

[Research Note]

土壌透水性が醸造用デラウェアの果実品質に及ぼす影響

三浦季子*・下野雄太・三輪由佳・磯部武志

(地独)大阪府立環境農林水産総合研究所・食と農の研究部
〒583-0862 大阪府羽曳野市尺度442

Effects of field infiltration on Delaware wine grape quality

Toshiko MIURA*, Yuta SHIMONO, Yuka MIWA and Takeshi ISOBE

Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries,
Osaka Prefecture, Shakudo, Habikino City, Osaka 583-0862, Japan

Abstract

We aimed to clarify the effects of field infiltration on the quality of Delaware wine grapes. In an experimental field where soils with different textures were partitioned by blocks, we measured saturated hydraulic conductivity, soil water potential, water saturation deficit (WSD) of leaves, and grape berry composition. We found that soils with lower infiltration rate showed higher soil water tension during the high-temperature season, and there was a significant positive correlation between soil water tension and WSD. These results suggest that grapes grown in soils with lower infiltration rate have higher water stress levels. We also found that WSD had a strong negative correlation with titratable acidity and malic acid content, but not with berry weight, sugar content, or tartaric acid content. We conclude that soils with lower infiltration rate give higher water stress to Delaware grapes, which can result in lower titratable acidity and malic acid content of grape berries.

Keywords: inversed auger hole method, Japan wine, saturated hydraulic conductivity, terroir, water saturation deficit

* Corresponding author (email: MiuraT@knsk-osaka.jp)

受付日：2023年10月17日

受理日：2024年1月22日

緒 言

醸造用ブドウの栽培面積が全国的に広がりを見せており、栽培に適した土壌条件の調査・研究は日本ワインの品質向上に重要な役割を果たすと考えられる。日本のように高温多湿な気候でブドウを育てるには、土壌の透水性の高さは不可欠とされているが、透水性が醸造用ブドウに与える影響について、国内の研究例は乏しい。樹体に中程度の水分ストレスがかかると、糖度が高くリンゴ酸含量の低いブドウになるとされる (Van Leeuwen and De Ressaiguier 2018, Van Leeuwen et al. 2018)。また、水分ストレスによりアントシアニンなどのフェノール含量が多くなるため、適度な水分ストレスは赤ワイン用ブドウを栽培する上ではメリットが多いと考えられている。一方、白ワイン用品種では酸度の高さやフレッシュな香りで評価されることが多いため、水分ストレスが与えるメリットは赤ワインほど多くないとされる (Des Gachons et al. 2005)。口当たりが軽くフレッシュな白ワインが作られるサレマ品種を対象にした調査では、粘土質土壌で栽培すると砂質土壌に比べてフレッシュな香りの減少が早く、熟した果実の香りが増加するため、収穫期を遅らせるべきでないと言及されている (Gómez-Míguez et al. 2007)。以

上のように、土壌の性質の違いが収穫適期やワイン品質に強く影響を与えることがこれまでの研究により明らかにされてきたが、雨量など気候条件の大きく異なる海外の研究成果を日本の栽培環境にそのまま適用することはできない。また、水分ストレスに対する感受性の高さは品種によって異なるとされる (Ferrer et al. 2014, Mirás-Avalos and Intrigliolo 2017)。そこで本研究では、日本で広く栽培されている醸造用デラウェアを対象に、土壌の透水性が土壌水分と果実品質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

材料と方法

1) 試験圃場

試験は大阪府立環境農林水産総合研究所の露地デラウェア圃場で行った。約6 m × 7 mの区画にデラウェアが長梢剪定で1樹ずつ植栽されており、深さ50 cm以上のコンクリートブロックで仕切られている。仕切られたそれぞれの区画は、過去からの研究経緯により土性が異なっている。本研究では、樹勢が中庸程度 (樹齢5–10年) のデラウェア8樹を試験対象とした (Fig. 1)。栽培方法は棚仕立てで、清耕栽培である。4月に除草剤散布により除草した後、以

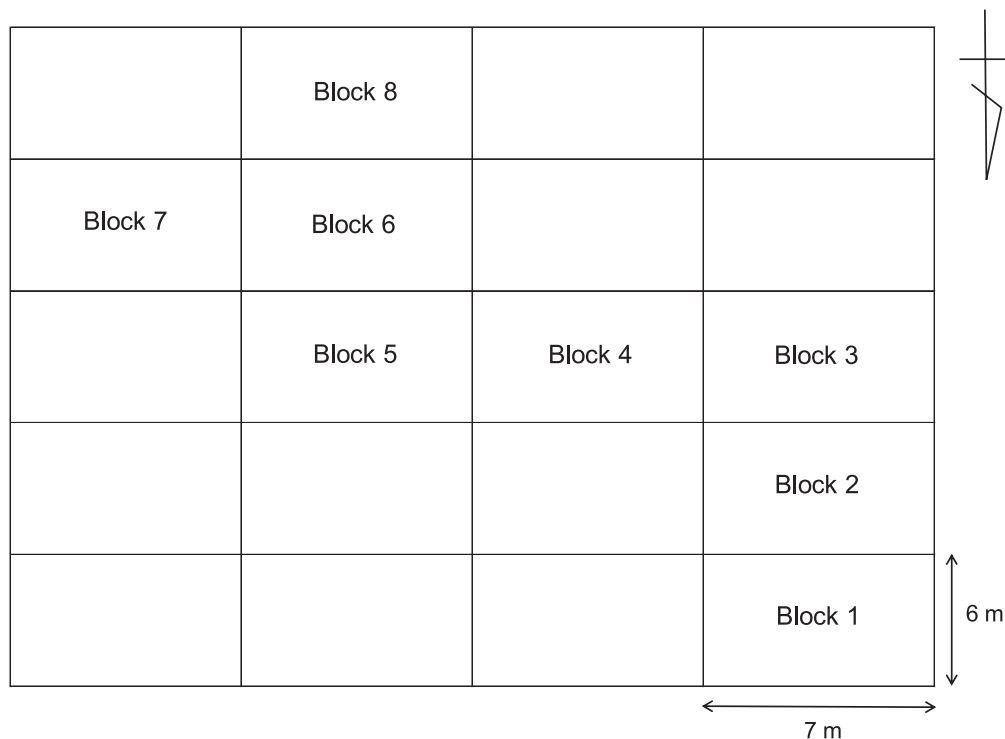


Fig. 1 Experimental field of Delaware wine grapes.

