岐阜県中山間農業研究所研究報告　第 21 号：18～27（2026）

クリにおける凍害発生要因の解明と対策技術の開発

メルトン里奈[1]*・荒河匠[1a]・水野文敬[1]・宮本善秋[1b]・熊澤良介[1]・神尾真司[1c]・堀井幸江[2]・井上博道[2]・西垣　孝[3]

[1]岐阜県中山間農業研究所中津川支所　508-0203　中津川市福岡
[2]国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構果樹茶業研究部門　305-8605　つくば市藤本
[3]岐阜県農政部農業経営課　501-1152　岐阜市又丸

Clarification of the factor and development of mitigation techniques for freezing injury in Japanese chestnut (*Castanea crenata*)

Rina Melton[1]*, Takumi Arakawa[1a], Hisataka Mizuno[1], Yoshiaki Miyamoto[1b], Ryosuke Kumazawa[1], Shinji Kamio[1c], Sachie Horii[2], Hiromichi Inoue[2] and Takashi Nishigaki[3]

[1]Gifu prefectural Research Institute for Agricultural Technology in Hilly and Mountainous Areas, Nakatsugawa Branch, Hukuoka, Nakatsugawa, Gifu 508-0203
[2]Institute of Fruit Tree and Tea Science, National Agricultural Research Organization, Fujimoto, Tsukuba, Ibaraki, 305-8605, Japan
[3]Agricultural Administration Division, Department of Agriculture-Management, Gifu Prefectural Government, Gifu, 501-1152

摘　要

クリは幼木期に凍害を受けやすく、現地では近年の温暖化の影響から幼木の凍害が頻発し、産地拡大の障害となっている。これまでに凍害被害を受けた園地における土壌調査から、凍害発生程度と土壌物理性および施肥の関連性が示されているが、対策技術の開発には至っていなかった。本報では、その影響を確認し、対策技術の開発を検討した。その結果、秋冬季の窒素施肥がハードニング期の耐凍性の獲得を遅延させる可能性が示唆され、また土壌物理性の改良により凍害発生率の低減ならびに生育量の向上が確認された。これらにより、幼木期の凍害発生率が 3 割以上低減される対策技術が開発された。

キーワード：施肥、ハードニング期、耐凍性、土壌物理性

緒　言

凍害は、植物の内部において細胞外に氷が形成されることで間接的に損傷し、その損傷により引き起こされる障害である（Levitt．1980）。これに対し、植物には凍結状態に耐えうる性質として耐凍性が備わっており、その度合いは植物の種類や季節によって著しく異なる（酒井．1964）。クリの耐凍性は、秋から厳寒期にかけて凍結に耐えられる度合いが著しく高まり、初春になって急速に消失するといわれ（酒井．1964）、凍害発生危険度を 11 月の最低気温（月平均）、1 月の最低気温（月平均）、12 月中旬から 2 月上旬の旬別積算降水量が 30㎜以上の回数から判断する手法が開発されている（神尾・水田．2017a）。凍害の対策としては、樹体内水分を抑制する目的で断根処理（水田ら．2021；堀本・荒木．1999）や高盛およびマルチ処理（神尾・水田．2017b；水田ら．2022）が開発されたが、近年の温暖化でこれらの対策を講じても凍害は多発している。

*Corresponding author. E-mail:kamio-shinji@pref.gifu.lg.jp
[a] 現在：ハウス食品グループ本社株式会社
[b] 現在：岐阜県農政部飛騨農林事務所
[c] 現在：岐阜県中山間農業研究所

これまでに、岐阜県内の現地クリ園における凍害発生程度と土壌物理性の関連性の調査により、凍害発生園および枯死樹根域の土壌は、気相率および透水係数が低く、クリの凍害発生には土壌物理性が関わる可能性が高いとされた（荒河ら. 2023）。

そこで、凍害発生要因を解明し、抜本的な凍害対策技術を開発するため、本報では、土壌物理性の改良による凍害発生率の変化を調査し、幼木期の凍害発生率が抑制される技術を開発したので報告する。

材料および方法

試験１　土壌物理性改良が耐凍性に及ぼす影響評価

過去の知見等（農水省土壌診断基準）から土壌物理性の改良目標値（気相率：15%、透水性：10^{-4}cm/秒）に従い 2021 年 2 月に所内土壌物理性不良区において列状に土壌改良（深耕および掘り起こした土壌体積の 20%のガラス発泡資材（以下、スーパーソル（粒径：4～15mm、ガラス発泡資材協同組合））混和を実施した。改良と同日に試験区（土壌体積 2.8m^3）あたり牛ふん堆肥 40kg、ヨウリン 2kg、クリマップ（N:12%, P_2O_5:16%, K_2O:14%）400g を混和し、‘筑波’1 年生樹を 4 本植栽した。2021 年 12 月に根域下部の土壌物理性を調査した。土壌物理性は、クリ樹周縁部（主幹から 40～60cm の位置）において、根域の広がる深さ 10～60cm の位置から 100mL 円筒コアで土壌を採取し、三相分布（デジタル実容積測定装置、大起理化工業）と飽和透水係数（変水位透水性測定器、大起理化工業）を測定した。また地下 10～50cm において山中式土壌硬度計を用いて土壌硬度を測定した。また 2021 年 4 月および 11 月に地上 20cm の高さで幹周を測定しその差を主幹肥大率として算出、同年 11 月に一年枝の長さを測定し樹ごとの総和を新梢総伸長量として算出し、生育量を調査した。また、同年 12 月 15 日、翌年 3 月 15 日に各処理区の樹を解体し主幹の台木および穂木部分、1 年生枝を採取し、プログラムフリーザー（小型環境試験器 SU-221、エスペック）により一定時間低温曝露（-5～-17℃、3℃刻み）させた後、5℃で 2～3 週間保管し、皮部、木質部、芽部の褐変程度を調査して耐凍性を評価した。凍結処理時に採取した主幹、1 年生枝の重量を測定した後、通風乾燥機（100℃）で乾燥させ、水分率を算出した。年次反復調査として 2022 年 2 月に‘筑波’1 年生樹を 4 本定植し同年 11 月に新梢伸長量、同年 12 月 14 日、翌年 3 月 16 日に耐凍性を評価した。

