作業技術体系研究の手法について

第2報 作業技術体系の設計および評価への線型計画法の適用法

農事試験場：池田弘・高橋保夫

Hiroshi IKEDA, and Yasuo TAKAHASHI: Studies on Methods of Integration of Farm Works. II. Application of the Linear Programming Methods for Integration of Farm Works.

前報において作業技術体系を設計したり評価を行なう手法として具備すべき条件は迅速性、経験や勘の排除による合理的意志決定、部分技術の技術体系からみだた的確な評価、情報の拡大であり、そのためにはORの導入が必要であることを述べた。つまりORでは数学的モデルに従って計算する諸手法を用い、その計算は電子計算機を使用することができるので、設計や評価を迅速に行なえるし、総合化が経験や勘を排除して合理的に行なえる。さらに、モデルを媒介として、作業を制約する諸条件をパラメータとした諸計算が容易にかつ迅速に行なえるので、作業技術体系の設計においても、結果の評価も多面的に行なえて、多くの体系に関する情報をうることができる。さらに、設計にもとづく運営においては各時点の結果や条件の変化をフィードバックして設計の修正を行ない、次の具体的作業実施計画を迅速に立てなければならない。それには電子計算機を用いる必要がある。そのためにはORの手法を導入する必要がある。しかし、これらの手法を用いる場合の大前提はモデルが実際に則していなければならない。

1) 2) 3) 4)

これから適用しようとする線型計画法は、ORの諸手法の一つであって、いくつかの一次式（等式または不等式）で表わされる制約条件のもとで、同じく一次式で表わされる目的函数の値を最大または最小にするような変数の値を求める方法である。条件式の数が増える数に等しい場合には連立一次方程式で解け、解は一つとなるので線型計画法の対象にはならない。線型計画法の対象となるのは、条件式の数が増える数より常に少く、したがって解がいくつも存在する場合で、その多くの解の中で目的式を最

大または最小にする最適解を試行錯誤的に求めていくのが線型計画法である。

線型計画法に用いられるいくつかの概念がある。例えば、ある生産物を1単位得るためには、一定量の土地・資金・労力・資材等の資源（resource）が要る。これは具体的な数字で示され技術係数（technical coefficient, production coef., input-output coef.）という。一定の技術係数によって資源を投入し、一定種類、一定量の産出物を生産する価値変換機構を方式（process, activity）という。生産物の種類が同じでも、技術係数が異なれば方式は異なるものとする。そして、方式の採用量を稼働水準（level）という。また、各方式の単位水準があげうる利益を利益係数（obj value）という。なお資源については、無限に用いられるものは線型計画法の対象とはならないのであって、有限なものが対象となる。つまり、線型計画法ではあらかじめ制約量が明らかかなものを資源として扱う。これらの用語は経営的な利益最大問題に用いられるものであって、その用語が表わす意味にこだわる必要はない。

さらに、線型計画法は若干の仮定を前提として成立する。その主なものは、直線性（linearity）、独立性（independency）、加算性（additivity）、可分性（divisibility）である。直線性とは投入－産出の函数関係が一次式で表わされること、独立性とはある方式の水準が高くなっても他の方式の技術係数に影響しないことで、これら両者から加算性は導かれる。可分性とは資源量と産出量とが連続的であり、従って無限に細分され、稼働水準もまた整数でなくてもよいという仮定である。以上の諸仮定を厳密でなくても実用的に満足しうるものでなければ線

型計画法を用いることはできない。

1. 作業体系のモデル化

いま具体的な作業を週単位で計画するものとする。変数 X をトラクタ作業を行なう圃場数（一圃場は 30×100 m で 0.3 ha）とする。また、技術係数は各方式の各週におけるトラクタ（またはコンバイン）の 0.3 ha 当り作業時間とする。制約量としては、各週のトラクタ利用可能時間（週当り作業制約時間）をとる。また、労働力その他作業の制約条件となる要因をあらかじめ規定して考える場合は、制約量として追加して考える。その追加した要因については、その要因に応じた技術係数を算出しなければならない。

方式の数を n 、週の数 m 、 i 方式の水準を X_i 、 i 方式の j 週の技術係数 a_{ij} 、 j 週の制約量を b_j とすると、

$$\begin{array}{ll} \text{条件式は、1 週目} & \sum_{i=1}^n a_{i1} \cdot X_i \leq b_1 \\ & \vdots \\ \text{2 週目} & \sum_{i=1}^n a_{i2} \cdot X_i \leq b_2 \\ & \vdots \\ \text{j 週目} & \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot X_i \leq b_j \\ & \vdots \\ \text{m 週目} & \sum_{i=1}^n a_{im} \cdot X_i \leq b_m \\ & (X \geq 0) \end{array}$$