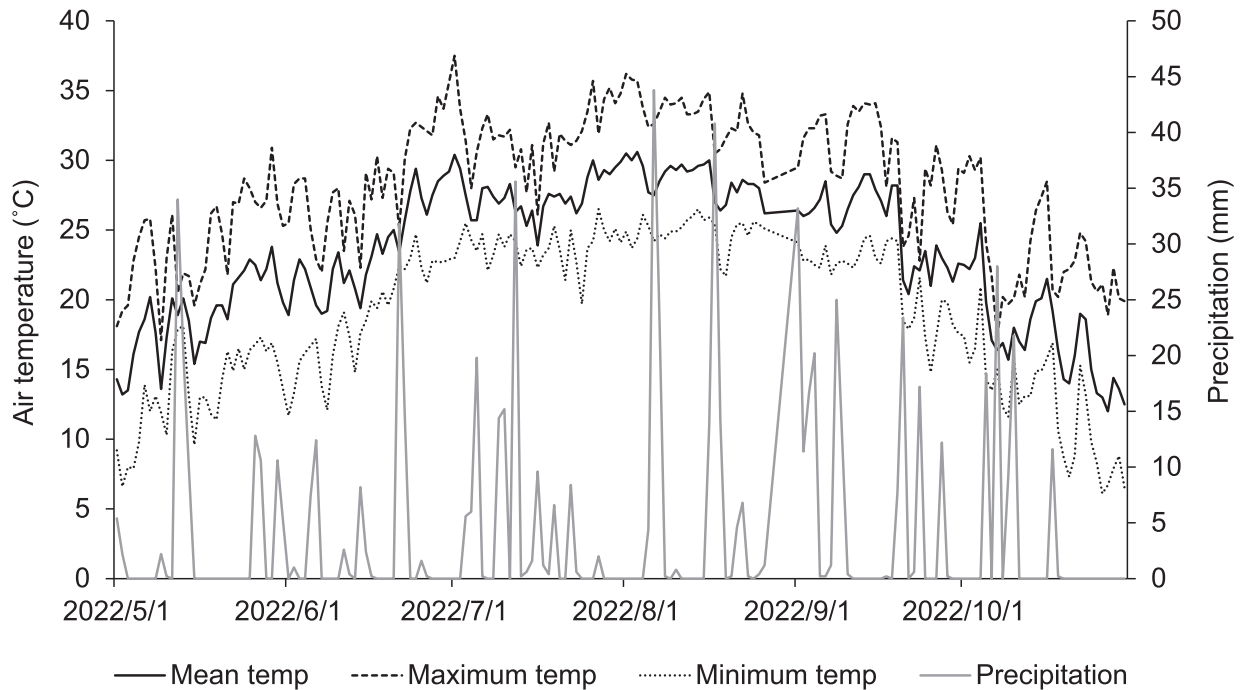


Fig. 2 Daily climate data for the experimental period.

降は草の生育状況に応じて刈払機で草刈を行った。なお、供試するデラウェアは醸造用として栽培されているため、ジベレリンは処理されていない。また、当研究所の気象観測装置で取得した試験期間（2022年5月から10月まで）の気象データはFig. 2の通りである。

2) 土壌化学性・粒径組成分析

2022年4月上旬に各区画において、樹冠下の表層（0-5 cm）と下層（15-25 cm）より採土した。風乾後、土壌粉碎ふるい分け装置（富士平工業 SSM-1）で礫などを取り除き2 mmでふるい分け後、pH、EC、交換性塩基（カリウム、カルシウム、マグネシウム、マンガン）、可給態リン酸、土壌全炭素・全窒素、全炭素：全窒素比（C/N比）を分析した。土壌pHとECは土壌：蒸留水=1：5で測定した。交換性塩基は1 mol/L 酢酸アンモニウム水溶液（pH 7.0）で抽出し、ICP発光分光分析装置（AVIO 220 MAX, PerkinElmer）を用いて測定した。可給態リン酸はトルオーグ法（土壌環境分析法編集委員会編 1997）によって測定し、リン酸の測定はオートアナライザー（QuAatro39, ビーエルテック）を用いた。土壌全

炭素および全窒素は元素分析装置（Vario max cube, Elementar）を用いて測定した。粒径組成は化学性分析用に採取した土壌を用い、ピペット法により分析した（土壌環境分析法編集委員会編 1997）。土性は国際法の粒径組成の定義（土壌環境分析法編集委員会編 1997）により判定した。

3) 飽和透水係数

土壌の透水係数はドライオーガーホール法（Van Hoorn 1979）を用いて2022年4月上旬に以下の手順で測定した。ブドウ樹の主幹から約50 cm-100 cm離れた土壌に直径4 cmのハンドオーガーで深さ30 cmまで穴を開けた後、水道水を注ぎ、穴が満水状態になった時点から一定時間毎の水深を計測した。飽和透水係数（ K ）は、次式を用いて算出した。

$$K \text{ (m s}^{-1}\text{)} = \frac{1.15r \left[\log \left(h_0 + \frac{r}{2} \right) - \log \left(h_n + \frac{r}{2} \right) \right]}{t_n - t_0} \times 0.01$$

r : 穴の半径

h_0 : 計測開始時の水深（底部から水面までの高さ）

h_n : 計測終了時の水深

t_0 : 計測開始時の経過時間

t_n : 計測終了時の経過時間

4) 土壌水分張力

土壌水分張力の測定にはウォーターマーク土壌水分センサー6450W (Irrometer) を使用した。このセンサーは電気抵抗の読み値を土壌吸引張力値に変換し土壌マトリックポテンシャルを推定する装置である。メーカーの測定値ガイドラインによると、値が100–200 kPaの範囲は土壌が重度の乾燥状態であることを示す。このセンサーを藤田ら (2011) の方法に準じてPVC管に接続し、センサー底面が15 cm深さと30 cm深さに位置するようそれぞれ埋設した。データロガーはWatchdog 1200 (Spectrum Technologies, Inc.) を用い、2022年4月下旬から10月下旬まで1時間ごとの連続測定を行った。

5) 水欠差 (葉内水分不足度)

水欠差は葉が水分を十分に含有可能な状態からどの程度不足しているかを簡易に把握するための指標であり、値が高いほど葉内水分が不足していることを示す。測定は相原ら (2016) を参考に以下の手順で行った。

- (1) 2022年8月1日と8月22日に新梢の基部第五葉から一樹あたり10–20葉を葉柄ごと取り外し、ジップ付きのビニール袋に入れ、袋中の空気を押し出した後、保冷剤を入れたクーラーボックスに入れて実験室に持ち帰った。
- (2) 葉柄付きの葉試料を速やかに0.01 g単位まで秤量し、生重 (Fw) とした。
- (3) 生重秤量後の葉試料は、水を含ませたキムワイプで葉柄を包んだ後、ジッパー袋に入れ、葉柄部分が浸る程度の水を加え、暗所で6時間以上放置し、葉内を飽水状態にした。
- (4) 飽水した葉試料をビニール袋より取り出し、葉面や葉柄についた余分な水滴をキムワイプで取り除いて秤量し、飽比重 (Fws) とした。
- (5) 飽比重秤量後の葉試料は、80℃で48時間乾燥させ、乾燥重 (Dw) を求めた。
- (6) 下式により水欠差を算出した。

$$\text{水欠差}(\%) = 100 - \left[\frac{\text{生重} Fw - \text{乾燥重} Dw}{\text{飽比重} Fws - \text{乾燥量} Dw} \right] \times 100$$

