイトベール、ロールベールでとりまとめ、これらの重量を水分含量 0% に換算したも

のとした。各年次の重回帰式の作成にあたっては、11~17 採草地の乾物収量データを用いた。

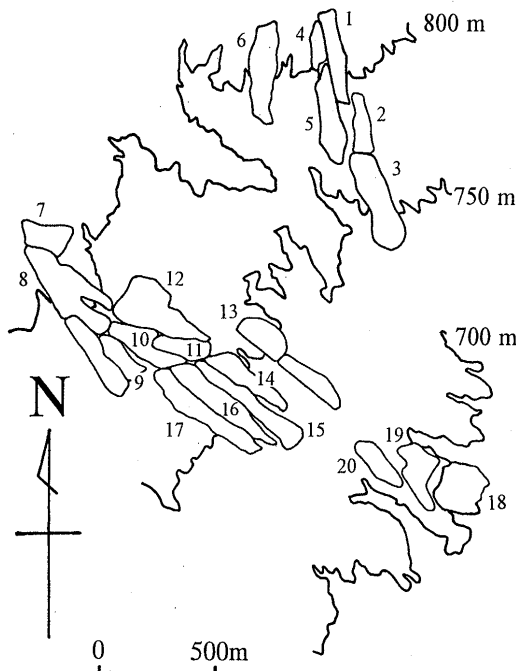
4. 各採草地に入射する日射量の計算

採草地の傾斜および方位角度によって、採草地に入射する日射量が異なる。この収量に対する影響を検討するために、各採草地の傾斜角度および方位角度を地形図から読みとり、傾斜、方位角度を考慮して、3 月から 5 月の晴天日の日射量の積算値を計算し (蔵田・岡田 1984)、収量との関係を調べた。

結 果

1. 衛星観測日から採草日までの牧草の生育量を表す指標の選定

平均気温、降水量、日照時間と牧草収量との相関を第 2 表に示した。3 月上旬から 5 月下旬までの牧草生育期間の気象条件と収量との相関係数は、平均気温で 0.83 と高い相関だった。次に、3 旬ごとに区切った期間中の気象条件と収量との相関をみると、気温については、4 月下旬から 5 月中旬の平均気温と収量との相関が最も高く、相関係数は 0.86 であった。日照時間については、3 月下旬から 4 月中旬の日照時間と収量の間に正の相関が、降水量では、4 月下旬から 5 月中旬、5 月上旬から 5 月下旬の降水量と収量との間に負の相関がみられた。さらに、期間を短くして 1 旬の気象条件と牧草収量の関係をみると、4 月下旬、5 月上旬の平均気温と収量の相関が高く、相関係数はそれぞれ、0.83、0.78 であった。3 月下旬の日照時間とは弱い正の相関が認められた。降水量については、4 月下旬、5 月上旬、5 月下旬の降水量と収量との間に負の相関がみられた。降水量と収量との間に負の相関がみられたのは、降



第 1 図 採草地の配置図。番号を付けた部分が採草地。

第 1 表 各年次の衛星観測日と採草日。

年次 (年)	衛星観測日	採草日
1989	4 月 27 日	5 月 13 日~6 月 6 日
1990	5 月 16 日	5 月 20 日~6 月 7 日
1992	5 月 21 日	5 月 24 日~6 月 3 日
1996	5 月 16 日	5 月 24 日~6 月 6 日

第 2 表 各期間の気象条件と牧草収量の単相関係数。

期間	平均気温	日照時間	降水量
3 月上旬~5 月下旬	0.83	0.03	-0.22
3 月上旬~3 月下旬	-0.07	-0.16	0.23
3 中~4 上	0.27	0.11	0.19
3 下~4 中	0.54	0.41	0.34
4 上~4 下	0.82	0.31	0.08
4 中~5 上	0.83	0.31	-0.24
4 下~5 中	0.86	0.11	-0.36
5 上~5 下	0.50	0.04	-0.50
3 月上旬	0.56	-0.43	0.22
3 中	-0.10	-0.30	0.20
3 下	-0.32	0.38	0.15
4 上	0.73	0.07	0.05
4 中	0.49	0.18	0.20
4 下	0.83	0.22	-0.44
5 上	0.78	0.19	-0.47
5 中	0.42	-0.01	-0.18
5 下	-0.52	0.20	-0.57

