光合成速度，エチレン生成量からみた踏圧強度と芝生の生育との関係について

近 藤 三 雄*

Growth of Lawn When Studied with Regard to Photosynthetic Rate and Formation of Ethylene-Effect of Treading.

Mitsuo KONDO

摘要：本研究では芝生の収容力を究明する一環として、踏圧強度と芝生の生育との関係を生理的レベルで検証することを意図した。その結果、毎日15回連続30日間、踏圧を加えた芝生の茎葉は草丈、葉長の生育が著しく抑制されるなど損耗し、光合成速度も無踏圧の芝生に比べて半減することなどが判明した。なお、草丈、葉長などが著しく抑制されるのは芝生に踏圧が加わることによって生成されるエチレンの作用によるものであることが判明した。

緒 言

本研究においては、芝生の収容力を解明する研究の一環として、踏圧の有無・強度の違いが芝生の生育に及ぼす影響を生理的レベルで究明することを意図した。本研究に関する従前の研究は、踏圧強度と芝生の損傷度合、あるいは生育量などに注目したものばかりであり、芝生面に過度の踏圧が加わることによって芝生の生理的機能は、いかなる状態となるのかなどの点について究明した研究事例は皆無である。また、芝生に踏圧が加わることによって草丈、葉長が著しく抑制されるという現象は、経験的によく知られていることであるが、踏圧が加わることによって何故、草丈、葉長の生育が抑制されるかなどの因果関係については全く明らかにされていない。このような背景から本研究においては、植物の生命維持や生育を支える最も重要な機能といえる光合成能が過度の踏圧を受けることによって、いかなる状態となるのかを実証すること、また、国内外の農学の諸分野で明らかとなりつつある「踏む、触れるなどの接触刺激（物理的ストレス）を植物に加えることによって茎葉から植物ホルモンの一種であるエチレンが生成され、このエチレンの作用によって植物の地上部の生育が著しく抑制される」という指摘¹⁾²⁾³⁾⁴⁾を基に、芝生に加わる踏圧強度の違いによる芝生の生育反応をエチレン生成量との関係から究明することを意図した。さらに、これらの成果を基に芝生地の利用の限界点、すなわち収容力について言及することを目論んだ。

実験方法

1.踏圧の有無が芝生の生育ならびに光合成速度に及ぼす影響について

本実験においては、過度の踏圧によって芝生が損耗した場合、光合成速度が、いかなる状態となるかを検証することを目的に以下の方法で実験を行った。

(1)実験材料ならびに実験区の設定

東京都世田谷区にある東京農業大学の実験圃場に育成しているコウライシバ (*Zoysia matrella* Merr.)のターフ (turf) を昭和59年6月9日に内径10cmのホールカッターで採取し、腐植性火山灰土（黒土）を充填した内径11.3cm、深さ6.3cmの1/10,000a NEUBAUER'S POTに植込み、8月10日まで約60日間養生したものを実験用芝生とした。なお、1/10,000aの大きさの実験ポットに植込んだのは、光合成速度測定上の便宜によるものである。

実験区については、過度な踏圧が加わった場合、芝生の光合成速度が、いかなる状態になるのかを把握するために、養生しておいた実験用芝生を用い、体重63kgの人間が8月11日から連続して30日間、麦踏みの要領で1日当り15回の踏圧を加えた実験区：30日間踏圧区（芝生面にかかる接地圧に換算すると人間の運動時の平均接地圧 $0.4\text{ kg/cm}^2 \times 15\text{回} \times 30\text{日}$ 、累計 180 kg/cm^2 区）と、軽度な踏圧が加わった場合の芝生の光合成速度が、いかなる状態になるのかを把握するために、9月12日の1日のみ体重63kgの人間が15回の踏圧を加えた区：1日踏圧区（接地圧に換算すると 6 kg/cm^2 区）の2区を設定した。これらの区と実験期間中、全く踏圧を加えずに放置しておい

* 東京農業大学造園学科

た区：無踏圧区（対照区）との光合成速度の比較測定を行った。なお、15回/日（30日間踏圧区）の踏圧回数は、明らかに芝生が損耗状態を呈することをねらい、既往の研究成果⁶⁾を基に設定したものである。また、いずれの実験区ともに実験用芝生は5ポットずつ用意したが、光合成速度等の測定には、その中で最も標準的な生育を示した1ポットのみをあてた。