6) 果実分析

大阪府内のワイナリーでは、酸度の高い完熟前と、香気成分の多い完熟後それぞれの果実の特徴を生かした醸造を行っているため、成熟度の異なる果実について分析を行った。果実のサンプリングは、果粒の半数以上が黄色から極薄い赤紫色に着色した8月1日と、果房全体が紫色になった8月19日に行った。便宜上、8月1日に採取した果実を‘早摘み果実’、8月19日に採取した果実を‘完熟果実’と表記する。各ブロックの樹から果粒50粒をランダムに一房2粒ずつを25房から採取し、重量を測定した。その後、搾汁率が60%になるように搾汁し、転化糖分(比重換算)、滴定酸度、pH、リンゴ酸および酒石酸含量を分析した。滴定酸度はpH8.2を終点として中和滴定により求めた。リンゴ酸および酒石酸含量は0.45 μmメンブランフィルターで濾過した果汁を有機酸分析用カラム(株式会社島津製作所, Shimpack SCR-102H)の付いた高速液体クロマトグラフィー(HPLC)(LC-20Aシリーズ, 株式会社島津製作所)により分離し、ポストカラムpH緩衝化電気伝導度検出法(株式会社島津製作所2014)で分析した。

7) 統計解析

相関分析および多重比較分析は統計解析ソフトR version 4.3.1 (R Development Core Team 2023) を用いた。スピアマンの順位相関係数は、回帰分析で有意性が認められた場合に算出した。

結 果

1) 土壌化学性および粒径組成

各区画における土壌化学性と粒径組成の分析値をTable 1に示した。土性区分は上層では区画1, 2, 4が粘土15%以上含む砂質埴壤土で、その他の区画は粘土含量15%未満の砂壤土であった。下層では、区画1および2が砂質埴壤土で、その他の区画はすべて砂壤土であった。

2) 飽和透水係数

オーガーホール法による透水性調査の結果、区画3, 6, 7, 8では注いだすべての水が計測開始から20分以内に孔外へ排出された。飽和透水係数は、区画3が 6.2×10^{-5} m/秒と最も高く、次いで区画7, 区画

6, 区画8の 5.0×10^{-5} , 3.8×10^{-5} , 2.9×10^{-5} m/秒であつた (Fig. 3). 一方, 区画1, 2, 4, 5は水位の低

下が緩やかで, 飽和透水係数は区画1が 2.3×10^{-6} m/秒と最も低く, 次いで区画2, 区画4, 区画5の $7.0 \times$

Table 1 Soil characteristics of each block.

Block	Soil layer	pH (1:5)	EC (mS/cm)	TruogP (mg P ₂ O ₅ /100g)	Exchangeable cation (mg/100g)				T-C (%)	T-N (%)	C/N	Particle size fraction (%)			Soil texture
					K ₂ O	CaO	MgO	Mn				Clay	Silt	Sand	
1	A	5.17	0.1	25.1	15.3	95.0	16.7	1.6	1.09	0.10	10.8	20.4	9.3	70.3	sandy clay loam
2	A	6.06	0.2	30.9	8.1	243.0	22.1	0.5	1.90	0.15	12.8	19.4	18.1	62.5	sandy clay loam
3	A	5.44	0.0	17.6	6.4	69.0	13.1	0.6	1.03	0.09	10.9	10.9	4.9	84.2	sandy loam
4	A	5.42	0.1	17.4	8.0	85.0	17.2	0.8	1.72	0.15	11.3	15.1	14.0	70.8	sandy clay loam
5	A	4.75	0.0	20.1	9.8	38.0	7.7	0.3	0.96	0.09	11.2	11.3	5.0	83.6	sandy loam
6	A	4.89	0.1	16.2	11.2	93.0	19.5	0.9	1.62	0.15	10.8	10.8	9.9	79.3	sandy loam
7	A	5.66	0.1	17.5	12.0	101.0	22.1	0.7	0.97	0.09	10.6	10.9	4.8	84.3	sandy loam
8	A	5.71	0.1	12.6	9.5	94.0	19.0	0.6	1.03	0.10	10.4	10.5	9.6	79.9	sandy loam
1	B	5.44	0.1	9.6	9.2	176.0	24.8	3.1	0.14	0.02	8.4	16.2	9.9	73.9	sandy clay loam
2	B	4.66	0.1	31.1	3.8	65.0	6.1	0.2	0.42	0.04	10.7	21.0	9.6	69.4	sandy clay loam
3	B	4.74	0.0	24.0	5.0	25.0	4.7	0.6	0.18	0.02	8.2	10.4	9.5	80.1	sandy loam
4	B	4.81	0.0	20.3	5.1	52.0	7.3	0.5	0.30	0.03	10.4	10.6	9.6	79.8	sandy loam
5	B	4.74	0.0	18.8	5.8	15.0	2.3	0.6	0.24	0.03	8.5	10.6	9.6	79.8	sandy loam
6	B	4.64	0.1	28.2	3.7	32.0	3.6	1.3	0.28	0.03	10.7	10.3	14.2	75.5	sandy loam
7	B	4.79	0.1	12.2	5.1	49.0	12.2	1.9	0.39	0.04	8.9	5.3	14.1	80.6	sandy loam
8	B	4.75	0.1	17.6	6.2	44.0	6.6	1.0	0.34	0.04	8.4	10.9	4.8	84.3	sandy loam

Soil layer A, upper soil layer (0–10 cm); B, lower soil layer (15–25 cm).

