

博士論文

長野県のリンゴ生産と農地環境の
関係解析に関する研究

(Study on the relationship between farmland environment
and apple production in Nagano prefecture)

2016年9月

立命館大学大学院理工学研究科

総合理工学専攻博士課程後期課程

甲斐 貴光

立命館大学審査博士論文

長野県のリンゴ生産と農地環境の

関係解析に関する研究

(Study on the relationship between farmland environment
and apple production in Nagano prefecture)

2016年9月

September 2016

立命館大学大学院理工学研究科

総合理工学専攻博士課程後期課程

**Doctoral Program in Integrated Science and Engineering
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University**

甲斐 貴光

KAI Takamitsu

研究指導教員：久保 幹 教授

Supervisor : Professor KUBO Motoki

目次

序論		1
第1章	異なる収穫量のリンゴ園における土壌の物理的および生化学的特性	
1節	緒言	5
2節	実験材料および方法	7
3節	結果	
	1.3.1 リンゴ圃場の気象条件	20
	1.3.2 農地の物理的解析	20
	1.3.3 農地の生化学的解析	22
	1.3.4 リンゴの葉と果実の栄養成分の解析および収穫量	25
4節	考察	26
5節	要約	30
第2章	有機肥料と化学肥料を施肥したリンゴ園における土壌の化学的および生物学的特性の解析	
1節	緒言	34
2節	実験材料および方法	35
3節	結果	
	2.3.1 土壌の物理的解析	40
	2.3.2 長野県下におけるリンゴ圃場の SOFIX 分析	45
	2.3.3 有機肥料栽培と化学肥料栽培における施肥状況と土壌環境 の関係解析	46
	2.3.4 有機肥料栽培と化学肥料栽培におけるリンゴ圃場の土壌の 生物学的特性の比較	47
	2.3.5 リンゴの葉と果実の栄養成分の解析	50
	2.3.6 リンゴ栽培の SOFIX 循環型農法における最適土壌環境	51
4節	考察	53
5節	要約	56

第3章	SOFIX に基づく樹園地における最適土壌環境	
1節	緒言	66
2節	実験材料および方法	67
3節	結果	
3.3.1	樹園地土壌の化学的特性の解析	68
3.3.2	樹園地土壌の生物的特性の解析	84
3.3.3	樹園地の最適土壌条件の解析	89
4節	考察	96
5節	要約	98
	総括と展望	111
	参考文献	115
	本論文に関する報告	125
	謝辞	126

序論

世界の食料情勢は、世界人口の増加、開発途上国の経済発展によって所得向上に伴う食文化の変化による畜産物等の需要増加、バイオ燃料の需要増加、異常気象の頻発および水資源の制約による農業生産量の減少など不安定な状況にあり、将来、食料が逼迫する可能性があることが指摘されている（農林水産省 2014）。

このような世界情勢の下で、日本の農業に目を向けると我が国の農業農村を取り巻く状況は、食料自給率の低迷、基幹的農業従事者の高齢化の進行や耕作放棄地の増加および農業所得の減少など様々な問題を抱えている。特に食料の安定確保、食の安全安心の確保および消費者の信頼確保に向けた取り組みは、緊喫な課題となっている。

1961年に農業基本法が制定されてから、化学肥料や化学合成農薬の使用が推進された。そのため、多くの農作物の栽培は化学肥料や化学合成農薬が利用され、農地の単位面積当たりの収穫量を増大させることができた。化学肥料の投入は、作物の成長に必要な栄養分のみを土壤中に補給することができ、しかも化学肥料の多くは、水に溶けやすく即効性があるため、効果的な土壌への栄養分の供給が可能となった。そのため、肥料散布の労働時間の減少や、農地の単位あたりの収穫量を大幅に増大させることができた。これらのことから、化学肥料や化学合成農薬の使用によって、食料増産が可能となり、一定の成果がもたらされた。

しかしながらその反面、化学肥料の使用は、土壌の団粒構造の減少、土壌侵食、貧栄養化、土壌の硬質化による大気と土壌内とのガス・溶質移動の遮断、塩類集積による作物の生育障害といった土地生産性の低下や、化学肥料の土壌中への残留、地下水汚染、土壌中の微生物の減少といった自然環境や生態系の破壊などの問題を引き起こした。無機物である化学肥料の連用は、有機物が不足し始めるため、それを栄養源とする土壌中の微生物が減少し始める。やがては、無機物を好む嫌気性微生物が土壌中に繁殖しやすくなることから、植物は病気にかかりやすくなり、その対処のために農薬の使用を増やさざるを得なくなり、ますます土壌環境を悪化させるという悪循環に陥ってしまうことが考えられる。

また、化学肥料の原料は、尿素、リン鉱石および塩化カリのほぼ全てを輸入に頼っている。しかも、その輸入先は特定の国に依存している状況である（農林水産省 2014）。また、尿素、りん鉱石および塩化カリの輸入単価は、平成 19 年（2007 年）から平成 20 年（2008 年）にかけて原料の需給が逼迫したことから、一時的に価格が高騰した。近年の価格水準は、平成 19 年（2007 年）以前と比較して高い傾向にある。2016 年現在の世界人口は約 73 億人であり、2050 年までには約 97 億人になり、2100 年までには 100 億人を越すだろうといわれている（総務省 2016）。今後も世界人口は増加することが考えられていることから、農業生産の拡大に伴い、化学肥料の需要が更に増加することが考えられる。

生産者や消費者は、食の安全安心の指向、化学肥料を不安定な輸入に頼ることや、化学肥料の高騰などから、化学肥料や農薬を使用した慣行農法に問題を提起し始めた。2006 年には

有機農業推進法が成立された。これにより、生産者が有機農業に取り組めるよう国や地方自治体に支援が義務づけられた。化学的に合成された肥料と農薬を使わず、また遺伝子組み換え技術を利用しないことを基本として、農業生産による環境負荷をできる限り減らした農業を「有機農業」と定義された（農林水産省 2014）。日本の有機農業の取り組みは広がっているものの、有機農家は約 1 万 2 千戸である。栽培面積は有機 JIS 認定を受けていないものを含めても約 1 万 6 千 ha である。2015 年の日本の農地面積が約 449 万 6 千 ha であることから、有機農業は農地全体の約 0.4% とわずかである。世界の有機農業の割合は、イタリアが 10% を超え、ドイツ約 6%、フランス約 4%、韓国約 1% となっている。このように国際的にもみて、日本の有機農業は低い水準にあり、そのため国は 2018 年度までには概ね農地面積の約 1% を有機農業による農地にする目標を設定した。生産者や消費者は、堆厩肥、緑肥等の有機質肥料を土壌へ投入による土づくりに注目し、土壌微生物を中心とした土壌生態系の保全と健全な食料生産を目指す有機農法に目を向け始め、有機農業が少しずつ広がっている。土壌中の微生物は、落ち葉、枯れ枝や樹皮、小動物の排泄物や死がいなどの有機物を餌とし、無機物に分解して生きている。また、有機物を施すことで多様な機能をもつ微生物群が増加し、単一の菌群、病原菌の増大を防ぐといわれている。植物は微生物の代謝によってもたらされた無機物を吸収することで成長し、光合成によって栄養分である有機物を合成する。土壌微生物は、このような生態系の物質循環の中心を担っている。また、有機質肥料の多くは、農産廃棄物、畜産廃棄物、林産廃棄物などの産業廃棄物である。この産業廃棄物を熟成させ、発酵させたものが有機肥料であり、ゴミの減量と併せて物質循環の促進が可能となり意義深いと考える。しかしながら、化学肥料や農薬などを使用しない有機農業にも欠点がないわけではない。それは、有機農法の土づくりは生産者である農家の長年の経験や勘に頼り、収穫量が十分に得られず安定的な生産ができない、再現性が低い等の問題である。

土壌の性質には、土壌の物理性、化学性および生物性がある。土壌の診断技術は多くの場合、土壌の化学的性質のみ行われているのが現状である。本研究では、土壌微生物の働きによって土壌中の環境を知るため、土壌中の生物的特性の把握に重点をおいた。土壌中の微生物の数は、生細胞、死細胞および鉱物粒子の識別が困難なため、正確な数字はわかっていないが、一般的には土壌 1g あたり約数十億個 (cell/g) の微生物がいると考えられている (Faegri et al. 1977)。これらの土壌中の微生物の総数を測定する代表的な方法には、平板培養法と DAPI 染色による顕微鏡観察法がある。しかしながら、平板培養法と DAPI 染色による顕微鏡観察法には、次のような問題点がみられる。平板培養法では、培地成分や培養条件に適した微生物のみがコロニー形成されることや、生育の遅い微生物は生育の速い微生物から物理的・化学的な影響によりコロニー形成ができない。また土壌中の微生物を培養する場合には、培地の基質を低濃度にすることで多数の微生物を培養できる (Hattori et al. 1980)。さらに、土壌中で死滅した菌体が活動している微生物によって、急速に分解されることが報告されている (Jenkinson 1966)。増殖の極めて遅い微生物を培養する場合には、更に培養時間がかかる等の問題がある。このように、培養できない微生物は測定できないことや培養時間がかかるこ

とから、正確で迅速な土壌中の微生物数を示しているとはいえない。DAPI 染色による顕微鏡観察法では、土壌環境の生菌の数を正確に測定できるものの、実験作業が煩雑であるという問題点がある。

そこで、正確で迅速に土壌中の微生物の数を把握する方法として、土壌中から微生物の DNA を抽出し、この DNA 量を指標として簡便に微生物数を測定可能にし、eDNA 解析法を用いた土壌の肥沃度評価指標 (SOFIX : Soil Fertile Index) 技術がある (Aoshima et al. 2006, 久保ら 2012)。この SOFIX 技術は、農家の長年の経験や勘に頼らない、有機栽培の実現を目指した科学的な土壌診断であり、有機栽培に望ましい土壌成分量とバランスを数値化する技術手法である。また、循環型農業の推進を目指した技術である (Figure 1)。この土壌肥沃度診断 SOFIX の研究実績として、実験農地でトマトの定植実験が行われた。農家の経験や勘に頼らずに農作物の作付け前に、SOFIX 技術を用いて、土壌肥沃度を診断し、その結果に応じて投入する有機堆肥が決められた。SOFIX 診断結果から、馬ふんなどの堆肥で土づくりをした有機区と、慣行の化学肥料による化学区に分けてトマトが栽培された。収穫量が落ちるとされる有機栽培でも慣行の化学栽培と同程度の収穫量が確保された。その上、有機栽培のトマトの糖度が 1 度高まるなど、収穫量と生育の違いが検証され、SOFIX 診断の効果が実証された。また、イチゴ、カボチャや白菜なども SOFIX 技術の有効性が確認された。

以上のことから、本研究では土壌の肥沃度評価指標 SOFIX 技術を用い、長野県の特産品であるリンゴ栽培をモデルとして土壌環境の解析と収穫量に関する基盤研究を実施した。リンゴ栽培の野外調査は、長野県の山成畑工のリンゴ圃場で実施した。一般的に土壌中の環境は、複雑な要素が組み合わさって形成されている。そのため、リンゴ圃場の土壌環境の特徴を解明するため、土壌の物理性、化学性および生物性の分析から総合的な解析をした。特に土壌の生物性の分析では、SOFIX 技術の診断結果から、土壌肥沃度とリンゴ生育への影響を解析した。また、肥料の三大要素である窒素、リン酸、カリウムの循環系における律速物質を把握した (Horii et al. 2013, Matsuno et al. 2013)。

無機質窒素は、農作物にとって必要不可欠である。農作物が無機態窒素を吸収・利用できるようになるには、土壌に投入された肥料 (窒素有機物) が硝酸態窒素 (NO_3^-) に分解される必要がある。土壌中に施肥されたタンパク質などの窒素有機物は、微生物によってタンパク質 \rightarrow ペプチド \rightarrow アミノ酸と低分子化が進んだ後、アンモニア態窒素 (NH_4^+) \rightarrow 亜硝酸態窒素 (NO_2^-) \rightarrow 硝酸態窒素 (NO_3^-) と分解されることが知られている。これらの過程で、アンモニア酸化活性 ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$)、亜硝酸酸化活性 ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) および微生物量を測定した。アンモニア酸化活性、亜硝酸酸化活性および微生物量の値から三角形のレーダーチャートで定量化し、土壌が持つ窒素有機物を硝酸態窒素に変換する力を評価した。これにより、三角形の面積が大きいほど土壌中の窒素循環が活発であることを示し、逆に三角形の面積が小さいほど微生物数が少なく、肥料の分解が進んでいないことを示した。

また、リン酸も農作物にとって必要不可欠である。農作物がリン酸を吸収できるようになるには、フィチン酸 (有機態リン酸) からリン酸へ分解される必要がある (フィチン酸分解

活性)。そこで、フィチン酸と呼ばれる有機態リン酸を変換する力をリン循環活性として評価した。

これらのことから、総細菌数と窒素循環活性、リン循環活性を判断し土壤環境を明らかにする判定指標とした。野外調査と室内実験から土壤環境のアプローチを実施し、論点を導き出した。第1章では、日本のリンゴ栽培は全国平均生産量が 2,120 kg/10a であり、日本のリンゴ生産目標が 4,000 kg/10a であることから、日本のリンゴ栽培はまだ改善の余地がある状況である。そのため、リンゴ生産量を改善する目的として、収穫量の異なる2つの果樹園(2,000 kg/10a、3,000 kg/10a)について、リンゴ圃場における栽培状況を把握するために、慣行栽培技術(施肥、農薬、管理など)および収穫量の調査を行った。2つの果樹園において、土壤環境因子(土壤中の総細菌数、物質循環活性および透(排)水性)の解析を行い、収穫量と土壤環境因子の関係を明らかにした。また、リンゴの葉と果実の分析も行い、土壤環境とリンゴ生産性に関して解析した。第2章では、リンゴ栽培では有機的な栽培手法が確立されていないことから、異なる肥料体系(有機肥料栽培、有機肥料と化学肥料を合わせた栽培および化学肥料栽培)の5つのリンゴ圃場で土壤の物理性、化学性および生物性について比較研究をした。特に、有機肥料栽培と化学肥料栽培のそれぞれの圃場で土壤環境因子(土壤中の総細菌数、物質循環活性および透(排)水性)の解析を行い、収穫量と土壤環境因子の関係を明らかにした上で、有機肥料栽培に最適な土壤条件を確立した。第3章では、果樹園の土壤環境について解析し、樹園地全般、リンゴ、茶、銀杏、ブドウ、桃、柿、梨およびブルーベリーの最適な土壤条件を決定した。最後に総括と展望では、本論文を総括し、その成果に基づいて今後の課題をまとめた。

SOFIX (Soil Fertile Index) : 土壤肥沃度診断

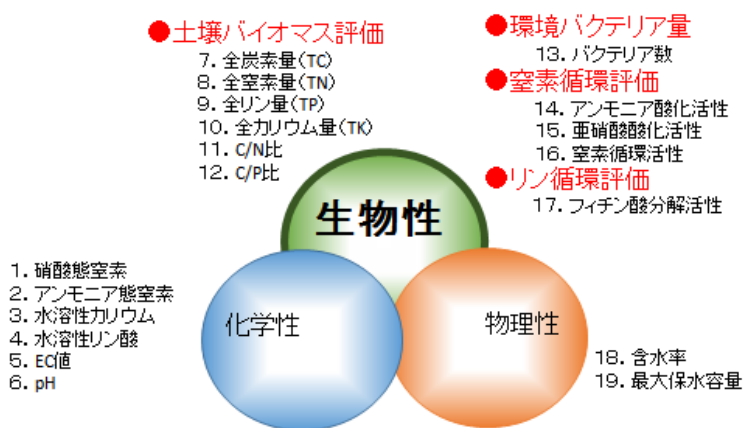


Figure 1 土壤の性質

第1章 異なる収穫量のリンゴ園における土壌の物理的および生化学的特性

1節 緒言

リンゴは、今から 4,000 年前に栽培が始まったと言われるバラ科リンゴ属 (*Malus domestica* Borkh) の落葉高木である。リンゴは、日本を含む世界の温暖な地域で広く栽培され、世界でもっとも古い作物の一つである (Forsline et al. 2003, Cornille et al. 2012)。現在のリンゴ栽培品種の起源は、中央アジアのキルギスタン、カザフスタン、コーカサス地方が原産の *M. domestica* と、ヨーロッパからバチカン半島が原産の *Malus sylvestris* Mill である。現在の品種のほとんどは、*M. domestica* に由来すると考えられており、2,000 種類以上あるといわれている (Koike 1998)。

リンゴの生育には、年平均気温 6~14 °C が適切であり、降水量が 1,000~1,500 mm と比較的少なく、日照時間が 1,800 hr 程度が好適である。また、pH が 5.5~6.5 の弱酸性で (Krishna 2014)、有機物と窒素・リン酸・カリウムが豊富で排水性の良い土壌が必要である。

2013 年の世界のリンゴ生産量は、中国が 39,682,618 t (約 49.1 %) とトップで、アメリカ合衆国が 4,081,608 t (FAO 推定値：約 5.1 %)、トルコが 3,128,450 t (約 3.9 %) などと続き、日本は 741,700 t (約 0.9 %) で 19 位である。日本のリンゴ生産量は、他の先進国に比べて低い。

日本のリンゴ栽培は、1871 年にアメリカから 75 品種のリンゴが輸入され、全国各地に広がったことにより普及した (Soejima et al. 1998)。2013 年の日本国内におけるリンゴ生産量は、主に青森県 412,000 t (約 55.6 %)、長野県 155,300 t (約 20.9 %)、山形県 46,500 t (約 6.3 %)、岩手県 42,800 t (約 5.8 %)、福島県 26,800 t (約 3.6 %)、秋田県 24,300 t (約 3.3 %) といった日本の北に位置する地域で高く、とくに青森県、長野県が日本のリンゴ生産の約 77 % を占める二大リンゴ生産地となっている (MAFF 2014)。2013 年の日本の輸出量は 19,431 t、輸入量が 2,291 t であり、日本の 1 年間のリンゴ消費量は約 519,400 t である。

また、リンゴ栽培の特徴として、化学肥料と農薬の使用、多くの病気が発生しやすい、害虫がつきやすいなどがある (浅利ら 2012)。例えば、斑点落葉病や黒星病は雨の多い時期に発生しやすく、発生すると葉は褐色や緑褐色の斑点が発生し、ほとんどの葉は落ちてしまう。果実には、黒色の斑点が発生しいびつな形になり、出荷することができなくなる。また、赤星病は近隣に針葉樹があると発生しやすい。さらに、炭疽病と輪紋病は、気温が高く雨の多い時期に発生しやすく、果実に輪紋状の斑点が発生して果実を腐らせてしまう。害虫では、ケムシ類、ハマキムシ類やアブラムシ類は、若芽や花を食害するため、これらが発生すると葉が育たなくなる。シンクイムシの発生は、果実を食害する。したがって、リンゴ栽培では、害虫駆除の対策が重要である。このような様々な病虫害の被害からリンゴの木を守るため、

年 11 回程度の農薬散布が必要となる。そのため、リンゴ栽培では、農薬などの化学合成物質を全く使用しないことは難しく、人の健康を考慮した安全安心なリンゴ生産には、化学合成物質を最小限にとどめることが必要である。

日本のリンゴ栽培は、化学肥料と農薬の使用に頼り、長年の農家の経験に基づいて行われているのが現状である（農林水産省 2014）。化学肥料投入の時期については、一般的に土壌の栄養状況と植物生長に基づいている（Nielsen et al. 2002）。リンゴ栽培にとって肥料投入の際には、果樹園の土壌は落ち葉からも肥料を得ているため、落ち葉の栄養分析も考慮しながら施肥をしなければならない（Tagliavini et al. 2007, Tonon et al. 2007, Han et al. 2011）。しかしながら、日本の多くの生産者は全国的な化学肥料の推奨に基づいて 1 年間に窒素 N : 14.4 kg/10a、リン酸 P_2O_5 : 7.2 kg/10a、カリウム K_2O : 4.8 kg/10a、マンガン MnO : 0.48 kg/10a、ホウ素 B : 0.24 kg/10a を投入している（農林水産省 2014）。

リンゴは、長野県で地域特産品として指定されている。そのため、リンゴの収穫量の安定的な増大と品質の向上は、重要な課題である。とくに、農地により収穫量が大きく異なっており、その原因解明と対策が求められている（Fujisawa et al. 2013）。例えば、長野県の同地域、同種類（ふじ）、さらには同一農法にも関わらず、3,000 kg/10a と 2,000 kg/10a の収穫量の違いがしばしば認められる。そこで長野県のリンゴ圃場では、土壌環境の良し悪しの違いによって、生育・収穫量が異なるのではないかと考えた。しかし、土壌環境とリンゴ収穫量との相互関係についての報告数が少ない（Dris et al. 2002, Aggelopoulou et al. 2010）。土壌肥沃度診断指標 SOFIX (soil fertile index) は、有機質肥料が土壌微生物によって分解され、農作物の主要肥料成分である窒素、リン酸、カリウムが適切な量とバランスで供給される物質循環と土壌微生物の活性を含めた土壌の状態を調べるために、土壌の物質循環に寄与する土壌微生物活性に着目した。有機栽培に望ましい土壌成分量とバランスを数値化する手法である。土壌肥沃度診断 SOFIX 技術の確立を目指して、実験農地でトマトの定植が行われた。農家の経験や勘に頼らずに、有機栽培の実現を目指す科学的診断技術である。農作物の作付け前に、SOFIX 技術を用いて、土壌肥沃度を診断し、その結果に応じて投入する有機堆肥が決められる。SOFIX 診断結果から、馬ふんなどの堆肥で土づくりをした有機区と、慣行の化学肥料による化学区に分けてトマトが栽培された。収穫量が落ちるとされる有機栽培でも慣行の化学栽培と同程度の収穫量が確保された。その上、有機栽培のトマトの糖度が 1 度高まるなど、生育と収穫量の違いが検証され、SOFIX 診断の効果が実証された。また、イチゴ、カボチャや白菜なども SOFIX 手法の有効性が確認された。この SOFIX 診断により、リンゴ圃場の土壌は水田や畑などの耕作地の土壌と比較して、全炭素 (TC)、全窒素 (TN)、全リン (TP) および全カリウム (TK) が豊富であると報告された (Kai et al. 2015)。

本章では、リンゴ生産性を改善する目的として収穫量の異なる 2 つの果樹園について、土壌の物理性・化学性および生物性の基礎研究を行った。リンゴ栽培圃場の生物的解析には、SOFIX 技術によって測定した。この診断により、植物生長ならびに物質循環に関する成分の実測値を測定した。また、リンゴの葉と果実の分析も行い、土壌環境の状態と果樹生産性に

関して解析した。

2節 実験材料および方法

1.2.1 リンゴ圃場の概要

調査地は、長野県北部に位置する上水内郡飯綱町である(北緯 36° 26'44.3"N、138° 9'11.6")。Figure 1-1, Figure 1-2 に調査位置を示す。調査地の気候は湿潤であり、7月が一番暖かく、1月が寒い (Figure 1-3)。調査地の果樹園は、北斜面に位置する。リンゴは、山成畑工で栽培されており、生育や収穫量がよいとされる「A 圃場 (収穫量 3,000 kg/10a)」と、生育や収穫量が悪いとされる「B 圃場 (収穫量 2,000 kg/10a)」は隣接している。A 圃場は B 圃場より高い位置にあり、水平方向に 12% の傾斜がある。A 圃場と B 圃場の距離は、約 90 m 離れており、高低差が約 11 m ある。リンゴの品種は、「ふじ」である。また、木の樹齢はともに 30 年であり、圃場面積はともに約 3,000 m² (60 m×50 m) である。そこに、リンゴの木がそれぞれ 15 本ずつ植わっている。リンゴの木の間隔は 16.6 m×12 m である。リンゴの台木はマルバカイドウ (*Malus prunifolia* Borkh. var. *ringo* Asami) である。年間を通して、A 圃場と B 圃場のリンゴの生育速度に違いはない。施肥は、農作業開始の 3 月と収穫後の 12 月の年 2 回実施される。1 年間の施肥量は各々の圃場に窒素 N : 14.4 kg/10a、リン酸 P₂O₅ : 7.2 kg/10a、カリウム K₂O : 4.8 kg/10a、マンガン MnO : 4.8 kg/10a、ホウ素 B : 0.24 kg/10a 投入される。また、農薬については、飯綱町の「リンゴ減農薬研究会防除基準」に基づいて、年 12 回実施される (Appendix 1-2)。さらに、草刈りを 1 年間で 7 回実施している。

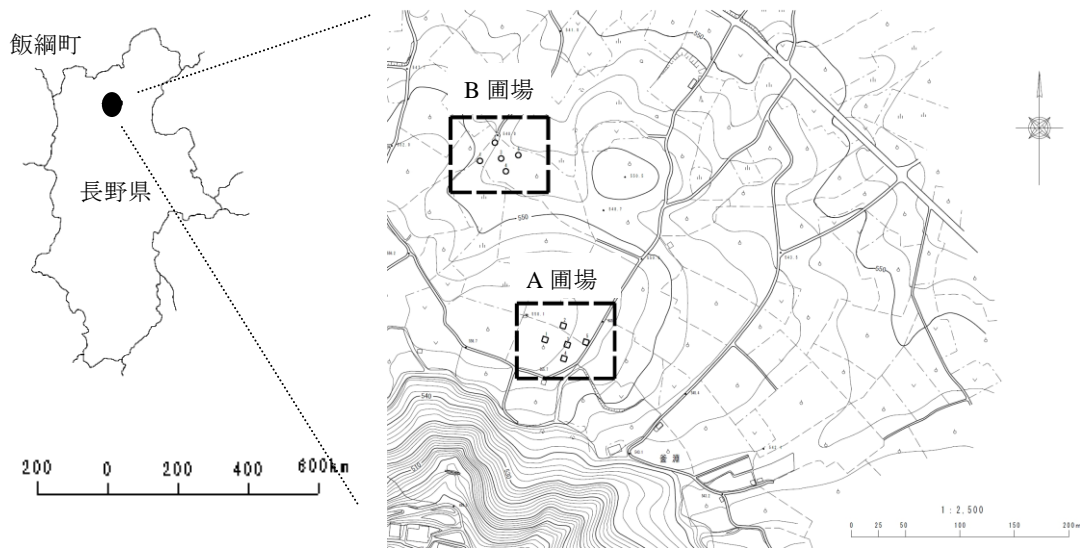


Figure 1-1 調査地および調査圃場の位置図 (A, B : 上水内郡飯綱町)

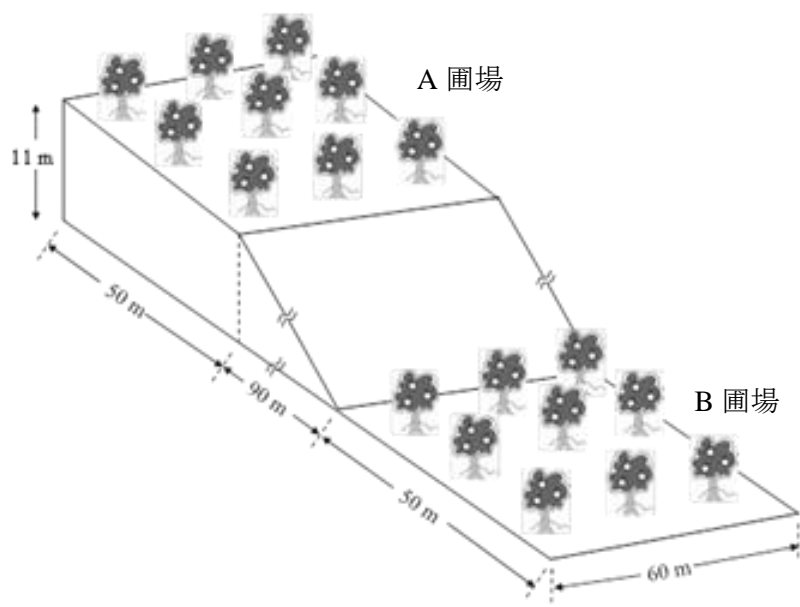
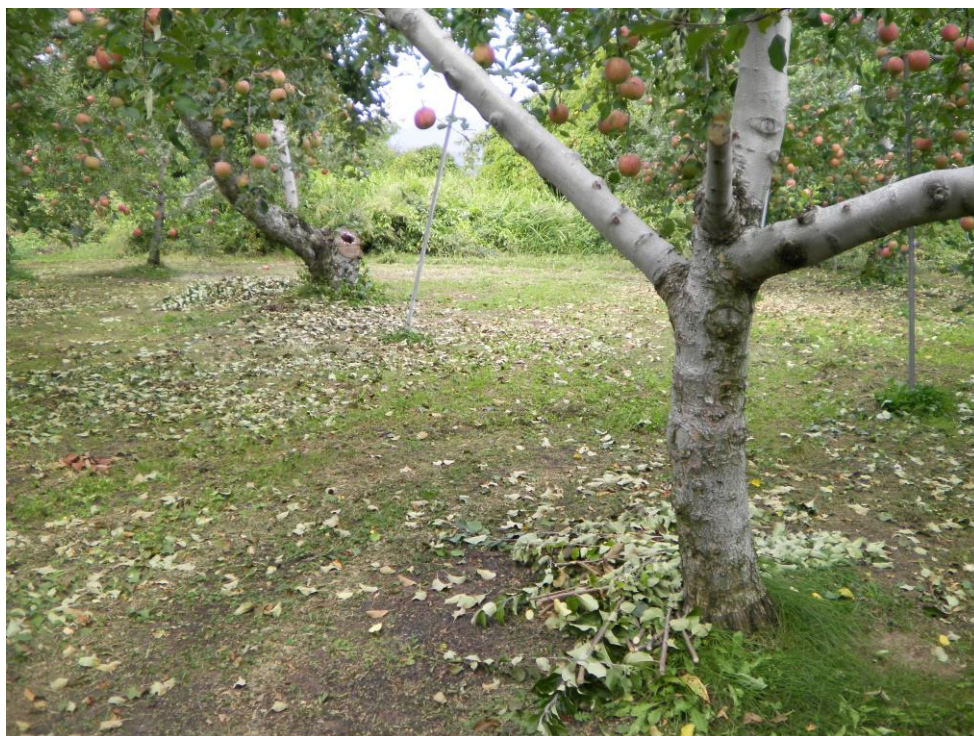


Figure 1-2 リンゴ圃場の概要図



Photograph 1-1 リンゴ園の様子 (A 圃場 : 2014 年 10 月 4 日撮影)



Photograph 1-2 リンゴ園の様子 (B 圃場 : 2014 年 10 月 4 日撮影)

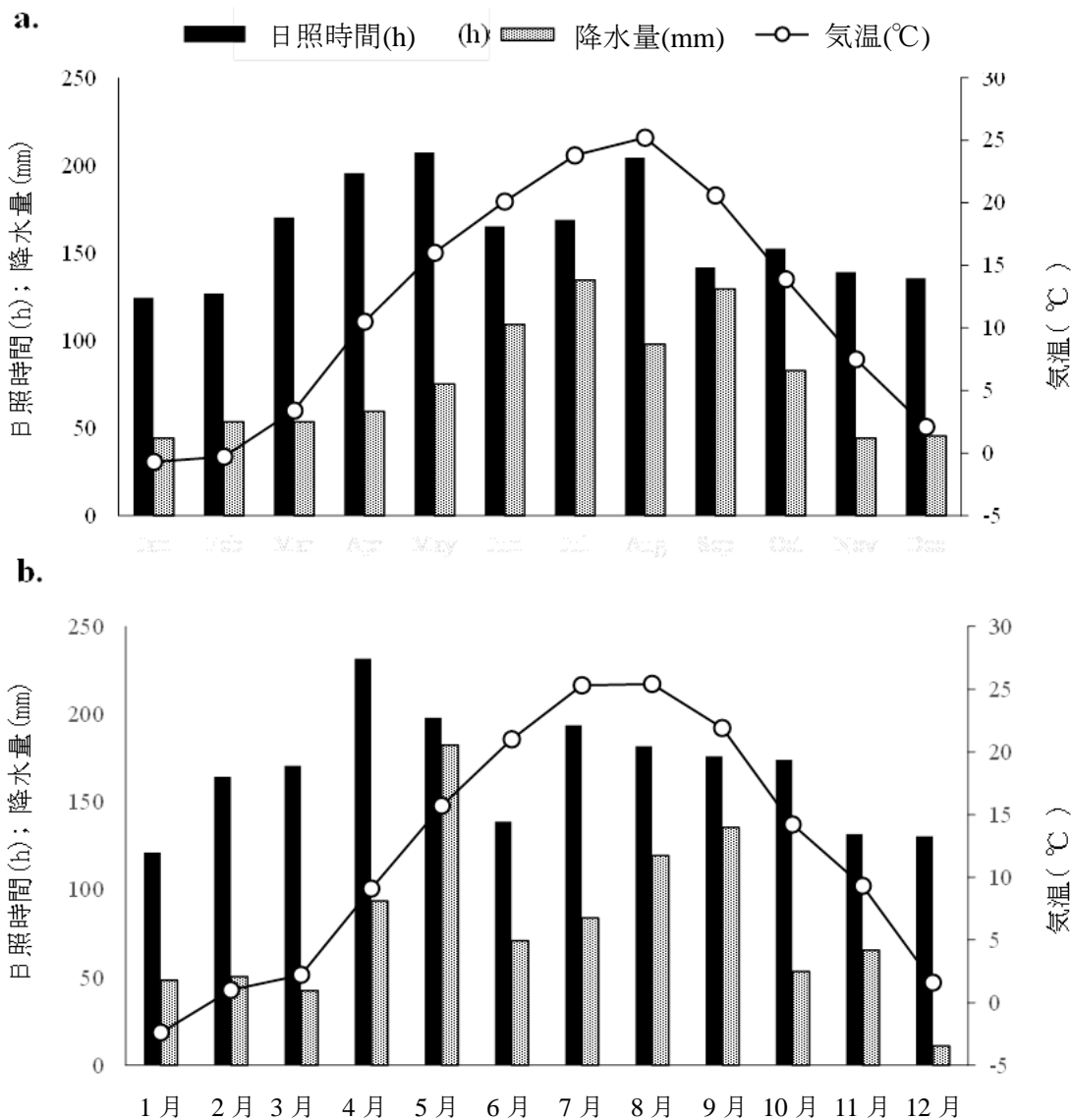


Figure 1-3 気象状況（気温、降水量、日照時間）
1980年から2010年までの平均 (a)と2011年 (b)

1.2.2 農地の物理性

リンゴの生育が異なる2圃場の土壌の物理的性質を調べるため、土壌断面柱状解析を行った。リンゴの成木の根が存在する深さ40 cmまでの解析を行った。土壌の物理性を調査するにあたり、試坑断面に層界を入れ、地表面から深さ5 cmごとに、土壌硬度計（藤原製作所製、山中式標準型、3-154-914、東京）で土壌の緻密度を測定した。その後に土壌試料のサンプリングを行った。サンプリング地点は「A圃場」、「B圃場」であり、一般的な土壌調査法に準じて行った採取試料として、攪乱土壌および不攪乱土壌を採取した。攪乱土壌は、土の基本

的物性の測定のために採取した (Table1-1)。不攪乱土壌は 100 cm² 定容量サンプラー缶 (Daiki 製、ステンレス試料円筒、DIK-1801、埼玉) で土の基本的物性、飽和透水試験 (飽和透水係数) などの間隙構造試験のために採取した。試坑断面に層界を入れ、その際、現地における土壌構造の異方性から、100 cm² 定容量サンプラー缶を鉛直・水平方向に 3 個ずつ採取した。

含水比 (%) の測定 (JIS A 1203) は、恒常乾燥炉 (ADVANTEC 製、定温乾燥機 FS-605、東京) を用いた炉乾法、真比重の測定 (JIS A 1202) はピクノメーター法 (As one 製、比重瓶ゲーリュサック型、兵庫)、間隙比、間隙率 (%) および飽和度 (%) については、真比重の値からそれぞれ求めた。固相割合 (%) については、乾燥密度と真比重から算出した。液相割合 (%) については、乾燥密度と含水比から求めた。気相割合 (%) については、固相割合と液相割合の数値から求めた。飽和透水試験の測定 (JIS A 1218) では、変水位法 (Daiki 製、変水位透水性測定器、DIK-4050、埼玉) を採用し、深さ 10 cm、35 cm の鉛直方向と水平方向のそれぞれの飽和透水係数 k (cm/s) を求めた。土性の判定は、粒度試験 (JIS A 1204) の結果から三角座標法により求めた。試験は、粒径 75 μm 以上を対象としたふるい分析と 75 μm 未満を対象とした沈降分析から、土壌を構成する土粒子径の分布状態を全質量に対する百分率で表した。土壌の基本的物性算出における計算式については、Appendix 1-1 を参照のこと。

1.2.3 農地の化学性と生物性

A 圃場、B 圃場で地表面から約 2~3 cm を取り除いた深さ約 15 cm までの土壌を、中央と対角線の 5 箇所から均等混合し 1 検体とした。A 圃場、B 圃場の経時変化を解析するため、4 月、7 月、12 月の計 3 回の試料採取を行った。調査試料から、植物生長に関する成分として硝酸態窒素、アンモニア態窒素、水溶性リン (P_2O_5)、水溶性カリウム (K_2O) を分析した。また、物質循環に関する成分として C/N 比、C/P 比、全炭素 (TC)、全窒素 (TN)、全リン (TP : P_2O_5 換算)、全カリウム (TK : K_2O 換算)、総細菌数、アンモニア酸化活性、亜硝酸酸化活性、リン循環活性評価値、pH、EC を求めた。これらは、一般社団法人 SOFIX (soil fertile index) 農業推進機構の「SOFIX マニュアル」によって分析した。