(2) 光合成速度の測定

測定にあたっては、写-1に示すような通気法・開放系の装置で、1/10.000 aNEUBAUER'S POT に植込んだ実験用芝生の地上部に外気を通気（2.5~5ℓ/min）し、温度25℃の下に47klx前後の光の強さに対応するCO₂交換量を赤外線ガス分析器を用いて測定し、得られた結果を所定の公式にあてはめ、光合成速度を求めた。光合成速度は、1時間に100 cm³（1 dm³）の面積の葉がとり込んだCO₂のmg数、すなわちmg CO₂ / dm² / hrで表示することとした。

なお、30日間踏圧区と無踏圧区との光合成速度の比較測定は9月10日の午後4時から翌日の午後5時までの25時間、1日踏圧区と無踏圧区との比較測定は9月12日の午前10時から翌日の午前10時までの24時間行った。また、光合成速度を測定した実験用芝生については、測定後、掘上げ調査を行い、葉長、葉幅、葉数、葉面積、葉部・根部の生体重・乾物重なども併せて計測した。

写-1 光合成速度測定風景

2. 踏圧強度の違いによる芝生の生育反応とエチレン生成量との関係について

本実験においては、芝生に様々な程度に踏圧を加えた場合の生育反応とエチレンの生成量との関係を検証することを目的として、以下に示すような内容で実験を行った。ただし、今回は踏圧強度ならびにエチレン生成量が根部の生育に及ぼす影響については言及しなかった。

(1) 実験材料ならびに実験区の設定

東京都世田谷区にある東京農業大学の実験圃場に育成しているコウライシバ (*Zoysia matrella* Merr.) の

ターフを7区画（1区画：52×51cm）に区切り、実験用芝生とした。

6)

実験区については、1日当りの踏圧回数を既往の知見を基に、踏圧による明らかな生育差がでることをねらいとして、無踏圧区（対照区）、3回/日踏圧区、5回/日踏圧区、7回/日踏圧区、10回/日踏圧区、15回/日踏圧区、20回/日踏圧区の7段階に設定し、体重63kgの人間が昭和59年8月21日から9月20日までの30日間連続して、麦踏み要領で踏圧を加えた。なお、1ヶ月間、所定の回数の踏圧を加えた場合の芝生面にかかる接地圧を累計して求めると3回/日区では36kg/cm²（人間の運動時の平均接地圧0.4kg/cm²×3回×30日）、5回区では60kg/cm²、7回区では84kg/cm²、10回区では120kg/cm²、15回区では180kg/cm²、20回区では240kg/cm²となる。また、参考のため、7段階に設定した踏圧回数の30日分を累計して、すなわち90（3回×30日）、150（5回×30日）、210（7回×30日）、300（10回×30日）、450（15回×30日）、600（20回×30日）回の踏圧を一度に連続してかけ、各踏圧強度とエチレンの生成量との関係をみるための実験も併せて行った。

(2) エチレンの測定

エチレンの測定は5日おきに行い、測定にあたっては、測定日の前日の午後0時前後（踏圧をかける前）に各実験区ごとに2~3葉の着生した直立茎を10本ずつ採取し、あらかじめ1mlの蒸留水を入れておいた32mlの試験管に入れて密封し、30℃の暗黒条件下で20時間以上、インキュベーションした後、ガスフロマトグラフィーによって定量し、1時間当りに1gの葉が生成するエチレンの量を求めた。なお、各実験区の芝生の生育状態を把握するために実験終了時点で内径10cmのホールカッターで各実験区のターフを採取し、草丈、葉長、葉幅、葉数、葉面積、葉部の生体重・乾物量などの計測を行った。