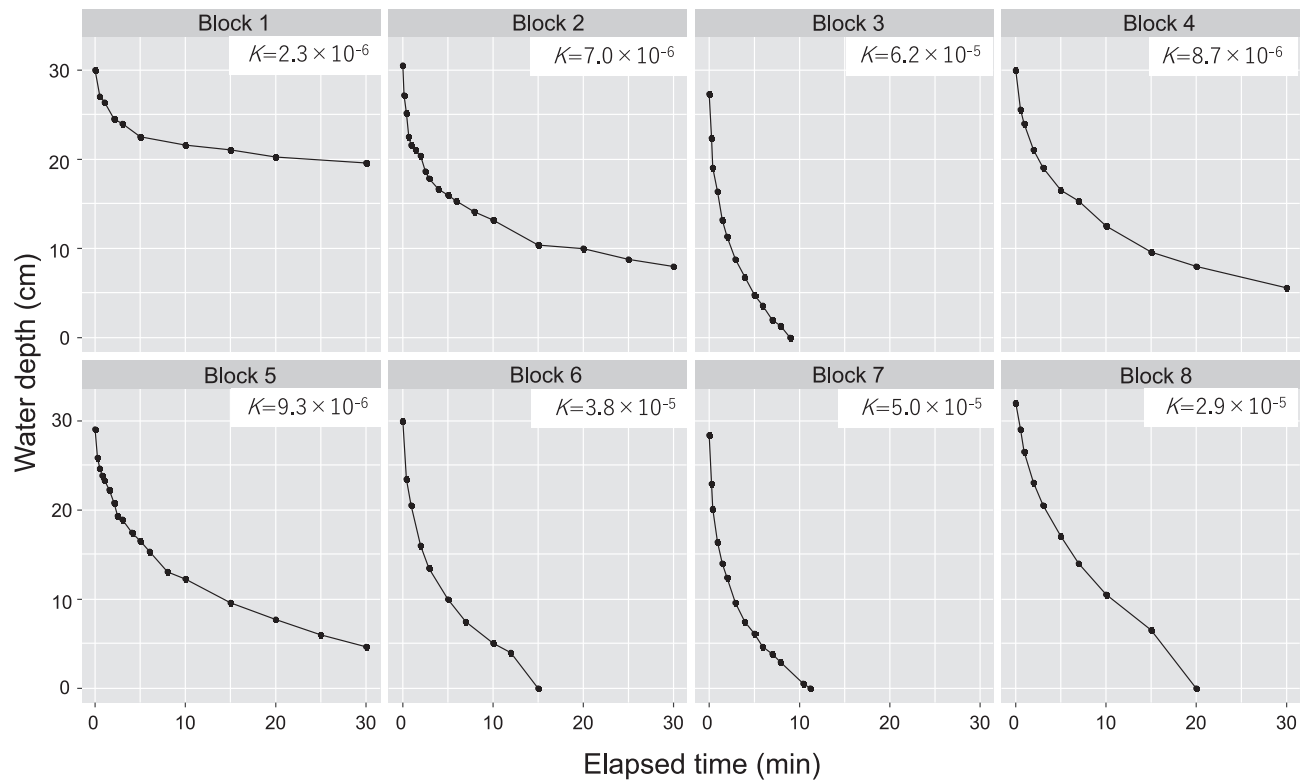


Fig. 3 Water level variation with time in auger holes. Saturated hydraulic conductivity K (m/s) is shown at the upper right corner of each graph.

10^{-6} , 8.7×10^{-6} , 9.3×10^{-6} m/秒であった。

3) 土壌水分張力

土壌水分張力は、区画1, 2, 4の上層において、7月下旬に極度の乾燥状態を示す100 kPaを超過した (Fig. 4)。8月上旬はさらに値が高く、区画1, 2, 4は上層で150 kPaを超過し、下層でも100 kPa以上に達した。区画3, 5, 6, 7, 8に関しては、区画1, 2, 4に比べて値の変動は小さく、夏季高温時に100 kPaを超過することはなかった。なお、区画6の上層における8月中旬以降の値の急激な変動は、回収後のセンサーチェックにより異常が確認されたことから、センサー不調によるものと考えられる。

4) 水欠差

8月1日の水欠差は区画1と4が9.4%と9.8%で最

も高く、次いで区画2の8.0%であり、区画3, 5, 6, 7, 8は5–6%と低かった (Fig. 5A)。8月22日は、区画1と2が7.9%と8.0%で最も高く、次いで区画4の7.1%であり、区画3, 5, 6, 7, 8は4–6%と低かった (Fig. 5B)。

5) 透水係数と土壌水分張力値の関係

各区画の飽和透水係数と深さごとの最大水分張力値の回帰分析を行った結果、上層では有意な負の相関が認められ、透水性が低い区画ほど夏季高温時に土壌が乾燥状態であることが示された (Fig. 6A)。一方、下層では有意な相関は認められなかった (Fig. 6B)。

