農業気象 (*J. Agr. Met.*) 47 (2): 83–90, 1991

ダイズの生育・収量におよぼす人工酸性雨の影響

小林卓也*・河野吉久**・中山敬一*

(* 千葉大学園芸学部農業気象学研究室)
(** 電力中央研究所生物部)

The Effects of Simulated Acid Rain on the Growth and Yield of Soybean

Takuya KOBAYASHI*, Yoshihisa KOHNO** and Keiichi NAKAYAMA*

(* College of Horticulture, Chiba University,
648 Matsudo, Matsudo City, Chiba 271, Japan
** Biology Department, Central Research Institute of Electric Power Industry,
1646 Abiko, Abiko City, Chiba 270-11, Japan)

This report described changes in the growth processes and yield of soybean plants exposed to simulated acid rain at pH 5.6, 4.0, 3.0 and 2.0 containing sulfate, nitrate and chloride by using analysis of growth parameters and seed yield components.

The analysis of growth parameters showed that *LAR* (leaf area ratio) and *SLA* (specific leaf area) for soybean plants at pH 2.0 from 1 week after the initiation of exposure were significantly smaller than those at pH 5.6. The application of simulated acid rain at pH 2.0 decreased *RGR* (relative growth rate) as compared with that at pH 5.6. Since *RGR* is expressed in the form of *NAR* (net assimilation rate) $\times$ *LAR*, lower *RGR* at pH 2.0 is associated with reduction of *LAR* due to small leaf area.

The yield component analysis indicated that the significant reduction of seed dry weight per plant at pH 2.0 were attributed to significant decrease in number of seeds per pod. Such a reduction in seed number at pH 2.0 resulted from increasing number of empty seeds.

pH of cultivated soil especially at the upper soil layer (0~5 cm from surface) exposed to simulated acid rain for 9 weeks was decreased with increasing acidity of simulated acid rain. At the lower layer (25~30 cm), however, there was no significant difference in soil pH among any treatments.

These results suggested that the exposure of simulated acid rain at pH 2.0 caused the reduction of dry weight growth and seed yield of soybean plant due to acute damage of leaf area growth. However, at a pH above 3.0 there was no significant effect on the growth processes and yield components of soybean plant. Based on our results current pH level of ambient rain in Japan should not have an adverse impact on the growth and seed yield of soybean.

Key words: Growth parameter, Simulated acid rain, Seed yield components, Soil pH, Soybean

キーワード: 子実収量構成要素, 人工酸性雨, 生長関数, ダイズ, 土壌 pH

1. はじめに

わが国の最近の降雨酸性度の調査結果によると, 降雨

昭和 63 年 4 月 13 日 日本農業気象学会全国大会にて発表
1991 年 3 月 5 日 受領, 1991 年 7 月 12 日 受理

の平均 pH は約 4.5~4.7 であることが報告され, その上, pH が 4 を下まわる降雨も観測されている(玉置ら, 1986 ; 電力中央研究所, 1985)。さらに, 関東地方ではスギの立ち枯れなどの樹木衰退の要因の一つとして酸性雨が関与していると指摘されており(Sekiguchi *et al.*, 1986

；環境庁, 1986), 我が国においても生態系に対する酸性降下物の影響が懸念されている。

著者らは、これまでに雨滴自然落下型降雨接触装置を用いて、ダイズの生育全期間にわたり人工酸性雨を接触し、その生育および収量におよぼす影響について検討してきた(Kohno and Kobayashi, 1989 a, b)。その結果、pH 3.0 以下の人工酸性雨の接触により葉に可視害が発生し、子実収量および植物体乾物重量はpH 2.0の人工酸性雨の接触により有意に低下した。また、pH 3.0 以上の人工酸性雨の接触による子実収量の有意な変化は認められなかったが、生育初期にはpH 3.0で葉面積が減少する傾向や、pH 4.0において子実収量の増加する傾向が見られるなど、人工酸性雨の接触に起因すると考えられる変化も認められた。本研究では、生長解析や収量構成要素の面から、ダイズ生長過程におよぼす人工酸性雨接触の影響について検討した。

2. 材料および方法

2.1 供試植物と栽培方法

本研究では、ダイズ(*Glycine max* (L.) Merr. 品種：早生白鳥枝豆、タキイ種苗)を供試し、1986年5月7日から8月7日の実験Ⅰと1986年8月10日から10月23日の実験Ⅱならびに1987年5月19日から8月11日の実験Ⅲの3回にわたって実験を行った。