雨による気温の低下が生育に影響をおよぼし収量が低下したためと考えられた。使用したランドサットデータの観測日は、4月27日から5月21日に分布している。年次によって異なるが、衛星観測日から採草日の期間に含まれる5月上旬の平均気温と収量との間には高い相関がみられ、同じく5月中旬でも正の相関がみられた。5月下旬の平均気温と収量との間に正の相関はみられなかったが、衛星観測日から採草日までの牧草の生育量を、基準温度を5°C（三井・西山 1960）としたその間の有効積算気温で表すこととした。

2. イネ科牧草の収量予測式の作成

RVI, NDVI, 各 TM バンドの CCT 値と牧草収量との相関を第3表に示した。RVI, NDVI とともに 1989 年は、収量との相関係数がそれぞれ 0.35, 0.36 と低かったが、1990, 1992, 1996 年は、0.55~0.71 と比較的高い相関がみられた。TM 4 バンドではどの年次も 0.64~0.67 と高い相関がみられた。これらのことから、説明変数に RVI, NDVI, TM 4 バンドのいずれか 1 つと有効積算気温の 2 変数を用いた場合、さらにこれらの変数のほかに各 TM バンドを組み合わせた場合の重回帰分析を行った。その結果、RVI, NDVI, TM 4 バンドのどれを使用した場合も、説明変数が多いほど寄与率が高かった。しかし、重回帰式の検定では、説明変数が多いほど有意水準が高くなるため、ある一定以上の寄与率かつ有意水準の低い重回

帰式を求めた。検討を重ねた結果、RVI, NDVI, TM 4 バンドのいずれも TM 2 バンドと組み合わせた重回帰式が、適当な収量予測式であると判断した。それらの重回帰式を第4表に示した。RVI を用いた場合、1992 年の寄与率は 0.56 とやや低かったが、他の年次では、0.65~0.75 と比較的高い寄与率であった。NDVI でも 1992 年の寄与率は 0.54 とやや低かったが、他の年次の寄与率は 0.64~0.76 であった。TM 4 バンドを用いた場合は、寄与率が 0.64~0.72 と RVI, NDVI を用いた場合に比べてどの年次も比較的高い寄与率を示した。以上のことから、TM 4 バンド、TM 2 バンドおよび衛星観測日から牧草採草日までの有効積算気温を説明変数に用いた重回帰式が、最も適当な収量予測式であった。これらの予測式を使って、各年次の牧草収量を予測した結果を第2図に示した。1992 年と 1996 年では 1:1 の直線からややはずれたものもみられるが、いずれの年次もほぼ直線の周辺に分布した。なお、実際の収量予測の方法は、ランドサット衛星の情報と観測日から予定している採草日までの日平均気温（平年値）から求めた有効積算気温を用いて牧草収量を予測する、というものである。次に、寄与率の一番高かった 1990 年の予測式を用いて、他年次の牧草収量を予測した結果を第3図に示した。いずれの年次も 1:1 の直線からはずれており、予測式の再現性は低かった。他の年次の予測式を用いても、同様に再現性は低い結果となった。

第3表 ランドサット各 TM バンドの CCT 値ならびに植生指数と牧草収量の単相関係数。

年次 (年)	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7	RVI	NDVI
1989	0.57	0.60	0.29	0.67	0.59	0.59	0.35	0.36
1990	0.47	-0.02	0.09	0.67	0.44	0.25	0.56	0.55
1992	-0.16	0.02	-0.31	0.64	0.15	0.12	0.70	0.69
1996	0.04	-0.08	-0.31	0.66	0.05	-0.05	0.71	0.69

