

シンポジウム「北海道における飼料用トウモロコシの栽培と利用の技術」

環境条件からみたトウモロコシの乾物生産

中世古 公 男 (北海道大学農学部)

作物の生長は、生育期間中における気象要因の変動によって大きく左右され、その最終収量は、作物自体の各生育相における気象反応の総合的、累積の結果として実現される。この意味で、地域の気象条件に適した品種の育成や、栽培技術を改善する場合、気象要因の直接的な効果だけでなく、気候のタイプに応じて作物がどのように反応するのか、その特徴を認識することがまず重要となる。

トウモロコシにおける生長の様相と気温、水分条件など、個々の気象要因の影響については、これまでかなり多くの知見が得られている。しかし、気候タイプと生育反応といった、いわゆるダイナミクスについては、年次を重ねたり、広域をもうらした規模の大きな試験が要求されることから、研究も少なく、地域による生育反応の特徴については案外知られていないのが現状である。

そこで、ここでは、筆者が参加したIBP「栽培植物による一次生産力の地域的評価に関する研究」(1966~1971)^註のうち、札幌(北海道大学農学部)、盛岡(東北農業試験場)、桔梗ケ原(長野県農業試験場)の3ヶ所で行われたトウモロコシに関するデータを用い、各地域における乾物生産過程の比較から、北海道のトウモロコシの特徴について述べてみたい。

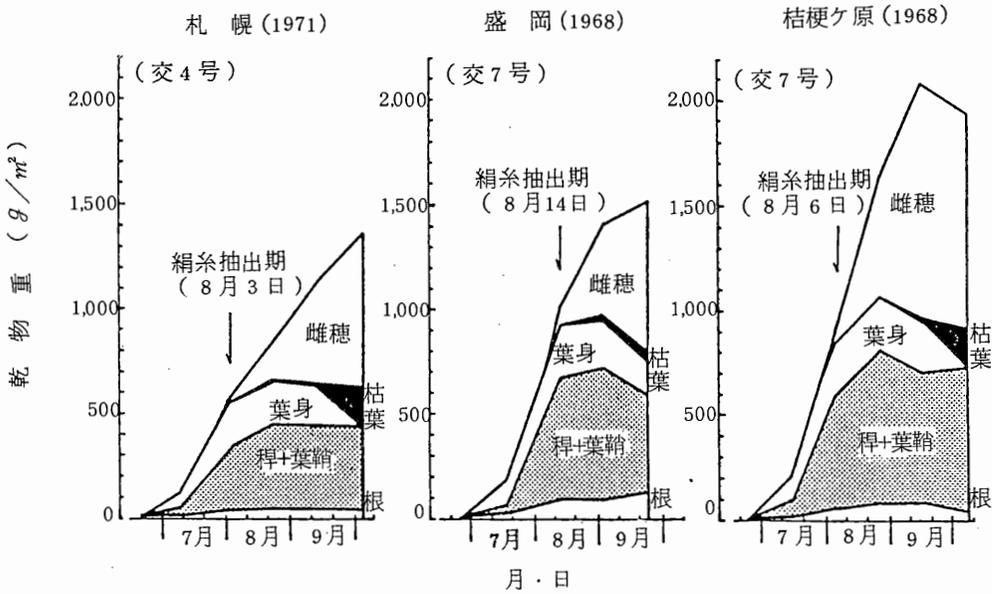
試験は、各地域で最も安定・多収が得られる品種、栽培条件で行われ、札幌ではトウモロコシ交4号、盛岡および桔梗ケ原ではトウモロコシ交7号が供試され、1966~71年の6年間まったく同様な栽培条件下で栽培された。