土壌中の窒素循環は、植物生長と密接に関連している。窒素循環は、土壌微生物による硝化や脱窒作用によるものである。土壌微生物の活性を正確に把握するため、総細菌数、亜硝酸酸化活性、アンモニア酸化活性の 3 要素から、窒素循環活性の評価図を作成した。分析方法は、下記のとおりである。

1. 無機態窒素抽出

1-1-1 無機態窒素抽出の準備

試料約 4.0 g を 50 ml 遠心管に量り取り、実験に使用する試薬を調整した。1 M 塩化カリウム溶液 40 ml を加え、振とう (100 rpm, 60 min) した。2 ml エッペンチューブに試料溶液 1.5

ml を加え、遠心分離 (10,000 rpm, 5 min) して沈殿物を浮遊させた後、得られた上澄み 1 ml を新しい 2 ml エッペンチューブに量り取った。遠心分離 (10,000 rpm, 5 min) して浮遊物を沈殿させた。得られた上澄液を無機態窒素抽出液として、以下のアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の定量に使用するため、使用分量を作製した。

1-1-2 アンモニア態窒素の定量 (インドフェノール青法)

上記 1-1-1 で調整した無機態窒素抽出液を 9-1 アンモニア態窒素の検量線に従い希釈した。希釈溶液 1.0 ml を試験管に入れ、フェノールニトロプルシッド溶液 400 μ l を加えて静かに攪拌した。次亜塩素酸ナトリウム溶液 600 μ l を加えて静かに攪拌し、静置 (25 °C, 45 min) した。吸光度 (Abs (635) nm) を測定し、アンモニア態窒素の定量を行い、9-1 アンモニア態窒素の検量線を用いて濃度を算出した。

1-1-3 亜硝酸態窒素の定量 (ナフチルエチレンジアミン法)

上記 1-1-1 で調整した無機態窒素抽出液を 9-2 アンモニア態窒素の検量線に従って希釈した。希釈溶液 1.0 ml を試験管に入れ、スルファニルアミド溶液 (ジアゾ化剤) 100 μ l を加えて攪拌し、静置 (25 °C, 3 min) した。ナフチルエチレンジアミン溶液 (カップリング剤) 100 μ l を加えて攪拌し、静置 (25 °C, 20 min) した。吸光度 (Abs(540)nm) を測定し、亜硝酸態窒素の定量を行い、9-2 アンモニア態窒素の検量線を用いて濃度を算出した。

1-1-4 硝酸態窒素の定量 (ブルシン・スルファニル酸法)

上記 1-1-1 で調整した無機態窒素抽出液を 9-3 硝酸態窒素の検量線に従って希釈した。希釈溶液 200 μ l を試験管に入れ、ブルシン・4-アミノベンゼンスルホン酸溶液 100 μ l を加えて攪拌した。硫酸 (H_2SO_4) 1.0 ml を加えて攪拌し、静置 (4 °C, 暗所, 10 min) した。蒸留水 1.0 ml を加えて攪拌し、静置 (4 °C, 暗所, 30 min) した。吸光度 (Abs(410)nm) を測定し、硝酸態窒素の定量を行い、9-3 硝酸態窒素の検量線を用いて濃度を算出した。

1-2 全窒素

1-2-1 全分解抽出液 (ケルダール全分解)

試料調整前にケルダール装置の電源を入れて温度を上げておき、試料約 0.5 g を量り取り、ケルダールチューブに入れる。試料がケルダールチューブの器壁に当たらないように注意して入れた。ただし、困難な場合は試料を薬包紙に包んでチューブに入れた。チューブに硫酸銅 5 水和物 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.5 g を入れ、濃硫酸 (H_2SO_4) 5.0 ml、過酸化水素水 (H_2O_2) 5.0 ml を加えた。ケルダール装置で 420 °C、1~1.5 hrs (全て分解するまで) 加熱し、ケルダール装置のスイッチを切り、スタンドに乗せて (加熱部から離す)、冷却した (30 min 以上置く)。ケルダールチューブに蒸留水約 50 ml を加えてチューブ内の試料を溶出させた。ろ紙 (125 mm) を乗せたロート (75 mm) を、100 ml メスフラスコにセットし、溶液をろ紙で

ろ過した。2~3回蒸留水をケルダールチューブに加え、サンプルが全てろ過されるようにすすいだ。そして、蒸留水をメスフラスコに注ぎ、100 ml にメスアップした。50 ml 遠心管に40 ml 程度分取し、全分解溶液とし、以下の全窒素の定量に用いた。

2) 全窒素の定量 (インドフェノール青法)

アンモニア態窒素の定量と同様の方法である。全分解溶液を 9-1 アンモニア態窒素の検量線に従い希釈した。希釈溶液 1.0 ml を試験管に入れ、フェノールニトロプルシッド溶液 400 μ l を加えて静かに攪拌した。次亜塩素酸ナトリウム溶液 600 μ l を加えて静かに攪拌し、静置 (25 °C, 45 min) した。吸光度 (Abs(635) nm) を測定し、全窒素の定量を行う。9-1 アンモニア態窒素の検量線を用いて濃度を算出した。

1-3 窒素循環活性

1-3-1 土壌の準備

あらかじめ、含水率の測定をしておき、基質添加直後 (0 日目) と静置後 (3 日目) に測定した。1 試料あたり遠心管 6 本分を調製した。約 30 g (湿重量) の試料土壌に蒸留水を加えて、土壌は 60% に含水率を調整した。50 ml 遠心管 6 本に含水率を調整した試料土壌 4.0 g を量り入れた。その際、試料が器壁につかないように注意した。以下の対照実験 (1-3-2)、アンモニア酸化活性 (1-3-3)、亜硝酸酸化活性 (1-3-5) に使用した。

1-3-2 対照実験の準備

1-3-1 で調製したうちの遠心管の 2 本に、蒸留水 100 μ l を (対照として) 添加した。このうち 1 本の遠心管は 0 日目 (基質添加直後) のアンモニア態窒素および亜硝酸態窒素の定量に使用し、速やかに 1-3-4 へ進んだ。もう 1 本の遠心管は蓋をして、3 日目のアンモニア態窒素および亜硝酸態窒素の定量のために、静置 (25 °C, 3 days) し、1-3-4 に進んだ。

1-3-3 アンモニア酸化活性 (反応)

1-3-1 で調製したうちの遠心管の 2 本に基質として 0.085 M 硫酸アンモニウム水溶液 100 μ l を添加した。このうち 1 本の遠心管は 0 日目 (基質添加直後) のアンモニア態窒素の定量に使用し、速やかに 1-3-4 に進んだ。もう 1 本の遠心管は蓋をして、3 日目のアンモニア態窒素の定量のために、静置 (25 °C, 3 days) し、1-3-4 に進んだ。

1-3-4 アンモニア酸化活性 (測定)

1-3-2 の調整溶液、1-3-3 の調整溶液の遠心管に 1 M 塩化カリウム溶液 40 ml を加え、振とう (100 rpm, 60 min, 25 °C) した。対照サンプルは 1-3-6 と同時にできる。2 ml エッペンチューブに各サンプル 1.5 ml を量り取り、遠心分離 (10,000 rpm, 5 min) した。得られた上澄液 1 ml を新しい 2 ml エッペンチューブに量り取り、1-1-2 に従い、アンモニア態窒素の定量

を行った。

1-3-5 亜硝酸酸化活性（反応）

1-3-1 で調製したうちの遠心管の 2 本に基質として 0.168 M 亜硝酸ナトリウム水溶液 100 μl を添加した。このうち 1 本の遠心管は 0 日目（基質添加直後）の亜硝酸態窒素の定量に使用し、速やかに 1-3-6 に進んだ。もう 1 本の遠心管は蓋をして、3 日目の亜硝酸態窒素の定量のために、静置（25 $^{\circ}\text{C}$, 3 days）し、1-3-6 に進んだ。

1-3-6 亜硝酸酸化活性（測定）

1-3-2 の調製溶液、1-3-5 の調製溶液の遠心管に 1 M 塩化カリウム溶液 40 ml を加え、振とう（100 rpm, 60 min, 25 $^{\circ}\text{C}$ ）した。対照サンプルは 1-3-4 と同時にできる。2 ml エッペンチューブに各サンプル 1.5 ml を量り取り、遠心分離（10,000 rpm, 5 min）し、得られた上澄液 1 ml を新しい 2 ml エッペンチューブに量り取った。1-1-3 に従い、亜硝酸態窒素の定量を行った。

窒素循環活性の原理：試料土壌の最大保水量を測定し、畑土壌は最大保水量の 60% に含水率を調製後、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ （硫酸アンモニウム）あるいは $\text{NO}_2^-\text{-N}$ （亜硝酸ナトリウム）を終濃度 60 $\mu\text{g-N/g-soil}$ となるように試料土壌に投与し、含水率一定で静置（25 $^{\circ}\text{C}$, 3 days）し、投与した基質の減少率から $\text{NH}_4^+\text{-N}\rightarrow\text{NO}_2^-\text{-N}$ の変換および $\text{NO}_2^-\text{-N}\rightarrow\text{NO}_3^-\text{-N}$ の変換の活性を解析した（Figure1-4）。

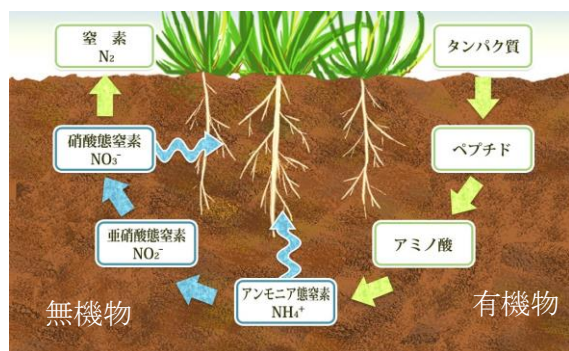


Figure 1-4 窒素循環活性の概要図

2. リン関連分析

2-1 水溶性リン

2-1-1 水溶性溶液の抽出

試料約 1.0 g を 50 ml 遠心管に量り取った。蒸留水 20 ml を加え、振とう（100 rpm, 60 min）

し、2 ml エッペンチューブに試料溶液 1.5 ml を加え、遠心分離 (10,000 rpm, 5 min) した後、得られた上澄液 1 ml を新しい 2 ml エッペンチューブに量り取った。水溶性溶液抽出液として以下の水溶性リン酸の実験に使用する。以下の実験での使用量分を作製し、この溶液は水溶性カリウムの定量にも使用できる。廃液は水溶性廃液である。

2-1-2 水溶性リン酸の定量

実験に使用する試薬を調整した。エッペンチューブもしくは遠心管に、モリブデン酸アンモニウム ($100 \mu\text{l} \times \text{サンプル}$) とアスコルビン酸 ($20 \mu\text{l} \times \text{サンプル}$) を加えてよく混合する。水溶性溶液抽出液 1 ml を試験管に入れ、①のモリブデン酸アンモニウム-アスコルビン酸 (5:1) 混合溶液 $100 \mu\text{l}$ を添加して攪拌後、静置 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 min) した。9-4 に従い、サンプルを希釈した。吸光度 (Abs(710)nm) を測定し、リン酸の定量を行った。9-4 の検量線を用いて濃度を算出した。

2-2 全リン

2-2-1 全分解抽出液 (ケルダール全分解)

試料調整前にケルダール装置の電源を入れて温度を上げておく。試料約 0.5 g を量り取り、ケルダールチューブに入れる。試料がケルダールチューブの器壁に当たらないように注意して入れた。チューブに硫酸銅 5 水和物 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.5 g を入れる。濃硫酸 (H_2SO_4) 5.0 ml、過酸化水素水 (H_2O_2) 5.0 ml を加える。ガラスピペットを使い、ケルダール装置で $420 \text{ }^\circ\text{C}$, 1~1.5 hrs (全て分解するまで) 加熱する。ケルダール装置のスイッチを切り、スタンドに乗せて (加熱部から離す)、冷却した (30 min 以上置く)。ケルダールチューブに蒸留水約 50 ml を加えてチューブ内の試料を溶出させる。ろ紙 (120 mm, No. 6) を乗せたロート (75 mm) を、100 ml メスフラスコにセットする。バランスが不安定なので倒れないように注意した。溶液をろ紙でろ過する。2-3 回蒸留水をケルダールチューブに加え、サンプルが全てろ過されるようにすすぐ。蒸留水をメスフラスコに注ぎ、100 ml にメスアップする。50 ml 遠心管に 40 ml 程度分取し、全分解溶液とし、以下の全カリウムの定量に用いた。この全分解溶液は、全窒素、全カリウムの定量にも使用できる。

2-2-2 全リン酸の定量

実験に使用する試薬を調整した。全分解溶液を 9-1 に従い希釈する。希釈溶液 1.0 ml を試験管に入れる。エッペンチューブもしくは遠心管に、モリブデン酸アンモニウム ($100 \mu\text{l} \times \text{サンプル}$) とアスコルビン酸 ($20 \mu\text{l} \times \text{サンプル}$) を加えてよく混合する。試験管に調整したモリブデン酸アンモニウム-アスコルビン酸 (5:1) 混合溶液 $100 \mu\text{l}$ を添加し攪拌後、静置 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 min) する。吸光度 (Abs(710)) を測定し、リン酸の定量を行い、9-4 の検量線を用いて濃度を算出した。

2-3 リン循環活性

2-3-1 土壌の準備

基質添加直後（0日目）と静置後（3日目）に測定した。1試料あたり遠心管4本分を調製した。50 ml 遠心管4本に試料 1.0 g を量り入れた。

2-3-2 対照実験の準備

2-3-1 で調製したうちの遠心管の2本に、蒸留水 150 μ l を（対照として）添加した。②このうち1本の遠心管は0日目（基質添加直後）のリン酸の定量に使用し、速やかに2-3-4に進んだ。もう1本の遠心管は蓋をし、3日目のリン酸の定量のために、静置（25 $^{\circ}$ C, 3 days）し、2-3-4に進んだ。

2-3-3 リン循環活性（反応）

2-3-1 で調製したうちの遠心管の2本に基質としてフィチン酸（ $C_6H_{18}O_{24}P_6$, 3.3 g / 30 ml , pH7.0）150 μ l を添加する。

②このうち1本の遠心管は0日目（基質添加直後）のリン酸の定量に使用する。→速やかに2-3-4に進んだ。

③もう1本の遠心管は蓋をして、3日目のリン酸の定量のために、静置（25 $^{\circ}$ C, 3 days）し、2-3-4に進んだ。

2-3-4 リン循環活性（測定）

2-3-2 の調製溶液、2-3-3 の調整溶液の遠心管に水 20 ml を加え、振とう（100 rpm, 60 min, 30 $^{\circ}$ C）する。2 ml エッペンチューブに 1.5 ml を量り取り、遠心分離（10,000 rpm, 5 min）し、得られた上澄液 1 ml を新しい 1.5 ml エッペンチューブに量り取った。2-1-2 に従いリン酸を測定した。9-4 の検量線を用いて濃度を算出した（Figure1-5）。

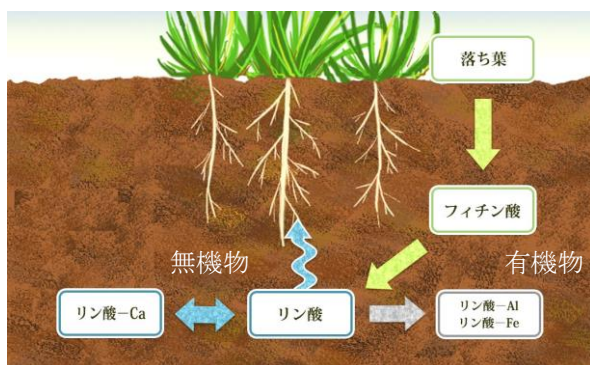


Figure 1-5 リン循環活性の概要図

3. カリウム関連分析

3-1 水溶性カリウム

3-1-1 水溶性溶液の抽出

試料約 1.0 g を 50 ml 遠心管に量り取る。蒸留水 20 ml を加え、振とう (100 rpm, 60 min) する。2 ml エッペンチューブに試料溶液 1.5 ml を加え、遠心分離 (10,000 rpm, 5 min) した後、得られた上澄液 1 ml を新しい 2 ml エッペンチューブに量り取った。水溶性溶液抽出液として以下の水溶性カリウムの実験に使用した。以下の実験での使用量分を作製する。この溶液は水溶性リン酸の定量にも使用できる。廃液は水溶性廃液である。

3-1-2 水溶性カリウムの定量 (原子吸光光度法)

原子吸光光度計 (Z-2300, HITACHI) で測定した。9-5 に従い、サンプルを希釈する。10 ml 程度用意する。原子吸光光度計により測定する。アセチレンガスのバルブを開いて、二次圧が 0.11 MPa になっていることを確認した。エアーコンプレッサーの電源を入れた (0.8 MPa になる)。機械の電源を入れ、パソコン (以下、「PC」) の電源を入れる。PC 上の「原子吸光光度計」のソフトウェアを立ち上げる。PC 上の矢印 (→) を選択する。PC 上、分析したい成分 (K/Ca/Fe/Mn etc.) を選択する。ランプの番号と合っていることを確認する。PC 上の矢印 (→) を 2 回選択して、スタンダード (標準) を選択する。PC 上検量線を確認した後、「確定」 (小さい緑の矢印) をクリックする。

PC 上「はい」をクリックする。PC 上、結果のデータを保存するフォルダを決める。PC 上の画面左側の Ready ボタンをクリックする。水道の蛇口をひねり、水を供給する (下のホースから水が出ていれば良い)。コンプレッサーのダイヤルを S (stop) から O (open) に回して空気を供給する。PC のディスプレイが "ready" になるまで待つ。ガスをチェックして、(PC 上) 「はい」をクリックする。機械本体の "FLAME" を押す (火がつくまで数分待つ。つかなければやり直す)。チューブの先をイオン交換水に浸して機械本体の "AUTO ZERO" を押す。チューブの先端をスタンダードとサンプルの入った試験管に浸し、溶液を吸水させて測定した。吸いきらないようにすばやくスタートする。9-5 の検量線を用いて濃度を算出した。

3-2 全カリウム

3-2-1 全分解抽出液 (ケルダール全分解)

試料調整前にケルダール装置の電源を入れて温度を上げておく。試料約 0.5 g を量り取り、ケルダールチューブに入れる。その際、試料がケルダールチューブの器壁に当たらないように注意して入れた。チューブに硫酸銅 5 水和物 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.5 g を入れ、濃硫酸 (H_2SO_4) 5.0 ml、過酸化水素水 (H_2O_2) 5.0 ml を加える。ケルダール装置で 420 °C, 1-1.5 hrs (全て分解するまで) 加熱し、ケルダール装置のスイッチを切り、スタンドに乗せて (加熱部から離す)、冷却し、30 min 以上置いた。ケルダールチューブに蒸留水約 50 ml を加えてチューブ内の試料を溶出させる。ろ紙 (120 mm, No. 6) を載せたロート (75 mm) を、100 ml メス

フラスコにセットする。溶液をろ紙でろ過する。2-3回蒸留水をケルダールチューブに加え、サンプルが全てろ過されるようにすすぐ。蒸留水をメスフラスコに注ぎ、100 ml にメスアップし、50 ml 遠心管に 40 ml 程度分取し、全分解溶液とし、以下の全カリウムの定量に用いた。この全分解溶液は、全窒素、全リンの定量にも使用できる。

3-2-2 全カリウムの定量

全分解溶液を 9-5 に従い希釈する。希釈溶液 1.0 ml を試験管に入れ、試料溶液を原子吸光度計で測定する。9-5 の検量線を用いて濃度を算出した。

4. 炭素関連分析

4-1 全炭素

全炭素量は、全有機体炭素系 (TOC-V5000、島津製作所、京都) で定量する。PC、TOC-V および TOC 分析器 (SSM-5000A、島津製作所、京都) の電源を入れる。SSM の温度が 900 °C になるまで待つ。酸素のバルブ (2 か所) を開ける。天秤にサンプルボートを載せ、土壌サンプルは 0.6~1.0 g 程度、有機資材および堆肥サンプルは 0.05~0.1 g 程度を量り取る。

5. 総細菌数解析法 (eDNA 法)

5-1 eDNA の抽出液

実験前に試薬を調整しておく。オートクレーブ滅菌 (121°C, 15 min) した 50 ml 遠心管に試料 1.0 g (1.0 ml) を量り取り、DNA 抽出緩衝液を 8.0 ml、20% ドデシル硫酸ナトリウム (SDS) 溶液を 1.0 ml 加える。攪拌機に遠心管をセットし、攪拌 (1,500 rpm, 20 min) する。遠心管から滅菌した 2.0 ml エッペンチューブにサンプル 1.5 ml を分取し、遠心分離 (8,000 rpm, 20 °C, 10 min) する。水層を新たな有機溶媒耐性のある 1.7 ml エッペンチューブに 700 μ l 分取し、クロロホルム・イソアミルアルコール (24 : 1, v/v) を 700 μ l 加えて、緩やかによく上下に混和させて攪拌する。遠心分離 (14,000 rpm, 20 °C, 10 min) する。水層を新たなエッペンドルフチューブに 500 μ l 分取し、2-プロパノールを 300 μ l 加えて緩やかに攪拌する。遠心分離 (14,000 rpm, 20 °C, 20 min) する。エッペンチューブを素早く下に向けて水層を除去し、70% (v/v) エタノールを 1.0 ml 加える。その後、遠心分離 (14,000 rpm, 20 °C, 5 min) する。エッペンチューブを素早く下に向けて水層を除去し、アスピレーターで 30 min 減圧乾燥する。10 : 1 TE 緩衝液を 50 μ l 加え、乾燥したサンプルをよく懸濁・溶解させ、これを eDNA 抽出溶液とする。

5-2 eDNA の定量

eDNA 抽出溶液 5 μ l に dye 4 μ l (bromophenol blue, 3X) を混合し、全量 9 μ l をアガロースゲルにアプライする。*追加のサンプルは、10 μ l (全量) をアプライする。既知量の DNA を含む smart ladder (NIPPON GENE, 富山) 1.5 μ l と 10 : 1 TE 緩衝液 4.5 μ l を混合し、アガロ

ースゲルにアプライする。アガロースゲル電気泳動を 100V で約 30 分間行った後、アガロースゲルに UV 照射を行い、KODAK 1D Image Analysis software (KODAK、アメリカ) によってエチジウムブロマイドを標識とした DNA バンドの蛍光強度測定を行い、アガロースゲル上の DNA 量を測定する。下記の計算式によって得られた eDNA 量を、eDNA-微生物数検量線に当てはめ、微生物数に換算する (Figure 1-6)。

$$\text{微生物数 (cells/mg)} = \text{eDNA 量 } (\mu\text{g/ml}) \times 1.70 \times 10^8 \text{ [R}^2=0.96\text{]}$$

$$\text{eDNA 量} = \text{ゲル DNA 量 (ng)} \times \frac{10 : 1 \text{ TE 緩衝液全量 } (\mu\text{l})}{\text{eDNA 溶液のアプライ量 } (\mu\text{l})} \times \frac{\text{全溶液量 } (\mu\text{l})}{\text{分取した水層の量 } (\mu\text{l})} \times 10^{-3}$$

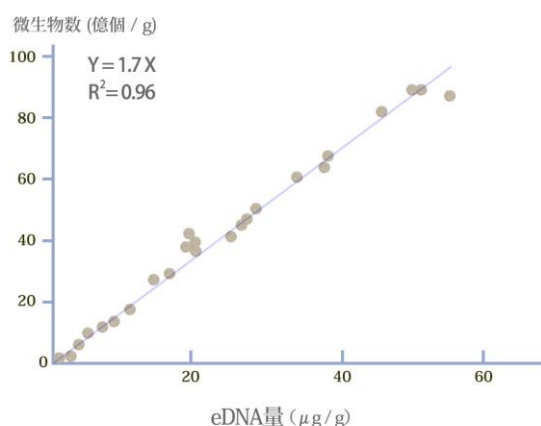


Figure 1-6 DAPI 染色法によって検鏡された土壌細菌数と eDNA 量の関係解析

6. EC、pH

50 ml 遠心管に試料 10 g を量り取り、25 ml (2.5 倍量) の蒸留水を入れる。振とう (100 rpm, 1 hr) する。浮遊物が沈殿するまで待つ。専用の機器で EC、pH をそれぞれ測定する。

1.2.4 葉と果実の化学性、糖度、収穫量について

有機資材品質指標 (Organic material Quality Index) の分析は、リンゴの葉と果実中の成分の季節変化を調べるため、7月の成長期と12月の収穫期に葉と果実のサンプルを採取した。調査地の果実は12月の間に収穫された。葉については、TN、TP および TK を測定項目とし、分析は土壌分析と同様の方法で行った。果実については、TN、TP、TK および糖度を測定した。糖度については、パレットデジタル屈曲率 (DBX-55、ATAGO、東京) で測定した。

3節 結果

1.3.1 リンゴ圃場の気象条件

飯綱町の1980年から2010年の31年間の平均化した気温、降水量、日照時間（以下、「平年」と示す）と、2011年の気温、降水量、日照時間の気象条件を示す。飯綱町は、最高気温7月に31.2 °C、最低気温1月に-5.7 °Cと日本海の影響を受けた積雪寒冷地であり、内陸性気候のため寒暖差が大きかった。飯綱町の年平均気温は、約11.5 °Cであり、平年気温11.9 °Cとほぼ同程度であったことから、2011年は平年並みであった。降水量は、2011年に957.5 mmであり、平年降水量929.4 mmであることから平年並みであった。日照時間は、2011年に2,013 hrであり、平年日照時間1,931 hrより若干多かった。飯綱町の1980年から2010年の31年間の平均化した気温、降水量、日照時間とリンゴ生育条件（小池 2006）を比較すると、飯綱町は、リンゴ生育の適地であった。

1.3.2 農地の物理的解析

土色の表示は、マンセル表色系に準じた（農林水産省 2010）。A 圃場の土性は、地表面から深さ15 cmまで埴壤土 CL（Clay Loam）であり、7.5 YR 4/4、褐色であった。15~40 cmが軽埴土 LiC（Light Clay）であり、7.5 YR 3/3、暗褐色であった。B 圃場の土性は、地表面から深さ40 cmまで埴壤土 CL（Clay Loam）であり、7.5 YR 4/4、褐色であった（Figure 1-7）。

土の基本的物理性を示す（Table 1-1）。含水比において、A 圃場の深さ10 cmで24.4 %、35 cmで35.1 %であった。B 圃場の深さ10 cmで27.7 %、35 cmで25.6 %であった。これらのことから、深さ10 cmではB 圃場で、深さ35 cmではA 圃場で含水比が高かった。乾燥密度においては、A 圃場の深さ10 cmで1.420 g/cm³であり、それ以外は、A、B 圃場ともに大きな違いは見られなかった。

飽和透水係数を比べてみると、深さ10 cmの鉛直方向では10⁻⁵ オーダー、深さ35 cmの鉛直方向では10⁻⁶ のオーダーであった。また、深さ35 cmの水平方向では10⁻⁶ のオーダーであり、A 圃場とB 圃場ともに同様な値を示した。しかし、深さ10 cmの水平方向では、A 圃場が10⁻⁵ のオーダーであり、B 圃場では10⁻⁶ のオーダーを示した。このことから、A 圃場はB 圃場よりも地表面から浅い深さ10 cmで、透水性に優位差がみられた。2つの果樹園の間では、深さ10 cmの水平方向の飽和透水係数を除いて、大きな違いはみられなかった。

透水係数が>10⁻¹ (cm/s) では「透水性が高い」、10⁻¹~10⁻³ (cm/s) では「透水性が普通」、10⁻³~10⁻⁵ (cm/s) では「透水性が低い」、10⁻⁵~10⁻⁷ (cm/s) では「透水性が非常に低い」、10⁻⁷ (cm/s) では「透水性が実質上不透水」とであると分類されている。このことから、A 圃場とB 圃場は、透水性が非常に低いことがわかった。

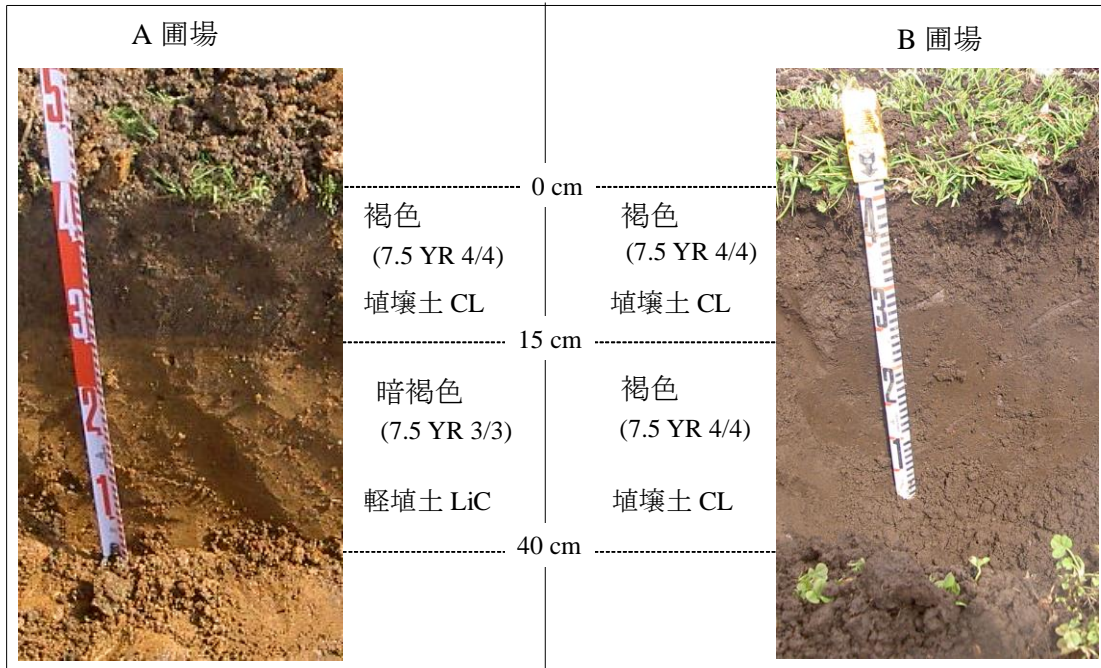


Figure 1-7 土壤構造図 (2011 年 4 月 2 日)

Table 1-1 土の基本的物理性

項目	A 圃場		B 圃場	
	10 cm	35 cm	10 cm	35 cm
含水比 ω (%)	24.4	35.1	27.7	25.6
真比重 G_s	2.664	2.730	2.605	2.658
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.776	1.640	1.665	1.601
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.420	1.214	1.296	1.275
間隙比	0.88	1.25	1.01	1.08
間隙率 n (%)	46.70	55.53	50.25	52.03
飽和度 S_r (%)	74.05	76.77	71.44	62.65
固相割合 (v/v) (%)	53.30	44.47	49.75	47.97
液相割合 (v/v) (%)	34.58	42.63	35.90	32.60
気相割合 (v/v) (%)	12.12	12.90	14.35	19.43
飽和透水係数 (鉛直) (cm/s)	4.7×10^{-5}	1.2×10^{-6}	6.7×10^{-5}	1.2×10^{-6}
飽和透水係数 (水平) (cm/s)	1.9×10^{-5}	4.1×10^{-6}	5.1×10^{-6}	7.0×10^{-6}

1.3.3 農地の生化学的解析

A 圃場と B 圃場で、4 月、7 月および 12 月の窒素循環活性評価値、総細菌数、リン循環活性評価値がほとんど等しかった (Table 1-2、Figure 1-8)。いずれの圃場でも総細菌数は、4 月から 12 月にかけて徐々に増大していたのに対して、窒素循環活性評価値が徐々に減少していた。リン循環活性評価値は、7 月に最も高かった。TC、TN および TP においては、B 圃場が A 圃場より約 2 倍高かった。水溶性リン酸 (SP) および水溶性カリウム (SK) においても、B 圃場が A 圃場より高かった。同地域、B 圃場は、A 圃場よりも土壤中に含まれる有機物、無機物の栄養分の量が大きかった。2 つの圃場では、土壤中に含まれる栄養分の量が異なっていた。

Table 1-2 リンゴ土壌の SOFIX 分析結果

測定項目	A 圃場			B 圃場		
	4月	7月	12月	4月	7月	12月
窒素循環活性評価値 (点)	96	59	33	92	77	33
総細菌数 ($\times 10^8$ cells g^{-1} soil)	14	17	18	13	16	17
アンモニア酸化活性 (%)	93	38	0	96	66	0
亜硝酸酸化活性 (%)	100	100	100	91	100	100
リン循環活性評価値 (%)	23	96	47	39	100	53
pH	7.0	7.4	7.5	7.2	7.6	6.8
全炭素 TC (mg/kg)	35,700	45,900	46,900	59,800	85,600	67,400
全窒素 TN (mg/kg)	4,100	4,500	5,100	10,500	8,500	7,500
アンモニア態窒素 (mg/kg)	2	3	8	3	3	2
硝酸態窒素 (mg/kg)	0	4	0	8	20	2
C/N 比	9	10	9	6	10	9
全リン TP (mg/kg)	3,700	3,300	2,600	7,900	8,400	7,900
水溶性リン酸 SP (mg/kg)	60	30	80	580	550	160
全カリウム TK (mg/kg)	5,300	4,700	4,300	5,300	4,700	5,000
水溶性カリウム SK (mg/kg)	151	140	350	840	420	340

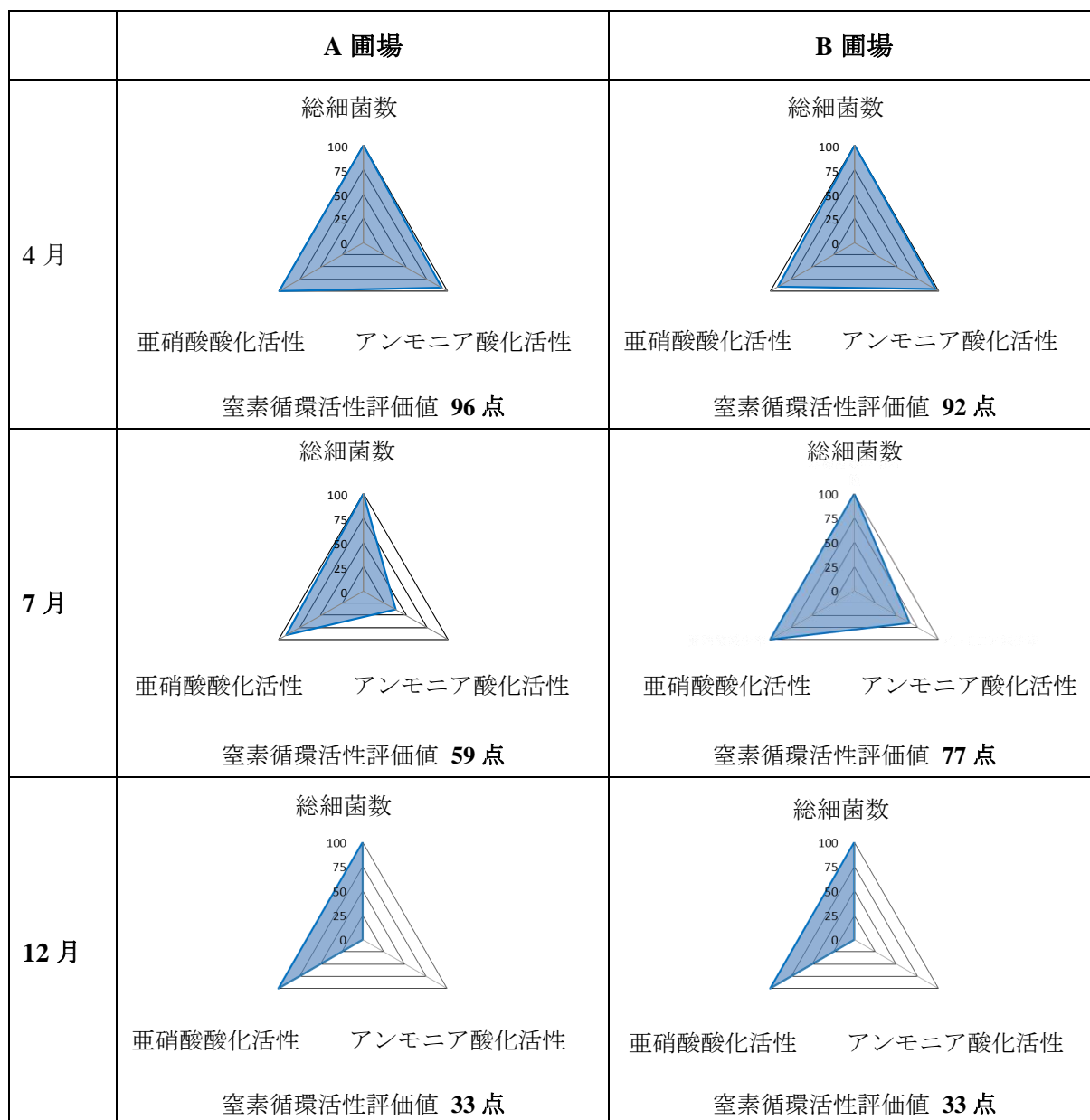


Figure 1-8 窒素循環活性の評価図 (2011 年)

