

第4章 土地生産力評価のための作物収量の推定

第1節 はじめに

農林地における土地評価の基本的尺度は土地生産力であり、土壌・気象条件を作物収量に関係付け、定量的な土地生産力の指標を得ようとする試みがなされてきた(三好, 1978; 江頭ら, 1990; 安田ら, 1994)。これらの試みでは、収量データを得るために聞き取りまたは圃場における実測を必要としており、集落単位を越える広域の土地生産力を解析するさいには、収量データの収集が障害となってきた。

現在、広域の作物収量について市町村統計よりも詳細なデータを入手することは通常困難であり、空間分解能が高く、観測を反復できる衛星リモートセンシングによる収量推定の有効性について検討する必要がある。

衛星データを用いた作物収量推定には大別して二つの手法がある。一つはNDVI等の植生指数を生育期間または登熟期間の間積算する手法である。NDVIから光合成有効放射吸収量を推定できることが、Daughtryら(1993)、Sellers(1985, 1987)によって示され、NDVIの積算値から純一次生産力が推定可能となったことが、この手法の理論的根拠となっている。この手法は主に回帰周期が短く地上分解能の粗い気象衛星ノアのAVHRRセンサーデータに対して用いられてきた。例えば、Benedettiら(1993)は、小麦の登熟期間中のNDVIの積算値から小麦の収量推定をおこなった。数は少ないが、ランドサットMSSデータを用いて小麦の登熟期間中の植生指数の最大値を推定し、この値を用いて収量予測を試みた例(Sharmaら, 1993)も報告されている。

他の一つは、衛星センサの各バンドの輝度値を説明変数、地上調査による収量を目的変数とした重回帰分析により収量推定をおこなう手法である。この手法は、地上調査の収量の確定後に収量地図を作成するものであり、収量予測ではなく収量分布の地理的な変異の把握を目

的としている。耕地規模の小さいわが国では、地上分解能を重視してランドサットデータ対してこの手法を用いた報告が多い。水稻(深山ら, 1983; 渡辺, 1988; MUBEKTIら, 1991)、牧草(秋山ら, 1985a, b)、テンサイ(岡野ら, 1994)についての報告例がある。しかし、複数年の衛星データを用いて収量推定に有効なバンドの組み合わせを検討した例はみられない。

本章では、複数年のランドサットTMデータおよびモス-1/MESSRデータを用い、小麦および水稻について重回帰式を用いた収量推定法を適用し、収量推定に有効なバンドおよびその再現性について検討した結果について述べる。

第2節 研究方法

1 解析の対象地域

解析の対象地域は、第2章に述べたように、石狩川下流の東西60km、南北135kmの地域である。ただし、1993年の水稻収量の解析については、未曾有の冷害であったため地域をさらに広げ、南西隅に苫小牧市、北東隅に旭川市を含む東西100km、南北160kmの地域を対象とした。解析対象地域内の小麦作付面積は、1987年には30,400haであり、全道の作付けの25%を占めた。水稻については、対象地域内の作付け面積は、1992年には79,000haであり、全道の作付けの49%を占めた。1993年の拡大した対象地域内における水稻作付け面積の合計は123,100haで、全道の作付け面積の約70%を占めている。

2 解析に使用したデータ

(1) 衛星データ

使用した衛星データの一覧を表4-1に示す。1984年から1993年の期間の衛星データから、対象地域の農耕地上に雲がなく、クリアな9シーンを選択した。内訳は、

表4-1 使用衛星データ一覧

撮影年月日	衛星	センサ	シーン番号	雲量	用途
1984年9月17日	ランドサット5号	TM	107-30	40%	水稻収量, 小麦分類
1985年5月31日	ランドサット5号	TM	107-30	30%	小麦収量, 水稻分類
1986年9月23日	ランドサット5号	TM	107-30	30%	水稻収量, 小麦分類
1987年9月22日	ランドサット5号	TM	107-30	50%	小麦収量
1990年5月29日	ランドサット5号	TM	107-30	0%	小麦収量
1992年9月14日	ランドサット5号	TM	108-30	20%	水稻収量
1993年7月8日	ランドサット5号	TM	107-30	10%	水稻分類
1993年9月2日	モス-1b	MESSR	20-59W, 60W	10%	水稻収量

表4-2 対象地域の小麦統計

年次	作付面積 (ha)	転作水田への作付 (ha)	収量 (t/ha)	作況指数	耕種月日 (最盛期)		
					播種	出穂	刈取
*1985	39300	26200	4.04	123	9月5日	6月13日	8月1日
1986	44600	28900	3.66	109	9月11日	6月19日	8月6日
*1987	52500	33300	2.70	78	9月6日	6月17日	8月3日
1988	52900	31600	3.46	100	9月9日	6月15日	8月1日
1989	51400	30200	3.57	103	9月9日	6月14日	8月2日
*1990	46100	27300	3.47	99	9月13日	6月9日	7月26日
1991	44200	25100	3.25	92	9月13日	6月9日	7月26日
1992	37100	18100	2.61	76	9月13日	6月17日	8月3日

資料：「作物統計」，札幌統計情報事務所管内（石狩，空知，上川，留萌支庁）
*解析の対象年

ランドサット5号のTMデータが7シーン，モス-1bのMESSRデータが2シーンである。

収量推定には，作物がある程度成長して地表をカバーしている時期の衛星データが必要である。今回の対象地域では，7月および8月には雲のない画像が過去にそれぞれ1シーンしか得られていなかったため，小麦の収量推定には5月および6月のデータ，水稻の収量推定には9月のデータを用いた。

小麦の収量推定に用いた1985年，1987年および1990年のTMデータの撮影日は，それぞれ5月31日，6月22日および5月29日である。これは，統計情報事務所の調査による出穂最盛期の14日前，5日後および11日前にあたり，また，刈取最盛期の62日前，42日前および58日前にあたる。小麦を画像から抽出する際には，補助データとして，秋まき小麦の播種時期である9月のランドサットTMデータ2シーンを用いた。

水稻の収量推定に用いた4ヶ年のデータのうち，1984年，1986年，1992年はランドサット5号のTMセンサ，1993年は国産の海洋観測衛星モス-1のMESSRセンサデータである。1984年のTMデータの撮影日は9月17日で，既に刈取最盛期の9月14日を過ぎているので，半数以上の圃場で刈取が終わっている。1986年，1992年および1993年の衛星データの撮影日は，それぞれ9月23日，9月14日，9月2日である。これは，それぞれ刈取最盛期の14日，22日および43日前にあたり，1992年および1993年には，撮影の時点で刈取の始まっている圃場はほとんどない。水田を画像から抽出する際には，補助データとして，水稻の生育初期でまだ水面の見える，5月から7月始めのランドサットTMデータ3シーンを用いた。

(2) 作物データ

衛星データとの重回帰分析に用いた作物収量の地上データとして，農林水産省統計情報事務所発表の市町村統計収量を用いた。小麦の解析対象年次は，1985年，1987年および1990年の3カ年である。解析の対象地域を含む札幌統計情報事務所管内（石狩，空知，上川および留萌

支庁）における1985年から1992年の小麦の生育概況を表4-2に示す。1985年は管内の作況指数123，収量4.04t/haと豊作であり，1987年は作況指数78，収量2.70t/haと不作，1990年は作況指数は99，収量は3.47t/haと平年作の年であった。管内の小麦作付け面積は，転作水田への小麦の作付けを反映して推移し，1985年には39,300haだったものが，1987年には52,500haとピークを迎え，1990年には46,100haとなった。

水稻の解析対象年次は，1984年，1986年，1992年および1993年の3カ年である。札幌統計情報事務所管内の水稻の生育概況を表4-3に示す。1984年は，作況指数114，収量5.56t/haと史上最高を記録した。1986年は，作況指数110，収量5.43t/haの豊作となった。

1992年は不稔が多発し，作況指数が89，収量は4.54t/haの冷害となった。1993年は不稔が激発し，作況指数48，収量2.42t/haと，80年ぶりの大冷害となった。

表4-3 対象地域の水稲統計

年次	作付面積 (ha)	収量 (t/ha)	作況 指数	耕種月日 (最盛期)		
				田植	出穂	刈取
*1984	120200	5.56	114	5月26日	7月26日	9月14日
1985	127600	4.96	102	5月25日	8月7日	10月1日
*1986	123100	5.43	110	5月27日	8月10日	10月7日
1987	116700	4.86	98	5月28日	8月6日	10月2日
1988	115800	5.34	108	5月27日	8月5日	9月29日
1989	115300	5.36	108	5月24日	8月6日	10月2日
1990	113900	5.48	110	5月24日	7月27日	9月21日
1991	113300	5.31	104	5月24日	7月28日	9月20日
*1992	129200	4.54	89	5月25日	8月7日	10月5日
*1993	139300	2.42	48	5月25日	8月13日	10月14日

