

New brand "healthy soil" of the Hokkaido appearance

北海道発の新ブランド “健康土壌”に関する研究

1 はじめに

北海道は日本の食料基地としての役割を果たしており、農地としての土地利用が多い。北海道は冷涼な気候のため害虫の発生が少なく、少ない農薬使用量で野菜類を栽培できるメリットがある。「北海道の野菜」といえば今でも本州では「安全でおいしい野菜」の代名詞であり、信頼性が高い。だが、近年では食に対する関心の高まりとともに、日本全国において、「減農薬」栽培や「有機」栽培を行うことによって付加価値を高めた農作物が出荷されている。それらの栽培方法は広く認知された「ブランド」として定着しており、従来の生産法による商品よりも競争力を持っている。「北海道の野菜」に対してそれ以上の競争力をつけるには新たなブランドを創り出し付加する必要がある。また、過剰施肥は地下水汚染やコスト増大を招き、競争力を低下させるため最適な施肥方法について検討する必要もある。

われわれは、現在構築しつつある分析方法によって定量的に表現できる“土壌の健康度”を新たなブランドとして提案する。本研究では、“土壌の健康度”を新たなブランドとしての可能性を調査するとともに、活用する場合に生じる課題点を抽出することを目的として、実地調査および検討を行った。



大平 勇一

室蘭工業大学工学部応用化学科助教授



小幡 英二

室蘭工業大学工学部応用化学科教授



古川 克彦

大北土建工業(株)取締役営業部長



吉田 豊

室蘭工業大学工学部応用化学科教授

2 “土壌の健康度”を分析するシステムの概要

農地の土壌分析と言えば、秋または春に採取した土壌中に残留している栄養成分量の測定を指し、農家はこの結果をもとにして次の栽培に必要な施肥量を決定する。これは人間に例えると、「摂取栄養診断」に相当する。人間の場合、問診と血液検査等によって健康状態がおおよそ推定できる。これは、体内での物質代謝の仕組み等がある程度分かっているためである。しかし、土壌については土壌分析値から土壌の状態を推定する方法が確立されていない。われわれの考えている分析システムは、土壌中に存在する成分がどのような速度で流出・分解するかを調べることで“土壌の健康度”を評価するものであり、人間の場合では病院等で行う「健康診断」に相当する。土壌にはイオン交換能に由来する緩衝作用と、土壌中に生息する微生物による物質代謝作用がある。これらの作用を定量的に把握できるシステムを構築すれば“土壌の健康度”を評価することが可能になると考えている。

以下、分析システムの基本的な考え方について概説する。基本的な概念は化学工学の分野で使用されている物質収支である。土壌に施された肥料の1成分に注目すると、

$$\begin{aligned} & (\text{土壌残存量}) + (\text{施肥量}) + (\text{その他の供給量}) \\ & = (\text{作物吸収量}) + (\text{土壌からの流出量}) + (\text{生物分解量}) \end{aligned} \quad \dots(1)$$

で表すことができる。他の成分についても同一の式が成立する。一般的に行われている土壌分析では、左辺第1項の「土壌残存量」を測定しているものであり、各農家はこれまでの経験等により左辺第3項と右辺の値を推定して施肥量を決定している。土壌の健康度を評価するための基本情報は前述したように土壌にはイオン交換能に由来する緩衝能と、土壌中に生息する微生物による物質代謝作用である。これはそれぞれ右辺第2項と第3項に相当する。右辺第2、3項を求めるにはその他の項目を把握する必要がある。

右辺第1項の「作物吸収量」を定量的に把握するには、単位面積当たりの栽培作物数、栽培作物1つ当たりの栄養成分含有量、栽培面積の3つを調べ、次式で計算する。

$$\begin{aligned} (\text{作物吸収量}) & = (1 \text{ m}^2 \text{ 当たりの作物数}) \\ & \times (\text{栽培面積}) \times (\text{栄養成分含有量}) \end{aligned} \quad \dots(2)$$