実験結果ならびに考察

1. 踏圧の有無が芝生の生育ならびに光合成速度に及ぼす影響について

実験結果については、表-1、図-1・2、写-2に示す通りである。まず30日間踏圧区と無踏圧区との比較測定結果から先に述べると、30日間踏圧区では、踏圧開始後、10日目後から地上部の損耗状態が判然とし始め、実験終了時点では地上部はもとより写-2でも明らかな通り、地下部の生育も無踏圧区に比べて、はるかに劣る状態となっている。このことを裏付けるように、掘上げ調査をした結果においても30日間踏圧区は無踏圧区に比べて、葉部の乾物重で51%減、根部の乾物重で27%減、葉数で37%減、個体全体の葉面積で38%減、葉長で22%減と明らかに生育量が低下していることが判明した。光合成速度の測定結果については図-1に示す通りであり

表一 踏圧の有無がコウライシバの生育ならびに光合成速度に及ぼす影響について

(光合成速度の測定日: 1984年9月10日~11日)

実験区	葉長* (cm)	葉数 (枚)	葉面積**(cm ²)		乾物重(g)		光合成速度(mg CO ₂ /dm ² /hr)	
			個体全体	1枚当り	葉部	根部	最小値~最大値	平均値
無踏圧区	2.68 (1.00)	1248 (1.00)	126.8 (1.00)	0.1016 (1.00)	1.351 (1.00)	2.588 (1.00)	12.35~20.01	14.96 (1.00)
15回/日 30日間 踏圧区	2.10 (0.78)	788 (0.63)	78.5 (0.62)	0.0996 (0.98)	0.659 (0.49)	1.885 (0.73)	3.95~11.00	6.13 (0.41)

注) ()内の数値は無踏圧区に対する比率 * 100枚の平均値

** 個体から全ての葉を切りはずし自動面積計にて測定

写一 2 光合成速度測定個体堀上げ結果

左側: 無踏圧区 右側: 15回/日・30日間踏圧区

図一 踏圧の有無によるコウライシバの光合成速度の経時的変化(無踏圧区と30日間踏圧区との比較)

(1984年9月10日~11日)

測定は9月10日の午後4時過ぎより開始したが、測定開始時点から30日間踏圧区は無踏圧区に比べて、光合成速度は顕著に低く、その割合は測定時間中、常に一定であった。因みに30日間踏圧区の測定時間中の光合成速度の最低値は3.95 mg CO₂/dm²/hr, 最高値11.00 mg CO₂/dm²/hr, 平均値6.13 mg CO₂/dm²/hr, (標準偏差1.3337)と無踏圧区の最低値12.35 mg CO₂/dm²/hr, 最高値20.01 mg CO₂/dm²/hr, 平均値14.96 mg CO₂/dm²/hr, (標準偏差1.844)と30日間踏圧区の光合成速度は無踏圧区の概ね1/2以下であった。

一方、9月12日に1日のみ15回の踏圧を加えた1日踏

圧区の茎葉は、やや倒伏した状態となったが、外見的には何らの損耗状態も観察されず、踏圧後間もなく、すなわち午前9時過ぎに踏圧を加え、午前10時から測定開始した光合成速度は図一2に示すように、測定開始後間もなくは無踏圧区に比べて1/2以下と著しく少なかったが、時間の経過とともに無踏圧区との差は徐々に小さくなり、約2時間後には無踏圧区との差はなくなり、その後は測定終了時点まで1日踏圧区と無踏圧区との光合成速度の測定値には全く有意な差(5%水準)は認められなかった。

図二 踏圧の有無によるコウライシバの光合成速度の経時的変化(無踏圧区と1日踏圧区との比較)

(1984年9月12日~13日)

以上、15回/日の踏圧が連続30日間(接地圧でいえば180 kg/cm²)加わると、無踏圧区に比べてコウライシバの生育量、光合成速度は顕著に低下し、コウライシバの生育にとって重大な影響を及ぼすが、15回の踏圧が1日だけ(接地圧でいえば6 kg/cm²)加わった程度では、外見的にも何の影響も観察されず、また、光合成速度も踏圧直後に一時的に低下するが、間もなく無踏圧区と同様な程度に回復するなど、コウライシバの生育を阻害するような影響は全く認められなかった。