註：文部省特定研究「生物圏動態」の一部をなすもので、昭和41~46年度科学研究費によって行われた。

1 乾物生産過程の地域的特徴

(1) 器官別乾物重の推移にみられる特徴

第1図は、気象条件がほぼ平年に近かった年次の器官別乾物重の推移を比較したものである。同図に明らかなように、各地域とも、稈の伸長が始まる絹糸抽出期前約3週間目頃から地上部の生長が旺盛となり、栄養生長は絹糸抽出期にほぼ完了し、その後は雌穂に同化産物が蓄積されるが、乾物生産量は南から北へ下がるほど少なくなる傾向が認められる。器官別にみると、葉身乾物重は地域間差が小さいが、稈(葉鞘を含む)の乾物重は南ほど大きく、乾物生産量の差は、主として稈と雌穂の差によることがわかる。稈の乾物重は、各地域とも絹糸抽出後3週間目まで増加するが、桔梗ケ原ではこの間の増加程度が大きいほか、盛岡を含む両地域ではその後減少がみられ、同化産物の一部が穂へ転流していることが示唆される。この点を各年次のデータについて検討してみると、減少程度は桔梗ケ原が最も大きく、次いで盛岡の順となり、札幌ではほとんど減少しない。トウモロコシでは、同化産物の稈から穂への転流量は約10%といわれている¹¹⁾が、その程度は環境条件によって異なり、札幌では転流量はきわめて



第1図 器官別乾物重の推移

少ないものと考えられる。

交7号は、盛岡、桔梗ヶ原の2ヶ所で栽培されたが、盛岡では絹糸抽出期が遅れ、茎葉の生長量は大きい、成熟期が早く穂の乾物重が小さい。第1表に示すように、盛岡では絹糸抽出期は約1週間遅く、

第1表 各地域における播種期、絹糸抽出期および成熟期

場所	播種期	絹糸抽出期	成熟期	栄養生長期間 (播種期～絹糸抽出期)	登熟期間 (絹糸抽出期～成熟期)
札幌	5月15日	8月3日	10月5日	80.4±3.9 (4.8) 日	61.3±3.5 (5.7) 日
盛岡	5月10日	8月12日	9月24日	92.8±4.6 (4.9)	43.4±6.5 (15.1)
桔梗ヶ原	5月20日	8月6日	10月9日	77.6±0.9 (1.1)	64.6±7.6 (11.8)

註. 供試品種：札幌-交4号、盛岡、桔梗ヶ原-交7号
1967～71年の5ヶ年平均、()：変異係数(%)

成熟期は約2週間早まり、登熟期間は桔梗ヶ原に比べ3週間も短縮している。また、このような生育期の違いを反映して、絹糸抽出期の全乾物重(栄養生長量)は盛岡で最も大きく、予実収量は逆に3地域で最低で、変異係数もきわめて大きい(第2表)。すなわち、トウモロコシの生育・収量は、気象要素の直接的な影響ばかりでなく、地域の気候タイプを反映した生育相の変化、換言すれば生長のリズムの変化を通じて大きく規制されることがわかる。

第2図は、交7号を札幌で栽培した例を示したものであるが、第1図の交4号と比較してみると、絹糸抽出期は4週間遅れ、栄養生長量は著しく大きい。また、生長は10月中旬まで継続し、生産量は高

第2表 乾物生産量および子実収量の地域間差異

場 所	全 乾 物 重 (g/m^2)		子 実 収 量 ($Kg/10a$)
	絹糸抽出期	成 熟 期	
札 幌	614 ± 40 (6.4)	1382 ± 228 (16.5)	702 ± 88 (12.5)
盛 岡	996 ± 131 (13.1)	1400 ± 266 (19.0)	684 ± 190 (27.7)
桔梗ヶ原	911 ± 210 (23.1)	2008 ± 395 (19.7)	872 ± 42 (4.8)

註. () : 変異係数(%)、1967~71年の5ケ年平均

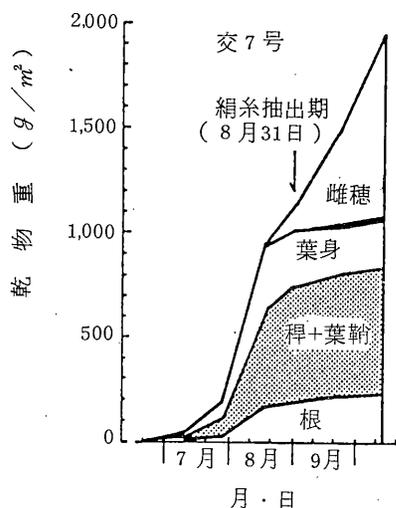
まると、成熟に至らず雌穂重が大きい割に子実収量は低い。寒冷地帯である北海道では、子実収量を確保する上で当然早生品種が栽培されるが、このことは、乾物生産面からみれば、ある程度栄養生長量を犠牲（絹糸抽出期が早まることによる栄養生長量の減少）にして成り立っているといえる。

