

## 農業と気候\*

内 嶋 善兵衛\*\*

## 1. はじめに

狩猟動物数の減少と増える人口圧の下に、人類が農耕を始めてから1万年とも2万年ともいわれている。この間、農業にたずさわる人々の最大の関心事は、いかに多くの食糧を安定的に生産するかであったし、今後もこれに変化はないものと思われる。このような努力によって、突棒や原始的な作物種およびささやかな筋力に頼る原始農耕から、近代的多収品種群や効果的農薬・肥料および機械力を駆使する現代農業へと進歩・発展してきた。現代農業の典型であるアメリカ農業は、1労働者で約50人を扶養できるまでになっている。

しかし、農業生産への気候・気象の影響は一向に克服されていない。それは1972, 1975, 1979, 1980年におけるソ連の凶作, 1980年に大熱波に襲われたアメリカ農業および昨年のわが国の冷害を見れば明らかである。これは主としてつぎのような原因にもとづいている:

- i: 主要食糧である穀類は広大な土地で栽培・生産され、それらの土地の気象環境を人為的に改変することは非常に困難である。
- ii: 作物は、つぎに説明するように、それぞれの成長・発育にとって適した環境域をもっており、この域から外れると成長と発育が阻害され、減収する。
- iii: 気象・気候条件は常に変動しており、作物生産の安定化に必要な精度で、それを予測・予報することは極めてむずかしい。

それゆえ、農業生産と気候との関係は、古今東西を問わず政事最大の重要事であった。それは新年における諸々の行事、星占い、呪詛などのなかに色濃く遺されて

いる。一方、21世紀への接近につれて、人口重圧はますます増大しており、自然資源の浪費と自然環境の破壊は拡大し、そして1950年代から1970年代初めまでの比較的安定した気候は終りを告げた。以上の条件は、生物としての人間の生存基盤である食糧生産が、かなり大きな危機に直面する可能性のあることを物語っているように思われる(約2,500万トンの穀類輸入下での水田減反は異例中の異例な出来事である)。

そのような危機をもたらす最も有力な原因としては、穀類生産地帯の気候の変動をあげなければならない。これは農業生産の立場から評価した気候の肥沃度—農業気候資源—の変動をひき起こし、農民の希望を打ち砕き、食糧の需給に大きな狂いをもたらす。そこで、ここでは、作物の気候に対する要求度、それを基にして評価された世界の農業気候資源の分布と変動、作物収量の変動と気候条件ならびに凶作時の気象特徴の説明を試みたいと思う。この小文が、気候変動は日常生活に極めて密着した重要な課題であるという理解を一般化するための一助ともなれば幸いである。

## 2. 作物の気候要求度

永い進化の歴史のなかで、厳しい自然環境の淘汰によって準備されてきた多様な植物群と人間との協力によって生み出されたのが、現在多くの家畜および40億を越す人類を支えている作物群である。現在、2,000~3,000種の作物が食用に供されているといわれるが、日常われわれが接するのは意外にすくなく、30種ほどである。これらの作物は世界中で、また特定の1地域で生み出されたのではなく、特徴的な環境条件をもつ地域で特異的に生み出されたといわれている(Shulgin, 1973)。最近の研究によると、第1表にみられるように、多くの作物の原

\* Agriculture and climate.

\*\* Zenbei Uchijima, 農業技術研究所気象科

第1表 作物起源の8大中心地 (Harlan, 1976; 田中, 1975)

No.	地 域	範 囲	作 物
I	中 国	中央・西部の山岳地と周辺低地	ダイズ, アズキ, ソバ, ハクサイなど
II	イ ン ド	アッサムとビルマを含む, 北西インド 一帯を除く	イネ, ナス, キュウリ, ゴマ, サトイ モ
II-a	インド-マレー	マレー半島, インドネシア, フィリッ ピン	バナナ, サトウキビ, ココヤシ, パン ノキ
III	中央アジア	北西インド, アフガニスタン, タドジ クスタン, ウズベクスタン	ソラマメ, タマネギ, ダイコン, ホウ レンソウ
IV	近 東	小アジア, トランスコーカサス, イラ ン	パンコムギ, マカロニコムギ, オオム ギ, エンバク
V	地 中 海 域		エンドウ, ヒヨコマメ, キャベツ, サ トウダイコン
VI	アビシニア	エリトリア高原を含む	モロコシ, オクラ, コーヒー, テフ
VII	南部メキシコ・ 中米	西インド諸島を含む	トウモロコシ, インゲン, カンショ, 日本カボチャ
VIII	南 米	ペルー, エクアドル, ボリビア	パレイショ, ワタ, タバコ, トマト, ラッカセイ
VII-a	チ リ ー	チロエ島	イチゴ
VII-b		ブラジル, パラグアイ	パイナップル

産地はほぼ8つに分けることができる。

人間の育種努力および栽培努力などによって、各作物の栽培可能地は次第に拡大しているが、極めて遅々である。それは、植物がその生まれ育ってきた原産地の気候条件（気温、降水、日長などの絶対値と季節変化）を最大限に利用するように、自らの形態および生理機能を適応発展させ、かたくなに守っているためである。それゆえ、作物栽培を安定的に発展させるには、つぎのようなことが大切である：

- i : 作物の気候要求度の定量的評価,
- ii : 各地域の農業気候資源の評価,
- iii : 上記を考えての気候要求度と農業気候資源とのマッチングの高い農業様式の確立.

これらのことは、農業が各地域の風土条件に適応する形で発展する必要性のあることを物語っている。これは、近代農業においても避けて通ることのできない法則といえよう。

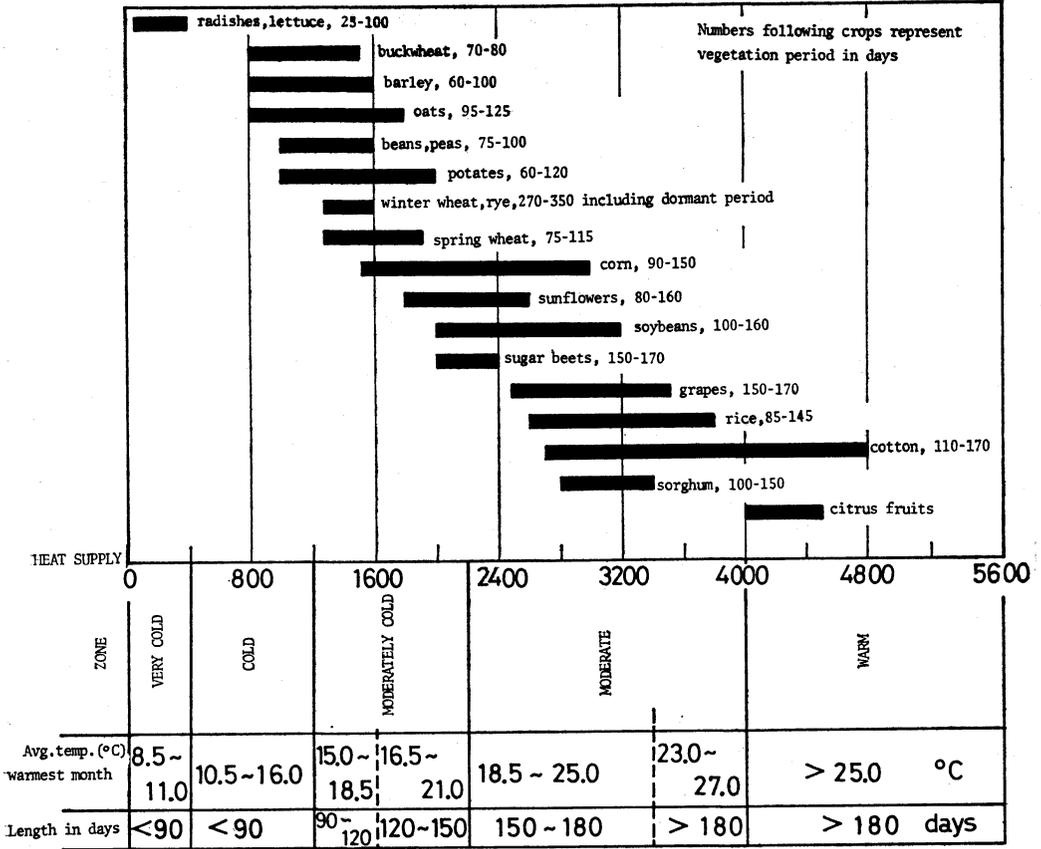
### 2.1. 作物の温度要求度

作物は芽生えから成熟にいたるまで、土壌中に根を張り、空気中に葉を展開して、生命活動の維持に必要なエネルギー（太陽光）と物質（二酸化炭素、水、無機塩類など）を周辺環境との間で活発に交換している。これらの交換に接地気層内の乱流状態が影響しているのはいうまでもないが、それ以上に作物側の吸・湧源の強度すなわち生理的な活動度が大きな役割を果たしている。これ

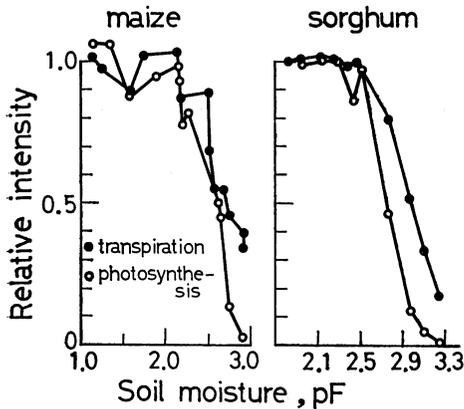
は光合成や蒸散活動が葉の気孔を通して営まれ、気孔の開閉および細胞内での生理活動が温度に著しく依存しているためである。

多くの作物によって温度要求度は大幅に違っているが、いまそれを発芽から成熟にいたる期間の有効積算気温（ $\Sigma T_{10}$ 、これは日平均気温  $10^{\circ}\text{C}$  以上の日の平均気温の積算値）で表わすと、第1図のようになる。図にみられるように、 $\Sigma T_{10} \leq 800^{\circ}\text{C}$  日の寒冷地帯では、カブ・レタスという葉菜がわずかに栽培できるだけで、これもビニール・トンネル栽培などの保護が必要である。若干温度資源が増して  $800 \leq \Sigma T_{10} \leq 1600^{\circ}\text{C}$  日になると、ソバやムギ類が出現し、穀類の栽培が可能となるが、早生や耐寒性の強い種類に限られている。  $1600 \leq \Sigma T_{10} \leq 2400^{\circ}\text{C}$  日の域では、主要穀類である春コムギ・トウモロコシ・パレイショ・ダイズなどが栽培されるようになり、世界の主要な畑作地帯はほぼこの地理帯にある。  $\Sigma T_{10} \geq 2400^{\circ}\text{C}$  日の中温帯になるとダイズ（中・晩生）・イネという比較的高温を好む作物が栽培できる。さらに温度資源が増すと、更に高温を好むワタ・ソルゴー・カンキツ類が広く栽培できるようになり、またイネなどの二期作が可能となってくる（ $\Sigma T_{10} \geq 5000^{\circ}\text{C}$  日の地帯）。  $6000^{\circ}\text{C}$  日以上になると、多くの亜熱帯・熱帯作物が栽培できる。

第1図および上の説明からわかるように、各作物は温度資源への要求度によって厳寒帯から温暖、亜熱帯、熱



第1図 主な作物の温度要求度 (USDA, 1975).