となり、 m 個の条件式ができる。

目的式は、利益係数を C_i ($i=1, 2, \dots, n$) とすると、

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i \cdot X_i$$

となる。利益係数 C_i は、その内容が計算目的によって異なり、最大負担面積を計算する場合は各方式とも同じ値（例えば 1 とか 100）でよいし、収穫量を最大にする場合は各方式の一圃場当りの収穫量、また収益を最大にする場合は各方式の一圃当りの総限界利益を直接原価計算方式により算出して利益係数とする。

計算の問題は b_i という各週の制約条件のもとで各方式を何筆（一筆は 0.3 ha の圃場）づつ採用すれば、目的（例えば負担面積）を最大にしようかということであり、この問題は単体法（Simplex

method）の最大値問題として最適解を求めることができる。

2. 線型計画法の適用における仮定

前述のように、線型計画法を用いる場合には直線性、独立性、加算性、加分性等の仮定を厳密でなくとも実用的に満足していなければならない。前項で変数を 0.3 ha を単位とする圃場数とした。これは最近の構造改善事業において基盤整備される圃場が 30×100 m (0.3 ha) であり、大型トラクタの作業や灌排水の効率率等から適当とされている区画である。農作業は、この 0.3 ha の圃場ごとに行なわれ一圃場の作業が終了してから次の圃場へ移る。圃場内の実作業を考えると、直進作業、旋回作業、枕地作業があるが、これらの作業は作業法を一定とする限り 0.3 ha の圃場で一定であり、圃場数と作業時間は一次の函数関係を保つ。しかし、変数を圃場数でなく面積にすると、圃場ごとに作業を完結させていくための直進以外の諸作業は小面積から大面積に至るまで平均して附加されることになり、現実と異なる。したがって、ここでは変数 X を 0.3 ha の圃場数とした。なお直線性を乱す作業時間、例えば毎日の作業開始前と作業終了後に行なわれるトラクタや作業機の整備点検、作業準備、清掃、移動時間、故障修理、休止の諸時間はすべて制約量（トラクタ利用可能時間）で考慮することにした。

以上のように変数を 0.3 ha 圃場の数とすると、直線性、独立性、加算性は満足するが、加分性は満足しない。というのは、方式の稼働水準は圃場の筆単位で表わされなければならない、勿論整数の筈であるしかし、小数点以下の圃場数は四捨五入して整数にすれば、設計や評価に支障をきたすことはないので計算はすべて圃場の分割は可能であるとして加分性をもたせ、試算結果を整数に整理し直すことにした。

3. 演算までの手順

試験設計を立てる場合も、試験結果を評価する場合も、先ず単体表を作る。単体表の各係数の具体的な算出基礎については第 3 報以降に詳述するが、ここでは手順と一般的説明にとどめることにする。なお、説明は 35PS トラクタを基幹としたイタリアン

ライグラスと水稻直播栽培の一カ年の作業技術体系の一例について述べる(第1表, 第2表)。

1) 単体表の作成

(1) 作業体系を作業工程に分割し, 作業工程を記号で表わす(第1表, 注)。この各作業工程はそれ以上分割しえない一連の作業方式の有機的結合であり, いわゆる部分作業体系に相当する。

(2) 作業期間の設定を行なう。つまり, 作物栽培の作季移動とそれに伴う作業工程の時期の設定を行なう。

(3) 方式の決定を行なう。例えばイタリアンライグラス—水稻の栽培を行なう場合, 0.3 ha のどの圃場もイタリアンライグラスを播き, 収穫し, 水稻をその跡地に播種(または移植)し, 収穫しなければならない。したがって各工程は設定された作業期間を動くことはあっても, 一カ年の間のいずれかの週にすべての工程が作業される筈である。このような時期的な作業工程の移動によって工程の組み合わせ, つまり作業体系がいくつかできる。これらの作業体系の各々を方式とし, 単体表の方式と週の該当カラムに作業工程記号を記入する。この事例では方式(P行)は1から43までの43通り考えられる。