実験ⅠおよびⅡでは、 10^{-4} a のプラスチックポット(直径10.5 cm, 高さ18.5 cm)を、実験Ⅲでは火山灰土壌を入れた $80 \times 80 \times 33$ cm³の模擬畑を使用してダイズの栽培を行った。実験ⅠおよびⅡでは種子をポットに直播したが、実験Ⅲでは初生葉の展開した幼植物体を模擬畑に移植して接触試験に供した。実験Ⅰの最終的な収穫までのダイズの全生育期間は92日、実験Ⅱでは74日、実験Ⅲでは84日であった。いずれの実験でも慣行に準じて施肥し、灌水にはイオン交換水を用いた。また、栽培ならびに人工酸性雨の接触には開放型のガラス室(南北棟6 m $\times$ 15 m)を使用した(Kohno and Kobayashi, 1989 a, b)。

2.2 人工酸性雨の接触

硫酸：硝酸：塩酸=2：1：1(重量比)となるように、それぞれ同一規定濃度の酸溶液を一定量混合し、人工酸性雨溶液の原液とした。この原液を、設定pHが2.0, 3.0, 4.0となるようにイオン交換水で希釈調整した。また、対照として設定したpH 5.6にはイオン交換水を使用した。

いずれの実験も、人工酸性雨溶液の接触には雨滴自然落下型降雨接触装置(Kohno and Kobayashi, 1989 a)を使用した。実験Ⅰでは、播種後15日目に人工酸性雨の接触を開始した。降雨強度は1時間当り5 mm, 1回

当りの降雨時間を1時間とし、週2回の割合で合計18回の人工酸性雨を接触した。高温下での人工酸性雨の接触を避けるため、接触時刻は早朝あるいは夕方とした。生育を調査するために、接触開始後0, 1, 3, 5および7週間目に処理当り10個体を無作為に抽出し、生育を調査した。各サンプルはそれぞれ0, 2, 6, 10, 14回ずつ人工酸性雨が接触されている。

実験Ⅱでは、実験Ⅰの方法に基づいて播種後11日目から、合計13回、総量65 mmの人工酸性雨を接触した。

実験Ⅲでは、降雨強度は1時間当り5 mm, 1回当りの降雨時間を3時間とし、週2回の割合で、合計18回人工酸性雨を接触し、総降雨量は270 mmであった。

2.3 生長解析法

実験Ⅰのデータについて生長解析を行ったが、本実験で使用した生長関数は以下の通りである。

$$LAR_m(\text{実測葉面積比}) = Fa/W \quad (1-1)$$

$$LWR_m(\text{実測葉重比}) = F/W \quad (1-2)$$

$$SLA_m(\text{実測比葉面積}) = Fa/F \quad (1-3)$$

$$T/R = (F + SW) / RW \quad (1-4)$$

ここで、 W は個体の乾物重(g), $W = SW$ (茎の乾物重) + RW (根の乾物重) + F (葉の乾物重)であり、 Fa は個体の葉面積(cm²)である。

さらに

$$RGR(\text{相対生長率}) = \frac{\ln W_{(N+1)} - \ln W_{(N)}}{t_{(N)}} \quad (2-1)$$

$$RLGR(\text{相対葉面積生長率}) = \frac{\ln Fa_{(N+1)} - \ln Fa_{(N)}}{t_{(N)}} \quad (2-2)$$

$$NAR_a(\text{純同化率：単位葉面積}) = \frac{RLGR \times dW}{dFa} \quad (2-3)$$

$$NAR_w(\text{純同化率：単位葉乾重}) = NAR_a \times SLA \quad (2-4)$$

ここで、 $t_{(N)}$ は N 回目と $N+1$ 回目のサンプリングの間隔(day)。 dW , dF および dFa はそれぞれサンプリング間の個体の乾物重量、葉の乾物重量ならびに葉面積の変化量で、 $dW = W_{(N+1)} - W_{(N)}$, $dF = F_{(N+1)} - F_{(N)}$, $dFa = Fa_{(N+1)} - Fa_{(N)}$ である。

また、 RGR および NAR_a に対応する LAR , LWR , SLA の値は以下の関係より算出した。

$$LAR = RGR / NAR_a \quad (3-1)$$

$$LWR = LAR / SLA \quad (3-2)$$

$$SLA = \frac{(Fa_{(N+1)} - Fa_{(N)}) \times (\ln F_{(N+1)} - \ln F_{(N)})}{(\ln Fa_{(N+1)} - \ln Fa_{(N)}) \times (F_{(N+1)} - F_{(N)})} \quad (3-3)$$