1.3.4 リンゴ葉と果実の栄養成分の解析および収穫量

葉の TN、TP および TK を示す (Table 1-3)。TN は、7月では A 圃場よりも B 圃場の方が高く、12月では同程度であった。TP と TK は、7月と12月で B 圃場よりも A 圃場の方が高かった。

果実の TN、TP および TK を示す (Table 1-4)。果実の成分数値は、A 圃場と B 圃場で異なっていた。果実の TN、TP および TK は、7月では A 圃場が B 圃場より高かった。12月では同程度だった。また、12月の糖度は A 圃場 (16.6%) が B 圃場 (15.4%) より 1.2% 高かった。さらに収穫量が A 圃場 3,000 kg/10a、B 圃場 2,000 kg/10a と異なり、1,000 kg/10a の違いがみられた。

Table 1-3 リンゴ葉の成分分析結果

測定項目	A 圃場		B 圃場	
	7月	12月	7月	12月
全窒素 TN (mg/kg)	18,900	22,000	25,200	21,200
全リン TP (mg/kg)	5,200	7,000	4,400	5,900
全カリ TK (mg/kg)	14,900	20,100	12,700	16,600

Table 1-4 リンゴ果実の成分分析結果

測定項目	A 圃場		B 圃場	
	7月	12月	7月	12月
全窒素 TN (mg/kg)	10,100	2,400	9,200	2,600
全リン TP (mg/kg)	4,100	2,500	3,200	2,400
全カリ TK (mg/kg)	10,900	11,900	8,700	10,100
糖度 (%)	-	16.6	-	15.4
収穫量 (kg/10a) ^{*)}	-	3,000	-	2,000

^{*)} 日本の全国平均生産量は 2,120 kg/10a である。

考察

日本のリンゴ栽培は全国平均生産量が 2,120 kg/10a であり、日本のリンゴ生産目標が 4,000 kg/10a であることから、日本のリンゴ栽培はまだまだ改善の余地がある状況である。そのため本研究では、リンゴ生産量を改善する目的として、長野県の同地域、同品種(ふじ)、さらには同一農法にも関わらず、収穫量の異なる 2つの果樹園 (2,000 kg/10a、3,000 kg/10a) について土壌の物理性、化学性および生物性の解析をした。また、リンゴの葉と果実の分析も行い、2つの果樹園の土壌環境とリンゴ収穫量の違いを明らかにした。

先行研究で、有機物の豊富な土壌では、透水係数の低下が示唆された (Marshall et al. 2009, Archer et al. 2013)。これは、リンゴの葉や枝、樹皮などのリターを多く含む土壌の間隙は、退化した有機物によって部分的に塞がれると報告されている (Oliveira and Merwin 2001)。B 圃場の深さ 10cm の水平方向の透水係数は、有機物の蓄積によって部分的に間隙が塞がれたため、 10^{-5} (cm/s) から 10^{-6} (cm/s) のオーダーに低下し、透水性が低くなったと考えた。

長野県の同地域、同品種(ふじ)、さらには同一農法にも関わらず、B 圃場は、A 圃場よりも TC、TN、TP、SP および SK の栄養分が豊富であった。しかし、収穫量は B 圃場よりも A 圃場の方が多かった。このことから、土壌中の栄養分の量と収穫量に相反する関係があった。以上のことから、B 圃場のリンゴ収穫量の低さは、TC、TN および TP の肥料過多が影響していることが示唆された (Figure 1-9、Figure 1-10、Figure 1-11)。長野県のように丘陵地でリンゴ栽培が行われている場合、地形勾配によって、高い標高に位置する A 圃場から低い標高に位置する B 圃場へ肥料が浸出していることが示唆された。窒素とリン酸の最適な供給によって、リンゴの木は活発に成長し、高いリンゴ収穫量を得ることができる。しかしながら、過大な窒素の供給はリンゴの木と葉を増進させる一方、反対にリンゴ果実の収穫量と品質に悪影響を及ぼす (Komamura et al. 2000)。また同様な研究では、過大な窒素の供給は、幹の大きさ、樹高および花のつぼみを小さくする原因を引き起こしている (Ro and Park 2000)。

また落ち葉は、果樹園の土壌へ必要な量のバイオマスと栄養を供給しており (Kumar and Goh 1999, Tonon et al. 2007)、毎年落ち葉には N 約 3 kg/10a が含まれていると報告されている (Haynes and Goh 1980)。これは、堆積した落ち葉を除去しない限り、栄養分が蓄積されていくことを示している (Photograph 1-3、Photograph 1-4)。リンゴ 1 本の木に生育する葉の数を計測したところ約 7,100 枚であり、水分を含む重さが約 0.29 g/枚であった。本研究では、12 月の葉の成分分析から TN、TP および TK を算出した。A 圃場では、N が約 0.2 kg/10a、P が約 0.1 kg/10a、K が約 0.2 kg/10a であった。B 圃場では、N が約 0.3 kg/10a、P が約 0.1 kg/10a、K が約 0.2 kg/10a であった。落ち葉を除去し管理しない限り、毎年 TN、TP および TK といった栄養分が蓄積されていくことがわかった。

土壌中の過大な栄養分は、しばしば摂取過多や不均衡な栄養摂取の原因となり、リンゴの品質や収穫量に悪影響を及ぼす (Drake et al. 2002, Teravert et al. 2010)。本研究によって、土壌中の栄養分と収穫量の相反する関係は、化学肥料が慎重に適用されることを示唆した。また、

栄養分の蓄積から判断すると、リンゴ園からの落ち葉の適切な管理は、リンゴ収穫量が高い水準を維持するためには、重要な要因である。長野県のように丘陵地で栽培されているリンゴ圃場では、低い標高にあるリンゴ圃場は、高い標高にあるリンゴ園からの肥料の浸出分を考慮し、適切な施肥量を投入する必要がある。また、落ち葉の管理はリンゴ生産量を改善するために必要である。

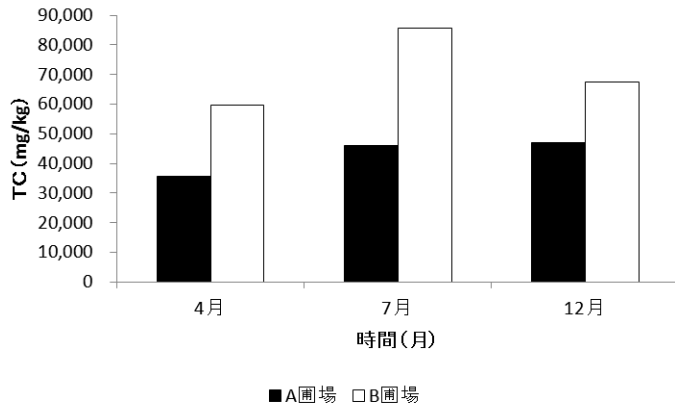


Figure 1-9 リンゴ土壌の TC の分析結果

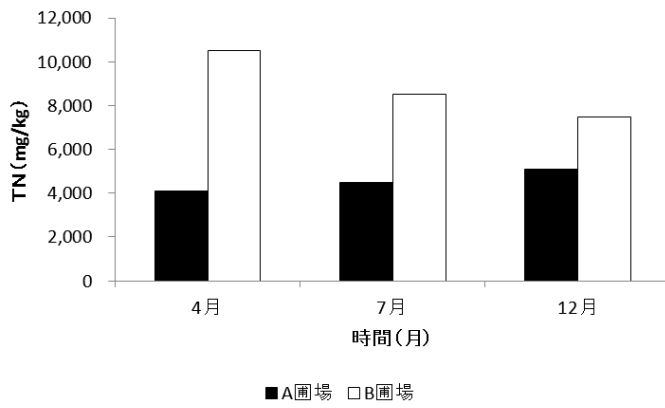


Figure 1-10 リンゴ土壌の TN の分析結果

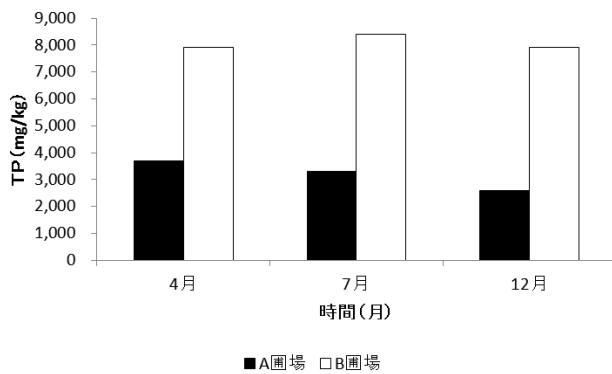


Figure 1-11 リンゴ土壌の TP の分析結果



Photograph 1-3 リンゴ園場の落ち葉の様子（飯綱町 2014年9月27日）



Photograph 1-4 リンゴ園場の剪定後の枝と落ち葉の様子（飯綱町 2014年10月4日）

4節 要約

1. A 圃場（収穫量：3,000 kg/10a）と B 圃場（収穫量：2,000 kg/10a）の異なる収穫量のリンゴ圃場で、土壌の物理性および生化学性を調査分析した。リンゴの葉や枝、樹皮などのリターを多く含む土壌の間隙は、退化した有機物によって部分的に塞がれたため、B 圃場の深さ 10cm の水平方向の透水性が低くなったことが示唆された。
2. 長野県の同地域、同品種(ふじ)、さらには同一農法にも関わらず、B 圃場は、A 圃場よりも TC、TN、TP、SP および SK の栄養分が豊富であった。しかし、収穫量は B 圃場よりも A 圃場の方が多かった。このことから、土壌中の栄養分の量と収穫量に相反する関係があった。B 圃場のリンゴ収穫量の低さは、TC、TN、TP、SP および SK の肥料過多が影響していることが示唆された。
3. A 圃場、B 圃場の窒素循環活性評価値、総細菌数、リン循環活性評価値は同程度であった。
4. 長野県のように丘陵地で栽培されているリンゴ圃場では、低い標高にあるリンゴ圃場は、高い標高にあるリンゴ園からの肥料の浸出分を考慮し、適切な施肥量を投入する必要がある。また、落ち葉の管理はリンゴ生産量を改善するために必要である。

Appendix 1-1

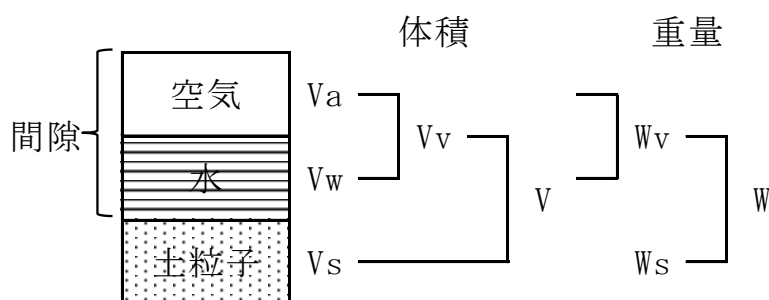


図 1-1 土壌の構成図

土壌の基本的物理性算出における計算式

全容量 100 cm^3 : V

土壌の重さ = 土粒子の重さ (乾土重) + 土壌水重 : $W = W_s + W_w$

- ① 真比重 (土粒子の比重) : $G_s = W_s / (V_s \times \rho_w)$
- ② 含水比 (乾土重に対する土壌水重) : $\omega = (W_w / W_s) \times 100 (\%)$
- ③ 湿潤密度 (土壌全容量における湿土重) : $\rho_t = W / V \quad (\text{g/cm}^3)$
- ④ 乾燥密度 (土壌全容量における乾土重) : $\rho_d = W_s / V \quad (\text{g/cm}^3)$
- ⑤ 間隙率 (土壌全容量に対する間隙の割合) :

$$n = (V_v / V) \times 100 (\%)$$

$$n = \{ 1 - (\rho_d / G_s \times \rho_w) \} \times 100 (\%)$$
- ⑥ 間隙比 (土粒子容積に対する間隙容量の比) : $e = V_v / V_s$
- ⑦ 飽和度 (間隙中の液相割合) $S_r = (V_w / V) \times 100 (\%)$
- ⑧ 体積含水率 (土壌全容量に対する土壌水の割合) :

$$\theta = (V_w / V) \times 100 (\%)$$

$$\theta = (\rho_d \times \omega / \rho_w) \times 100 (\%)$$
- ⑨ 固相割合 (土壌全容積における固相の容積率) :

$$V_s = (\rho_d / G_s) \times (100 / \rho_w) (\%)$$
- ⑩ 液相割合 (土壌全容積における液相の容積率) :

$$V_w = (V_w / V) \times 100 (\%)$$

$$V_w = \rho_d \times \omega$$
- ⑪ 気相割合 (土壌全容積における気相の容積率) :

$$V_a = V - (V_s + V_w)$$

V_s : 土粒子の体積、 ρ_w : 水の密度、 W_w : 土壌水重、 W_s : 乾土重

Appendix 1-2

表 1-1 リンゴ防除暦：リンゴ減農薬研究会防除基準（飯綱町）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 当たり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
1	芽出し前	スプレーオイル	2,000 ml	500 ℓ	ハダニ、カイガラムシ
2	開花直前	マイリノー	5 ml	500 ℓ	黒星病、うどんこ病、ハマキムシ、毛虫類
		オンリーワンフロアブル	50 ml		
		ロムダンフロアブル	33 ml		
3	落花期	マイリノー	5 ml	500 ℓ	黒星病、うどんこ病、黒点病
		インダーフロアブル	10 ml		
		ストピット II	1,200g		
4	5 月下旬	マイリノー	5 ml	600 ℓ	黒星病、黒点病、斑点落葉病、アブラムシ、リンゴワタムシ、キンモンホソガ、シンクイムシ、ギンモンハモグリカ
		アントラコール顆粒水和剤	200 g		
		ダントツ水溶剤	50 g		
		ストピット II	1,200 g		
5	6 月中旬 ～下旬	マイリノー	5 ml	600 ℓ	黒星病、黒点病、斑点落葉病、炭そ病、輪紋病、シンクイムシ、カイガラムシ、ハマキムシ、ケムシ類
		キノンドーフロアブル	125 ml		
		ダーズバン DF	33 g		
		ストピット II	1,200 g		
6	7 月上旬	マイリノー	5 ml	600 ℓ	炭そ病、輪文病、斑点落葉病、褐斑病、すす病、シンクイムシ、キンモンホソガ、ハダニ類
		フリントフロアブル	50 ml		
		サムコルフロアブル	20 ml		
		トップジン M 水和剤	66 g		
		ストピット II	200 g		
7	7 月下旬	マイリノー	5 ml	600 ℓ	炭そ病、輪紋病、斑点落葉病、褐斑病、すす病、シンクイムシ、キンモンホソガ、ハダニ類
		ダニゲッターフロアブル	50 ml		
		ナリア WDG	50 g		
		ダーズバン DF	33 g		
		ストピット II	200 g		

リンゴ防除暦：リンゴ減農薬研究会防除基準（飯綱町）（続き）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 当たり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
8	8月上旬	マイリノー ベルコートフロアブル アーデント水和剤	5 ml 66 ml 100 g	600 ℓ	炭そ病、輪紋病、斑点落葉病、 褐斑病、すす病、シンクイムシ、 キンモンホソガ
9	8月中旬	マイリノー フrintフロアブル ダニサラバフロアブル バリアード顆粒水和剤	5 ml 50 ml 100 ml 33 g	600 ℓ	炭そ病、輪紋病、斑点落葉病、 褐斑病、すす病、シンクイムシ、 キンモンホソガ
10	9月中旬	マイリノー ストロビードライフロアブル アルバリン顆粒水和剤	5 ml 33 g 50 g	600 ℓ	輪紋病、斑点落葉病、すす病、 シンクイムシ、キンモンホソガ、 ハダニ類
11	10月中旬	マイリノー ストライド顆粒水和剤	5 ml 66 g	600 ℓ	炭そ病、輪紋病、斑点落葉病、 褐斑病、すす病

第2章 有機肥料と化学肥料を施肥したリンゴ園における 土壌の化学的および生物学的特性の解析

1節 緒言

リンゴ (*Malus domestica* Borkh) は、日本やいくつかの他の国々で古くから栽培されている果物の一つである (Forsline et al. 2003, Cornille et al. 2012)。リンゴ栽培は pH 5.5~6.5 で、深く耕された水はけの良い土壌を必要とする (Krishna 2014)。窒素、リン酸、カリウムの有機物を豊富に含む土壌がリンゴ栽培に最適である。日本のリンゴは、従来から化学肥料や農薬の大量使用によって栽培されている。リンゴや他の果樹栽培 (約 1,100 ha) のわずか 1.4 % が有機肥料栽培で行われている (Willer and Lernoud 2015)。

日本のリンゴ全国平均生産量は 2,120 kg/10a であり、他の先進国であるオーストラリア 7,790 kg/10a、ニュージーランド 4,740 kg/10a、アメリカ 3,190 kg/10a に比べると低い状態にある (FAO 2014)。土壌肥沃度の乏しさが、リンゴ生産量の低さに最も影響していると考えられている (Fujisawa and Kobayashi 2013)。

リンゴ栽培には、化学肥料栽培の他に、有機肥料と化学肥料を混合した栽培と、有機肥料栽培の2つの栽培方法がある (Swezey et al. 1998, Reganold et al. 2001, Peck et al. 2006)。先行研究では、有機肥料栽培の生産量は、従来の化学肥料栽培の生産量よりも 20~30 % 低いことを指摘している (Reganold et al. 2001, de Ponti et al. 2012)。しかし、有機肥料を基本とした場合でも、土壌中の TC、TN および C/N 比を制御することで、土壌微生物の数の増加や土壌微生物の活性を向上させることによって、安定した高い生産性を達成することができる (Adhikari et al. 2014)。リンゴ圃場の土壌は、水田や畑などの耕作地の土壌と比較して、TC、TN、TP および TK が豊富である (Kai et al. 2015)。したがって、リンゴ圃場での有機肥料による栽培では、土壌肥沃度の考慮する必要がある。第 1 章では、化学肥料によるリンゴ生産が土壌の物理性、化学性および生物性に影響を与え、同地域、同品種(ふじ)、さらには同一農法にも関わらず、土壌中の栄養分の量と収穫量に違いがあり相反する関係がみられた。リンゴ圃場は、TC、TN、TP、SP および SK が土壌中に蓄積傾向がみられ、肥料過多は土壌肥沃度を乏しくし、リンゴ収穫量が低くなることを発見した。また、落ち葉の管理はリンゴ生産量を改善するために、必要であることを報告した (Kai et al. 2015)。

本章では、リンゴ栽培は、いまだ有機的な栽培手法が確立されていないことから、土壌微生物の数が増加し、土壌中の物質循環を活性化させる有機肥料栽培に注目した。また、最適なリンゴ圃場の土壌条件を決定するために、有機肥料および化学肥料により栽培したリンゴ圃場の土壌肥沃度を比較し、リンゴ有機肥料栽培の最適な土壌条件を検討することを目的とした。

2節 実験材料および方法

2.2.1 調査圃場の概要

2014年に長野県の5つのリンゴ圃場(果樹園A、B、C、DおよびE)を選定した(Figure 2-1)。選定の際には、調査圃場が長野県のある一地域に固まらないように留意した。また、日本の全国平均生産量(2,120 kg/10a)の約2倍の収穫量を得ることができる圃場とした。すべての果樹園は、栽培開始から20年から30年が経過している。長野県の気候は7月が暑く、1月が寒い温暖多湿である(Figure 2-2~Figure 2-4)。

5つのリンゴ圃場の主な違いは施肥体系であり、各圃場での施肥体系は、過去10年以上にわたって変わっていない。従来から化学肥料によるリンゴ栽培(果樹園AとD)、有機肥料と化学肥料を混合したリンゴ栽培(果樹園BとE)、および有機肥料による栽培(果樹園C)の3つに分類することができる。果樹園AとDでは、化学肥料が毎年窒素(N) 14.4 kg/10a、リン酸(P_2O_5) 7.2 kg/10a、カリウム(K_2O) 4.8 kg/10a、マンガン(MnO) 0.48 kg/10a およびホウ素(B) 0.24 kg/10aの割合で圃場へ投入されている。化学肥料は12月(収穫後)と3月(開花前)の2回に、総量の半分ずつが分割されて投入される。果樹園Cでは、毎年、約3,500 kg/10a牛糞堆肥が圃場へ投入される。果樹園BとEは、化学肥料が果樹園AとDと同じ割合で投入され、併せて稲わらが約120 kg/10aの割合で圃場へ投入される。殺菌剤、殺虫剤、および除草剤といった農薬散布の使用回数については、各地域の奨励値によって管理されている。5つの圃場の概要は、以下のとおりである。

上水内郡飯綱町(果樹園A)の概要は、第1章2節1.2.1のとおりである。

長野市のリンゴ圃場(果樹園B)は、長野市篠ノ井(北緯36.591558、東経138.124073)にある。リンゴ圃場は、標高365.81 mの平坦な地形にある。収穫量は5,000 kg/10aである。リンゴの品種は、「ふじ」であり、木の樹齢は20年である。圃場面積は、約600 m²である。リンゴの木が17本植わっている。施肥については、有機肥料として3月に1回稲わらをリンゴの木の周りに敷く。また、収穫後の12月に1回化学肥料を投入する。農薬については、共和園芸農業協同組合の防除基準から3月に1回、4月~8月には2回/月、9月に1回で合計12回実施している(Appendix 2-1)。さらに、草刈りについては、4月に1回、5月~8月には2回/月、9月に1回で合計10回実施している。

埴科郡坂城町のリンゴ圃場(果樹園C)は、埴科郡坂城町坂城(北緯36.2815、東経138.1213)にある。リンゴ圃場は丘陵地にあり、収穫量は4,500 kg/10aである。圃場は、標高603.99 mにあり、リンゴの品種は、「ふじ」である。また、木の樹齢は20年であり、圃場面積は約2,000 m²である。リンゴの木が25本植わっている。施肥については、20年間牛糞堆肥を圃場へ投入しており、3月に1回実施している。施肥量については、3年間熟成させた牛糞堆肥を圃場全体に、地表面から厚さ約5 cm~10 cmで撒く。化学肥料は5年間使っていない。また、農薬については、3月に1回、5月に2回、6月に2回、7月に2回、8月に1回に実施し合計8回である(Appendix 2-2)。周辺農家の農薬の使用回数は12回であるため、極力減らしている。

東筑摩郡朝日村のリンゴ園場（果樹園 D）は、東筑摩郡朝日村古見原（北緯 36.1048、東経 137.8296）にある。リンゴ園場は標高 749.0 m の平坦な土地にあり、収穫量は 5,000 kg/10a である。園場面積は約 2,500 m² である。リンゴの品種は、「ふじ」である。また、木の樹齢は 30 年である。リンゴの木が 105 本植わっている。施肥については、化学肥料を 4 月に 1 回投入する。また、農薬については、13 回実施している（Appendix 2-3）。さらに除草剤については、3 月、5 月、7 月、9 月、11 月の 5 回実施し、草刈りについては、5 月、6 月、7 月、9 月、10 月、11 月の 6 回実施している。

下伊那郡松川町のリンゴ園場（果樹園 D）は、下伊那郡松川町大島（北緯 35.3605、東経 137.5322）である。リンゴ園場は標高 749.0 m の丘陵地にある。園場面積は約 5,000 m² であり、リンゴの品種は、「ふじ」である。また、木の樹齢は、ともに 30 年である。リンゴの木は、60 本植わっている。施肥については、12 月に 1 回有機肥料と化学肥料を投入している。有機肥料については、稲わらを投入し、リンゴの木の周りに敷く。また、農薬については、3 月に 1 回、4 月に 1 回、5 月～8 月に 2 回／月、9 月に 1 回、合計 11 回実施している（Appendix 2-4）。さらに草刈りについては、4 月に 1 回、5 月～8 月に 2 回／月、9 月に 1 回、合計 10 回実施している。

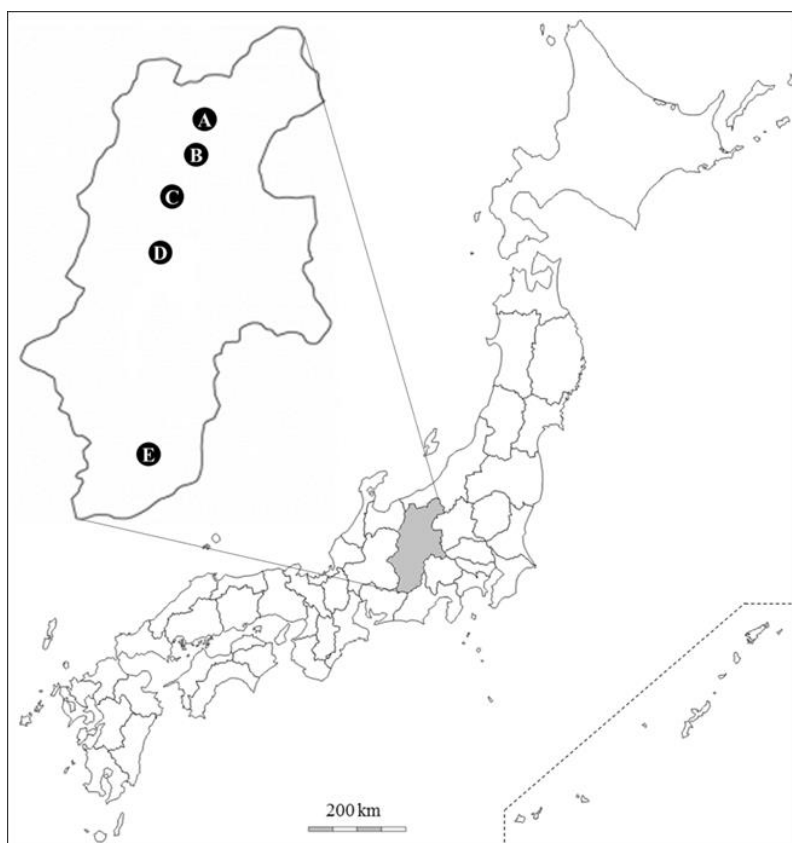


Figure 2-1 調査園場の位置

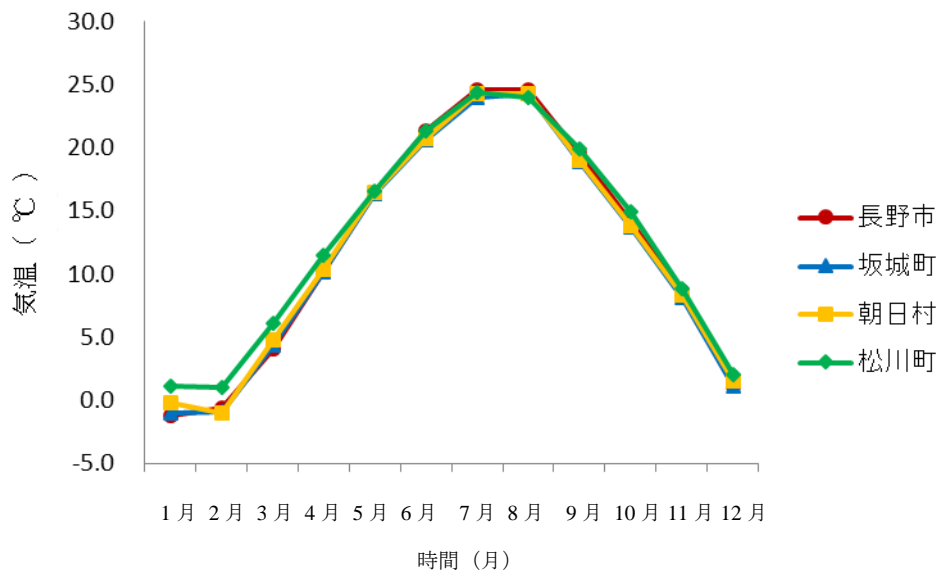


Figure 2-2 気温 (2014年)

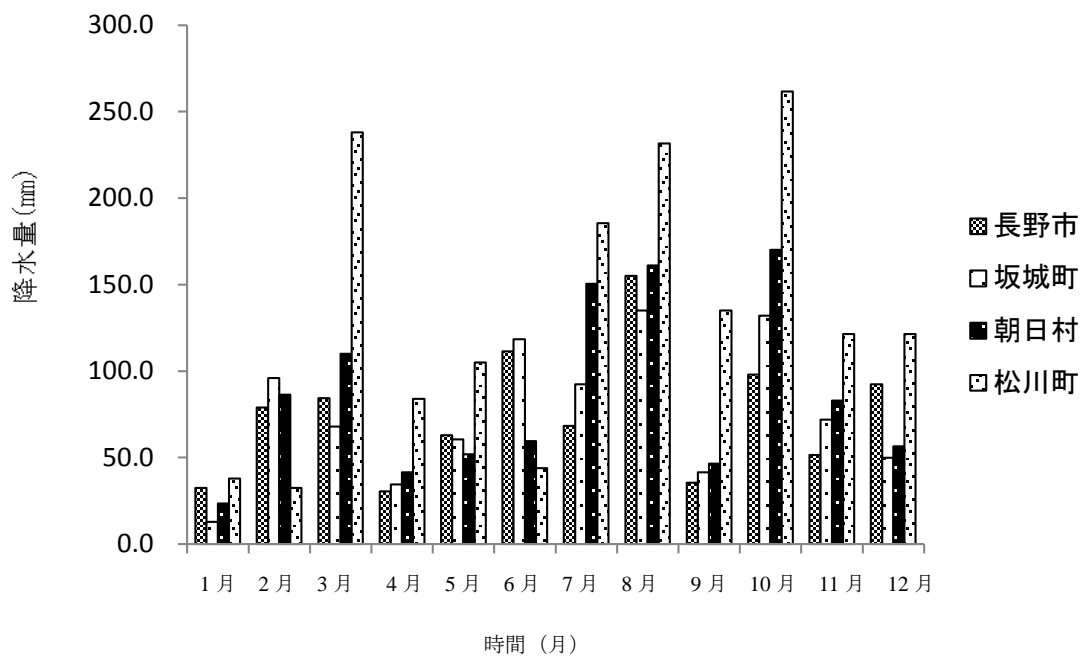


Figure 2-3 降水量 (2014年)

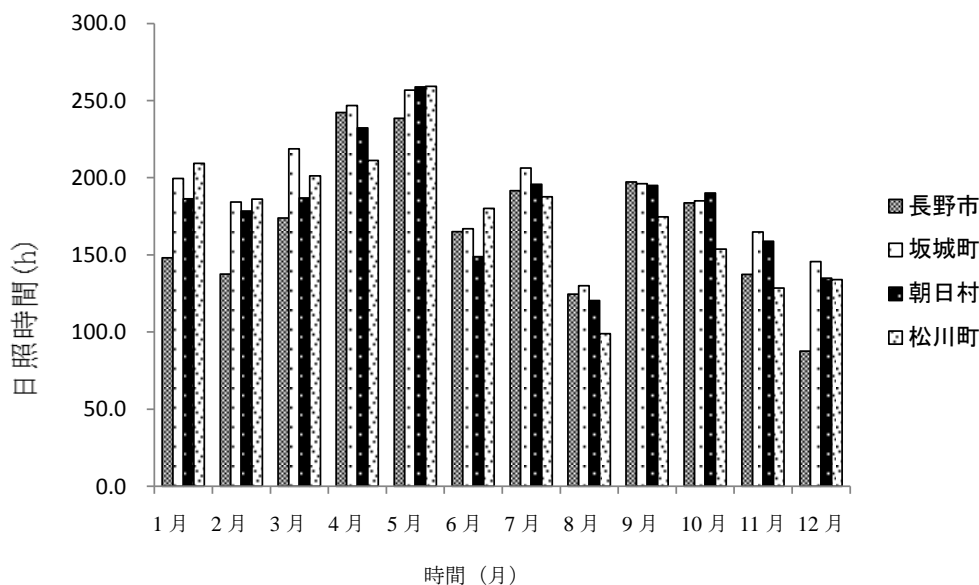


Figure 2-4 日照時間 (2014年)

2.2.2 土壌の物理的性質

リンゴの施肥状況が異なる5圃場の土壌性質を調べるため、土壌断面柱状解析を行った。リンゴの成木の根が存在する深度40 cmまでの解析を行った。土壌の物理性を調査するにあたり、土壌試料のサンプリングを行った。サンプリングは土壌調査法に準じて行い（日本土壌肥料学会 2000）、試料は攪乱土壌および不攪乱土壌を採取した。攪乱土壌は、土の基本的物理性の測定のために採取した。不攪乱土壌は100 cm²定容量サンプラー缶（Daiki製、ステンレス試料円筒、DIK-1801、埼玉）で土の基本的物理性、飽和透水試験（飽和透水係数）などの間隙構造の試験のために採取した。試坑断面に層界を入れ、その際、現地における土壌構造の異方性から、100 cm²定容量サンプラー缶を鉛直・水平方向に3個ずつ採取した。なお、実験方法は、第1章2節1.2.2に従った。

2.2.3 土壌の化学的性質

土壌サンプルは、調査圃場の地表面から約2~3 cmを取り除いた深さ約15 cmまでの土壌を、中央と対角線の5箇所から均等混合した。土壌サンプルにより、TC、TN、アンモニア態窒素（NO₄⁺-N）、硝酸態窒素（NO₃-N）、TP、水溶性リン（SP）、TK、および水溶性カリウム（SK）といった化学的性質を分析した。実験方法は、第1章2節1.2.3に従った。

2.2.4 土壌の生物的特性

総細菌数、アンモニア酸化活性、亜硝酸酸化活性、窒素循環活性評価値といった生物的特性を分析した。実験方法は、第 1 章 2 節 1.2.3 に従った。

2.2.5 葉と果実の養分分析

葉は 7 月にサンプリングし、果実は 12 月にサンプリングした。それぞれの葉と果実の試料は、各果樹園の中央と対角線の 5 箇所から採取した。実験方法は、第 1 章 2 節 1.2.3 および 1.2.4 に従った。

3節 結果

2.3.1 土壌の物理的解析

飯綱町の調査圃場（果樹園 A）については、第 1 章 3 節 1.3.2 の A 圃場に示す（Figure 2-2）。

長野市の調査圃場（果樹園 B）においては、地表から 20 cm までが褐色（7.5 YR 2/1）、土性区分は埴壤土（Clay Loam）であり、礫を含んでいた（Figure 2-3）。深度 20 cm～40 cm は、黄褐色（7.5 YR 6/8）、土性区分は砂壤土（Sandy Loam）であった。土壌硬度は 11.4 mm～19.6 mm であった。基本的物理性を示す（Table 2-1）。乾燥密度は 1.119～1.143 g/cm³、間隙率は 55.04～58.14 % の範囲にあった。飽和透水係数は、10⁻³～10⁻⁴ cm/s のオーダーであった。褐色森林土であることがわかった。

坂城町の調査圃場（果樹園 C）においては、地表から 40 cm まで黄褐色（7.5 YR 4/2）、土性区分は軽埴土（Light Clay）であり、土壌硬度は 7.7 mm～21.8 mm であった（Figure 2-4）。基本的物理性を示す（Table 2-2）。乾燥密度は 1.214～1.282 g/cm³、間隙率は 49.29～54.19 % の範囲にあった。飽和透水係数は、10⁻³～10⁻⁴ cm/s のオーダーであった。褐色森林土であることがわかった。

朝日村の調査圃場（果樹園 D）においては、地表から 40 cm まで褐色（7.5 YR 3/3）、土性区分は埴壤土（Clay Loam）であり、腐植を含んでいた（Figure 2-5）。土壌硬度は 8.0 mm～13.8 mm であった。基本的物理性を示す（Table 2-3）。乾燥密度は 0.624～0.729 g/cm³、間隙率は 71.81～75.99 % の範囲にあった。飽和透水係数は、10⁻³ cm/s のオーダーであった。乾燥密度が小さく、間隙率が大きいことから火山灰土であることがわかった。

飯綱町の調査圃場は褐色森林土で、飽和透水係数が 10⁻⁵～10⁻⁶ cm/s のオーダーであり、収穫量が 3,000 kg/10a である（Table 2-4）。長野市、坂城町の調査圃場は、飯綱町の調査圃場と同様に褐色森林土で、飽和透水係数が 10⁻³～10⁻⁴ cm/s オーダーであり、収穫量は各々 5,000 kg/10a、4,500 kg/10a である。また、朝日村の調査圃場は火山灰土で、飽和透水係数が 10⁻³～10⁻⁴ cm/s オーダーであり、収穫量が 5,000 kg/10a である。このことから、リンゴの高い収穫量を得るには、土壌の物理性においては、飽和透水係数が 10⁻³～10⁻⁴ cm/s のオーダーが必要であることが示唆された。