2.踏圧強度の違いによる芝生の生育反応とエチレン生成量との関係について

実験結果については、表一2、図一3、4、5に示す通りである。まず所定の踏圧回数を連続して30日間加えた実験の踏圧強度の違いによるコウライシバの生育反応との関係についていえば、踏圧開始後10日目を過ぎる頃から踏圧を加えた各区の草丈、葉長の生育が無踏圧区に比べて抑制され始め、10回/日踏圧区、15回/日踏圧区、

20回 / 日踏圧区の各区においては、地上部の損耗も徐々に明らかとなり、実験終了時点では15回 / 日踏圧区、20回 / 日踏圧区では一部分で裸地化現象も認められるなど、損耗状態が著しかった。各実験区のターフを掘上げ調査をした結果は表－2に一覧してあるが、踏圧強度の増加

に比べて、15回 / 日踏圧区では草丈が54%減、葉長が26%減、葉数が45%減、掘上げ個体全体の葉面積が46%減、葉部の乾物重が62%減と生育量が50%内外減じ、20回 / 日踏圧区では草丈が60%減、葉長が30%減、葉数が61%減、掘上げ個体全体の葉面積が68%減、葉部の乾物重が

表－2 踏圧強度の違いによるコウライシバの生育とエチレン生成量との関係について

(エチレン生成量の測定日：1984年8月22日～9月21日)

実験区	葉 丈 * (cm)	葉 長 ** (cm)	葉 数 (枚)	個体全体 *** の葉面積 (cm ²)	葉 部 の 乾物重 (g)	エチレン生成量 **** (nl/g FW/hr)
無 踏 圧 区	2.37 (1.00)	2.37 (1.00)	815 (1.00)	86.8 (1.00)	2.38 (1.00)	1.30 (1.00)
3 回 / 日踏圧区	1.69 (0.71)	2.06 (0.87)	619 (0.76)	74.9 (0.86)	1.76 (0.74)	1.41 (1.08)
5 回 / 日踏圧区	1.53 (0.56)	2.03 (0.86)	643 (0.79)	67.8 (0.78)	1.67 (0.70)	1.64 (1.26)
7 回 / 日踏圧区	1.55 (0.57)	1.76 (0.74)	478 (0.59)	44.5 (0.51)	0.94 (0.39)	1.69 (1.30)
10回 / 日踏圧区	1.31 (0.48)	1.71 (0.72)	499 (0.61)	41.7 (0.48)	1.04 (0.44)	1.47 (1.13)
15回 / 日踏圧区	1.25 (0.46)	1.76 (0.74)	451 (0.55)	46.6 (0.54)	0.90 (0.38)	1.76 (1.35)
20回 / 日踏圧区	1.10 (0.40)	1.67 (0.70)	321 (0.39)	28.0 (0.32)	0.68 (0.28)	1.83 (1.41)

注) () 内の数値は無踏圧区に対する比率

* 10箇所 の 平均値

** 100 枚 の 平均値

*** 個体から全ての葉を切りはずし自動面積計にて測定

**** 7 回 の 測定値 の 平均値

に伴い、草丈、葉長、さらには葉数、葉面積、葉部の乾物量が漸減することが明らかとなった。すなわち踏圧回数の違いと草丈との関係は $Y = 1.985 - 0.0515 X$ ($r = -$

図－3 コウライシバ芝生における踏圧強度と草丈との関係(平均値のグラフ)(調査日：1984年9月21日)

0.8660), 踏圧回数の違いと葉長との関係は $Y = 2.171 - 0.0305 X$ ($r = -0.8364$), 踏圧回数の違いと葉数との関係は $Y = 727.5428 - 21.1133 X$ ($r = -0.9233$), 踏圧回数の違いと掘上げ個体全体の葉面積との関係は $Y = 78.8564 - 2.6982 X$ ($r = -0.8997$), 踏圧回数の違いと葉部乾物重との関係は $Y = 0.6410 - 0.0254 X$ ($r = -0.8812$) という回帰式で示されるような関係があり、いずれも有意(1%ないし5%水準)な負の相関関係があることが認められた。殊に一部に裸地化現象が認められた15回 / 日踏圧区、20回 / 日踏圧区で生育量の低下が顕著で、無踏圧区