実験ⅡおよびⅢでは、可視害の発現と子実収量につい

て調査した。

各実験データは、Tukey's *HSD* multiple range test により、5%水準で有意差検定を行った。

3. 結果および考察

3.1 落葉におよぼす影響

人工酸性雨接触による植物の可視害発現に関する報告は多数あるが、Jacobson (1980) は、可視害発現の閾値が pH 4 から 3 の間にあることを報告している。Evans (1982) は、可視害の発現する最高の pH として 3.4 を報告しており、Lee *et al.* (1980, 1981) は、多くの作物において pH 3.5 で可視害が発生することを報告している。ダイズを供試した本実験の場合においても、pH 3.0 以下の人工酸性雨の接触により壊死斑が発現し、pH 2.0 では葉が著しく奇形化した。

Arny *et al.* (1986) は、ジャガイモ、ハツカダイコンおよびダイズを使用した実験において、人工酸性雨の接触により、葉の組織からエチレンが発生することを報告している。一般的に、エチレンは植物の葉の黄化や離層形成を促進すると考えられている。しかしながら、本実験 I では、pH 2.0 の人工酸性雨の接触により葉の黄化の遅れが認められ、Table 1 に示すように、pH 2.0 では 5.6 に比較して有意に落葉が少なく、エチレンの発生にともなうと考えられる反応は認められなかった。

Table 1 Number of defoliated leaves of soybean plants at 7 weeks after the initiation of simulated acid rain exposure in experiment I.

Treatment (pH)	Leaf position ¹⁾					Total
	L-1	L-2	L-3	L-4	Others	
	----- leaflet number per plant -----					
5.6	2.3c ²⁾	1.3	0.4a	0	0	3.95bc
4.0	1.4b	0.9	0.5a	0	0	2.73b
3.0	2.1bc	1.4	0.6a	0.1	0	4.00c
2.0	0.7a	0	0.2a	0.2	0	0.98a

1) L-1: 1st (oldest) trifoliate leaves, L-2: 2nd trifoliate leaves, L-3: 3rd trifoliate leaves, L-4: 4th trifoliate leaves, other: other leaves.

2) Within a column means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's *HSD* multiple range test with 5% ($N=10$).

実験 II および III においても pH 2.0 で葉の黄化および落葉の遅れる傾向が認められたが、いずれの実験も処理間で葉の展開および開花時期に差は認められなかった。さらに、pH 5.6 から 3.0 では、生育が進行し莢の黄化が始まる時期にはほとんどの葉は落葉したが、pH 2.0 では莢が黄化しても着生している葉が多く認められた。仮に、葉の黄化と落葉の遅延が、植物が光合成活性を維持して

いる期間の延長を意味すると考えられるならば、葉の黄化と落葉が遅れることにより、人工酸性雨の接触にともなう生育初期の乾物生産の低下が補われることも考えられる。しかしながら、人工酸性雨と葉の黄化ならびに落葉の変化との因果関係について示した報告はほとんど見られないため、今後さらに検討を加える必要があろう。

3.2 生長におよぼす影響

pH 2.0 の人工酸性雨の接触により、ダイズは急性的な被害を受け、この影響は各生長関数に反映された。

Table 2 に、実験 I における植物体乾物重 (W)、葉重比 (LWR_m)、葉面積比 (LAR_m)、比葉面積 (SLA_m) および地上部と根の乾物重比 (T/R) の実測値を示す。pH 5.6 の LAR_m は、接触開始後 1 週間目に急激に増加し、その後ダイズの生育にともない低下した。pH 4.0 も pH 5.6 と同じ変化を示したが、pH 2.0 では生育全期間を通じて LAR_m に大きな変化は見られず、pH 2.0 の接触開始後 1 週間目および 3 週間目の LAR_m は対照とした pH 5.6 に比較して有意に低かった。pH 2.0 の個体の乾物重が pH 5.6 に比較して低下したことから、pH 2.0 における LAR_m の低下には葉面積の低下が直接原因していると判断された。Fig. 1 に、実験 I における相対生長率 (RGR)、葉面積あるいは葉乾物重を基準にした純同化率 (それぞれ NAR_a と NAR_w)、相対葉面積生長率 ($RLGR$) および式 (3-1) ~ (3-3) に基づいて算出した LAR 、 LWR 、 SLA の平均値の推移を示す。Fig. 1 に見られるように、pH 2.0 の $RLGR$ は pH 5.6 に比較して低かったが、Table 2 に示したように、接触開始から 5 週間目と 7 週間目の T/R と LWR_m が pH 5.6 に比較して有意に高く、pH 2.0 の人工酸性雨の接触による害作用は生育全般にわたるものではなく、葉面積生長が抑制されたものと考えられた。