(2) 生長パラメータの季節変動とその地域間差異

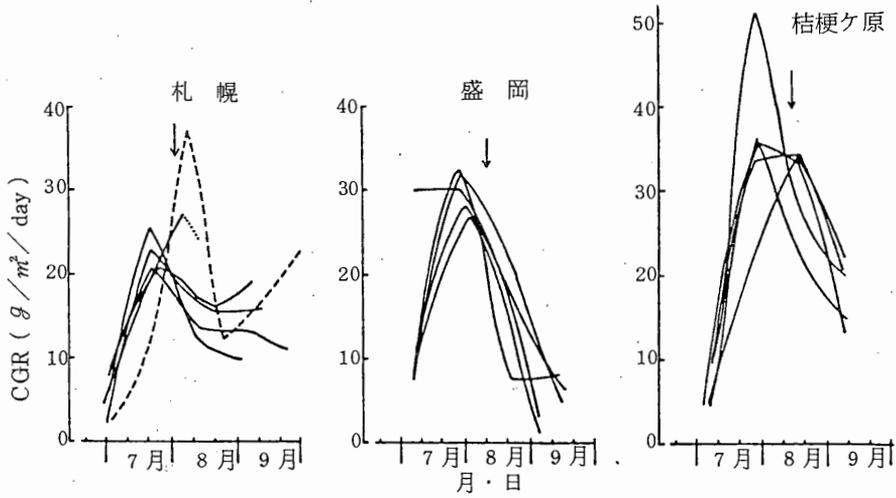
第3図は、圃場における生長速度を表わす個体群生長速度(CGR)を示したものである。各地域とも年次変動は比較的小さく、絹糸抽出期前の稈の伸長期に最も生長が旺盛となり、南ほどその程度が大きいことがわかる。特に、桔梗ヶ原では1日あたり $50g/m^2$ 以上の生長速度を示す年次が認められたが、この値は我が国で記録された最高値に近い⁶⁾。生長速度は、登熟期に入ると急速に低下するが、札幌では最大期の値は低いものの、登熟期での低下が小さく、8月中旬以降はほぼ平行に推移しており、他の地域と異った傾向が認められる。この傾向は、また1971年に札幌で栽培された交7号についてもほぼ同様に認められた。

個体群生長速度は、受光の場である葉面積指数(LAI)と単位葉面積あたりの同化効率を表わす純同化率(NAR)の二つの要素によって支配されることから、次に、第4図について、CGRの様相の地域間差異がどちらの要素によってもたらされたかを検討してみよう。

LAIは、各地域とも絹糸抽出期にほぼ最大となるが、桔梗ヶ原では各年次とも比較的安定して推移するのに対し、札幌、盛岡では年次変動が著しく大きい。特に、盛岡では最大LAIは大きい、絹糸抽出後急激に減少し、登熟期も最大期の値をほぼ持続する札幌、桔梗ヶ原と著しい対照を示している。また、LAIの値は、収量生産力の高い桔梗ヶ原(第2表参照)で、必ずしも高くないことが注目される。一方、NARは、生育に伴って減少する推移を示し、特に盛岡では登熟期での減少が著しい。これと対照的に、札幌では8月下旬から9月にかけてやや上昇する推移を示しており、CGRのパターンに

