

植物に対するパーオキシアセチルナイトレートの影響【修正版】

目次

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17

1.	はじめに.....	2
2.	PAN による葉面可視障害の発現	2
2.1.	葉の可視障害と大気 PAN 濃度の関係	3
2.2.	葉の可視障害と気孔からの PAN 吸収の関係	4
3.	植物の成長に対する PAN の影響	6
4.	植物の生理機能に対する PAN の影響	7
4.1.	光合成に対する影響	7
4.2.	脂質とチオール基に対する影響	9
5.	まとめ	10
6.	参考文献	10

18 1. はじめに

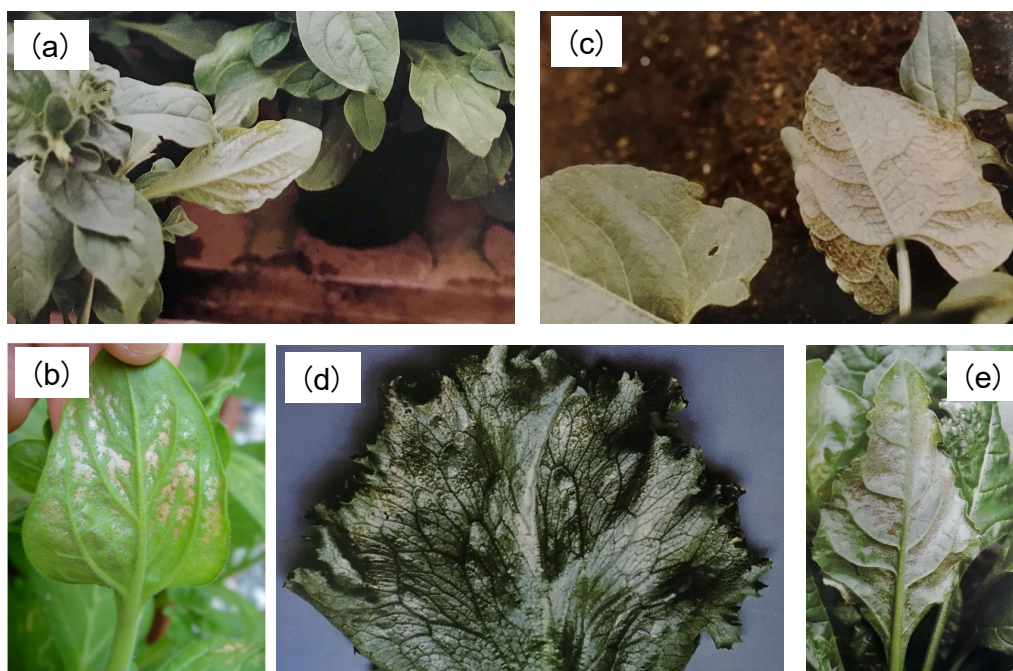
19 パーオキシアセチルナイトレート (peroxy acetyl nitrate, PAN) は、光化学オキシ
20 ダントを構成する酸化性物質のひとつである。

21 PAN の植物影響に関しては、1944 年に、米国のロサンゼルス地域で、レタスやホ
22 ウレンソウなどの農作物の葉の背軸面（裏面）に光沢化、ブロンズ化または銀白色化
23 と呼ばれる可視障害が発現した(Middleton *et al.*, 1950)。この葉裏面の可視障害を引
24 き起こす原因物質の究明が精力的に行われたが、それが PAN であることが証明され
25 たのは 1960 年である(Taylor *et al.*, 1960)。その後、米国では、1960 年代から 1970
26 年代にかけて、農作物に対する PAN の影響に関する実験的研究が行われた。日本にお
27 いては、PAN の植物影響に関する研究は極めて限られているが、1970 年代から 1990
28 年代にかけて東京都公害研究所（東京都環境科学研究所）、農業環境技術研究所、東京
29 都農業試験場、国立公害研究所（国立環境研究所）、東京農工大学などで、PAN の植
30 物影響に関する実験的研究が行われた。本資料では、主に日本国内の植物種を対象と
31 して、植物に対する PAN の影響を概説する。