一方、pH 3.0 では、Table 2 に示したように、壊死斑発現が認められた接触開始後 1 週間目の LAR_m が、対照とした pH 5.6 に比べて低くなる傾向にあったが、接触開始後 3 週間目には、壊死斑発現の減少と同時に差は認められなくなった。そこで、pH 3.0 で壊死斑が発現した第一本葉に注目すると、Fig. 2 に示したように、pH 3.0 の葉面積は pH 5.6 に比較して有意に小さかった。しかし、壊死斑発現がほとんど認められなくなった第三本葉では、pH 3.0 と 5.6 の葉面積に有意差は認められず、壊死斑が発現する pH レベルが、葉面積の低下する pH レベルと密接な関係にあるものと推察された。

Fig. 1 に示したように、接触開始後 1 週間目から 3 週間目の間の pH 3.0 および 2.0 における RGR は、対照とした pH 5.6 に比較して低かった。 RGR は、式 (3-1) のように、 NAR_a と LAR の 2 つのパラメーターにより表

Table 2 Actual values of plant dry weight (W), leaf weight ratio (LWR_m), leaf area ratio (LAR_m), specific leaf area (SLA_m) and Top/Root ratio (T/R) of soybean plants as affected by simulated acid rain in experiment I.

Exposure ¹⁾ period (weeks)	Rain pH	Parameter ²⁾				
		W	LWR_m	LAR_m	SLA_m	T/R
0		0.32	0.296	125.01	421.94	4.33
1	5.6	0.62 a ³⁾	0.415 b	170.35 b	411.11 b	3.14 a
	4.0	0.63 a	0.389 a	167.34 b	430.18 b	2.92 a
	3.0	0.62 a	0.373 a	154.92 b	415.37 b	2.91 a
	2.0	0.62 a	0.377 a	131.87 a	349.36 a	3.19 a
3	5.6	2.30 b	0.480 ab	150.23 b	313.55 b	3.29 a
	4.0	2.38 b	0.463 a	144.90 b	313.78 b	3.15 a
	3.0	2.09 ab	0.478 ab	154.37 b	322.86 b	3.43 ab
	2.0	1.88 a	0.492 b	124.55 a	253.21 b	3.92 b
5	5.6	6.25 b	0.492 a	131.30 a	266.94 b	4.08 a
	4.0	6.80 b	0.481 a	129.27 a	269.17 b	3.89 a
	3.0	6.60 b	0.496 a	127.99 a	258.02 b	4.26 a
	2.0	5.34 a	0.538 b	122.05 a	226.88 a	5.59 b
7	5.6	10.91 b	0.449 a	118.92 a	265.10 ab	3.79 a
	4.0	11.22 b	0.437 a	124.37 a	284.97 b	3.40 a
	3.0	10.65 b	0.448 a	121.31 a	272.57 ab	3.75 a
	2.0	8.72 a	0.499 b	120.88 a	242.55 a	4.86 b

1) After the initiation of exposure.

2) Parameter;

W : Plant dry weight (g plant^{-1}), LWR_m : Leaf weight ratio (g g^{-1}),
 LAR_m : Leaf area ratio ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), SLA_m : Specific leaf area ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$),
 T/R : Top DW/root DW (g g^{-1}).

3) Within a column means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's *HSD* multiple range test with 5% ($N=10$).

される。pH 5.6 に比較して、pH 2.0 では LAR が低く、 NAR_a は高くなる傾向が認められたことから、 RGR の低下には LAR の低下が関与しているものと判断された。また、pH 5.6 を基準にして各処理の NAR_a と NAR_w を比較すると、pH 4.0 と 3.0 では NAR_a と NAR_w が同じ傾向で推移したが、pH 2.0 の NAR_a と NAR_w の推移は一致しなかった。接触開始から 5 週間目までは、pH 2.0 の NAR_a が pH 5.6 に比較して高くなる傾向が見られたのに対して、 NAR_w は変わらないか、むしろ低くなる傾向が見られたことから、式(2-4)の関係により、pH 2.0 における NAR_a の増加には、 SLA の低下、すなわち葉の構造的厚さの増加が関与していることが推察された。

