C₃植物とC₄植物に関する農業気候学的研究*

(1)C₃作物とC₄作物の栽培地の分布

長谷川史郎・奥田 明男

(大阪府立大学農学部)

Agro-Climatological Studies on C₃-Plants and C₄-Plants.

(1). The Distribution of Cultivated Area of C₃-Crops
and C₄-Crops

Shirou HASEGAWA and Akio OKUDA

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture,
Sakai, Osaka)

1. ま え が き

高等植物は、CO₂固定系のちがいに、C₃植物とC₄植物の2群に分けられている⁵⁾。そして、従来の研究では、光合成、物質生産などにおよぼす生育環境の影響のしかたが、C₃植物とC₄植物とで異なっており、C₄植物はC₃植物に比して、光合成の好適温度^{8),9)}、及び光飽和点が高く⁶⁾、また要水量が少ない⁸⁾ことなどが認められている。C₄植物は、熱帯、乾燥砂漠、高山、塩地などにしばしば分布し²⁾、一部の熱帯原産の植物である¹¹⁾とされている。一方、C₃植物は温帯原産のものが主で、一部熱帯原産のものも含まれている¹¹⁾。

農業の面においても、C₃、C₄両作物の生産性のちがい¹²⁾やC₄作物の利用のしかた¹⁾などが論じられており、両作物の成りたちや、その耕作地域の分布に対する気候学的究明は重要な問題であると考えられる。

植物の分布は現時点の気候や土壌などの環境条件に支配され、それぞれの植物はそれぞれに固有の範囲の環境の下で、その生育が許容されるものである。しかし、地球上各地の植物の分布を実際に調べてみると、気候や土壌などの環境条件がほとんど近似している地域間にも、種類相にいちじるしい相違が見られる場合が少なくない。こうした現象は現時点での環境条件だけではとうてい理解できず、進化や地形、および気候の歴史的な経過をさぐらなければその由来は解明できない¹²⁾。

一方、作物の分布となると、気候、土壌環境などの外に人為的要素(栽培技術、栄養価、嗜好性など)が強く作用し、植物の分布にくらべ、より複雑になっているものと思われる。

本報は、現在C₃、C₄作物がどのような地域に多く栽培されているかを明らかにするとともに、C₃作物とC₄作物の現時点での栽培地と気候環境(気温、降水量)との関係を明らかにするために行なった研究をまとめたものである。

2. 方 法

C₃、C₄作物の栽培地の分布を明らかにするために、比較的広い地域(世界)と比較的狭い地域(インド)におけるC₄作物の栽培面積率(以後、C₄栽培率とよぶ)を算出した。なおC₄栽培率は次式で表わされる。

$$C_4 \text{栽培率} = \frac{C_4 \text{作物の栽培面積}}{C_3 \text{作物と} C_4 \text{作物の栽培面積}} \times 100(\%)$$

この資料としては;

世界……各作物の栽培面積はFAOのProduction Year Book¹⁰⁾における、1970-71年と1948-52年の数値を用いた。Table 1に示すように、対象作物は、穀類、マメ類、いも類、糖料類、蔬菜類とし、C₃作物とC₄作物に分類した。そして大陸別、国別にC₄栽培率を算出した。

インド……州別各作物の栽培面積は1964-65年のインドの農業統計⁷⁾を用い、世界の場合と同様の操作を行なった。なお、対象作物は世界の場合と同様の基準で選んだが、選定された作物はTable 2に示すごとく世界の場合とは異なっている。

昭和49年4月4日 全国大会にて発表

昭和49年5月25日 受理

* 編集委員会注: C₃、C₄植物のちがいについては農業気象25巻1, 2号, 単葉の光合成速度をめぐる諸問題(武田友四郎)を参照ください。

Table 1. C₃-crops and C₄-crops used in this research for the world distribution.