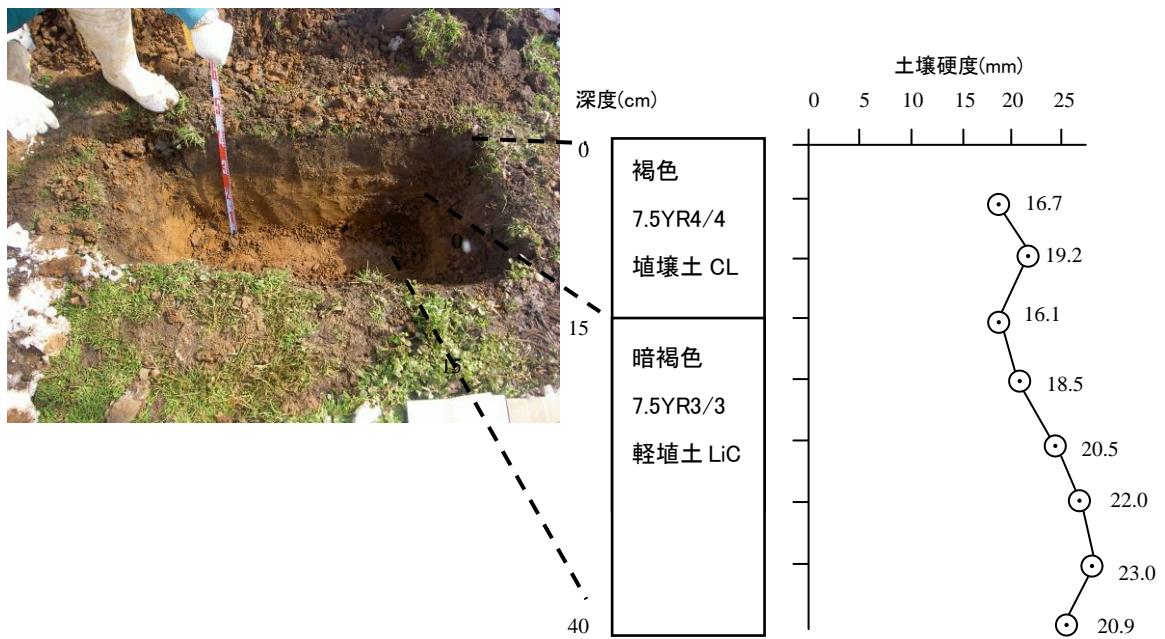


Figure 2-2 土壤構造（飯綱町 2011年4月2日）（Kai et al. 2014）

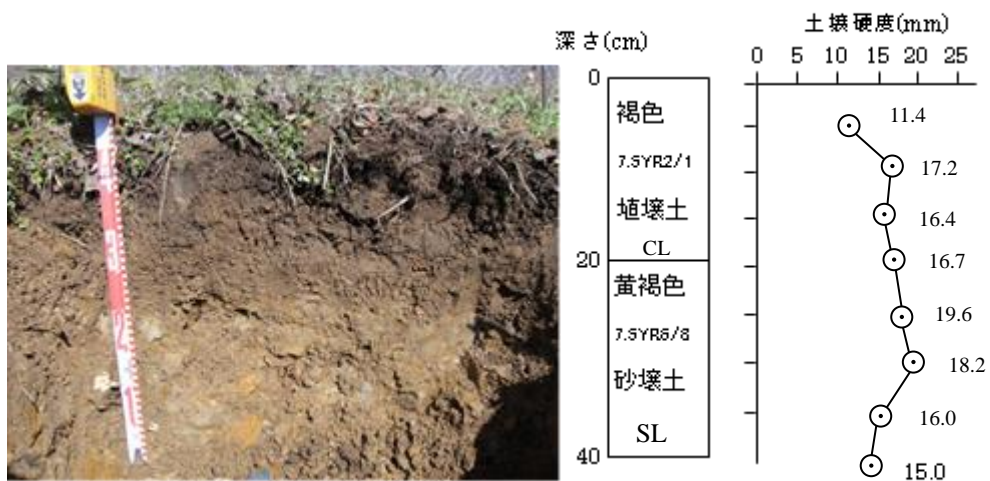


Figure 2-3 土壤構造（長野市 2014年3月22日）

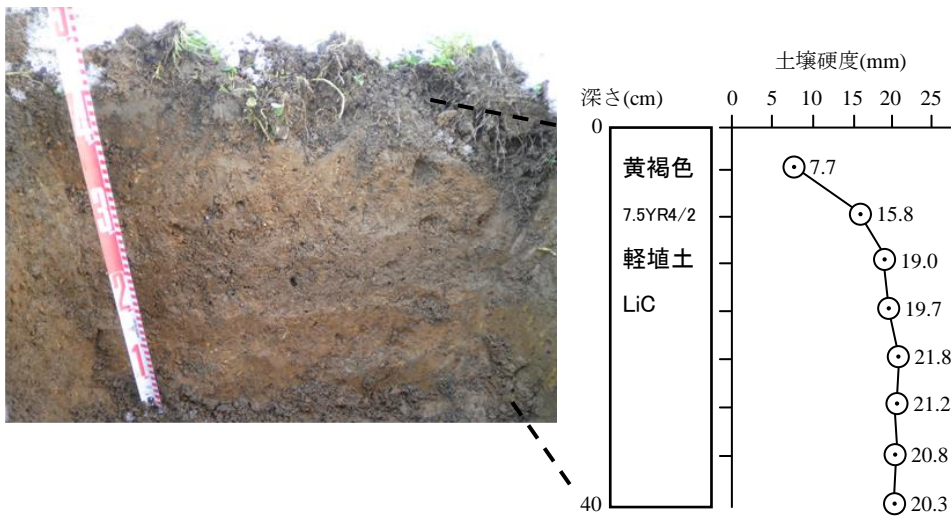


Figure 2-4 土壤構造 (坂城町 2015年2月14日)

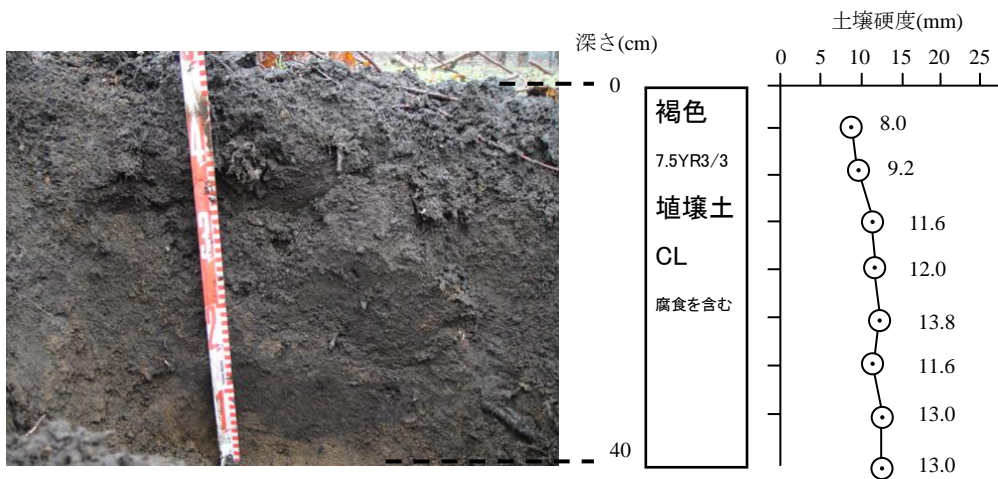


Figure 2-5 土壤構造 (朝日村 2014年3月30日)

Table 2-1 土の基本的物理性（長野市：果樹園 B）

項目	果樹園 B	
	10 cm	35 cm
含水比 ω (%)	29.9	31.4
真比重 G_s	2.542	2.673
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.485	1.470
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.143	1.119
間隙比	1.22	1.39
間隙率 n (%)	55.04	58.14
飽和度 S_r (%)	34.18	35.14
固相割合 (v/v) (%)	44.96	41.86
液相割合 (v/v) (%)	34.18	35.14
気相割合 (v/v) (%)	20.86	23.00
飽和透水係数（鉛直） (cm/s)	5.5×10^{-3}	2.3×10^{-3}
飽和透水係数（水平） (cm/s)	1.7×10^{-3}	7.7×10^{-4}

Table 2-2 土の基本的物理性（坂城町：果樹園 C）

項目	果樹園 C	
	10 cm	35 cm
含水比 ω (%)	19.5	19.2
真比重 G_s	2.528	2.650
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.532	1.447
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.282	1.214
間隙比	0.972	1.183
間隙率 n (%)	49.29	54.19
飽和度 S_r (%)	50.72	43.02
固相割合 (v/v) (%)	50.71	45.81
液相割合 (v/v) (%)	25.00	23.31
気相割合 (v/v) (%)	24.29	30.88
飽和透水係数（鉛直） (cm/s)	1.6×10^{-3}	4.6×10^{-4}
飽和透水係数（水平） (cm/s)	2.5×10^{-3}	2.7×10^{-4}

Table 2-3 土の基本的物理性（朝日村：果樹園 D）

項目	果樹園 D	
	10 cm	35 cm
含水比 ω (%)	27.74	17.76
真比重 G_s	2.586	2.599
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	0.931	0.735
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.729	0.624
間隙比	2.547	3.165
間隙率 n (%)	71.81	75.99
飽和度 S_r (%)	28.16	14.58
固相割合 (v/v) (%)	28.19	24.01
液相割合 (v/v) (%)	20.22	11.08
気相割合 (v/v) (%)	51.59	64.91
飽和透水係数（鉛直） (cm/s)	2.4×10^{-3}	2.6×10^{-3}
飽和透水係数（水平） (cm/s)	4.3×10^{-3}	9.7×10^{-3}

2.3.2 長野県下におけるリンゴ圃場の SOFIX 分析

5 箇所のリンゴ圃場 A～E での肥料管理、平均収穫量、および土壌特性（TC、TN、TP、TK、および総細菌数）を示す（Table 2-4）。5 つのリンゴ圃場の主な違いは施肥状況であり、各圃場での施肥方法は、過去 10 年以上にわたって変わっていない。5 箇所の果樹園のリンゴ平均収穫量は、3,000～5,000 kg/10a の範囲にある。5 つの果樹園では、TC が 22,900～58,000 mg/kg、TN が 1,600～3,970 mg/kg、および TK が 6,130～9,600 mg/kg と広い範囲にあった。ほとんどのリンゴ圃場の土壌は、肥料体系に関係なく TC が豊富であった。このことから、大量の落ち葉が土壌中の TC の値を増加させたことが示唆された。リンゴ圃場の土壌中の総細菌数は、 $5.7 \times 10^8 \sim 11.4 \times 10^8$ cells/g の範囲にあった。有機肥料栽培が行われている果樹園 C の総細菌数は多く、土壌中の TC も比較的大きかった。

Table 2-4 リンゴ圃場の SOFIX 分析

果樹園	肥料体系	収穫量 (kg/10a)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	調査地
A	化学	3,000	42,400	3,230	2,430	7,270	13.1	8.9	飯綱町
B	有機 + 化学	5,000	22,900	1,600	4,570	9,600	14.3	5.7	長野市
C	有機	4,500	53,700	3,570	5,730	6,800	15.0	11.4	坂城町
D	化学	5,000	48,800	2,130	10,870	8,770	22.9	6.4	朝日村
E	有機 + 化学	4,500	58,000	3,970	7,830	6,130	14.6	9.3	松川町
平均		4,400	45,160	2,900	6,290	7,110	16.0	8.3	

2.3.3 有機肥料栽培と化学肥料栽培における施肥状況と土壌環境の関係解析

土壌の化学的性質を検討するために、有機肥料栽培（果樹園 C）と化学肥料栽培（果樹園 D）で4月、7月、および12月にサンプリングをした（Table 2-5）。2つの果樹園では、リンゴの平均収穫量は4,500～5,000 kg/10aであり、ほぼ同じであった。TCおよびTNは、果樹園 Cが果樹園 Dよりも高かった。しかし、TPおよびTKは、観測期間を通して果樹園 Dが高かった。TPおよびTKの季節変動は、果樹園 Cと果樹園 Dの両方で観察されたが、有意な差は認められなかった。

無機窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ）、SP、およびSKは、4月に果樹園 Cでわずかに高かったが、7月と12月では有意な差は認められなかった。TPおよびTKは、果樹園 Cよりも果樹園 Dの方が高いものの、SPが低かった。このことから、化学肥料栽培の圃場では、PとKが土壌中に蓄積傾向にあることがわかった。

Table 2-5 土壤の化学的特性 (果樹園 C と果樹園 D)

測定項目	果樹園 C (有機肥料)			果樹園 D (化学肥料)		
	4月	7月	12月	4月	7月	12月
全炭素 (TC) (mg/kg)	58,100	35,800	67,200	45,700	42,300	58,300
全窒素 (TN) (mg/kg)	3,000	1,500	6,200	2,200	1,600	2,600
C/N 比	19	24	11	21	26	22
アンモニア態窒素 (mg/kg)	1	1	5	0	0	1
硝酸態窒素 (mg/kg)	4	6	0	0	0	9
全リン酸 (TP) (mg/kg)	8,600	4,300	4,300	13,400	7,900	11,300
水溶性リン酸 (SP) (mg/kg)	163	30	7	143	52	81
全カリウム (TK) (mg/kg)	7,600	6,800	6,000	7,100	4,700	14,500
水溶性カリウム (SK) (mg/kg)	146	44	38	112	62	156

2.3.4 有機肥料栽培と化学肥料栽培におけるリンゴ圃場の土壤の生物学的特性の比較

2015年4月、7月および12月を通じた、有機肥料栽培の果樹園 C と化学肥料栽培の果樹園 D における土壤中の生物学的特性を示す (Table 2-6、Figure 2-6)。4月と7月では、果樹園 C と果樹園 D の総細菌数は同程度であったが、12月では、果樹園 C が果樹園 D よりも約3倍大きかった。窒素循環活性評価値は4月から12月の観察を通して、果樹園 C が果樹園 D よりも63~83%高かった。リン循環活性評価値は、4月では果樹園 C が果樹園 D よりも高かったが、7月と12月で果樹園 C が果樹園 D よりも低かった。有機肥料栽培が行われている果樹園 C の土壤は、微生物の活動に適していることがわかった。

Table 2-6 土壤の生物学的特性（果樹園 C と果樹園 D）

測定項目	果樹園 C（有機肥料）			果樹園 D（化学肥料）		
	4 月	7 月	12 月	4 月	7 月	12 月
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	5.3	6.6	22.2	7.2	4.8	7.2
アンモニア酸化活性 (%)	98	50	40	14	23	40
亜硝酸酸化活性 (%)	99	52	84	23	100	36
窒素循環活性評価値 (点)	91	67	52	50	41	30
リン循環活性評価値 (%)	50	19	1	44	32	16

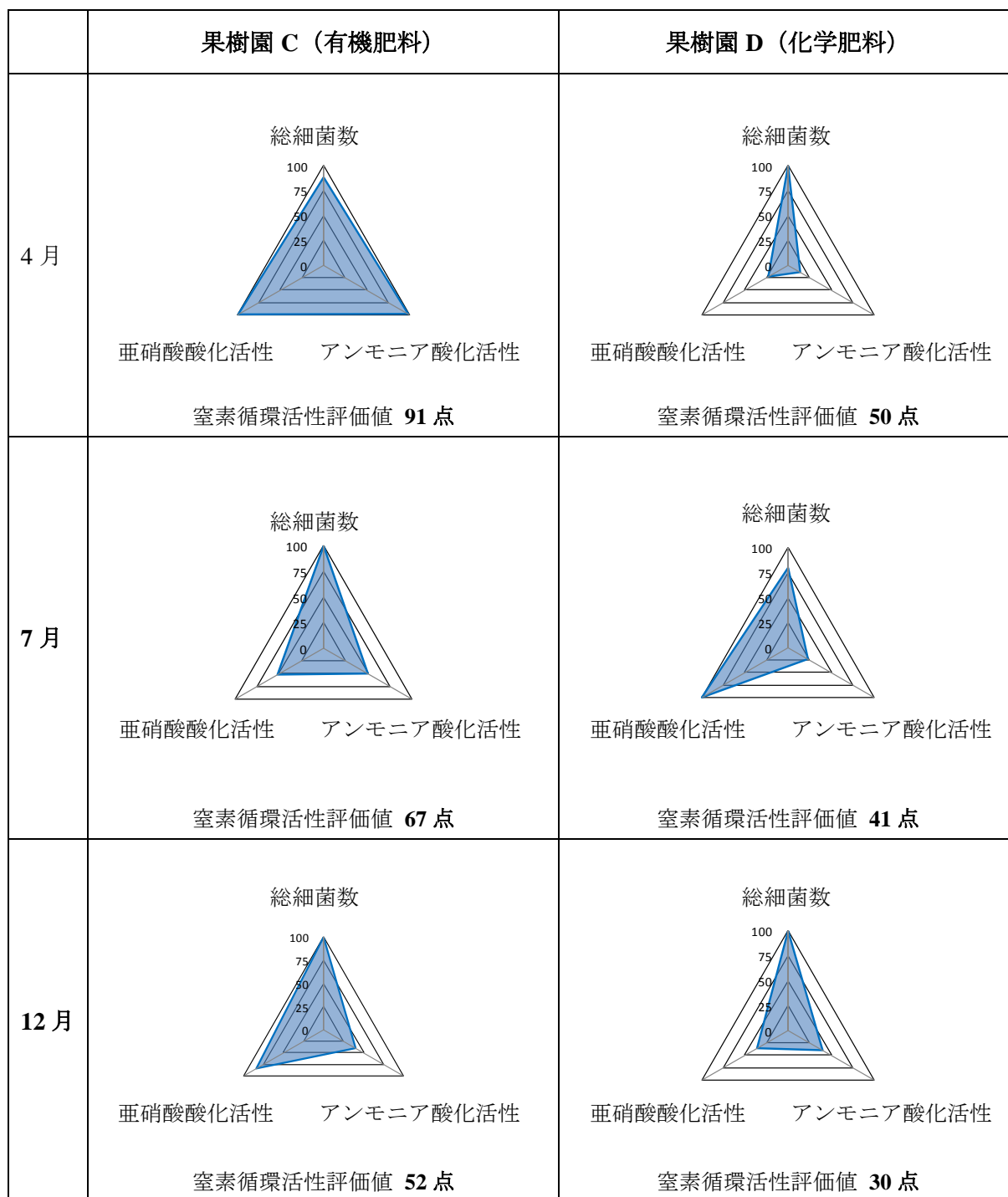


Figure 2-6 窒素循環活性の評価図 (2015 年)

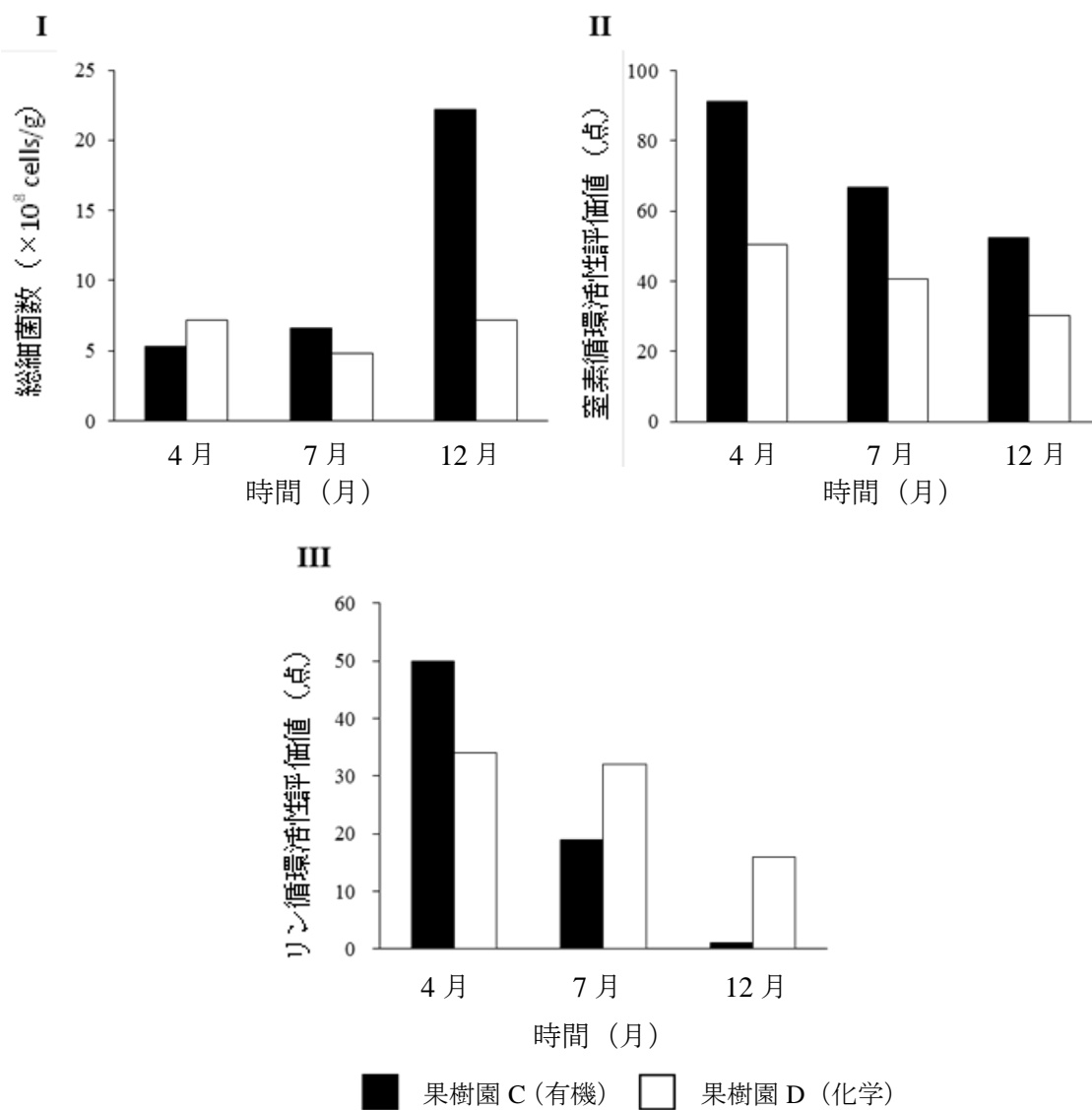


Figure 2-7 総細菌数 (I)、窒素循環活性評価値 (II) およびリン循環活性評価値 (III)
(果樹園 C と果樹園 D)

2.3.5 リンゴの葉と果実の栄養成分の解析

果樹園 C と果樹園 D において、7月に葉を、12月に果実をそれぞれサンプリングし成分分析した (Table 2-7)。これは、葉が土壌中からの栄養分を吸収するピークが7~8月であること、また、果実については収穫時のデータを採用したためである。葉と果実の両方で、TN、TKは、果樹園 C が果樹園 D より高かった。葉の TN と果実の TN は、果樹園 C が果樹園 D よりもそれぞれ 25.9 %、21.2 %高かった。また、葉の TK と果実の TK は、果樹園 C が果樹園 D よりそれぞれ 20.2 %、88.2 %高かった。果樹園 C においては、土壌中の総細菌数の活性

により有機物が分解され、リンゴの根からの葉や果実へ栄養が行き渡り、TN、TP、およびTKの濃度を高めることができることがわかった。

Table 2-7 リンゴの葉と果実成分

測定部位	成分			
	TC	TN	TP	TK
	(mg/kg-fresh weight)	(mg/kg- fresh weight)	(mg/kg- fresh weight)	(mg/kg- fresh weight)
葉 (果樹園 C)	223,400	14,100	4,300	11,300
葉 (果樹園 D)	237,700	11,200	7,900	9,400
果実 (果樹園 C)	61,300	400	200	3,200
果実 (果樹園 D)	60,800	330	300	1,700

2.3.6 リンゴ栽培の SOFIX 循環型農法における最適土壌環境

果樹園 C (有機肥料) は、収穫量が 4,500 kg/10a であり、約 20 年間牛糞堆肥を投入している。果樹園 D (化学肥料) は、収穫量が 5,000 kg/10a で約 20 年以上化学肥料を投入している。果樹園 C (有機肥料) と果樹園 D (化学肥料) の収穫量は、それぞれ日本の全国平均生産量 (2,120 kg/10a) の約 2 倍であり、2 つの圃場の収穫量は同程度である。このように、リンゴ有機肥料栽培でも、日本の全国平均生産量 (2,120 kg/10a) の約 2 倍の収穫量が確保されている。また、果樹園 C のリンゴは、おいしさ、色、つやといった品質面も確保されていた。

以上のことから、果樹園 C (有機肥料) の土壌環境から有機的な最適な土壌条件を算出した (Table 2-4)。有機肥料によるリンゴ栽培には、TC が 50,000~60,000 mg/kg、TN が 3,000~4,000 mg/kg、C/N 比が 15~20、TP が 5,000~6,000 mg/kg、および TK が 6,000~7,000 mg/kg が最適値である (Figure 2-8)。

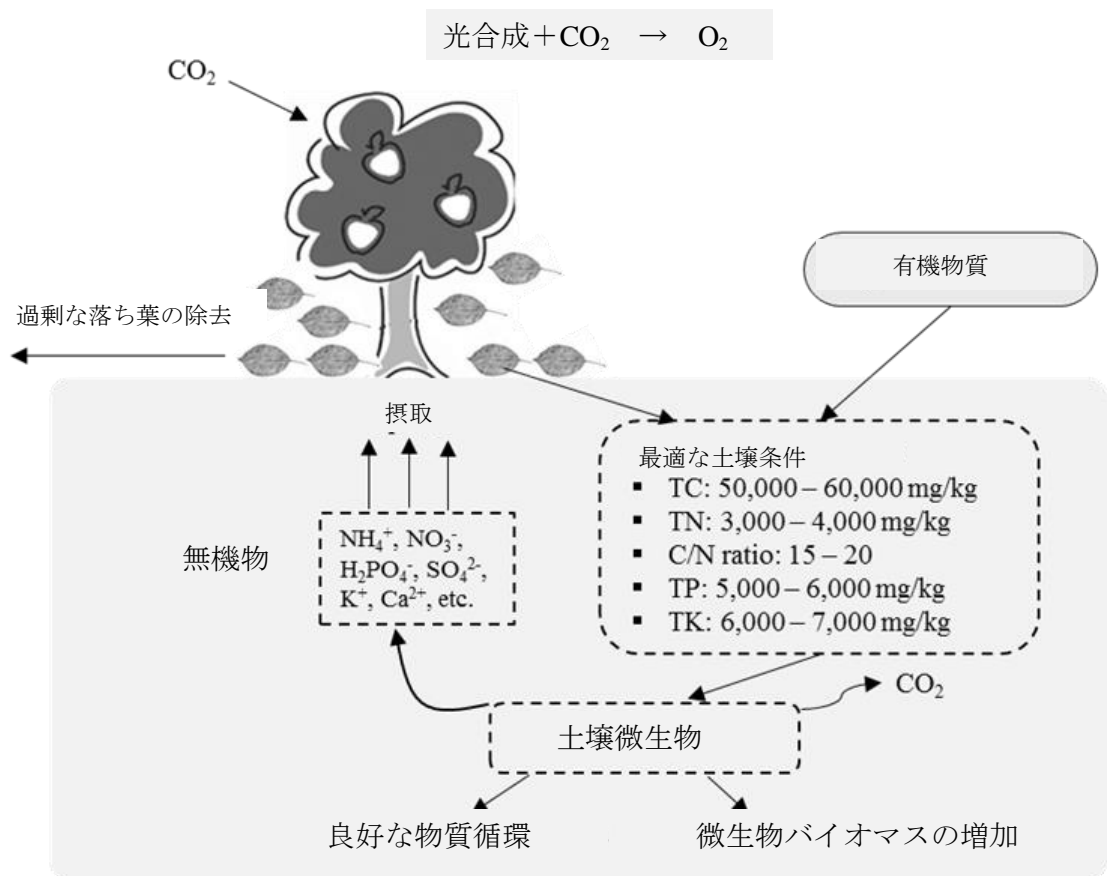


Figure 2-8 リンゴ園場の有機物質の循環

4節 考察

健康や環境問題に関する懸念から、近年は化学肥料よりも有機肥料を使用する傾向がある (Carvalho 2006, Lairon 2010)。優れた有機農業は、健康でおいしい栄養価の高い食品が私たちの需要を満たすことが必要である。しかし、有機農業の生産量は、化学肥料や農薬を使用した慣行の化学農業より低い場合が多い (de Ponti et al. 2012, Seufert et al. 2012)。土壌微生物数をより増加させ、土壌微生物の活動を活性化させる土壌の最適な管理方法は、収穫量の増加だけでなく、農産物の品質の向上にもつながっている。有機物に富んだ土壌では、土壌微生物数の増加とともに活動が活発となり、土壌の物理性、化学性及び生物性が改善されている。本研究では、リンゴ圃場で高い TC 値が観察された (平均: 45,160 mg/kg)。この TC 値は、水田や畑地に比べても明らかに高かった (Adhikari et al. 2014)。通常、野菜や穀物などを繰り返し耕作する畑地では、TC は微生物に消費されるため、次第に減少していく。これに対し、果樹園では、常に一つの果樹を栽培し、果樹を収穫した後には大量の落ち葉が圃場に残っている。このことから、毎年リンゴ圃場へ炭素の蓄積をもたらしていると考えられる (Kumar and Goh 1999, Tonon et al. 2007, Kai et al. 2015)。

リンゴ圃場の土壌は、TCに加えて TN、TP および TK が豊富であった。大量の落ち葉が分解されることで、リンゴ圃場の土壌中には栄養素が蓄積されていく可能性がある (Tagliavini et al. 2007)。リンゴの木から落ちた葉の中には、毎年約 30 kg/ha もの N が含まれていることが報告されている (Haynes and Goh 1980)。リンゴ1本の木に生育する葉の数を計測したところ、約 7,100 枚で、重さが約 0.29 g/枚であった。果樹園 C (有機肥料) では、落ち葉から圃場へ C が約 6 kg/10a、N が約 0.4 kg/10a、P が約 0.1 kg/10a、K が約 0.3 kg/10a、毎年落ち葉を排除しない限り、蓄積されていく計算となった。同様に、果樹園 D (化学肥料) では、C が約 21 kg/10a、N が約 1 kg/10a、P が約 0.7 kg/10a、K が約 0.8 kg/10a と算出された。したがって、毎年落ち葉を適切に排除し、栄養分を蓄積させずに管理していくことが必要である。また、化学肥料の投入の際にも、蓄積され過ぎた栄養分を考慮に入れながら適正な施肥量を投入することが、安定したりんご生産量の確保には必要である。

日本の平均的なリンゴ収穫量は、2,120 kg/10a であり (農林水産省 2014)、乏しい土壌肥沃度がリンゴ生産量の低迷への影響の一つになっている (Fujisawa and Kobayashi 2013)。本研究では、有機肥料栽培によるリンゴの高い生産量に適した最適な土壌条件を決定するために、有機肥料で栽培した果樹園 C を含む 5 つの高収穫量のリンゴ圃場 (3,000~5,000 kg/10a) を選定した。日本の全国平均生産量 (2,120 kg/10a) と比較すると、ほぼ倍の生産量 (4,500 kg/10a) が有機肥料栽培の圃場で確認された。このリンゴ園では、総細菌数と窒素循環活性が高いレベルにあった。また、葉や果実中の N、P、K のレベルは、有機肥料で栽培された果樹園が化学肥料で栽培された果樹園よりも高かった。土壌中の TC、TN、および C/N 比の効果的な管理 (TC : 50,000~60,000 mg/kg、TN : 約 3,000 mg/kg、C/N 比 : 15~20) は、細菌数を増やし、細菌の活動を高めることができる (Kai et al. 2016)。したがって、有機肥料で栽培されるリン

ゴ園の土壌環境は、栄養素の循環を高めるために、土壌微生物による有機物の分解に適していると考えられる。従来の化学肥料で栽培された果樹園 D よりも有機肥料で栽培された果樹園 C は、総細菌数が多く、窒素循環活性の活動が大きかった。リンゴ収穫量は、土壌微生物に適した最適な土壌条件を維持することにより、改善することができることが示唆された。



Photograph 2-1 収穫後のリンゴ園の様子（長野市 2014 年 11 月 29 日撮影）



Photograph 2-2 摘果されたリンゴの様子（坂城町 2014 年 9 月 27 日撮影）



Photograph 2-3 リンゴ園の様子（朝日村 2015年6月28日撮影）



Photograph 2-4 リンゴ園の様子（松川町 2015年6月28日撮影）

5節 要約

1. 有機肥料栽培によるリンゴの高い生産量に適した最適な土壌条件を決定するために、有機肥料で栽培した果樹園 C を含む 5 つの高収穫量のリンゴ圃場 (3,000~5,000 kg/10a) を選定した。日本の全国平均生産量 (2,120 kg/10a) と比較すると、ほぼ倍の生産量 (4,500 kg/10a) が有機肥料栽培の圃場で確認された。
2. リンゴ圃場の TC は、水田や畑地に比べても明らかに高かった。通常、野菜や穀物などを繰り返し耕作する畑地では、TC は微生物に消費されるため、次第に減少していく。これに対し、果樹園では、常に一つの果樹を栽培し、果樹を収穫した後には大量の落ち葉が圃場に残っている。このことから、毎年リンゴ圃場へ炭素の蓄積をもたらしていると考えられる TP と TK については、有機肥料栽培と化学肥料栽培の圃場で同様な値を示したが、全炭素 TC と TN については、有機肥料栽培のリンゴ圃場が化学肥料栽培のリンゴ圃場よりも高かった。
3. リンゴ栽培においては、有機的な栽培手法が確立されていなかったが、SOFIX 技術の診断結果から、有機肥料栽培による高品質で収穫量を確保するリンゴ圃場の最適な土壌条件は、TC : 50,000~60,000 mg/ kg、TN : 約 3,000 mg/ kg、C/N 比 : 15~20、TP : 5,000~6,000 mg/kg、および TK : 6,000~7,000 mg/kg である。

Appendix 2-1

リンゴ防除暦：共和園芸農業協同組合（長野市）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量 (水 100ℓ 当たり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
1	発芽前	スプレーオイル	2 ℓ	400 ℓ	カイガラムシ、リンゴハダニ
2	開花直前 (一二輪咲き)	展着剤 ラリー水和剤 ロムダンフロアブル	10 cc 33 g 33 cc	450 ℓ	黒星病、赤星病、うどんこ病、ハマキムシ、ケムシ
3	落花直後	展着剤 オンリーワンフロアブル	10 cc 50 cc	450 ℓ	黒星病、赤星病、うどんこ病、アブラムシ
4	5 月中下旬	展着剤 トレノックスフロアブル ダントツ水溶剤 クレフノン	10 cc 200 cc 25 g 600 g	550 ℓ	黒星病、黒点病、斑点落葉病、キンモン、ギンモン、アブラムシ、カイガラムシ、リンゴワタムシ
5	6 月上中旬	展着剤 アントラコール顆粒水和剤 スプラサイド水和剤	10 cc 200 g 66 g	600 ℓ	黒星病、黒点病、斑点落葉病、アブラムシ、カイガラムシ、モモ・ナシヒメシンクイ
6	6 月下旬	展着剤 キノンドーフロアブル オーソサイド水和剤 サムコルフロアブル	10 cc 100 cc 125 g 20 cc	600 ℓ	炭疽病、輪紋病、すす斑すす点病、シンクイムシ、ハマキムシ、キンモン、ギンモン
7	7 月上旬	展着剤 コロマイト乳剤 キノンドーフロアブル ダズバン DF トップジン M 水和剤	10 cc 100 cc 100 cc 33 g 66 g	650 ℓ	炭疽病、輪紋病、すす斑すす点病、褐斑病、ハダニ、ケムシ、モモシンクイ、ハマキムシ、カイガラムシ類、リンゴワタムシ

リンゴ防除暦：共和園芸農業協同組合（長野市）（続き）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量 (水 100ℓ 当たり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
8	7月下旬	展着剤	10 cc	600 ℓ	炭疽病、輪紋病、すす斑 すす点病、褐斑病、シン クイムシ、カイガラムシ、 ハマキムシ
		ナリア WDG	50 g		
		オリオン水和剤	100 g		
9	8月上中旬	展着剤	10 cc	650 ℓ	輪紋病、褐斑病、すす斑 すす点病、ハダニ、ハマ キムシ、シンクイム、キ ンモン、ギンモン、ワタ ムシ、カメムシ
		ベンコートフロアブル	66 cc		
		スターマイトフロアブル	50 cc		
		モスピラン顆粒水和剤	25 g		
10	8月下旬	展着剤	10 cc	600 ℓ	炭疽病、輪紋病、すす斑 すす点病、シンクイムシ、 キンモン、ギンモン
		フリントフロアブル	33 g		
		アーデントフロアブル	50 cc		
11	9月上旬	展着剤	10 cc	600 ℓ	すす斑すす点病、斑点落 葉病、シンクイムシ
		ベフラン液剤	66 cc		
		バリアード顆粒水和剤	25 g		
12	9月下旬	展着剤	10 cc	600 ℓ	すす斑すす点病、斑点落 葉病
		ベフラン液剤	66 cc		

Appendix 2-2

リンゴ防除暦：かまねこ農園（坂城町）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ あたり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
1	発芽前	スピンドロン 石灰硫黄合剤	50 cc 10 ℓ	350 ℓ	カイガラムシ、リンゴハダニ
2	落花 15 日後	スコア ダイボルト オサダンダーズバン	2,000 ml 1,000 ml 2,000 ml	500 ℓ	黒星病、赤星病、うどんこ病アブラムシ
3	5 月下旬	アントラコール	1,000 ml	600 ℓ	黒星病、黒点病、斑点落葉病、キンモン、ギンモン、アブラムシ、カイガラムシ、リンゴワタムシ
4	6 月上旬	ポリベリ スミチオン	2,000 ml 2,000ml	600 ℓ	黒星病、黒点病、斑点落葉病、アブラムシ、カイガラムシ、モモ・ナシヒメシンクイ
5	6 月下旬	トモオキシラン 硫酸ニコチン スプラサイド水和剤	600ml 1,000 ml 66 g	600 ℓ	黒炭疽病、輪紋病、すす斑すす点病、シンクイムシ、ハマキムシ、キンモン、ギンモン
6	7 月中旬	アリエティ C ダニトロン	1,200 ml 2,000 ml	600 ℓ	炭疽病、輪紋病、すす斑すす点病、褐斑病、ハダニ、ケムシ、モモシンクイ、ハマキムシ、カイガラムシ類、リンゴワタムシ