32

33 2. PAN による葉面可視障害の発現

34 PAN は、若い葉の背軸面（裏面）に光沢化、青銅色化（ブロンズ化）、銀白化などの
35 可視障害症状（図 1）を発現する(野内ら, 1975)。一般に、オゾンは葉の向軸面（表面）
36 に可視障害を発現させるが、PAN は葉の背軸面（裏面）に可視障害を発現させる。こ
37 の理由として、PAN は葉組織の海綿状組織の細胞を選択的に攻撃するためであると考
38 えられる(野内, 2001)。PAN による葉の特徴的な可視障害の症状は、健全な下表
39 皮細胞とその内側の海綿状組織細胞の着色した壊死細胞との間にできた大きな空隙に
40 よって光が散乱した結果であると考えられている(野内, 2001)。



41
 42 図 1 パーオキシアセチルナイトレート (PAN) によるペチュニア(a,
 43 b), インゲンマメ(c), レタス(d), フダンソウ(e)の葉の可視障害(野
 44 内, 2002; 埼玉県環境科学国際センター). (a)は 1972 年 6 月に東京
 45 都立川市で, (b)は埼玉県で, (c)(d)及び(e)は 1974 年 5 月に東京都保
 46 谷市 (現・西東京市) で撮影された.

47
 48 植物が PAN による可視障害を発現するには、PAN の曝露前、曝露中及び曝露後に
 49 光に照射される必要があり、これらのどこかを暗黒にすると可視障害が抑制される
 50 (Mudd, 1975)。これらの事実は、PAN が植物における光化学プロセスの代謝経路にあ
 51 る何らかの組成物との反応を介して、植物に障害を与えている可能性を示している
 52 (Dugger *et al.*, 1963)。PAN による可視障害発現に光が必要である理由は明らかでは
 53 ないが、光が抗酸化防御機構を破壊するフリーラジカルの生成の開始剤となっている
 54 可能性が指摘されている(Wellburn, 1994)。

55 56 2.1. 葉の可視障害と大気 PAN 濃度の関係

57 ここでは、日本の植物を対象に、葉の可視障害と大気 PAN 濃度の関係などを調査し
 58 た知見を整理する。葉の可視障害に関して、日本国内ではペチュニア (*Petunia hybrida*)
 59 が研究によく用いられてきた。

60 野内(1979)は、ペチュニアの白色系品種であるホワイトエンサインを対象に、人工
 61 気象室を用いた PAN 曝露実験を 25,000 ルクスの照度下で行い、葉の可視障害を調査
 62 した。0.0075 ppm (7.5 ppb)、0.012 ppm、0.020 ppm、0.040 ppm の PAN を 1、2、
 63 4、8 時間、0.080 ppm の PAN を 1、2、4 時間、0.070 ppm、0.140 ppm の PAN を 1

64 時間曝露した結果、ホワイトエンサインの葉の可視障害発現閾値は 1 時間の PAN 曝
65 露で 0.032 ppm であり、3 時間曝露で 0.014 ppm、8 時間曝露で 0.007 ppm であるこ
66 とを報告している。

67 寺門と久野(1984)は、1974~1977 年に東京都立川市にて、野外又は FAC 内に植え
68 たペチュニア (品種: ホワイトエンサイン) を用い、PAN による葉の可視障害の発現
69 と大気 PAN 濃度との関係を調べた。その結果、大気 PAN 濃度が 2 ppb 未満の場合は
70 葉可視障害発生率が 20%以下であったが、3 ppb 以上になると 80%以上となり、ホワ
71 イトエンサインにおける PAN による葉の可視障害発生限界濃度は 3 ppb 前後である
72 と推測した。ペチュニアにおいて PAN に対して最も感受性が高いのは、未成熟な若
73 い葉 (ペチュニア株の先端から第 2 葉位~第 6 葉位) であった。また、ペチュニアの
74 品種間差異について調査したところ、白花系のペチュニアの品種 (ホワイトエンサイ
75 ン) は、青花系や赤花系の品種に比べて PAN 感受性が高かったと報告した。