第4表 TM 2 バンド、有効積算気温ならびに植生指数を用いた各年次のイネ科牧草の収量予測式。

植生指数等	年次 (年)	収量予測式	寄与率 (r ²)
RVI	1989	$Y = 71.7 \text{ TM } 2 + 195 \text{ RVI} + 0.409 \Sigma T - 3104$	0.71**
	1990	$Y = 18.9 \text{ TM } 2 + 118 \text{ RVI} + 0.651 \Sigma T - 881$	0.75***
	1992	$Y = 7.76 \text{ TM } 2 + 447 \text{ RVI} + 0.992 \Sigma T - 1728$	0.56
	1996	$Y = -37 \text{ TM } 2 + 199 \text{ RVI} - 0.912 \Sigma T + 1020$	0.65**
NDVI	1989	$Y = 72.9 \text{ TM } 2 + 2309 \text{ NDVI} + 0.402 \Sigma T - 3750$	0.71**
	1990	$Y = 17.8 \text{ TM } 2 + 2611 \text{ NDVI} + 0.671 \Sigma T - 2004$	0.76***
	1992	$Y = 12.4 \text{ TM } 2 + 6035 \text{ NDVI} + 0.985 \Sigma T - 3738$	0.54
	1996	$Y = -35 \text{ TM } 2 + 2664 \text{ NDVI} - 0.954 \Sigma T + 161$	0.64**
TM 4	1989	$Y = 38.2 \text{ TM } 2 + 7.15 \text{ TM } 4 + 0.4 \Sigma T - 2048$	0.69**
	1990	$Y = 1.39 \text{ TM } 2 + 4.78 \text{ TM } 4 + 0.502 \Sigma T - 347$	0.72***
	1992	$Y = -14.1 \text{ TM } 2 + 19.3 \text{ TM } 4 + 2.01 \Sigma T - 1870$	0.64*
	1996	$Y = -77.6 \text{ TM } 2 + 7.71 \text{ TM } 4 - 0.861 \Sigma T + 2115$	0.68**

Y: 乾物収量 (kg 10a⁻¹)。RVI: 比植生指数。NDVI: 正規化植生指数。TM 2: ランドサット TM 2 バンドの CCT 値。TM 4: ランドサット TM 4 バンドの CCT 値。ΣT: 衛星観測日から採草日までの有効積算気温 (5°C)。***, **, *: 1% 水準, 5% 水準, 10% 水準の有意性をそれぞれ示す。