リンゴ防除暦：かまねこ農園（坂城町）（続き）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 10a 当たり 当たり)	散布量	主要病害虫
7	8月上旬	ベフラン コロマイト	2,000 ml 1,500 ml	600 ℓ	輪紋病、褐斑病、すす斑 すす点病、ハダニ、ハマ キムシ、シンクイム、キ ンモン、ギンモン、ワタ ムシ、カメムシ
8	8月下旬	キノンド-FA	1,200 ml	600 ℓ	炭疽病、輪紋病、すす斑 すす点病、シンクイムシ、 キンモン、ギンモン

Appendix 2-3

リンゴ防除暦：JA 松本ハイランド（朝日村）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 当たり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
1	発芽前	プフラン液剤 アタックオイル	125 ml 2 ℓ	300 ℓ	腐らん病、いぼ皮病、ハダニ
2	発芽 10 日後	マイリノー（展着剤） コロナフロアブル	10 ml 250 ml	400 ℓ	うどんこ病
3	開花始め (1～2 輪咲き)	マイリノー（展着剤） アンビルフロアブル サムコルフロアブル 10	10 ml 100 ml 20 ml	400 ℓ	黒星病、赤星病、黒点病、 うどんこ病、ハマキムシ、 ギンモンハモグリガ、 キンモンホソガ、ケムシ類
4	落花期	マイリノー（展着剤） オンリーワンフロアブル ストピット II	10 ml 50 ml 200 g	400 ℓ	黒星病、赤星病、黒点病、 うどんこ病、ハマキムシ、 ギンモンハモグリガ、 キンモンホソガ、ケムシ類
5	落花 10 日後	マイリノー（展着剤） ディアナ WDG ジマンダイセン水和剤 ストピット II	10 ml 10 g 200 g 200 g	400 ℓ	黒星病、黒点病、斑点落葉病、 シンクイムシ、ハマキムシ
6	5 月下旬	マイリノー（展着剤） アントラコール顆粒水和剤 サイアノック水和剤 ストピット II	10 ml 200 g 100 g 200 g	500 ℓ	斑点落葉病、すす斑病、 すす点病、黒星病、炭そ病、 輪紋病、褐斑病、カイガラムシ、 ハマキムシ類、シンクイムシ類、 キンモンホソガ、ギンモンハモグリガ、 アブラムシ類、ハダニ類

リンゴ防除暦：JA 松本ハイランド（朝日村）（続き）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 当たり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
7	6月中旬	アピオン E (展着剤) ダニゲッターフロアブル モスビラン顆粒水溶剤 ジマンダイセン水和剤 グリーントップ 70 (葉面散布剤)	100mℓ 50 mℓ 25 g 200 g 100 g	500 ℓ	斑点落葉病、すす斑病、 すす点病、黒星病、炭そ 病、輪紋病、褐斑病、カ イガラムシ、ハマキムシ 類、シンクイムシ類、キ ンモンホソガ、ギンモン ハモグリガ、アブラムシ 類、ハダニ類
8	6月下旬	アピオン E (展着剤) オキシラン水和剤 ダーズバン DF デミリン水和剤 グリーントップ 70	100mℓ 200 g 33 g 33 g 100 g	500 ℓ	褐斑病、斑点落葉病、す す斑病、すす点病、輪紋 病、炭そ病、ハダニ類、 キンモンホソガ、シンク イムシ類、カイガラム シ、ギンモンハモグリ ガ、ハマキムシ
9	7月中旬	アピオン E (展着剤) ナリア WDG ダントツ水溶剤 ベンレート水和剤 グリーントップ 70 (葉面散布剤)	100mℓ 50 g 25 g 33 g 100 g	500 ℓ	褐斑病、斑点落葉病、す す斑病、すす点病、輪紋 病、炭そ病、ハダニ類、 キンモンホソガ、シンク イムシ類、カイガラム シ、ギンモンハモグリ ガ、ハマキムシ
10	7月下旬	スカッシュ (展着剤) ベルタートフロアブル サムコルフロアブル 10 オマイト	100mℓ 100mℓ 20mℓ 100mℓ	500 ℓ	褐斑病、斑点落葉病、す す斑病、すす点病、輪紋 病、炭そ病、ハダニ類、 キンモンホソガ、シンク イムシ類、カイガラム シ、ギンモンハモグリ ガ、カメムシ類

リンゴ防除暦：JA 松本ハイランド（朝日村）（続き）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 当たり)	10a 当たり 散布量	主要病害虫
11	8月中旬	マイリノー（展着剤）	10 ml	500 ℓ	褐斑病、斑点落葉病、すす斑病、すす点病、輪紋病、炭そ病、ハダニ類、キンモンホソガ、シンクイムシ類、カイガラムシ、ギンモンハモグリガ、カメムシ類
		ストロビードライフロアブル	33 g		
		イカズチ WDG	65 g		
		スターマイトフロアブル	50 ml		
12	9月上旬	マイリノー（展着剤）	10 ml	500 ℓ	褐斑病、炭そ病、斑点落葉病、すす斑病、すす点病、ハダニ類、シンクイムシ類、カメムシ類
		マイトコーネフロアブル	100 ml		
		ダントツ水溶剤	25 g		
		ストライド顆粒水和剤	65 g		
13	9月下旬～ 10月上旬	マイリノー（展着剤）	10 ml	500 ℓ	褐斑病、炭そ病、斑点落葉病、すす斑病、すす点病、ハダニ類、シンクイムシ類、カメムシ類
		ストライド顆粒水和剤	65 g		

Appendix 2-4

リンゴ防除暦：みなみ信州農業協同組合（松川町）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 10a 当たり 当たり)	散布量	主要病害虫
1	発芽前 (3月下旬)	石灰硫黄合剤	10 ℓ	350 ℓ	腐らん病、リンゴハダニ、カイガラムシ類
2	開花直前 (4月下旬)	展着剤 スコア顆粒水和剤	10 ml 33 g	350 ℓ	黒星病、うどんこ病、赤星病、りん翅目害虫
3	落花期	オンリーワンフロアブル チオノックフロアブル サムコルフロアブル	50 ml 166 ml 20 ml	400 ℓ	斑点落葉病、黒点病、黒星病、赤星病、うどんこ病、褐斑病、赤衣病、ハマキムシ病、シンクイムシ類、キンモンホソガ、ギンモンハモグリガ
4	5月下旬	展着剤 トップジン M 水和剤 ジマンダイセン水和剤 ダントツ水溶剤 ストピット II	10 ml 66 g 166 g 33 g 200 g	450 ℓ	斑点落葉病、黒点病、黒星病、斑点落葉病、腐らん病、褐斑病、うどんこ病、ケムシ類、クワコナカイガラムシ類、シンクイムシ類
5	6月上旬	デランフロアブル スプラサイド水和剤 ストピット II ピランカ	100 ml 66 g 200 g 50 g	450 ℓ	黒点病、斑点落葉病、黒星病、すす点病、すす斑病、赤星病、炭そ病、褐斑病、ギンモンハモグリガ、ハマキムシ類、カメムシ類、クワコナカイガラムシ、アブラムシ類
6	6月下旬	展着剤 ベフラン液剤 オーソサイド水和剤 ダーズバン DF	10 ml 66 ml 125 g 33 g	550 ℓ	斑点落葉病、黒星病、すす点病、すす斑病、炭そ病、赤星病、輪紋病、褐斑病、ハマキムシ類、シンクイムシ類、アブラムシ類、キンモンホソガ、ギンモンハモグリガ、クワコナカイガラムシ

リンゴ防除暦：みなみ信州農業協同組合（松川町）（続き）

回数	散布時期	散布薬剤名	薬量(水 100ℓ 10a 当たり 当たり)	散布量	主要病害虫
7	7月上旬	展着剤 ベフラン液剤 オーソサイド水和剤 スタークル顆粒水溶剤	10 ml 66 ml 125 g 50 g	550 ℓ	黒点病、斑点落葉病、炭そ病、赤星病、すす点病、すす斑病、輪紋病、褐斑病、腐らん病、ハマキムシ類、シンクイムシ類、キンモンホソガ
8	7月下旬	フリントフロアブル ダニゲッターフロアブル バリアード顆粒水和剤	33 ml 50 ml 33 g	550 ℓ	斑点落葉病、炭そ病、輪紋病、すす点病、すす斑病、褐斑病、腐らん病、ナシヒメシンクイ、キンモンホソガ、ハダニ類、カメムシ類
9	8月中旬	テルスターフロアブル ベフラン液剤	33 ml 66 ml	550 ℓ	輪紋病、腐らん病、斑点落葉病、褐斑病、すす点病、すす斑病、ハダニ類、カメムシ類、ナシヒメシンクイ、キンモンホソガ、モモシнтаイガ
10	9月上旬	フリントフロアブル ダントツ水溶剤	33 ml 50 g	550 ℓ	すす点病、すす斑病、腐らん病、斑点落葉病、炭そ病、褐斑病、黒星病、輪紋病、リンゴワタムシ、ナシヒメシンクイ、カメムシ類、モモシンクイガ、ハダニ類
11	9月中旬	ストライド バリアード顆粒水和剤	66 g 25 g	550 ℓ	すす点病、すす斑病、斑点落葉病、輪紋病、炭そ病、黒星病、シンクイムシ、ハマキムシ

第3章 SOFIX に基づく樹園地における最適土壌環境

1節 緒言

樹園地は、果樹、茶、桑など多年生の木本作物を対象として栽培されている圃場である。樹園地の特徴として、多年生のため何年（何十年）にもわたり、単一の樹種を生育させ続けることや、恒常的に植物（樹木）が植わっていることなどが畑地と異なる点である。毎年多くの落ち葉や枝および樹皮といったリターを地表面に落下させ、高い収穫量を維持し、病害虫から樹木を守るため、毎年多くの化学肥料と農薬が使用されている。これらのリターや施肥量の管理が樹園地の最適な土壌環境を維持する上で、大変重要な問題である。第1章、第2章では、バラ科リンゴ属の落葉高木で、その果実であるリンゴを研究対象とした。本章では、リンゴに加えて多年生の木本作物である樹園地を基礎研究し、様々あるデータベースの解析に繋げることにした。樹園地の中でも、とくにリンゴ、茶、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシ、ブルーベリーの SOFIX 技術によりデータベースを構築し、その解析を行った。

茶は、チャノキ（茶樹 *Camellia sinensis* Kuntze）の葉や茎を加工してつくられる飲み物である（農林水産省 2003）。茶樹は種子または挿し木から繁殖し、茶樹が種子をつけるまでには、4年から12年ほどかかり、新しい木が収穫（摘採）に適するまでには約3年かかるといわれ、茶の生育条件は、年平均気温 12.5~13 °C 以上（適温は 14~16 °C）、年間降水量 1,300~1,400 mm 以上、土壌は pH 4~5 程度の酸性であることが望ましいといわれている（日本土壌協会 2013）。茶の品質は、一般に窒素を多くするほど向上するため、日本では多施肥化が進み、硝酸態窒素による地下水汚染が問題になっている（中曾根ら 2000）。

銀杏（*Ginkgo biloba* Linnaeus）は、裸子植物門イチョウ綱イチョウ目イチョウ科イチョウ属に属する（十亀 1984）。銀杏の生育条件は、年平均気温 0~20°C、降水量 500~2,000mm の地域に分布しており、繁殖力が強く、人為的に広く栽培・植樹されている。現存する唯一のイチョウ綱であり、IUCN レッドリスト 1997 年版では希少種（Rare）に、1998 年版で絶滅危惧（絶滅危惧 II 類）となっている。

ブドウ（*Vitis vinifera* Linnaeus）は、つる性落葉低木であり、その果実である。メロン（*Cucumis melo* Linnaeus）は、果実を食用にするうり科の一年生草本植物である。モモ（*Amygdalus persica* Linnaeus）は、バラ科モモ属の落葉小高木であり、その果実である。カキ（*Diospyros kaki* Thunberg）は、カキノキ科の1種の落葉樹である。ナシ（*Pyrus pyrifolia*）は、バラ科ナシ属の植物であり、その果実のことである。ブルーベリー（*Vaccinium corymbosum* Vaccinium）は、ツツジ科スノキ属シアノカス節に分類される北アメリカ原産の落葉低木果樹である。

土壌の化学的、生物的解析には、土壌の物質循環と微生物の活性を含めた土壌の状態を調

べるために、土壌の物質循環に寄与する生物活性に着目した土壌肥沃度診断指標 SOFIX (Soil Fertile Index) によって分析した。土壌中に施肥されたタンパク質などの窒素有機物は、微生物によってアンモニア態窒素 (NH_4^+) \rightarrow 亜硝酸態窒素 (NO_2^-) \rightarrow 硝酸態窒素 (NO_3^-) と分解されることが知られている。このように有機物中の窒素はアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素を経て植物が吸収できる硝酸態窒素に変える力を評価した。これらの過程で、アンモニア酸化活性 ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$)、亜硝酸酸化活性 ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) および微生物量を測定し、土壌環境を明らかにする判定指標とした。

また、土壌中のリン循環では、施肥された有機態リン酸から植物が利用できるリン酸への変換が律速となっている。そこで、フィチン酸と呼ばれる有機態リン酸を変換する力をリン循環活性として評価した。食の安全安心への関心が高まる中、土壌を活性化させる微生物の含有量を数値でとらえることができ、有機栽培の促進が期待できる。

SOFIX によって、土壌中の有機物量についての評価を行っている。これは、土壌中の微生物にとって活性化していきやすい環境かどうかを示すものである。主に、TC、TN および C/N 比を指標にしている。SOFIX の先行研究では、日本で作付面積の多い水田と畑に注目した (Adhikari et al. 2014)。水田や畑栽培は、今まで生産者による経験や勘などによって、土づくりがなされていた。そのため、SOFIX によって、水田と畑の有機的な最適な土壌条件を科学的に明らかにした。水田の最適な土壌条件は、TC \geq 20,000 mg/kg、TN : 1,000~1,500 mg/kg であり、畑の最適な土壌条件は、TC \geq 25,000 mg/kg、TN \geq 1,500 mg/kg、C/N 比 : 15~25 であることを報告した (Adhikari et al. 2014)。これらの範囲にあれば、微生物のエサ (栄養分) となる有機物の量および比率がより良い状態となり、窒素循環活性が高まり、植物の成長が促進されることを明らかにした (Adhikari et al. 2014, Kai et al. 2015)。

本章では、樹園地に注目し、樹園地の土壌環境を改善する目的として、土壌の化学性・生物性の分析を行った。とくに茶園では、多施肥から硝酸態窒素が過剰となり、土壌から溶出し地下水を汚染していることは、茶園にとって大きな課題である。このことから、茶園土壌の最適条件を調査することは、大変重要である。土壌の化学的、生物的解析には、土壌の物質循環に寄与する微生物活性に着目した土壌肥沃度診断指標 SOFIX (soil fertile index) によって分析した。TC、TN、TP、TK、C/N 比および窒素循環活性値の分析結果から樹園地土壌の最適条件を検討した。

2節 実験材料および方法

3.2.1 樹園地土壌の化学的性質の分析

樹園地 (n=141) から土壌を採取した。樹園地の作物の内訳は、リンゴ (n=66)、茶 (n=33)、銀杏 (n=19)、ブドウ (n=11)、メロン (n=6)、モモ (n=2)、カキ (n=2)、ナシ (n=1) およびブ

ルーベリー (n=1) である。土壌のサンプリングは、各樹園地の地表面から約 2~3 cm を取り除いた深さ約 15cm までの土壌を、中央と対角線の 5 箇所から均等混合した。土壌サンプルから TC、TN、TP、TK、C/N 比、C/P 比、アンモニア態窒素 ($\text{NO}_4^+\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、水溶性リン (SP) 水溶性カリウム (SK)、pH および EC といった化学的性質を分析した。実験方法は、第 1 章 2 節 1.2.3 に従った。

3.2.2 樹園地土壌の生物的性質の分析

3.2.1 と同様に樹園地土壌から採取した 141 個の試料から、総細菌数、アンモニア酸化活性、亜硝酸酸化活性、窒素循環活性評価値、リン循環活性評価値といった生物的特性を解析した。窒素循環活性は、土壌中の総細菌数、アンモニア酸化活性と亜硝酸酸化活性に基づいて決定した。これら 3 つの土壌中の総細菌数、アンモニア酸化活性と亜硝酸酸化活性から算出した得点から、レーダーチャートを構築し定量化した後、内側の三角形の相対面積を窒素循環活性評価値とした。実験方法は、第 1 章 2 節 1.2.3 に従った。

3.2.3 樹園地の最適土壌条件のデータ解析

SOFIX 分析結果から、樹園地全般、リンゴ、茶、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシおよびブルーベリー、それぞれの窒素循環活性評価値に注目し、最適な土壌条件を解析した。

3節 結果

3.3.1 樹園地土壌の化学的性質の解析

樹園地全般、また樹園地の作物別にリンゴ、茶、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシおよびブルーベリーの土壌の SOFIX 分析結果を示す (Table 3-1~ Table 3-10)。

これらのことから、TC はリンゴで一番大きく、銀杏、ナシの順であった (Figure 3-1)。TN はブルーベリー、銀杏、リンゴの順であった (Figure 3-2)。TP は銀杏、ナシ、カキの順であった (Figure 3-3)。TK はカキ、銀杏、メロンの順であった (Figure 3-4)。銀杏の土壌は、TC、TN、TP および TK が大きいことから、炭素、窒素、リン、カリウムといった養分を満遍なく必要としていることがわかった。

リンゴ、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキおよびナシの土壌の pH7.3~6.5 は、それぞれ中性であった。それに対して、茶とブルーベリーの土壌の pH は、それぞれ 4.3 と 4.7 で酸性であった。このことから、茶、ブルーベリー栽培によって、土壌が酸性傾向になったと考え

た。

樹園地全般 ($R^2=0.2975$)、リンゴ圃場 ($R^2=0.2832$)、茶園 ($R^2=0.6023$)、銀杏 ($R^2=0.6617$)、ブドウ ($R^2=0.9652$) およびメロン ($R^2=0.7743$) の TC および TN との間には、それぞれ正の相関関係がみられた (Figure 3-5~Figure 3-10)。とくにブドウでは、強い正の相関関係が見られた。

Table 3-1 樹園地全般の土壌の SOFIX 分析結果 (n = 141)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	40,571	2,670–119,200
全窒素 TN (mg/kg)	2,340	273–11,284
全リン TP (mg/kg)	5,625	142–35,937
全カリウム TK (mg/kg)	6,554	813–15,537
C/N 比	18.4	3.2–58.2
C/P 比	12.8	1.7–52.6
窒素循環活性評価値 (点)	38.7	0.0–98.7
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	6.4	nd–23.2
アンモニア酸化活性 (%)	31.1	0.0–98.1
亜硝酸酸化活性 (%)	59.2	0–100
リン循環活性評価値 (%)	43.2	0–100
pH	6.3	3.1–8.0

nd : 検出限界以下 ($< 6.6 \times 10^6$ cells/g)

Table 3-2 リンゴ圃場土壌の SOFIX 分析結果 (n = 66)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	53,865	17,480–93,850
全窒素 TN (mg/kg)	3,000	720–8,494
全リン TP (mg/kg)	5,930	174–12,928
全カリウム TK (mg/kg)	6,903	3,783–12,829
C/N 比	19.9	7.0–39.5
C/P 比	10.3	2.8–38.1
窒素循環活性評価値 (点)	49.1	1.7–95.4
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	8.5	3.6–20.2
アンモニア酸化活性 (%)	37.3	0.0–97.7
亜硝酸酸化活性 (%)	48.5	0–100
リン循環活性評価値 (%)	38.6	0–100
pH	7.0	5.4–7.7

Table 3-3 茶園土壌の SOFIX 分析結果 (n = 33)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	14,443	2,670–37,150
全窒素 TN (mg/kg)	837	273–1,729
全リン TP (mg/kg)	833	142–5,039
全カリウム TK (mg/kg)	3,722	813–8,920
C/N 比	15.9	7.0–37.8
C/P 比	23.3	2.1–99.9
窒素循環活性評価値 (点)	12.6	0.0–38.6
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	2.2	nd–12.9
アンモニア酸化活性 (%)	4.8	0.0–28.3
亜硝酸酸化活性 (%)	94.4	31.3–100
リン循環活性評価値 (%)	51.4	6.8–100
pH	4.3	3.1–8.0

nd : 検出限界以下 ($< 6.6 \times 10^6$ cells/g)

Table 3-4 銀杏土壤の SOFIX 分析結果 (n = 19)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	45,995	10,816–119,000
全窒素 TN (mg/kg)	3,158	483–11,284
全リン TP (mg/kg)	11,927	1,313–35,937
全カリウム TK (mg/kg)	8,133	1,848–15,537
C/N 比	16.8	3.6–43.3
C/P 比	6.2	1.5–24.7
窒素循環活性評価値 (点)	60.2	10.5–98.7
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	7.9	1.7–23.2
アンモニア酸化活性 (%)	52.5	0.0–98.1
亜硝酸酸化活性 (%)	54.7	0.0–100
リン循環活性評価値 (%)	66.1	13.0–100
pH	6.9	6.1–7.8

Table 3-5 ブドウ土壌の SOFIX 分析結果 (n = 11)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	11,680	4,900–26,140
全窒素 TN (mg/kg)	810	483–1,507
全リン TP (mg/kg)	1,220	317–2,599
全カリウム TK (mg/kg)	4,094	2,195–8,477
C/N 比	13.6	10.4–17.4
C/P 比	11.6	3.9–18.5
窒素循環活性評価値 (点)	10.9	1.5–26.5
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	3.9	1.2–10.6
アンモニア酸化活性 (%)	12.9	0.0–34.6
亜硝酸酸化活性 (%)	41.8	5.8–71.8
リン循環活性評価値 (%)	17.9	0.0–81.6
pH	6.5	5.6–8.0

Table 3-6 メロン土壌の SOFIX 分析結果 (n = 6)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	36,225	10,650–63,000
全窒素 TN (mg/kg)	2,027	963–2,785
全リン TP (mg/kg)	6,562	2,857–14,984
全カリウム TK (mg/kg)	7,342	5,951–9,153
C/N 比	16.5	10.7–23.4
C/P 比	6.5	3.1–12.6
窒素循環活性評価値 (点)	59.9	5.3–97.3
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	8.0	3.7–17.1
アンモニア酸化活性 (%)	65.1	5.1–96.2
亜硝酸酸化活性 (%)	70.5	18.2–99.9
リン循環活性評価値 (%)	13.8	0.0–42.7
pH	6.9	6.5–7.4

Table 3-7 モモ土壌の SOFIX 分析結果 (n = 2)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	38,655	19,600–57,710
全窒素 TN (mg/kg)	2,415	1,781–3,049
全リン TP (mg/kg)	6,990	6,030–7,951
全カリウム TK (mg/kg)	6,381	5,731–7,030
C/N 比	15.0	11.0–18.9
C/P 比	5.3	3.3–7.3
窒素循環活性評価値 (点)	14.2	1.0–27.4
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	3.5	0.03–7.1
アンモニア酸化活性 (%)	26.1	17.6–34.6
亜硝酸酸化活性 (%)	25.7	16.4–35.0
リン循環活性評価値 (%)	53.5	7.0–100
pH	6.6	6.5–6.8

Table 3-8 カキ土壤の SOFIX 分析結果 (n = 2)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	24,340	11,810–36,870
全窒素 TN (mg/kg)	1,065	804–1,326
全リン TP (mg/kg)	7,976	5,690–10,263
全カリウム TK (mg/kg)	9,567	8,959–10,176
C/N 比	21.2	14.7–27.8
C/P 比	3.8	1.2–6.5
窒素循環活性評価値 (点)	47.8	34.9–60.7
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	4.6	3.6–5.6
アンモニア酸化活性 (%)	37.0	28.2–45.9
亜硝酸酸化活性 (%)	15.5	12.6–18.3
リン循環活性評価値 (%)	37.0	30.0–44.0
pH	7.3	7.2–7.4

Table 3-9 ナシ土壤の SOFIX 分析結果 (n = 1)

測定項目	値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	40,680	—
全窒素 TN (mg/kg)	2,051	—
全リン TP (mg/kg)	8,112	—
全カリウム TK (mg/kg)	4,296	—
C/N 比	19.8	—
C/P 比	5.0	—
窒素循環活性評価値 (点)	32.9	—
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	8.3	—
アンモニア酸化活性 (%)	45.1	—
亜硝酸酸化活性 (%)	37.3	—
リン循環活性評価値 (%)	100	—
pH	7.0	—

Table 3-10 ブルーベリー土壌の SOFIX 分析結果 (n = 1)

測定項目	平均値	範囲
全炭素 TC (mg/kg)	12,080	—
全窒素 TN (mg/kg)	3,738	—
全リン TP (mg/kg)	1,633	—
全カリウム TK (mg/kg)	3,141	—
C/N 比	3.2	—
C/P 比	7.4	—
窒素循環活性評価値 (点)	0.0	—
総細菌数 ($\times 10^8$ cells/g)	1.1	—
アンモニア酸化活性 (%)	0.0	—
亜硝酸酸化活性 (%)	0.0	—
リン循環活性評価値 (%)	0.0	—
pH	4.7	—

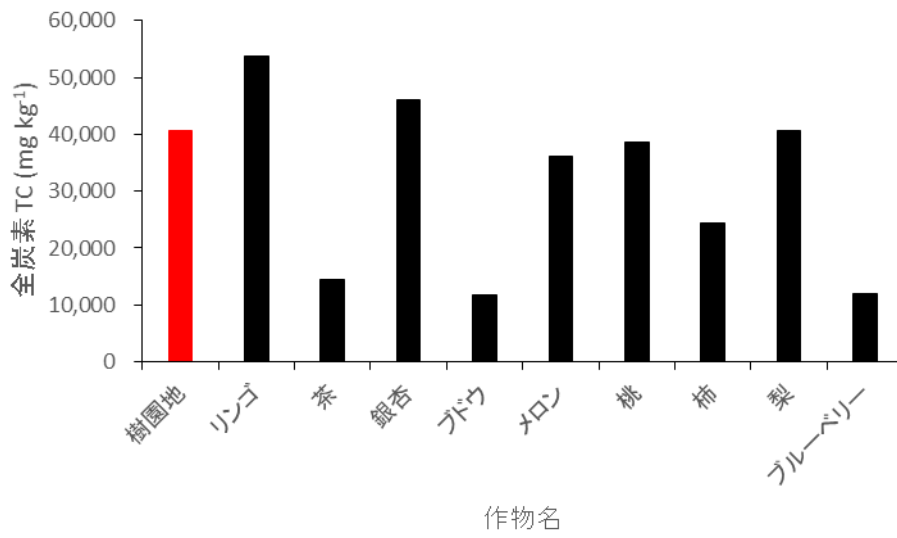


Figure 3-1 作物と TC の関係

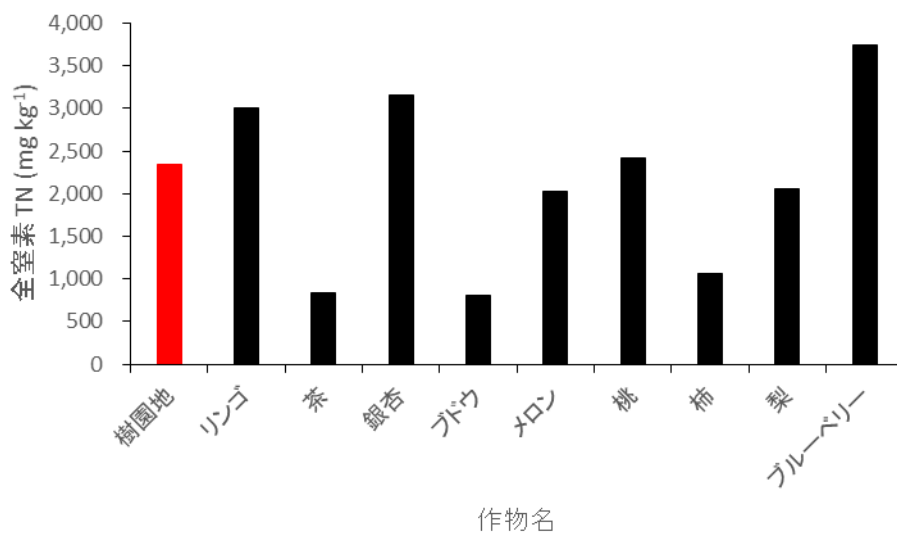


Figure 3-2 作物と TN の関係

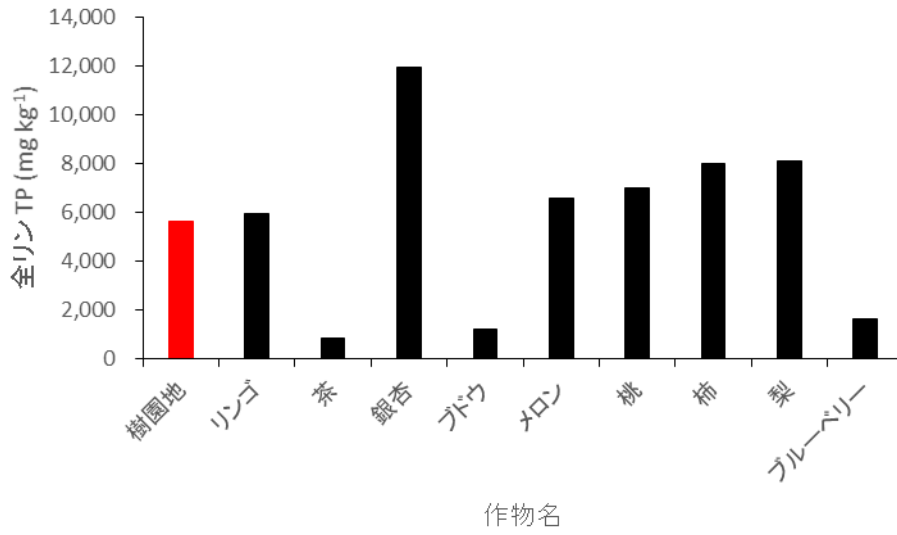


Figure 3-3 作物と TP の関係

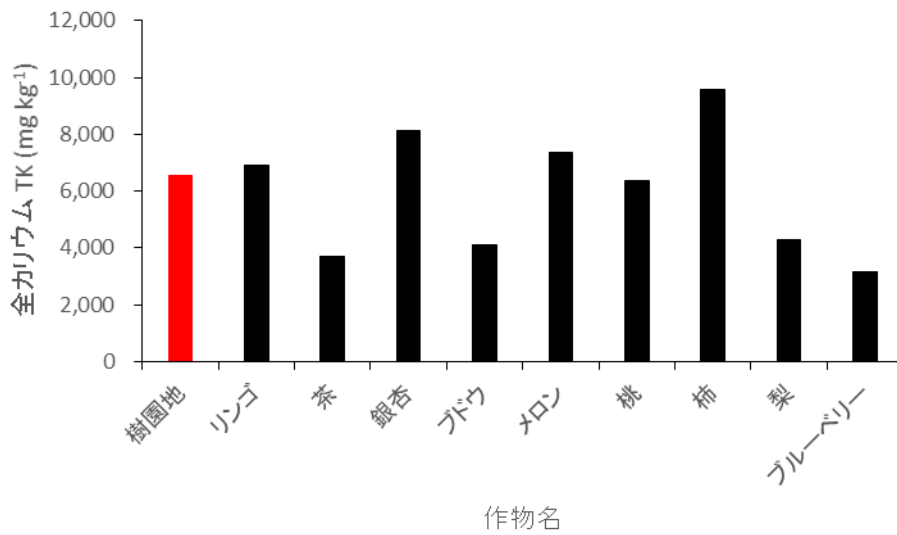


Figure 3-4 作物と TK の関係

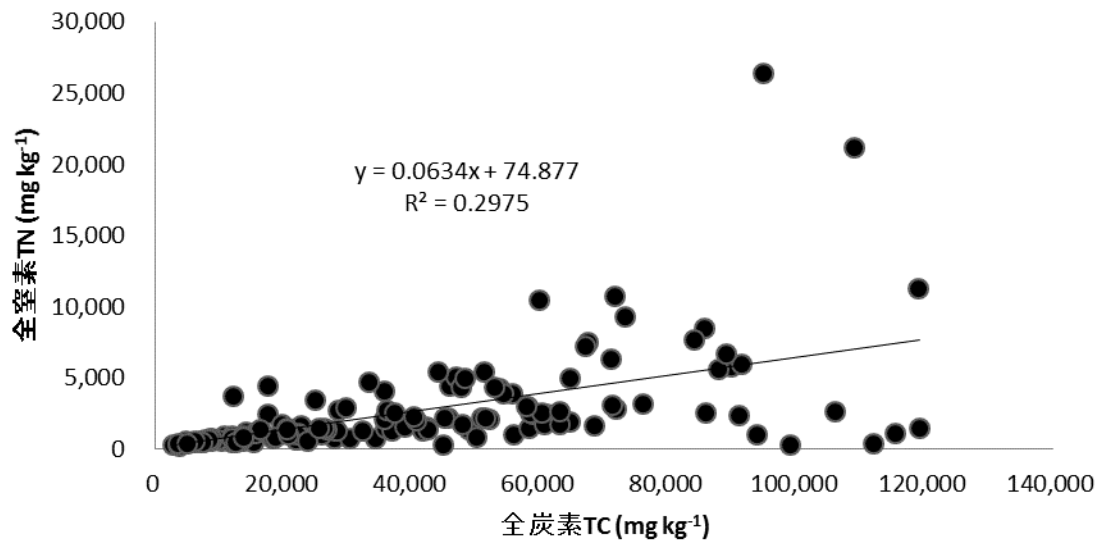


Figure 3-5 樹園地の TC と TN の関係 (サンプル数=141)

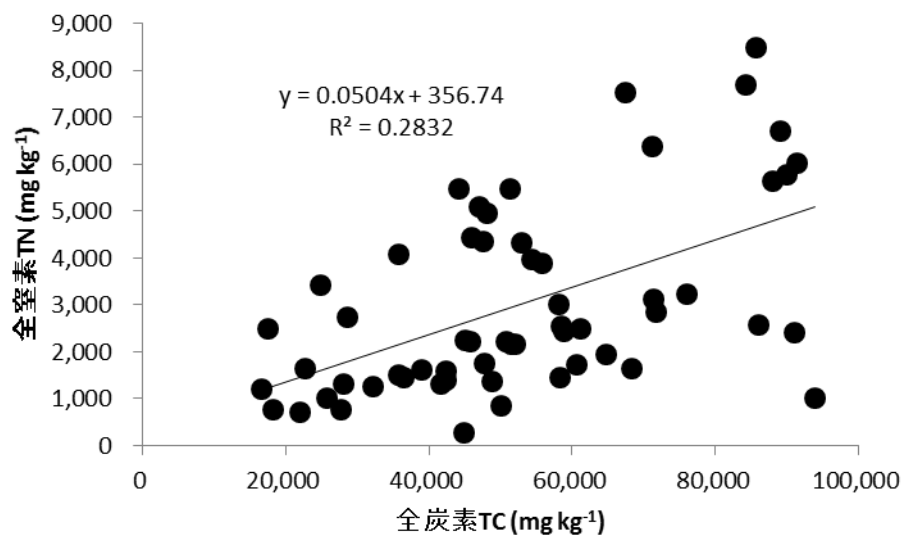


Figure 3-6 リンゴ圃場の TC と TN の関係 (サンプル数=66)

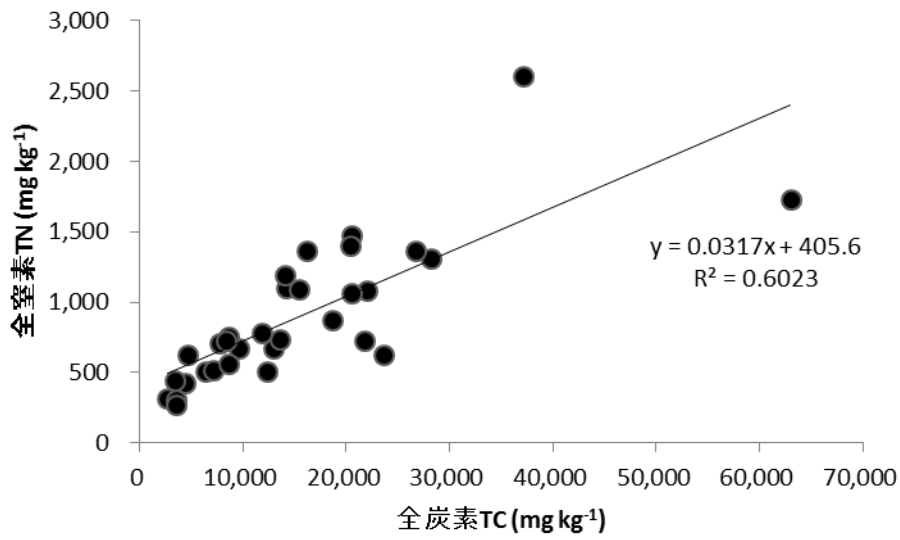


Figure 3-7 茶園の TC と TN の関係 (サンプル数=33)