さらに、式(3-2)の関係から、一定量の光合成産物が葉の生長に与えられた場合、 SLA が小さくなるほど、葉面積は小さくなることが考えられる。しかしながら、本実験の場合、Fig. 2 に示したように、葉面積の低下が認められた pH 3.0 の第一本葉において、 SLA の有意な低下が認められなかったことから、 SLA が低下しなくても、人工酸性雨の接触により葉面積が低下することが明らかになった。

Fig.1 に示したように、pH 2.0 および 3.0 では、人工酸性雨の接触を開始した直後に低下した $RLGR$ が、その後、対照とした pH 5.6 の値に近づき、pH 3.0 では個体当りの葉面積が回復した。また、接触開始後 3 週間目以降には、pH 4.0 から 2.0 の間では人工酸性雨の pH が低いほど LWR_m は大きく、pH 4.0 と 2.0 との間に有意差が認められた。以上の pH 3.0 および 2.0 の人工酸性雨の接触下における生長関数の経時的な変化は、前述の可視害発現の変化とともに、人工酸性雨に対する植物の生育にともなう感受性の変化、あるいは人工酸性雨による初期の被害からの回復の可能性を示唆するものと考えられた。

3.3 子実収量におよぼす影響

実験 I における花蕾(Flower bud)、花(Flower)および莢実(Pod)の数を Table 3 に示す。莢実はその長さにより 3 つに分類した。実験 I では、全処理とも接触開始後 23 日目(播種後 38 日目)に開花が確認され、開花時期に対する人工酸性雨の影響は認められなかった。接触開始後 26 日目(播種後 41 日目、開花確認後 3 日目)には花数に変化は認められなかったが、pH 2.0 の花蕾数は対照とした 5.6 に比較して有意に少なかった。接触開始後

Fig. 1. Changes in growth parameters of soybean plants exposed to simulated acid rain in experiment I. Parameters: relative growth rate (RGR , $g\ g^{-1}\ d^{-1}$), net assimilation rate based on leaf area (NAR_a , $mg\ cm^{-2}\ d^{-1}$), net assimilation rate based on leaf dry weight (NAR_w , $g\ g^{-1}\ d^{-1}$), relative leaf area growth rate ($RLGR$, $cm^2\ cm^{-2}\ d^{-1}$), leaf area ratio (LAR , $cm^2\ g^{-1}$), leaf weight ratio (LWR , $g\ g^{-1}$) and specific leaf area (SLA , $cm^2\ g^{-1}$).

Fig. 2. Leaf area and specific leaf area (SLA , $cm^2\ g^{-1}$) of 1st ($L1$) and 3rd ($L3$) trifoliol leaves of soybean plants at 5 weeks after the initiation of simulated acid rain exposure in experiment I. At each leaves any two treatment means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's HSD multiple range test with 5% ($N=10$).

Table 3 The effects of simulated acid rain on the floral differentiation, flowering and podding of soybean plants in experiment I.

Exposure ¹⁾ period (day)	Rain pH	Flower bud number	Flower number	Pods number per plant ²⁾				Total number
				Rank - 1	Rank - 2	Rank - 3	Total	
				----- number per plant -----				
26	5.6	11.3 b ³⁾	7.6 a	0	0	0	0	18.9 a
	4.0	9.4 ab	9.3 a	0	0	0	0	18.7 a
	3.0	9.5 ab	8.2 a	0	0	0	0	17.7 a
	2.0	6.6 a	8.5 a	0	0	0	0	15.1 a
33	5.6	9.4 a	5.3 a	12.5 ab	0.7 a	0	13.2 a	27.9 a
	4.0	8.7 a	3.5 a	12.6 ab	1.2 a	0	13.8 a	26.0 a
	3.0	9.8 a	3.6 a	11.5 a	1.1 a	0	12.6 a	26.0 a
	2.0	10.4 a	4.1 a	15.2 b	0.8 a	0	16.0 a	30.5 a
40	5.6	7.6 a	2.4 a	9.7 b	6.0 a	3.2 a	18.9 a	28.9 a
	4.0	8.2 a	2.6 a	8.5 ab	6.4 ab	4.2 a	19.1 a	29.9 a
	3.0	6.6 a	3.3 a	7.3 a	6.0 a	4.1 a	17.4 a	27.3 a
	2.0	6.3 a	3.8 a	7.0 a	9.4 b	3.4 a	19.8 a	29.9 a

1) After the initiation of exposure.

2) Rank-1: < 2 cm, Rank-2: 2 cm ≤ 3 cm, Rank-3: 3 cm <.