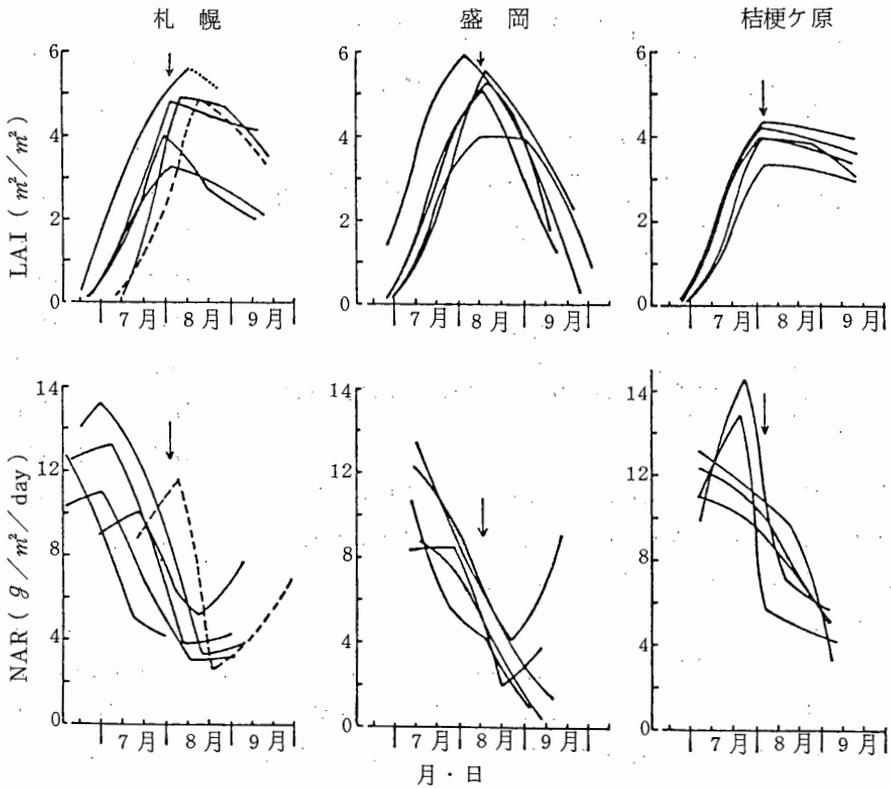


第2図 札幌における交7号の器官別乾物重の推移(1971)



第3図 各地域における個体群生長速度 (CGR) の季節変動とその年次間差異

註、矢印は絹糸抽出期(平均)。破線は札幌における交7号(1971)



第4図 各地域における葉面積指数(LAI)と純同化率(NAR)の季節変動とその年次間差異

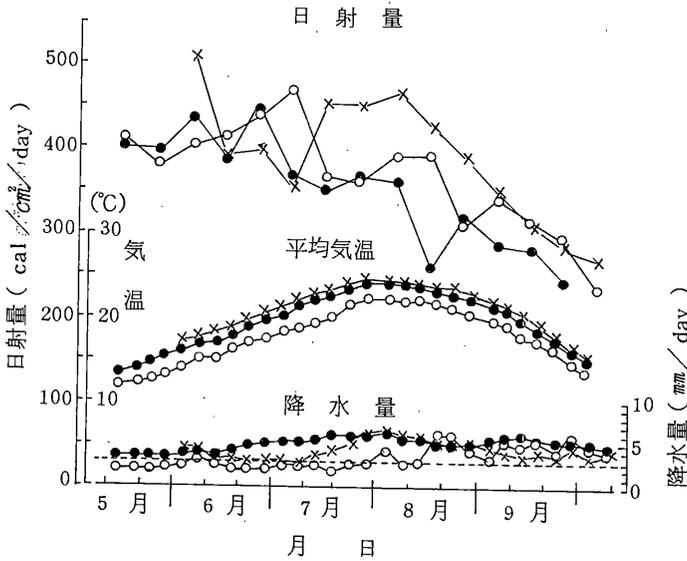
註、矢印は絹糸抽出期(平均)。破線は札幌における交7号(1971)

みられた地域間差異は、主としてNARの推移を反映していることがわかる。このことは、葉の生理的活性の差を反映しているものと考えられ、札幌では絹糸抽出後も葉の活性が比較的高く保たれているのに対し、NARの低下に伴って葉面積も減少する盛岡では、登熟期に入ると葉の活性が急速に失われ、老化が進行することによって登熟期間が短縮するものと推察される。