76 野内ら(1984)は、東京都有楽町において、1976~1978 年及び 1982~1983 年の 4 月
77 初めから 11 月末日までの 8 か月間野外に生育しているペチュニア (品種: ホワイト
78 エンサイン) の葉の可視障害の発現と大気中の PAN 濃度との関係を調査した。その結
79 果、ホワイトエンサインにおける葉の可視障害の発生率は、PAN の日最高濃度または
80 一日の曝露量の増加に伴って増加することを報告した。なお、可視障害が発現した葉
81 面積と日最高濃度または PAN の一日の曝露量との間には有意な相関はみられなかつ
82 た。また、PAN の曝露量や気象条件により可視障害の出現が PAN 汚染日から 2~5 日
83 後と遅れたり、同程度の曝露量でも環境要因の変動により可視障害の程度が著しく変
84 化したりした。野外においてペチュニアに葉の可視障害が発現する可能性がある PAN
85 濃度は日最高濃度で 4 ppb であり、一日の曝露量 (8:00~18:00 の積算値) で 20 ppb・
86 h 程度とされた(野内, 1988)。

87 Izuta *et al.* (1993)は、ペチュニア (品種: ホワイトチャンピオン)、インゲンマメ
88 (*Phaseolus vulgaris*、品種: ホンキントキ) 及びハツカダイコン (*Raphanus sativus*、
89 品種: コメット) に自然光型ファイトトロン内で 10 ppb、30 ppb または 60 ppb の
90 PAN を 4 時間/日で 3 日間曝露した。実験は日平均積算日射量が $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を超
91 える 8 月に実施した。その結果、ペチュニアやインゲンマメにおいては 30 ppb また
92 は 60 ppb の PAN 曝露によって葉に可視障害が発現したが、ハツカダイコンではいず
93 れの濃度の PAN 曝露によっても葉に可視障害が発現しなかったことを報告している。

94

95 2.2. 葉の可視障害と気孔からの PAN 吸収の関係

96 Okano *et al.* (1990)は、気孔を介した葉の PAN 吸収速度と葉の可視障害の程度に
97 基づく PAN 感受性を調べるために、草本 9 種に人工光型グロースキャビネット内に
98 設置した透明アクリル製チャンバー内で 50 ppb または 100 ppb の PAN を 5 時間曝

99 露した。葉による PAN の吸収速度は、120 分間の明条件下ではほぼ一定レベルに保た
 100 れたが、暗条件下への切り替え後は急速に低下し、30~45 分以内にほぼゼロに達した
 101 (図 2)。これらの結果は、葉の表面への PAN の吸着は非常に小さく、そのほとんど
 102 が開いた気孔を通して葉内に吸収されることを示唆している。葉の PAN 吸収速度は、
 103 ヒマワリ>ハツカダイコン>トマト>ホウレンソウ>ペチュニア>ラッカセイ>タバ
 104 コ>ダイズ>トウモロコシの順に高かった(表 1)。曝露前と曝露後にそれぞれ可視
 105 障害の発現に必要な光を 3 時間照射した結果、葉の可視障害の程度に基づいた PAN
 106 感受性は、ペチュニア>タバコ=ハツカダイコン>トマト=ダイズ=ホウレンソウ=
 107 ヒマワリ>トウモロコシ=ラッカセイの順に高かった(表 1)。したがって、PAN の
 108 吸収速度と葉の可視障害の程度に基づいた PAN 感受性との間に有意な相関は認めら
 109 れなかった。この結果より、PAN 感受性における種間差異を決定する要因は、気孔を
 110 介した葉の PAN 吸収速度ではなく、葉内のいくつかの代謝プロセスにおける PAN 感
 111 受性であると考えられる。

112

113 表 1 草本 9 種の気孔を介した葉の PAN 吸収速度と PAN に対する
 114 感受性(Okano *et al.*, 1990).