また、土壌改良資材の種類による土壌物理性改良効果を明らかにするため、2022 年 2 月に土壌深さ 1.0m、幅 1.0m を深耕した後、スーパーソル、太平洋パーライト特 M-1（粒径：3～25mm、太平洋マテリアル）、ネニサンソ 1 号（粒径：5mm 以下、三井金属鉱業）をそれぞれ掘り起こした土壌体積の 20%混和し埋め戻した（それぞれ、スーパーソル区、太平洋パーライト区、ネニサンソ区）。深耕区では深耕のみ行い、各試験区間は 2.0m の間隔を空けた。処理後、地下 20cm に土壌水分センサーを設置し体積含水率を測定するとともに、2022 年 12 月に改良した土壌の三相分析、土壌硬度、透水係数を測定した。

試験２　窒素施用が耐凍性に及ぼす影響評価

窒素肥料の施用時期がクリ幼木の耐凍性に及ぼす影響を明らかにするため、所内において不織布ポット植えの‘筑波’2 年生樹（2020 年 3 月植付け）に硫安 160g／樹（このうち半量は ^{15}N 標識硫酸アンモニウム（$(NH_4)_2SO_4$、5atom% ^{15}N、Sigma-Aldrich）を、慣行の施用時期を想定した 2021 年 11 月 25 日に施用し、2021 年 12 月 15 日および 2022 年 3 月 15 日に部位別の耐凍性を評価した。年次反復調査として、2021 年 1 月 28 日に‘筑波’1 年生樹を定植し 2022 年 11 月 25 日に硫安 160g／樹を施用し、2022 年 12 月 14 日、2023 年 3 月 16 日に耐凍性を評価した。

また、樹体内窒素の動態を明らかにするため、前述の ^{15}N 標識硫安を施用した‘筑波’を 2021 年 12 月 15 日に部位別（芽、1 年生枝、穂木部幹、台木部幹、太根、細根）に解体、乾燥、粉砕し、安定同位体比質量分析装置（ANCA-SL）で ^{15}N 含量を、NC アナライザー（NC-220F）で全窒素含量を、NC アナライザー（FlashEA 1112 Elemental Analyzer、Thermo Fisher Scientific）により重窒素分析を行うとともに、日本食品分析センターに依頼し高速液体クロマトグラフィーにより糖含量を調査した。

試験３　対策技術の開発（土壌物理性改良）

（１）列状処理

工事残土を客土し造成された土壌物理性が不良で凍害発生の多い現地クリ園（恵那市）にお

いて、2020年12月に暗渠上に土壌改良（深耕（幅1m、深さ50～70cm）、深耕および掘り起こした土壌体積の50%の木材チップ堆肥（はーどN：1.2%，P_2O_5：0.4%，K_2O：0.3%，C／N比：25.4；%は乾燥物重量；以下同じ）混和、深耕および掘り起こした土壌体積の30%の木材チップ堆肥と20%のスーパーソル（粒径：4～15mm；以下同じ）混和）を実施し、地上部を50cm高盛成型した。各試験区に植穴を70cm四方、深さ30cmで掘り、2021年2月に‘ぽろたん’1年生苗を定植し、定植から4年後までの凍害発生状況（6月）、土壌物理性および樹体の生育量（12月）を調査した。凍害発生状況として、凍害発生率は芽や枝の一部あるいは大部分の枯死があった樹数を試供樹数で除して算出、また枯死樹率は樹全体が枯死した樹数を試供樹数で除して算出した。

（２）植穴処理

山林を開墾した土壌物理性が不良で凍害の発生が多い現地クリ園において、2022年1月に植穴単位（1m四方）で土壌改良（深耕、深耕および掘り起こした土壌体積の50%の木材チップ堆肥混和、深耕および掘り起こした土壌体積の20%のスーパーソル混和）して埋め戻し、地上部を50cm高盛成型した。各試験区に植穴を70cm四方、深さ30cmで掘り2022年3月に‘丹沢’1年生苗を定植した。改良処理時に土壌物理性を調査するとともに、定植当年から3年間、12月に樹体の生育量、定植翌年から2年間、6月に凍害発生状況を調査した。