資料：「作物統計」，札幌統計情報事務所管内（石狩，空知，上川，留萌支庁）
*解析の対象年

3 衛星データによる収量推定法

小麦の収量推定における，衛星データの解析手順を図4-1に示す。水稻の収量推定の場合も，圃場の識別における春と秋の衛星データの役割が逆になる点および1993年にモス-1衛星のデータを用いた点を除いて同様の手順で解析をおこなった。

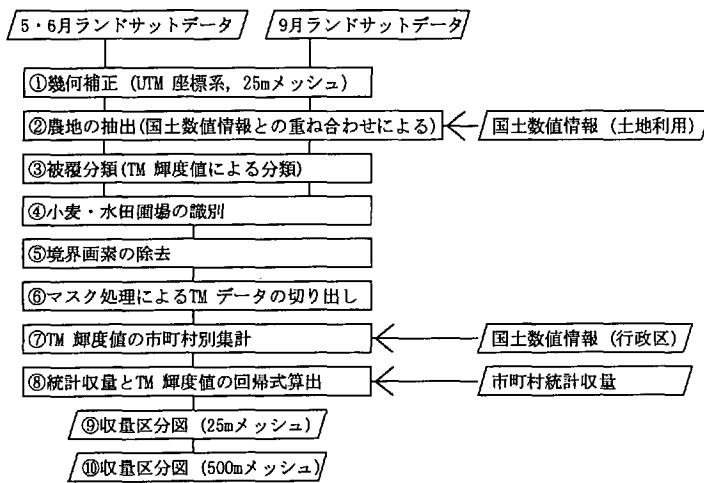
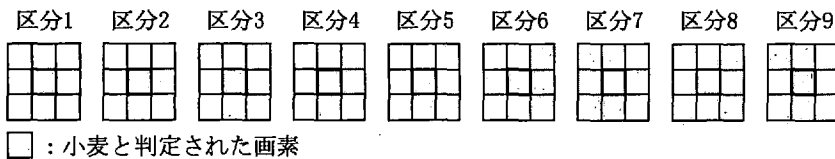


図4-1 衛星データによる収量推定の手順



□ : 小麦と判定された画素

図4-2 境界画素の除去条件検討のための区分
 区分1 : 8近傍に小麦画素なし (孤立画素)
 区分2~8 : 他の地目と境界を接する場合
 区分9 : 8近傍すべてが小麦画素

① 幾何補正, ② 農地の抽出: 第3章と同様の方法でおこなった。ただし, MESSRデータについては画素サイズ50mのUTM座標系データに変換した。TMデータについては南北5400画素, 東西2700画素, MESSRデータについては南北2700画素, 東西1350画素の各年次共通のフォーマットのデータとした。

③ 被覆分類: TMデータについては, バンド3, 4, 5, 7, MESSRデータについては, バンド1, 2, 4を用いたK-MEANS法によるクラスター分類をおこない, 画像の一部からサンプリングしたデータを約20のカテゴリーに区分した。さらに, 分類後の各カテゴリーの統計量に基づいて最尤法で画像全体を分類した。

④ 小麦・水田圃場の識別: 小麦の場合, 春先のデータのみでは, 小麦と草地や樹木の一部を互いに分離することが困難なため, 1985年の場合, 5月のTMデータではほぼ植被に覆われ, かつ1984年9月のTMデータで裸地に分類された地点を小麦と判定した。1990年の場合は, 前年または当年の秋の衛星データが得られていないので, 1990年5月に植被に覆われ, 1987年に草地または樹木以外の農地に分類された地点を小麦と判定した。水稲の場合は, 生育初期と収穫期の2時期の

変化に基づく分類をおこなった。1993年の場合, 7月のTMデータで水面を含み, かつ9月のMESSRデータで植生に分類されたカテゴリーを水稲と判定した。他の年次では, 9月のデータと生育初期のデータが同一年に得られていないので, 1年違いのデータを組み合わせた。

⑤ 境界画素の除去: TMセンサの研究から, 対象物の固有の分光特性を計測するためには, 少なくとも60画素程度のみとまり (およそ5ha)が必要と報告されている (Park, 1981)。これは, 孤立した画素や, 他の地目との境界に接する部分は, 対象物以外の周辺地目の輝度値の影響を受けている可能性があるためである。米国の場合, 穀物の圃場の大きさは8~32ha程度で, この条件

を満たしている (安田, 1987) が, 耕地規模が小さい日本の農地にはこの基準は厳しすぎる。そこで, 境界画素の除去については, 小麦と判定された画素の8近傍 (隣接する縦・横・斜めの画素) 中の小麦画素の出現数をカウントし, カウント数によって図4-2の9区分を設けた。各区分におけるNDVIの値を指標として,

境界画素の除去について検討した。

⑥ マスク処理によるTMデータの切り出し: 小麦および水稲圃場の識別, 境界画素の除去をおこなったファイルを用いて, ①のファイルにマスク処理をおこない, 小麦および水稲圃場の輝度値のみを含むファイルを作成した。

⑦ TM輝度値の市町村別集計: このファイルに, 国土数値情報の行政区ファイル (KS-618ファイル) を重ね合わせて各バンド輝度値の市町村平均を算出した。

⑧ 統計収量とTM輝度値の回帰式算出: 農林水産省統計情報事務所発表の各年次の市町村別小麦収量を目的変数, TMセンサの各バンド輝度値および正規化植生指数 (NDVI) の市町村平均値を説明変数としたステップワイズ重回帰分析をおこなった。小麦については, NDVIと収量の関係を検討した既往の報告が多いので, NDVIのみを説明変数とした場合の推定精度についても検討した。なお, 重回帰分析の際に, 熱赤外バンドであるTM6は他のバンドより地上分解能が悪いため説明変数から除外した。

1993年の水稲については, 収量レベルが不稔の発生程度にはほぼ支配されていたことが報告されており (竹

川ら, 1994), 赤波長域のMESSR2の輝度値から収量を推定することを試みた. 深山ら (1983) が報告しているように, 著しい不稔を生じた水稻は, 収穫期をむかえても茎葉の窒素が穂へ転流することができないため茎葉の窒素およびクロロフィルの含有率が高く推移し, クロロフィルの吸収帯である赤色波長域における反射が小さくなるからである. 収量の地上データとして, 1993年12月の時点では, 農林水産省統計情報事務所発表の支庁別の水稻収量を用い, 支庁別収量とMESSRデータの直線回帰式から市町村別の水稻収量を推定した. さらに, 1994年3月に発表された市町村別の統計収量と各市町村のMESSR2輝度値のヒストグラムから, MESSR2の輝度値を収量に変換するための非線形関数を検討した.

⑨ 収量区分図 (25mメッシュ) : 各年次について, 得られた回帰式にもとづいて, 画素サイズ25mメッシュの収量区分図を得た. しかし, 25mメッシュの収量区分図は収量推定画素の分布がきわめてまばらで, 図上で収量分布の傾向を把握することは困難である. 一方, 作物の分光反射は畝の方向と太陽方位との関係によって変化するため (Guyot, 1990), 25mメッシュの収量区分図をそのまま用いることは, 個々の圃場条件の影響を受け, 収量推定の誤差が大きくなりやすいと考えられる. そこで,

⑩ 収量区分図 (500mメッシュ) : 収量推定値を20×20画素, すなわち, 一辺500m四方の区画毎に平均し, 500mメッシュの収量区分図に変換した.

第3節 結果および考察

1 衛星データからの小麦畑および水田の抽出

(1) 小麦畑の抽出面積の検討

幾何補正, 農地の抽出をおこなった後のランドサットTMデータを最尤法によって分類した小麦の面積を市町村統計による作付面積と比較したものを図4-3に示す. ただし, 衛星データに行政区の一部しか含まれない

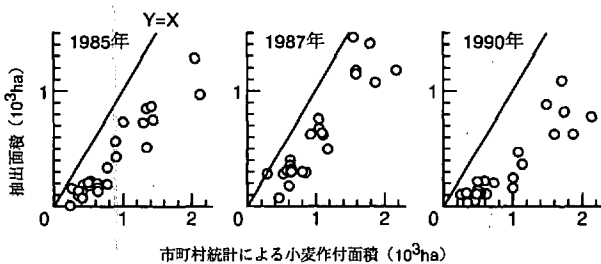


図4-3 小麦の統計上の作付け面積とランドサットデータから抽出した面積市町村別の集計値で示す

市町村や, 雲のために全域を解析できなかった市町村は, 図4-3から除外してある.