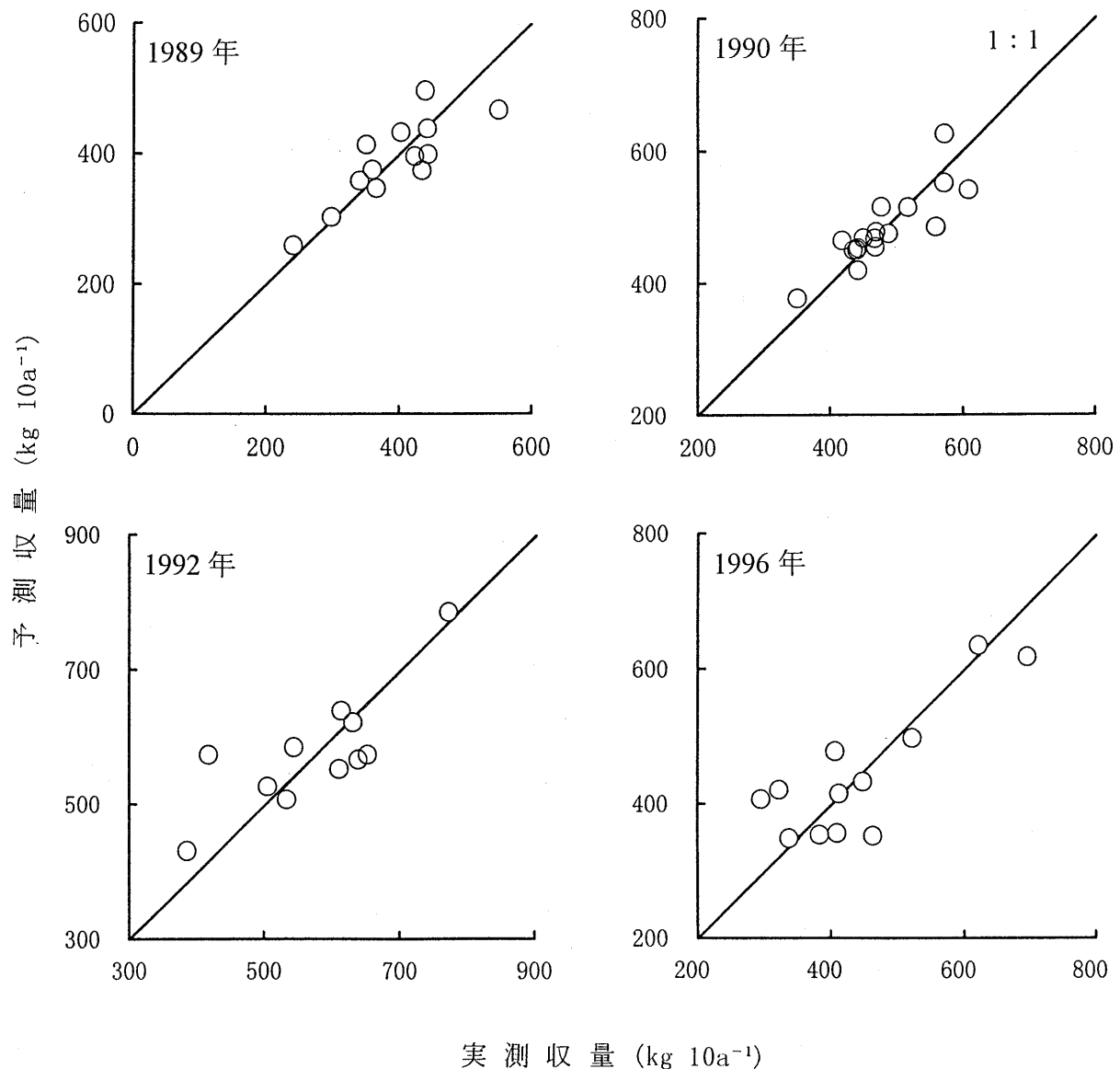
考 察

4カ年のランドサット TM データを用いて、九州久住高原におけるイネ科牧草の収量予測を試み、各年次において予測が可能である重回帰式が得られた。しかし、ランドサットデータを用いた収量予測を実用的なものにするためには、さらに推定精度を向上させる必要がある。また、各年次の収量予測式を用いて、他の年次の収量を予測した場合、再現性が低かった。ここでは、収量予測式の精度向上の方法および再現性の低い原因について考察する。

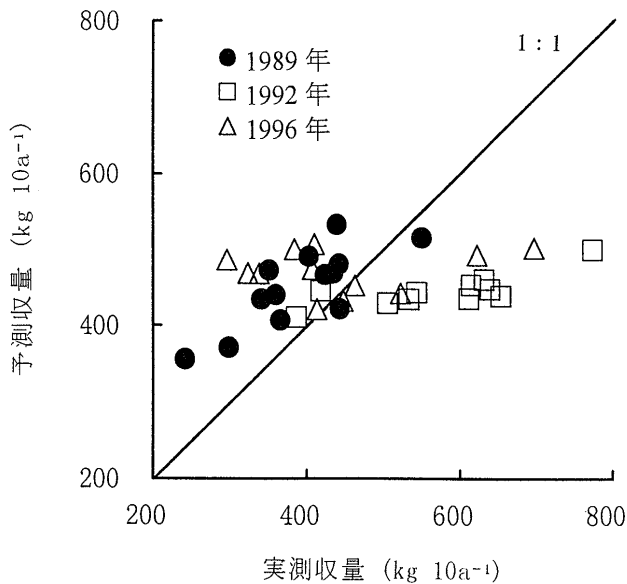
対象とした採草地は、標高 700 m から 820 m にわたって分布し、傾斜角度や方位角度の地形条件も採草地によって異なる。一般に、標高が 100 m 高くなるにともない気温はおおよそ 0.6°C 低下する。そのため、重回帰式の説明変数に用いた有効積算気温が、採草地の標高によって異なることが予想される。そこで、地形図から各採草地の標高を読みとり、採草地の標高と 1987~1996 年の平均収量との

関係を調べた。しかし、相関係数は低く、標高と収量との間に明確な関係は認められなかった。採草地の傾斜角度、方位角度の収量に与える影響については、各採草地間の積算日射量に大きな差はみられず、各採草地の積算日射量と収量との間にも、はっきりとした関係はみられなかった。研究対象とした久住高原の採草地は、標高差が 100 m あまりあるものの、標高の牧草収量に与える影響は小さいと思われた。日射量に影響を及ぼす採草地の傾斜、方位角度についても、傾斜角度が $1\sim 3^{\circ}$ と緩やかなため、採草地間の日射量に大きな差が現れず、積算日射量の収量に対する影響が認められなかったと考えられた。

牧草の刈り取りが行われる採草日は、衛星観測日より 3 日から 40 日後であるため、衛星観測日から採草日までの牧草の生育量をその期間の有効積算気温で表した。しかし、結果の第 1 節で述べたように、衛星観測後の 5 月下旬の平均気温と牧草収量との間に相関はみられなかった。このように、気温に対する牧草の生育量は生育ステージによ