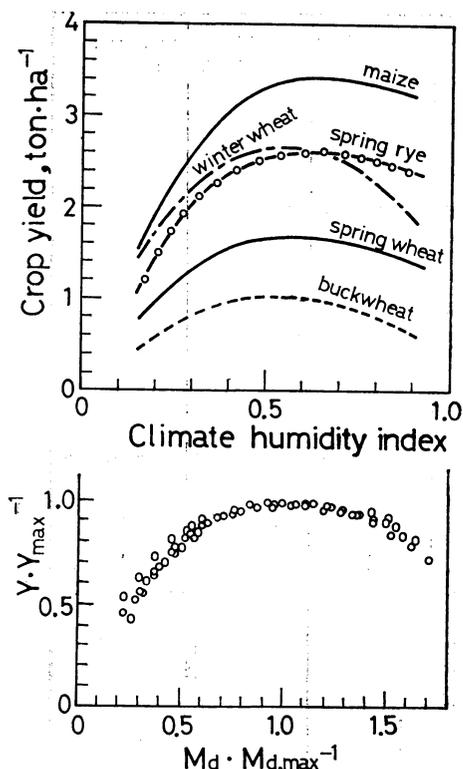


第2図 作物の光合成・蒸散強度と土壌水分(鴨田・伴・志村, 1974). pFは土壌水分の化学ポテンシャルの絶対値の対数で、土壌粒子への水分子の吸着度を表わす。

帯という緯度帯にそれぞれ適応・栽培されている。これは上に説明した気候条件と作物の気候要求度のマッチングのためであり、いわゆる適地適作という古くから長い経験のなかで確立された受身の環境制御技術である。ビニールハウスやガラス温室という能動的環境制御技術は広大な穀類生産地には適用できないので、適地適作は今後も大きな役割を果たすものと思われる。

2.2. 作物の水分要求度

作物がその生理機能を十分に維持するには、エネルギーと物質の交換がスムーズに行われる必要がある。この過程の進行は気孔の開き方で大きく変化する。土壌中に水分が十分にあって、根系を通して水がよく吸収されている条件下では、気孔は開き二酸化炭素および水蒸気はよく交換され、光合成と蒸散は活発になされ、作物はよく生育し高い収量を与える。一方、水分が不足すると、気孔は閉じてガス交換強度は低下し、光合成と蒸散活動は急減する。この模様の一例が第2図に示されている。



第3図 上：作物収量と気候乾湿度 (Shashko, 1958).  
下：無次元作物収量と無次元気候乾湿度 (内嶋, 1976).

図にみられるように、ある水分域までは相対光合成・蒸散強度はほぼ1.0であるが、pF 2.0 (トウモロコシ), 2.5 (ソルガム) 以上の水分域ではほぼ直線的に減少している。このような傾向は多くの研究者によって報告されており (Closs, 1958; Budagovsky 1964; Budyko, 1956 など), Budyko (1956) はこれをつぎのように近似している。

$$\left. \begin{aligned} E_T &= E_{T, \max} \\ P_N &= P_{N, \max} \end{aligned} \right\} W \geq W_c \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} E_T &= E_{T, \max}(W/W_c) \\ P_N &= P_{N, \max}(W/W_c) \end{aligned} \right\} W \leq W_c \quad (2)$$

ここで  $E_T$ ,  $P_N$  は作物の蒸散強度と純光合成強度,  $E_{T, \max}$  と  $P_{N, \max}$  は根圏内 (一般に 0.5~1.0 m の深さ) の土壌水分が十分な場合の蒸散強度と純光合成強度,  $W$  は根圏内の有効水分量 (一般に水柱 mm で示す),  $W_c$  は蒸散・光合成の減少の始まる臨界水分量.  $W_c$  については一般に  $W_c = 0.6W_f$  とされているが ( $W_f$

は圃場容水量, 十分な降雨の24時間後に耕地土壌に含まれている水分量を示す), これは蒸散能 (したがって純放射量) によってつぎのように変化することが報告 (Nerpin et al., 1967) されている。

$$W_c = 0.57 + 0.33E_0 \quad (3)$$

ここで  $E_0$  は蒸散能 ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) である。

この結果から, 作物の生理活動を活発に維持して収量を高く維持するには, 根圏内の土壌水分をすくなくとも, つぎの範囲に維持することが必要である。

$$W \geq 0.6W_f$$

一方,  $W = W_f$  なる条件が長期間維持されると, 根圏内の土壌空気組成が悪化し ( $\text{CO}_2$  濃度上昇,  $\text{O}_2$  濃度低下), 根の生理機能が低下してくる。それゆえ, 作物の収量形成には好適な土壌水分域が存在する。多くの並行観測 (気象条件と作況との) の資料が Shashko (1958) によって発表されている。それが第3図に示されている。

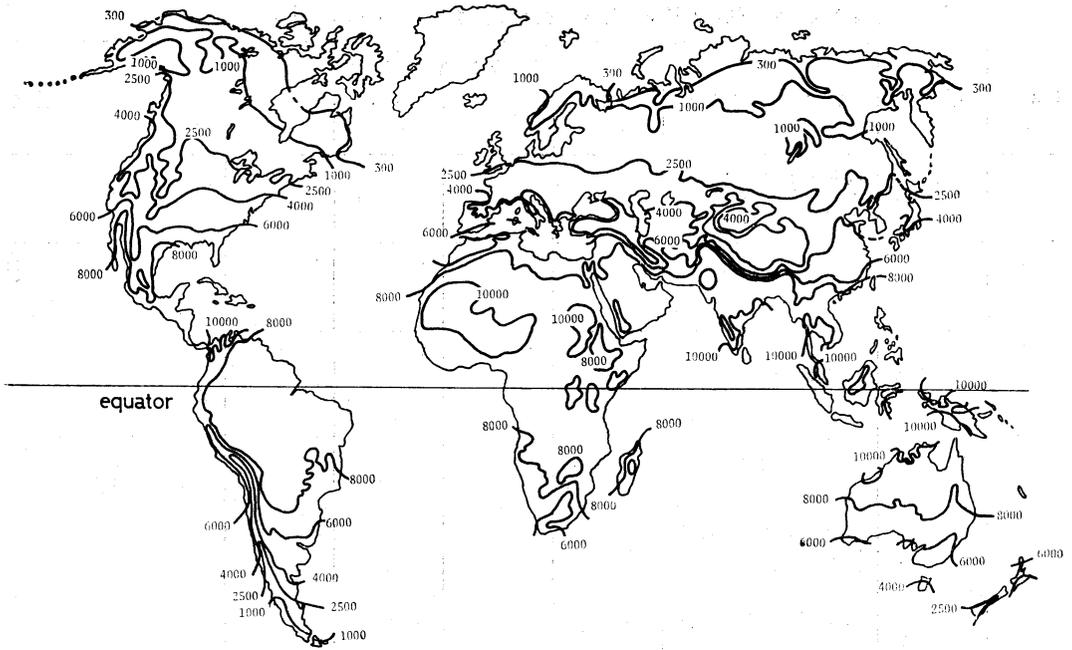
気候乾湿度 ( $Md = \frac{\sum Y}{\sum d}$ ,  $r$  と  $d$  は日降水量と日平均飽差 mm) の中間域で, 収量は最大になり, その両側特に乾燥域で収量は急減する。図下には, 無次元気候乾湿度 ( $Md' = Md \cdot Md_{\max}^{-1}$ ,  $Md_{\max}$  は  $Y = Y_{\max}$  の時の気候乾湿度) と無次元収量 ( $Y' = Y \cdot Y_{\max}^{-1}$ ) との関係が示されている。作物種の違いにもかかわらず, ほぼ一本の曲線上に分布し, それは次式で近似できた。

$$Y' = 0.19 + 1.57Md' - 0.74Md'^2 \quad (4)$$

ここで  $Md_{\max}$  は冬コムギ 0.52, キビ 0.55, 春コムギ 0.57, オオムギ 0.60, 冬ライムギ 0.62, トウモロコシ 0.65, エンバク 0.67 となった。第3図および (4) 式は畑作物の水分に対する反応が非常に類似していることを物語っている。第3図の結果にはほぼ近い関係が, 4~8月降水量とトウモロコシ収量 (ケニア, Glover, 1957) および出穂開花期の土壌水分量とコムギ収量 (カナダ, Mack, 1977) でも得られている。

### 3. 農業気候資源の分布と作物生産

作物は温度資源と水分資源が, 生育期間の進みに応じて, うまく結合しながら満足される時, よく成育し高い収量を与える。それゆえ, 古くから農業地帯は温度資源と水分資源の組合せと季節変化が作物の生育に適した地域に展開されてきた。では, 作物生産にとっての気候資源の豊かさは, この地球上にどのように分布し, それを実際に利用する作物生産はどう分布しているのだろうか



第4図 有効積算気温の地理的分布 (Golts'berg, 1972).

か。

### 3.1. 温度資源の分布

植物生産または作物生産の要求する気候資源には種々あるが、最も大切なのは上に説明した温度資源と水分資源である。温度資源を表わすのに多くの農業気候指標が提示されている。その若干を示すとつぎの通りである。

有効積算気温	$\Sigma T_{10}$	°C 日
生育積算温度	$\Sigma(T - T_b)$	°C 日
温量指数	$\Sigma(T - 5)$	°C 月

ここで  $\Sigma T_{10}$  は日平均気温  $10^\circ\text{C}$  以上の期間について、生育積算気温は  $T \geq T_b$  なる期間について、温量指数は  $T \geq 5$  なる月について積算する。なお、 $T_b$  は生育ベース温度で、作物によってつぎのように変化する (Edey, 1977)。

レタス： $4.4^\circ\text{C}$ 、エンドウ： $5.5^\circ\text{C}$ 、アスパラガス： $5.5^\circ\text{C}$ 、トウモロコシ： $10^\circ\text{C}$ 、カボチャ： $13^\circ\text{C}$ 、トマト： $13^\circ\text{C}$ 。

これら3量の間には比例関係があるので、各々換算することが出来る。

いま、Golts'berg (1972) によって編集された世界農業気候図から  $\Sigma T_{10}$  の分布図を引用すると、第4図のようになる。図上の実線は  $\Sigma T_{10}$  の等値線を示す。早生で

耐寒性の強いオオムギの栽培北限に当る  $1000^\circ\text{C}$  日は、大陸西岸での北緯  $65^\circ$  から東海岸の  $50 \sim 55^\circ$  にかけて分布している。イネ栽培の北限に相当する  $2500^\circ\text{C}$  日線は大陸西岸および内部では  $50^\circ\text{N}$  附近にあるが、東岸では  $42 \sim 43^\circ\text{N}$  まで低下している。温暖地帯を示す  $4000^\circ\text{C}$  日線は、山岳地帯を除いて、北緯  $35 \sim 40^\circ$  の間を走っている。亜熱帯の北限にほぼ対応する  $6000^\circ\text{C}$  日の等値線は北緯  $25 \sim 30^\circ$  の間にある。これより赤道に接近するに伴って、 $\Sigma T_{10}$  は増加し、最大値は約  $10,000^\circ\text{C}$  日になることが知られている。高さ  $300\text{m}$  以下の観測所（北半球）の資料から、 $\Sigma T_{10}$  と緯度  $\varphi$  との間に次式がえられている (内嶋, 1976, 1978)。

$$\Sigma T_{10} = 10663 + 41.1\varphi - 9.0\varphi^2 + 0.096\varphi^3 \quad (5)$$

一方、南半球では、大陸の占有面積が狭いために、緯度の増加に伴う  $\Sigma T_{10}$  の減少はかなり緩やかである。例えば、南緯  $30^\circ$  でも  $5,000 \sim 6,000^\circ\text{C}$  日の値がみられる。

第4図の結果からみると、山岳・高原地帯を除いて、北緯  $55^\circ$  から南の全ての陸地は、温度資源的に十分作物栽培の可能なことがわかる。しかし、実際の農業生産地帯をみると、後で説明するように、そんなには広大でない。豊富にある温度資源の活用を妨げているのは、つぎに説明する水分資源の不足である。

第2表 気候乾湿度指標の比較と農業気候条件 (Shimitsina et al. 1973).