統計作付け面積に対する衛星からの抽出率を年次毎の平均値で示すと, 1985年は47%, 1987年は63%, 1990年は38%であった. 1990年に抽出率が小さいのは, 播種時期の衛星データがなく, 1987年の分類データを参照したことが影響している可能性がある. 小麦畑の抽出にあたっては, 小麦の正確な輝度値を得ることを目的として, 小麦画素の分類判定基準を厳しくしたことから, 1985年および1987年においても統計面積をかなり下回る結果になった. 各年次における抽出率の市町村間のばらつきを変動係数で示すと, 1985年36%, 1987年30%, 1990年37%となり, いずれの年次も30%台の変動係数を示した. 衛星データ上での小麦畑の識別は, 小麦畑がまとまって大面積に作付けされているほど容易となるはずである. そこで, 1985年について各市町村の全耕地面積に対する小麦作付け面積の割合を算出し, 統計作付け面積に対する抽出率と比較したのが図4-4である. 全耕地面積に対する小麦の作付け割合が高く, 小麦圃場の密度が高い市町村ほど抽出率が高くなる傾向が認められる. 対象地域内で, 1985年に全耕地面積に対する小麦の作付け面積の割合が20%を越えた町村 (美幌市, 南幌町, 北村) では抽出率も50%を越える高い値となった.

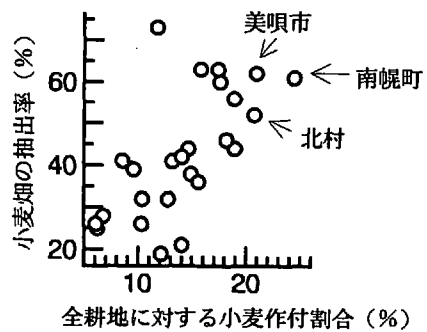


図4-4 全耕地面積に対する小麦の作付け割合と衛星データによる小麦畑の抽出率1985年の結果, 市町村別の集計値で示す

(2) 水田の抽出面積の検討

小麦の場合と同じように衛星データから抽出された水田の面積を市町村統計による作付面積と比較したものを図4-5に示す. 小麦の場合と同様に, 衛星データに行政区の一部しか含まれない市町村や, 雲のために全域を解析できなかった市町村は, 図4-5から除外してある. 1993年については, 実際の対象地域は他の3カ年より広いが, 共通する地域についての値を示した.

市町村統計に対する衛星からの抽出面積の割合を年次毎の平均値で示すと, 1984年は18%, 1986年は32%, 1992

年は44%，1993年は72%であった。1984年は、既に刈取が進行していたため抽出割合が小さくなったと思われる。水田面積の推定そのものを目的とする場合には、ランドサットTMデータを用いた精度の高い手法（Okamotoら，1993）が報告されているが、ここでは、小麦の場合と同様に水稻の正確な輝度値を得ることを目的として、水田画素の判定基準を厳しくしたことから、刈取の始まっていない1992年および1993年においても統計面積をかなり下回る結果になった。1993年については、衛星データをモス-1の地上分解能に合わせて画素サイズ50mに幾何補正したため、画素サイズ25mでは識別される農道や宅地等も水稻の区分に含まれ、抽出割合が高くなったと考えられる。各年次における水田の抽出率の市町村間の変動係数は1984年63%，1986年28%，1992年22%，1993年20%となり、刈取の進行していた1984年を除いて、小麦の場合より小さかった。また、小麦の場合とは異なって、全耕地面積に対する水田面積の割合が抽出率に影響しているとは認められなかった。水田の場合は立地が水利条件に規制され、地域的にまとまって存在

の順で大きくなった。6月の時点では、小麦畑は草地以外では最も大きなNDVIを示すカテゴリであることから、小麦畑と識別された画素であっても、他の地目との境界に位置する画素は、周辺よりNDVIの小さな地目の輝度値の影響を受けているものと考えられた。そこで、最終的には区分9に該当する画素、すなわち他の地目との境界に接していない画素のみを選び出し、小麦の輝度値の算出に用いることとした。

表4-4 境界画素の除去条件検討のための区分毎に求めた出現面積割合、TM3およびTM4の輝度値、NDVIの平均値（1987年6月22日のデータ。区分については図4-2を参照）

区分	出現面積割合 %	ランドサットTM輝度値		NDVI
		TM3	TM4	
区分1	2.7	45.3	110.1	0.42
〃 2	5.0			
〃 3	7.2	42.7	114.1	0.46
〃 4	10.7			
〃 5	13.6	38.5	116.0	0.50
〃 6	15.7			
〃 7	11.8	37.2	122.2	0.53
〃 8	11.3			
〃 9	22.0	36.1	125.5	0.55

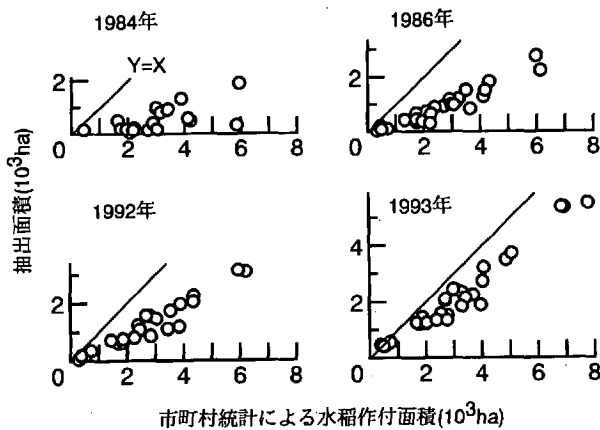


図4-5 水田の統計上の面積と衛星データから抽出した面積。市町村別の集計値で示す

することから、耕地面積に対する水田面積の割合が小さい市町村においても、衛星データ上での識別に支障をきたすことはなかったと考えられる。

(3) 境界画素の除去の検討

1987年6月22日のTMデータについて、小麦畑と識別された画素の境界画素の区分（図4-2）毎に出現面積割合と、TM3およびTM4の輝度値、NDVIの平均値を求めた結果を表4-4に示す。各区分におけるNDVIの平均値は、孤立した小麦畑を意味する区分1で0.42であるのに対して、隣接する8画素のうち半数が小麦畑と識別された区分5では0.50、隣接8画素のすべてが小麦畑と識別された区分9では0.55となり、区分1から区分9

境界画素の除去の様子を図4-6に示す。図4-6の(A)が小麦に分類された画素の分布、図4-6の(B)は境界に接した画素を除去した分布である。境界画素の除去の結果、統計面積に対する最終的な小麦畑の抽出面積の割合は、1985年は10%、1987年は14%、1990年は8%となった。境界画素を除去した場合、最低3×3画素（約0.6ha）以上の画素のまとまりがあれば中心の画素を抽出することになり、理想とされる60画素の15%程度の面積のまとまりも対象とすることになる。しかし、画像上の抽出面積を極端に絞り込むと、実際の栽培面積に対する抽出割合が低下しすぎ、地域の平均的な生育状態を反映した輝度値が得られなくなる恐れがある。今回は、8近傍すべてが小麦という条件を一応の妥協点としたが、今後は対象地域の圃場規模に応じた最適な抽出条件の決定方法を定量的に決める方法を考える必要がある。

水田の場合、他の地目との境界画素の除去処理をおこなった結果、統計面積に対する最終的な抽出面積の割合は、1984年は2%、1986年は5%、1992年は10%、1993年は11%と、極めて低い値となったが、抽出画素は水稻の栽培地域にはほぼランダムに分布しており、輝度値を市町村統計収量と対比することが可能と考えられた。