2 乾物生産と気象条件

以上みてきたように、乾物生産からみたトウモロコシの生長は、地域によってかなり特異な様相を示すが、これらの差は、どのような気象条件を反映したものであろうか。

第5図は、各地の平均気温、降水量および日射量を示したものである。生育期間中の平均気温は、桔梗ヶ原が最も高く、次いで盛岡の順となり、札幌はこれらの地域に対して、2~3℃低く推移している。降水量は、盛岡では生育期間を通して多いのが特徴で、これと対照的に札幌では8月中旬まではかなり少ない。桔梗ヶ原では、7月下旬から多くなり、9月に入るとやや少なくなる。日射量は、6月までは地域間差は小さいが、7月以降では、桔梗ヶ原が最も高く、次いで札幌、盛岡の順で低くなっている。これら3地域の気象条件の特徴を比較してみると、盛岡は生育期間を通して高温、



第5図 各地域における気象要因の季節変動
 註、○：札幌、●：盛岡、×：桔梗ヶ原
 平均気温および降水量は平年値、日射量は1967~71年の5ヶ年平均

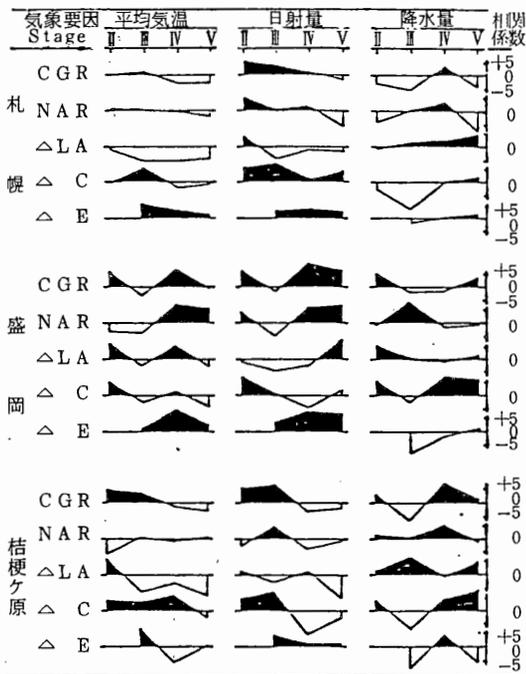
寡照で降水量が多く、札幌は低温、乾燥気味で、8月中旬以降では日射量、降水量ともやや多くなる。一方、桔梗ヶ原は高温で、生育が旺盛となる7月中旬以降は日射量、降水量とも多く、トウモロコシの生育にとって好適な気象条件をそなえているといえる。

第6図は、絹糸抽出期を中心(0)とし、3週間間隔に生育スージを区切った場合の各ステージにおける生長パラメータと気象要因との相関関係を示したものである。札幌では、稈の増加速度は栄養生長期(Ⅱ、Ⅲ)では日射量と正、降水量とは負の強い相関を示すが、他の要素は生育期間を通して気象要因と明確な相関を示さない。一方、日射量の少ない盛岡では、登熟期(Ⅳ、Ⅴ)に入ると、CGR、NARおよび穂の増加速度と気温、日射量との間に強い正の相関が認められる。桔梗ヶ原についてみると、CGRと稈の増加速度は、栄養生長期では日射量と、登熟期では降水量と強い正の相関を示すほか、稈の増加速度と日射量との間には登熟期では負の相関関係が認められた。これらの関係は6年間のみのデ

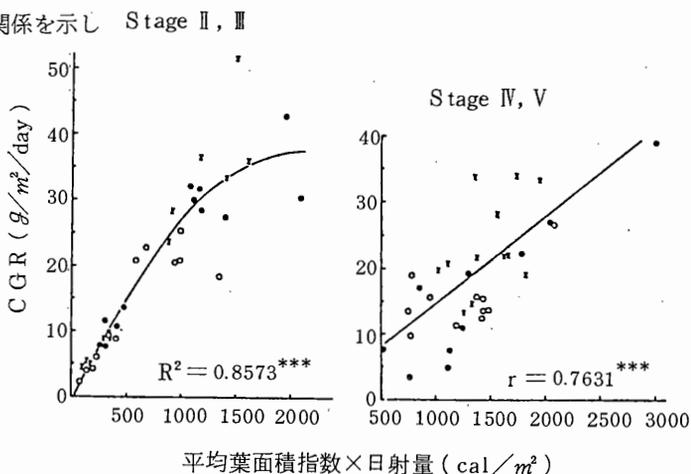
ータによるため、信頼性は高くはないが、前述した各地の気象条件を合わせて考えると、それぞれの地域の各生育相における制限因子を示しているものと推察される。気温が低い札幌では、各生長パラメータと気温の相関は必ずしも高くはなく、気温の年次変動は乾物生産の直接制限因子ではないことを示している。しかし、後述するように、絹糸抽出期における乾物生産量、および成熟期における穂の生産量は積算気温と正の相関を示すほか、第4図に示したL A IとN A Rのパターンは、低温年次で後にずれこむことから、気温の変動は生長のリズムを通じて乾物生産に影響するものと考えられる。