この工程の配置の仕方は, 水稻の播種の作業期間や品種, 栽培法その他諸条件によって収穫の作業期間が規制され, それによりイタリアンライグラスの播種作業期間も規制される。さらにイタリアンライグラスの品種や栽培法, 生育中の気象, 土壌等の諸条件の影響も加わって, 最終的には水稻の播種作業は何らかの形でイタリアンライグラスの収穫作業期間の設定まで規制する。この規制の仕方, つまり工程の配列は技術によって裏づけされていない。つまり, この一方式自体が作業技術体系となっていない。したがって, この例での43通りの方式(作業技術体系)の中, 技術的にみて主要な方式については作業技術体系試験を行なって, 実証を行ない, 部分技術の水準を高めておくとともに数量化(技術係数)もきめこまかに行なっておくこと, とさらに作業技術体系として完全なものでなければならない。

例えば, この第1表の例だと水稻の品種はミョウジョウでN₇, 8, 9の週に播種する。イタリアンライグラスはオオバヒカリを用い, 播種はN₁₀週に中まきする場合と, 水稻収穫後に耕起して播種する場合はN₁₂, 13, 14の週に播き, 施肥量は基肥・追肥とも1回にN 1 Kg/aで行ない1番刈は乾物2トン/haから3.5トン/haまでに刈取ること, 再生は3週間後(草丈60cm, 乾物で約2トン/ha)で刈取るように配置してあるこの技術体系の根拠については, 第3報以降に詳述する予定である。

(4) 技術係数を算出する。例えば, 制約量をトラクタ利用可能時間とすると技術係数はトラクタの作業能率(0.3 ha 当り作業時間)であり, 制約量を労力とすれば, 技術係数は各工程における0.3 ha 当りの所要労力である。各作業工程について技術係数が算出されたら, これを記号と併記する。また, 作業能率を技術係数とする場合は, 圃場内作業時間以外に各圃場ごとに必要とする圃場外作業時間(例えば運搬, 移動, 補給, 作業機の着脱装時間)もトラクタ作業能率を拘束する時間として技術係数に含ませ, 変数である圃場数と技術係数が一次の函数関係にあるようにしなければならない。この算出基礎についても第4報以降に詳述する。

(5) 制約量を算出する。いま, 各週のトラクタ利用可能時間を制約量とすると, この制約量は主として降雨に関係するので過去の気象表から試算する。例えば農事試験場作業技術部機械化経営研究室⁵⁾で試算したように, 作業別大型機械運行不可能率を算出し, 毎日の作業可能率を求める。その場合, ある特定日の作業の可否は特定日を含み, それ以前の数日の降雨によって支配され, かつ, これら数日の天候は独立して特定日の作業可能率に関与すると考えて毎日の作業可能率を求める。かくしてえられた毎日の作業可能率を週別に平均し, これを特定年の特定週における平均作業可能日数率とする。この作業可能日数率と作業別日実作業時間との積を週当りトラクタ利用可能時間とするやり方である。第1表のPo列の値は, このようにして求めた値を17年間にわたって集計し, その平均値を出したもので,

作業名	週 No.	週No. 6 (中まき)				週No. 12 (耕起播)				週No. 13 (耕起播)				週No. 14 (耕起播)			
		イタリアン 播種期				Oj				Oj				Oj			
	月 日	101.6	102.2	101.8	101.3	101.9	101.4	101.2	101.8	101.4	101.1	101.4	101.1	101.4			
1	1219~	28	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
イグラス収穫	2	411~	31	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
3	418~	42	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
4	425~	34	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
5	52~	34	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
6	59~	38	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
7	516~	42	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
水稻播種	8	523~	34	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
9	530~	42	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
イタリアン イグラス中ま	10	926~	26	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
11	103~	25	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
水稻収穫	12	1010~	25	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
イタリアン イグラス播種	13	1017~	30	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
14	1024~	29	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			

技術係数 (hrs/0.3ha)	収量によつて異なる。	C-0.2+0.2=C	3.5	—	2.2	0.3	2.4

作業名	技術係数 (hrs/0.3ha)
イタリアンイグラス刈取り (モアー) - 反転 (サイドレーキ) - 集草 (サイドレーキ) - 運搬 (トラック) - 追肥 (プロードキヤスタ) の一連の刈取り作業。	3.5
イタリアンイグラス最終刈りて追肥施用せず、刈取り後直ちにバラコートを散布しイタリアンイグラスを枯らす。	—
部分耕 (ロータリー) - 播種 (ドリルジーンダ)。	2.2
イタリアンイグラスを水稻の立毛中に中まき (ダスタ) する。	0.3
コンバイン (クボタM200), ルーズベラによるわら梱包, 稲・わら運搬 (トラック) を同時に作業する	2.4
(H), Yの後, イタリアンイグラスの基礎を施用 (プロードキヤスター)	
イタリアンイグラス中まき (H) 以外のイタリアンイグラス播種の一連の作業で, 施肥 (プロードキヤスター) - 耕起 (ディスクハロー) - 播種 (ダスタ) - 覆土・鎮圧 (カルチバクター)。	