大分類	中分類	自然植生帯の特徴	湿潤条件の指標				農業と気候の特徴
			$\frac{\Sigma r''}{\Sigma E_0}$	$\frac{\Sigma E_0}{\Sigma r''}$	$\frac{\Sigma r''}{\Sigma d''}$	$HTC_{6-8}$	
多 湿	過 湿	灰色ボドゾール及びボドゾール土壌帯に卓越するタイガー	>1.33	<0.75	>0.60	>1.6	降雨は蒸発 (ポテンシャル) より多い。
	多 湿	ボドゾール土壌帯上のタイガーと広葉樹林	1.33 ~ 1.00	0.75 ~ 1.00	0.60 ~ 0.45	1.6 ~ 1.3	水分不足による減収は起こりうるが、著しい減収は稀れである。降雨<蒸発能
水 分 不 足	やや水分不	森林草原帯	1.00 ~ 0.77	1.00 ~ 1.28	0.45 ~ 0.35	1.3 ~ 1.0	収量は湿潤条件に応じて大きく変動する。蒸発能>降雨
	水分不足	一般的チェルノーゼム上の草原帯	0.77 ~ 0.55	1.28 ~ 1.80	0.35 ~ 0.25	1.0 ~ 0.7	
	かなり不	南チェルノーゼム及び暗栗色土上の草原帯	0.55 ~ 0.33	1.80 ~ 3.00	0.25 ~ 0.15	0.7 ~ 0.4	
乾 燥	乾 燥	明栗色土上の半砂漠帯	0.33 ~ 0.22	3.00 ~ 4.5	0.15 ~ 0.10	<0.4	蒸発能>降雨
	著しく不	褐色土の砂漠	<0.22	>4.5	<0.10		灌漑地のみで農業は可能

3.2. 水分資源の分布

すでに説明したように、作物の生育および収量は根圏内の土壌水分量に密接に関係している。そして、ある気候条件下で高い収量を得るには、耕地からの蒸発散が蒸発散能に近い強度でなされることが必要である。このような条件下での、耕地の水収支式は次式で表わされる。

$$W_2 - W_1 = \sum_{dt} r - \sum_{dt} E \quad (6)$$

ここで  $W_1$  と  $W_2$  は期間  $dt$  の最初と最後の土壌水分量 (mm),  $\Sigma r$  と  $\Sigma E$  はその間の降水量と蒸発散量の積算値 (mm). 上式から、つぎの2つの指標が導かれる。

$$\frac{\Sigma E}{\Sigma r} = 1 - \frac{W_2 - W_1}{\Sigma r} \quad (7)$$

$$\frac{\Sigma r}{\Sigma E} = 1 + \frac{W_2 - W_1}{\Sigma E} \quad (8)$$

(7) 式では  $\Sigma E/\Sigma r > 1.0$  で乾燥,  $\Sigma E/\Sigma r < 1.0$  で湿潤, (8) 式では  $\Sigma r/\Sigma E > 1.0$  で湿潤,  $\Sigma r/\Sigma E < 1.0$  で乾燥となり、両指標とも 1.0 では降水と蒸発とが平衡し、土壌水分は変化しないことになる。降水量の測定は

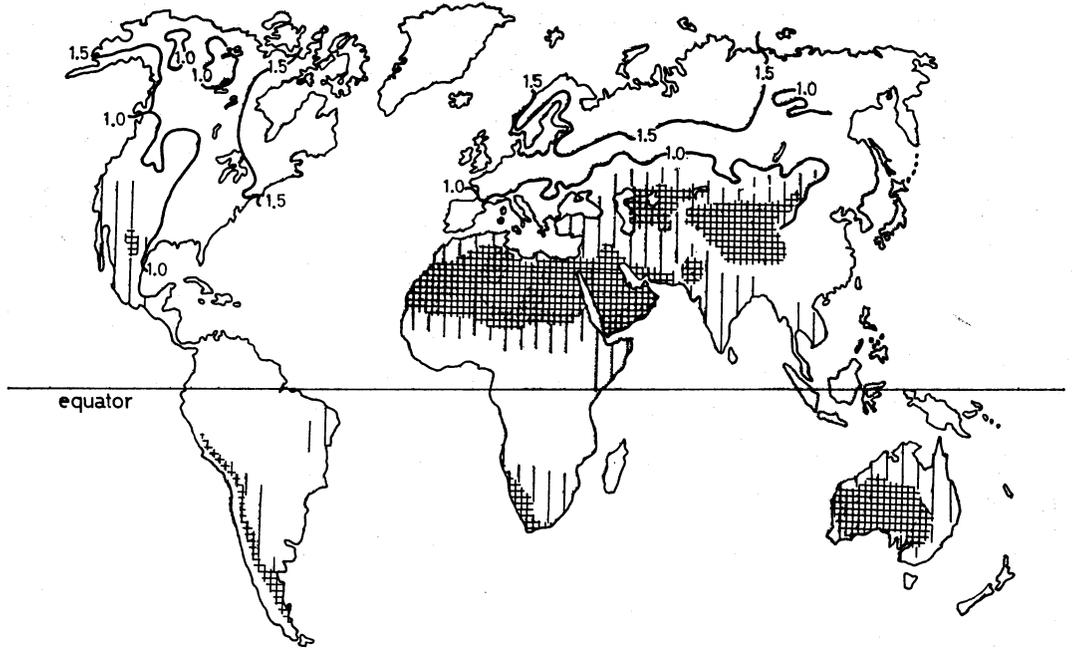
容易であるが、蒸発散能の決定はかなり困難である。そのため、これの代用として積算気温や積算飽差が広く用いられている (内嶋, 1962; 吉良, 1945).

農業気候の分野では、つぎの2指標がよく用いられている。

$$\left. \begin{aligned} HTC &= \Sigma r / 0.1 \Sigma T_{10} \\ Md &= \Sigma r / \Sigma d \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで  $HTC$  は水熱係数,  $Md$  は気候湿度度である。これらは (8) 式の系統の気候指標である。水分状態を示す多くの気候指標の間の関係および農業気候条件を表示すると第2表のようになる。

第5図に  $HTC$  および早魃発生頻度の分布が示されている。北半球上で、 $HTC > 1.5$  の多湿域は主に高緯度帯に分布しており、 $HTC \approx 1.0$  の線はユーラシア大陸では緯度に平行に、北米大陸では経度に沿って走っている。特徴的なことは、早魃頻度 100% の農業不適地が亜熱帯高気圧帯に沿って地球を一巡していることである。また、ユーラシア大陸の内部には広大な早魃常襲地があり、地球上には広大な水分不足地帯が広がっている。



第5図 HTC および早蝻発生 (マス目区域は早蝻発生頻度 100%, 粗い縦線区域は同発生頻度50%を示す) (Gol'tsberg, 1972).

第3表 主要作物の年間生産量 (百万トン) と集中度 (Herlan, 1976より作表).

作物	生産量	比率(%)	作物	生産量	比率(%)	作物	生産量	比率(%)
コムギ	360	15.3	ソルゴー	50	2.1	リンゴ	20	0.8
コムメ*	320	13.6	サトウキビ	50	2.1	ヤムイモ**	20	0.8
トウモロコシ	300	12.7	キビ・アワ類	45	1.9	ピーナッツ	20	0.8
パレイシヨ	300	12.7	バナナ	35	1.5	スイカ	20	0.8
オオムギ	170	7.2	トマト	35	1.5	キャベツ	15	0.6
カンシヨ**	130	5.5	ビート	30	1.3	タマネギ	15	0.6
キャッサバ**	100	4.2	ライムギ	30	1.3	インゲン	10	0.4
ブドウ	60	2.5	ミカン	30	1.3	エンドウ	10	0.4
ダイズ	60	2.5	ココナッツ	30	1.3	ヒマワリ種実	10	0.4
エンバク	50	2.1	ワタ種実	25	1.1	マンゴー	10	0.4

\* コメは初重, \*\* イモ類は生重.

第4図と第5図とを重ねてみると、十分な温度資源と水分資源をもつ農業生産適地はつぎのようになる：

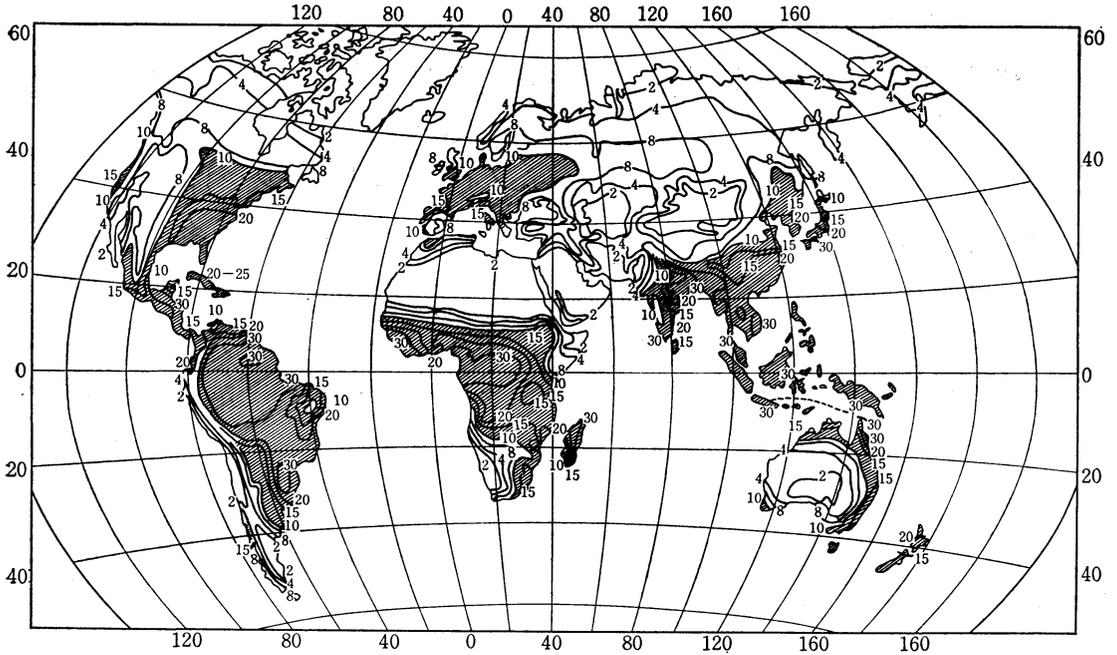
ヨーロッパ大陸、東南アジア・極東地域、北米大陸南半分、南米大陸、アフリカ大陸中央部。

これらの地域は、つぎに説明する植物生産力10トン以上の地帯と一致している。また、第7図の主要穀作物の栽培地帯とも一致している。このように、農業に利用で

きる土地は、気候資源の分布のために、地球上の極く一部に限られており、ここに人類と家畜の生命が委ねられている。

### 3.3. 作物生産の分布

現在、40億の人口とそれに匹敵する家畜類は、第3表に示されているような農業生産物にその生を委ねている。この農業生産物は、農業技術を用いて自然環境のも



第6図 自然植生の1次生産力(乾物トン・ha<sup>-1</sup>・yr<sup>-1</sup>)の地理的分布 (Efimova, 1977).