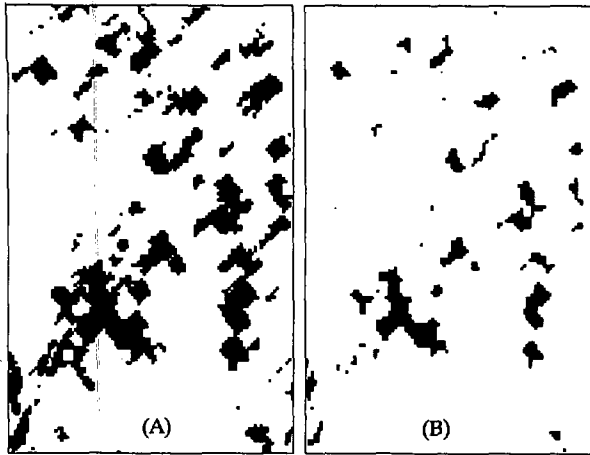


図4-6 8近傍の解析による境界画素の除去(図の1画素は25mメッシュ)
A:小麦に分類された画素の分布
B:境界に接した画素を除去した画素の分布

2 市町村統計と衛星データによる小麦の収量推定

1984年5月31日, 1987年6月22日および1990年5月29日のTMデータから抽出した小麦畑について, TM各バンドの輝度値の市町村平均と, 農林水産統計による市町村の小麦収量の相関を表4-5に示す。収量と1%水準で有意な相関があったバンドを年次別に見ると, 1985年には, TM4, TM5およびNDVIが正の相関を示した。1987年には, TM2, TM3, TM5およびTM7が負の相関を, NDVIが正の相関を示した。1990年には, TM2およびTM3が負の相関を, NDVIが正の相関を示した。年次を通してみると, 可視域のバンドは1985年のTM1を除い

てすべて収量と負の相関を示した。また, 可視域の3バンドの中ではクロロフィルの吸収帯にあたるTM3が収量との相関がもっとも高かった。近赤外のTM4は収量と正の相関を示すが, 1%水準で有意となったのは1985年のみであった。中間赤外のTM5およびTM7は, 1987年には収量と有意な負の相関を示したが, 1985年には正の相関を示し, 一定した傾向はみられなかった。NDVIは3カ年とも収量と有意な正の相関を示した。

TM各バンド輝度値を説明変数としたステップワイズ重回帰分析の結果, 1985年と1990年についてはTM1, TM2およびNDVIの3バンド, 1987年についてはTM1およびTM2の2バンドを用いた回帰式が得られた(表4-6)。重回帰式の寄与率(R^2)は, 1985年, 1987年および1990年について, それぞれ0.69, 0.73および0.62となり, 1990年に最も小さかった。その原因は, 1990年の市町村間の小麦収量のばらつきそのものが小さかったためと考えられ, 回帰式の推定誤差を示すRMSエラー(Root Mean Square Error: 推定残差の平方和をデータ数で除した値の平方根)は, 1985年, 1987年および1990年について, それぞれ0.28t/ha, 0.22t/haおよび0.25t/haと, 1985年が1990年を上回った。

RMSエラーを基準に考えれば重回帰式の推定精度は対象とした3カ年では大差がなかったと考えられる。強いて言えば, 1987年のRMSエラーが他の2カ年より低いのは, TMデータの撮影時から収穫までの期間の長さが影響していると考えられる。1987年はデータの撮影が6月22日であり, 5月から6月にかけての干ばつの影響がTMデータに反映されたと推測されるが, 1985年と

表4-5 小麦の市町村統計収量と各バンド輝度値の単相関係数

TMデータの撮影日	市町村数	各バンド輝度値と収量の相関係数						NDVI
		TM1 (青)	TM2 (緑)	TM3 (赤)	TM4 (近赤外)	TM5 (中間赤外)	TM7	
1985年5月31日	23	0.22	-0.16	-0.44	0.76*	0.62*	0.11	0.71*
1987年6月22日	29	-0.28	-0.76*	-0.78*	0.10	-0.72*	-0.72*	0.63*
1990年5月29日	28	-0.42	-0.62*	-0.65*	0.42	-0.081	-0.42	0.59*

* 1%水準で有意なもの

表4-6 TMバンドの重回帰およびNDVIの単回帰による小麦の収量推定式

年次	市町村数	収量推定式*	寄与率(R^2)	RMSエラー** (ta)
1985年	23	$Y=0.236TM1-0.294TM2+15.6NDVI-14.47$	0.69	0.28
1987年	29	$Y=0.210TM1-0.570TM2+5.36$	0.73	0.22
1990年	28	$Y=0.172TM1-0.539TM2+8.23NDVI+4.285$	0.62	0.25
1985年	23	$Y=17.5NDVI-6.89$	0.51	0.35
1987年	29	$Y=13.8NDVI-4.49$	0.41	0.33
1990年	28	$Y=8.95NDVI-1.90$	0.35	0.33
全年次	80	$Y=12.6NDVI-3.90$	0.73	0.37

* Y:推定収量(t/ha)

** 推定残差の平方和をデータ数で除した値の平方根

1990年のTMデータは5月30日前後の撮影であり、その後収穫までの約2カ月の気象の推移はTMデータに反映されていないため、回帰の寄与率が低くなったものであろう。回帰式の各項の係数をみると、3カ年ともTM1については正、TM2については負の値となった。また、1985年と1990年のNDVIの項については正の係数となり、年次が異なっても類似した回帰式が得られた。しかし、係数の値は各年次で大きく異なっており、ある年次に得られた重回帰式を他の年次にあてはめることは不可能であった。市町村統計収量と重回帰式による推定収量の散布図(図4-7)では、各年次とも推定値は $Y=X$ の直線の周辺に分布し、推定残差の偏りは特に認められなかった。

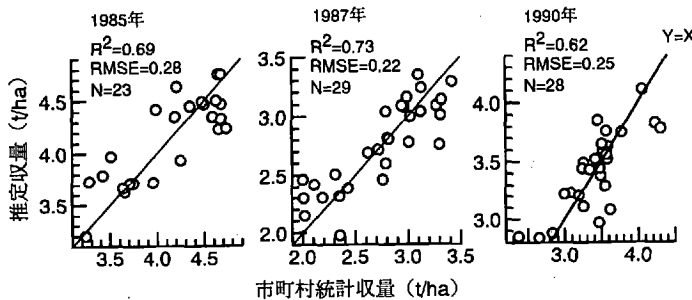


図4-7 小麦の市町村統計収量とTMバンドの重回帰式による推定収量

3カ年とも収量と有意な相関を示したNDVIの場合、単回帰式のRMSエラーは、 $0.33\text{t/ha} \sim 0.35\text{t/ha}$ で、TMバンド輝度値の重回帰式を用いた場合のRMSエラーより40%程度大きく、推定精度は劣った。(表4-6)しかし、3カ年のNDVIと市町村収量の関係を散布図にプロットすると3カ年のデータがほぼ一直線上に並ぶことは、年次間に共通した収量推定式が存在する可能性を示すものとして注目される(図4-8)。3カ年のデータを統合した場合のNDVIと市町村統計収量との回帰式の寄与率は0.73、回帰のRMSエラーは 0.37t/ha であった。衛星の撮影時の小麦の生育ステージが出穂後の1987年と出穂前の他の2カ年ではかなり異なるにも関わらず、3カ年に共通した収量推定式の推定精度はそれほど悪くない。この理由を圃場における小麦の分光反射測定によって確かめた。すなわち(図4-9、図4-10)に示すように、今回用いたTMデータが、NDVIが比較的安定した値を示す5月下旬から6月下旬の間に撮影されたデータであるためと考えられる。出穂期前後の衛星データを用いて収穫前に収量予測をおこなうことを目的とする場合には、3カ年に共通する推定式が得られたNDVIによる収量推定が可能と思われる。

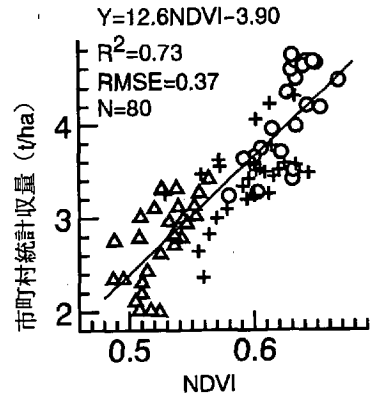


図4-8 小麦のNDVIと市町村統計収量
○：1985年5月31日
△：1987年6月22日
+：1990年5月29日

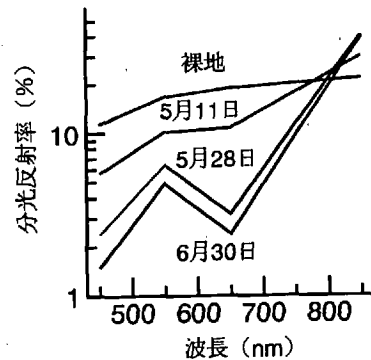


図4-9 圃場における小麦の分光反射の時期別変化
1992年，中央農試圃場，携帯分光反射計使用

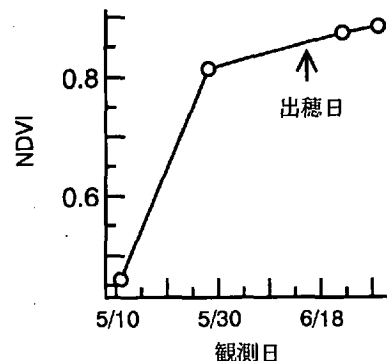


図4-10 圃場における小麦のNDVIの時期別変化
1992年，中央農試圃場，携帯分光反射計使用

収量推定式のRMSエラーを検討した結果、単年度の収量区分図を作成する目的では、重回帰式による収量推定が適当と考えられたので、各年次の重回帰式にもとづいてバンド間演算をおこない、収量区分図を作成した。収量区分図の小麦収量推定値のヒストグラムを図4-11に示す。推定収量はほぼ正規分布を示し、1985年、1987年および1990年における推定収量の平均値は4.3t/ha、2.8t/haおよび3.5t/ha、標準偏差は0.84t/ha、0.75t/haおよび0.88t/haであった。