試験４　対策技術の開発（施肥体系改良）

2021年2月に試験3の列状処理を実施した圃場内の暗渠のない場所で、凍害で枯死した場所に土壌改良せず植穴を70cm四方、深さ30cm掘り‘ぽろたん’1年生苗を定植し、同年11月または翌年3月に発酵鶏糞（全窒素3.5%）5kg／樹を主幹から半径約1mの位置に輪状施用し、2022年12月14日、2023年12月15日に一年生枝を用いて樹体含水率、耐凍性を調査した。また定植した翌年から2年間、6月に凍害発生状況を調査するとともに12月に樹体の生育量を調査した。

試験５　実証試験

（１）実証試験１

凍害による枯死樹が多発している現地クリ園（恵那市）において、2023年3月に園主の自己施工による2種類の土壌改良（深耕および掘り起こした土壌体積の50%の木材チップ堆肥混和、深耕および掘り起こした土壌体積の30%の木材チップ堆肥と20%のスーパーソルを混和）を実施し、地上部は50cm高盛成型して‘丹沢’1年生苗を定植した。翌年の2024年6月に凍害発生状況を調査した。

（２）実証試験２

過去に馬術競技に使われていた跡地で土壌物理性が非常に悪い土地（山県市）において、2022年3月に園主の自己施工による4種類の土壌改良（深耕および掘り起こした土壌体積の50%の木材チップ堆肥混和、深耕および掘り起こした土壌体積の20%のスーパーソル混和、深耕および掘り起こした土壌体積の20%の太平洋パーライト特M-1（粒径：3～25mm）混和、深耕および掘り起こした土壌体積の20%のネニサンソ1号（粒径：5mm以下）混和）を実施したうえで地上部を50cm高盛成型し‘筑波’または‘利平ぐり’1年生苗を定植した。2023年12月に生育量および枯死樹数、2024年6月に凍害発生状況、同年8月に土壌物理性を調査した。

結　果

試験１　土壌物理性改良が耐凍性に及ぼす影響評価

土壌物理性の改良目標値に従い所内土壌物理性不良区において列状に土壌改良を実施したところ、深耕とスーパーソル20%混和により根域にあたる深さ40cmまでの土壌の固相率が低下し、透水性も向上した。その後3年目まで気相率、飽和透水係数および土壌硬度の改善効果が維持されていることが確認された（図１、表１）。

改良区に定植した‘筑波’1年生苗の生育は、定植当年の新梢総伸長量が無処理区に比べて有意に長く、生育が良好であった（表２）。

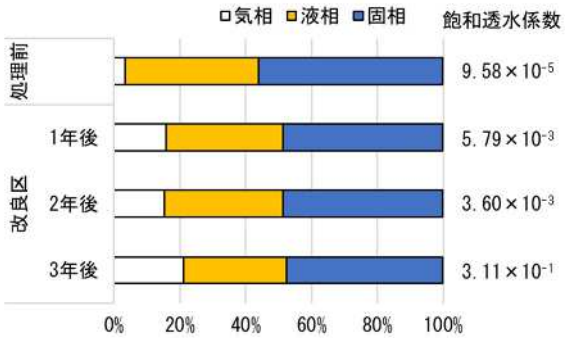

図１　所内物理性不良区における土壌改良後の三相分布と飽和透水係数の推移

・土壌深さと20cmと40cmの平均値［三相分析］あるいは中央値［飽和透水係数］を示す

・年数は改良処理から経過した期間を示す

表１　所内物理性不良場所における土壌改良後の土壌物理性の推移（列状処理）

試験区	土壌深さ（cm）	土壌硬度（mm）		
		2021	2022	2023
無処理区	10	4.7	11.7	12.3
	20	6.7	14.0	13.8
	30	3.7	24.7	24.8
	40	26.7	23.3	28.7
改良区	10	11.7	14.0	8.8
	20	11.0	11.3	11.0
	30	12.3	11.0	15.3
	40	9.3	11.7	15.7

表２　所内物理性不良場所における土壌改良が生育に及ぼす影響（列状処理）

試験区	新梢総伸長量（cm）	
	定植1年後	定植2年後
無処理区	63.0±32.5[Z]	373.0±233.0
改良区	213.8±110.4	1114.7±473.8
有意性	*	ns

・有意性は Wilcoxon の順位和検定した際の p 値により判定した（*, p<0.05;ns, 有意差なし）
・[Z] 数値は平均値±標準偏差で示す

また、当区画に植栽した‘筑波’2 年生樹の耐凍性は無処理区に比べて有意に高かった（表３）。また、所内において各種資材を植穴単位で改良した区では、土壌深さ 20cm および 40cm において、ネニサンソ区および太平洋パーライト区は深耕区に比べて気相率および飽和透水係数が高く、土壌改良基準値（気相率 15%、飽和透水係数 1.0×10^{-4} cm/秒）に達した（図２）。一方で、スーパーソル区は深耕区と同等かわずかに上回る傾向にあった。土壌硬度について、試験区間での差はなくいずれの測定値も15mm未満であった（表４）。改良後の土壌含水率は、深耕区に比べてネニサンソ区が有意に低かった一方で、太平洋パーライト区はわずかに低く、スーパーソル区は同等の傾向にあった。またネニサンソ区では少量の降雨時には含水率の上昇が少なく、多量の降雨時にも含水率がすぐに低下した（図３）。