3) Within a column means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's HSD multiple range test with 5% (N=10).

33 日目(播種後 48 日目)には pH 2.0 の花蕾および莢実数の増加が観察され、対照に比較して花蕾、花および莢実の総数も増加する傾向が見られた。また、接触開始後 40 日目(播種後 55 日目)には、長さ別の莢実数が処理間で変化した。総莢実数に差は認められず、これらの総数にも人工酸性雨の接触にともなう変化は認められなかった。

以上のように、開花期には、花数や莢実の構成に変化が認められたが、子実肥大期には個体当たりの莢実数および莢実重に関して、人工酸性雨の接触にともなう有意な変化は認められなかった。よって、花芽分化や開花に対する影響が、最終的な子実収量に直接影響することは少ないと考えられた。

農作物の子実収量におよぼす酸性雨の影響に関して、Johnston *et al.* (1982) は、インゲンマメを使用した実験において、pH 3.2 の人工酸性雨の接触により、有意ではないが莢実重が減少することを報告している。また、Evans *et al.* (1985) は、ダイズの 2 品種 Amsoy と Williams を pH 5.6, 4.1, 3.3 および 2.7 の人工酸性雨に接触した結果、Amsoy の子実収量は人工酸性雨の pH の低下にともなって直線的に減少し、この減収は個体当たりの莢実数の減少により起こったことを報告している。著者らは、pH 2.0 の人工酸性雨の接触により個体当たりの総子実数が減少するが、一莢当たりの子実数の減少が原因であり、必ずしも上述の Evans *et al.* (1985) の実験結果とは一致しないことを示した(Kohno and Kobayashi, 1989b)。Table 4 に示したように、本実験では pH 2.0 の人工酸性雨の接触により、pH 5.6 に比較して、しいな数(Empty seed)が有意に増加した。つまり、実験

I および III における pH 2.0 の個体当たりの総子実数の減少は、しいな数の増加による一莢当たりの子実数の減少によるものであると考えられた。

人工酸性雨の接触にともなうしいな数増加の原因として、酸性溶液の接触にともなう受粉過程の直接的な阻害や体内栄養状態の悪化にともなう種子の発育停止が考えられる。Nakada *et al.* (1980) は、pH 3.2 以下の酸性溶液によりツバキの花粉管の伸長が著しく阻害されることを報告し、酸性雨により受粉過程が阻害される可能性を示唆している。しかしながら、マメ科であるダイズは、花器の形態的特徴から、雌しべならびに雄しべが降雨に直接曝されることは少なく、受粉過程が酸性雨の接触により直接阻害されるとは考えにくい。

本実験 I では、人工酸性雨接触開始後 7 週間目における pH 2.0 の葉面積は pH 5.6 の 76% であり、接触開始後 5 週間目と 7 週間目の間の乾物増加量は pH 5.6 の 73% であった。葉面積の低下率と乾物増加量の低下率がほぼ等しいことから、前述した通り、pH 2.0 における葉面積の減少が乾物生産を抑制したものと考えられた。また、接触開始後 7 週間目の pH 2.0 における莢実重は、莢数が低下しないにもかかわらず、pH 5.6 の 92% で、単位葉面積当たりの莢実乾物重量は pH 5.6 の 120% であった。さらに、5 週間目と 7 週間目の間の pH 2.0 における乾物増加量の低下率が、子実重量の低下率を上回ったことから、莢に対する同化産物の分配率は上昇していると考えられた。よって、pH 2.0 における子実収量の低下は、直接的には、葉面積低下にともなう子実への同化産物供給量の減少が原因であると判断された。前述したように、子実

Table 4 Seed yield characteristics of soybean plants as affected by simulated acid rain.¹⁾

Yield component	Experiment ²⁾	Rain pH			
		5.6	4.0	3.0	2.0
Dry seed weight per plant (g)	I	4.9 b ³⁾	5.2 b	4.9 b	4.1 a
	II	4.0 a	4.4 a	4.4 a	4.1 a
	III	7.3 b	7.7 b	6.7 b	4.9 a
Seed number per plant	I	19.1 b	20.6 c	19.5 bc	16.5 a
	II	20.8 ab	21.6 ab	22.7 b	20.3 a
	III	26.6 b	27.5 b	24.9 ab	20.9 a
Total pod number per plant	I	11.4 a	12.4 a	11.4 a	12.0 a
	II	10.9 a	11.8 ab	12.2 b	11.5 ab
	III	16.3 ab	16.7 ab	15.2 a	18.5 b
Seed setting pod number per plant	I	11.0 a	12.1 b	11.2 ab	10.7 a
	II	10.6 a	11.4 ab	11.9 b	11.0 ab
	III	15.3 b	15.0 ab	13.6 ab	12.3 a
Seed number per seed setting pod	I	1.7 b	1.7 b	1.8 b	1.6 a
	II	2.0 a	1.9 a	1.9 a	1.9 a
	III	1.6 b	1.7 b	1.6 b	1.1 a
Empty seed number per plant	I	2.4 a	2.7 a	2.6 a	5.9 b
	II	2.0 a	2.8 a	2.7 a	2.9 a
	III	5.5 a	4.9 a	4.2 a	12.3 b