第2表 イタリアンライグラス-水稲(直播, 部分耕)2毛作田で負担面積を最大にする作業体系(最適解)

作業名	週 No	月 日 (白)~(至)	トラ ク タ ー 利 用 可 能 時 間	方 式 №	1	4	5	23	29	31	32	37	週別 イタリア ンライグラス 乾物収量 (トン)
				0.3ha 区画数	1	8	2	5	1	2	5	4	
				ha 当り イタリ アン 収 量	5.39	7.39	6.09	4.70	3.80	3.80	3.80	3.80	
				ha 当り 水稲収量	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	
イタリアンラ イグラス刈取 り 水 稲 播 種 イタリアンラ イグラス中ま き 水 稲 収 穫 イタリアンラ イグラス播種	1	12.19~12.26	28	※ 16.5(11.5)	C15 (0.33)	C1.5 (0.33)	C1.5 (0.33)						3.6
	2	4.11~	31	20.7(10.3)	C2.3 (0.69)	C2.3 (0.69)							6.2
	3	4.18~	42	42.4(0)			C2.7 (0.93)	C2.6 (0.84)	C2.0 (0.57)	C2.0 (0.57)	C2.0 (0.57)	C2.0 (0.57)	12.9
	4	4.25~	34	0(34.0)									0
	5	5.2~	34	18.9(15.1)	-Cp 2.1 (0.60)	C2.1 (0.60)							5.4
	6	5.9~	38	38.0(0)			-Cp 2.0 (0.57)	-Cp 2.0 (0.57)	-Cp 2.0 (0.57)	-Cp 2.0 (0.57)	-Cp 2.0 (0.57)	-Cp 2.0 (0.57)	10.8
	7	5.16~	42	38.5(3.5)	S3.5		S3.5	S3.5	S3.5	S3.5			0
	8	5.23~	34	34.3(0)		-Cp 2.1 (0.60)					S3.5		4.8
	9	5.30~6.5	42	42.0(0)		S3.5						S3.5	—
	10	9.26~	26	—(—)	(H)	(H)	(H)						—
	11	10.3~	25	24.2(0.8)				Y2.2	Y2.2		Y2.2		—
	12	10.10~	25	24.2(0.8)	Y2.2	Y2.2	Y2.2						—
	13	10.17~	30	28.5(1.5)	F0.3	F0.3	F0.3	H2.4		Y2.2		Y2.2	—
	14	10.24~10.31	29	28.8(0.2)					H2.4	H2.4	H2.4	H2.4	—
方式別トラクター稼働面積と合計負担面積 (ha)					0.3	2.4	0.6	1.5	0.3	0.6	1.5	1.2	合計負担面積 8.4 ha
方式別イタリアンライグラス乾物収量と総収量(トン)					1.6	17.7	3.7	7.1	1.1	2.3	5.7	4.6	総収量 43.8トン
方式別水稲玄米収量と総収量 (トン)					1.3	10.4	2.6	6.5	1.3	2.6	6.5	5.2	総収量 36.4トン

