

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 1. はじめに.....2

7 2. PAN による葉面可視障害の発現2

8 2.1. 葉の可視障害と大気 PAN 濃度の関係3

9 2.2. 葉の可視障害と気孔からの PAN 吸収の関係4

10 3. 植物の成長に対する PAN の影響6

11 4. 植物の生理機能に対する PAN の影響7

12 4.1. 光合成に対する影響7

13 4.2. 脂質とチオール基に対する影響9

14 5. まとめ10

15 6. 参考文献10

16

17

18 1. はじめに

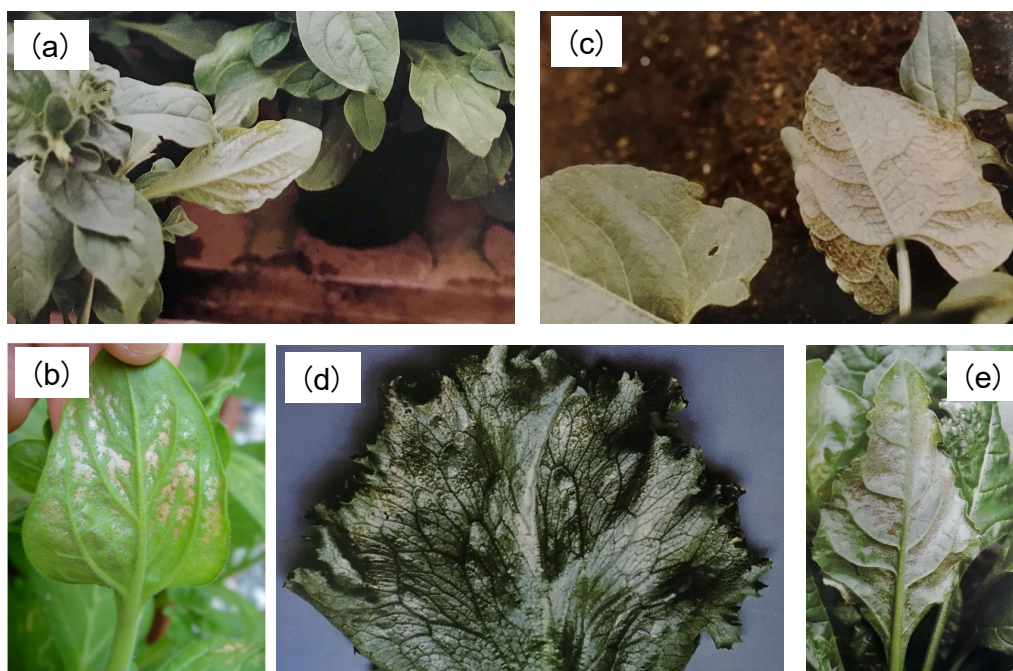
19 パーオキシアセチルナイトレート (peroxy acetyl nitrate, PAN) は、光化学オキシ
20 ダントを構成する酸化性物質のひとつである。

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 えられている(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 MJ m⁻² 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 が開いた気孔を通過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 (品種: ロシアンマンモス) > ハツカダイコン (品種: コメット) > トマト
 104 (品種: 福寿 2 号) > ホウレンソウ (品種: ニューアジア) > ペチュニア (品種: ミ
 105 シェル) > ラッカセイ (品種: 千葉半立) > タバコ (品種: Xanthi NC) > ダイズ (品
 106 種: 早生白鳥) > トウモロコシ (品種: デント) の順に高かった (表 1)。曝露前と
 107 曝露後にそれぞれ可視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
 108 程度に基づいた PAN 感受性は、ペチュニア > タバコ = ハツカダイコン > トマト = ダ
 109 イズ = ホウレンソウ = ヒマワリ > トウモロコシ = ラッカセイの順に高かった (表 1)。
 110 したがって、PAN の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
 111 有意な相関は認められなかった。この結果より、PAN 感受性における種間差異を決定
 112 する要因は、気孔を介した葉の PAN 吸収速度ではなく、葉内のいくつかの代謝プロ
 113 セスにおける PAN 感受性であると考えられる。