推定収量を、一辺500m四方の区画毎に平均し、500mメッシュの収量区分図に変換した結果を図4-12に示す。図では、推定収量の高低を色調の違いで表現し、低収側から順に紫、青、緑、黄、赤の連続して変化する色調を対応させた。収量分布の特徴については次章で検討する。

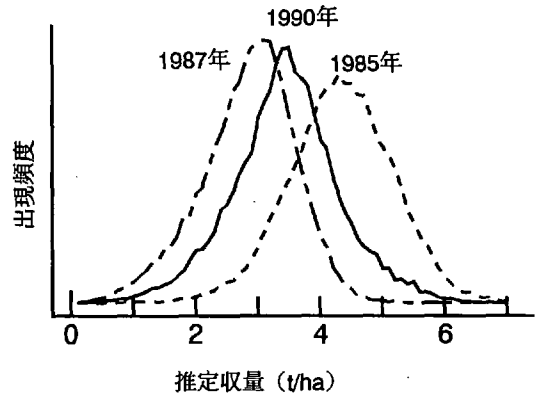


図4-11 TMバンドの重回帰式から推定した小麦収量のヒストグラム
推定収量の平均値は、1985年：4.3t/ha、
1987年：2.8t/ha、1990年：3.5t/ha

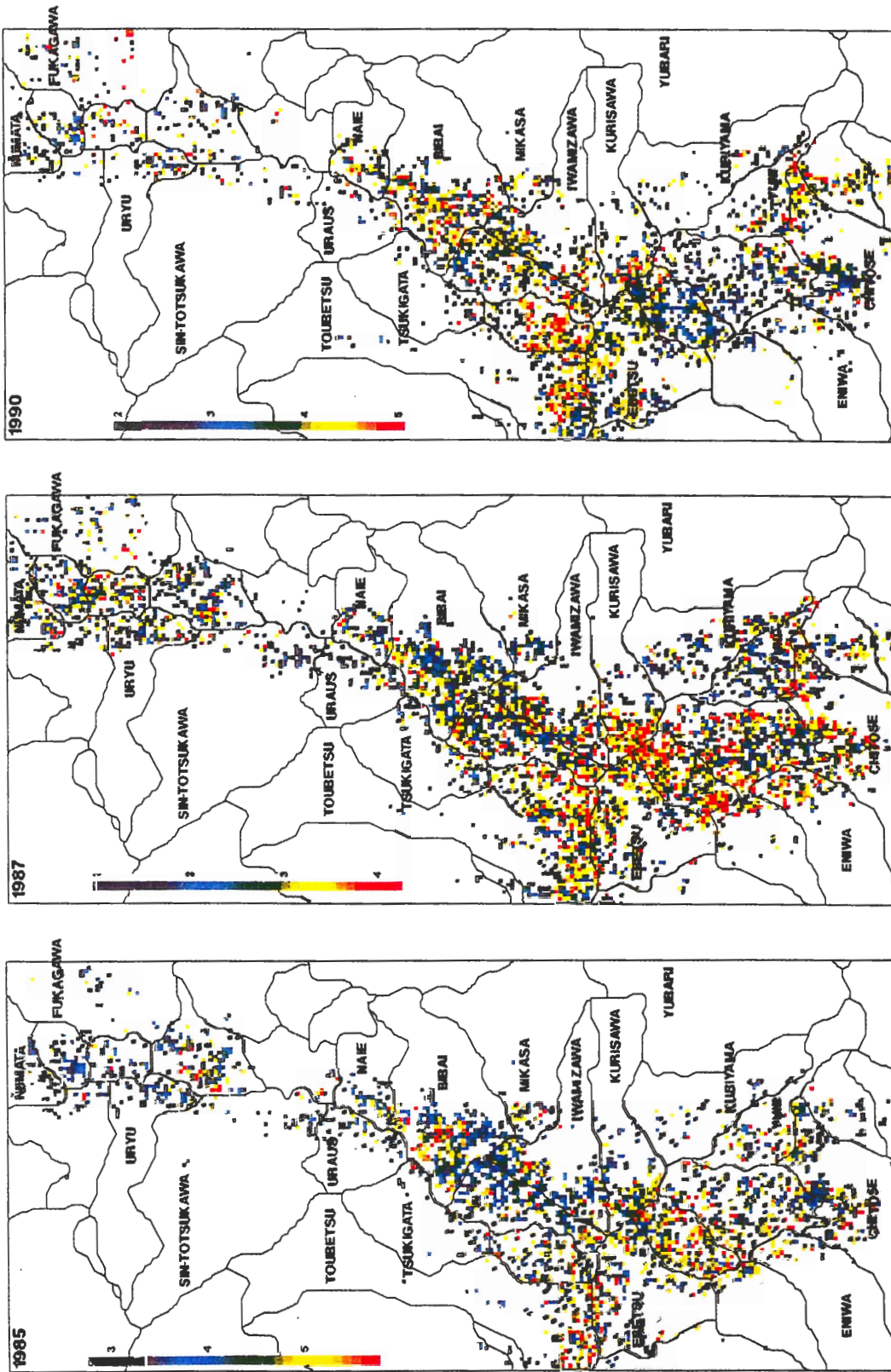


図4-12 TMバンドの重回帰式から推定した小麦の収量の収量区分図
500mメッシュ毎に平均した値で示す、背景は市町村の境界線、凡例のカラーバーは推定収量 (t/ha) を示す

表4-7 市町村統計収量と各バンド輝度値の単相関

TMデータの撮影日	市町村数	各バンド輝度値と収量の相関係数						NDVI
		TM1 (青)	TM2 (緑)	TM3 (赤)	TM4 (近赤外)	TM5 (中間赤外)	TM7	
1984年9月17日	21	-0.33	-0.44	0.22	-0.30	-0.29	-0.14	-0.32
1986年9月23日	30	0.37	0.39	0.40	0.51*	0.24	0.33	-0.09
1992年9月14日	27	-0.79*	-0.20	0.56*	-0.34	-0.47	-0.34	-0.57*
		MESSR1 (緑)	MESSR2 (赤)	MESSR4 (近赤外)	NDVI			
1993年9月2日	29	0.93*	0.93*	0.69*	-0.81*			

NDVI=(TM4-TM3)/(TM4+TM3)または(MESSR4-MESSR2)/(MESSR4+MESSR2)

*1%水準で有意なもの

表4-8 TM2, TM4, NDVIを用いた重回帰式による収量推定

年次	市町村数	収量推定式*	寄与率 (R ²)	RMSエラー** (t/ha)
1984年	21	Y=-0.619TM2+0.239TM4-34.1NDVI+19.17	0.72	0.18
1986年	30	Y=-0.181TM2+0.123TM4-14.4NDVI+7.06	0.45	0.28
1992年	27	Y=-0.932TM2+0.185TM4-41.1NDVI+36.05	0.87	0.13
(美幌市以南の市町村を対象とした場合)				
1984年	15	Y=-0.584TM2+0.246TM4-31.2NDVI+16.17	0.81	0.12
1986年	18	Y=-0.485TM2+0.174TM4-24.0NDVI+18.07	0.84	0.12

*Y:推定収量(ta)

**推定残差の平方和をデータ数で除した値の平方根

3 市町村統計と衛星データによる水稻の収量推定

市町村別に平均したTMおよびMESSR各バンドの輝度値と、農林水産統計による水稻収量の相関を表4-7に示す。相関係数の符号をみると、赤色波長(TM3およびMESSR2)の輝度値が4カ年で収量と正の相関を示し、正規化植生指数NDVI(近赤外と赤の輝度値の差を両者の和で割ったもの)が収量と負の相関を示した。1993年にはMESSR1(緑色)およびMESSR2の輝度値が収量と高い正の相関を示した。豊作年の1984年および1986年には、収量と各バンド輝度値の相関は全般に低く、収量と1%水準で有意な相関を示したバンドは、1986年のTM4のみであった。一方、冷害年には複数のバンドで収量と有意な相関が見られ、1992年にはTM1, TM3およびNDVI, 1993年にはMESSRの全バンドおよびNDVIが収量と1%水準で有意な相関を示した。