115 葉の PAN 吸収速度(左の表)は、100 ppb の PAN を曝露して測定
 116 した。PAN 感受性(右の表)は、50 ppb または 100 ppb の PAN を
 117 5 時間にわたって曝露し、葉の可視障害の程度(-障害なし、+軽微
 118 な障害、++中程度の障害、+++著しい障害)を評価した。

植物種(学名)	PAN吸収速度 ($\times 10^{-5}$ g PAN dm ⁻² h ⁻¹)	PAN感受性(可視障害)		
		50 ppb PAN	100 ppb PAN	
ヒマワリ (<i>Helianthus annuus</i> L. cv. Russian Mammoth)	11.6±1.0	ペチュニア	++	+++
ハツカダイコン (<i>Raphanus sativus</i> L. cv. Comet)	9.1±1.0	タバコ	-	++
トマト (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill cv. Fukuju No. 2)	7.2±0.5	ハツカダイコン	-	++
ホウレンソウ (<i>Spitacia oleracea</i> L. cv. New Asia)	7.0±0.5	トマト	-	+
ペチュニア (<i>Petunia hybrida</i> Vilm cv. Mitchell)	6.7±0.6	ダイズ	-	+
ラッカセイ (<i>Arachis hypogaea</i> L. cv. Chiba-handachi)	3.8±0.7	ホウレンソウ	-	+
タバコ (<i>Nicotiana tabacum</i> L. cv. Xanthi NC)	3.3±0.5	ヒマワリ	-	+
ダイズ (<i>Glycine max</i> Merr. cv. Waseshiratori)	2.7±0.7	トウモロコシ	-	-
トウモロコシ (<i>Zea mays</i> L. cv. Dento)	1.3±0.6	ラッカセイ	-	-

119

120

121

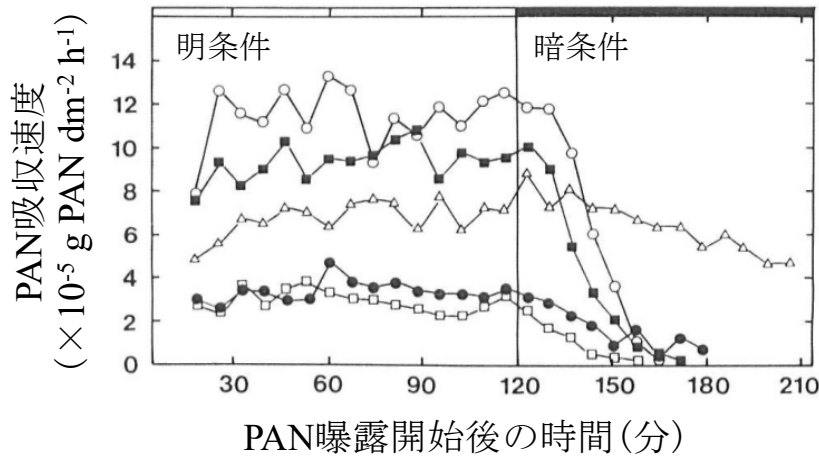
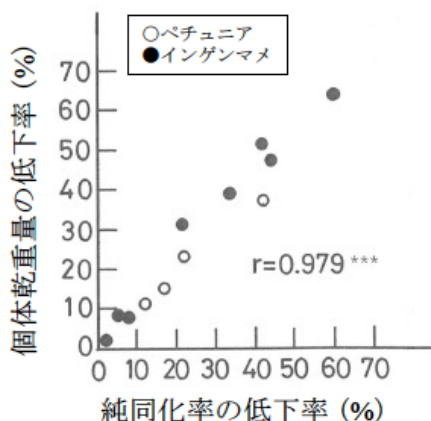


図 2 ヒマワリ (○)、ハツカダイコン (■)、ハウレンソウ (△)、タバコ (●) 及びダイズ (□) の葉の PAN 吸収速度の時間変化 (Okano *et al.*, 1990)。各植物に、100 ppb の PAN を明条件下 (120 分間) と暗条件下 (90 分間) で曝露し、葉の PAN 吸収速度を測定した。