114

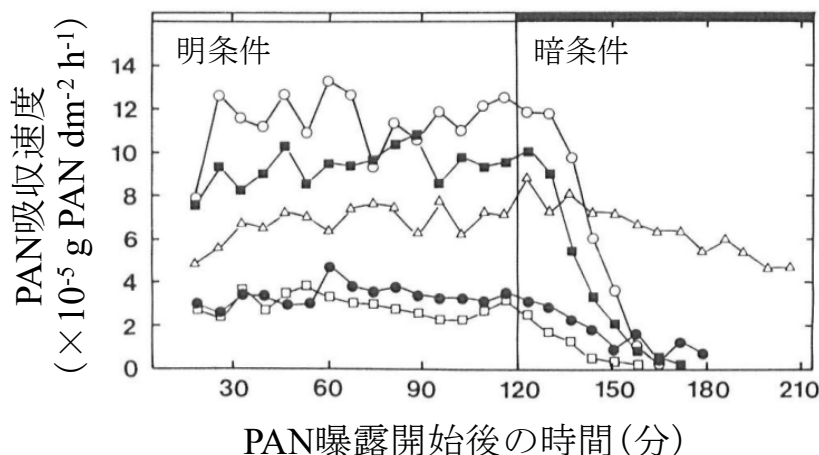
115 表 1 草本 9 種の気孔を介した葉の PAN 吸収速度と PAN に対する
 116 感受性 (Okano *et al.*, 1990).

117 葉の PAN 吸収速度 (左の表) は、100 ppb の PAN を曝露して測定
 118 した。PAN 感受性 (右の表) は、50 ppb または 100 ppb の PAN を
 119 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
 120 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>Spiitacia 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	-	-

121

122



124

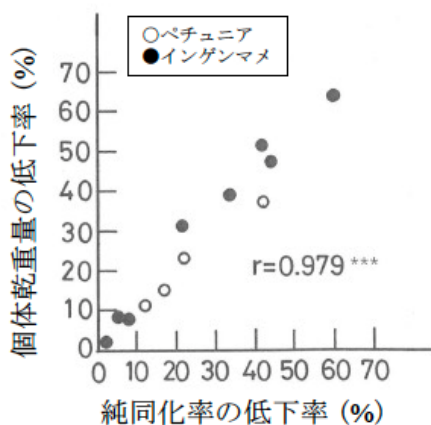
125 図 2 ヒマワリ (○)、ハツカダイコン (■)、ホウレンソウ (△)、
 126 タバコ (●) 及びダイズ (□) の葉の PAN 吸収速度の時間変化 (Okano
 127 *et al.*, 1990)。各植物に、100 ppb の PAN を明条件下 (120 分間)
 128 と暗条件下 (90 分間) で曝露し、葉の PAN 吸収速度を測定した。

129

130 3. 植物の成長に対する PAN の影響

131 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。
 132 Temple and Taylor (1985) は、PAN とオゾンがトマト (*Lycopersicon esculentum*)
 133 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
 134 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
 135 時間/日で 3 回/週で 3 週間におわたって曝露し、最後の曝露から 1 週間後にサンプリン
 136 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 $385 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
 137 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
 138 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、
 139 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
 140 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、
 141 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
 142 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
 143 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
 144 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
 145 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
 146 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
 147 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
 148 種: コメット) に 10 ppb、30 ppb または 60 ppb の PAN を 4 時間/日で 3 日間におわた

149 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。
 150 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
 151 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
 152 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
 153 (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
 154 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
 155 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。
 156



157
 158 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)
 159 の低下率と個体乾重量の低下率の関係 (Izuta *et al.*, 1993)
 160 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:
 161 ホンキントキ) に、10 ppb、30 ppb または 60 ppb の PAN を 4 時
 162 間/日で 3 日間にわたって曝露した。
 163 成長パラメータの低下率 (%) = $100 - (\text{PAN を曝露された植物の成長パラメータ} / \text{浄化空気を曝露された植物の成長パラメータ}) \times 100$
 164
 165