C ₄ crops	C ₃ crops		
Maize	Wheat	Rice	Rye
Millet and Sorghum	Barley	Oats	Buckwheat
Sugar cane	Bananas	Potatoes	Sweet potatoes and yams
	Cassava	Sugar beets	Sesame seed
	Soybeans	Dry peas	Dry broad beans
	Lentils	Dry beans	Green peas
	Lupins	Cow peas	Green beans
	Vetch	Pigeon peas	Groundnuts in shell
	Chick peas	Watermelons	Cantaloupes and other melons
	Onions	Cauliflowers	Cucumbers and cherkins
	Tomatoes	Cabbages	

Table 2. C₃-crops and C₄-crops used in this research for India.

C ₄ crops	C ₃ crops		
Jowar or Cholum (<i>Sorghum vulgare</i>)	Rice,	Wheat,	Barley,
Bajra or Cumbu (<i>Pennisetum typhoides</i>)	Pulses,	Bananas,	Vegetables,
Maize (<i>Zea mays</i>)	Groundnut,	Sesamum	
Ragi or Marua (<i>Eleusine coracana</i>)			
Sugarcane (<i>Saccharum officinarum</i>)			

3. 結果および考察

1) 世界の大陸別C₄栽培率

Table 3に1970-71年と1948-52年の大陸別のC₄栽培率を示した。両期間とも世界の作物栽培地のほぼ30%がC₄作物で占められており、残りの70%がC₃作物である。C₄作物のうち約50%がトウモロコシで、Millet and Sorghumが40数%、残りがサトウキビである。

C₄栽培率のもっとも高い大陸はアフリカとラテンアメリカで、ほぼ50%である。ついで、北アメリカとアジアで、

30%前後であり、C₄栽培率のもっとも低い大陸はヨーロッパとオセアニアで、10%前後である。

トウモロコシとMillet and SorghumとでC₄作物の90%以上を占めるが、この大陸別分布をみると、トウモロコシは北アメリカとラテンアメリカに多く、Millet and Sorghumはアジアとアフリカに多く、それぞれの原産地あるいはそれに隣接していると考えられる地域で多く栽培されている。

2) 世界の国別C₄栽培率

1970-71年の世界各国のC₄栽培率をFig. 1に示した。

Table 3. Distribution of C₃-crops and C₄-crops in the world.

Continent/Year		Maize	Millet and Sorghum	Sugar Cane	C ₄ Total	C ₃ Total	Total	C ₄ /Total (%)
		(1000 hectares)						
Europe*	1970-71	11799	149	6	11954	76661	88615	13.5
	1948-52	10379	143	5	10527	81725	92252	11.4
North America	1970-71	26366	6718	236	33320	69760	103080	32.3
	1948-52	29978	3087	169	33234	76584	109818	30.3
Lat. America	1970-71	26788	3807	4994	35589	33710	69299	51.4
	1948-52	14142	734	3460	18336	21155	39491	46.4
Asia*	1970-71	15869	40896	4307	61072	189089	250161	24.4
	1948-52	9080	35817	2400	47297	138728	186025	25.4
Africa	1970-71	16700	25580	601	42881	39265	82146	52.2
	1948-52	10040	20781	239	31060	28931	59991	51.8
Oceania	1970-71	96	582	324	1002	11555	12557	8.0
	1948-52	76	63	130	269	6261	6530	4.1
Total	1970-71	97618	77732	10468	185818	420040	605858	30.7
	1948-52	73695	60625	6403	140723	353384	494107	28.5

* Excluding U.S.S.R., China

C₄栽培率が50%以上の高い地域はエチオピア、スーダン、チャド、ニジェール、マリ、モーリタニアなどのサハラ砂漠以南の北部アフリカと、アンゴラ、ボツワナ、南ア共和国などの南部アフリカ、それにメキシコ、キューバなどのカリブ海沿岸の諸国である。これらの地域は、年平均気温が比較的高く、比較的乾燥した地域である。

一方、C₄栽培率が低く、C₃作物の多い地域は、ヨーロッパ、カナダ、ソ連などの冷涼な国々、アルジェリア、サウジアラビア、イランなどの非常に乾燥した国々、それに東南アジア、赤道アフリカなどの熱帯多雨地域の国々である。

Fig. 1. Map of distribution of C₄-crops (1970-71).