本来、1圃場中の全作物数を数えれば間違いな

いが、調査には時間がかかるため「1 m²当たりの作物数」と「栽培面積」の積としてある。

式(1)左辺第2項の「施肥量」については、圃場に散布した肥料等の種類及び量について各農家から聞き取り調査が必要である。

式(1)左辺第3項の「その他の供給量」については、降水や散水によって供給される栄養成分であり、次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} (\text{その他の供給量}) & = (\text{供給水量}) \times (\text{栽培面積}) \\ & \times (\text{供給水の栄養成分濃度}) \end{aligned} \quad \dots(3)$$

式(1)右辺第2項の「土壌からの流出量」は降水や散水等によるものであり、これを求めるには2通りの方法がある。暗渠等が設置してある圃場では、次式によって計算することが可能である。

$$\begin{aligned} (\text{土壌からの流出量}) & = (\text{浸透水量}) \times (\text{栽培面積}) \\ & \times (\text{流出水の栄養成分濃度}) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

一方、暗渠等が設置されていない圃場では流出水の採取が困難であるため、土壌内の栄養成分濃度を直接測定し、次式から求める。

$$\begin{aligned} (\text{土壌からの流出量}) & = (\text{浸透水量}) \times (\text{栽培面積}) \\ & \times (\text{栄養成分濃度差}) \end{aligned} \quad \dots(4')$$

式(4)、(4')における「浸透水量」は降水量、散水量であり測定可能な数値であるが、式(4)の「流出水の栄養成分濃度」、式(4')の「栄養成分濃度差」は実測が必要である。

式(1)から式(4')を用いることで「生物分解量」を求めることができる。「土壌からの流出量」を知ることができれば、土壌の持つ栄養成分の保持力を評価することが可能となる。また、「生物分解量」を知ることができれば、土壌中に生息する微生物による物質代謝作用、即ち土壌の自浄能力を評価することが可能となる。

3 ニーズ調査と分析操作の課題点抽出

平成15年度に中富良野町の農家7名に本研究の趣旨説明を行い、賛同をいただいた。各農家から2圃場を試験圃場として提供していただくことができ、“土壌の健康度”に対するニーズが大きいことを確認した。土壌内での物質挙動を解明するためのデータ取得を兼ねて今回は土壌内栄養成分を直接測定する方法を採用した。“土壌の健康度”を評価するために分析を行う項目の中で最も時間を要すると予想される事項は、土壌採取と前処理（ふるい分け、乾燥、固液抽出）である。まずこれらの操作を最適化するため、試験圃場1圃場当

たり5箇所、15cm間隔で3深度からサンプリングを行った。サンプル数は合計では210サンプルとなった。

調査は位置決めと採取に2名、温度・硬度などの測定及び記録に1名、合計3名の人員で行った。土壌サンプリングを行う地点を決定するための位置決めは1圃場当たり約30分を要した。土壌採取は1箇所につき10分程度であるが、温度・土壌硬度の測定には1箇所約10分を要した。埋め戻しを行い、次のサンプリング箇所に移動するまでの合計時間は約25分であった。これを5箇所行うため、土壌採取、計測、埋め戻しに要する時間は約125分となる。位置決めを含めると155分となることから1圃場約2時間30分、1日当たり3圃場程度となる。

次にふるい分け操作について調査を行った。この操作は土壌養分試験方法に2mmのふるいを通過したものだけを試料として使用するよう明記されている。この操作を行うことにより、これまでに得られている土壌分析値と比較検討が可能となる。ふるい分け操作は、ふるい分け、試料の瓶詰め、ふるいの洗浄と水切りからなり、1サンプルにつきそれぞれ約10分、約2分、約3分を要した。1サンプル当たり15分と見積もると1日8時間で1人がふるい分け可能なサンプル数は32となる。210サンプルを全て処理するには7日を要することになる。

次に乾燥操作を検討すべきであるが、乾燥器等で試料を乾燥させると栄養成分が分解する恐れがある。別途、同一土壌試料について自然乾燥させたものと湿潤状態のままのものについて後述する栄養成分分析を行い、分析結果を統計学的に処理したところ有意差が認められなかった。そこで、時間短縮を兼ねて本研究では乾燥操作を行わなかった。