第2図 各年次のイネ科牧草の収量予測式による予測収量と実測収量の比較。



第3図 1990年次のイネ科牧草の収量予測式による再現性の検討。

って異なる。これが各年次の予測式の精度に影響を及ぼし、さらに予測式の再現性が低い原因の1つであると思われる。最近、精度の高い作物生育モデルが開発されており、その期間の生育量の推定には、生育モデルの利用が有効であると考えられた。Justiceら(1991)は、ノア衛星のAVHRRの観測波長帯に水蒸気による吸収帯が存在するため、大気中の水蒸気量の増加に伴い、植生のNDVIが低下すると報告している。今回使用したランドサットTMバンドのCCT値も年次変動がみられた。本研究で使用了ランドサットTM4バンドにおいても、水蒸気の吸収帯が含まれることから(Iqbal 1983)、大気の影響を受けることが示唆された。したがって、再現性の高い収量予測式の開発のためには、大気補正導入の検討も必要である。

Prediction of Grass Production by Using LANDSAT TM Data in the Kyushu Region: Yasuyuki WAKIYAMA*, Tsunehisa INOUE and Nobuaki KOYAMA (*Kyushu Natl. Agr. Exp. Stn., Nishigoushi 861-1192, Japan*)

Abstract: The production of grass in the Kyushu region was predicted by using Landsat TM data. Explanatory variables to be used for the multiple regression model for the prediction were determined by simple regression analysis. The degrees of correlation (r) between 2 vegetation indexes (RVI, NDVI), TM4 band, and the grass production ranged from 0.35 to 0.71. The grass production and mean air temperature were highly correlated during the growing period ($r=0.83$). The growth of grass from day of satellite observation to day of harvest was estimated on the basis of effective accumulated temperature (over 5°C) of this period. The multiple regression models were obtained in each year of 1989, 1990, 1992, and 1996 by using the TM4 band, the TM2 band, and effective accumulated temperature as explanatory variables. The coefficients of determination (r^2) ranged from 0.64 to 0.72 in each model. The production of grass in the other years was then predicted based on these models, but the accuracy of the prediction was poor. This inaccuracy might be attributed to the above method of estimating grass growth from the day of satellite observation to the day of harvest and to an atmospheric effect on the TM data. These results suggested that the accuracy of prediction could be improved by using a crop growth model and atmospheric correction.

Key words: Effective accumulated temperature, Grass, Landsat TM data, Prediction of production, Vegetation index.

以上の考察より、衛星観測日から牧草の採草日までの生育量の補正に生育モデルの利用、大気補正の導入による予測式の改良の必要性が明らかになった。これらの点を改良していくことによって、衛星リモートセンシング情報を用いた収量予測式の予測精度、再現性は向上するものと考えられた。

謝辞: 本研究の実施にあたって、大分県畜産試験場の林健剛氏、佐藤忠夫氏には牧草収量のデータ収集で協力を得ました。本研究に使用したランドサットTMデータは、研究向けデータ配布により宇宙開発事業団の提供を受けた。ここに記して、感謝の意を表します。

引用文献

- 秋山侃・安田嘉純・江森康文・深山一弥 1985. リモート・センシングによる草地の診断 2. ランドサット MSS データによる1番草収量の推定. 日本草地学会誌 31: 97-103.
- 池田浩明・岡本勝男・福原道一 1993. ランドサット TM データとアメダス・データを用いた一番草収量予測. 日草誌 39(別): 171-172.
- Iqbal, M. 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, New York. 1-330.
- Justice, C.O., T.F. Eckd, D. Tanre and B.N. Holben 1991. The effect of water vapour on the normalized difference vegetation index derived for the Sahelian region from NOAA AVHRR data. Int. J. Remote Sensing 12: 1165-1187.
- 蔵田憲次・岡田益己 1984. 環境工学入門. サイエンスハウス, 東京. 32-41.
- 三井計夫・西山太平 1960. 牧草講座 1 栽培編. 朝倉書店, 東京. 1-280.
- 深山一弥・佐藤博・安田嘉純・江森康文 1983. 農用地調査へのリモートセンシング技術の適用性に関する研究. 農土論集 105: 27-35.
- 志賀弘行・安積大治 1995. ランドサット TM データおよび MOS-1/MESSR データを用いた水稲収量地図の作成. 土肥誌 66: 625-631.
- 渡辺利通 1988. ランドサット MSS データを用いた九州地方における水稲収量推定の試み. 農環研資 4: 21-35.