6) 土壌水分張力値と水欠差の関係

8月1日と8月22日に採取した葉の水欠差と、それ

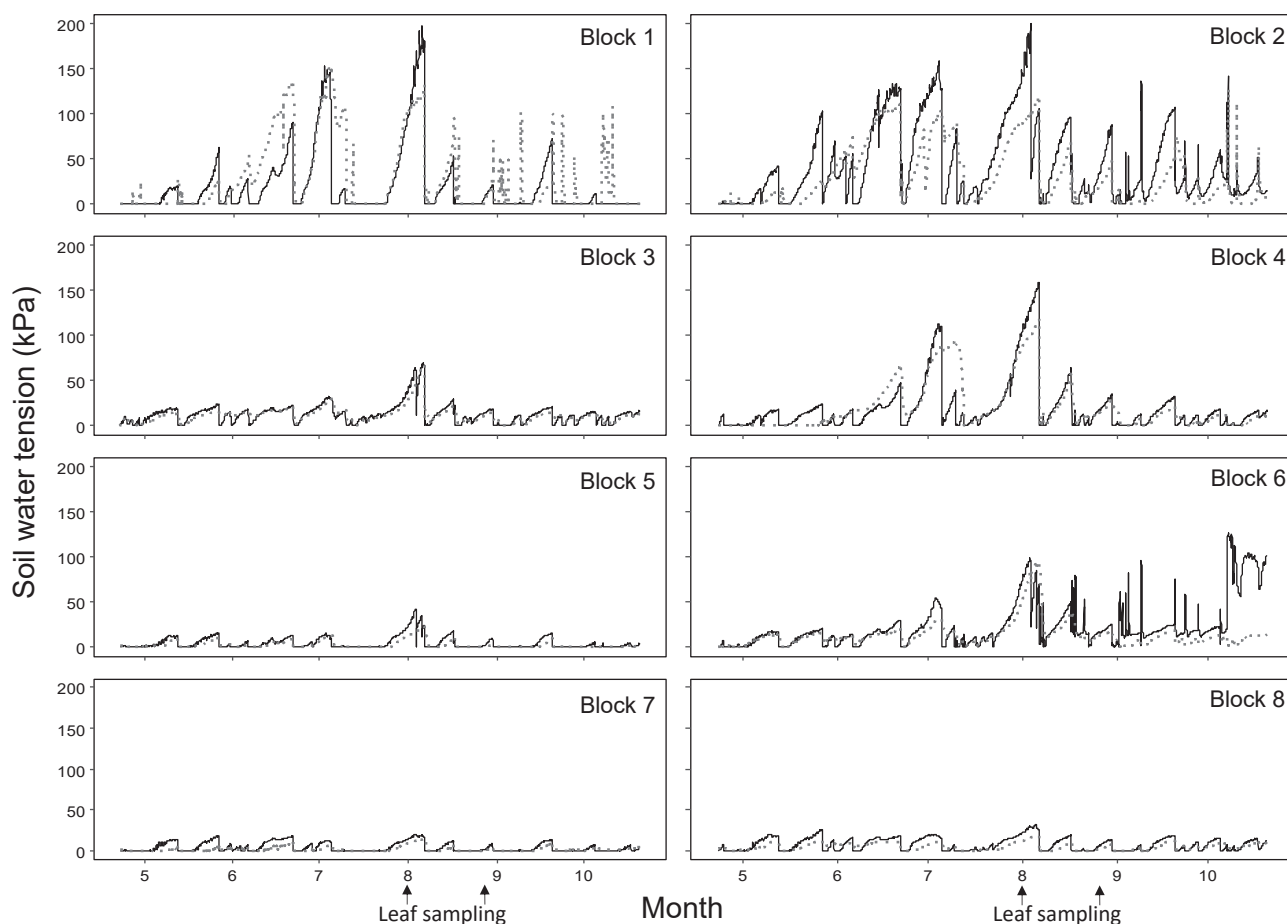


Fig. 4 Soil water tension measured by a Watermark soil moisture sensor. Solid line, upper soil layer (7–15 cm); dotted line, lower soil layer (22–30 cm).

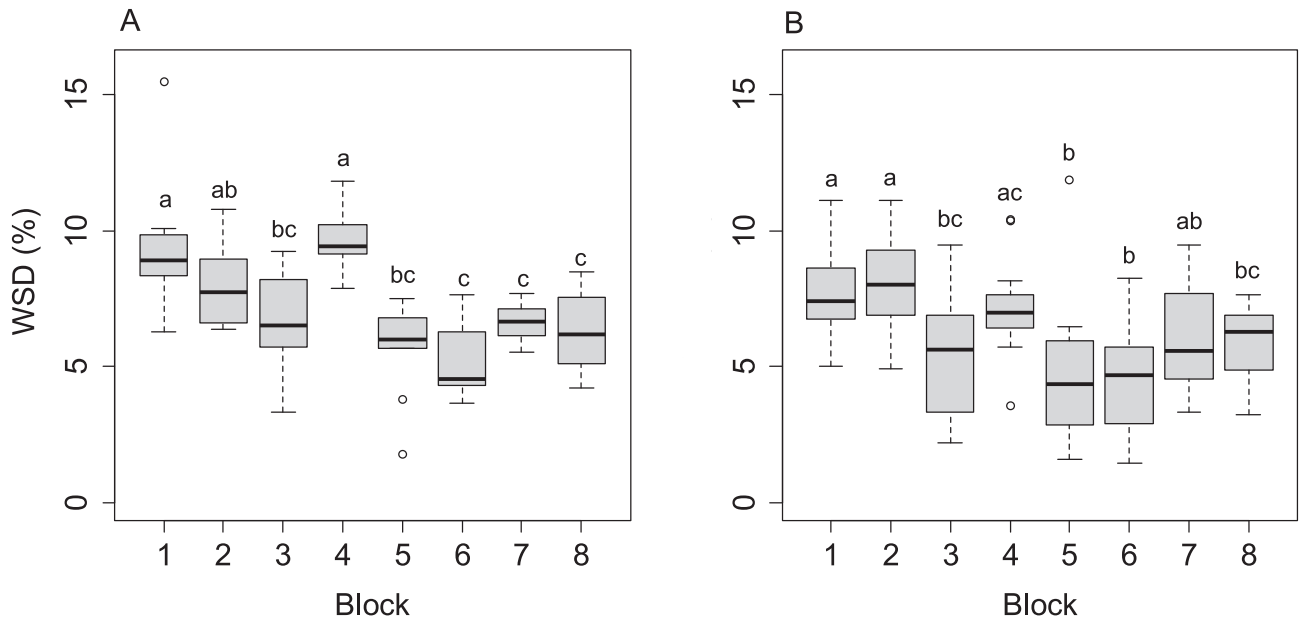


Fig. 5 Water saturation deficit (WSD) of Delaware grape leaves. A, leaves sampled on 1 August 2022; B, leaves sampled on 22 August 2022. Different letters indicate significant differences by Tukey's post hoc comparison ($p < 0.05$).

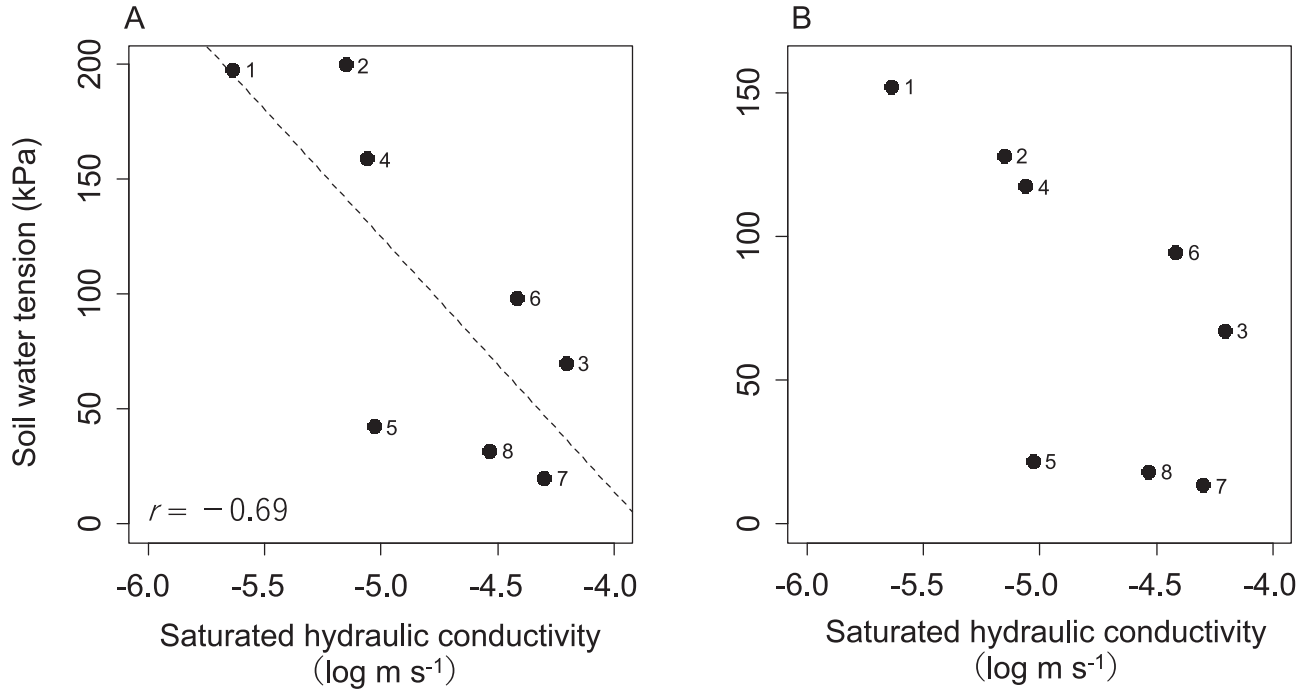


Fig. 6 Relationships between saturated hydraulic conductivity and maximum value of soil water tension for each block (A, upper soil layer; B, lower soil layer). The linear regression line indicates a significant correlation between the two variables ($p < 0.05$). r , Spearman's correlation value.