最後に抽出操作について検討を行った。今回、対象とした化学的成分の項目全てを分析するのに必要な清澄液の量は約40mlである。三角フラスコ内に試料と水を質量比1:5で混合・振とうし、土壌懸濁液を調製した。当初は重力沈降や濾過を考えていたが予想以上に微粒子成分が多く、短時間で清澄液を得ることが難しかった。そこで、遠心分離機による処理を行った。遠心分離操作を最適化するため、回転速度を最大の4000rpm、処理時間を0~20分として、上澄み液の濁度を検討し

表1 測定項目一覧

土壌特性（4項目）	水分含有率 強熱減量 pH 電気伝導度
化学成分 （陽イオン3項目、陰イオン4項目）	カリウムイオン カルシウムイオン マグネシウムイオン リン酸イオン 硝酸イオン 硫酸イオン 塩化物イオン

た。その結果、処理時間とともに濁度は減少したが、20分の処理時間でも濁度をゼロとすることはできなかった。10分以上の処理を行えば濁度に差異が認められなかったことから、遠心分離の条件を4000rpm、10分と設定した。

現行の体制（1日8時間）、設備では210サンプルについて表1に示す11項目を分析すると96日を要した。これは1日平均2.2サンプル、1週間当たり11サンプルに相当する（土日を除く5日を計算対象とした）。今回は土壌サンプルがそろっている状態であったため、水分測定や抽出・遠心分離などは幾つかのサンプルを同時に進行させている。しかし、実際にはサンプルを採取した直後から分析を開始しないと土壌の状態が変化する可能性がある。水分測定に使用する乾燥機は追加サンプルがあっても対応可能であると考えられるが、600℃加熱による強熱減量成分の測定にはマッフル炉を使用している。マッフル炉は予熱に1時間、本加熱と放冷に各2時間必要であり、円滑に進めるには計画的な運用が必要である。

最も時間を要したのはイオンクロマトグラフィーによるカリウム、マグネシウム、カルシウムの分析であった。この機器は使用可能になるまでに約2時間の立ち上げ運転が、終了時には約30分の操作が必要となる。そのため、1日8時間のうち5時間30分が分析時間となる。1試料の分析には約35分を要することから、1日当たりの最大分析数は9-10試料となり、210サンプルを分析するために23日程度を要した。また、イオンクロマトグラフィーの分離カラムを陰イオン用に交換することによって陰イオンを測定している。これは陽イオンの分析より若干早いものの1試料当たり約20分の測定時間が必要である。1日当たりの最大分析可能数は16試料であり、210サンプルを分析するのに約13日を要した。さらに、分離カラ

ムの交換に1日を要した。このことからイオンクロマトグラフィーにより7項目、210サンプルを分析するのに要する時間は最低でも36日が必要となる。1台のイオンクロマトグラフィーによる7項目の分析は時間を要するため、今年度よりカリウムなどの陽イオンの分析に原子吸光光度計を使用したところ陽イオンの測定は4日で終了し、イオンクロマトグラフィーとの併用で分析時間は17日に短縮できた。

4 必要経費の試算

土壌の健康度を分析するには、分析に必要な機器類の購入費用、メンテナンス費用、消耗品費、人件費等がかかる。これらは分析費用に反映され、最終的な費用負担者は農家である。仮に“健康土壌”による高付加価値化ができたとしても、それによる収益分以上の支出が必要となつては普及しない。そこで1サンプル当たりの経費について検討を行った。なお、機器類を運転するための光熱費、土壌採取や分析を行うための人件費を盛り込む必要があるが、これは体制によって大きく変動するため今回は盛り込まないこととした。前処理から分析までの全手順を書き出し、必要機器類と必要試薬の調査を行った。表2に使用機器類と試薬類の価格を示す。その結果、今回使用した機器類（X線回折装置など）及び使用物品（分析用器具など）を新規に購入する場合、最低でも約2,600万円が必要になることがわかった。使用年数を15年とし、維持に要する年間費用を価格の5%と仮定すると、維持のみで年間130万円が必要となる。15年単位で機器類を更新する場合、機器の購入・15年維持には総額で約4,550万円と試算される。これを15年で割ることにより1年当たり約300万円の経費が必要となることがわかった。一方、試