- (注) 1. 方式№の方式とは、年間を通して各作業工程の組合せが異なる作業体系のことで、この設計例では43通りあり、電子計算機で計算の結果、この表にあげた8つの方式を次の段の0.3ha圃場の数だけ作業すると最も負担面積を大きくすることができる。なお、この設計はすべて100m×30mの0.3ha圃場区画に区画整理してあるものとして計画している。
2. ha当りイタリアンライグラス収量は、各方式の年間を通じて乾物合計収量(トン/ha)を、ha当り水稲収量は各方式の玄米収量(トン/ha)を示す。
3. トラクター利用可能時間は、この表の場合は鴻巣における過去17年間の気象データをもとに、トラクターが作業しうる時間を求めたもので、算出の方法は省略、なおこの時間は休憩その他(3時間)、準備時間、見込故障時間、イタリアンライグラスの予乾時間を差し引いた実作業時間を示す。
4. トラクター稼働(残余)時間の中、左側の数字は、その週トラクターやコンバインが稼働する時間を、右の()内はトラクター利用可能時間から稼働する時間を差し引いた余裕時間を示す。
5. 週別イタリアンライグラス乾物収量は、週別に収穫しうるイタリアンライグラスの収量で、この利用法に従って給与計画やサイロ等の準備が必要となる。
6. 方式の各列と週№の各行が交わる欄に記号と数字および()内の数字が記入してあるが、記号は作業内容を、記号の右側の数字は、各記号の一連の作業0.3ha(100m×30m)当り作業時間を表わし着脱時間も含む。同時作業は、最も能率の悪い作業時間をもつて作業能率とする。()内数字は、イタリアンライグラスの0.3ha当り乾物収量を表わす。
7. イタリアンライグラスの春先の追肥と、水稲の追肥、病虫害防除、雑草防除等の管理作業は負担面積に直接関係しない(トラクターに余裕のある作業であるから)ので表から省略する。
8. トラクターは、フーガゾンFE35X、コンバインはクボタM200、イタリアンライグラス品種はオオバヒカリ、水稲はミヨウジョウ。イタリアンライグラスの施肥量は、基肥・春先追肥・刈取り毎に各成分で100kg/haを施用するものとし、すべてヘイレージとして利用するものとする。

※ トラクター稼働(残余)時間

さらにイタリアンライグラスの収穫期間においては予乾時間を差引いてある。また、作業別日実作業時間の算出には、前述の直線性を乱す時間、例えばトラクタや作業機の整備点検、準備、清掃、車庫から圃場への往復移動、故障修理、休止の諸時間も考慮してある。この具体的算出基礎については第4報で詳述する。

(6) C_j 値 (利益係数) を算出する。 C_j 値は問題の目的によって異なる。この例ではトラクタおよびコンバインの負担面積を最大にするには、各週のトラクタやコンバインの動きうる時間の制約をうけながら、この43通りの方式の中、どの方式を何単位 (0.3 ha 圃場数) づつ採用すればよいかという問題である。負担面積を最大にする場合は、もし各方式から産出される価値が同一なら同一の値を C_j 値としてよい筈である。ここでは、各方式に収量で重みづけすることにした。その際、水稻収量はどの方式もすべて同一水準となるように作業期間の設定を行なったので、イタリアンライグラスの収量で重みづけすればよい。そこで各方式別イタリアンライグラスの0.3 ha当り乾物合計収量 (トン) に一律に100 (イタリアンライグラス収量の値に対して相当大きな値であればどんな値でもよい) を加えて各方式の C_j 値とした。そうすれば、最大負担面積で、かつ、イタリアンライグラス収量も高い方式が最適解として採用されることになる。

以上の諸係数が算出され、記入されると単体表は完成する。単体表の作成に当っては、他の工程にくらべて明らかに能率的であり、作業期間が他の工程と重ならない作業工程については単体表から削除し

演算労力を節減するようにする。

2) 演算

電子計算機によって計算する。電子計算機のプログラムは農林研究計算センターで開発された森島⁷⁾のものを使用した。線型計画法の演算手法である単体法は計算手順は簡単であるが、計算量が多く、方式数40程度でも一問題について電動計算機を用いて約1週間近くかかった。一方、電子計算機を使用した場合は、演算のみの所要時間は約1分であり、しかも正確に計算できる。多くの制約条件をパラメータにした試算を迅速に行なうには電子計算機が絶対に必要である。

最初の単体表のデータをインプットすると最適解の単体表の形でアウトプットされる。この最適解の単体表を整理すると第2表のようになり、この表から各週のトラクタ利用時間、残余 (余裕) 時間、採用方式の稼働水準、負担面積等が明らかとなる。

このようにして算出された技術体系の評価については続報で詳細に報告する予定である。

4. 引用文献

1. 小野勝章, 1967, 計算を中心とした線型計画法, 日科技連
2. 工藤元, 1960, リニヤプログラミングによる農業経営設計と分析, 東京明文堂
3. Hedy, E. O. and Candler, W. 1960, Linear Programming methods, Iowa State University Press.
4. 市橋英世・野志功, 1960, 線型計画法, 共立出版
5. 農事試験場作業技術部機械化経営研究室, 1967, 昭和41年度成績書
6. 農事試験場作業技術部, 1967, 昭和41年度成績書
7. 森島賢, 1968, 縮約法による離散的パラメトリック線型計画, 農林研究計算センター報告, A3, 51 - 62