Fig.2は1948-52年の世界各国のC₄栽培率の分布を示したものである。20年後の1970-71年のFig.1と比較すると、全体的な分布状況には大きな変動が見られないが、こまかく見ると、変動した国がある。たとえば、アルゼンチンのC₄栽培率は1948-52年では24%であったが、1970-71年には54%となり、C₄作物の栽培面積が急激に増加しており、フィリピンでも30%から43%へと増加している。逆にエジプト、サウジアラビアなどでは、1948-52年のC₄栽培率に比して、1970-71年の

Fig. 2. Map of distribution of C₄-crops (1948-52).

値が小さくなっている。

つぎに、Table 4に1970-71年のC₄作物の栽培面積とC₄栽培率がそれぞれ大きい上位10カ国の値を示した。C₄作物の栽培面積が最大の国はインドで、次いでU.S.A.であり、上位10カ国は世界各地に分布し、耕地面積の大きい国が上位を占めている。一方、C₄栽培率はハイチが最も高く81.5%、次いでチャドであり、すべてラテンアメリカ・アフリカの諸国である。

C₃、C₄作物の栽培地における温度、雨量の状況を明らかにするために、栽培地を1948-52年のC₄栽培率が50%以上、20-50%、20%以下の3つの群にわけた。Fig.3、4および5は各群について各群に属する各国内の年総雨量と年平均気温を気候表⁴⁾を用いて、各国内の観測値をすべてプロットしたものである。なおこの図では面積の大きいソ連、カナダ、中国、U.S.A.、ブラジル、オーストラリアは気候環境が非常に多様で、各国内の気候データーに非常に大きな変異があり、不適当と思われるので除いた。

Fig.3、4および5から、世界各地の温度と雨量の関係をみれば、低温地帯(年平均気温が20℃以下の地域)では、年総雨量が1500 mm以上の多雨地域はほとんどな

Table 4. 10 leading countries in C₄-crop cultivated areas and percent of C₄-crop cultivated areas to total cultivated areas.

Country	Area(1000hectares)*	Country	Percent (%)
1. India	46497	1. Haiti	81.5
2. U.S.A.	32780	2. Chad	79.9
3. Brazil	11585	3. Zambia	79.7
4. Mexico	9130	4. Cuba	78.9
5. Nigeria	8503	5. Rhodesia	78.5
6. Argentina	6804	6. Guatemala	77.7
7. South africa	6683	7. Upper volta	77.4
8. Ethiopia	5328	8. Malawi	75.8
9. Romania	3178	9. Kenya	74.6
10. Indonesia	3134	10. Mali	73.3

* : Excluding U.S.S.R. and China

Fig. 3. Relation between temperature and precipitation in the countries over 50% in percent of C₄-crop cultivated areas to total cultivated areas.

Fig. 4. Relation between temperature and precipitation in the countries under 20% in percent of C₄-crop cultivated areas to total cultivated areas.

Fig. 5. Relation between temperature and precipitation in the countries from 20% to 50% in percent of C₄-crop cultivated areas to total cultivated areas.

いことがわかる。

Fig. 3によると、C₄栽培率が50%以上の諸国は、ほぼ年平均気温が17-18℃以上、年総雨量が0-1500mm位で、比較的高温な、乾燥した地域であることがわかる。なお、年総雨量が、0-200mm位の点はほとんどすべてサハラ砂漠中の地域のもので、作物栽培が行なわれていない地点の観測値と見なしてさしつかえないと思われる。

一方、Fig. 4から、C₄栽培率が20%以下の諸国は、50%以上の諸国とは逆に、年平均気温が、19-20℃以下の低温な地域、あるいは、年平均気温が19-20℃以上で、年総雨量が200mm以下の極乾燥地、および1500mm以上の多雨地である。

C₄栽培率が20-50%の諸国は(Fig. 5)、高温から低温、多雨から少雨まで、点がほぼまんべんなく分布しており、上記2群の中間型を示している。

3) インドの州別C₄栽培率

以上は、比較的広い地域を対象とした作物の分布状況であるが、両作物分布の大勢を知るにはいいとしても、細かな点については誤るおそれがある。そこで、比較的狭い地域での分布状況を調べることににより、さらに細かな点を知ろうと試みた。その地域としてインドを対象として検討した。インドはC₄作物の栽培面積が世界で最も大きく、C₄栽培率は30%余りで、世界の平均値にほぼ等しい。さらに、種々な気候型が存在し、比較的小地域でのC₄栽培率を調べるには好都合な国である。

Fig. 6. Map of distribution of C₄-crops (India, 1965-66).