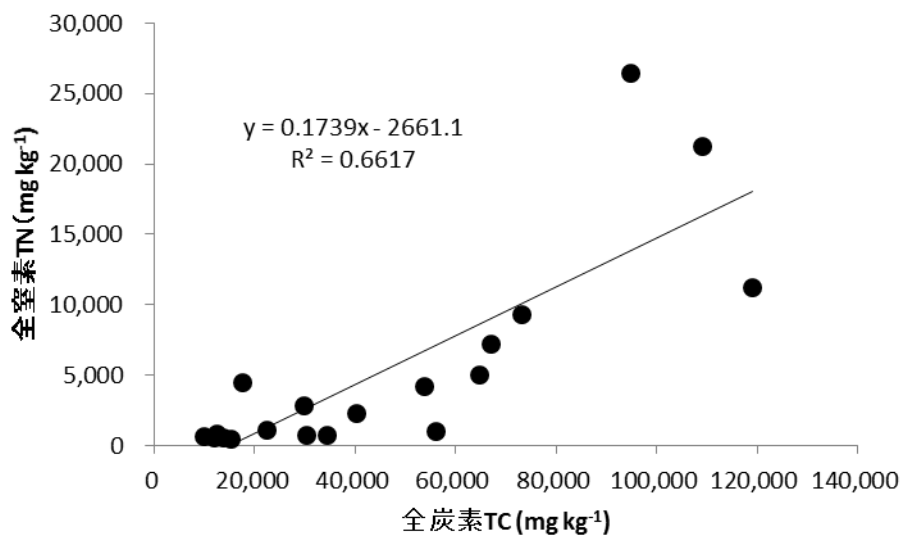


Figure 3-8 銀杏の TC と TN の関係 (サンプル数=19)

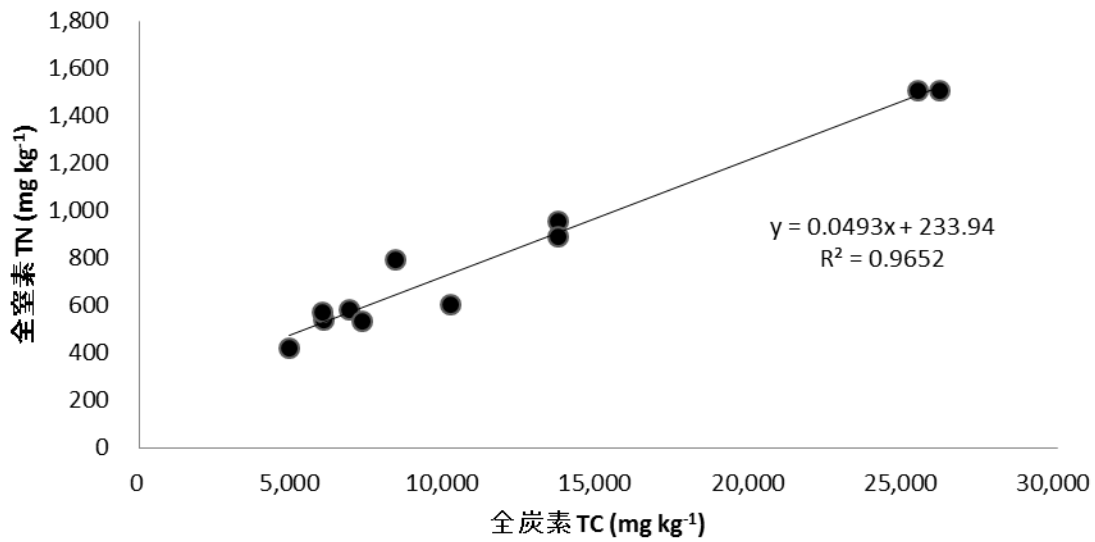


Figure 3-9 ブドウの TC と TN の関係 (サンプル数=11)

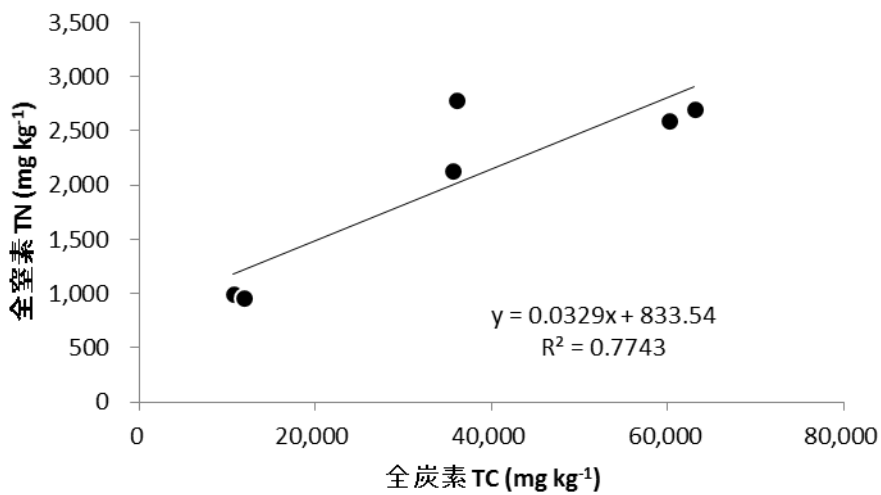


Figure 3-10 メロンの TC と TN の関係 (サンプル数=6)

3.3.2 樹園地土壌の生物学的特性の解析

樹園地全般、リンゴ、茶、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシおよびブルーベリーのそれぞれの土壌の SOFIX 分析結果から (Table 3-1~Table 3-10)、土壌中の総細菌数、アンモニア酸化活性と亜硝酸酸化活性から割合を利用して、レーダーチャートを構築し定量化した後、内側の三角形の相対面積を窒素循環活性評価値とした (Figure 3-11~Figure 3-20)。なお、ブルーベリーはサンプル数が 1 つで、アンモニア酸化活性と亜硝酸酸化活性が 0.0 % であったため、傾向がつかめなかった。

樹園地の窒素循環活性評価値が 38.7 点であった。リンゴ、銀杏、メロン、カキの土壌の窒素循環活性評価値は、それぞれ 49.1 点、60.2 点、59.9 点、47.8 点であり、樹園地の窒素循環活性評価値より高かった。茶の土壌は、樹園地の他の作物と比較すると、総細菌数が 2.2×10^8 cells/g、アンモニア酸化活性 4.8%、窒素循環活性評価値 12.6 点と小さい値を示した。土壌中に施肥されたタンパク質などの窒素有機物は、微生物によってアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) \rightarrow 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) \rightarrow 硝酸態窒素 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) と分解される過程において、多くの植物は最終産物である硝酸が利用される。しかし、茶は好アンモニア性植物のため、アンモニア態窒素を利用し、硝化過程の亜硝酸酸化活性 ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) ではなく、アンモニア酸化活性 ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$) を利用することが知られている (農山漁村文化協会 2004)。そのため、土壌中の総細菌数、アンモニア酸化活性と亜硝酸酸化活性から割合を利用した、レーダーチャートではこれらの特徴を如実に反映していた。このことから、茶園の土壌中では、土壌微生物による窒素循環が既存の方法で正確に判断するのが難しいことが示唆された。

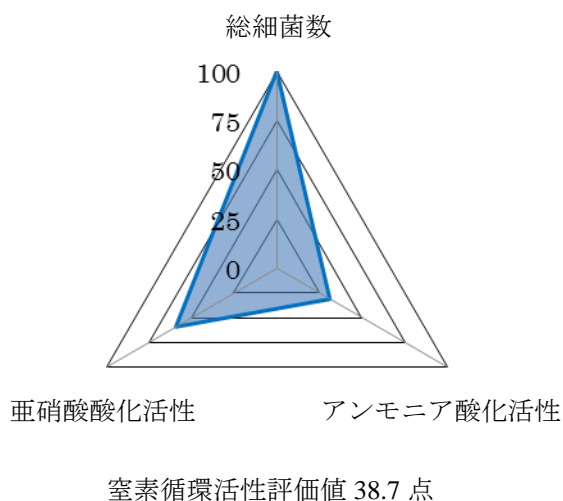


Figure 3-11 窒素循環活性の評価 (樹園地)

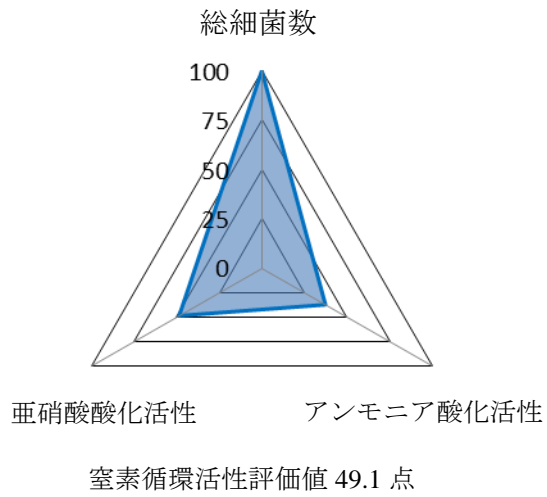


Figure 3-12 窒素循環活性の評価（リンゴ圃場）

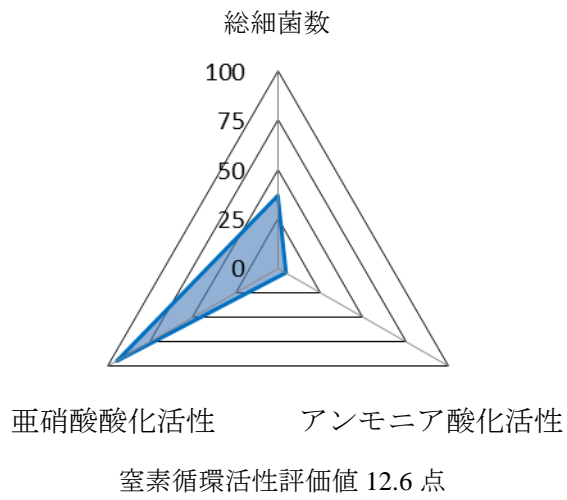


Figure 3-13 窒素循環活性の評価（茶園）

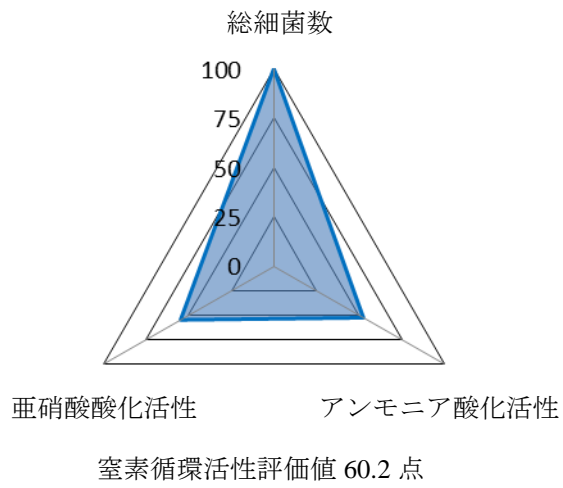


Figure 3-14 窒素循環活性の評価（銀杏）

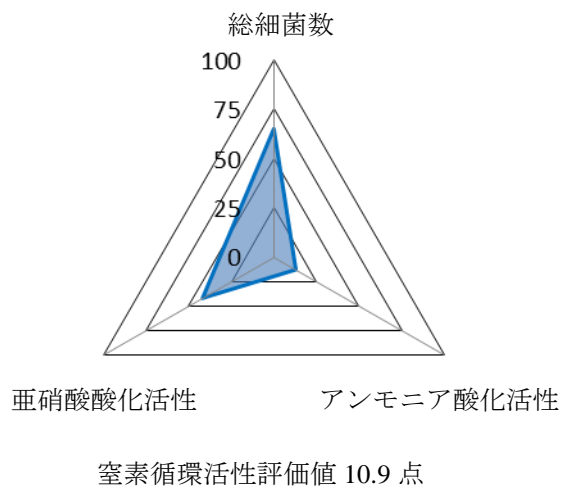


Figure 3-15 窒素循環活性の評価（ブドウ）

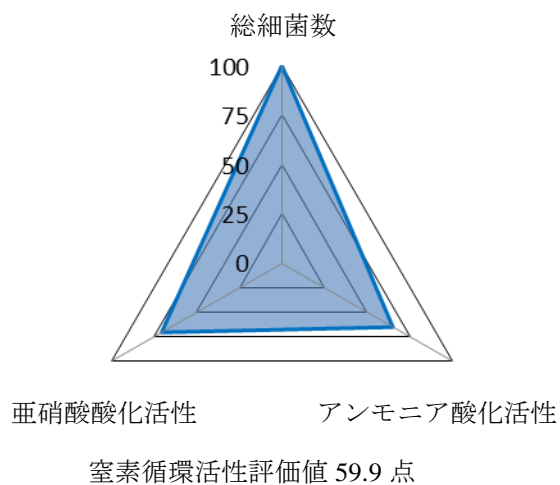


Figure 3-16 窒素循環活性の評価（メロン）

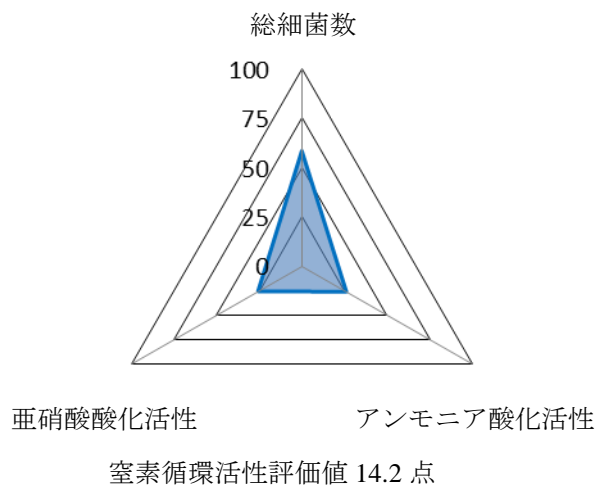


Figure 3-17 窒素循環活性の評価（モモ）

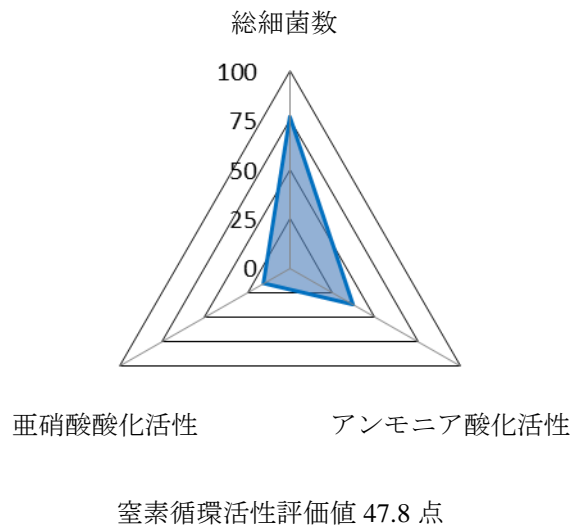


Figure 3-18 窒素循環活性の評価（カキ）

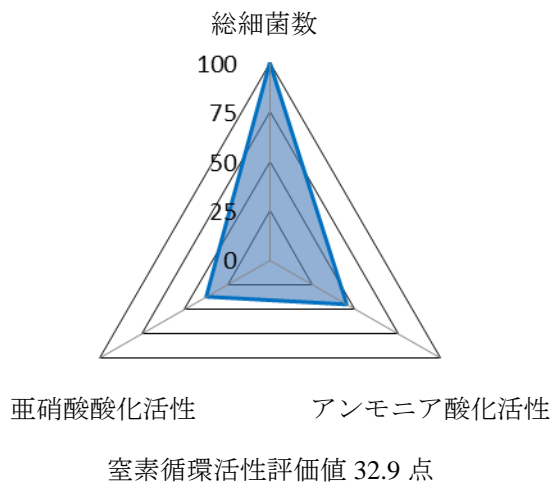


Figure 3-19 窒素循環活性の評価（ナシ）

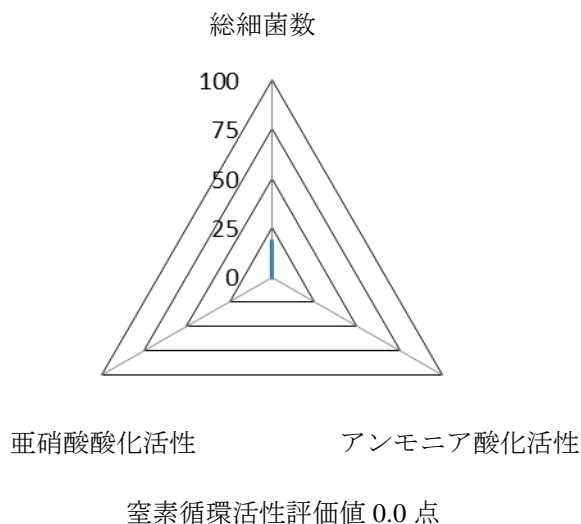


Figure 3-20 窒素循環活性の評価（ブルーベリー）

3.3.3 樹園地の最適土壌条件の解析

SOFIX 分析結果から、樹園地、リンゴ、茶、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシおよびブルーベリー土壌のそれぞれの窒素循環活性評価値に注目し、最適な土壌条件を解析した（Table 3-11 ~ Table 3-18）。

樹園地については、SOFIX 分析結果から窒素循環活性評価値の高い 98.7-72.2 のグループは、他のグループ（72.0-43.2、42.6-22.7、20.7-8.2、7.7-0.0）と比較して、土壌中の活発な窒素循環が行われていて、TC、TN が高く、C/N 比が 15.7 であった。このことから、樹園地の最適な土壌条件は、TC：50,000-60,000 mg/kg、TN：3,000-4,000 mg/kg、TP：5,000-6,000 mg/kg、TK：6,000-7,000 mg/kg および C/N 比：15-20 であることがわかった。

リンゴ圃場については、窒素循環活性評価値の高い 95.8-58.7 のグループが、他のグループ（56.1-37.0、34.9-1.7）と比較して、TC と TN が高く、TP と C/N 比が低かった。リンゴ圃場の最適な土壌条件は、TC：50,000-60,000 mg/kg、TN：3,000-4,000 mg/kg、TP：5,000-6,000 mg/kg、TK：6,000-7,000 mg/kg、C/N 比：15-20 であることがわかった。

茶園については、窒素循環活性評価値の高い値が 38.6 であることから、土壌中の窒素循環が活発に行われているとは言い難い。茶はアンモニア態窒素を好む植物であることから、窒素循環活性評価値でのみ評価するのは難しいが、低い方のグループ（12.0-6.1、5.9-0.0）と比較すると、TC、TN、TP が大きく、C/N 比が小さかった。窒素循環活性評価値 38.6 を向上させるためには、TC \geq 20,000 mg/kg、TN \geq 1,500 mg/kg、TP \geq 1,000 mg/kg、TK \geq 3,000 mg/kg、C/N 比：15-20 が必要と判断し、茶の最適な土壌条件とした。

銀杏については、サンプル数が 19 と少ないが、窒素循環活性評価値 98.7 は土壌中の活発

な窒素循環が行われているため解析をした。窒素循環活性評価値 98.7-77.4 のグループは、他のグループ (73.4-39.3、34.2-0.0) と比較して、TC、TN、TP が大きく、TK は小さかった。このことから、銀杏の最適な土壤条件は、 $TC \geq 60,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TN \geq 5,000 \text{ mg/kg}$ と判断した。

ブドウについては、サンプル数が 11 と少なく、窒素循環活性評価値は 26.5 と低かった。そのため、土壤中の活発な窒素循環が行われるように、有機栽培に望ましい土壤成分の量とバランスを考え、最適な土壤条件を求めた。窒素循環活性評価値 26.5-16.2 のグループは、他のグループ (8.4-5.5、4.6-1.5) と比較して、TC、TN、TK が小さかった。このことから、ブドウの最適な土壤条件は、 $TC \geq 10,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TN \geq 1,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TP \geq 2,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TK \geq 3,000 \text{ mg/kg}$ 、C/N 比：15-20 と判断した。

メロンについては、サンプル数が 6 と少ないが、窒素循環活性評価値 97.3 は土壤中の活発な窒素循環が行われているため解析をした。窒素循環活性評価値 97.3 のグループから、他のグループ (77.7-70.1、11.5-5.3) と比較して、メロンの最適な土壤条件は、 $TC : 30,000-40,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TN : 2,000-3,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TP : 3,000-4,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TK : 8,000-9,000 \text{ mg/kg}$ 、C/N 比：15-20 と判断した。

モモについては、サンプル数が 2 と少なく、窒素循環活性評価値は 27.4 と低かった。そのため、土壤中の活発な窒素循環が行われるように、有機栽培に望ましい土壤成分の量とバランスを考え、最適な土壤条件を求めた。窒素循環活性評価値 27.4 のグループは、他のグループ (1.0) と比較して、TC、TN、TP が大きく、TK が小さかった。このことから、モモの最適な土壤条件は、 $TC \geq 60,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TN \geq 4,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TP \geq 8,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TK \geq 6,000 \text{ mg/kg}$ 、C/N 比：15-20 と判断した。

カキについては、サンプル数が 2 と少ないが、窒素循環活性評価値は 60.7 と高かった。土壤中の活発な窒素循環が行われていることから解析をした。窒素循環活性評価値 60.7 のグループは、他のグループ (34.9) と比較して、TC、TN が大きく、TP、TK が小さかった。このことから、カキの最適な土壤条件は、 $TC : 30,000-40,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TN : 1,000-2,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TP : 5,000-6,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TK : 9,000-10,000 \text{ mg/kg}$ 、C/N 比：15-25 と判断した。

ナシについては、サンプル数が 1 と少なく、窒素循環活性評価値は 32.9 と低かった。そのため、土壤中の活発な窒素循環が行われるように、有機栽培に望ましい土壤成分の量とバランスを考え、最適な土壤条件を求めた。ナシの最適な土壤条件は、 $TC \geq 50,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TN \geq 3,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TP \geq 9,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TK \geq 5,000 \text{ mg/kg}$ 、C/N 比：15-20 と判断した。

ブルーベリーについては、サンプル数が 1 と少なく、窒素循環活性評価値は 0.0 と低かった。土壤中の活発な窒素循環が行われるように、最適な土壤条件を求めた。ブルーベリーの最適な土壤条件は、 $TC \geq 20,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TN \geq 4,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TP \geq 2,000 \text{ mg/kg}$ 、 $TK \geq 4,000 \text{ mg/kg}$ 、C/N 比：15-20 と判断した。

Table 3-11 樹園地全般の窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 141)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サン プル 数	サン プル 割合 (%)
98.7-72.2	58,087	3,872	5,247	6,065	15.7	28	19.9
72.0-43.2	40,802	2,571	4,782	5,863	18.7	29	20.4
42.6-22.7	40,608	2,718	6,107	4,834	20.4	28	19.9
20.7-8.2	18,885	2,147	3,367	3,763	14.9	28	19.9
7.7-0.0	21,088	2,534	3,499	6,722	15.9	28	19.9
Total						141	100.0

Table 3-12 リンゴ圃場の窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 66)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サン プル 数	サン プル 割合 (%)
95.8-58.7	56,770	3,698	5,116	5,935	15.3	22	33.3
56.1-37.0	40,049	1,879	5,408	5,456	20.2	22	33.3
34.9-1.7	54,269	3,044	6,028	6,414	21.5	22	33.3
Total						66	100.0

Table 3-13 茶園の窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 33)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サン プル 数	サン プル 割合 (%)
38.6-13.9	17,012	1,126	687	2,915	13.2	11	33.3
12.0-6.1	14,434	803	600	3,990	15.7	11	33.3
5.9-0.0	12,116	766	540	3,265	15.4	11	33.3
Total						33	100.0

Table 3-14 銀杏の窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 19)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サン プル 数	サン プル 割合 (%)
98.7-77.4	64,083	5,917	28,304	5,373	13.6	7	36.8
73.4-39.3	14,434	803	16,503	9,786	14.4	6	31.6
34.2-0.0	17,016	1,253	3,487	9,699	20.2	6	31.6
Total						19	100.0

Table 3-15 ブドウの窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 11)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サンプル数	サンプル割合 (%)
26.5-16.2	7,839	638	1,352	2,354	12.4	4	36.3
8.4-5.5	13,001	840	826	4,128	14.5	4	36.3
4.6-1.5	15,042	1,001	1,567	6,367	14.1	3	27.4
Total						11	100.0

Table 3-16 メロンの窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 6)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サンプル数	サンプル割合 (%)
97.3	35,800	2,459	3,119	8,638	14.8	2	33.3
77.1-70.1	61,605	2,645	13,125	7,399	23.3	2	33.3
11.5-5.3	11,270	977	3,441	5,989	11.5	2	33.3
Total						6	100.0

Table 3-17 モモの窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 2)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サンプル数	サンプル割合 (%)
27.4	57,710	3,049	7,951	5,731	18.9	1	50.0
1.0	19,600	1,781	6,030	7,030	11.5	1	50.0
Total						2	100.0

Table 3-18 カキの窒素循環活性評価値による SOFIX 分析結果 (n = 2)

窒素循環活性評価値 (点)	TC (mg/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (mg/kg)	C/N 比	サン プル 数	サン プル 割合 (%)
60.7	36,870	1,326	5,690	8,959	27.8	1	50.0
34.9	11,810	804	10,263	10,176	14.7	1	50.0
Total						2	100.0

Table 3-19 最適な土壌条件

地目	TC (mg kg ⁻¹)	TN (mg kg ⁻¹)	TP (mg kg ⁻¹)	TK (mg kg ⁻¹)	C/N 比	サンプル 数 (個)
樹園地 [*]	50,000-60,000	3,000-4,000	5,000-6,000	6,000-7,000	15-20	141
リンゴ	50,000-60,000	3,000-4,000	5,000-6,000	6,000-7,000	15-20	66
茶	≧20,000	≧1,500	≧1,000	≧3,000	15-20	33
銀杏	≧60,000	≧5,000	—	—	10-20	19
ブドウ	≧10,000	≧1,000	≧2,000	≧3,000	15-20	11
メロン	30,000-40,000	2,000-3,000	3,000-4,000	8,000-9,000	15-20	6
モモ	≧60,000	≧4,000	≧8,000	≧6,000	15-20	2
カキ	30,000-40,000	1,000-2,000	5,000-6,000	9,000-10,000	15-25	2
ナシ	≧50,000	≧3,000	≧9,000	≧5,000	15-20	1
ブルーベ リー	≧20,000	≧4,000	≧2,000	≧4,000	15-20	1
(参考)						
水田	≧20,000	1,000-1,500	—	—	—	—
畑	≧25,000	≧1,500	—	—	15-25	—

^{*} 樹園地の作物の内訳は、リンゴ (n=66)、茶 (n=33)、銀杏 (n=19)、ブドウ (n=11)、メロン (n=6)、モモ (n=2)、カキ (n=2)、ナシ (n=1) およびブルーベリー (n=1) である。

4節 考察

本章では、リンゴと同様に多年生の木本作物である樹園地を基礎研究し、樹園地の中でも、とくにリンゴ、茶、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシおよびブルーベリーを研究対象とした。141 サンプルの樹園地の土壌に対して、化学的分析と生物的分析を行った。化学的分析は、TC、TN、TP、TK、C/N 比および pH などである。また、生物的分析は、土壌の物質循環と微生物の活性を含めた土壌の状態を調べるために、土壌の物質循環に寄与する生物活性に着目した土壌肥沃度診断指標 SOFIX (soil fertile index) によって分析した。

TC はリンゴ圃場で最も大きく、銀杏、ナシの順であり、TN はブルーベリー、銀杏、リンゴの順であった。TP は銀杏、ナシ、カキの順であり、TK はカキ、銀杏、メロンの順であった。リンゴ圃場と銀杏の土壌は、栄養分が豊富であることがわかった。リンゴ圃場と銀杏の土壌は、茶園の土壌と比較して、落ち葉、小枝、樹皮および摘果された有機物が、樹木に落下し集積され、土壌中に栄養分が蓄積されていることが示唆された。

リンゴ圃場と銀杏土壌の pH は、それぞれ中性であった。それに対して、茶園の土壌は、pH 4.3 で酸性であった。茶園では、芽だし期と夏の施肥に、茶樹の生長促進のために硫酸などの化学肥料が使用される。これらにより、茶栽培は化学肥料の多施肥により、収穫量の向上や労働時間の削減などといった土地生産性や労働生産性を著しく高めた。しかし、主に丘陵地で栽培される茶園は、化学肥料の多施肥が進むにつれて、土壌が酸性傾向となり、土壌中に蓄積され、硝酸態窒素などが下流域の斜面等から流出し、土壌汚染を引き起こしたり、地下水を汚染させる問題が生じる傾向があると考えた。茶園の総細菌数 2.2×10^8 cells/g は、樹園地の他の作物と比較すると著しく少なかったことや、アンモニア酸化活性、窒素循環活性評価値が小さいことから、茶園の土壌中では、土壌微生物の栄養分となる有機物が少なく、化学肥料の多施肥と連用により、総細菌数が減少したと考えた。これらのことから、茶園では、窒素循環が機能していないことが示唆された。そのため、茶園の最適な土壌環境を示すことは、大変重要である。

土壌の SOFIX 分析結果から、樹園地全般、リンゴ圃場、茶園、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシおよびブルーベリーのそれぞれの最適な土壌条件を明らかにした。樹園地全般とリンゴ圃場の最適な土壌条件は、TC が 50,000-60,000 mg/kg、TN が 3,000-4,000 mg/kg、TP が 5,000-6,000 mg/kg、TK が 6,000-7,000 mg/kg、C/N 比が 15-20 であることがわかった。茶園の最適な土壌条件は、TC \geq 20,000 mg/kg、TN \geq 1,500 mg/kg、TP \geq 1,000 mg/kg、TK \geq 3,000 mg/kg、C/N 比 15-20 であった。また、銀杏の最適な土壌条件は、TC \geq 60,000 mg/kg、TN \geq 5,000 mg/kg であった。サンプル数が少ないが、ブドウの最適な土壌条件は、TC \geq 10,000 mg/kg、TN \geq 1,000 mg/kg、TP \geq 2,000 mg/kg、TK \geq 3,000 mg/kg、C/N 比：15-20 と判断した。メロンの最適な土壌条件は、TC：30,000-40,000 mg/kg、TN：2,000-3,000 mg/kg、TP：3,000-4,000 mg/kg、TK：8,000-9,000 mg/kg、C/N 比：15-20 と判断した。モモの最適な土壌条件は、TC \geq 60,000 mg/kg、TN \geq 4,000 mg/kg、TP \geq 8,000 mg/kg、TK \geq 6,000 mg/kg、C/N 比：15-20 と判断した。

カキの最適な土壤条件は、TC : 30,000-40,000 mg/kg、TN : 1,000-2,000 mg/kg、TP : 5,000-6,000 mg/kg、TK : 9,000-10,000 mg/kg、C/N 比 : 15-25 と判断した。ナシの最適な土壤条件は、TC \geq 50,000 mg/kg、TN \geq 3,000 mg/kg、TP \geq 9,000 mg/kg、TK \geq 5,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。ブルーベリーについては、サンプル数が 1 と少なく、窒素循環活性評価値は 0.0 と低かった。土壤中の活発な窒素循環が行われるように、最適な土壤条件を求めた。ブルーベリーの最適な土壤条件は、TC \geq 20,000 mg/kg、TN \geq 4,000 mg/kg、TP \geq 2,000 mg/kg、TK \geq 4,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。今後、樹園地の各作物については、サンプル数を増やして、最適な土壤条件の精度を上げていくこととしたい。

樹園地の土壤環境因子（土壤中の総細菌数、物質循環活性）は、樹種により様々な土壤環境をつくっている。それぞれの樹園地の作物が高水準で維持されるように土壤環境の最適条件を確立した。これにより、先行研究である水田と畑地の最適な土壤条件の確立に続き、樹園地における土壤環境の改善システムである最適な土壤条件のデータベースを構築することができた。

5節 要約

1. 樹園地において、生物指標を基盤とした物質循環活性の解析を行い、樹園地の最適な土壤条件は、TC : 50,000-60,000 mg/kg、TN : 3,000-4,000 mg/kg、TP : 5,000-6,000 mg/kg、TK : 6,000-7,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 であることがわかった。
2. 樹園地の作物別では、リンゴ圃場が TC : 50,000-60,000 mg/kg、TN : 3,000-4,000 mg/kg、TP : 5,000-6,000 mg/kg、TK : 6,000-7,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 であることがわかった。また、茶園が TC \geq 20,000 mg/kg、TN \geq 1,500 mg/kg、TP \geq 1,000 mg/kg、TK \geq 3,000 mg/kg、C/N 比 15-20 であることがわかった。さらに、銀杏が TC \geq 60,000 mg/kg、TN \geq 5,000 mg/kg、C/N 比 10-20 であることがわかった。
3. ブドウの最適な土壤条件は、TC \geq 10,000 mg/kg、TN \geq 1,000 mg/kg、TP \geq 2,000 mg/kg、TK \geq 3,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。メロンの最適な土壤条件は、TC : 30,000-40,000 mg/kg、TN : 2,000-3,000 mg/kg、TP : 3,000-4,000 mg/kg、TK : 8,000-9,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。モモの最適な土壤条件は、TC \geq 60,000 mg/kg、TN \geq 4,000 mg/kg、TP \geq 8,000 mg/kg、TK \geq 6,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。カキの最適な土壤条件は、TC : 30,000-40,000 mg/kg、TN : 1,000-2,000 mg/kg、TP : 5,000-6,000 mg/kg、TK : 9,000-10,000 mg/kg、C/N 比 : 15-25 と判断した。ナシの最適な土壤条件は、TC \geq 50,000 mg/kg、TN \geq 3,000 mg/kg、TP \geq 9,000 mg/kg、TK \geq 5,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。ブルーベリーの最適な土壤条件は、TC \geq 20,000 mg/kg、TN \geq 4,000 mg/kg、TP \geq 2,000 mg/kg、TK \geq 4,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。
4. 樹園地の土壤環境因子（土壤中の総細菌数、物質循環活性）が高水準で維持されるように土壤環境の最適条件を確立したこと。これにより、先行研究で確立された水田と畑地に続き、樹園地における土壤環境の改善システムであるデータベースを構築した。

Appendix VI

樹園地全般と化学的特性の関係

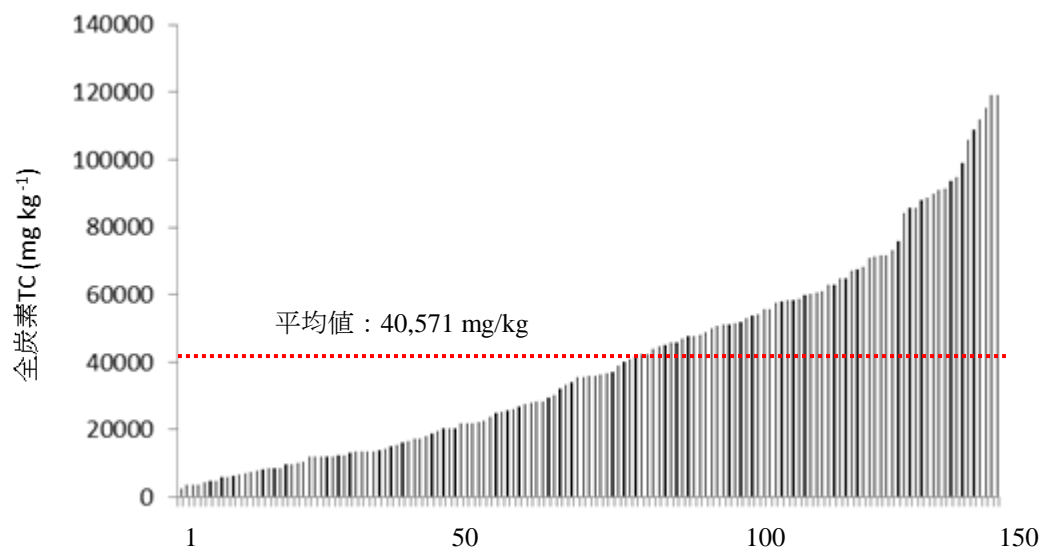


Figure VI-1 樹園地の全炭素 TC (サンプル数=141)

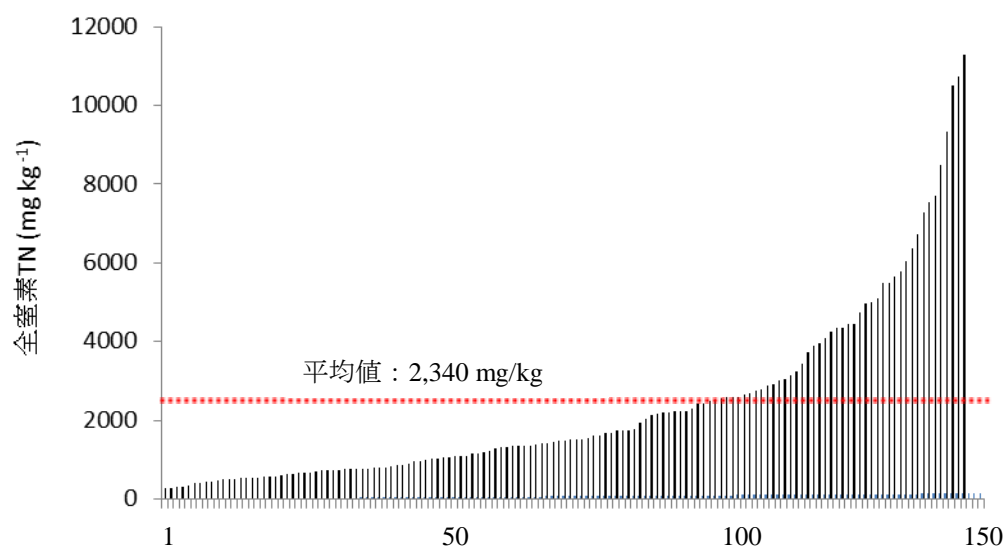


Figure VI-2 樹園地の全炭素 TN (サンプル数=141)