つ潜存生産力を具体化したものに他ならない。そこで、自然環境の潜存生産力の一指標である自然植生の純一次生産力の分布をまず説明しよう。純一次生産力の研究はIBP(国際生物学事業計画, 1964-1974)によって大幅に進展した。Leith(1978)は年間純一次生産力(NPP, 乾物 g·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>)と年平均気温  $T$  および年平均降水量  $r$  との間に次式を提出している。

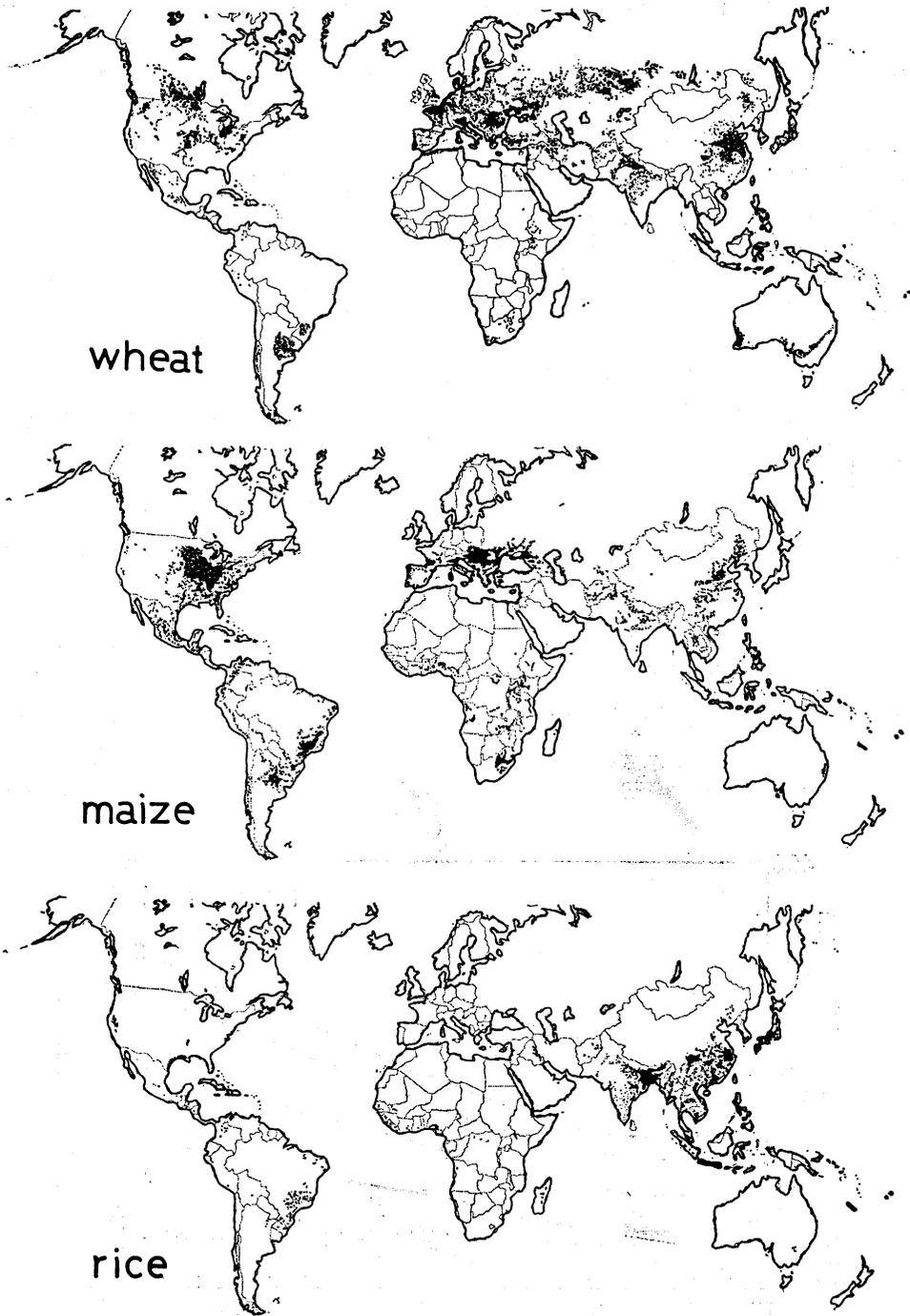
$$\left. \begin{aligned} NPP &= \frac{3000}{1 + \exp[1.315 - 0.119T]} \\ NPP &= 3000[1 - \exp(-0.000664r)] \end{aligned} \right\} (10)$$

また、Efimova(1977)は、(7)式の系統に属する放射乾燥度(=純放射/降水の蒸発に要する熱量)と純放射量とから、NPPを求める計算図を提出している。この計算図と放射乾燥度・純放射の分布図(Budyko, 1956, 1971)とから推定された一次生産力(乾物トン・ha<sup>-1</sup>・yr<sup>-1</sup>)の分布が第6図に示されている。

図上で斜線の施されている部分は10トン以上という高い生産力の地帯である。第4, 5図との比較からわかるように、この地帯は2,500°C日以上の温度資源と1.0以上の水熱係数をもつ地域に一致している。これらの地域のなかで中央アフリカ・アマゾン流域・東南アジア諸島の一部を除いて、すべてが古くから開発が進められ、

生産力の高い農業地帯であることは、この高い自然生産力が農業技術によって食糧に転化されてきたことを物語っている。一方、第6図は広大な地球上の陸地が自然環境の強い制約によって低い生産力を強いられていることを示している。すなわち、高緯度・山岳地帯はすくない温度資源によって、大陸内部および亜熱帯高気圧地域は低い水資源量によって制約されている。それゆえ、現在の耕地面積(約14億ha)を拡大することは大変むずかしいことといえよう。

上に説明した自然生産力を食糧に転化するには作物の栽培が不可欠であり、人類は数多くの作物を栽培している。作物の分布は、それらがもつ環境適応力と環境条件とのマッチングの程度によってほぼ定まり、冷涼で乾いた土地にはムギ類が、温暖で多湿な土地にはイネというように、農耕様式が分化している。これらの問題は農業地理学(例えば、Klages, 1951)において詳しく研究されているが、最近の資料を用いて作成された、三大作物(コムギ・トウモロコシ・イネ)の栽培分布を示すと第7図のようになる。図にみられるように、コムギは北緯60°附近から20°附近まで、南半球では南緯20°以南の地域に主として栽培されている。寒さの厳しい高緯度地帯には、春先きに播いて初夏に収穫する春コムギが主と



第7図 三大作物の栽培分布 (Loomis, 1976).

して栽培されており、冬の寒さの温和な低緯度地方には、秋に播いて初夏に収穫する秋（または冬）コムギが栽培されている。

新大陸起原のトウモロコシは世界中に広がり、いまや濃厚飼料作物として欠くことの出来ない重要な作物となっている。トウモロコシは、コムギよりかなり温度量の多い地帯に栽培されており（種実生産には、早生種で2,100、中生種で2,400、晩生種で2,900°C日の有効積算気温を必要とする）、コムギ栽培帯の南半分（北半球）および北側一帯（南半球）に分布している。青刈り用のトウモロコシは、北緯60°の近くまで栽培されている。

熱帯または亜熱帯の湿潤地発生と考えられるイネの栽培は、コムギやトウモロコシ栽培帯より温度資源の多い

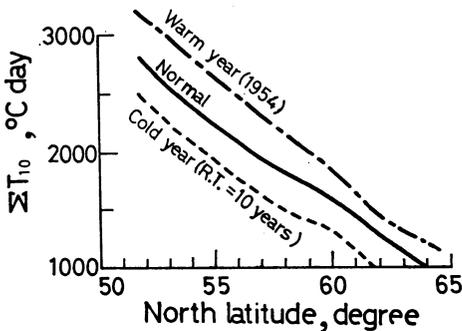
低緯度帯でなされており、コムギとトウモロコシの間のような栽培帯の重なりは余り見られない。大陸性気候の発達する大陸内部では北緯50°附近まで進出しているが、主な栽培地は北緯45°以南に限られている。これはほぼ2,500°C日の有効積算気温の等値線と一致している。 $\Sigma T_{10}$ が5,000°C日以上の地帯では、温度的にはイネの二期作が可能である。

4. 農業気候資源の変動

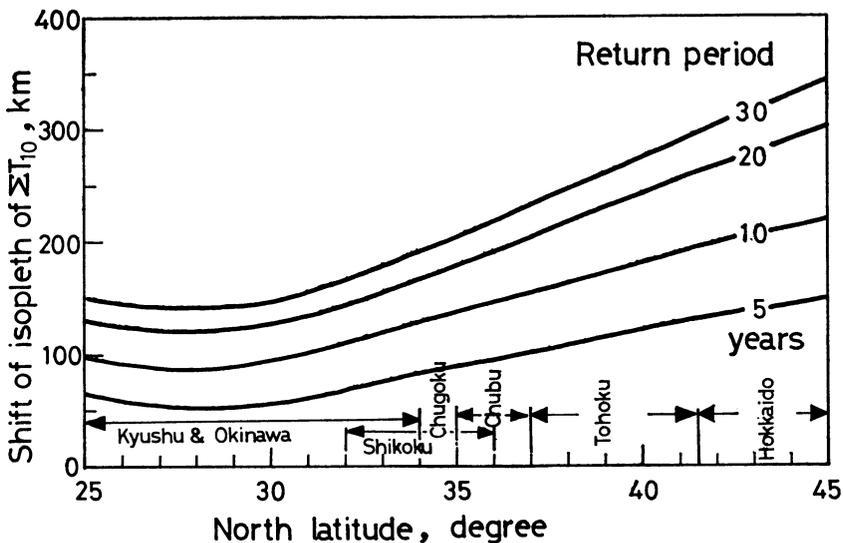
すでに多くの書物（例えば Lamb, 1966; 河村, 1980; 山本, 1979など）で指摘されているように、測器観測時代（約100年間）に入ってから明瞭な気候変動が生じている。そして、地球上のいたる所で展開されている人類の生産活動や生活に無視できない影響を与えてきた。このため、気候変動は純然たる科学的認識の対象から実際の工学的対象へと変化したといわれている（Budyko, 1974）。このように、一般気候の変化または変動については多くの関心が払われているが、農業気候資源の変動に関する研究は余り多くない。

4.1. 温度資源の変動

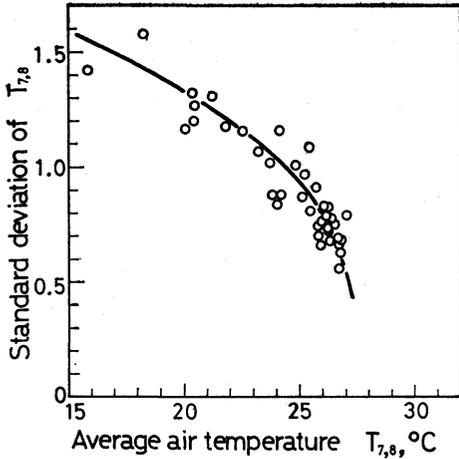
1920年代に始まった北半球の気候温暖化によって、シベリア地方でコムギ栽培北限がかなり北上した事実が広く知られている。また、1950年代に始まった寒冷化によって、イングランドでは作物栽培可能期間が約2週間短縮し、穀類生産に大きな被害を与えたといわれている。



第8図 ロシア平原における  $\Sigma T_{10}$  分布の年次変動 (Sapozhnikova et al., 1957).