Fig. 6に1964-65年のインドの州別C₄栽培率を示した。C₄栽培率の高い州はマイソール、ラジャスタンなどの比較的高温な、乾燥した諸州である。一方C₄栽培率が低く、C₃作物の多い州はアッサム、西ベンガルなどのベンガル湾の諸州と、ケララ、ゴヤのマラバル海岸の諸州である。また、マディヤプラデシ、アンドラプラデシなどの諸州は、C₄栽培率、気候ともに以上2群の中間を示している。この様に、比較的広い地域を対象とした世界で見られるC₃、C₄作物の分布と気候との関係が、比較的狭い地域を対象としたインドにおいても同様に認められる。

4) C₃作物の地域性

Table 5に、冷涼地、極乾燥地、高温多雨地で栽培されているC₃作物を示した。サウジアラビア、アルジェリアなどの極乾燥地と、カナダ、フランスなどの冷涼地では、C₃作物のほぼ80%が小麦、大麦である。一方、マレーシア、ザイル、アッサムなどの高温多雨地では、C₃作物の90%以上がイネ、キャッサバである。このように、冷涼地と極乾燥地で栽培されているC₃作物の種類と、高温多雨地域のものとはいちじるしく異なっている。

5) C₃、C₄作物の栽培地の気候

以上のことから、世界におけるC₃作物とC₄作物の現

在の栽培地と温度・雨量との関係をまとめれば、Fig. 7のようになる。すなわち、C₄作物は高温で比較的乾燥した地域に多く栽培されており、C₃作物は冷涼な地域、極乾燥地、それに高温多雨な地域に多く栽培され、気候的にかなり広範囲に分布し、C₃作物の種類も地域によって大きく異なる。なお、年総雨量200mm以下の極乾燥地にC₃作物が多く栽培されているが、本来、気候的には作物栽培が不可能な地域である。しかし、人為的に水を補給することにより作物栽培が行なわれている。そのため、

Fig. 7. Schema of climate (temperature and precipitation) in main cultivated area of C₃-crops and C₄-crops.

Table 5. Species of C₃-crops and their cultivated areas and the percent in cool regions, high dry regions and high precipitation regions with high temperature.

Country/Year (State)		Wheat	Barley 1000 hectares	Rice (%)	Cassava	C ₃ Total	C ₄ /Total %
Saudi Arabia	1970-71	100(65)	26(17)	1(1)	---	155(100)	29.8
	1948-52	36(50)	15(21)	2(3)	---	72(100)	36.2
Algeria	1970-71	2250(67)	880(26)	2(0)	---	3369(100)	0.2
	1948-52	1597(52)	1166(38)	---	---	3076(100)	0.5
Canada	1970-71	7781(44)	6154(36)	---	---	17724(100)	3.0
	1948-52	10507(56)	2845(15)	---	---	18848(100)	0.7
France	1970-71	3977(46)	2668(31)	21(0)	---	8701(100)	16.3
	1948-52	4264(42)	954(9)	15(0)	---	10087(100)	3.2
United Kingdom	1970-71	1096(25)	2296(52)	---	---	4431(100)	0.0
	1948-52	881(23)	818(21)	---	---	3880(100)	0.0
Malaysia	1970-71	---	---	695(93)	24(3)	746(100)	1.0
	1948-52	---	---	406(86)	21(4)	473(100)	0.8
Surinam	1970-71	---	---	36(95)	---	38(100)	7.3
	1948-52	---	---	18(95)	---	19(100)	5.0
Liberia	1970-71	---	---	190(75)	57(23)	252(100)	0.0
	1948-52	---	---	261(79)	55(17)	331(100)	8.3
Zaire	1970-71	3(0)	---	135(9)	800(56)	1434(100)	21.1
	1948-52	4(0)	---	151(12)	655(53)	1242(100)	25.7
Gabon	1970-71	---	---	---	62(94)	66(100)	2.9
	1948-52	---	---	1(6)	12(67)	18(100)	10.0
Assam	1965-66	5(0)	---	1940(89)	2(0)	2171(100)	2.5
	1952-53	2(0)	---	1712(91)	1(0)	1873(100)	2.2
Kerala	1965-66	---	---	802(68)	230(19)	1187(100)	1.3
	1952-53	---	---	815(72)	185(16)	1135(100)	1.3