1) Adapted from Kohno and Kobayashi, 1989b.

2) I: N=30, II: N=30, III: N=16.

3) Within a row means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's HSD multiple range test with 5%.

収量の減少要因である一莢当たりの子実数の減少ならびに稔実莢数の減少も、同化産物の減少が主な原因であると考えられた。

Lee *et al.* (1980) はハツカダイコンに人工酸性雨を接触し、植物の生育時期が違くと人工酸性雨の影響程度が異なることを示している。Table 4 に示したように、本実験Ⅱでは、個体当たりの子実重量が、pH 5.6 に比較して、pH 4.0, 3.0, 2.0 でそれぞれ 11%, 10%, 4% の増加を示し、実験ⅠおよびⅢのように pH 2.0 の人工酸性雨の接触による子実収量の低下は認められなかった。実験Ⅱの生育時期がⅠおよびⅢよりも約 3 カ月遅いことから、ダイズにおいても、生育時期が異なることにより、人工酸性雨の影響程度が変化することが考えられた。しかしながら、人工酸性雨の影響が植物の生育時期により変化する原因については明らかにされておらず、今後、検討を加える必要がある。

3.4 土壌 pH におよぼす影響

酸性雨の土壌影響が懸念されているが、農耕地土壌では施肥等の人為的な影響の方が酸性雨の影響よりも大きい。著者らは、施肥により低下した pH はダイズの生育にともない上昇するが、対照とした pH 5.6 に比較すると、pH 4.0 から 2.0 では土壌 pH が有意に低くなるこ

Table 5 pH values¹⁾ of cultivated soil after the harvest of soybean plants exposed to simulated acid rain for 9 weeks in experiment III.

Soil layer ²⁾	Rain pH			
	5.6	4.0	3.0	2.0
upper	5.48 c ³⁾	5.42 bc	5.37 b	4.88 a
middle	5.41 b	5.39 b	5.37 ab	5.28 a
lower	5.58 a	5.56 a	5.53 a	5.53 a

1) Soil: Deionized water = 1:2.5.

2) Soil layer; upper : 0~5 cm from soil surface, middle : 15~20 cm from soil surface, lower : 25~30 cm from soil surface.

3) Within a row means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's HSD multiple range test with 5% (N=6).

とを報告した (Kohno and Kobayashi, 1989a)。Table 5 に、実験Ⅲにおいて、模擬畑の土壌を表層(表面から 5 cm)、中層(15~20 cm)、下層(25~30 cm)の 3 層に分け、各土壌 pH について調査した結果を示した。

人工酸性雨の pH が低いほど栽培試験終了後の土壌 pH は低かった。また、本実験Ⅰで土壌 pH が低下した pH 3.0 と対照とした pH 5.6 の生育の間には統計的に有意差は認められず、生育の減退が観察された pH 2.0 でも土壌 pH の変化は少ないことから、人工酸性雨の接触にとも

なう土壤中 H^+ の増加は、ダイズの生育に対して直接的な影響をおよぼしてはいないものと判断された。

しかし、既に報告したように、人工酸性雨の pH が低いほど土壌 EC が高くなることから(Kohno and Kobayashi, 1989a), 人工酸性雨の接触にともなう人工酸性雨成分の土壌への蓄積と土壌中成分の溶出が考えられる。これらの土壌性状の変化と植物生育との相互関係については、今後さらにきめ細かい研究を行う必要がある。

3.5 おわりに

ダイズに pH 5.6, 4.0, 3.0 および 2.0 の人工酸性雨を接触した結果、pH 2.0 でダイズの生育が抑制された。生長解析を行ったところ、pH 2.0 の人工酸性雨の接触による害作用は、葉面積の生長阻害であると判断された。また、pH 3.0 でも、接触開始時には可視害が発現し生育が抑制される傾向が認められた。しかしながら、可視害の発現が見られなくなるのとはほぼ同時期に生育の低下も認められなくなり、ダイズでは、可視害の発生する pH レベルと生育抑制の起こる pH レベルに密接な関係があると考えられた。