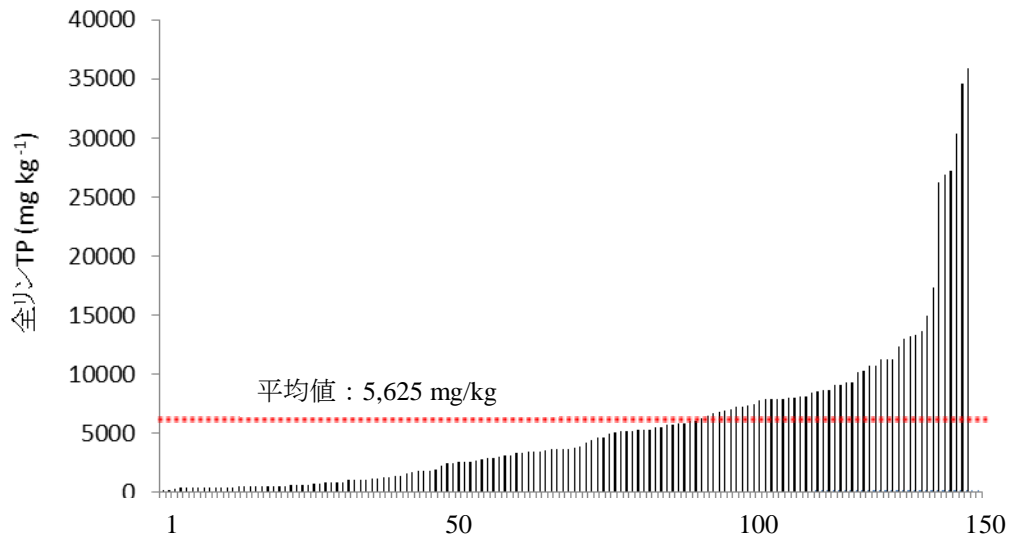


Figure VI-3 樹園地の全リン TP (サンプル数=141)

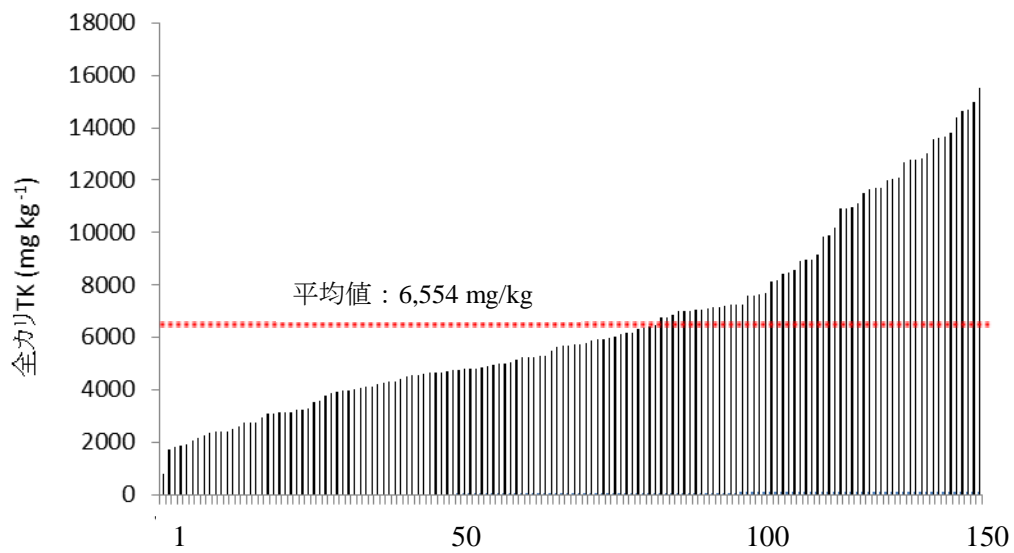


Figure VI-4 樹園地の全カリ TK (サンプル数=141)

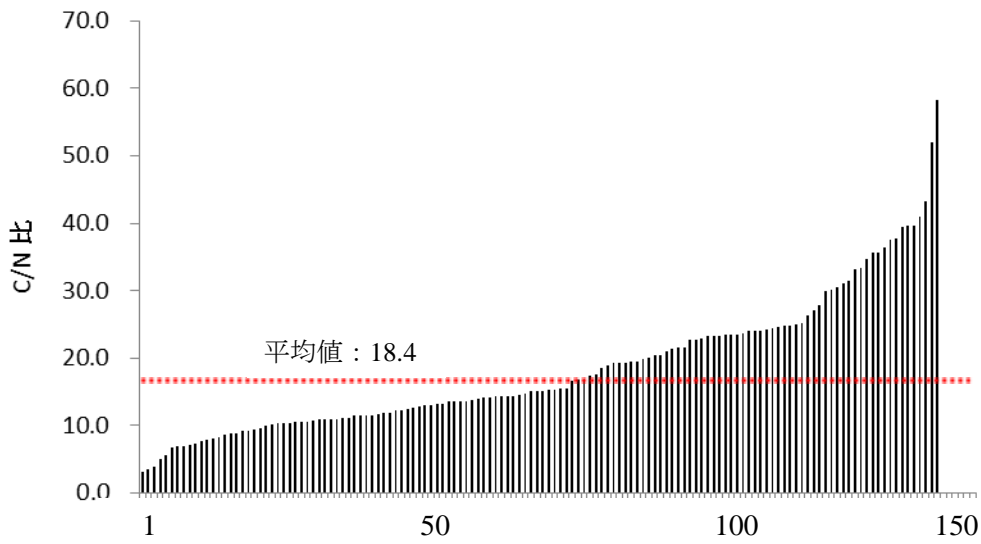


Figure VI-5 樹園地の C/N 比 (サンプル数=141)

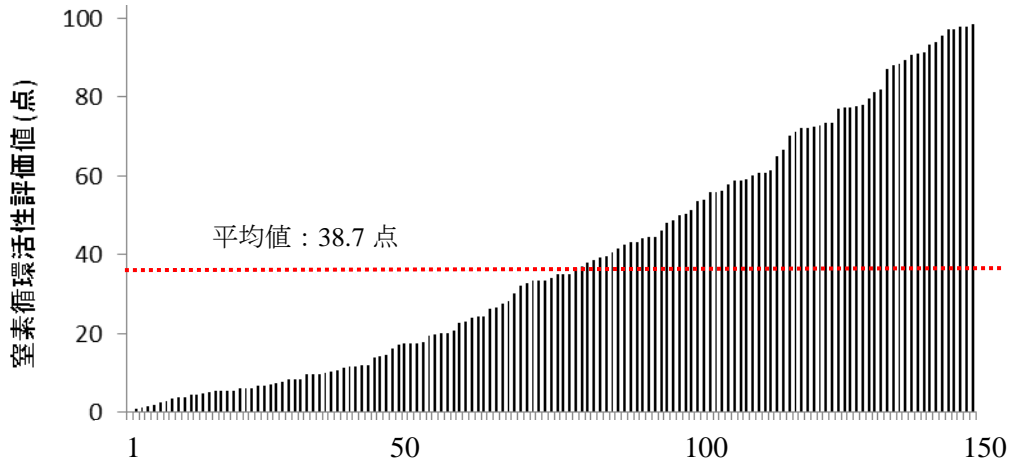


Figure VI-6 樹園地の窒素循環活性評価値 (サンプル数=141)

Appendix VII

リンゴ圃場と化学的特性の関係

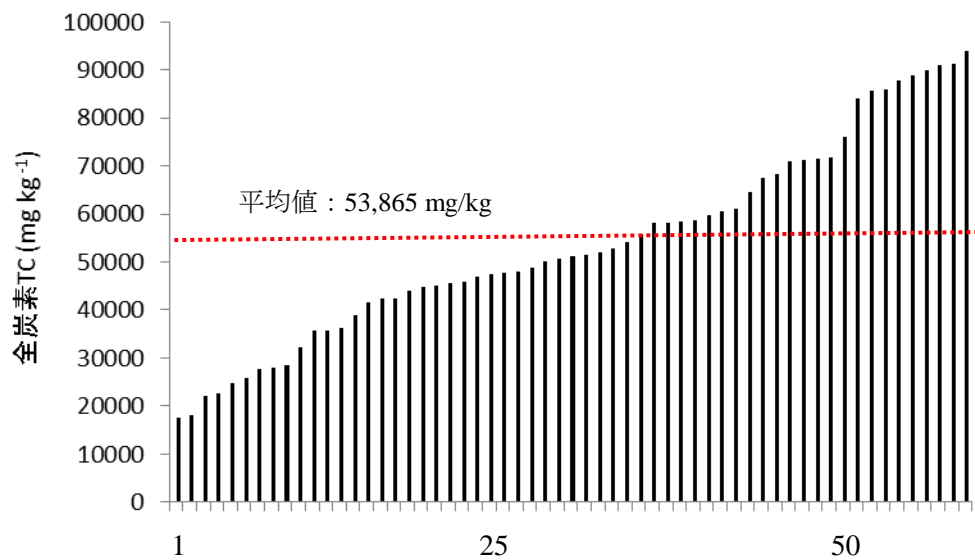


Figure VII-1 リンゴ圃場の全炭素 TC (サンプル数=66)

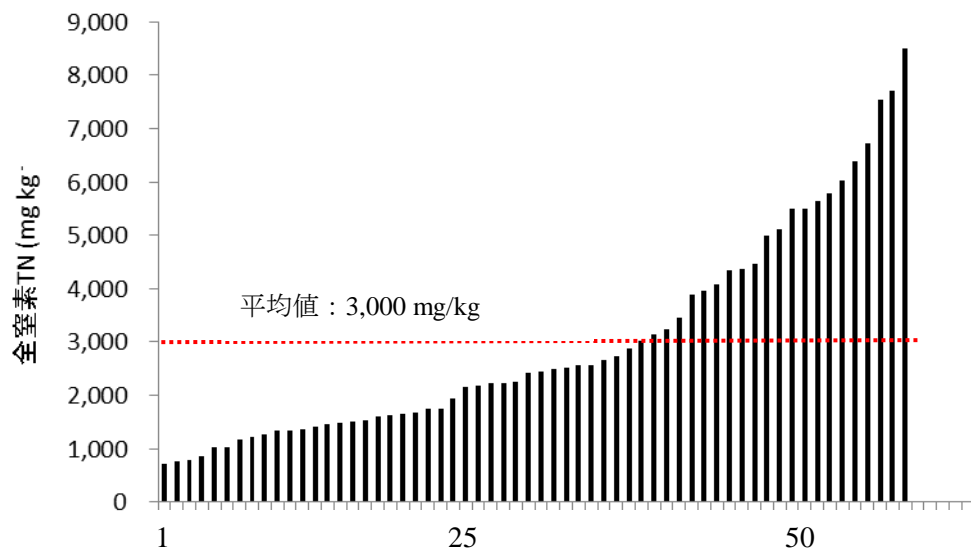


Figure VII-2 リンゴ圃場の全窒素 TN (サンプル数=66)

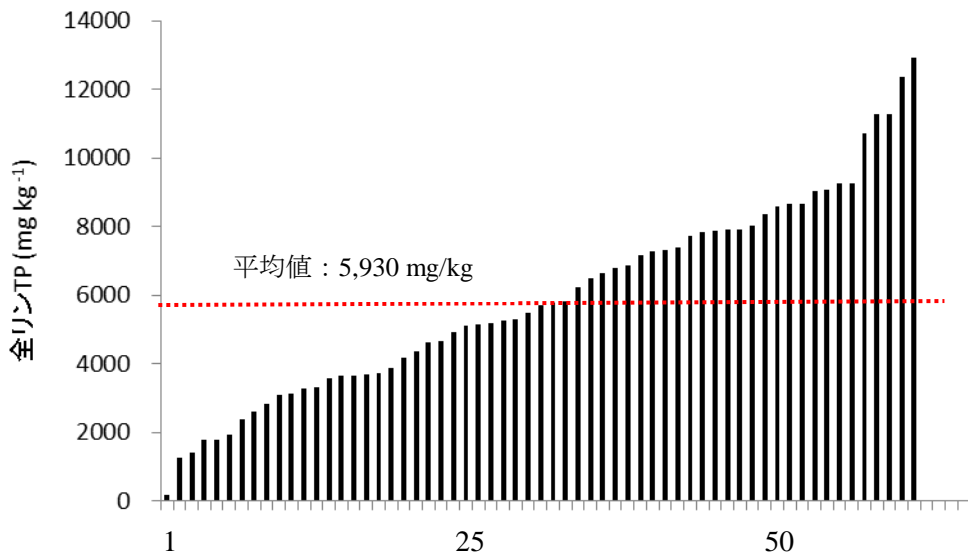


Figure VII-3 リンゴ圃場の全リン TP (サンプル数=66)

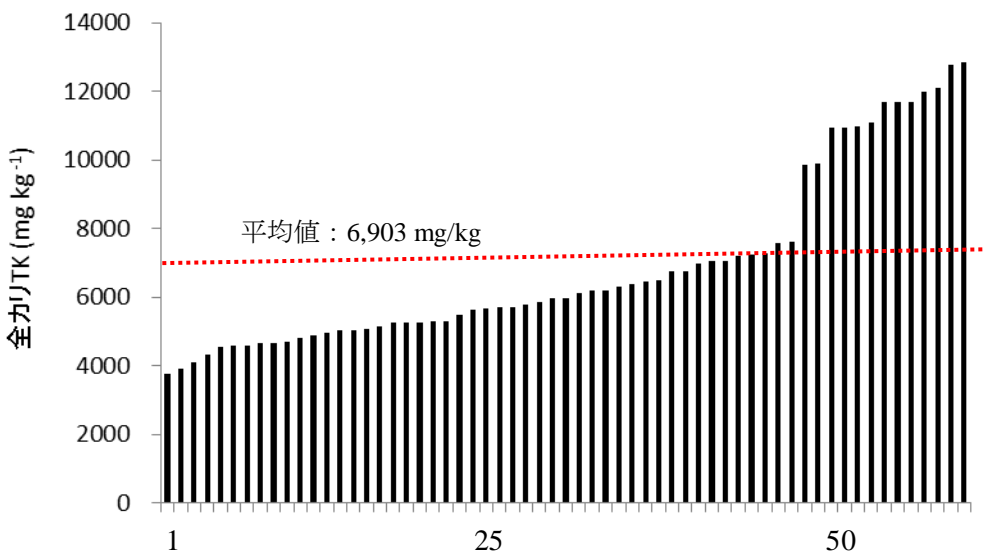


Figure VII-4 リンゴ圃場の全カリ TK (サンプル数=66)

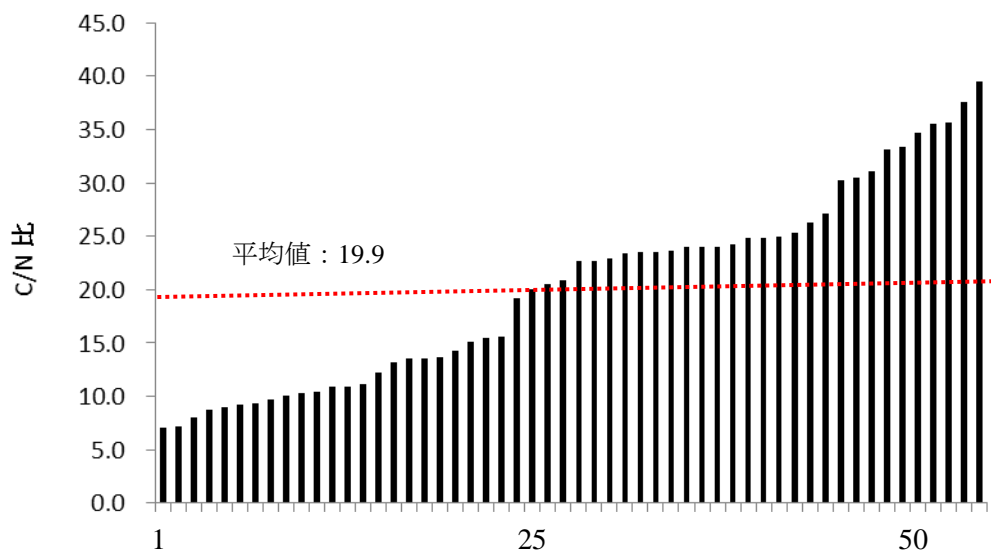


Figure VII-5 リンゴ圃場の C/N 比 (サンプル数=66)

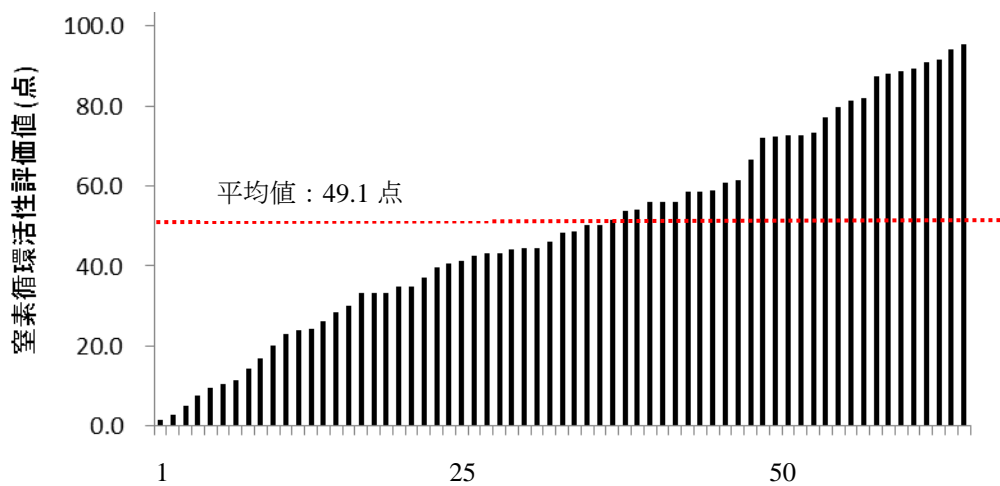


Figure VII-6 リンゴ圃場の窒素循環活性評価値 (サンプル数=66)

Appendix VIII

茶園と化学的特性の関係

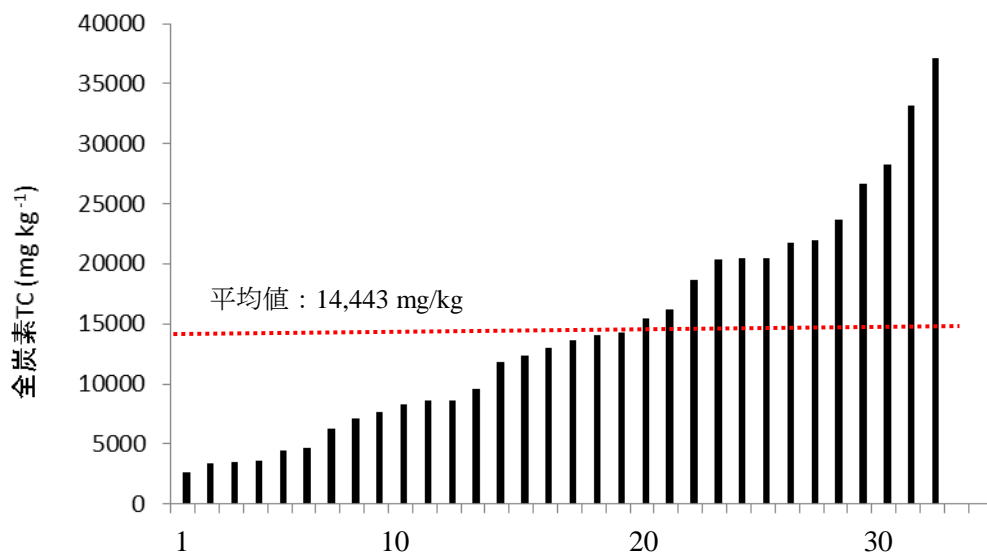


Figure VIII-1 茶園の全炭素 TC (サンプル数=33)

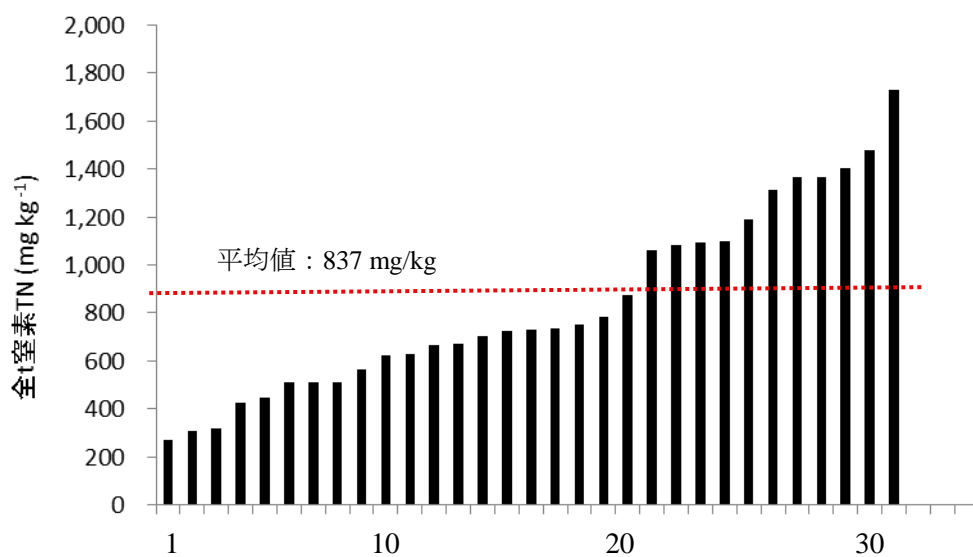


Figure VIII-2 茶園の全窒素 TN (サンプル数=33)

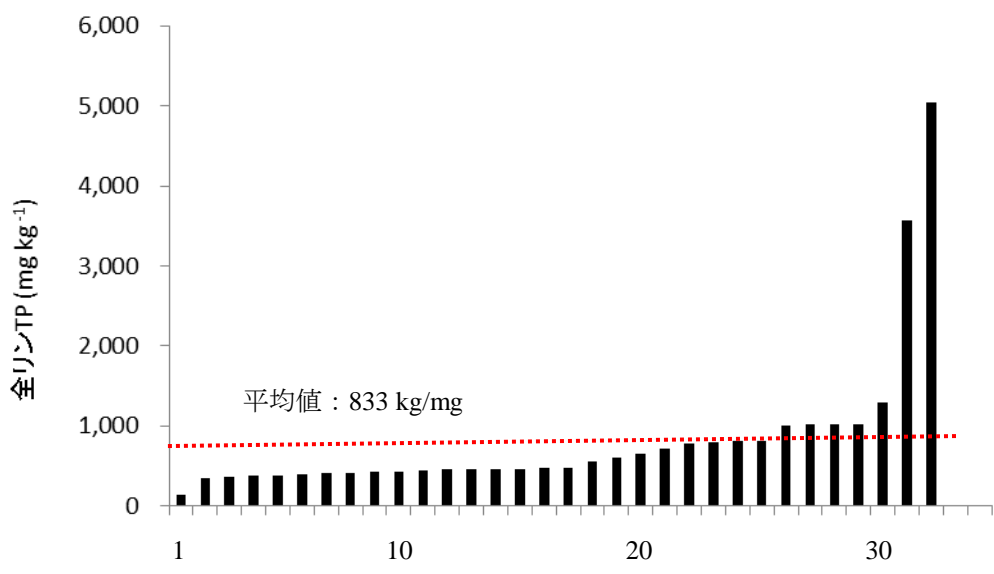


Figure VIII-3 茶園の全リン TP (サンプル数=33)

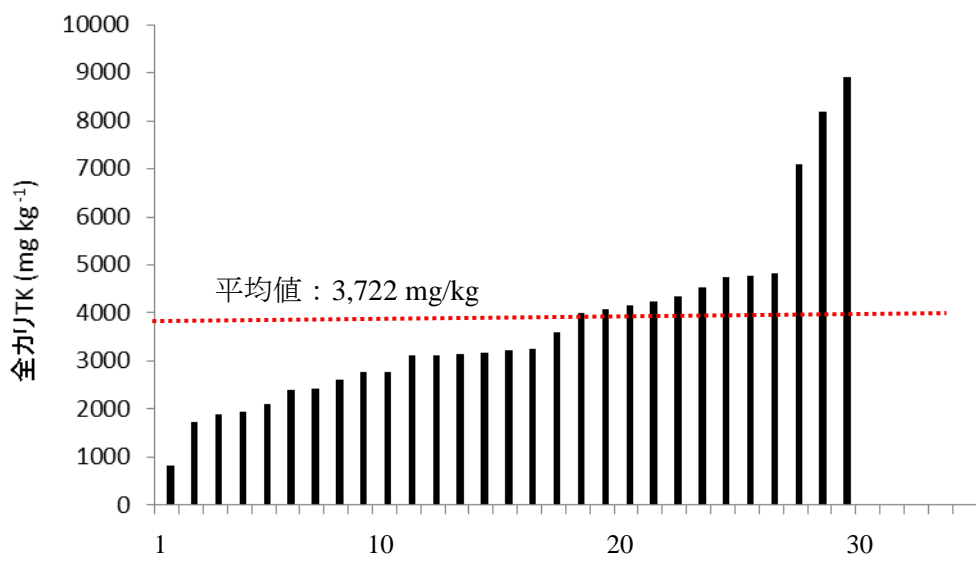


Figure VIII-4 茶園の全カリ TK (サンプル数=33)

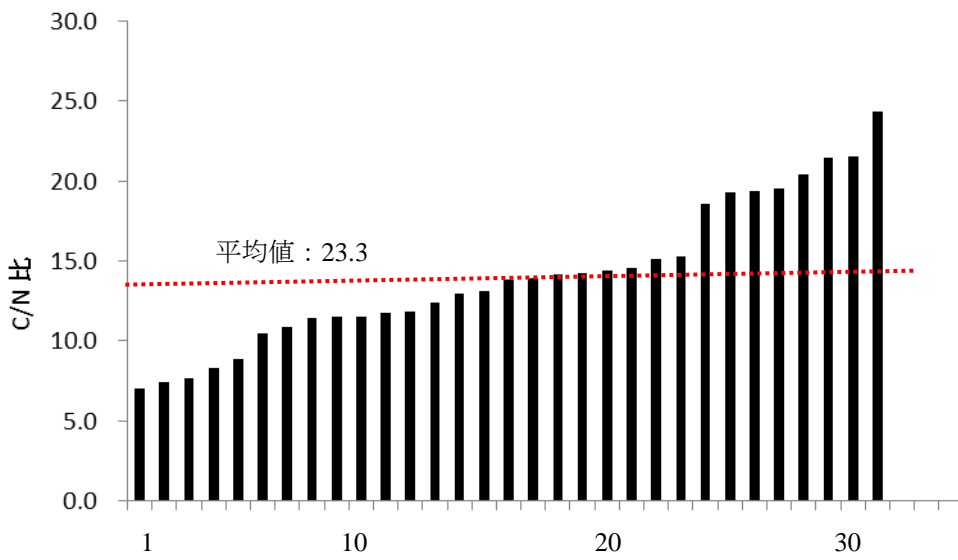


Figure VIII-5 茶園の C/N 比 (サンプル数=33)

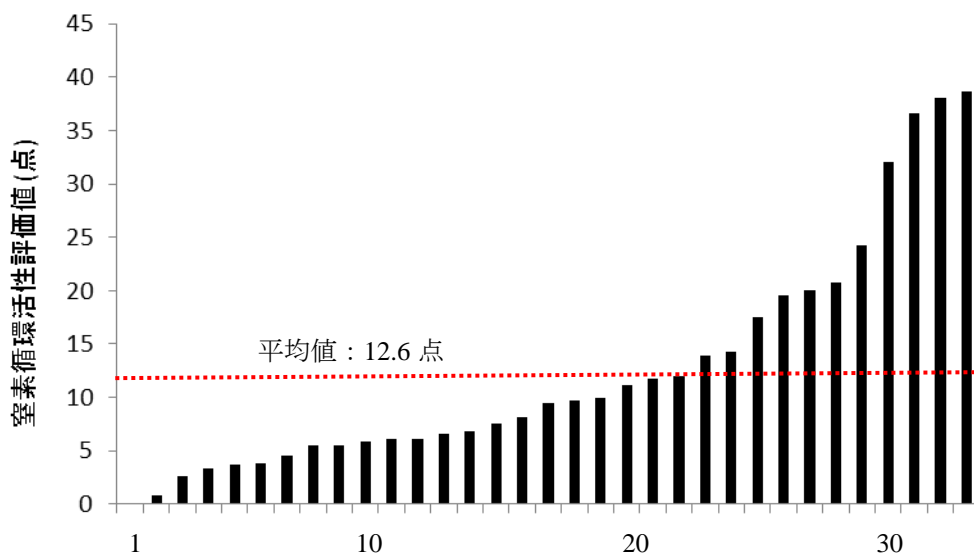


Figure VIII-6 茶園の C/N 比 (サンプル数=33)

Appendix IX

銀杏と化学的特性の関係

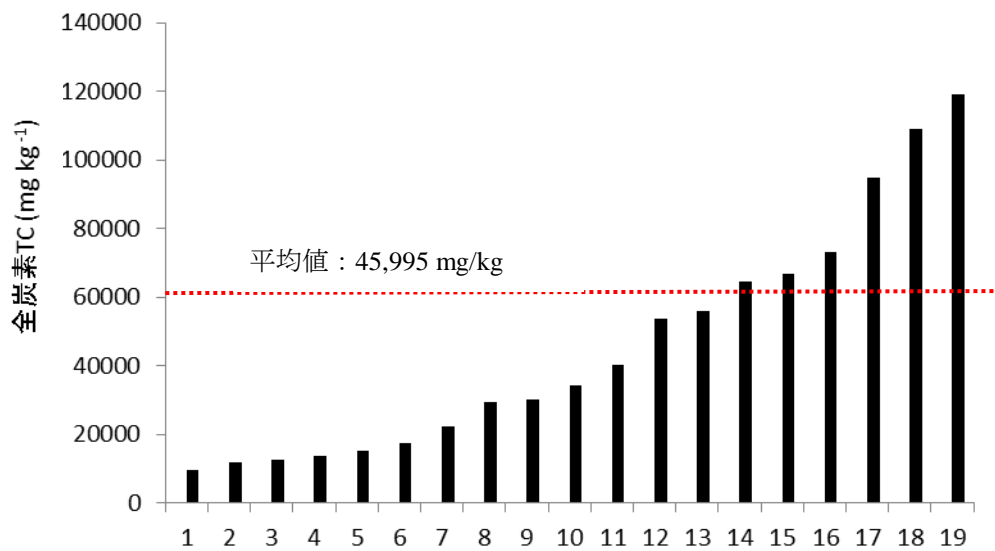


Figure IX-1 銀杏の全炭素 TC (サンプル数=19)

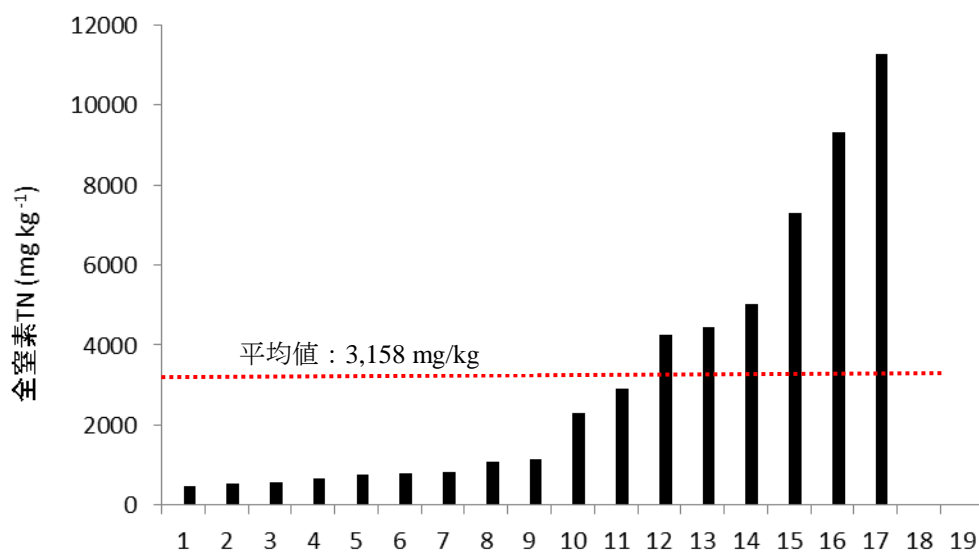


Figure IX-2 銀杏の全窒素 TN (サンプル数=17)

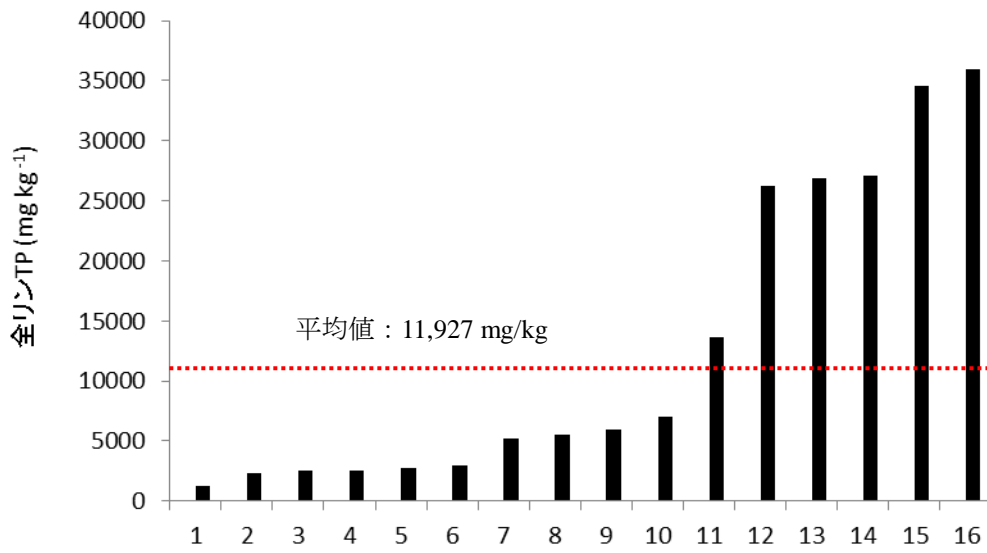


Figure IX-3 銀杏の全リン TP (サンプル数=16)

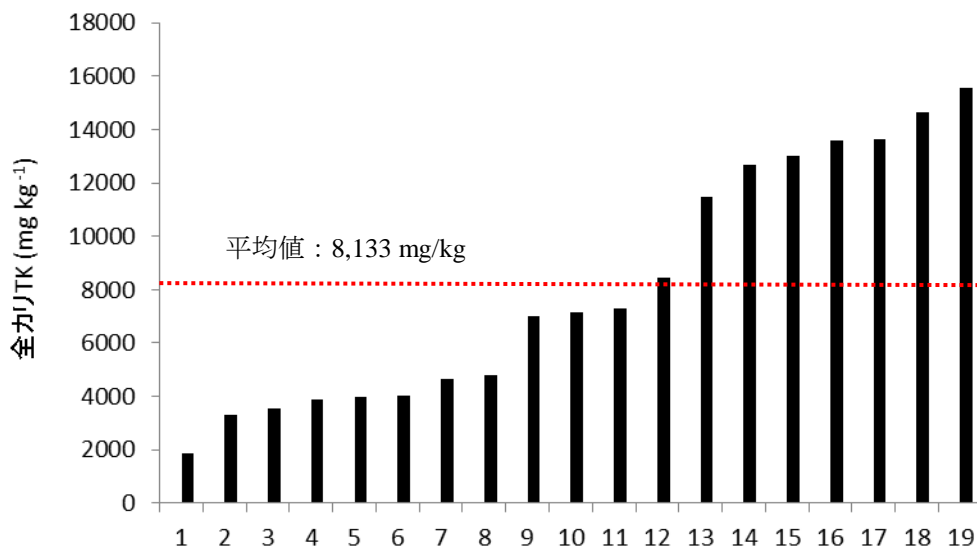


Figure IX-4 銀杏の全カリ TK (サンプル数=19)