次に、TM1, TM2, TM3, TM4, TM5の輝度値およびNDVIを説明変数、統計収量を目的変数としたステップワイズ重回帰分析をおこなった。TM7は同じ中間赤外域のバンドであるTM5と常に高い相関を示したため説明変数から除外した。重回帰分析にあたっては、3カ年共通のバンドの組み合わせで、寄与率の高い式を探索した。その結果、TM2, TM4, NDVIの説明変数を用いた場合、1984年および1992年について寄与率が7割をこえる回帰式が得られた(表4-8)。しかし、豊作年の1984年と1986年について、統計収量とTM2, TM4, NDVIの重回帰式による推定収量を比較したところ、図

4-13に示すように、対象地域の北部、美幌市より北の市町村では推定収量が過少評価となることが認められた。そこで、1984年および1986年については、美幌市以南の市町村について、再度TM2, TM4, NDVIを説明変数に用いた重回帰式を求めた。こうして求めた重回帰式の寄与率(R²)は、1984年0.81, 1986年0.84, 1992年0.87であった(図4-14)。また、回帰のRMSエラーは、1984年0.12t/ha, 1986年0.12t/ha, 1992年0.13t/haであり、取り上げた3つの変数で市町村収量を精度良く説明することができた。従って、豊作年の解析対象地域から北部を除いては得られた重回帰式を用いて収量地図の作成が可能と判断された。

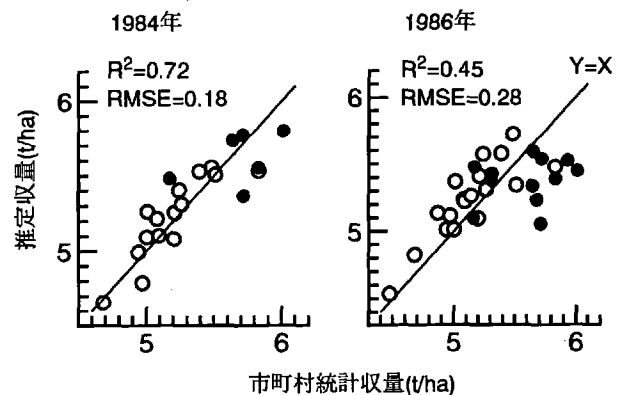


図4-13 豊作年における市町村統計収量と衛星データからの推定収量

○:美幌市以南の市町村

●:美幌市より北の市町村

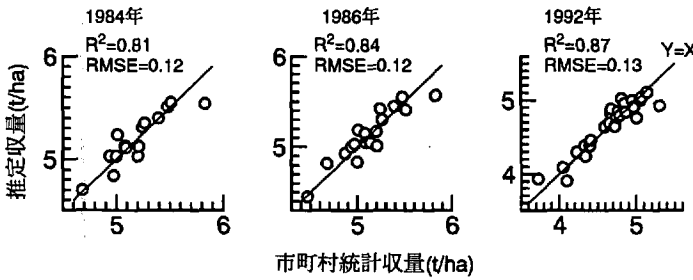


図4-14 市町村統計収量と衛星データからの推定収量
推定収量はTM2, TM4, NDVIの重回帰式による値
ただし、1984年および1986年は美瑛市以南の市町村が対象

豊作年の解析対象地域北部の収量が、過少評価となる理由として、気候条件および水稻生育の様相の違いが考えられる。すなわち、夏季にオホーツク海の高気圧から吹き出し、太平洋から石狩平野南部に流入する海洋性冷気流、いわゆる「やませ」は、低温と海霧による日照不足をもたらすが、内陸側の美瑛市付近では解消することが堀口ら(1983)によって明らかにされている。このような気象条件を反映して、解析対象地域北部の水稻は初期生育が早く、成熟も早いのにに対し、南部では、初期生育が停滞し、登熟も不揃いの傾向がある(藤原, 1994)。収量レベルが高い北部では、豊作年には収量と輝度値が、南部と同一の回帰式で表せる範囲を越えていたと推定される。美瑛市以北の市町村の水稻統計収量は、豊作年には概ね5.5t/haに達しており、TMデータを用いた水稻収量推定の手法を適用する際の統計収量の上限が5.5t/haあたりにあるものと推定される。冷害年の1992年には、全域についてTM2, TM4, NDVIの説明変数を用いた重回帰式がよくあてはまったことから、単純に収量水準が5.5t/haに達しない条件さえあれば、地理的条件には関係なくTMデータによる収量推定が可能であるのかもしれない。

いずれにしても、9月のTMデータを用いた水稻収量の推定が可能であり、収量推定に有効な波長には、ある程度普遍的な組み合わせ(TM2, TM4, NDVI)が存在すると考えられる。ここで用いた波長域(緑色, 赤色, 近赤外)は、TM以外の衛星センサ、例えばスポットのHRVセンサやJERS-1のOPSセンサでも観測可能であり、今後、複数センサの適用を検討することで、収量推定の機会が増えることが期待される。

4 不稔の激発年における水稻収量推定

1993年について、MESSR各バンドの輝度値を支庁別に平均した値と、農林水産省が1993年12月に発表した各支

庁の水稻収量の関係を図4-15に示す。MESSR輝度値の支庁平均と収量の間にはいずれも正の相関が見られ、特にMESSR2との間には相関係数0.98(データ数は5)の高い相関がみられた。MESSR2輝度値と支庁収量間の直線回帰式は次のようになった。

$$Y = -14.4 + 1.67 \text{MESSR2} \quad (4-1)$$

但し、Y: 推定収量 (t/ha)

式(4-1)をMESSR2の市町村平均値にあてはめて市町村別の収量を推定した。市町村の推定収量はその後1994年3月に発表された統計収量とほぼ一致し、推定のRMSエラーは0.61t/haであった(図4-16)。解析対象地域内の収量が、0.4t/haから4t/haまでの広い範囲に分布することを考えると、MESSR2と支庁統計を用いた推定は、被害程度の把握に十分な精

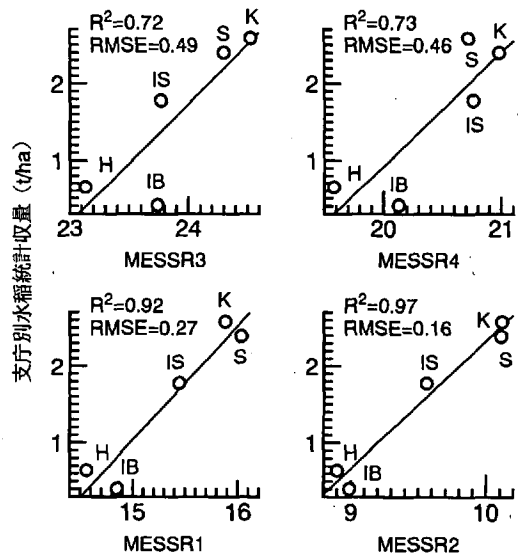


図4-15 モス-1/MESSR輝度値の支庁平均値と支庁別水稻収量
IS:石狩, S:空知, K:上川, IB:胆振, H:日高の各支庁を示す

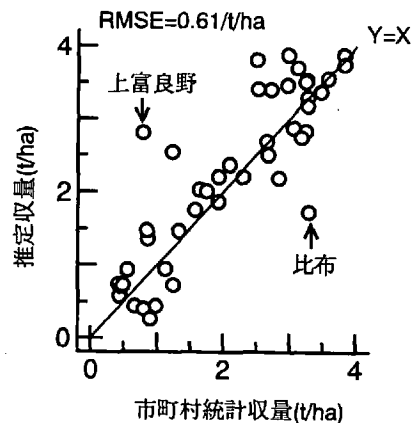


図4-16 MESSR2輝度値と支庁別水稻収量の関係から推定した市町村収量と市町村統計収量

度と言える。推定収量が統計値を大きく下回る比布町と統計値を大きく上回る上富良野町について、水稻の抽出位置、雲の影響などを仔細に検討したが特に問題となる点は認められず、統計値とのずれの原因は不明であった。

MESSR2の市町村平均値と最終的に確定した市町村統計収量間の回帰式は、

$$Y = -12.2 + 1.44\text{MESSR2} \quad (4-2)$$

となり、相関係数は0.93（データ数は42）、推定のRMSエラーは0.43t/haであった。ただし、式（4-1）による推定収量が統計収量と大きく食い違った比布町と上富良野町は除外して計算をおこなった。