極乾燥地の農耕民は、灌漑設備を作るだけの技術を保持しておらなければならない、灌漑設備を作り得る基盤をもった文化を保持しているということと、 C_3 作物の栽培とは密接に結びついているものと考えられる。

6) 今後の問題点

C_3 、 C_4 作物の現在の栽培地の分布とその気候環境(気温、降水量)を述べてきたが、使用した気候データはすべて年平均気温及び年総雨量であり、また作物栽培の行なわれていないような地域の観測値も入っているため、今後、資料の点でさらにくわしくしらべる必要があるものと思われる。

アラブなどの極乾燥地では天水だけでは作物栽培は不可能と考えられ、なんらかの形で水を補給しなければならない。また、1948-52年と1970-71年の分布図の比較で明らかなように、約20年間で栽培作物の種類が大きく変わる国がある。また、オーストラリアは、気候的には現在 C_4 作物を多く栽培している地域の気候と非常に良く類似している。しかし、オーストラリアには古来農耕文化を保持した民族はおらず、土着の農作物はなかったと考えて良い、ところが18-19世紀に移住してきたヨーロッパ人が、今まで彼らが食用としていた作物(麦類をはじめほとんどすべて C_3 作物)を導入し、そのためにオーストラリアでは C_3 作物の栽培面積が非常に大きいものと考えられる。この様に作物の分布には人為的要素が大きく関与するので、その分布と気候要因をにわかに結びつけるには困難な点もある。

以上のように、いくつかの問題点が存在するので、今後は気候要素の季節的変動、 C_3 、 C_4 作物の作付場所・期間、作物の特性などを考慮すると同時に、 C_3 、 C_4 作物の歴史的分布、伝播経路などをとおして、技術的、文化的側面からも明らかにしてゆきたい。

4. 摘 要

CO_2 固定系のちがいに、作物は C_3 作物と C_4 作物に分けられるが、両作物の世界における国別分布とインドにおける州別分布を調べ、気候資料と対応させて、次のような結果を得た。

1. 世界の作物栽培地(面積)の約70%に C_3 作物が、約30%に C_4 作物が栽培されている。大陸別にみると、ヨーロッパ、オセアニアでは C_3 作物、ラテンアメリカ、アフリカでは C_4 作物がそれぞれ多く栽培されている。

2. C_3 作物が多く栽培されている地域は、冷涼地(ヨーロッパ、カナダなど)、極乾燥地(アラブ諸国)、高温多雨地(東南アジア、赤道アフリカなど)に多い。冷涼地、極乾燥地では主として麦類が、高温多雨地ではイネ、キャッサバが多く栽培されている。

3. C_4 作物が多く栽培されている地域は、高温で比較的乾燥した諸国(カリブ海沿岸地、南部アフリカ、サハラ以南の北部アフリカ)に多い。

4. C_4 作物を50%以上作っている地域は、年平均気温が17-18℃以上で、年総雨量が200-1500mm程度の地域である。 C_3 作物を80%以上栽培している諸国は、年平均気温が19-20℃以下か、19-20℃以上で年総雨量が200mm以下か、1500mm以上の地域である。