ところで、乾物生産と気象要因との関係について考えてみると、日射量は光合成のエネルギー源として乾物生産にとって基本的な要素であるが、気温は生理的諸活性の律速を通じて乾物生産を規制する。また、降水量は養水分吸収や蒸散を通じて影響し、乾物生産に及ぼす各気象要因の効果はそれぞれ意味合を異にし、同列に扱うには問題がある。そこで、筆者が以前に用いたと同様な方法⁷⁾により、葉面積指数に日射量を掛けた値を植物体が吸収したエネルギー量とし、これと個体群生長速度との関係を示したのが第7図である。

図に明らかなように、エネルギー吸収量とCGRとの間には、地域、年次を込みにして密接な対応関係が存在し、乾物増加速度は基本的には吸収したエネルギー量に比例することがわかる。栄養生長期では、2次曲線的対応関係が認められるが、これは後述するように、葉面積の増加に伴い相互遮蔽が激化し、生産効率が低下することによるものである。



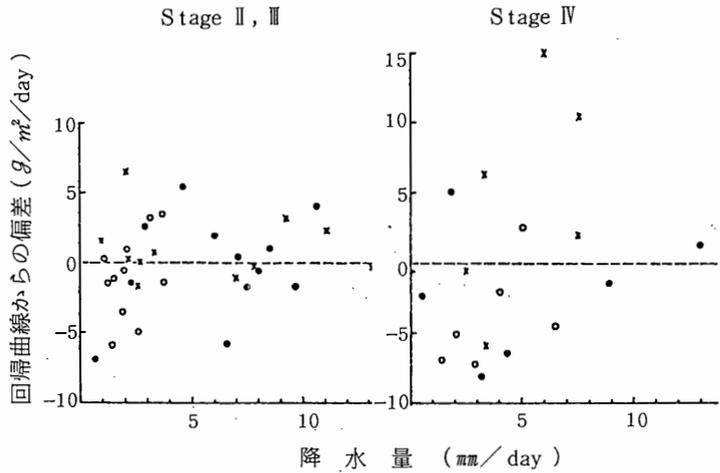
第6図 CGR、NAR および器官別乾物増加速度と気象要因との相関
註、△L A、△C、△Eはそれぞれ葉面積、稈（葉鞘を含む）および雌穂の乾物増加速度



第7図 エネルギー吸収量とCGRとの関係
註、○：札幌、●：盛岡、×：桔梗ヶ原

以上のように、乾物生産に対する日射量の影響は図中の2次曲線や直線式で表わされるとすると、回帰からの偏差は気温や降水量の変動によってもたらされている可能性がある。そこで、まず気温と偏差との関係を調べたところ、ステージⅡでは気温の高い盛岡、桔梗ヶ原では負の相関が認められたが、札幌では $r = 0.703$ の正の相関が存在し、生育の早いステージでは気温が乾物生産の変動要因であることがわかった。しかし、気温が高く推移するステージⅢ～Ⅴ（7月中旬から9月上旬）では、札幌も含め偏差は気温と負、降水量とは正の相関を示し、降水量が乾物生産の変動要因である可能性が示唆された。

第8図に示すように、偏差と降水量との関係はばらつきが大きい。栄養生長期（Ⅱ、Ⅲ）では平均日降水量3mm以下、登熟期では5mm以下になると偏差がマイナスになる頻度が高い。トウモロコシの水分消費量は、幼苗期の5～6月に少なく、7～8月に多く¹⁾、花粉飛散期を中心とする期間は水分ストレスに敏感であることが指摘