第9図 わが国の緯度帯における  $\Sigma T_{10}$  等値線の南北移動 (内嶋, 1978).



第10図 7, 8月平均気温の累年平均値と系列標準偏差との関係(岩切, 1967のデータより再構成)。

このように一般気候の変化は農業気候資源の変動をもたらしている。Sapozhnikova *et al.* (1957) は、ヨーロッパ平原地帯における  $\Sigma T_{10}$  の分布を研究し、第8図のような結果を発表している。図中央の実線は累年平均値の緯度による変化を、上側の1点鎖線は今世紀で最暖年といわれる1954年における  $\Sigma T_{10}$  の分布を、下側の線は10年に1回程度の冷涼な年におけるそれを示している。最暖年と冷涼年の間では、 $\Sigma T_{10}$  等値線は緯度にして3~4度(距離で300~400 km)も南北移動している。

内嶋(1976, 1978)は北半球上の主な観測地点の累年気象データを解析して、 $\Sigma T_{10}$  の年次変動に伴う変化による等値線の南北移動、 $\Delta\varphi$  を評価するために次式をえている。

$$\Delta\varphi = A(1-Z) < \Sigma T_{10} > \quad (11)$$

ここで  $< \Sigma T_{10} >$  は  $\Sigma T_{10}$  の累年平均値(°C日)、 $A$  と  $Z$  は次式で与えられる経験関数である。

$$A = -1.96 \cdot 10^{-2} + 5.16 \cdot 10^{-6} < \Sigma T_{10} > - 3.96 \cdot 10^{-10} < \Sigma T_{10} >^2$$

$$Z = 1 \pm \frac{\tau_0}{390 + 39.5\tau_0} CV_{\Sigma T}$$

ここで  $\tau_0$  は再現期間(年)、 $CV_{\Sigma T}$  は  $\Sigma T_{10}$  時系列の変動係数で、次式で近似できる。

$$CV_{\Sigma T} = 0.0025 + 0.161\varphi - 0.004\varphi^2 + 0.00009\varphi^3 \quad (12)$$

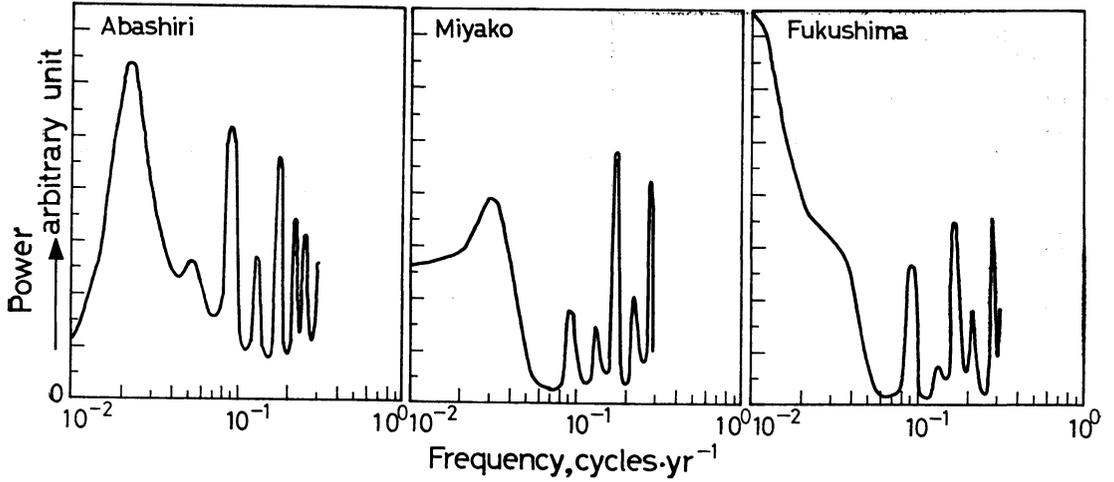
$A$  は  $\Sigma T_{10}$  が単位量変化した時の等値線の南北移動を示しており、北半球では高緯度で大、中緯度で最低、低

緯度で若干大きくなる。 $Z$  の土符号は、高温側の変動時に+、低温側の変動時に-の符号となる。

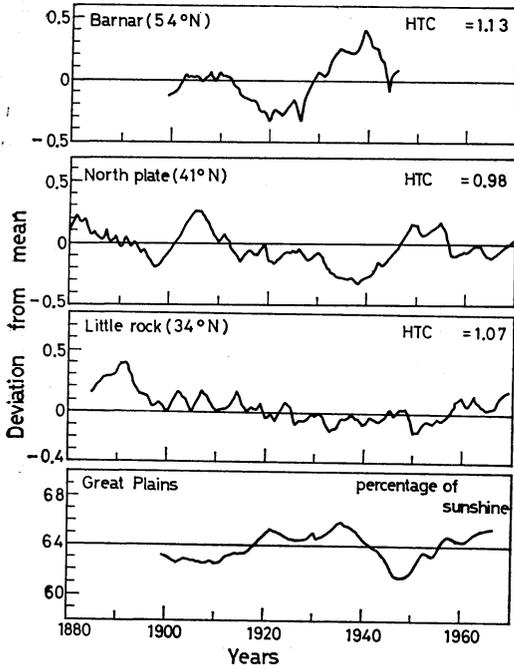
(11)式を用いて、わが国の緯度帯について評価した  $\Sigma T_{10}$  等値線の南北移動幅が第9図に示されている。図から明らかなように、東北・北海道と温度資源の豊かでない地方ほど、同一再現期間の気候変動でも  $\Sigma T_{10}$  の南北移動は大きい。例えば、異常気象と一般に定義されている  $\tau_0=30$ 年をとると、低温異常では北海道北端の気候が南端まで、東北地方では青森県の気候が宮城県付近まで南下してくることになる。これは温度資源の豊かでない地域ほど、気候変動の影響をより厳しく受けることを物語っている。

気温の低いほどその変動性の大きくなることは、かなり古くから認められていたが(長尾, 1951)、最近、イネの生育期間の積算気温についても見出されている(羽生・石黒, 1972)。イネ収量は開花・登熟期間に相当する7, 8月平均気温に密接に関係している。岩切(1967)は主要観測点の7, 8月平均気温時系列の解析から、北へ移動するに伴って標準偏差の大きくなることを見出している。岩切の報告から再構成した関係が第10図に示されている。図にみられるように、両者の間には明瞭な関係があり、平均温度の上昇につれて標準偏差は急減している。この結果は羽生・石黒(1972)が水稻安全栽培期間の積算気温で認めた関係と定性的によく一致している。

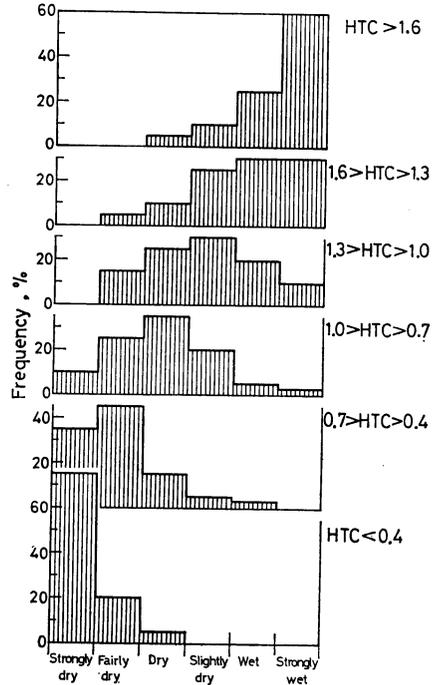
植物および農業生産に関係の深い温度資源の変動特性を明らかにするために、有効積算気温(内嶋, 1976)、7, 8月平均気温(岩切, 1967)および温量指数と寒さ指数(内嶋・堀部, 1977)のパワースペクトルが計算されている。統計期間が100年未満のため、普通の計算法では不十分であった。最近開発された最大エントロピー法(MEM)は、作物統計・気候統計のようにデータ数の短い標本でもかなり正確にパワースペクトルを計算できる。わが国の北部地域の代表地点の7, 8月平均気温の時系列のパワースペクトル(MEMによる)が第11図に示されている。0.05 cycles $\cdot$ yr $^{-1}$ 以下の低周波域の高いパワーはトレンドが除去されていないためと思われる。周期約11, 6, 3年の周波数の所に鋭いピークが3地点ともかなり明瞭にみられる。あとで説明するように(第20図)、北海道と青森でのイネ作柄指数のパワースペクトルでも、同一周期の所に鋭いピークがみられる。このピークの一致は7, 8月平均気温の稲作における重要性を物語っている。



第11図 7, 8月平均気温のパワースペクトル (内嶋原図).



第12図 水熱係数 ( $HTC_{6-8}$ ) と日照率の年次変動 (Sapozhnikova *et al.*, 1957; Berlyand, 1976 の報告より作図).



第13図 各気候帯下での土壌の乾・湿条件の出現頻度分布 (Shimitsin *et al.*, 1973より作図).

4.2. 水分資源の変動

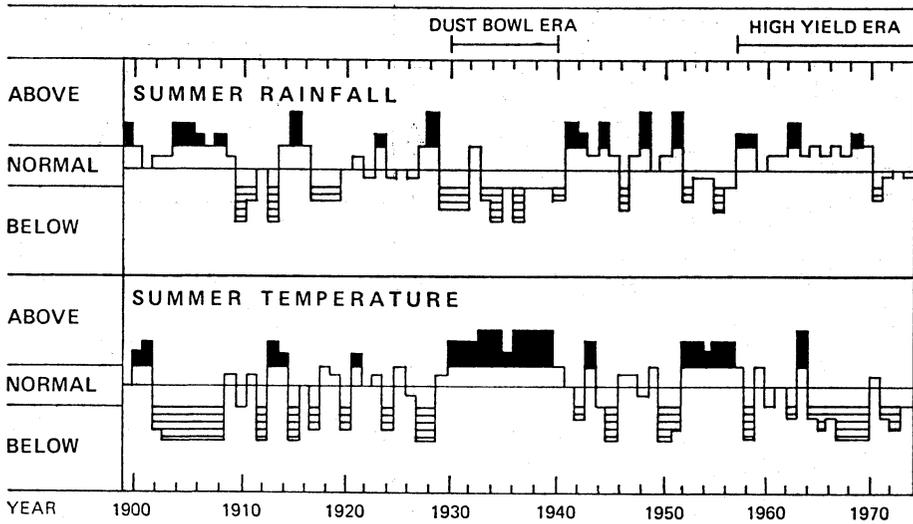
農業生産に関係の深い水分資源の変動に関する研究は降水量のそれに比較して非常にすくない。一般に、つぎのような関係があるので

多雨→日射減少・気温低下→蒸発能減少

少雨→日射増加・気温上昇→蒸発能増加

雨量と蒸発能との比として定義される気候の乾湿度(根圏水分量を定めている)の変動は大きく増幅される。

作物栽培に関係の深い6~8月の水熱係数,  $HTC_{6-8}$ ,



第14図 合衆国コムギ栽培帯における夏期気候条件の年次間変動 (NDU, 1978).