MESSR2輝度値を市町村別に平均した値の最小値は平取町の8.7であり、これを式（4-2）にあてはめれば、0.41t/haの推定収量に相当する。しかし、画素単位の集計によれば、MESSR2輝度値の分布は8～12の範囲にあり、式（4-2）を用いると、輝度値が8.5以下で推定収量が負の値となる不都合が生じる。図4-17中の移動平均の折れ線の形状からみて、MESSR2輝度値と市町村統計収量の関係には、S字型の関数がより適合すると想定された。そこで、S字型関数としてロジスティック曲線（安田、1968）のあてはめを試みた（式4-3）。

$$Y = K / (1 + (K/a - 1) \exp(-K \alpha (\text{MESSR2} - 7))) \quad (4-3)$$

但し、K, a, α:定数

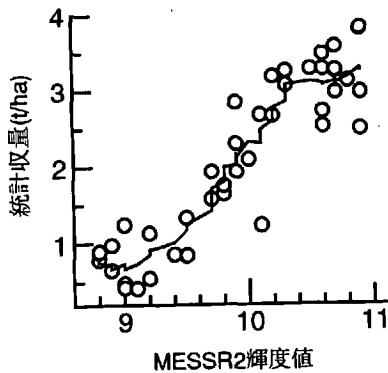


図4-17 MESSR2輝度値の市町村平均値と市町村別統計収量
図中の線は収量の7点移動平均値

対象地域の全市町村について、MESSR2輝度値の出現頻度を求め、（4-3）式による推定収量を出現頻度で重みづけ平均した値と市町村統計収量の差の平方和が最小となるように、定数K, a, αの値を定めた。ただし、式（4-2）と同様に比布町と上富良野町は計算から除外した。その結果次式が得られた。

$$Y = 4.2 / (1 + 4199 \exp(-2.81(\text{MESSR2} - 7))) \quad (4-4)$$

式（4-4）による収量推定のRMSエラーは0.42t/haと、式（4-2）を用いた場合にはほぼ等しく、S字型関数を用いることによる収量推定の精度向上は認められなかった。図4-18に示すように、式（4-2）と式（4-4）による推定収量は、MESSR2輝度値が8から11の間では大差がない。対象地域内の画素の94%が輝度値8から11の範囲に出現したため、式（4-2）と式（4-4）の違いはRMSエラーに反映しなかったと考えられる。したがって、少数の画素で推定収量が負の値となる不都合を許容すれば、MESSR2輝度値と収量の関係が線形と仮定しても、実用上問題はないものと考えられる。式（4-4）による推定収量と市町村統計の関係を図4-19に示す。

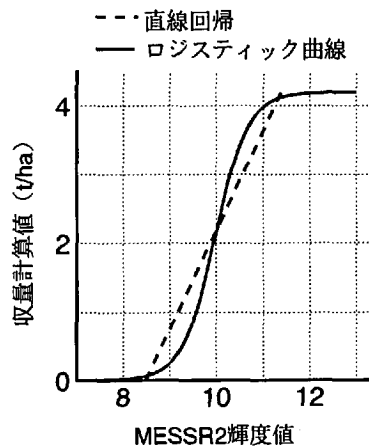


図4-18 MESSR2を用いた収量推定関数の比較

1993年においては、解析対象地域の収量は不稔の発生程度にはほぼ支配されていた。不稔により減収となる型の冷害（他の要因との複合型も含む）は、北海道では過去50年間に約10回発生しており（佐竹、1994）、この型の冷害年には、深山ら（1983）によるMSSのバンド5を用いた解析事例や、今回のMESSRバンド2を用いた解析と同様に、赤色波長の輝度値による収量の推定が有効であることが予測される。

MESSRセンサの量子化レベルは6ビットであり、ランドサットTMの8ビットに比べると粗い（宇宙開発事業団、1987）。図4-18にみるように輝度値9から11の間では輝度値1ポイントの違いが収量約2t/haの違いに相当する。したがって、画素単位では定性的な収量の判定にとどまらざるを得ない。水稻の場合は、収量推定精度に対する農業現場の要求が厳しい。MESSRを用いる場合は、空間解像度を犠牲にして、500mメッシュ程度のメッシュに集計し、推定精度を高めることが必要であろう。1993年の9月に量子化レベルおよび空間解像度の

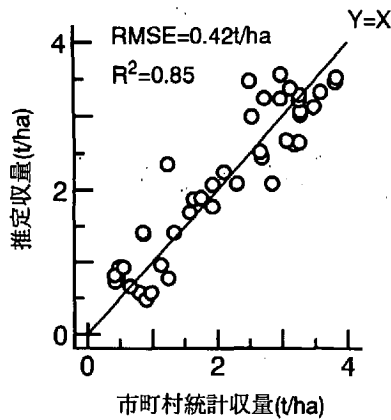


図4-19 ロジスティック関数による推定収量と市町村統計収量

点でMESSRを上回るランドサットTMデータが得られていれば、よりきめ細かい収量分布を把握することが可能であったと考えられる。

5 収量区分図の作成

冷害年の1992年および1993年について、収量推定式にもとづいて推定した収量を500mメッシュ単位に平均化した結果を図4-20に示す。小麦の場合と同様に、推定収量の低収量側から順に紫、青、緑、黄、赤の連続して変化する色調を対応させた。紫、青、緑で示される推定収量が低い地点は、図の南端の千歳市から江別市にかけて集中しており、太平洋から石狩平野に流入する海洋性冷気流の通路で2カ年とも大きな被害を受けていることがわかる。1992年の水稲収量が美瑛市以北でやや減少する傾向にあるのは、解析対象地域の北部で9月に厳しい冷え込みがあったことを反映していると考えられる。

図4-21は、岩見沢市周辺における1993年の水稲収量推定値をトゥルーカラー表示のランドサット画像にオーバーレイしたものである。画像のサイズは南北37km、東西26kmである。石狩川が北から南に流れ、図の南西隅で夕張側と合流している。図のほぼ中央の白く抜けた部分は岩見沢の市街地である。図の収量推定値は50m角の推定値に500mメッシュの2次元の移動平均を施して平滑化してある。図の中央の岩見沢市街地より南の地域では、極めて低収量となっていること、市街地より北の地域についても収量の局地的な変動があることが認められる。

第4節 まとめ

1 小麦の収量推定

秋まき小麦の収量推定手法を、1985年、1987年、1990年の3カ年のランドサットTMデータを用いて検討した。

(1) 小麦畑と識別された画素のうち、他の地目との境界

に位置する画素は、NDVIの値からみて、周辺のカテゴリの輝度値の影響を受けていた。したがって、小麦の輝度値の算出にあたっては、境界画素を除去する処理をおこなった。

(2) TM各バンドの輝度値の市町村平均と、統計収量の関係を検討したところ、可視域のバンドは1985年のTM1を除いてすべて収量と負の相関を示した。また、可視域の3バンドの中ではクロロフィルの吸収帯にあたるTM3が収量との相関がもっとも高かった。NDVIは3カ年とも収量と有意な正の相関を示した。

(3) NDVIと市町村収量の3カ年のデータを統合した場合、寄与率0.73の回帰式が得られ、5月下旬から6月のNDVIを用いて小麦の収量を収穫前に予測することがある程度可能と推測された。

(4) TM各バンド輝度値およびNDVIの市町村平均値を説明変数、市町村統計収量を目的変数とした重回帰分析の結果、1985年と1990年についてはTM1、TM2およびNDVIの3バンド、1987年についてはTM1およびTM2の2バンドを用いた回帰式が得られた。

(5) 単年度の収量推定をおこなう場合は、重回帰式を用いた方が収量推定のRMSエラーが小さいことから、重回帰式にもとづいてバンド間演算をおこない、収量区分図を作成した。

2 水稲の収量推定

豊作年および冷害年それぞれ2カ年を含む計4カ年について、9月に撮影されたランドサットTMセンサおよびモス-1/MESSRセンサのデータを用いて水稲収量の推定をおこない、以下の結果を得た。

(1) 1984年、1986年、1992年の3カ年について、統計収量を目的変数、TM2、TM4の輝度値およびNDVIを説明変数に用いた重回帰式をあてはめ、1984年および1992年について寄与率0.70をこえる回帰式を得た。

(2) TM2、TM4、NDVIを用いた重回帰式は、豊作年(1984年および1986年)の解析対象地域北部を除けば、市町村収量を精度良く説明し、収量地図の作成が可能と判断された。