第8図 エネルギー吸収量とCGRとの回帰曲線からの偏差と降水量との対応関係

註、○：札幌、●：盛岡、×：桔梗ヶ原

9) されている。また、山崎¹²⁾は、絹糸抽出期を中心とする1ヶ月間の降水量と収量との間に密接な正の相関があり、7、8月の乾燥期における灌漑が増収にきわめて効果的であることを報告しており、この期間乾燥気味に経過する札幌では、降水量が乾物生産の制限要因となる危険性が高いと思われる。

第3表 絹糸抽出期における全乾物重および成熟期における雌穂乾物重と気象要因との相互関係

場所	積算値			平均値			日数
	気温	日射量	降水量	気温	日射量	降水量	
栄養生長期							
札幌	0.757	0.175	0.075	0.393	-0.190	0.004	0.518
盛岡	-0.379	-0.006	0.576	0.988**	0.339	-0.522	-0.757
桔梗ヶ原	0.368	0.152	0.562	0.729	0.323	-0.522	0.772
登熟期							
札幌	0.505	0.016	-0.143	-0.070	-0.680	-0.338	0.702
盛岡	0.897*	0.677	0.316	0.452	0.263	0.132	0.591
桔梗ヶ原	-0.865*	0.920**	-0.604	0.971**	0.205	-0.539	-0.928**

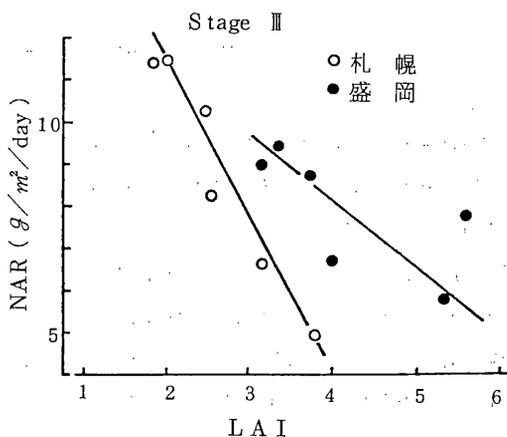
註、*：5%、**：1%水準で有意

第3表に、絹糸抽出期における乾物生産量（栄養生長量）、および成熟期における穂の生産量と気象要因との相関を積算値と平均値に分けて示した。栄養生長量は、札幌では積算気温および絹糸抽出期まで日数（以後日数とのみ表示）と比較的高い正の相関を示し、他の要素、とくに各気象要因の平均値とはほとんど相関がみられない。一方、盛岡と桔梗ヶ原ではこれとは逆に平均気温との間に正の相関関係がみられ、日数とは負の相関を示している。すなわち、気温の効果は、札幌では累積的であるのに対し、他の地域では促進的に作用し、生長が早まることによって生産量が高まる。登熟期についてみると、札幌では栄養生長期とほぼ同様な関係が認められ、穂の生産量は登熟日数が長いほど大きい。また、登熟期間が短い盛岡でも札幌とほぼ同様な対応関係が認められ、栄養生長期と異なり、促進的效果よりも累積的效果が大きいことがわかる。一方、気象条件が好適な桔梗ヶ原では、他の地域と全く異なり、各気象要素の積算値および登熟日数は穂の生産量と強い負の相関を示し、平均気温とのみ正の相関が認められ、栄養生長期と同様促進的效果が大きいことを示している。このように、気象要因の乾物生産に及ぼす効果や意義は、地域の気候タイプによって全く異なることが理解される。

3 気候タイプからみた北海道における飼料用トウモロコシの育種・栽培上の問題点

寒冷地帯である北海道におけるトウモロコシの生育・収量は、有効積算気温と密接な正の相関を示すことはこれまでも指摘されることである^{3, 4, 5)}。各地との比較から明らかのように、気温の生育・収量に及ぼす効果は、札幌では直接的というより、生長リズムの変化（絹糸抽出期や成熟期の変化）を通じての累積的な効果であり、子実の収量性を高めるには限られた栽培期間を如何に有効に利用するかが問題で、この意味で品種の早生化が最も重要な課題といえる。しかし、高エネルギー飼料としての価値のみを重視して早生化を進めることは、一方では晩生品種のもつ旺盛な栄養生長性を犠牲にすることとなり、ホールクロップとして利用される飼料用トウモロコシでは、その優れた特性を効果的に利用する上で、品種の選択についてはより柔軟な考え方が要求されるように思われる。