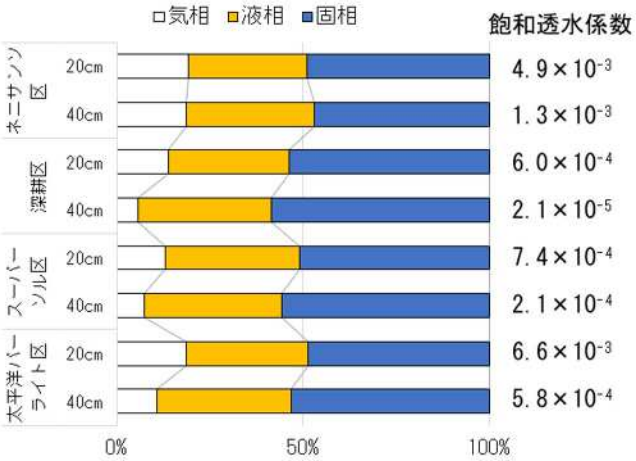

図２　所内物理性不良区における土壌改良後の三相分布と飽和透水係数（植穴処理；2022）
・土壌深さ 20cm と 40cm の平均値［三相分布］あるいは中央値［透水係数］を示す
・年数は改良処理から経過した期間を示す

表３　所内物理性不良場所における土壌改良が生育に及ぼす影響（列状処理）

暴露温度	試験区	2021							2022						
		一年生枝			主幹（穂木部幹）		主幹（台木部）		一年生枝			主幹（穂木部幹）		主幹（台木部）	
		芽	皮部	木質部	皮部	木質部	皮部	木質部	芽	皮部	木質部	皮部	木質部	皮部	木質部
-8℃	改良	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
	無処理	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.8	0.2	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0
-11℃	改良	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.3	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.5	0.0
	無処理	0.0	0.3	0.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0
-14℃	改良	0.0	0.5	0.3	0.3	1.5	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0
	無処理	0.0	0.7	0.5	1.3	1.3	0.7	1.5	0.0	2.0	0.0	1.0	2.0	1.0	2.0
-17℃	改良	0.2	1.0	0.8	0.5	1.8	0.3	1.8	0.5	1.5	0.5	1.0	2.5	0.5	2.0
	無処理	0.8	1.8	1.8	1.2	1.8	1.2	2.3	1.0	3.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
有意性	-8℃	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns
	-11℃	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
	-14℃	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
	-17℃	**	*	*	*	ns	**	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns

・値は褐変指数の平均値を示す（n=6-8、無，0;微，1;中，2;激，3）
・有意差は Wilcoxon の順位和検定の p 値により判定した（*, p<0.05;**, p<0.01;ns, 有意差なし）

表４　所内物理性不良場所における土壌改良後の土壌硬度（列状処理；2022）

土壌深さ（cm）	土壌硬度(mm)			
	ネニサンソ区	深耕区	スーパーソル区	太平洋パーライト区
10	10.0	11.7	9.7	8.0
20	12.0	12.0	11.7	10.3
30	11.7	11.7	14.0	11.7
40	11.7	14.0	9.7	11.0
50	7.0	10.3	11.0	9.0