3. 植物の成長に対する PAN の影響

農作物や樹木の成長に対する PAN の影響に関する知見は極めて限られている。 Temple and Taylor (1985) は、PAN とオゾンがトマト (*Lycopersicon esculentum*) の 4 つの品種の成長に及ぼす複合影響を調べた。4 週齢のトマトに、0 ppb、50 ppb または 100 ppb の PAN と 0 ppb、102 ppb または 204 ppb のオゾンを組み合わせて、4 時間/日で 3 回/週で 3 週間にわたって曝露し、最後の曝露から 1 週間後にサンプリングした。なお、曝露期間中の光合成有効放射束密度 (PPFD) の平均値は $385 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。102 ppb のオゾンで微量の葉の可視障害 (葉の 1% 程度) が発現し、204 ppb のオゾンでは中程度の葉の可視障害 (葉の 30~50% 程度) が出現した。PAN は、単独またはオゾンとの組み合わせでも葉に可視障害を発現させず、オゾンによる葉の可視障害に影響を与えなかった。4 品種の葉の可視障害に基づくオゾン感受性は、Heinz 1350 > Tiny Tim > Ace > Pyxie の順に高かった。オゾン曝露は、4 品種のトマトの成長を低下させた。また、PAN 曝露もトマトの成長を低下させたが、統計的に有意な低下ではなかった。オゾンと PAN のトマトの成長に対する複合影響は相殺的影響であったが、地上部乾重量と根乾重量の比率に対する複合影響は相乗的影響であった。この違いは、オゾンと PAN の複合曝露は、葉の成長と比較して、根の成長をより著しく抑制したことに起因している。Izuta *et al.* (1993) は、ペチュニア (品種: ホワイトチャンピオン)、インゲンマメ (品種: ホンキントキ) 及びハツカダイコン (品種: コメット) に 10 ppb、30 ppb または 60 ppb の PAN を 4 時間/日で 3 日間にわたって曝露した。実験は日平均積算日射量が $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を超える 8 月に実施した。

148 その結果、30 ppb または 60 ppb の PAN 曝露によってペチュニアとインゲンマメの
 149 乾物成長は低下したが、ハツカダイコンの乾物成長は有意な影響を受けなかった。ペ
 150 チュニアとインゲンマメにおいては、PAN による個体乾重量の低下率と純同化率
 151 (NAR: net assimilation rate) の低下率との間に正の相関が認められた (図 3)。こ
 152 の結果は、PAN によるペチュニアとインゲンマメの個体乾物成長の低下は、葉におけ
 153 る同化産物の生産効率の低下が原因であることを示唆している。
 154



155
 156 図 3 ペチュニアとインゲンマメの PAN 曝露による純同化率 (NAR)
 157 の低下率と個体乾重量の低下率の関係 (Izuta *et al.*, 1993)
 158 ペチュニア (品種: ホワイトチャンピオン) とインゲンマメ (品種:
 159 ホンキントキ) に、10 ppb、30 ppb または 60 ppb の PAN を 4 時
 160 間/日で 3 日間にわたって曝露した。
 161 成長パラメータの低下率 (%) = 100 - (PAN を曝露された植物の成
 162 長パラメータ / 浄化空気を曝露された植物の成長パラメータ) × 100
 163

164 4. 植物の生理機能に対する PAN の影響

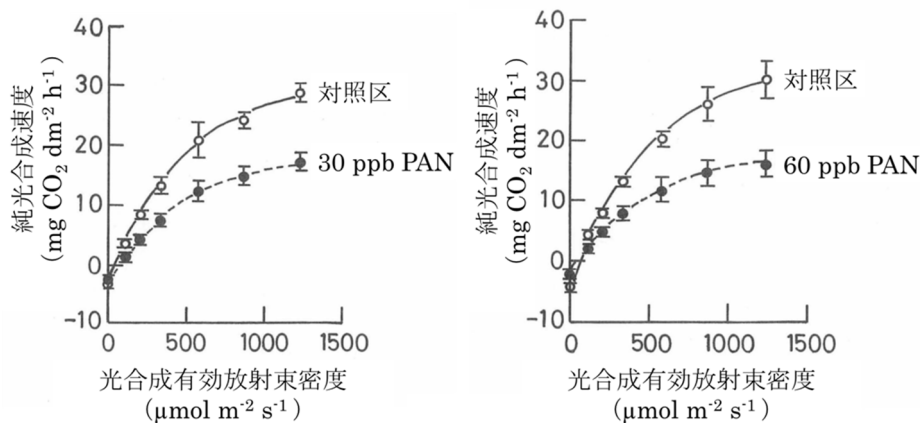
165 植物の生理生化学的機能に対する PAN の影響やそのメカニズムは、米国で 1960 年
 166 代に精力的に研究された。しかしながら、1970 年代以降は PAN の植物影響に関する
 167 研究が少なくなったため、PAN の植物影響のメカニズムは未解明である。なお、PAN
 168 とオゾンはどちらも光化学オキシダントの一種であるが、両者の光合成などの生理生
 169 化学的機能に対する影響は異なる。
 170