の年次変動(10年の移動平均)が、アメリカの大平原地帯における日照率の年次変動(Berlyand, 1976)と一緒に第12図に示されている。図にみられるように、 $HTC_{6-8}$ は大幅に脈動しており、乾燥期と湿潤期との間で0.6~0.8の係数値の変化がみられる。もう1つの重要なことは、北半球で顕著な気温上昇があり、中緯度畑作地帯で約10年間厳しい早魃に襲われた1930年代を中心として強い乾燥期間が卓越したことである。地表面に入射する太陽エネルギー量を左右している日照率も、ほぼ同じように脈動し、1930年代にはかなり晴天が続き、強い早魃条件が大平原地帯に生まれたことがわかる。

気候の乾湿条件は大幅に変動しており、その特徴はかなり気候帯で違っている。いま、第2表に示した $HTC_{6-8}$ 帯別の乾湿度の出現頻度曲線を示すと第13図のようになる。 $HTC > 1.6$ の多湿気候帯から $HTC < 0.4$ の乾燥気候帯へ移動するに伴って、出現頻度曲線は大幅に変化し、全く逆の分布型になる。中湿気候帯では正規分布に近い分布型となっている。多湿気候帯では、土壌水分が過剰で、農業生産の遂行には排水が不可欠となる。一方、乾燥気候下では土壌水分は極度に不足し、灌漑農業となるが、不十分な管理下では塩類集積によって耕地の破壊が進行する。

Mack (1977) はカナダ大平原地帯の気象データから、コムギ収量と相関の高い(-0.83)コムギ栽培期間の水分ストレス、 $\Delta E = \Sigma(E_0 - E_a)$ 、 $E_0$ と $E_a$ は蒸発散能と実際の蒸発散量)の年次変動をしらべ、水分ストレス

の大きい乾いた地域ほど標準偏差の大きくなることを見出している。この結果は第10図に示した温度資源量の変動特性とよく一致している。

以上のような2つの資源の変動の間にはかなり高い相関があり、作物の生産に好都合な組合せと悪い組合せとが時間の経過につれて次々と出現するのが現実である。世界の畑作物の出来・不出来に大きな影響を与える早魃の発生条件はつぎのように整理されている。

早魃の発生：夏期の平均気温が平年値より $2^{\circ}\text{C}$ 高い。

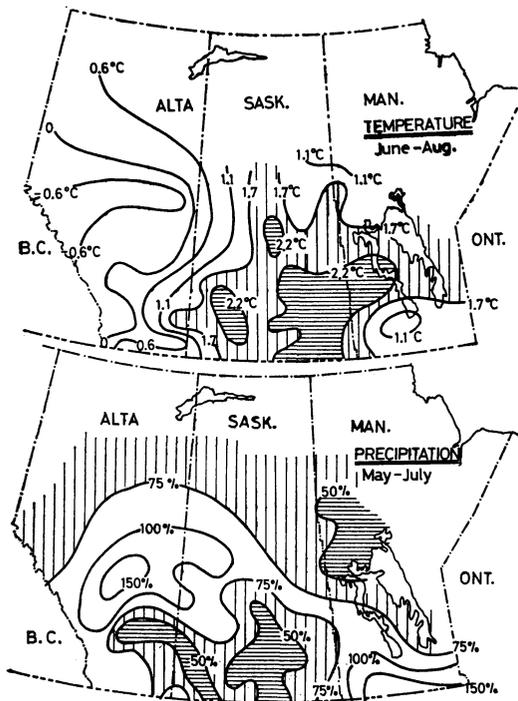
夏期雨量が平年値の60~70%へ減少、

大早魃発生：夏期平均気温が平年値より $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 高くなる、

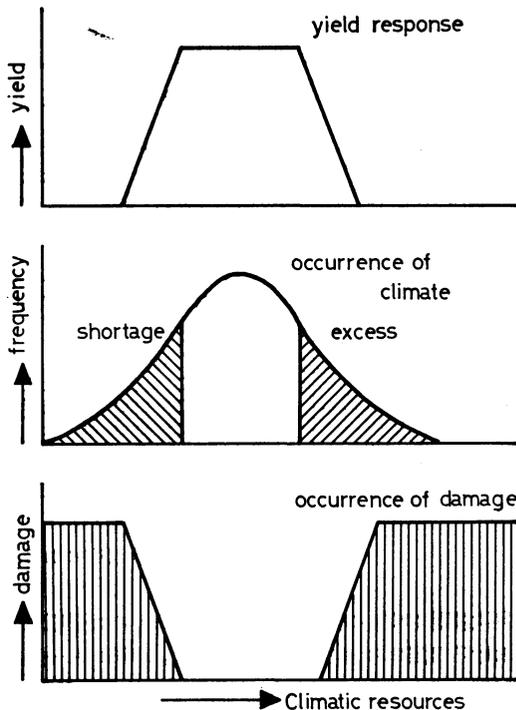
夏期雨量が平年値の50%以下になる。

これと逆の組合せの時には、コムギの収量がかかなりよくなることが知られている(Jakovlev, 1973)。

最近、Gilman (1978) は合衆国のコムギ栽培帯(オクラホマ、カンサス、ネブラスカ、南・北両ダコタ)の夏期気象条件をとりまとめ、好適気候期と不適気候期とが20~30年の周期で交代していることを明らかにしている。その結果が第14図に示されている。図にみられるように、1900年代、1940年代、1960年代以降はコムギ生産に好適な気候(多目の降水量とやや低温)が卓越し、1930年代と1950年代には不適気候(少雨と高温)が卓越している。このような気候組合せの脈動は、北米大陸上での降水量の長期変動と密接に関係している(Thomas, 1978)。1930年代にみられた降雨減少は極めて著しく、



第15図 1937年大旱魃時におけるカナダ太平洋地帯の異常気象 (Mckay and Allsopp, 1977).



第16図 農業気候資源量の変動と作物生産との関係のモデル化 (内嶋, 1979).

かつ汎地球的な特徴をそなえていた。このため、中緯度地帯の多くで旱魃が頻発し(10年間に7回)、合衆国もコムギ輸入国に転落したと記録されている(例えば、Morgan, 1979)。

### 4.3. 大旱魃時における気象要素の分布

すでに説明したように、1930年代は異常ともいえる時代で、中・高緯度畑作地帯が連続的に大旱魃に襲われた。カナダ、合衆国およびヨーロッパロシアは10年間7回も旱魃に襲われ、農民は耕地を棄てて都会へと逃げ出した。その悲惨な模様は、スタインベックの「怒りの葡萄」に示されている通りである。大旱魃発生条件は上に述べたが、実際の旱魃時の異常気象の実態について簡単に説明する。

1937年は北米大陸を極めて厳しい旱魃の襲った年であった。カナダ大平原のコムギ作は平年の20%へと激減した。この年の夏の異常気象の実態が第15図に示されている。コムギの主要産地であるアルバータ・サスカチワン・マニトバ州南部では、降水量は平年値の75%以下で、主要産地では50%以下となっている。一方、気温は多くの

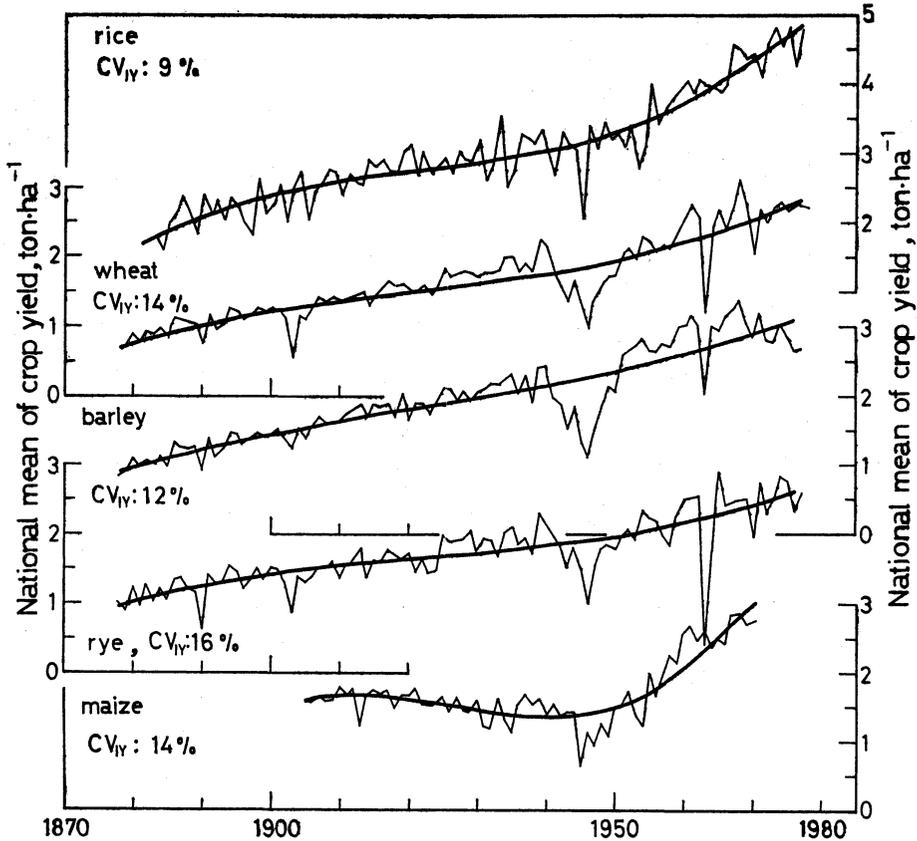
地域で1.7°C以上も高くなり、耕地は干き切り、作物はカラカラに枯れてしまったと伝えられている。

1975年にソビエトを襲った大旱魃は最近における最も被害の大きなもので、穀物生産は約1.5億トンに激減し、世界の食糧需給に大きな影響を与えた。この年の気候分析から、ヨーロッパロシアと西シベリアの全地域が2°C以上も平年値より高くなり、主要穀作地帯では3°C以上に、特に、ウクライナ、カザフ、ボルガ流域では4°C以上も高温になったことがわかった。降水量は80%以下で、栽培地帯では50%以下となり、ソビエト畑作地帯の大部分が大旱魃発生条件下におかれた。

このような大旱魃の時は熱乾風とよばれる現象が多く畑作地帯で発生する。これは短時間で作物を枯死させてしまう極めて危険な異常気象である。このような危険気象から作物を保護する方策はほとんどなく、作期移動などの回避策しかない。

### 5. 作物生産の変動

作物・植物の遺伝的能力と環境条件とのマッチングの



第17図 わが国の主な作物の収量変動 (内嶋, 1981).