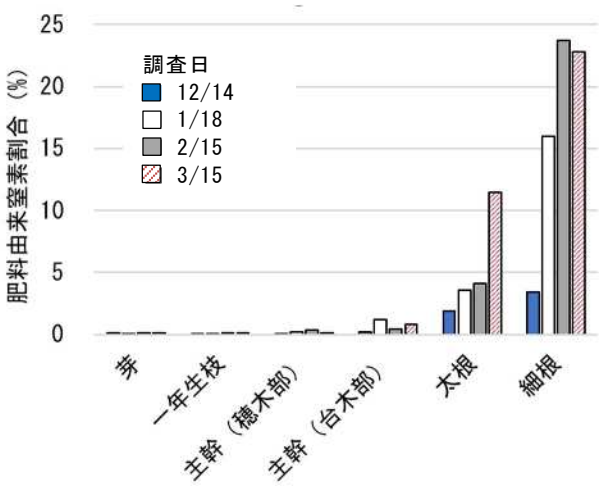

図４　部位ごとの肥料由来窒素割合（2022）

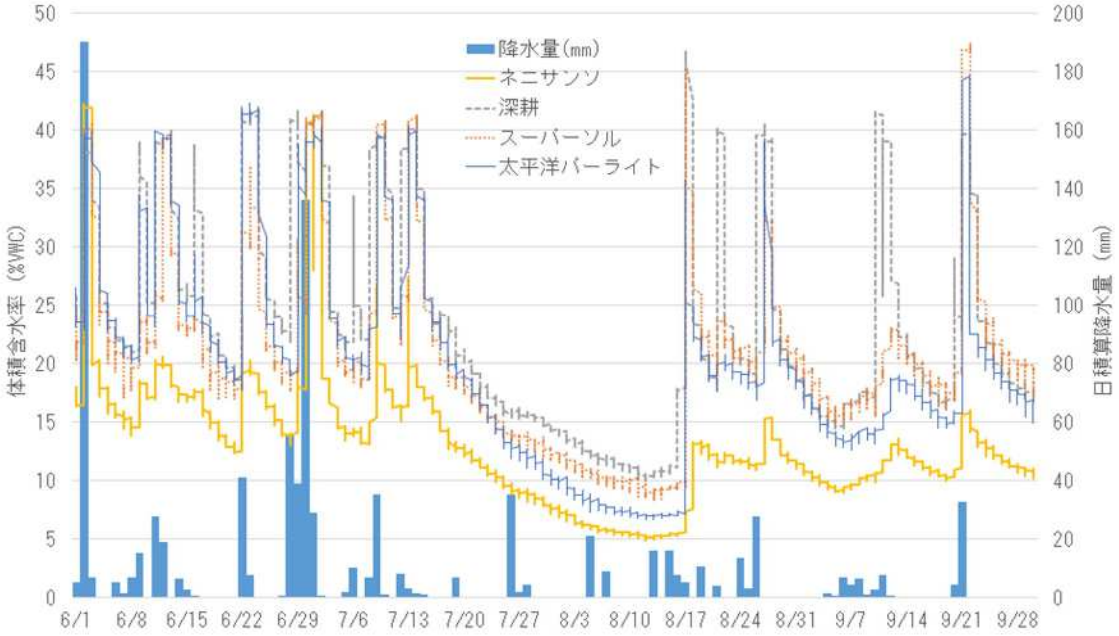

図３　所内物理性不良場所における土壌改良後の土壌水分および日積算降水量の推移（植穴処理；2023.6～9）
注記　日積算降水量はアメダス恵那のデータを参照した（7/29～8/2 データなし）

試験２　窒素施用が耐凍性に及ぼす影響評価

11 月下旬に ^{15}N 標識硫安を施用した 2 年生樹について、時期・部位別に全窒素量および安定同位体比を測定し施肥窒素利用効率を調査した結果、12 月時点で施用窒素が根部に吸収され、1 月には主幹台木部に移行していた（図４）。また、時期・部位別に糖含量（スクロース、グルコース、フルクトース）を測定した結果、12 月時点で糖含量は 11 月施用区が無処理区を下回った（図５）。

さらに、堆肥施用から 20 日後の 12 月低温暴露試験において、11 月施用区の皮部および木質部、穂木部の主幹の木質部で無処理区より高い温度で褐変が認められ、11 月施用区が無処理区よりも耐凍性が劣る傾向が認められた（表５）。

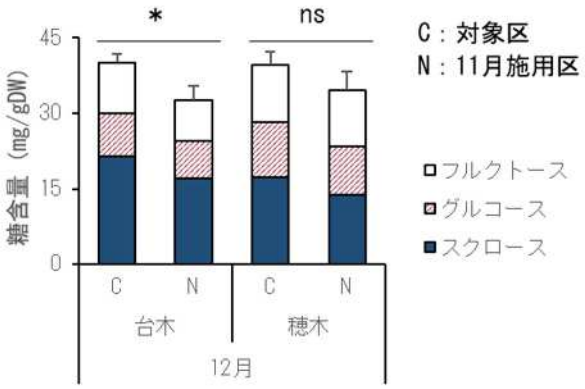

図５　部位ごとの肥料由来窒素割合（2022）
・＊，$p<0.05$;ns，有意差なし（t 検定）

表５　施肥時期が耐凍性(褐変程度)に及ぼす影響（2022）

処理温度	施肥時期	一年生枝			主幹（穂木部）		主幹（台木部）	
		芽	皮	木質	皮	木質	皮	木質
-5°C	無処理	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
	11月	0.0	0.3	0.0	0.8	0.3	0.0	0.0
-8°C	無処理	0.0	0.0	0.3	1.0	0.0	0.3	0.0
	11月	0.0	0.0	0.3	1.0	0.5	0.0	0.5
-11°C	無処理	0.0	0.0	0.0	0.8	0.5	0.3	0.0
	11月	0.0	0.3	0.3	0.5	1.8	0.3	0.0
-14°C	無処理	0.0	0.3	0.0	1.0	1.5	0.3	0.5
	11月	0.0	1.3	0.8	1.3	1.8	0.5	0.8
-17°C	無処理	0.0	1.0	0.5	1.0	2.8	0.5	1.8
	11月	0.5	1.8	0.8	1.5	2.5	1.0	2.0
有意性		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
		ns	*	*	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

・値は褐変指数の平均値を示す（n=8、無，0;微，1;中，2;激，3）
・有意性は Wilcoxon の順位和検定を行った際の p 値により判定した（*，p<0.05;ns，有意差なし）

試験３　対策技術の開発（土壌物理性改良）

（１）列状処理

現地の土壌物理性不良園において列状に土壌改良を実施した結果、改良前と比較し深耕区の固相率は差が認められなかったが、木材チップ堆肥を50%混和した区（以下、50%区）、木材チップ堆肥30%とスーパーソル 20%を混和した区（以下、30-20%区）は固相率が低下した。また、飽和透水係数はいずれの区も高くなり、50%区、30-20%区は深耕区よりも高くなった。実際に 30-20%区の改良1 年後の深さ 20cm における土壌体積含水率は深耕区に比べて低く推移し、透水性の改善効果が認められた。その後は、50%区が 4 年後まで、30-20%が 3 年目まで固相率が低く透水性が高く維持されていた。逆に深耕区は 4 年後で固相率が低下していたが、これは前年までに採土した場所と重複した可能性が考えられた（図６）。一方、すべての区で凍害が発生したもののいずれの処理区も無処理区に比べ凍害被害率が低い傾向で、枯死樹率は無処理区の 3 割以下に抑えられた（表 6）。30-20%区の 4 年目の値は固相率、飽和透水係数ともが改良前と同等であることから、土壌の採土場所が不適（改良場所から外れた場所）であった可能性が考えられた。樹体生育は、主幹肥大率、新梢総伸長量に有意な差は認めらなかったが、いずれの処理区も新梢総伸長量が無処理区に比べ長く生育が良好となる傾向が見られた（表 7）。