171 4.1. 光合成に対する影響

172 光合成における PAN 感受性は、他の生理生化学的機能におけるそれに比べて高い
 173 (野内, 2001)。600 ppb の PAN に 30 分間にわたって曝露された植物から単離された
 174 葉緑体は、酸素発生が阻害されるが、光リン酸化は影響を受けなかった (Dugger *et al.*,

175 1965)。また、単離されたホウレンソウの葉緑体では、PAN によって光合成における
 176 光化学系 I と光化学系 II (PS) の両方の電子伝達系が阻害された(Coulson and Heath,
 177 1975)。野内(1988)は、インゲンマメに 0.095 ppm の PAN を同化箱中で 4 時間曝露し
 178 た結果、葉に水浸状症状の可視障害が発生しない間は純光合成速度と蒸散速度は低下
 179 しなかったが、葉に水浸状症状が拡大すると急激にそれらが著しく低下したことを報
 180 告している。この結果は、PAN が葉に可視障害症状を発現しない間は気孔開度に影響
 181 しないことや曝露終了後も葉緑体の構造を破壊することを示唆している。PAN によ
 182 る光合成阻害が発現するには、PAN 曝露中と曝露後に光が必要である(Koukol *et al.*,
 183 1967)。Izuta *et al.* (1993)は、ペチュニア (品種: ホワイトチャンピオン) の純光合
 184 成速度は 30 ppb または 60 ppb の PAN を 4 時間/日で 3 日間曝露すると有意に低下し
 185 たことを報告している。この時、PAN 曝露によって、ペチュニアの光-光合成曲線の初
 186 期勾配 (量子収率) と光飽和純光合成速度は有意に低下し、暗呼吸速度は 60 ppb の
 187 PAN 曝露によって有意に低下したが、CO₂ 気孔拡散抵抗 (気孔を通じて行われる二酸
 188 化炭素の拡散に対する抵抗、気孔コンダクタンスの逆数) に有意な影響は認められな
 189 かった (図 4)。これらの結果は、PAN によるペチュニアの純光合成速度の低下の原
 190 因は、気孔閉鎖ではなく、主に葉緑体における光合成能力の低下であることを示唆し
 191 ている。

192
 193
 194



195

196 図 4 ペチュニア (品種: ホワイトチャンピオン) の純光合成速度に
 197 に対する PAN の影響(Izuta *et al.*, 1993)。ペチュニアに 30 ppb また
 198 は 60 ppb の PAN を 4 時間/日で 3 日間曝露後、純光合成速度を測
 199 定した。図中の値とバーは、それぞれ 4 個体の平均値と標準偏差を
 200 示している。

201

202 4.2. 脂質とチオール基に対する影響

203 PAN は、不飽和炭化水素（オレフィン）の二重結合と反応し、エポキサイドを生成
204 し、脂質の生合成に影響を与えることが報告されている(Mudd, 1975)。また、PAN は
205 アミンと反応してアミドを生成する。そのため、PAN は膜のタンパク質と脂質に影響
206 を与える可能性がある(野内, 2001)。PAN は、NADPH を酸化し、アセテートの長鎖
207 脂肪酸への結合を阻害するため(Mudd and Dugger, 1963)、葉の膜脂質を変化させる
208 可能性がある。