それぞれの葉の採取日以前に観測された土壌水分張力値の最大値について回帰分析を行った結果、両日ともに水欠差と水分張力値の間に有意な正の相関が認められた (Fig. 7).

7) 水欠差と果実成分の関係

果粒重および転化糖分に関しては、早摘み果実と完熟果実ともに水欠差との間に明瞭な関係は認められなかった (Fig. 8). 一方、滴定酸度は両果実ともに水欠差と有意な負の相関が認められ、葉内の水分が不足している樹ほど果実の滴定酸度が低い結果を示

した. なお、滴定酸度の最大値と最小値の区画では、早摘み果実で0.30 g/100 mL、完熟果実で0.17 g/100 mLの差があった. また、リンゴ酸含量においては、早摘み果実および完熟果実ともに有意な負の相関があり、滴定酸度と同様に葉内の水分が不足している樹ほど果実のリンゴ酸含量が低かった. リンゴ酸含量の最大値と最小値の区画では、早摘み果実で0.30 g/100 mLの差があり、完熟果実では0.22 g/100 mLの差があった. なお、水欠差と酒石酸含量の間には有意な相関は認められなかった.

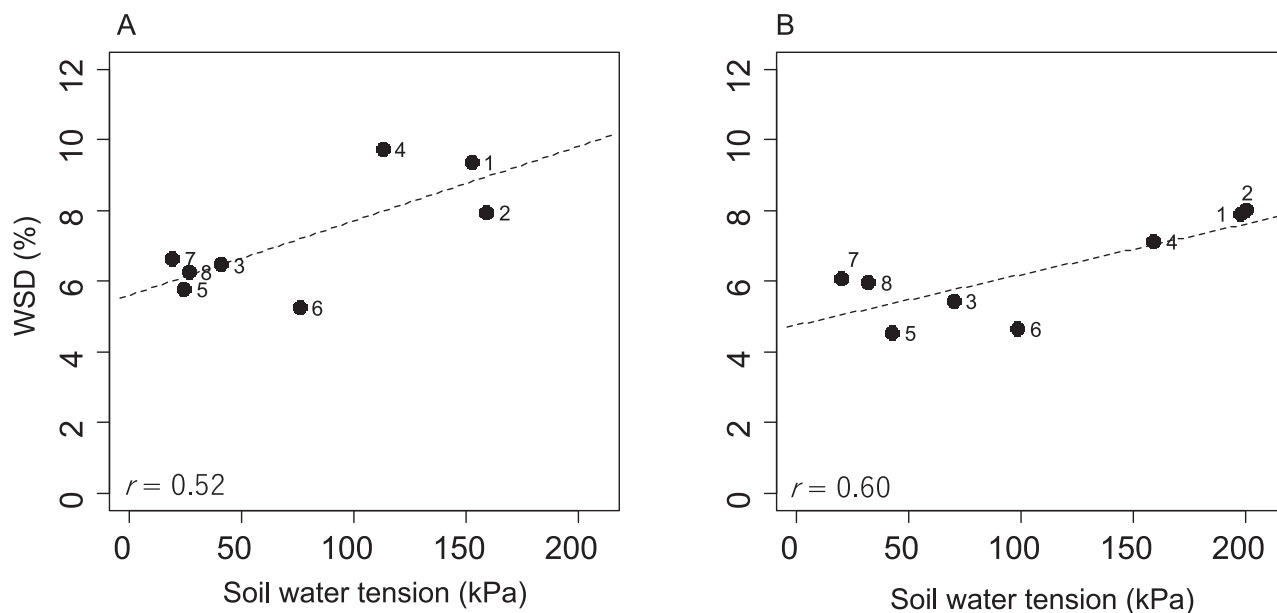


Fig. 7 Relationships between maximum value of soil water tension and average WSD value for each block. A, leaves sampled on 1 August 2022; B, leaves sampled on 22 August 2022. Linear regression lines indicate a significant correlation between the two variables ($p < 0.05$). r , Spearman's correlation value.