166 4. 植物の生理機能に対する PAN の影響

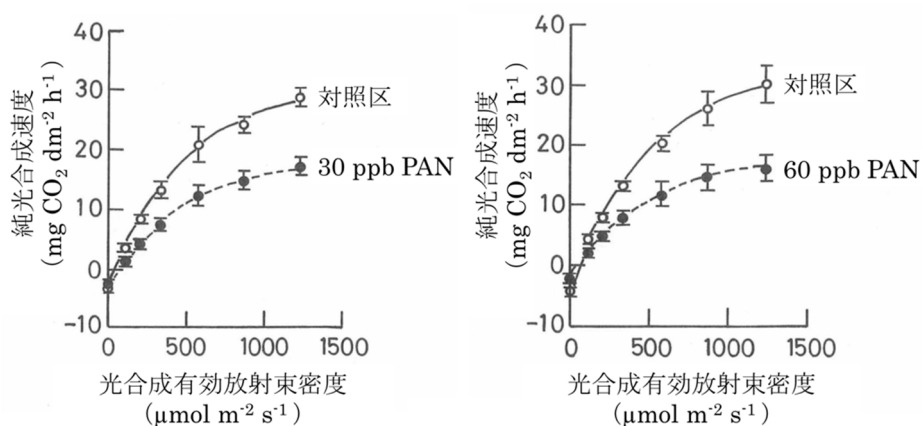
167 植物の生理生化学的機能に対する PAN の影響やそのメカニズムは、米国で 1960 年
 168 代に精力的に研究された。しかしながら、1970 年代以降は PAN の植物影響に関する
 169 研究が少なくなったため、PAN の植物影響のメカニズムは未解明である。なお、PAN
 170 とオゾンはどちらも光化学オキシダントの一種であるが、両者の光合成などの生理生
 171 化学的機能に対する影響は異なる。
 172

173 4.1. 光合成に対する影響

174 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
 175 (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

176 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.*,
 177 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
 178 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,
 179 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
 180 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
 181 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
 182 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
 183 しないことや曝露終了後でも葉緑体の構造を破壊することを示唆している。PAN によ
 184 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.*,
 185 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
 186 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
 187 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
 188 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
 189 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
 190 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
 191 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
 192 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
 193 ている。

194
 195
 196



197
 198 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
 199 対する PAN の影響(Izuta *et al.*, 1993)。ペチュニアに 30 ppb また
 200 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
 201 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
 202 示している。

203

204 4.2. 脂質とチオール基に対する影響

205 PAN は、不飽和炭化水素（オレフィン）の二重結合と反応し、エポキシサイドを生成
206 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
207 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
208 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
209 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
210 可能性がある。

211 Nouchi and Toyama (1988)は、インゲンマメ（品種：銀手忘）を人工光型曝露チャ
212 ンバー内（中央の光強度は約 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）に設置した透明アクリル製チャンバ
213 ーで 100 ppb の 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
214 障害が発現せず、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
215 開始後 6 時間目に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、
216 全脂肪酸含量の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
217 ことを報告している (図 5)。MDA は、生体内で、不飽和結合を 2 つ以上持つ多価不
218 飽和脂肪酸が活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
219 レスの指標である。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
220 に攻撃し、膜構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
221 内(1988)は、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
222 キシドアニオン (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
223 いないことを報告している。この結果は、PAN の酸化的作用が少なくとも 2 つの経路
224 で進行してい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
225 酸化剤としての 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
226 る酸化剤としての O_2^- の作用である (野内, 2001)。PAN は、酵素のチオール基 (SH 基)
227 や含硫アミ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-
228 acetyl 基を生成する (野内, 2001)。SH 基を持たない酵素は PAN による影響を受けな
229 いが (Mudd and Dugger, 1963)、SH 酵素（活性発現に SH 基が関与している酵素）の
230 活性は PAN 曝露によって阻害されることが報告されている (Taylor, 1969; Mudd,
231 1975)。

232

233

234

235

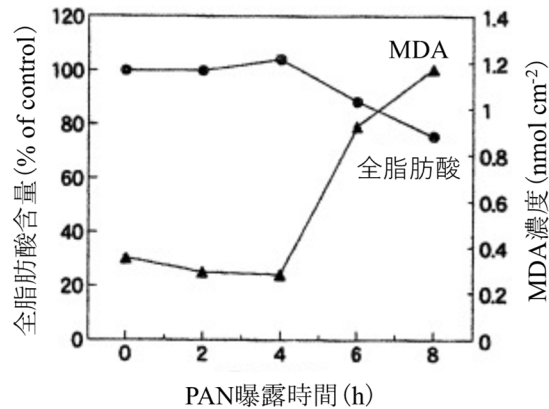


図 5 100 ppb の PAN 曝露中 (8 時間) におけるインゲンマメの葉の全脂肪酸とマロンジアルデヒド (MDA) の含量の変化 (Nouchi and Toyama, 1988; 野内, 2001).