209 Nouchi and Toyama (1988)は、インゲンマメを人工光型曝露チャンバー内（中央の
210 光強度は約 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）に設置した透明アクリル製チャンバーで 100 ppb の
211 PAN に 8 時間曝露したところ、曝露開始から 4 時間までは葉に可視障害が発現せず、
212 リン脂質、糖脂質及び全脂肪酸含量はほとんど変化しないが、曝露開始後 6 時間目に
213 葉に水浸状症状や萎れ症状が現れ始め、リン脂質と糖脂質が減少し、全脂肪酸含量の
214 減少と共にマロンジアルデヒド（MDA, $\text{CH}_2(\text{CHO})_2$ ）含量が増加したことを報告して
215 いる（図 5）。MDA は、生体内で、不飽和結合を 2 つ以上持つ多価不飽和脂肪酸が活
216 性酸素種によって非酵素的に酸化されると生成されるため、酸化ストレスの指標であ
217 る。これらの結果から、PAN は葉緑体のチラコイド膜の脂質を直接的に攻撃し、膜構
218 造の崩壊と細胞死を導いていると推定される(野内, 2001)。さらに、野内(1988)は、
219 PAN によるクロロフィルと脂肪酸の分解及び MDA の生成がスーパーオキシドアニオン
220 (O_2^-) に起因しているが、極性脂質の分解には活性酸素種は関与していないことを
221 報告している。この結果は、PAN の酸化的作用が少なくとも 2 つの経路で進行してい
222 ることを示している。すなわち、初期ステージでは、極性脂質に対する酸化剤として
223 の PAN の作用であり、後期ステージではクロロフィルと脂肪酸に対する酸化剤とし
224 ての O_2^- の作用である(野内, 2001)。PAN は、酵素のチオール基（SH 基）や含硫アミ
225 ノ酸のようなイオウを含む低分子の化合物と強く反応し、S-S 結合や S-acetyl 基を生
226 成する(野内, 2001)。SH 基を持たない酵素は PAN による影響を受けないが(Mudd and
227 Dugger, 1963)、SH 酵素（活性発現に SH 基が関与している酵素）の活性は PAN 曝露
228 によって阻害されることが報告されている(Taylor, 1969; Mudd, 1975)。

229

230

231

232

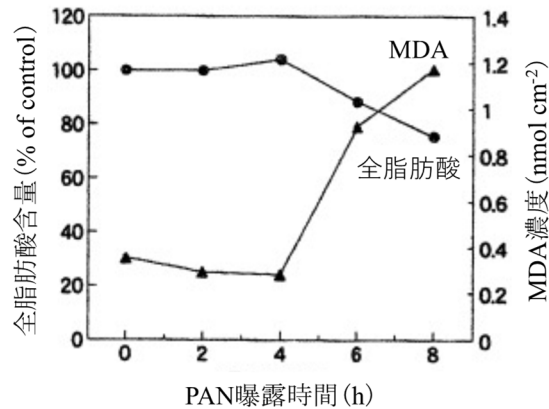


図 5 100 ppb の PAN 曝露中 (8 時間) におけるインゲンマメの葉の全脂肪酸とマロンジアルデヒド (MDA) の含量の変化 (Nouchi and Toyama, 1988; 野内, 2001).

233
234
235
236
237

238 5. まとめ

239 本資料では、主に日本国内の植物種を対象として、植物に対する PAN の影響を概
240 説した。PAN の植物影響に関する研究は極めて限られているが、大気中の PAN は葉
241 に存在する気孔を介して葉内に吸収され、感受性が高い植物種においては葉に可視障
242 害が発現し、成長や光合成などの生理機能の低下が引き起こされることが示されてい
243 る。

244

245 6. 参考文献

- 246 Coulson, C.L. & Heath, R.L. (1975) The interaction of peroxyacetyl nitrate (PAN)
247 with the electron flow of isolated chloroplasts. *Atmospheric Environment*
248 (1967), 9, 231-238.
- 249 Dugger, W.M., Jr., Mudd, J.B. & Koukol, J. (1965) Effect of PAN on certain
250 photosynthetic reactions. *Archives of Environmental Health: An*
251 *International Journal*, 10, 195-200.
- 252 Dugger, W.M., Jr., Taylor, O.C., Klein, W.H. & Shropshire, W., Jr. (1963) Action
253 spectrum of peroxyacetyl nitrate damage to bean plants. *Nature*, 198, 75-
254 76.
- 255 Izuta, T., Matsumura, H., Ohashi, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Effects of
256 peroxyacetyl nitrate on the growth of petunia, kidney bean and radish
257 plants. *Environmental Sciences*, 2, 63-75.
- 258 Koukol, J., Dugger, W.M., Jr. & Palmer, R.L. (1967) Inhibitory effect of
259 peroxyacetyl nitrate on cyclic photophosphorylation by chloroplasts from