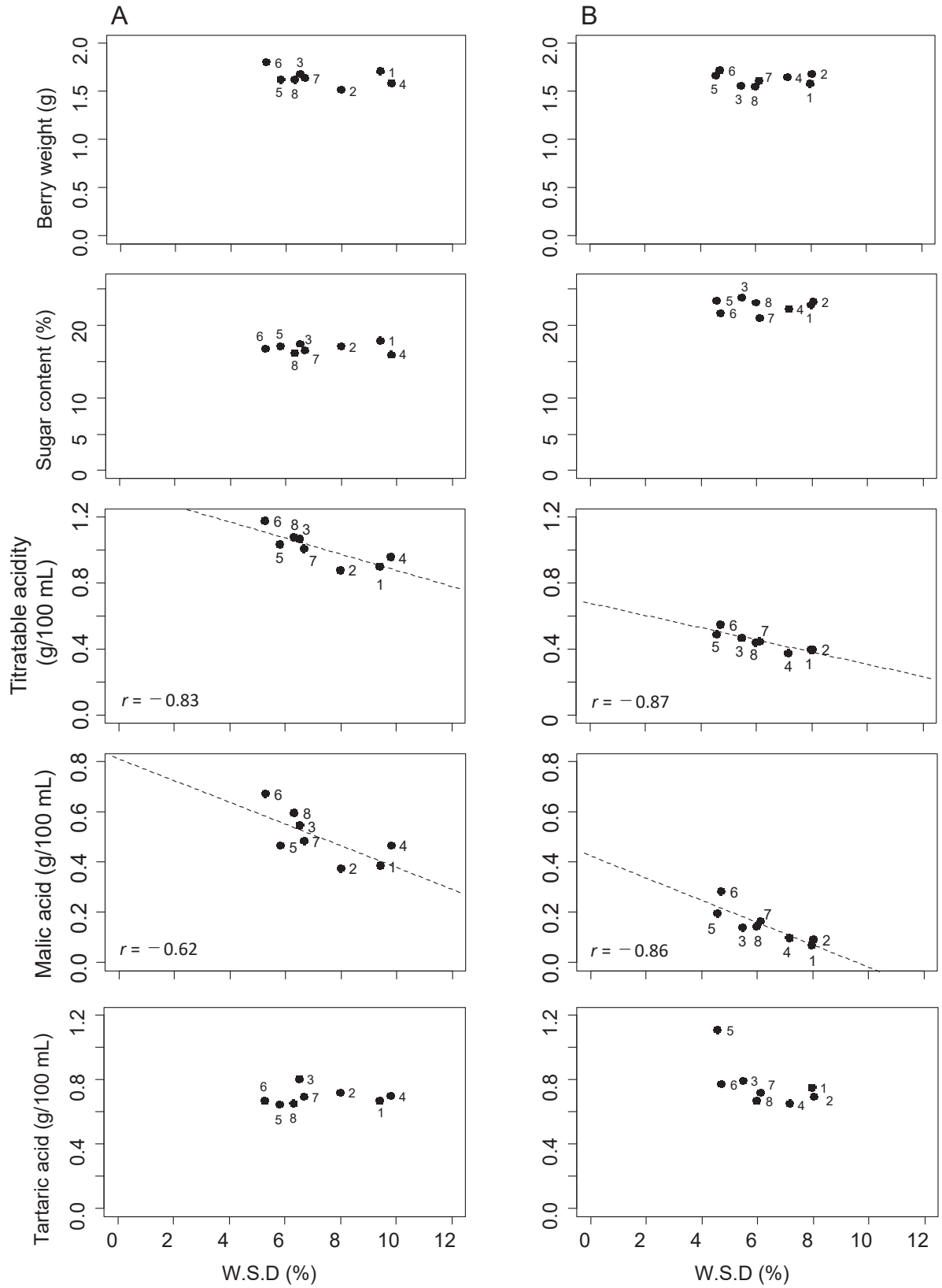


Fig. 8 Relationships between average WSD value for each block and grape berry composition. A, WSD of leaves sampled on August 1 and composition of early harvest berries. B, WSD of leaves sampled on August 22 and composition of ripe berries. Linear regression lines indicate a significant correlation between the two variables ($p < 0.05$). r , Spearman's correlation value.

考 察

土壌中の水分は土壌間隙に保持されているが、直径 $10\ \mu\text{m}$ より大きい孔隙内の水は重力により下方移動するため土壌に保持されにくい。一方、直径 $0.2\ \mu\text{m}$ 未満の小さい孔隙では強い毛管張力が働くため、ブドウの根は吸水できない。直径 $0.2\ \mu\text{m}$ 以上から $10\ \mu\text{m}$ 以下の孔隙内にある水は適度に保持され、根も吸水できる。一般的に、最も小さい土粒子である粘土 (< 粒径 $2\ \mu\text{m}$) を多く含む土壌は透水性が低く、水分保持力が高い。一方、砂 (粒径 $62.5\ \mu\text{m}$ – $2\ \text{mm}$) を多く含む土壌は透水性が高く、水分保持力が低い。本研究の結果でも、粘土含量の比較的多い区画で土壌透水性が低い傾向を示した (Table 1; Fig. 3)。しかし、土壌透水性の低い区画は水分張力値が高く、夏季に重度の乾燥状態を示した (Fig. 4)。また、葉の水欠差が高かったことから、透水性の低い区画の方が透水性の高い区画よりも乾燥による水分ストレスが強い状態であることが示された (Fig. 5; Fig. 7)。透水性の低い土壌の方が強い乾燥状態を示した理由としては、水は土粒子間が狭いほど毛細管現象により上昇しやすく、高温時には土壌表面から水が旺盛に蒸発したためと考えられる。さらに、先述したように、粘土粒子間の水分は植物が利用できないほど強く保持されるため、気温が高く乾燥が続くと、透水性の低い粘土質の土壌では植物が利用できる水が限られると考えられる。フランスのボルドー地域で行われた調査でも、粘土質土壌の方が砂質土壌よりブドウに強い水分ストレスがかかることを示す結果が報告されており (Tramontini et al. 2013, 渡辺 2015)、本研究結果と一致する。

土壌水分センサーが重度の乾燥状態を示した7月下旬から8月上旬は、果実の成熟期と重なるため、果実品質にも影響が及ぶと考えられたが、転化糖分と果粒重に関しては影響が認められなかった (Fig. 8)。乾燥ストレスにより糖度が高まるメカニズムには、果肉中の水分減少による濃縮の影響などがある (Xiao et al. 2018)。日本の夏は雨が比較的多いため、土壌の乾燥が断続的であったことから、果実の水分含量に影響せず、果実成分が濃縮されなかった可能性が考えられる。また、先行研究によれば、ベレゾーン後や収穫前の水分ストレスは開花期からベレゾーン前の水分ストレスに比べて果粒重や果粒サイ

ズに及ぼす影響は小さい (Levin et al. 2020, McCarthy 1997)。本研究では、開花期からベレゾーン前まではベレゾーン後ほど土壌が乾燥しなかったことから、果粒重や糖度には影響が出なかったと考えられる。

一方、酸度に関しては透水性による差異が見られた。有機酸については、酒石酸含量に差は認められなかったが、リンゴ酸含量は影響が見られた (Fig. 8)。山梨県の生食用デラウェアの調査でも、飽和透水係数の低い園地は成熟期から収穫期にかけての水分張力値が高く、デラウェアの酸含量が少なかったことが報告されている (窪川, 窪田 1985)。海外の研究でも、水分ストレスとリンゴ酸含量の間に高い相関関係が報告されている (Deluc et al. 2009, Mirás-Avalos and Intrigliolo 2017)。しかし、水分ストレスがリンゴ酸の分解に直接関与しているかは明らかでなく、水分ストレスが樹勢に影響することで、樹冠の微気象 (気温) が変化することが主な原因と考えられている (Hewitt et al. 2023, Keller 2023)。一方、2018年に行った大阪府内ワイナリーの園地調査では、透水性と酸度に有意な相関は見られなかった (三浦ら, 2020)。大阪府内においては、醸造用ブドウは生食用ブドウと異なり、清耕栽培ではなく雑草草生栽培の園地が比較的多い。草生栽培と清耕栽培では土壌水分の蒸発の程度に差があり、透水性の影響も異なる可能性がある。また、同じく三浦ら (2020) の調査では、透水係数と糖度の間に正の相関が見られたが、本研究では糖度への影響は認められなかった。透水性に対する樹体の反応は、気候条件や土壌養分など他の要因に応じて異なると考えられる。今後は、下草管理の異なる条件下での透水性の影響についても詳しく検討する必要がある。