72%減と大略60%以上生育量が減じたとみなせる。

5日おきに測定した各実験区のエチレンの生成量については表－2、図－4・5に示す通りであり、踏圧回数の違い(踏圧強度)とエチレンの生成量とは大略相関し、各測定日の平均値でいえば、踏圧回数の違いとエチレンの生成量との関係は $Y = 1.387 + 0.023 X$ ($r = 0.830$) という回帰式で示され(図－4)、有意(5%水準)な正の

図－4 コウライシバ芝生における踏圧強度の違いとエチレン生成量との関係(測定日：1984年8月22日～9月21日)

相関関係のあることが認められた。すなわち踏圧回数の増加に伴いエチレンの生成量が漸増する関係が明らかとなった。ただし10回 / 日踏圧区のエチレンの生成量の平均値が3・5・7回 / 区に比して低かったのは、踏圧の加えられた部分の茎葉の採取が均一にできなかったなどの測定資料のサンプリング上の問題から生じた結果と推察される。なお、15回 / 日踏圧区、20回 / 日踏圧区と無踏圧区とでは、図－5に一部示すように、各測定日のエチレンの生成量に有意(5%水準)な差が認められたことは、踏圧という接触刺激(物理的ストレス)によって

図一五 コウライシバ芝生における無踏圧区と踏圧区 (20回/日) とのエチレン生成量の比較 (1984年)

コウライシバの茎葉からのエチレン生成量は明らかに高まるという事実を確認するものである。また、既知の事実であるが、気温の低下に伴い、エチレンの生成量が漸減することも本実験の結果からも伺われた。

なお、各実験区のエチレン生成量と草丈との関係は $Y = 4.2648 - 1.7165 X$ ($r = -0.8060$)、エチレン生成量と葉長との関係は $Y = 3.4858 - 0.9946 X$ ($r = -0.7624$) という回帰式で示され、有意 (5%水準) な正の相関関係があることが認められた。すなわちエチレンの生成量が高まると草丈、葉長の伸長が抑制されるという関係が明らかとなった。前述した踏圧回数とエチレンの生成量とは正の相関関係があるということと考えあわせると踏圧強度の増加に伴い、エチレンの生成量が高まり、その結果、草丈、葉長の伸長が抑制されるという図式が成り立ち、太田らの「ムギ踏みは体重をかけて踏みつけるので、相当に大きな物理的な刺激をムギに与えることになる。その刺激に反応してムギはエチレン生成量を増大し、草丈の伸長が抑制される」⁷⁾と指摘される既知の事実と完全に合致する。換言すれば、本実験によって、「踏圧が加わることによって芝生の草丈の伸長が抑制される」という多くの人が、これまでに認めていた現象は、実は踏圧という接触刺激によってエチレンが生成され、生成されたエチレンが一つの抑制因子となって現われる現象であるという因果関係が明らかになったといえる。

次に3～20回の所定の踏圧回数の30日分を累計して、すなわち90, 150, 210, 300, 450, 600回の踏圧を一度に連続して加えた場合のエチレンの生成量を9月21日に測定した結果、90回踏圧区で1.25 nl/gFW/hr、150回踏圧区で1.74 nl/gFW/hr、210回踏圧区で1.60 nl/gFW/hr、300回踏圧区で2.35 nl/gFW/hr、450回踏圧区で2.83 nl/gFW/hr、600回踏圧区で2.31 nl/gFW/hrであった。この結果は、1日当たり3～20回の踏圧を加えた場合に比べると、はるかにエチレンの生成量は大きく、しかも、この場合の踏圧回数の違いとエチレンの生成量との関係は $Y = 0.9847 + 0.0031 X$ ($r = 0.8535$) という回帰式で示され、有意 (5%水準) な正の相関関係があることが認められた。したがって、この結果からも踏圧強度が増すことによってエチレンの生成

量が漸増する事実が確認された。なお、この実験の場合の踏圧強度がコウライシバの地上部に及ぼす影響について観察した結果を述べると、90～600回踏圧区のいずれにおいても茎葉が倒伏した状態となり、300回踏圧区 (10回×30日)、450回踏圧区 (15回×30日)、600回踏圧区 (20回×30日) においては損耗が明らかとなり、しかも450回踏圧区、600回踏圧区においては、一部、裸地化状態が観察された。この結果と前述した実験結果と考え合わせると、3～20回の踏圧を毎日30日間加えた場合と30日間分を累計し、一度に連続して踏圧を加えた場合とでは、芝生に与えるダメージは大差ないと判断される。