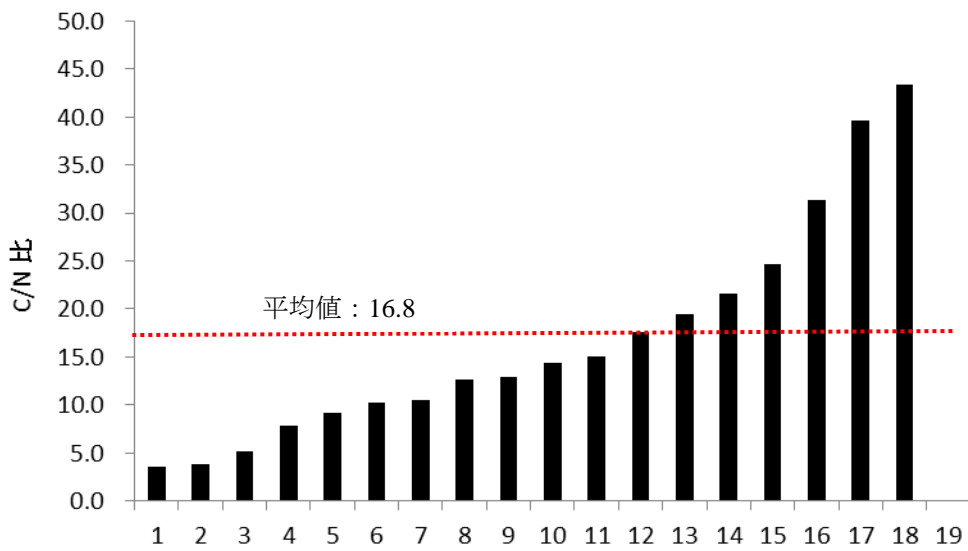


Figure IX-5 銀杏の C/N 比 (サンプル数=18)

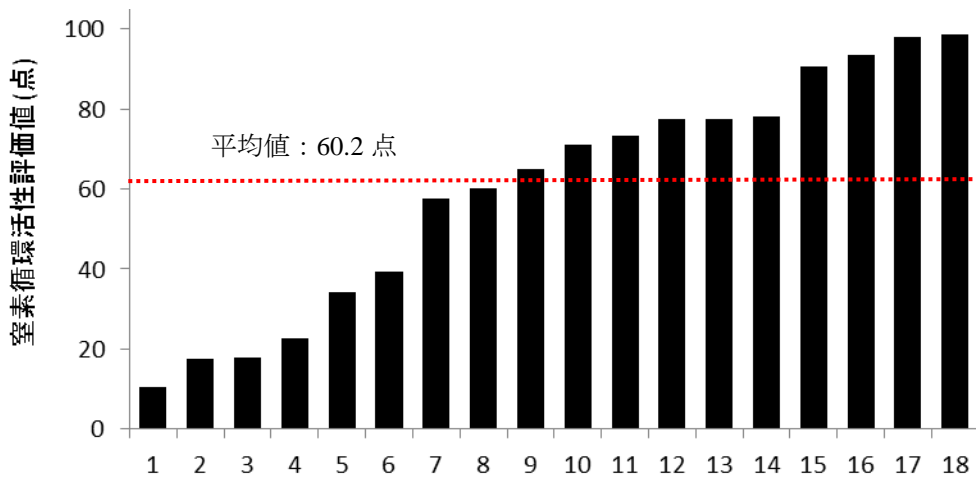


Figure IX-6 銀杏の窒素循環活性評価値 (サンプル数=18)

総括と展望

近年、生産者や消費者は、食の安定的な確保、食の安全安心の指向、化学肥料や農薬を使用した化学農法に問題を提起し始めた。そのため、農業の持続的な発展、農産物の高品質・高収穫量を実現する安全で安心な食料生産システムの構築、さらには人と自然との共生や自然生態系保全などの計画的な整備・管理といった国土資源と自然環境の保全は重要である。

本研究では、安定的な収穫量の維持のために、化学肥料への依存度が高いのが現状であり、有機的な栽培手法が確立されていない果樹を研究対象とした。長野県の特産品であるリンゴ栽培をモデルとして土壌環境の解析と収穫量に関する基盤研究を実施した。

第1章では、長野県の同地域、同種類（ふじ）、さらには同一農法にも関わらず、3,000 kg/10a と 2,000 kg/10a の収穫量の違いがしばしば認められたため、リンゴ生産量を改善する目的として収穫量の異なる2つの果樹園について、土壌の物理性、化学性および生物性について分析した。リンゴ栽培圃場の生物的解析には、土壌の物質循環と土壌微生物の活性を含めた土壌環境を調査するため、土壌の物質循環に寄与する生物活性に着目した土壌肥沃度診断指標 SOFIX (soil fertile index) 技術によって分析した。調査の結果、土壌の物理性については、ほとんど変わりがなかった。SOFIX 技術によって、土壌環境とリンゴ収穫量との相互関係について解析したところ、TC、TN および TP は、収穫量が多い圃場より収穫量が少ない圃場の方が約2倍高かった。そのため、リンゴ生産量の増加には、リンゴ圃場への化学肥料の投入を少なくすることと、落ち葉や枝、樹皮が地表に落ちてくるため、管理することが必要であることを明らかにした。

第2章では、リンゴ栽培は有機的な栽培手法が確立していないことから、化学肥料を使用せず、自然環境に配慮した有機肥料栽培に着目した。また、調査作物は長野県の同品種（ふじ）とし、有機的に最適なリンゴ圃場の土壌条件を決定するために、有機肥料および化学肥料により栽培したリンゴ圃場の土壌肥沃度を比較した。TP と TK については、有機肥料栽培と化学肥料栽培の圃場で同様な値を示したが、TC と TN については、有機肥料栽培のリンゴ圃場が化学肥料栽培のリンゴ圃場よりも高かった。また、総細菌数については、有機肥料栽培と化学肥料栽培の圃場で同様な値を示したが、窒素循環活性については、4月から12月にかけて有機肥料栽培の圃場が明らかに高かった。有機肥料栽培でも化学肥料栽培と同程度の収穫量が確保できることを明らかにした。そのため、リンゴ収穫量は、土壌微生物に適した条件を維持することにより、土壌環境を改善することができることを示唆した。リンゴ圃場の有機的な土壌の適切な条件は、TC : 50,000~60,000 mg/kg、TN : 約 3,000 mg/kg、C/N 比 : 15~20、TP : 5,000~6,000 mg/kg、および TK : 6,000~7,000 mg/kg であることを明らかにした。

第3章では、リンゴと同様に永年生の木本作物である樹園地を基礎研究し、樹園地の中でも、とくにリンゴ、茶、銀杏、ブドウ、メロン、モモ、カキ、ナシおよびブルーベリーを研究対象とした。樹園地の土壌環境を改善する目的として、土壌の化学的・生物的分析を行った。土壌の化学的、生物的解析には、微生物活性に着目した土壌肥沃度診断指標 SOFIX によ

って分析した。TC、TN、TP、TK、C/N 比および窒素循環活性値の分析結果から樹園地土壌の最適条件を検討した。

樹園地全般の最適な土壌条件は、TC : 50,000-60,000 mg/kg、TN : 3,000-4,000 mg/kg、TP : 5,000-6,000 mg/kg、TK : 6,000-7,000 mg/kg および C/N 比 : 15-20 であることがわかった。

茶園については、窒素循環活性評価値の高い値が 38.6 であることから、土壌中の窒素循環が活発に行われているとはいいがたいが、窒素循環活性評価値 38.6 を向上させるためには、TC \geq 20,000 mg/kg、TN \geq 1,500 mg/kg、TP \geq 1,000 mg/kg、TK \geq 3,000 mg/kg、C/N 比 15-20 が必要と判断し、茶の最適な土壌条件とした。銀杏については、サンプル数が 19 と少ないが、窒素循環活性評価値 98.7 の土壌中の活発な窒素循環が行われている試料を含んでいたため解析をした。銀杏の最適な土壌条件は、TC \geq 60,000 mg/kg、TN \geq 5,000 mg/kg と判断した。ブドウについては、サンプル数が 11 と少なく、窒素循環活性評価値は 26.5 と低かった。そのため、土壌中の活発な窒素循環が行われるように、有機栽培に望ましい土壌成分の量とバランスを考え、最適な土壌条件を求めた。ブドウの最適な土壌条件は、TC \geq 10,000 mg/kg、TN \geq 1,000 mg/kg、TP \geq 2,000 mg/kg、TK \geq 3,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。メロンについては、サンプル数が 6 と少ないが、窒素循環活性評価値 97.3 は土壌中の活発な窒素循環が行われているため解析をした。メロンの最適な土壌条件は、TC : 30,000-40,000 mg/kg、TN : 2,000-3,000 mg/kg、TP : 3,000-4,000 mg/kg、TK : 8,000-9,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。桃については、サンプル数が 2 と少なく、窒素循環活性評価値は 27.4 と低かった。そのため、土壌中の活発な窒素循環が行われるように、有機栽培に望ましい土壌成分の量とバランスを考え、最適な土壌条件を求めた。モモの最適な土壌条件は、TC \geq 60,000 mg/kg、TN \geq 4,000 mg/kg、TP \geq 8,000 mg/kg、TK \geq 6,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。柿については、サンプル数が 2 と少ないが、窒素循環活性評価値は 60.7 と高かった。土壌中の活発な窒素循環が行われていることから解析をした。カキの最適な土壌条件は、TC : 30,000-40,000 mg/kg、TN : 1,000-2,000 mg/kg、TP : 5,000-6,000 mg/kg、TK : 9,000-10,000 mg/kg、C/N 比 : 15-25 と判断した。梨については、サンプル数が 1 と少なく、窒素循環活性評価値は 32.9 と低かった。そのため、土壌中の活発な窒素循環が行われるように、有機栽培に望ましい土壌成分の量とバランスを考え、最適な土壌条件を求めた。ナシの最適な土壌条件は、TC \geq 50,000 mg/kg、TN \geq 3,000 mg/kg、TP \geq 9,000 mg/kg、TK \geq 5,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。ブルーベリーについては、サンプル数が 1 と少なく、窒素循環活性評価値は 0.0 と低かった。土壌中の活発な窒素循環が行われるように、最適な土壌条件を求めた。ブルーベリーの最適な土壌条件は、TC \geq 20,000 mg/kg、TN \geq 4,000 mg/kg、TP \geq 2,000 mg/kg、TK \geq 4,000 mg/kg、C/N 比 : 15-20 と判断した。

樹園地の土壌環境因子（土壌中の総細菌数、物質循環活性）は種々によって土壌条件に違いがみられた。それぞれの種々が高水準で維持されるように土壌環境の最適条件を確立した。これにより、先行研究で確立された水田と畑地に続き、樹園地における土壌環境の改善システムであるデータベースを構築した。さらに、樹園地の最適な土壌環境条件の精度向上をさ

せたい。

2016年現在の世界人口は約73億人であり、2050年までには約97億人になり、2100年までには100億人を越すだろうといわれている（総務省2016）。世界的な食料増産に伴う肥料の需要増大は、今後も維持されると考えられる。また、1970年代頃から豊富な天然資源を保有する開発途上国において、自国の発展のために、自国に存在する資源を管理・開発しようとする資源ナショナリズムの動きによって、肥料原料の安定的な確保が年々困難になってきている。今後も肥料価格は、高水準で推移するものと考えられており、継続的な対策が必要とされている。

日本の土壌に目を向けると、リン酸が欠乏した黒ボク土、泥炭土壌、塩類土壌、酸性硫酸塩土壌などの問題土壌があり、作物生育に適した土壌環境が整っていない。また、我が国の年間降水量は1,600mm～1,800mmと多いため、肥料が流出しやすい傾向にある。とくに、長野県のように丘陵地での栽培は、下流域に肥料の流出が考えられる。また、土壌が酸性あるいはアルカリ性に偏りすぎると、土壌中の肥料成分の溶解性や可給性が変わり、作物に肥料成分による過剰障害や欠乏障害が生じることが考えられる。さらに、降雨や降雪の影響により、溶質の流失や過剰水が圃場内に滞水することによる肥料の蓄積が考えられる。日本の農業は、化学肥料や農薬の使用を中心としているなかで、農地土壌において化学肥料や農薬等の物質の移動が引き起こす地下水汚染といった地域環境が問題となっている。自然の循環系に生産力の基礎をおくという農業の特性を踏まえると、良好な農村環境の保全・創出の前提、すなわち農地土壌の健全な循環系の再構築を進めることが重要である。

平成25年（2013年）に、日本の伝統的な食文化である「和食」がユネスコ無形文化遺産登録に決定され、国際的な注目を集めた。中央政府は、平成25年（2013年）に日本の農業と地域の活力を創造する「農林水産業・地域の活力創造プラン」を策定した（農林水産省2014）。そこでは、農作物の輸出拡大や、生産・加工・流通を一手に担う農業を第六次産業としての強化、農業経営の安定化および農業所得の倍増を目指し、農業従事者や農業の新規参加者が希望を持つことができる農業農村の環境整備の必要性を述べている。そのためにも、日本の農業農村の活性化を図っていくことは、緊喫な課題となっている。そのため、堆厩肥、緑肥等の有機質肥料を土壌に投入による土づくりに注目し、土壌微生物を中心とした土壌生態系の保全と健全な食料生産を目指す有機農法に注目した。土壌中の微生物は、落ち葉、枯れ枝や樹皮、小動物の排泄物や死がいなどの有機物を餌とし、作物の栄養分となる無機物に分解して生きている。また、有機物を施すと多様な機能をもつ微生物群を増やし、単一の菌群、病原菌の一時的な増大を生態的に防ぐ。植物は微生物が代謝によってもたらされた無機物を吸収することで成長し、光合成によって栄養分である有機物を合成する。土壌微生物は、このような生態系の物質循環の中心を担っている。

そこで本研究では、土壌の物理性、化学性および生物性について分析した。リンゴ栽培圃場の生物的解析には、土壌微生物に着目し、土壌の物質循環と微生物の活性を含めた土壌の状態を調べるために、土壌肥沃度診断指標SOFIX（soil fertile index）で検証した。また、肥料

の三大要素である窒素、リン酸、カリウムの循環系における律速物質を把握した。これらから総細菌数と窒素循環活性を判断し、土壤環境を明らかにする判定指標とした。圃場の土壤環境因子（土壤中の総細菌数、物質循環活性および排水性）から、リンゴ生産に及ぼす最適な土壤条件を明らかにした。最終的に土壤中の物質循環に着目した果樹（リンゴ）栽培システムの構築を行った。具体的には、圃場の土壤改善を実施するために必要な土壤環境因子および測定方法を明確にした。土壤改善のための堆肥および有機質資材の施用量・方法・時期を明確にし、自然循環系に適合した果樹栽培システムを構築した。

化学性を中心とした土壤診断では、各種肥料を施用する際の判断基準に用いられ、土壤改良や施肥の改善、作物の増収のために必要な肥料成分の不足量を発見し、大きな成果を上げてきた。しかし、現在では、以前とは逆に養分過剰な土壤が多く見られるようになった。その有効な対策のひとつが土壤肥沃度診断指標 SOFIX (soil fertile index) である。土壤肥沃度では分析、診断、対策という一連の流れを繰り返し、土壤分析の結果、土壤中の肥料成分が基準よりも多い場合には、その成分を控え施肥量を調整することで健康な土壤環境に近づけることができ、また不必要な経費の支出を抑えることができる。一方、不足している成分がある場合には、その成分を適切に補給することで安全安心な農産物の収穫量を安定させ、品質の向上を図ることができる。化学肥料由来の成分量を減らすことで、環境に配慮した持続的な農業の実践が可能と考えられる。現在、必要な養分だけを補う適正施肥は、コスト抑制と環境保全という点からも重要である。

現在のリンゴ栽培は化学肥料栽培が中心であるが、リンゴ栽培の有機肥料による最適な土壤条件の確立により、土壤微生物の力による環境循環型の有機肥料栽培が可能と考える。このことにより、長野県ひいては日本のリンゴ栽培の収穫量増加と品質向上に貢献できるのではないかと考える。また、化学肥料や農薬を使用しない土壤微生物の力を活用した有機肥料栽培による安全安心な食材が消費者の手に届くことや、新規農業生産者の参入、環境保全型農業、食品表示、農作物のブランドで確立した知名度を生かした販売力を強化することで、現在の日本の食料自給率を約 39%から 100%以上へ日本の農業を変えることができるのではないかと考える次第である。

参考文献

1. **Aber, J.D., Nadelhoffer, K.J., Steudler, P., Melillo, J.M., (1989)** Nitrogen saturation in northern forest ecosystems, *Bioscience*, **39**, 378–286.
2. **Adair, K.L., Schwartz, E. (2008)** Evidence that ammonia-oxidizing archaea are more abundant than ammonia-oxidizing bacteria in semiarid soils of northern Arizona, USA. *Microbial Ecology*, **56**, 420–426.
3. **Adhikari D., Kai T., Mukai M., Araki K.S. and Kubo M. (2014)** Proposal for a new soil fertility index (SOFIX) for organic agriculture and construction of a SOFIX database for agricultural fields, *Current Topics in Biotechnology*, **8**, 81–91.
4. **Aggelopoulou, K.D., Wulfsohn, D., Fountas, S., Gemtos, T.A., Nanos, G.D., and Blackmore, S. (2010)** Spatial variation in Yield and Quality in a Small Apple Orchard, *Precision Agriculture*, **11**, 538–556.
5. **Agricultural Policy and Planning Department of Nagano Prefecture (2014)** Pesticide Use Criteria in Apple.
6. **Altieri, M.A., Nicholls, C.I. (2003)** Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems, *Soil and Tillage Research*, **72**, 203–211.
7. **Aoshima, H., Kimura, A., Shibutani, A., Okada, C., Matsumiya, Y. and Kubo, M. (2006)** Evaluation of Soil Bacterial Biomass Using Environmental DNA Extracted by Slow-Stirring Method, *Applied Microbiology and Biotechnology*, **71**, 875–880.
8. **Archer, N.A.L., Bonell, M., Coles, N., MacDonald, A.M., Auton, C.A. and Stevenson, R. (2013)** Soil Characteristics and Landcover Relationships on Soil Hydraulic Conductivity at a Hillslope Scale: A View towards Local Flood Management, *Journal of*

Hydrology, **497**, 208-222.

- 9. Bengtsson, G., Bengtson, P., Mansson, K.F. (2003)** Gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity, *Soil Biol. Biochem*, **35**, 143–154.
- 10. Brown, M.W., Tworkoski, T. (2004)** Pest management benefits of compost mulch in apple orchards, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **103**, 465–472.
- 11. Carvalho, F.P. (2006)** Agriculture, Pesticides, Food Security and Food Safety, *Environmental Science and Policy*, **9**, 685–692.
- 12. Cleveland, C.C., Liptzin, D. (2007)** C: N: P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass *Biogeochem*, **85**, 235–252.
- 13. Connor, D.J. (2013)** Organically grown crops do not a cropping system make and nor can organic agriculture nearly feed the world, *Field Crops Research*, **144**, 145–147.
- 14. Cornille, A., Gladioux, P., Smulders, M.J., Roldán-Ruiz, I., Laurens, F., Le Cam, B., Nersesyan, A., Clavel, J., Olonova, M., Feugey, L., Gabrielyan, I., Zhang, X.G. and Giraud, T. (2012)** New Insight into the History of Domesticated Apple: Secondary Contribution of the European Wild Apple to the Genome of Cultivated Varieties, *PLoS Genetics*, **8**, e1002703.
- 15. de Ponti, T., Rijk, B. and Van Ittersum, M.K. (2012)** The Crop Yield Gap between Organic and Conventional Agriculture, *Agricultural Systems*, **108**, 1–9.
- 16. Di, H.J., Cameron, K.C., Shen, J.P., Winefield, C.S., O'Callaghan, M., Bowatte, S., He, J.Z. (2010)** Ammonia-oxidizing bacteria and archaea grow under contrasting soil nitrogen conditions, *FEMS Microbiol. Ecol.*, **72**, 386–394.
- 17. Donald Nicholas, D.J. and Nason, A. (1957)** Determination of Nitrate and Nitrite, *Methods in Enzymology*, **3**, 981–984.

18. **Drake S.R., Raese, J.T. and Smith, T.J. (2002)** Time of Nitrogen Application and Its Influence on “Golden Delicious” Apple Yield and Fruit Quality, *Journal of Plant Nutrition*, **25**, 143–157.
19. **Dris, R. (2002)** Influence of Orchard Management on Growth and Production of Fruits. In: Dris, T., Jain S. M. and Khan I. A., Eds., Environment and Crop Production, Science Publishers Inc., Enfield, NH, 1-3.
20. **Faegri A., Torsvik V., Goksoyr J. (1977)** Bacterial and fungal activities in soil: Separation of bacteria and fungi by a rapid fractionated centrifugation technique, *Soil Biology and Biochemistry*, **9**, 105-112.
21. **Ernani, P.R., Dias, J. (1999)** Soil nitrogen application in the spring did not increase apple yield, *Ciência Rural*, **29**, 645–649.
22. **FAO (2014)** FAOSTAT. faostat3.fao.org/home/E.
23. **Forge, T.A., Hogue, E., Neilsen, G., Neilsen, D. (2003)** Effects of organic mulches on soil microfauna in the root zone of apple: implications for nutrient fluxes and functional diversity of the soil food web, *Applied Soil Ecology*, **22**, 39–54.
24. **Forsline, P.L., Aldwinckle, H.S., Dickson, E.E., Luby, J.J. and Hokanson, S.C. (2003)** Collection, Maintenance, Characterization, and Utilization of Wild Apples of Central Asia, *Horticultural Reviews: Wild Apple and Fruit Trees of Central Asia*, **29**, 1–62.
25. **Fujisawa, M. and Kobayashi, K. (2013)** Shifting from Apple to Peach Farming in Kazuno, Northern Japan: Perceptions of and Responses to Climatic and Non-Climatic Impacts, *Regional Environmental Change*, **13**, 1211–1222.
26. **Fujita, M. (2001)** Nature farming practices for apple production in Japan, *Journal of Crop Production*, **3**, 119-125.
27. **Gonzalez-Sosa, E., Braud, I., Dehotin, J., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R.,**

- Lagouy, M., Jacqueminet, C., Kermadi, S. and Michel, K. (2010)** Impact of Land Use on the Hydraulic Properties of the Topsoil in a Small French Catchment, *Hydrological Processes*, **24**, 2382-2399.
- 28. Han, M.Y., Zhang, L.X., Fan, C.H., Liu, L.H., Zhang, L.S., Li, B.Z. and Alva, A.K. (2011)** Release of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium during the Decomposition of Apple (*Malus domestica*) Leaf Litter under Different Fertilization Regimes in Loess Plateau, China. *Soil Science and Plant Nutrition*, **57**, 549-557.
- 29. Hart, S.C., Nason, G., Myrold, D.D., Perry, D.A. (1994)** Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest: the carbon connection, *Ecology*, **75**, 880–891.
- 30. Hattori, R. and Hattori, T. (1980)** Sensitivity to salts and organic compounds of soil bacteria isolated on diluted media, *J. Gen. Appl. Microbiology*, **26**, 1-14
- 31. Haynes, R.J. and Goh, K.M. (1980)** Some Effects of Orchard Soil Management on Sward Composition, Levels of Available Nutrients in the Soil, and Leaf Nutrient Content of Mature “Golden Delicious” Apple Trees, *Scientia Horticulturae*, **13**, 15–25.
- 32. Horii, S., Matsuno, T., Tagomori, J., Mukai, M., Adhikari, D. and Kubo, M. (2013)** Isolation and Identification of Phytate-Degrading Bacteria and Their Contribution to Phytate Mineralization in Soil, *The Journal of General and Applied Microbiology*, **59**, 353–360.
- 33. Hseu, Z.Y., Huang, C.C. (2005)** Nitrogen mineralization potentials in three tropical soils treated with biosolids, *Chemosphere*, **59**, 447–454.
- 34. Ito, E., Ono, K., Ito, Y.M., Araki, M. (2008)** A neutral network approach to simple prediction of soil nitrification potential: a case study in Japanese temperate forests. *Ecology, Model*, **219**, 200–211.
- 35. Janssen, B.H. (1996)** Nitrogen mineralization in relation to C: N ratio and

- decomposability of organic materials, *Plant Soil*, **181**, 39–45.
- 36. Jenkinson, D.S. (1966)** Studies on the decomposition of plant material in soil, II. Partial sterilization of soil and the soil biomass, *J. Soil Science*, **17**, 280-302.
- 37. Kai, T., Mukai, M., Araki, K.S., Adhikari, D. and Kubo, M. (2015)** Physical and Biochemical Properties of Apple Orchard Soils of Different Productivities, *Open Journal of Soil Science*, **5**, 149-156.
- 38. Kai, T., Mukai, M., Araki, K.S., Adhikari, D. and Kubo, M. (2016)** Analysis of chemical and biological soil properties in organically and conventionally fertilized apple orchards, *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, **5**, 92-99.
- 39. Koike, H., Ono, T. (1998)** Optimum crop load for Fuji apples in Japan, *Compact Fruit Tree*, **31**, 13–16.
- 40. Komamura, K., Suzuki, A., Fukumoto, M., Kato, K. and Sato, Y. (2000)** Effects of Long-Term Nitrogen Application on Tree Growth, Yield, and Fruit Qualities in a “Jonathan” Apple Orchard, *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, **69**, 617-623.
- 41. Kowalchuk, G.A., Stephen, J.R. (2001)** Ammonia-oxidizing bacteria: a model for molecular microbial ecology, *Ann. Rev. Microbiol*, **55**, 485–529.
- 42. Krapp, A., Berthomé, R., Orsel, M., Mercey-Boutet, S., Yu, A., Castaings, L., Iftieh, S., Major, H., Renou, J.P., Daniel-Vedele, F. (2011)** Arabidopsis roots and shoots show distinct temporal adaptation patterns toward nitrogen starvation, *Plant Physiology*, **157**, 1255–1282.
- 43. Krishna, K.R. (2014)** Agroecosystems: Soils, Climate, Crops, Nutrient Dynamics and Productivity, Apple Academic Press, Inc., Oakville.

44. **Kumar, K. and Goh, K.M. (1999)** Crop Residues and Management Practices: Effects on Soil Quality, Soil Nitrogen Dynamics, Crop Yield, and Nitrogen Recovery, *Advances in Agronomy*, **68**, 197–319.
45. **Kuroiwa, M., Koba, K., Isobe, K., Tateno, R., Nakanishi, A., et al. (2011)** Gross nitrification rates in four Japanese forest soils: heterotrophic versus autotrophic and the regulation factors for the nitrification, *J. Forest Research*, **16**, 363–373.
46. **Lairon, D. (2010)** Nutritional Quality and Safety of Organic Food, A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, **30**, 33–41.
47. **Lehtovirta-Morley, L.E., Stoecker, K., Vilcinskas, A., Prosser, J.I., Nicol, G.W. (2011)** Cultivation of an obligate acidophilic ammonia oxidizer from a nitrifying acid soil, *Proc. Natl. Acad. Science USA*, **108**, 15892–15897.
48. **MAFF (2014)** Monthly Statistics of Agriculture, Forestry and Fisheries, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan.
49. **Marshall, M.R., Francis, O.J., Frogbrook, Z.L., Jackson, B.M., McIntyre, N., Reynolds, B., Solloway, I., Wheater, H.S. and Chell, J. (2009)** The Impact of Upland Land Management on Flooding: Results from an Improved Pasture Hillslope, *Hydrological Processes*, **23**, 464-475.
50. **Matsuno, T., Horii, S., Sato, T., Matsumiya, Y. and Kubo, M. (2013)** Analysis of Nitrification in Agricultural Soil and Improvement of Nitrogen Circulation with Autotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **169**, 795–809.
51. **Merwin, I.A., Stiles, W.C., van Es, H.M. (1994)** Orchard groundcover management impacts on soil physical properties, *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **119**, 216–222.

- 52. Munsell Color Company (1975)** Munsell Soil Color Charts. Munsell Color Company, Baltimore.
- 53. Murphy, J. and Riley, J.P. (1962)** A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters, *Analytica, Chimica*, **27**, 31–36.
- 54. Nagano Agricultural Administration Department (2000)** The Guide of Environment-Friendly Agricultural Technology.
- 55. Nava, G. and Dechen, A.R. (2009)** Long-Term Annual Fertilization with Nitrogen and Potassium Affect Yield and Mineral Composition of “Fuji” Apple, *Scientia Agricola*, **66**, 377–385.
- 56. Neilsen, D. and Neilsen, G.H. (2002)** Efficient Use of Nitrogen and Water in High-Density Apple Orchards, *HortTechnology*, **12**, 19-25.
- 57. Nicol, G.W., Leininger, S., Schleper, C., Prosser J.I. (2008)** The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria, *Environ, Microbiol.* **10**, 2966–2978.
- 58. Oliveira, M.T. and Merwin, I.A. (2001)** Soil Physical Conditions in a New York Orchard after Eight Years under Different Groundcover Management Systems, *Plant and Soil*, **234**, 233-237.
- 59. Pasda, G., Hähndel, R., Zerulla, W. (2001)** Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops, *Biology and Fertility of Soils*, **34**, 85–97.
- 60. Peck, G.M., Andrews, P.K., Reganold, J.P. and Fellman, J.K. (2006)** Apple Orchard Productivity and Fruit Quality under Organic, Conventional, and Integrated Management, *HortScience*, **41**, 99–107.
- 61. Prosser, J.I. (2007)** The ecology of nitrifying bacteria. In: Bothe H, Ferguson SJ, Newton

WE (eds) *Biology of the nitrogen cycle*, Elsevier, Amsterdam, 223–244.

62. **Reganold, J.P., Glover, J.D., Andrews, P.K. and Hinman, H.R. (2001)** Sustainability of Three Apple Production Systems, *Nature*, **410**, 926–930.
63. **Ro, H.M. and Park, J.M. (2000)** Nitrogen Requirements and Vegetative Growth of Pot-Lysimeter-Grown "Fuji" Apple Trees Fertilized by Drip Irrigation with Three Nitrogen Rates, *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, **75**, 237-242.
64. **Robinson J.P., Harris S.A., Juniper B.E. (2001)** Taxonomy of the genus *Malus* Mill. (Rosaceae) with emphasis on the cultivated apple, *Malus domestica* Borkh, *Plant Systematics and Evolution*, **226**, 35–58.
65. **Sayavedra-Soto, L.A., Gvakharia, B., Bottomley, P.J., Arp, D.J., Dolan, M.E. (2010)** Nitrification and degradation of halogenated hydrocarbons—a tenuous balance for ammonia-oxidizing bacteria, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **86**, 435–444.
66. **Seufert, V., Ramankutty, N. and Foley, J.A. (2012)** Comparing the Yields of Organic and Conventional Agriculture, *Nature*, **485**, 229–232.
67. **Soejima J., Bessho H., Tsuchiya, S., Komori, S., Abe, K., and Kotoda, N. (1998)** Breeding of Fuji Apples and Performance on JM Root Stocks, *Compact Fruit Tree*, **31**, 22–24.
68. **Springob, G., Kirchmann, H. (2003)** Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils, *Soil Biol. Biochem.*, **35**, 629–632.
69. **Swezey, S.L. , Werner, M.R. , Buchanan, M. and Allison, J. (1998)** Comparison of Conventional and Organic Apple Production Systems during Three Years of Conversion to Organic Management in Coastal California, *American Journal of Alternative Agriculture*, **13**, 162–180.

70. Tagliavini, M., Tonon, G., Scandellari, F., Quinones, A., Palmieri, S., Menarbin, G., Gioacchini, P. and Masia, A. (2007) Nutrient Recycling during the Decomposition of Apple Leaves (*Malus domestica*) and Mowed Grasses in an Orchard, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **118**, 191–200.
71. Teravest, D., Smith, J.L., Carpenter-Boggs, L., Hoagland, L., Granatstein, D. and Reganold, J.P. (2010) Influence of Orchard Floor Management and Compost Application Timing on Nitrogen Partitioning in Apple Trees, *HortScience*, **45**, 637–642.
72. Tonon, G., Ciavatta, C., Solimando, D., Gioacchini, P. and Tagliavini, M. (2007) Fate of ¹⁵N Derived from Soil Decomposition of Abscised Leaves and Pruning Wood from Apple (*Malus domestica*) Trees, *Soil Science and Plant Nutrition*, **53**, 78–85.
73. Xia, W., Zhang, C., Zeng, X., Feng, Y., Weng, J., Lin, X., Zhu, J., Xiong, Z., Xu, J., Cai, Z., Jia, Z. (2011) Autotrophic growth of nitrifying community in an agricultural soil, *ISME J.* **5**, 1226–1236.
74. Willer, H. and Lernoud J. (Eds.) (2015) *The World of Organic Agriculture, Statistics and Emerging Trends*. FiBLIFOAM Report. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick, and IFOAM Organics International, Bonn.
75. Zoppolo, R.J., Stefanelli, D., Bird, G.W., Perry, R.L. (2011) Soil properties under different orchard floor management systems for organic apple production, *Organic Agriculture*, **1**, 231–246.
76. 浅利正義, 舟山健 (2012) 防除ハンドブック リンゴの病害虫, 全国農村教育協会.
77. 久保幹, 森崎久雄, 久保田謙三, 今中忠行 (2012) 環境微生物学, 化学同人, 2-164.
78. 総務省統計局 (2016) 世界の統計 2016.
79. 十亀好雄 (1984) 世界におけるイチョウの分布, 甲子園短期大学紀要, **4**, 1-14.
80. 中曾根英雄, 山下泉, 黒田久雄, 加藤亮 (2000) 茶園地帯の過剰窒素施肥がため池

の水質に及ぼす影響, 水環境学会誌第 23 巻第 6 号, 374-377.

81. 日本土壌肥料学会監修 (2000) 土壌環境分析法.
82. 農林水産省 (2003) 茶樹栽培法.
83. 農林水産省 (2014) 平成 26 年版食料・農業・農村白書.
84. 日本土壌協会 (2013) 有機栽培技術の手引 (果樹・茶編), 319-414.

本論文に関する報告

1. **Takamitsu Kai, Masaki Mukai, Kiwako S. Araki, Dinesh Adhikari, and Motoki Kubo (2016)** Analysis of chemical and biological soil properties in organically and conventionally fertilized apple orchards. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, **5**, 92-99.
2. **Takamitsu Kai, Masaki Mukai, Kiwako S. Araki, Dinesh Adhikari, and Motoki Kubo (2015)** Physical and biochemical properties of apple orchard soils of different productivities. *Open Journal of Soil Science*, **5** 149-156.
3. **Dinesh Adhikari, Kiwako S. Araki, Masaki Mukai, Takamitsu Kai, Kenzo Kubota, Taiki Kawagoe, and Motoki Kubo (2015)** Development of an efficient bioremediation system for petroleum hydrocarbon contaminated soils based on hydrocarbon degrading bacteria and organic material control. *Austin Journal Biotechnology and Bioengineering*, **2**, 1-7.
4. **Dinesh Adhikari, Takamitsu Kai, Masaki Mukai, Kiwako S. Araki, and Motoki Kubo (2014)** Proposal for a new soil fertility index (SOFIX) for organic agriculture and construction of a SOFIX database for agricultural fields. *Current Topics in Biotechnology*, **8**, 81-91.

謝辞

本論文をとりまとめるにあたり、立命館大学生命科学部生物工学科 久保 幹 教授には、本研究の立案から草稿の校閲まで、すべての過程で終始丁寧なご指導と適切なお助言を頂きました。研究において、多くのご支援とご鞭撻ならびにご教示を賜りました。心から深く感謝の意を表します。

本学位論文の副査を務めて頂きました立命館大学生命科学部生物工学科 森崎 久雄 教授ならびに若山 守 教授には、ご多忙のところ、学位論文の完成に向けて数多くの有益なお意見を賜りました。謹んで謝意を表します。

立命館大学生命科学部生物工学科 荒木 希和子 助教、同大学専門研究員（現：株式会社CTI フロンティア）Dinesh Adhikari 博士ならびに大和ハウス工業株式会社総合技術研究所 久保田 謙三 博士には、実りある討論と共に研究の方向性について適切なお教示を頂きました。また、終始温かいお助言を頂きました。三重大学大学院生物資源学研究所 成岡 市 教授には多くの貴重なお助言を頂きました。心から感謝を致します。

東京農業大学地球環境科学部生産環境工学科 中村貴彦 准教授、藤川 智紀 准教授、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 岩田 幸良 博士には、本研究の実施にあたり惜しまないご協力を頂きました。また貴重なお助言を頂きました。心から感謝を致します。

立命館大学生命科学部生物工学科専門研究員（現：アグリジャパン株式会社）向 真樹 氏ならびに大和ハウス工業株式会社総合技術研究所 川越 大樹 氏、立命館大学大学院生命科学研究科博士後期課程 Ima Yudha Perwira 氏には、実りある討論と共に、貴重なお助言を頂きました。心から感謝を致します。

今回の圃場調査に際し、篤農家である長野県上水内郡飯綱町 若林 秋男氏、市子 氏夫妻、ならびに若林 千賀男 氏、長野市 久保田 俊男 氏、埴科郡坂城町 小宮山 忠明 氏、菜奈子 氏夫妻、東筑摩郡朝日村 森村 大樹 氏、下伊那郡松川町 大場 秀之氏には、リンゴ圃場を長い間こころよく試験圃場として調査させて頂きました。また、研究を進めるにあたり終始暖かい励ましのお言葉を頂きました。心から感謝をいたします。

東京農業大学名誉教授 駒村 正治 博士、東京農業大学 高須 俊行 博士、東京農工大学名誉教授 穴瀬 真 博士、東京大学 小出 進 博士には、本研究を遂行するにあたり、暖かい励ましの言葉をいただきました。心から感謝の意を表します。

立命館大学生命科学部立命館大学生命科学部生物工学科生物機能工学研究室の学生諸兄には、終始暖かい励ましのお言葉を頂きました。有難うございました。

最後に本研究を進めるうえで、妻と子供が私の心の大きな支えでした。仕事上の人間関係に疲れたときにも、何とか研究を続けることができました。博士課程社会人入学への進学を快諾してくれたこと、そして骨身を惜しまない様々なサポートに対して、心から感謝を致します。