程度は、農業気候資源の変動によって常にゆれ動いており、このために植物の純一次生産力および作物収量も変動をくりかえしている。この模様をモデル的に示すと第16図のようになる。気候資源は適域内の平均値 $m$ のまわりに変動しており、適域からの外れの程度(資源不足量、または資源過剰量)に応じて減収する。

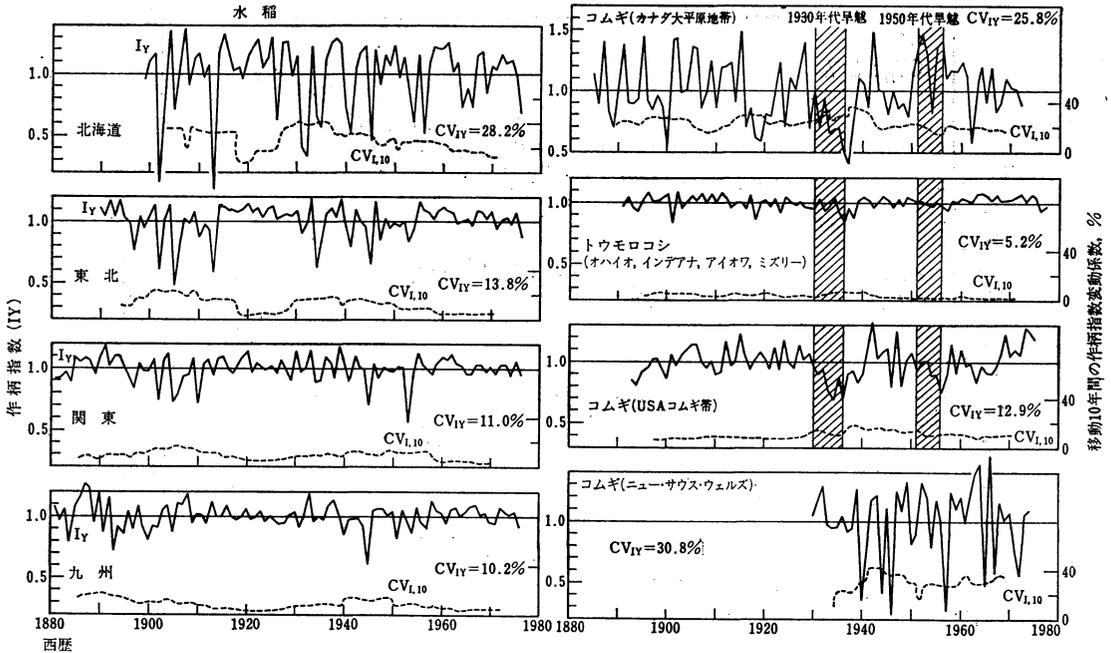
実際条件下での気候資源の過・不足は気象災害という形で作物生産の上に現われる。たとえば、温度資源の不足は冷夏、厳寒、凍霜害などを、過剰は早魃、熱波、暖冬などを引き起こして作物の生理活動の機能を混乱させ、減収を招く。また、水分資源の過剰は根圏層の過湿、水食、作物の倒伏、病害の発生を、その不足は早魃をひき起こす。このような気象災害は毎年のように何処かで発生しており、その規模が大で、強い時には大きな被害となり、国内だけでなく世界の食糧需給をも混乱させる。1972年のインドとソビエトの大早魃以来、作物生産の変動は次第に大きくなっていると心配されてい

る。

### 5.1. 作物収量の変動

作物収量は、多くの技術の開発・導入によって、定常的に上昇している。この上昇傾向線の上下に、実際の収量は変動しており、これは気候条件の変動にもとづくと考えられている。化石エネルギーを多量に投入・使用する近代農業では、収量水準の向上は著しく、多くの先進国で“農業の離陸”とよばれている。しかしながら、上下への収量変動は技術進歩にもかかわらず、ほとんど抑制されていない。逆に、気候変動の激化の伝えられる1970年代以降若干大きくなっているような傾向がうかがわれる。

いまわが国の主な作物の収量(国内平均)の年次変化を示すと、第17図のようになる。全ての作物において、収量は向上しており、特に1950年以降の急上昇が目につく。図上の太い実線は多項式で近似した傾向曲線 $Y_T(t)$ で、細い折線は毎年の収量、 $Y(t)$ である。この両者か



第18図  $IY(t)$  の作物と国による変化 (内嶋, 1980).

ら、つぎの関係をを用いて作柄指数系列,  $IY(t)$ , を求めた.

$$IY(t) = Y(t) / Y_T(t) \tag{13}$$

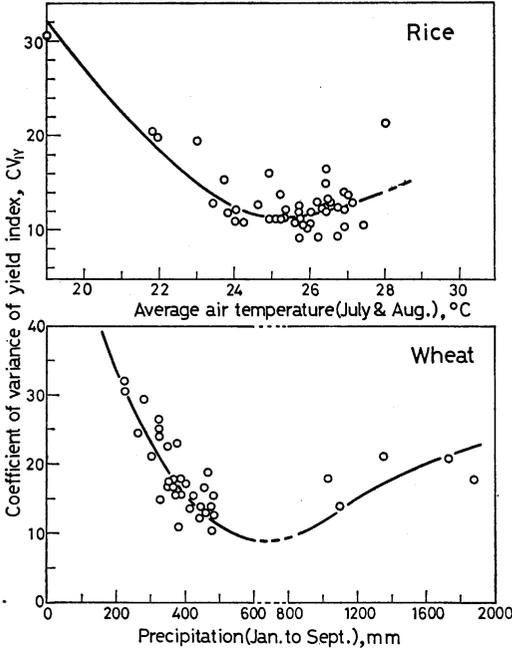
図の左側の  $CV_{IY}$  は,  $IY(t)$  の変動係数である. 畑作物の  $CV_{IY}$  に比較して, イネの  $CV_{IY}$  は9%とかなり低い. これは灌漑水によって保護されているためで, 同様な現象が世界中のイネ栽培において認められている.

第17図に示されているもう1つの重要な特徴は, 収量変動の著しい時代 (たとえば, イネでは1890~1910, 1935~1955) と比較的変動の弱い時代 (同様に, 1910~1935, 1960~1970) とが交互にみられるということである. 1962年におけるムギ類の  $Y(t)$  曲線の急な落込みは, 登熟期の異常多雨 (とくに西日本一帯での) による倒伏および穂発芽と病害の多発のためである.

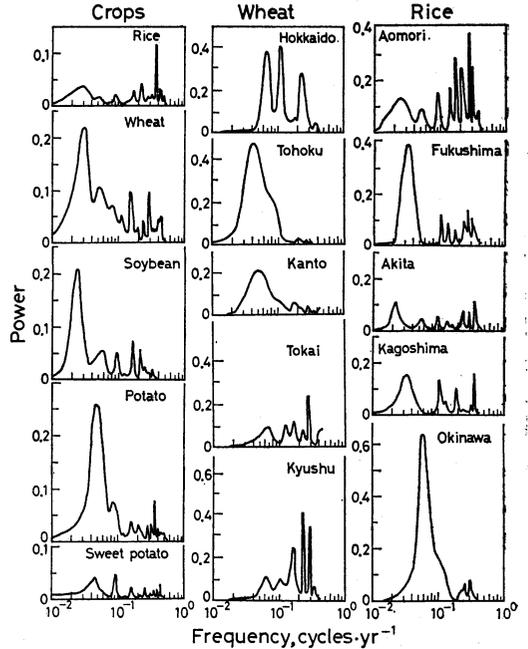
わが国の各地域における水稻の  $IY(t)$  および主要な畑作物のコムギとトウモロコシの  $IY(t)$  の変動が第18図に示されている. 図にみられるように, イネの  $CV_{IY}$  は北海道の28.2%から九州での10.2%へと約1/3に減少している. これはさきに説明したように, 温度資源量の豊かでない地方ほど資源量の変動が大きいことに主として原因している. 畑作物におけるコムギの  $CV_{IY}$  においても, アメリカ合衆国とオーストラリアでは約2.5倍の

開きがあり, オーストラリアおよびカナダのコムギ生産は合衆国に比較して, 非常に不安定である. これは主として水分資源の不足にもとづいている. 図上に示されている点線は, 移動10年間の作柄指数の変動係数,  $CV_{I,10}$ , を示している. かなり明瞭な脈動を見出すことができる. 世界の主要な畑作物であるソビエトにおける穀類生産も極めて不安定で, ヨーロッパロシアで約12%, シベリア地域で18%とかなり高い.

一般に, 国の食糧生産が10%上下すると, 大きな政治・経済的な問題になるといわれているが, ほとんどの国で  $CV_{IY}$  は10%以上になる. しかし, 作柄の変動をもたらす異常気象が広い範囲に同時的に発生する確率は低く, 多くの場合, 好適天候域と不良天候域とは, それらの影響を相殺するように発現する傾向がある. このために, 世界全体の穀類生産の変動係数は非常に低い (約2~3%). それぞれの地域や国ごとにみると,  $CV_{IY}$  はかなり大きくなるが, その大きさは気候資源量に密接に関係している. イネとコムギの  $CV_{IY}$  が気候資源量の関数として第19図に示されている. 上のイネの  $CV_{IY}$  は各都道府県の平均収量時系列を用いて計算した. 図にみられるように, 7, 8月平均気温の上昇につれて30%から約10%レベルへと急減するが,  $\langle T \rangle_{7,8} \approx 25^\circ\text{C}$  で最



第19図  $CV_{IY}$  と気候資源量との関係。  
 上：イネ（内嶋，1981）  
 下：コムギ（内嶋，1980）



第20図 わが国における種々な作物の作柄指数のパワースペクトルの比較（内嶋，1981）。

低となり、そのあと若干増加する傾向にある。 $\langle T \rangle_{7,8} = 28^\circ\text{C}$  での  $CV_{IY} = 20\%$  は沖縄県の値である。温度資源が過度に豊かになってくると、温度の制約はなくなるが、他の要素の制約が作用するようになり、 $CV_{IY}$  が再び増大してくるものと思われる。気候条件の比較的安定していた1950年代後半から1970年代初めにかけての水稻データを用いて、日本および東南アジア諸国の作柄指数の標準偏差を計算した。その結果、この値は日本の約0.05から東南アジア諸国の0.15へと増加することがわかった。これは、温度量の十分な東南アジアでは他の資源量の制約—水分資源の制約によってイネ栽培が不安定になっていることを示している。

コムギ作柄指数の  $CV_{IY}$  と1～9月間の降水量との関係は、最初急減して10%台になり、その後再び20%台に増加してくる。第19図に示した  $CV_{IY}$  と資源量との関係は、第16図にモデル的に説明した環境への作物収量の反応曲線と定性的によく一致している。

このことは、人口重圧による耕地の外延的（気候資源的な辺地への）拡張が農業生産の不安定性を増加させることを意味している。フルンチョフによる西シベリア処女地の開拓推進は穀類生産を大幅に上げたが、変動を

著しくした。気候的辺地ほど気候変動の激しいことを考えると当然なことである。

5.2. 作柄指数変動のパワースペクトル

第17, 18図で説明したように、作柄の変動には若干の周期性がうかがわれる。このような周期性を検証するために、Rauner と Lozovskaya (1978) はアメリカ合衆国大平原地帯のコムギとトウモロコシの収量変動をスペクトル解析した。そして、パワースペクトルは周期4, 7～11年の所にもピークをもっていることを見出している。7～11年の周期帯にあるピークは内嶋 (1976) が北米大陸の有効積算気温のパワースペクトルで見出したピークによく一致していると述べている。ヨーロッパロシア地区とアジア地区ロシアの穀類収量の変動についても解析を行い、ヨーロッパロシアのパワースペクトルと北米大陸のコムギのスペクトルとが非常によく一致することを報告している。アジア地区では、若干違ったスペクトル分布となり、6～8年の周期帯に強いピークが認められている。このような周期はソビエト国内における旱魃の頻度とかなりよく一致している。

最近、内嶋 (1981) は短いデータのスペクトル分析に適している MEM を用いて、わが国の主要作物の作柄

指数のパワースペクトルを計算している。そして、スペクトルの型は作物の種類、地域によってかなり違い、イネのスペクトルからわが国は5つの区に分かれると述べている。これらの結果を要約的に示すと第20図のようになる。