236

237

238

239

240

241 5. まとめ

242 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
 243 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
 244 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
 245 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
 246 る。

247

248 6. 参考文献

249 Coulson, C.L. & Heath, R.L. (1975) The interaction of peroxyacetyl nitrate (PAN)
 250 with the electron flow of isolated chloroplasts. *Atmospheric Environment*
 251 (1967), 9, 231-238.

252 Dugger, W.M., Jr., Mudd, J.B. & Koukol, J. (1965) Effect of PAN on certain
 253 photosynthetic reactions. *Archives of Environmental Health: An*
 254 *International Journal*, 10, 195-200.

255 Dugger, W.M., Jr., Taylor, O.C., Klein, W.H. & Shropshire, W., Jr. (1963) Action
 256 spectrum of peroxyacetyl nitrate damage to bean plants. *Nature*, 198, 75-
 257 76.

258 Izuta, T., Matsumura, H., Ohashi, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Effects of
 259 peroxyacetyl nitrate on the growth of petunia, kidney bean and radish
 260 plants. *Environmental Sciences*, 2, 63-75.

261 Koukol, J., Dugger, W.M., Jr. & Palmer, R.L. (1967) Inhibitory effect of
 262 peroxyacetyl nitrate on cyclic photophosphorylation by chloroplasts from

- 263 black valentine bean leaves. *Plant Physiology*, 42, 1419-1422.
- 264 Middleton, J.R., Kendrick, J.B., Jr. & Schwalm, H.W. (1950) Injury to herbaceous
265 plants by smog or air-pollution. *Plant Disease Report*, 34, 245-252.
- 266 Mudd, J.B. & Dugger, W.M., Jr. (1963) The oxidation of reduced pyridine
267 nucleotides by peroxyacyl nitrates. *Archives of Biochemistry and*
268 *Biophysics*, 102, 52-58.
- 269 Mudd, J.B. (1975) Peroxyacyl nitrates. In *Responses of Plants to Air Pollution*,
270 Mudd, J. B. & Kozlowski, T. T., (eds.) Academic Press: pp. 97-119.
- 271 Nouchi, I. & Toyama, S. (1988) Effects of ozone and peroxyacetyl nitrate on polar
272 lipids and fatty acids in leaves of morning glory and kidney bean. *Plant*
273 *Physiology*, 87, 638-646.
- 274 Okano, K., Tobe, K. & Furukawa, A. (1990) Foliar uptake of peroxyacetyl nitrate
275 (PAN) by herbaceous species varying in susceptibility to this pollutant.
276 *New Phytologist*, 114, 139-145.
- 277 Taylor, O.C. (1969) Importance of peroxyacetyl nitrate (PAN) as a phytotoxic air
278 pollutant. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 19, 347-351.
- 279 Taylor, O.C., Stephens, E.R., Darley, E.F. & Cardiff, E.A. (1960) Effect of airborne
280 oxidants on leaves of pinto bean and petunia. *Proceedings of the American*
281 *Society for Horticultural Science*, 75, 435-444.
- 282 Temple, P.J. & Taylor, O.C. (1985) Combined effects of peroxyacetyl nitrate and
283 ozone on growth of four tomato cultivars. *Journal of Environmental*
284 *Quality*, 14, 420-424.
- 285 Wellburn, A. (1994) Ozone, PAN and photochemical smog. In *Air Pollution and*
286 *Climate Change: The Biological Impact*, Second ed.; Longman Scientific
287 and Technical, Wiley: pp. 123-144.
- 288 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？.
289 <https://www.pref.saitama.lg.jp/cess/cess-kokosiri/cess-koko7.html>
290 (accessed 2023.9.7).
- 291 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
292 究報告, 17, 1-11.
- 293 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,
294 489-496.
- 295 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
296 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-
297 121.

- 298 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
299 変化と植物の反応, 養賢堂, pp. 97-112.
- 300 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
301 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
302 気環境学会植物分科会・農業環境技術研究所.
- 303 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
304 (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.
- 305 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
306 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.
- 307