表６　列状処理による土壌改良がその後の凍害発生に及ぼす影響（現地：恵那市）

	調査年度	処理区			
		無処理	深耕	50%	30-20
枯死樹率(%)	2021	10.0	0.0	0.0	0.0
	2022	30.0	0.0	0.0	0.0
	2023	30.0	0.0	0.0	6.7
	2024	70.0	13.3	20.0	26.7
	平均	35.0a	3.3b	5.0b	8.3a
凍害被害率(%)	2021	10.0	30.0	30.0	60.0
	2022	6.7	0.0	0.0	6.7
	2023	33.3	13.3	0.0	26.7
	2024	13.3	6.7	6.7	20.0
	平均	32.5a	3.3c	18.3ab	11.7ab

・異符合間は Tukey-Kramer 検定により有意に値が異なることを示す（p<0.05）

（２）植穴処理

現地の土壌物理性不良園において植穴に土壌改良を実施した結果、無処理区において枝への凍害が見られたが、枯死樹は発生せず差は判然としなかった（表 8）。また、改良処理により樹体の生育量が向上したが、処理 2 年目の新梢総伸長量は深耕してスーパーソル 20%混和した区（以下、20%区）において有意差が見られた。2024 年は差に有意性はなかった（表 9）。

表７　列状処理による土壌改良が生育に及ぼす影響（現地；恵那市）

処理区	生存樹数				主幹肥大率(%)				新梢総伸長量(cm)			
	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
無処理	9	7	7	3	121	130	134	130	135±36[z]	162±54	180±111	323±117
深耕	15	15	15	13	122	154	131	115	272±70	435±208	657±361	816±653
50%	15	15	15	12	119	146	122	180	216±92	403±203	422±383	588±416
30-20%	15	15	14	11	119	135	116	129	190±45	330±142	532±372	740±647
				有意性	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

・主幹肥大率および新梢総伸長量の数値は各処理区の生存樹の平均値を示す
・有意性は Wilcoxon の順位和検定を行った際の p 値により判定した（ns，有意差なし）
・[z]数値は平均値±標準偏差で示す

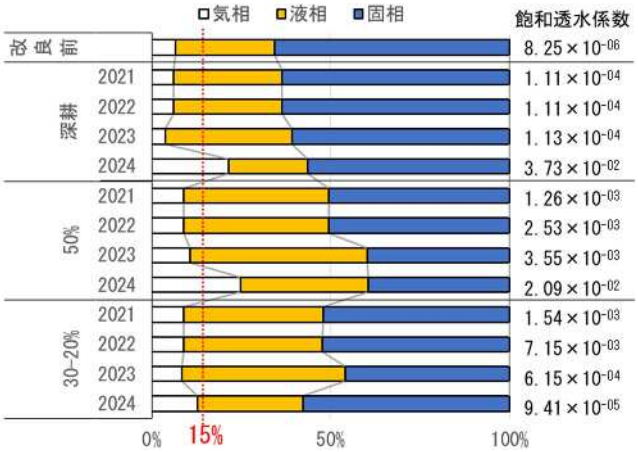

図６　列状処理による土壌改良がその後の土壌物理性に及ぼす影響（現地：恵那市）
・土壌深さ 20cm と 40cm の平均値[三相分布]あるいは中央値[飽和透水係数]を示す
・15%は物理性改良の指標となる粗孔隙を示す

表８　植穴処理による土壌改良がその後の凍害発生に及ぼす影響（現地：恵那市）

処理区	供試樹（樹）	凍害発生状況（樹；2023）		凍害発生状況（樹；2024）	
		枝のみ	枯死	枝のみ	枯死
無処理	7	1	0	0	0
深耕	6	0	0	0	0
50%	5	0	0	0	0
30-20%	5	0	0	0	0

表９　植穴処理による土壌改良が生育に及ぼす影響（現地：恵那市）

処理区	供試樹（樹）	新梢総伸長量(cm)		
		2022	2023	2024
無処理	3	222.6±104.7	441.9±354.9	898.0±1094.7
深耕	13	216.6±39.0	649.5±155.0	1222.0±397.4
50%	12	236.8±72.2	721.8±269.8	1167.8±447.9
20%	11	238.0±61.4	780.0±268.2	1516.4±1005.7
	有意差	ns	ns	ns
		ns	ns	ns
		ns	*	ns

・有意性は Wilcoxon の順位和検定を行った際の p 値により判定した（*，p<0.05；ns，有意差なし）
・数値は平均値±標準偏差で示す

表 10　堆肥の施用時期が初冬期（12 月）の樹体内水分量に及ぼす影響

試験区	水分含率	
	2021	2022
11月施肥	51.9±2.7	50.1±2.7
3月施肥	52.0±2.7	50.6±2.3
有意差	ns	ns

・有意性は Wilcoxon の順位和検定を行った際の p 値により判定した（*，Ip<0.05；ns，有意差なし）
・数値は平均値±標準偏差で示す

試験４　対策技術の開発（施肥体系改良）

夏季の生育不良により枯死樹が発生したため、各区の生存していた樹から初冬期（12 月）に一年生枝を採取し水分含量を測定したところ（N=4-8）、2021 年、2022 年ともに両試験区とも約 50%で差は認められなかった（表 10）。