結 論

本実験の結果、15回/日の踏圧が30日間連続してコウライシバに加わると、草丈、葉長、葉数、葉面積など生育量が顕著に減少するばかりでなく、無踏圧の状態のものに比べると光合成速度も1/2以下に減少するなど、生体維持上、かなりのダメージを受けることが判明した。また、芝生面にかかる踏圧強度の増加に伴い、茎葉からのエチレンの生成量が高まること、さらには踏圧により草丈、葉長が著しく抑制されるのは、このエチレンの作用によるものであることが既往の知見と照合することによって明らかとなった。このことは従前からいわれている芝生面に踏圧あるいは転圧が加わると、芝生の草丈が抑制されるという経験的事実の因果関係をシバの生育生理から説明したものといえる。

なお、本実験の結果を基に芝生地の利用の限界点、すなわち収容力について言及すると、公園等の芝生地において、芝生を完全に裸地化させないためには、芝生地での1ヶ月間の利用者の踏圧強度を最大に見積っても累計450回/月 (接地圧でいえば180 kg/cm²) 以下に抑えることが要件となる。ただし、今回の実験は完全なターフを形成している芝生で行ったものであり、ターフが十分に形成されていない造成後間もない芝生、あるいは4～5月の芽出しの時期の芝生においては、芝生の耐踏圧性は、より劣ると考えられるため、450回/月よりも低い値が、芝生を完全に裸地化させないための目安数値となるといえる。

また、本実験で得られた結果から、さらに言えることとして、ほとんど人の立入り利用をさせない観賞芝生、あるいはのり面等の芝生などにおいては、適宜、転圧あるいは踏圧、さらには他の方法で接触刺激 (物理的ストレス) を与えることによって、エチレンの生成量を高め、芝生の草丈を抑制し、緻密な芝生に仕上げる、また、刈込の手間を省くなど実利的な効果をあげる目論みも期待できる。

最後に、本研究を実施するにあたり、御指導・御助言を頂いた東京農業大学造園地被・植栽学研究室、小沢知

雄教授ならびに東京農業大学作物学研究室，田辺猛教授
玉井富士雄講師，東京農業大学アイソトープ研究所，太
田忠親講師に深甚の謝意を表する。

引用ならびに参考文献

- (1)太田保夫（1974）：植物の接触形態形成とエチレン：
農業および園芸 49（9），21—25
- (2)太田保夫（1975）：植物に対する接触刺激と生長抑制
：植物の化学調節 10（2），90—94
- (3)太田保夫（1983）：接触刺激による作物の生育制御法
：農業および園芸 58（4），9—14

- (4)下川敬之（1979）：エチレンの生理・生化学14：農業
および園芸 54（6），112—118
- (5)三股正年他（1970）：自然草地の改良と牧養力の向上
に関する研究：北海道農業試験場報告 77，126—130
- (6)近藤三雄他（1977）：芝生地の収容力に関する基礎的
研究（Ⅰ）——踏圧—土壤硬度に対する芝生地の植群の
低抗性からみた収容力について——：造園雑誌 40（3），
11—23
- (7)太田保夫（1980）：植物の一生とエチレン：東海大学
出版会，106

Summary : The purpose of this study is to verify the growth of lawn in relation to treading as part of an investigation conducted to discover the capacity of a stretch of turf on a physiological level. A number of findings were collected. What is noteworthy here is the results of an experiment in which pressure was applied to lawn by treading on it 15 times a day for a period of 30 days in succession; a control was prepared for comparisons. It was found that the growth of lawn, if treaded on, will be suppressed significantly; the growth of the stem and leaves in terms of their length was hindered, if not prevented all together. The photosynthetic rate, moreover, dropped to half that of the lawn used as the control. It was later found that the limited growth of the stem and leaves was due to the work of ethylene being formed by the pressure on the lawn.