- 260 black valentine bean leaves. *Plant Physiology*, 42, 1419-1422.
- 261 Middleton, J.R., Kendrick, J.B., Jr. & Schwalm, H.W. (1950) Injury to herbaceous
262 plants by smog or air-pollution. *Plant Disease Report*, 34, 245-252.
- 263 Mudd, J.B. & Dugger, W.M., Jr. (1963) The oxidation of reduced pyridine
264 nucleotides by peroxyacyl nitrates. *Archives of Biochemistry and*
265 *Biophysics*, 102, 52-58.
- 266 Mudd, J.B. (1975) Peroxyacyl nitrates. In *Responses of Plants to Air Pollution*,
267 Mudd, J. B. & Kozlowski, T. T., (eds.) Academic Press: pp. 97-119.
- 268 Nouchi, I. & Toyama, S. (1988) Effects of ozone and peroxyacetyl nitrate on polar
269 lipids and fatty acids in leaves of morning glory and kidney bean. *Plant*
270 *Physiology*, 87, 638-646.
- 271 Okano, K., Tobe, K. & Furukawa, A. (1990) Foliar uptake of peroxyacetyl nitrate
272 (PAN) by herbaceous species varying in susceptibility to this pollutant.
273 *New Phytologist*, 114, 139-145.
- 274 Taylor, O.C. (1969) Importance of peroxyacetyl nitrate (PAN) as a phytotoxic air
275 pollutant. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 19, 347-351.
- 276 Taylor, O.C., Stephens, E.R., Darley, E.F. & Cardiff, E.A. (1960) Effect of airborne
277 oxidants on leaves of pinto bean and petunia. *Proceedings of the American*
278 *Society for Horticultural Science*, 75, 435-444.
- 279 Temple, P.J. & Taylor, O.C. (1985) Combined effects of peroxyacetyl nitrate and
280 ozone on growth of four tomato cultivars. *Journal of Environmental*
281 *Quality*, 14, 420-424.
- 282 Wellburn, A. (1994) Ozone, PAN and photochemical smog. In *Air Pollution and*
283 *Climate Change: The Biological Impact*, Second ed.; Longman Scientific
284 and Technical, Wiley: pp. 123-144.
- 285 埼玉県環境科学国際センター 「光化学スモッグ」って植物にも悪影響を及ぼすの？.
286 <https://www.pref.saitama.lg.jp/cess/cess-kokosiri/cess-koko7.html>
287 (accessed 2023.9.7).
- 288 寺門和也, 久野春子. (1984) PAN 発生動向とペチュニアの被害. 東京都農業試験場研
289 究報告, 17, 1-11.
- 290 野内 勇. (1979) オゾン, PAN の濃度および暴露時間と植物被害. 大気汚染学会誌, 14,
291 489-496.
- 292 野内 勇. (1988) 光化学オキシダント (オゾンおよびパーオキシアセチルナイトレー
293 ト) による植物葉被害および被害発現機構. 農業環境技術研究所報告, 5, 1-
294 121.

- 295 野内 勇. (2001) パーオキシアセチルナイトレート (PAN) . 野内 勇 (編) 大気環境
296 変化と植物の反応, 養賢堂, pp. 97-112.
- 297 野内 勇. (2002) 大気汚染による植物被害(4), 光化学オキシダント被害(4), 野外で
298 発生した PAN による 草本植物の被害. 大気汚染による植物被害写真集. 大
299 気環境学会植物分科会・農業環境技術研究所.
- 300 野内 勇, 飯島 勉, 大平俊男. (1975) 植物に及ぼすパーオキシアセチルナイトレード
301 (PAN)の影響 I. PAN による草本植物の被害症状. 大気汚染研究, 9, 635-643.
- 302 野内 勇, 大橋 毅, 早福正孝. (1984) 東京都内における環境大気 PAN 濃度とその指標
303 植物としてのペチュニアの葉被害. 大気汚染学会誌, 19, 392-402.
- 304