一方で、2022 年の耐凍性評価では、11 月堆肥施用区の方でより褐変程度が大きい傾向にあり、-

14℃処理の芽、-11℃および-14℃処理の木質部において有意に無処理区を上回った（表 11、12）。生育量の調査では、生存樹の新梢総伸長量のばらつきが大きく、施用時期による差は判然としなかった（表 13）。

試験５　実証試験

（１）実証試験１

恵那市における現地実証園の植穴処理では、木材チップ堆肥 50%区で 5 本中 1 本が枯死（枯死樹率 20%）、ガラス発泡資材を混和した区では枯死は認められなかった（表 14）。

一方、同園地内の慣行（土壌改良せずに植栽）区の枯死樹率は 23.8%と差は認められなかった。排水性が悪い園地では、木材チップ堆肥のみの改良では不十分な可能性があった。

（２）実証試験２

山県市における現地実証園の植穴処理では、すべての処理区において飽和透水係数が処理前（1.0×10^{-4}cm/秒）と比較し改善が確認されたが（図７）、深耕区、スーパーソル区を除いて凍害による枯死樹が発生した。これは、いずれの区も植栽した当年に夏季の干ばつ等が原因と考えられる枯死が発生しており、その影響で生存樹も生育が不良であったことから耐凍性が劣り凍害を受けた可能性が考えられた（表 15）。

表 11　堆肥の施用時期が初冬期（12 月）の耐凍性（褐変程度）に及ぼす影響（2021）

処理温度	施肥時期	褐変程度（2021）		
		芽	皮部	木質部
対照	11月	0.0	0.0	0.3
	3月	0.0	0.0	0.0
-8℃	11月	0.0	0.0	0.3
	3月	0.0	0.1	0.1
-11℃	11月	0.0	0.7	0.6
	3月	0.0	0.3	0.0
-14℃	11月	1.3	1.2	1.6
	3月	0.0	0.6	0.8
-17℃	11月	1.1	1.7	1.9
	3月	0.3	1.5	1.5
有意性	対照	ns	ns	ns
	-8℃	ns	ns	ns
	-11℃	ns	ns	*
	-14℃	*	ns	*
	-17℃	ns	ns	ns

・値は褐変指数の平均値を示す（n=6-8、無,0；微，1；中,2；激，3）
・有意性は Wilcoxon の順位和検定を行った際の p 値により判定した（*，p<0.05；ns，有意差なし）

表 12　堆肥の施用時期が初冬期（12 月）の耐凍性（褐変程度）に及ぼす影響（2022）

処理温度	施肥時期	褐変程度（2022）		
		芽	皮部	木質部
対照	11月	0.0	0.0	0.0
	3月	0.0	0.2	0.0
-8℃	11月	0.0	0.3	0.0
	3月	0.0	0.2	0.0
-11℃	11月	0.0	0.3	0.3
	3月	0.0	0.7	0.3
-14℃	11月	0.0	1.3	1.0
	3月	0.5	1.3	1.0
-17℃	11月	0.3	1.3	1.8
	3月	0.7	1.7	1.2
有意性	対照	ns	ns	ns
	-8℃	ns	ns	ns
	-11℃	ns	ns	ns
	-14℃	ns	ns	ns
	-17℃	ns	ns	ns

・値は褐変指数の平均値を示す（n=4[11 月]、6[3 月]；無,0；微，1；中,2；激，3）
・有意性は Wilcoxon の順位和検定を行った際の p 値により判定した（ns，有意差なし）

表 13　堆肥の施用時期が翌年の生育に及ぼす影響（2021）

試験区	試供樹数(樹)[z]	凍害による枯死樹数(樹)	幹周(cm)	主幹肥大率(%) 前年から	主幹肥大率(%) 初年から	新梢総伸長量(cm)[y]
11月施肥	5	0	11.1	129	237	1065±771
3月施肥	5	0	12.1	114	261	505±166

[z]前年秋に生存していた樹数、[y]数値は平均値±標準偏差で示す

表 14　現地実証試験における植穴処理による土壌改良が凍害発生に及ぼす影響（恵那市）

処理区	試供樹数 (樹)	凍害被害状況(2023) 枝のみ (樹)	凍害被害状況(2023) 枯死 (樹)	枯死樹率 (%;2023)	凍害発生状況(2024) 枝のみ (樹)	凍害発生状況(2024) 枯死 (樹)	枯死樹率 (%;2023)
木材チップ堆肥50%	5	0	0	0	0	1	20
木材チップ堆肥30%＋ガラス発泡資材20%	5	0	0	0	0	0	0
慣行（同一園地内で土壌改良処理）	109	0	88	80.7	0	5	23.8

表 15　現地実証試験における植穴処理による土壌改良の凍害発生状況（山県市；2024）

処理区	試供樹数 (樹)	枯死樹(樹) 2023.12	枯死樹(樹) 2024.6	枯死樹率 (%)[z]	新梢総伸長量(cm)[y] 2023.12
深耕	4	2	0	50.0(0)	111±57
木材チップ堆肥	36	4	7	30.6(21.9)	170±67
ネニサンソ	8	2	1	37.5(16.7)	144±149
太平洋パーライト	8	3	3	75.0(60.0)	170±65
スーパーソル	7	3	0	42.9(0)	141±21