トウモロコシの栽培は、近年世界的に多肥密植の傾向にあるが、密植にすると光や養水分競合が生じ、不稔個体や無雌穂個体の発生頻度が高まり、子実収量は減少する。第9図は、絹糸抽出期前3週間における札幌の交4号と盛岡の交7号のLAIとNARとの関係を示したものであるが、NARはLAIの増加に伴って急激に減少しており、密植適性を高める上で草型の改良がきわめて重要であることが示唆される。群落内部への光の透入は、葉の形、大きさ、角度などによって左右されるが、このうち角度の効果が最も大きいことから、直立葉型の品種が増えている。しかし、光の吸収と利用の両面から考えると、下位葉は大きく水平で、上位葉は



第9図 Stage IIIにおけるLAIとNARとの関係

ど小形で直立となる草型が理想的である⁸⁾。

密植に伴う穂数の減少は、従来主流を占めていた1穂型に比べ2穂型品種で少ないことから、アメリカではいわゆる多穂型品種の育成が進んでいる¹⁰⁾。また、多穂型品種は乾燥や痩せ地などの不良環境

第4表 道央および道東各地における月平均気温と降水量の季節変動

場 所	5月	6月	7月	8月	9月	10月
平均 気 温 (°C)						
上士別	10.8	15.4	19.5	19.5	14.9	8.2
旭 川	11.5	16.2	20.3	20.4	15.2	8.5
富良野	11.3	15.7	19.9	20.4	15.2	8.6
札 幌	12.0	15.9	20.2	21.3	16.9	10.6
北 見	10.4	14.1	18.3	19.0	14.8	8.3
中標津	8.7	12.0	16.0	17.7	14.8	8.8
芽 室	10.9	14.4	18.6	19.6	15.6	8.9
平均 降 水 量 (mm/day)						
上士別	2.2	2.6	4.1	5.1	4.7	3.4
旭 川	2.4	2.6	3.8	5.4	4.5	3.3
富良野	2.3	2.6	3.3	4.9	4.3	3.5
札 幌	1.9	2.5	2.6	4.2	4.7	3.7
北 見	2.0	2.5	2.7	3.7	3.4	2.4
中標津	4.1	4.1	3.4	4.5	5.7	4.6
芽 室	2.7	3.3	3.1	4.6	4.5	3.5

註、平年値

に耐えることが指摘されている²⁾。第4表に示すように、北海道では低温に加えて6～7月は乾燥気味に経過する地域が多く、収量安定性の観点から、多穂性のほか耐乾性が育種の指標となろう。

引 用 文 献

1. BREIBELBIS, F. R. and L. L. HARROLO 1958. Agron. J. 50:500-503
2. JOSEPHSON, L. M. 1957. Ann. Hybrid Corn Industry-Res. Conf. Proc. 12:71-79
3. 吉 良 賢 二 1981. 日作紀 50:481-488.
4. ————— 1983. 日作紀 52:190-199.
5. 楠 引 英 男 1979. 日草誌 25:144-149.
6. 村 田 吉 男 ・ 玖 村 敦 彦 ・ 石 井 龍 一 1971. 作物の光合成と生態農文協。
7. 中世古 公 男 ・ 吉 田 稔 1971. 北大農邦文紀 8:40-48.

8. ———— · 後藤 寛 治 1983. 日作紀 52: 49-58.
9. RUNGE, E. C. A. 1968. Agron. J. 60: 503-507.
10. RUSSELL, W. A. 1968. Crop Sci. 8: 244-247.
11. TANAKA, A. and J. YAMAGUCHI 1972. J. Facul. Agric. Hokkaido Univ. 57: 71-132.
12. 山崎 義人 1952. 総合作物学食用作物篇. 地球出版社。