第20図左側には、国平均収量のデータから求めた主要作物のパワースペクトルが示されている。カンショを除く畑作物とイネの間ではパワースペクトルの間に大きな違いがみられる。畑作物では、 $0.1 \text{ cycles}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以下の低周波数域に大きなピークが見られる。すなわち、ダイズで $0.025(=40\text{年周期})$ 、コムギで $0.32(=30\text{年周期})$ 、パレイショで $0.05(=20\text{年周期})$ の周波数の所に大きなピークがあるが、水稻およびカンショでは余り大きなピークはみられない。これは作物収量の安定性および気候変動への反応性の違いを物語っている。

図の中央には、わが国の各地域ごとのコムギ平均収量の年次変動データから求めたパワースペクトルが示されている。地域によってスペクトルのパターンが大きく違っており、北海道タイプ、東北・関東タイプおよび東海・九州タイプの三つに区分することができる。北海道タイプは3個の大きなピークを $0.06\sim 0.3 \text{ cycles}\cdot\text{yr}^{-1}$ の間にもっており、東北・関東タイプは $0.04\sim 0.05 \text{ cycles}\cdot\text{yr}^{-1}$ の周波数域に1個の大きなピークを持っている。一方、東海・九州タイプでは $0.2\sim 0.3 \text{ cycles}\cdot\text{yr}^{-1}$ の域に鋭いピークをもっている。このようなパターンの違いは、コムギ作に影響する気候条件の違いによるものと思われる。すなわち、北海道では冬期の寒さと積雪量とが最も大きく影響し、九州地域では、冬期の暖さと登熟期の降水量とが大きな役割を果たしているものと思われる。

図の右側には、各都道府県の水稲データから求めた水稻作柄指数のパワースペクトルが示されている。47都道府県のパワースペクトルは、図に示されている5つのタイプに分けることができる。すなわち、北海道・青森型、東北型(日本海岸を除く)、日本海岸型、関東以南型および沖縄型である。北海道・青森型では高周波域に強く鋭いピークがあり、これらのピークは7、8月平均気温のパワースペクトルでみられたそれらとよく対応している。青森と日本海岸を除く東北地方では、高周波域に低い若干のピークを持っているが、 $0.03 \text{ cycles}\cdot\text{yr}^{-1}$ に中心をもつ大きなピークが特徴的である。このピークは、移動10年間の作柄変動係数の脈動(20~30年の周期をもつ)によく対応している。日本海岸型(秋田県から

山口県まで)ではパワーが他のタイプに比較して低く、作柄の変動の低いのが特徴である。これは、水稻栽培期間に日本海岸一帯に発達する日本海岸型気候によるものと思われる。関東以南の太平洋岸に主として分布する関東以南型は日本海岸型に似ているが、パワー密度はそれより高く変動は若干大きくなって来る。特に、 $0.02\sim 0.05 \text{ cycles}\cdot\text{yr}^{-1}$ の周波数域のピークがかなり大きくなって来る。より南の温度資源の十分な沖縄県は非常に特別なパワースペクトルを持っており、 $0.06 \text{ cycles}\cdot\text{yr}^{-1}$ の所に極めて大きいピークをもっている。

以上の説明からわかるように、作柄指数の変動のパワースペクトルは、作物の種類と地域によって違い、これは作物の気象条件への反応、作用気象要素の変動特性の差にもとづいている。しかしながら、作物生産の立場からの気象・気候条件の変動特性の研究はまだ不十分である。変動激化の予想される条件下で、作物生産の向上と安定化への要求は益々増大するものと思われるが、これに応えるには、スペクトル農業気候学の推進が大切である。

## 6. むすび

異常なスピードで増加する人類および多くの家畜は、その生存のエネルギーをすべて農業生産物に頼っている。それゆえ、農作物の出来・不出来は人類の最大の関心事であった。しかし、以上の説明からわかるように、農業生産に適した温度資源と水分資源をもつ地帯は広い地球上で限られていて、アマゾン流域とコンゴ河流域とを除いて古くから既に農耕地として利用されつくしている。これらの地帯でも、時折り訪れる異常気象は農業に大きな打撃を与えるのが普通である。これは、現在の近代農業でも耕地を自然の猛威から保護することの出来ないことを物語っている。

このような条件下で作物生産の向上・安定を図るには、作物のもつ気候要求度と各地域の農業気候資源のマッチングの程度を上昇させる農法を確立し、展開することが大切である。このためには、つぎのような気象学的・農業気候学的研究が必要である。

- i : 長期予報の精度向上(3~6ヵ月後の季節変化がかなりの精度で予報できれば、現在の農業技術は異常気象に対してかなりの対策がたてられる)、
- ii : 気候の変動特性を考慮に入れた農業気候資源分布の解明、
- iii : 気候条件の変動による作物生産の変化を知る広域

作況予測法の確立（現在、ランドサット資料による LACIE 計画が進められている）。

- iv : 並行観測（作物成育と気象条件の）網による資料収集とそれに基づく作物気候要求度のより正確な評価。

気象学の立場からみれば、以上の課題は極めて応用的なものであるけれども、変動激化の伝えられる気候条件下で、われわれの生存のエネルギー源を確保するためには是非とも解決しなければならない問題の1つである。

## 文 献

- Белрянд, Т.Г. (Belryand, T.G.), 1976: 合衆国大平原地帯での日照率変化, 中央地球物理観象台報告, No. 365, 29-35.
- Будаговский, А.И. (Budagovsky, A.I.), 1964: Истарение Почвенной Влага (内嶋訳, 1965: 耕地の蒸発散, 技術会議調査資料, No. 40, 海外, 農林水産技術会議事務局調査資料課).
- Будыко, А.М. (Budyko, A.M.), 1956: Тегловый Баланс Земной Поверхности (内嶋訳, 1959: 地表面の熱収支, pp. 108-128, 河川水温調査会).
- Будыко, А.М. (Budyko, A.M.), 1971: Климат и Жизнь (内嶋・岩切訳, 1973: 気候と生命, pp. 141-181, 東京大学出版会).
- Будыко, А.М. (Budyko, A.M.), 1974: Изменения Климата (内嶋・岩切訳, 1976: 気候の変化, pp. 258-275, 日本イリゲーシヨクラブ).
- Closs, R.L., 1958: Transpiration from plants with a limited water supply, in *Climatology and Microclimatology* (Proceed. of the Canberra Symposium), pp. 168-171, UNESCO.
- Ефимова, Н.А. (Efimova, N.A.), 1977: Радиационные Факторы Продуктивности Растительного Покрова, Гидрометесиздат, pp. 216.
- Edey, S.N. 1977: Growing degree-days and crop production in Canada, Pub. No. 1635, pp. 63.
- 羽生寿郎・石黒忠之, 1972: 北海道における水稻栽培期間の気温条件と収量の安定性(2)安全栽培期間の気温と収量の変動性, 北海道農試研報, No. 102, 93-102.
- Glover, J., 1957: The relationship between total seasonal rainfall and the yield of maize in the Kenya Highlands. *J. Agric. Sci. (Cambs.)* 49, 285-290.
- Гольцберг, И.А. (Gol'tsberg, I.A.), 1972: Агроклиматический Атлас Мира, Гидрометеиздат.
- Herlan, J.R., 1976: 栽培植物と家畜, *サイエンス*, 11, 68-79.
- 岩切 敏, 1967: 水稻栽培期間気候の農業気候学的研究(1)7~8月平均気温の変動性について, 農業気象, 23, 123-130.
- Jakovlev, N.N., 1973: Agrometeorological factors influencing spring wheat yield and grain quality in the Union of Soviet Socialist Republics in Plant Response to Climatic Factors (Slatyer, R.O., ed.), pp. 435-439, UNESCO.
- 鴨田福也・伴 義之・志村 清, 1974: 野菜の光合成及び蒸散に関する研究, 野菜試報, A-1, 109-139.
- 河村 武(編), 1977: 気候変動研究成果報告, 文部省科研費—総合研究(A), pp. 282.
- 吉良竜夫, 1945: 農業地理学の基礎としての東亜の新気候区分, 京都帝国大学農学部園芸学教室.
- Klages, K.H.W., 1951: *Ecological Crop Geography*, The Macmillan Company, pp. 615.
- Lamb, H.H., 1966: *The Changing Climate*, Methuen and Co. Ltd. pp. 236.
- Leith, H., 1978: Vegetation and CO<sub>2</sub> changes, in *Environment Carbon Dioxide, Climate and Society* (Williams, J., ed.), pp. 103-109, Pergamon Press.
- Loomis, R.S., 1976: 農業のシステム, *サイエンス*, 11, 80-88.
- Mack, A.R., 1977: Long-term moisture stress index, *Climatic Variability in Relation to Agricultural Productivity and Practices*, Canada Committee on Agrometeorology.
- Morgan, D., 1979: Merchants of Grain (喜田迅鷹・喜田元子訳, 巨大穀物商社, 日本放送出版協会, pp. 566).
- 長尾 隆, 1951: 月平均気温の標準偏差, *研究時報*, 3, 434-448.
- National Defence University, 1978: *Climate Change to the Year 2000*, pp. 109.
- Нергин, С.В., Саноян, М.Г. и Чулновский, А.Ф., 1967, Бислогические Основы, 29, 449-456.
- Раунер, Ю.П.И.П.А. Позанская (Rauner, Yu. L., and L.A. Lozanskaya), 1978: Клеяния урожайности пшеницы и кукурузы в зерновой зоне северной Америки, *Серия Географическая*, No. 2, 90-101.
- Сапожникова, С.А., Мель, М.И., Смирнова, В.А. и Кикиглова, А.Т., 1957: Опыт характеристики агроклиматических ресурсов территории СССР, *Труды НИИА*, 78-115.
- Щецко, Д.И. (Shashko, D.I.), 1958: Агроклиматическое районирование СССР по обеспеченности растений теплом и влагой, *Вопросы Агроклиматического Районирования СССР*, 38-92.
- Шиничина, Н.И., Гольцберг, И.А., и Струнников, Э.А., 1973: *Агроклиматология*, Гид-

- рометеониздат, pp. 344.
- Шульгин, И.А. (Shul'gin, I.A.), 1973: Растение и Солнце (内嶋訳, 1978: 植物と太陽, エネルギー関連文献翻訳シリーズ, No. 2, 農林水産技術会議事務局連絡調整課).
- 田中正武, 1975: 栽培植物の起源, 日本放送出版協会.
- Thomas, M.K., 1978: Climate Canada, Wileys of Canada, pp. 300.
- 内嶋善兵衛, 1962: 水温環境からみた日本の農業気候区分, 農技研報, A-9, 1-28.
- 内嶋善兵衛, 1976: 有効積算気温の永年変化と変動特性, 農業気象, 31, 185-194.
- 内嶋善兵衛・堀部淑子, 1977: 温量指数と寒さ指数の長期変化と変動性, 農業気象, 33, 137-148.
- 内嶋善兵衛, 1978: Long-term change and variability of air temperature above 10°C in relation to crop production, in Climatic Change and Food Production (Takahashi, K. and M.M. Yoshino, ed.), pp. 217-229, University of Tokyo Press.
- 内嶋善兵衛, 1979: 農業気象災害について, オペレーションズリサーチ, 24, 541-548.
- 内嶋善兵衛, 1980: 気候の変動と食糧生産, しのびよる世界の食糧不安, 116-144, 農林統計協会.
- 内嶋善兵衛, 1981: Yield variability of crops in the Japan, Geojournal. in press.
- USDA, 1975: USSR Agriculture Atlas, pp. 60.
- 山本義一(編), 1979: 気候変動—大気環境の科学 4, 東京大学出版会, pp. 206.