[z]() 内は凍害による枯死樹率、[y]数値は平均値±標準偏差で示す

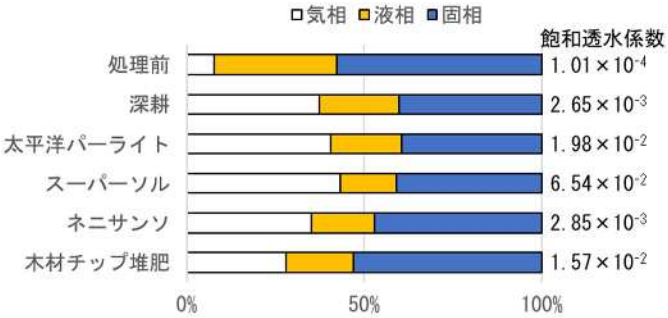

図 7　現地実証試験（山県市）における植穴処理による土壌改良区の土壌物理性（2024）
・土壌深さ 20cm と 40cm の平均値［三相分布］あるいは中央値［透水係数］を示す

考　察

土壌物理性の改良は、所内の土壌物理性不良区を列状に深耕しスーパーソル 20%を混和した場合、少なくとも効果が 3 年程度維持され、その結果、樹体生育が良好になったことから、耐凍性の向上に寄与すると考えられた。また植穴処理の場合も、列状処理と同様に改良費剤による土壌物理性の改善効果が確認された。用いた資材の中でネニサンソの利用における透水性が最も優れており、これには粒径が細かいことが関わるかもしれないが、夏には含水率が低下するため過乾燥に留意する必要がある。また、現地の土壌物理性不良園においても列状処理により改良区で 3 年以上改良効果が維持されたことが確認された。凍害被害率についても、無処理区に比べ枯死樹率が 3 割以下に抑制されたことから、土壌物理性の改良が影響すると考えられた。現地の土壌物理性不良園での植穴処理では、枯死樹率への効果が判然としなかったが、樹体の生育量においては処理 2 年目で有意な差が見られた。このことから、植穴処理より列状処理の方が土壌物理性の改良効果に伴う樹体生育の改善および凍害被害の軽減効果が期待されると考えられるが、植穴処理でも効果が出る可能性が示唆された。

窒素施用の影響について、樹体内の施肥窒素利用効率を確認した結果、11 月に施用した窒素は 12 月には吸収され、それによりハードニング期における耐凍性の獲得が遅れる可能性が示唆された。

施肥体系の改良による対策では、11 月施肥区において無施肥区の方が一年生枝の褐変程度が低かったことから、11 月の堆肥施用により耐凍性が低下する可能性が示唆された。定植 2 年目以降で枯死樹の発生、生育に差がなかった原因として、定植したほ場が非常に物理性の悪いほ場で、土壌改良せず定植し試験を実施したために、2 年目以降は植穴から外への根の伸長が不良となったことが考えられた。

今回の試験を通し、クリ幼木における凍害被害に土壌物理性や窒素施用が影響したことから、これらが要因の一つであると考えられ、実証試験からも改善効果が確認された。ただし、園地の条件により改善効果の程度は異なり、改良資材によっても過乾燥などに注意が必要なことから、栽培す

る園地の土壌物理性を把握し、適切な資材を選択することが、対策における重要なポイントと考えられる。

謝　辞

本試験を実施するにあたり、ほ場を提供していただいた、株式会社えな笠置山栗園、農事組合法人おおが、たかはしファームには、栽培管理および調査等に多大なる協力を賜りました。岐阜農林事務所、可茂農林事務所、恵那農林事務所の各農業普及課の担当者には、現地試験ほ場の設置や調査にご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。なお、本研究は、みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち農林水産研究の推進（委託プロジェクト研究）「現場ニーズプロジェクト（果樹等の幼木期における安定生産技術の開発）」（JPJ008720）において実施した成果の一部になります。

引用文献

荒河匠・神尾真司・堀井幸江・井上博道・西垣孝．2023．岐阜県におけるクリ凍害発生状況と土壌物理性の関係．岐阜県中山間農研研報．18：24-29

神尾真司・水田泰徳．2017a．冬季の気象条件によるクリの凍害発生危険度判定．岐阜中山間農研研報．13:8-16.

神尾真司・水田泰徳．2017b．クリ幼木に対する高畝およびマルチシートの凍害発生抑制効果の検討．岐阜中山間農研研報．13: 17-28.

酒井　昭．1964．木本類の耐凍性増大過程 X．枝の耐凍性を効果的にたかめる温度．低温科學．生物篇．22．25-50.

堀本宗清・荒木　斉．1999．吸水抑制処理がクリ樹の凍害に及ぼす影響．55(4) 329-336.

水田泰徳・織邊　太・田中宏明・中元陽一・松本和浩．2021．数種の新規株ゆるめ処理がクリ幼木の凍害軽減に及ぼす効果．園学研．20 (3)：305-313.

水田泰徳・織邊　太・神尾真司・松本和浩．2022．クリ幼木に対する高畝栽培およびマルチ被覆の凍害軽減要因の解明．園学研．21 (3)：279-286.

Levitt J. (1980) Reponses of Plants to Environmental Stresses. Academic Press. 1. 347-393