(3) 不稔の発生が著しかった1993年については、クロロフィルの吸収波長に対応するMESSR2の輝度値が収量と高い相関を示し、MESSR2の非線形回帰式により収量を推定することができた。

(4) 以上、年次、地域的な制限はあるが9月のTMデータを用いた水稲収量地図の作成が可能であり、収量推定に有効な波長には、ある程度普遍的な組み合わせが存在することを示した。

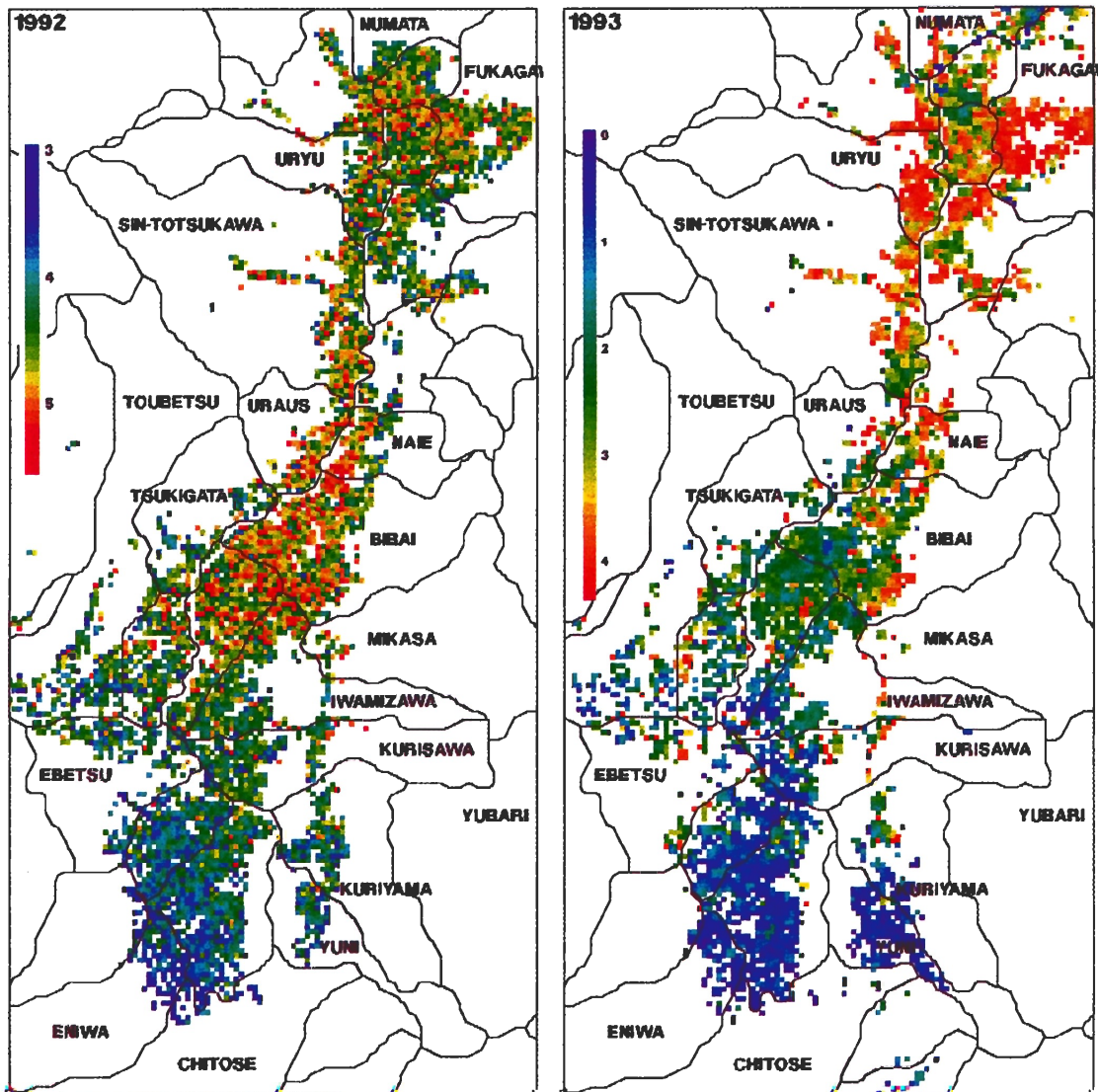


図4-20 1992年および1993年の水稲収量区分図
 500mメッシュに平均化した結果、背景は市町村境界
 1992年はTMデータの重回帰、1993年は
 MESSR2の非線形回帰による推定値
 凡例のカラーバーは推定収量 (t/ha) を示す

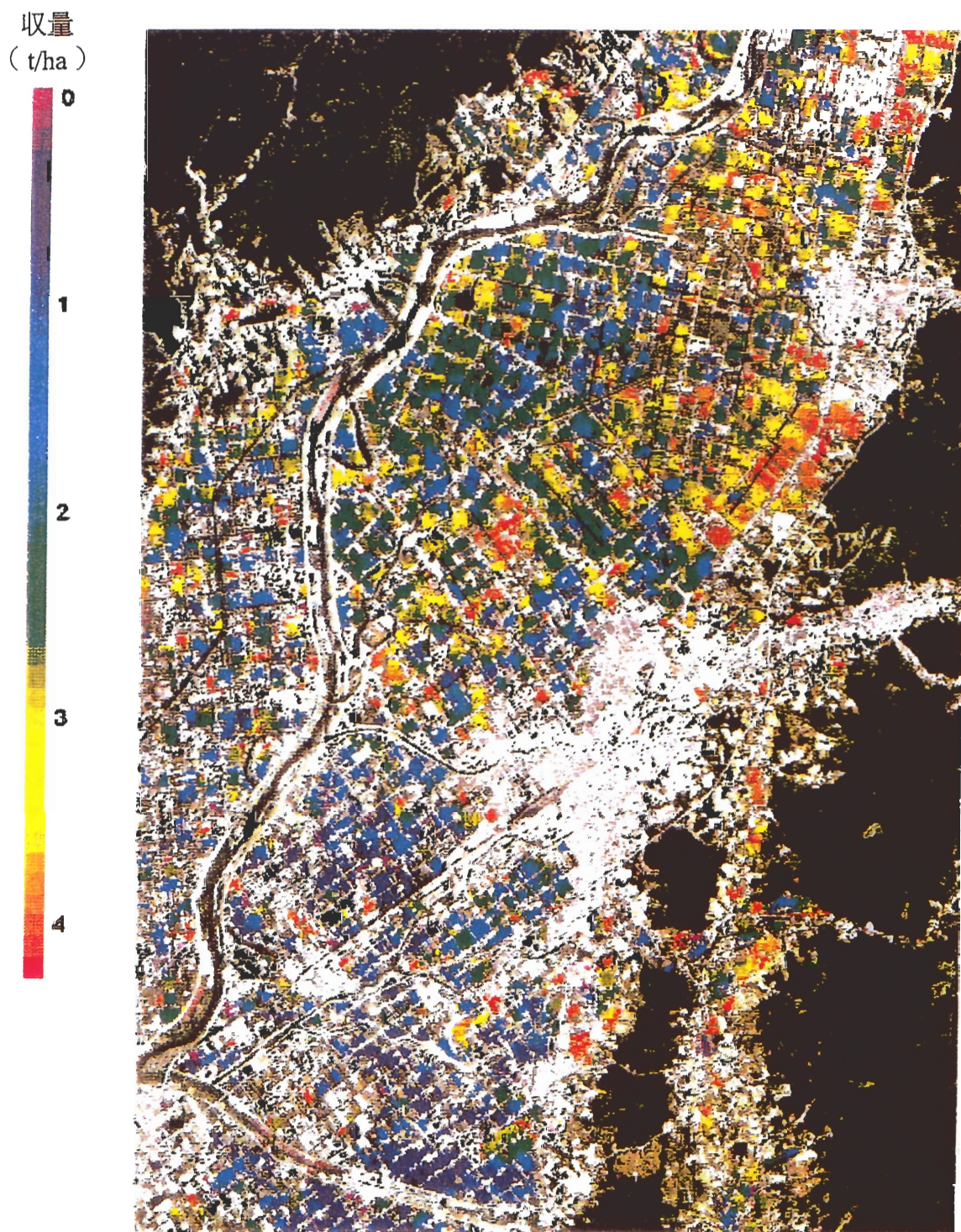


図4-21 岩見沢市周辺における1993年の水稲収量推定値
画像のサイズは南北37km，東西26km
背景はランドサットの原画像