本研究の結果、透水性の低い土壌では、透水性の高い土壌よりデラウェア果実の滴定酸度やリンゴ酸含量が低くなることが示された。これは、透水性が低い土壌ほど夏季高温時に乾燥しやすく、樹体に強い水分ストレスを与えることによるものと考えられた。近年、気候変動の影響による酸の減少が問題視されており、フランス南部では、栽培されているすべてのブドウ品種において、1980年から2001年の約20年間に総酸が約 0.4 – $0.6\ \text{g}/100\ \text{mL}$ (硫酸換算) 減少したとされる (Mira de Orduna, 2010)。日本でも、特に西日本などの温暖な地域では、酸落ちの早さが

問題になっている。温暖な地域でブドウの酸含量が低い園地では、透水性の診断を行い、飽和透水係数が 10^{-5} m/秒 (10^{-3} cm/秒) より低い場合は透水性向上の対策を講じることで改善が見込まれるかもしれない。

要 約

本研究は、土壌の透水性が醸造用デラウェアの果実品質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。土壌がコンクリートブロックで仕切られている8区画の試験圃場において、区画ごとの飽和透水係数、土壌水分張力値、葉の水欠差、果実の果粒重、転化糖分、滴定酸度、リンゴ酸および酒石酸含量を測定した。調査の結果、7月から8月にかけて断続的にはあるが、透水性が低い区画ほど土壌が強い乾燥状態を示した。また、土壌が乾燥状態の区画ほど葉の水欠差が高かったことから、ブドウ樹が強い水分ストレス状態であることが示された。果実の果粒重や転化糖分については、透水性の違いによる差異は認められなかったが、滴定酸度とリンゴ酸含量は水欠差と有意な負の相関が認められた。以上の結果、透水性の低い土壌ほど、夏季高温時はブドウ樹に強い水分ストレスがかかり、果実の酸度やリンゴ酸含量に負の影響を与えることが示された。

謝 辞

本研究は「日本ワインのテロワール解明に係る研究コンソーシアム」の委託を受けて実施しました。

文 献

相原敬次, 谷脇 徹, 齋藤央嗣, 越地 正. 2016. ブナの水欠差測定による丹沢山地の水分ストレス評価. 神奈川県自然環境保全センター報告 **14**: 49–51.

Deluc LG, Quilici DR, Decendit A, Grimplet J, Wheatley MD, Schlauch KA, Mérrillon J-M, Cushman JC and Cramer GR. 2009. Water deficit alters differentially metabolic pathways affecting important flavor and quality traits in grape berries of Cabernet Sauvignon and Chardonnay. *BMC Genomics* **10**: 1–33.

Des Gachons CP, Leeuwen C Van, Tominaga T, Soyer J, Gaudillère J and Dubourdiou D. 2005. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential

of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions. *J Sci Food Agric* **85**: 73–85.

土壌環境分析法編集委員会編. 1997. 土壌環境分析法. pp. 24–29. 博友社, 東京.

Ferrer M, Echeverría G and Carbonneau A. 2014. Effect of berry weight and its components on the contents of sugars and anthocyanins of three varieties of *Vitis vinifera* L. under different water supply conditions. *South African J Enol Vitic* **35**: 103–113.

藤田絢香, 中村元一, 亀岡孝治. 2011. 生産現場における高品質ミカン生産のための ICT 利用に向けた土壌水分計測手法の確立. *農業情報研究* **20**: 86–94.

Gómez-Míguez MJ, Gómez-Míguez M, Vicario IM and Heredia FJ. 2007. Assessment of colour and aroma in white wines vinifications: Effects of grape maturity and soil type. *J Food Eng* **79**: 758–764.

株式会社島津製作所. 2014. 有機酸分析法. 特開 2014-48137, 3月17日.

Keller M. 2023. Climate Change Impacts on Vineyards in Warm and Dry Areas: Challenges and Opportunities. *Am J Enol Vitic* **74**: 740033.

窪川 茂, 窪田友幸. 1985. 優良ブドウ園土壌の理化学性調査. 山梨県果樹試験場研究報告 **6**: 109–116.

Hewitt S, Hernández-Montes E, Dhingra A and Keller M. 2023. Impact of heat stress, water stress, and their combined effects on the metabolism and transcriptome of grape berries. *Sci Rep* **13**: 9907.

Levin AD, Matthews MA and Williams LE. 2020. Effect of preveraison water deficits on the yield components of 15 winegrape cultivars. *Am J Enol Vitic* **71**: 208–221.

McCarthy MG. 1997. The effect of transient water deficit on berry development of cv. Shiraz (*Vitis vinifera* L.). *Aust J Grape Wine Res* **3**: 2–8.

Mira de Orduna R. 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res Int* **43**: 1844–1855.

Mirás-Avalos JM and Intrigliolo DS. 2017. Grape composition under abiotic constrains: water stress and salinity. *Front Plant Sci* **8**: 851.

三浦季子, 佐野修司, 三輪由佳, 谷本秀夫, 森也寸志. 2020. 大阪府における醸造用ブドウ園土壌の理化学性と果実品質との関係. *日本土壌肥科学雑誌* **91**:

445–450.

R Development Core Team. 2023. A language and environment for statistical computing. as found on the website (<http://www.r-project.org/>).

Tramontini S, Van Leeuwen C, Domec J-C, Destrac-Irvine A, Basteau C, Vitali M, Mosbach-Schulz O and Lovisolo C. 2013. Impact of soil texture and water availability on the hydraulic control of plant and grape-berry development. *Plant Soil* **368**: 215–230.

Van Hoorn J. 1979. Determining hydraulic conductivity with the inversed auger hole and infiltrometer methods. In *Proceedings of the International Drainage Workshop*, 16–20 May 1978. pp. 150–154. Wageningen, The Netherlands.

Van Leeuwen C and De Ressaiguier L. 2018. Major soil-related factors in terroir expression and vineyard siting. *Elements* **14**: 159–165.

Van Leeuwen C, Roby JP and De Ressaiguier L. 2018. Soil-related terroir factors: a review. *OENO One* **52**: 173–188.

渡辺晃樹. 2015. 海外派遣研修報告(2) フランスにおける土壌が異なるブドウ園の水分ストレスと樹体生育に関する調査. *山梨果試研報* **14**: 75–88.

Xiao Z, Liao S, Rogiers SY, Sadras VO and Tyerman SD. 2018. Effect of water stress and elevated temperature on hypoxia and cell death in the mesocarp of Shiraz berries. *Aust J Grape Wine Res* **24**: 487–497.