5. インドでは、多雨地に C_3 作物が、乾燥地に C_4 作物が多く栽培されている。

6. 今後、 C_3 、 C_4 作物の栽培地の気候環境を明らかにするためには、作物の特性、歴史的分布などを明らかにする必要があると考えた。

終りに、本研究にあたって貴重な助言をたまわった、大阪府立大学西内光教授、矢吹万寿教授、金関四郎助教授、ならびに京都大学渡部忠世教授に深甚の謝意を表す。また資料の収集に際し、ご便宜をたまわった、アジア経済研究所萩原宜之部長、それに終始激励して下さった大阪府立大学古在豊樹助手に感謝の意を表す。

引 用 文 献

- 1) ベルクマン, O., ベリー, J., 1973: 効率の高い光合成. サイエンス (*Scientific American* 日本版) **3**, No.12, 96-107.
- 2) BLACK, C.C., 1971: Ecological implications of dividing plants into groups with distinct photosynthetic production capacities. *Advances in ecological research*, **7**, 87-114.
- 3) BLACK, C.C., CHEN, T.M. and BROWN, R.H., 1969: Biochemical basis for plant competition. *Weed Sci.* **17**, 338-344.
- 4) 外国気候表. 1967: 気象庁編. 日本気象協会
- 5) HATCH, M.D., SLACK, C.R. and JOHNSON, H.S., 1967: Further studies on a new pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation in sugar-cane and its occurrence in other plant species. *Biochem. J.* **102**, 417-422.
- 6) HESKETH, J.D. and MOSS, D.N., 1963: Variation in the response of photosynthesis to light. *Crop Sci.* **3**, 107-110.
- 7) Indian agricultural statistics. 1971.
- 8) MURATA, Y. and IYAMA, J., 1963: Studies on the photosynthesis of forage crops. II. Influence of air-temperature upon the photosynthesis of some forage and grain crops. *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.* **31**, 315-322.
- 9) MURATA, Y., IYAMA, J. and HONMA, T., 1965: Studies on the photosynthesis of forage crops. IV. Influence of air-temperature upon the photosynthesis and respiration of alfalfa and several southern type forage crops. *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.* **34**, 154-158.

- 10) Production Yearbook. 1971: FAO. 25.
- 11) 武田友四郎, 福山正隆, 1971: イネ科植物における光合成に関する研究・第1報イネ科植物の亜科レベルにおける光合成速度とその系統関係. 日作紀. 40, 12-19.
- 12) 吉岡邦二, 1973: 植物地理学. 共立出版.
- 13) ZELITCH, I., 1971: *Photosynthesis, photorespiration and plant productivity*. Academic press. New York and London.

Summary

Crops can be divided into C₃-crops and C₄-crops by the difference in the pathways of CO₂ fixation. We examined the distribution of C₃- and C₄-crops in the World and India. The results are as follows:

- 1) C₃-crops are cultivated in about 70% of cultivated area in the world and C₄-crops are about 30%. In Europe and Oceania, C₃-crops are mainly cultivated. In Latin America and Africa, C₄-crops are.
- 2) C₃-crops are mainly cultivated in cool regions (Europe, Canada, etc.), high dry regions with high temperature (Arab countries), and high precipitation regions with high temperature (South-east Asia, Equator Africa, etc.). Barley and wheat are mainly cultivated in cool regions, and high dry regions with high temperature. Rice and cassava are in high precipitation regions with high temperature.
- 3) C₄-crops are mainly cultivated in dry regions with high temperature (coastal countries of the Caribbean Sea, Southern Africa, and Northern Africa of south of the Sahara Desert).
- 4) The regions where C₄-crops are cultivated over 50% of cultivated area are 17–18 °C of mean annual air temperature with annual total precipitation from 200 to 1500mm. The regions where C₃-crops are cultivated over 80% of cultivated area are under 19–20 °C, over 19–20 °C with under 200mm, or over 19–20 °C with over 1500mm.
- 5) In India, C₃-crops are mainly cultivated in high precipitation regions. C₄-crops are in dry regions.
- 6) It is considered to be necessary to clarify the characters and the historical distribution of crops as well as the climate and environment of cultivated areas of C₃- and C₄-crops.