生育と同様に、pH 2.0 では子実収量の低下が認められた。pH 2.0 では子実数の低下が認められたが、しいな数が増加し、一莢当りの子実数が減少したことが原因であった。単位葉面積当りの莢実収量が低下しなかったことから、収量の低下は葉面積生長の低下にともなう同化産物量の減少により引き起こされたものと考えられた。

以上のように pH 2.0 の人工酸性雨の接触によりダイズの生育および子実収量が低下したが、pH 3.0 以上では有意な影響が認められず、平均 pH が 4.5~4.7 程度の現状レベルの酸性雨では、農作物が急性的な被害を受けることはないものと思われる。しかしながら、酸性雨の影響を総合的に評価するためには、酸性雨により引き起こされるとされる植物体からの養分溶脱促進と生育の関係や、人工酸性雨の接触条件の違いによる影響の変化などについて未だ不明な点が多く残っている。さらに、自然環境条件下では、酸性雨の影響とともにガス状大気汚染物質の存在も考慮する必要があり、酸性雨の単独影響を評価するだけでは不十分であろう。今後の研究では、酸性雨の影響と他の汚染物質との相互作用を検討し、酸性雨の生態系への長期的な影響を明らかにすることが必要である。

4. 謝 辞

本論文をまとめるに当たり、御助言をいただいた千葉大学名誉教授の羽生寿郎教授、同園芸学部今久助教授、ならびに、実験に際し、多大の御協力をいただいた(株)

環境リサーチの篠崎玲子氏、千葉大学大学院自然科学研究科の岡野千春氏に深く感謝する。

引用文献

- Arny, C. J. and Pell, E. J., 1986: Ethylene production by potato, radish and soybean leaf tissue treated with simulated acid rain. *Envir. Exp. Bot.*, **26**, 9-15.
- 電力中央研究所, 1985: 「酸性雨の広域観測と解析」観測資料集. 昭和60年11月.
- Evans, L. S., 1982: Biological effects of acidity in precipitation on vegetation. A review. *Envir. Exp. Bot.*, **22**, 155-169.
- Evans, L. S., Lewin, K. F., Santucci, K. A. and Patti, M. J., 1985: Effects of frequency and duration of simulated acidic rain falls on soybean yields. *New. Phytol.*, **100**, 199-208.
- Jacobson, J. S., 1980: The influence of rainfall composition on the yield and quality of agricultural crops. *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Pricip.*, Norway 1980, SNSF project, 124-127.
- Johnston, J. W., Jr., Shriner, D. S., Klarer, C. I. and Lodge, D. M., 1982: Effect of rain pH on senescence, growth, and yield of bush bean. *Envir. Exp. Bot.*, **22**, 329-337.
- 環境庁, 1986: 昭和60年度関東地方におけるスギ林の衰退と酸性降下物の影響に関する緊急実態調査報告書. 昭和61年12月.
- Kohno, Y. and Kobayashi, T., 1989a: Effect of simulated acid rain on the growth of soybean. *Water, Air, and Soil Pollut.*, **43**, 11-19.
- Kohno, Y. and Kabayashi, T., 1989b: Effect of simulated acid rain on the yield of soybean. *Water, Air, and Soil Pollut.*, **45**, 173-181.
- Lee, J. J., Neely, G. E. and Perrigan, S. C., 1980: *Sulfuric acid rain effects on crop yield and folia injury*. U. S. EPA., EPA-600/3-80-016.
- Lee, J. J., Neely, G. E., Perrigan, S. C. and Grothaus, L. C., 1981: Effect of simulated sulfuric acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops. *Environ. Exp. Bot.*, **21**, 171-185.
- Nakada, M., Fukaya, K., Takeshita, S. and Wada, Y., 1980: Effects of inorganic components in acid rain on tube elongation of *Camellia* pollen. *Environ. Pollut. Ser. A*, **21**, 51-57.
- Sekiguchi, K., Hara, Y. and Ujiie, A., 1986: Dieback of *Cryptomeria Japonica* and distribution of acid deposition and oxidant in Kanto District. *Environmental Technology Letters*, **7**, 263-268.
- 玉置元則, 平木隆年, 1986: わが国各地における雨水pHの年平均値. 環境技術, **15**, 1-11.