薬等の消耗品類については、210サンプルの分析で約3万円であり、1サンプル当たりの消耗品費は約120円と試算された。これより、費用のほとんどは消耗品ではなく、機器類の購入・維持に要する費用であることがわかった。

次に1サンプルの分析に対する採算ラインを検討する。年間の営業日数を約300日とすると、対応可能なサンプル数は656サンプルとなる。研究用には夏季サンプリングも行っているが、実際に農地の分析を行うことができる時期は秋から春にかけてであり、かつ、積雪前か雪解け後となる。そのため、10月頃から翌年の4月頃まで（約6ヶ月）の限られた期間で採算ラインを考える必要がある。仮に6ヶ月間で毎日分析可能数を確保できたとして、対応可能な約400サンプルとなる。これをもとにして計算を行う。機器類の更新・維持にかかる費用をサンプル数で割ると1サンプル当たり約7,500円となる。さらに、人件費や光熱費を考慮すると分析経費はこれ以上となる。現在は試験的に1圃場当たり5箇所3深度の15サンプルとしているため、このままでは1圃場当たり11万円以上の費用がかかる。既存の土壌分析は1サンプル当たり無料から数千円程度であることを考えると、試算経費は2桁以上大きく非現実的な金額であり、このままでは本システムを導入したとしても農家に相当な負担を強いることとなる。

5 分析費用の抑制

サンプリング数を減らすことによって費用抑制と時間短縮をはかることは可能である。だが、理由もなくサンプリング数を減らしては理解が得られない。そこで、工業製品の品質管理に使用されている統計学的手法を使ってデータを検定し、5%有意差がなければ、代表的な箇所、深さに絞ったデータで議論が可能になると考えた。

まず、1圃場から採取する15サンプルのデータについて二元配置法の分散分析と平均値検定を行い、採取箇所及び深さ方向の違いについて検定した。検定は栄養成分等の測定項目12および土壌硬度の計13項目について行った。その結果、深さ方向については全検定のうち半数以上の項目で5%有意差があると判定されたため、現時点では深さ方向のサンプル数を減らすことが困難である。一方、採取箇所が異なってもほとんどの項目において5%有意差はないことが明らかとなり、サ

表2 使用機器類・試薬類の新規購入価格 単位：千円

<機器類>	
X線回折装置	17,000
原子吸光光度計	3,000
イオンクロマトグラフィー	3,000
紫外分光光度計	700
マッフル炉	380
遠心分離器	300
その他の器具類（1品20万円以下）	1,670
合計	26,050
<試薬類>	
試薬合計	105

ンプリング箇所は多くても2、3箇所、場合によっては1箇所が良いことが分かった。1圃場当たりの経費は2～7万円程度に抑えられる。現在、特定の場所について栄養成分を調べることで他の場所の状態を推定できるよう、土壌中の栄養成分移動およびその数学モデルの構築を検討するとともに、測定項目間の相関性について整理・検討している。この検討結果を活用することにより、1圃場当たりのサンプル数をさらに減らすことができ、経費削減につながると予想している。

前述したように、サンプリング箇所を削減することで費用総額を抑えられるものの1サンプル当たりの単価が高価である。そこで、分析項目を削減することで高価な機器類の購入・更新費用を抑える方法について検討した。機器類リストの中で最も高価な機器はX線回折装置である。これは、土壌を構成する粒子の化学組成分析に用いている。平成15年度に引き続き平成16年度においても土壌の化学組成分析を実施したところ、圃場間の差はあるものの、同一圃場では約1年に渡って土壌粒子の化学組成はほぼ同じであった。このことから、客土工事等で土壌の入れ替えしない限り、1回分析しておけばその後の分析はほぼ不要と言える。使用回数が極端に少ないにもかかわらず、このような高価な機器を購入・維持・更新することは経済上難しい。そこで、機器類リストからX線回折装置をはずすと、機器類等の新規購入費は1,305万円、維持費は979万円(=1,305万円×0.05×15年)と計算される。合計2,284万円を15年で割ると152万円であり、年間サンプル数400で割ると、1サンプルの単価は約4,000円となる。この価格は既存の土壌分析よりも高いものの同じ桁であり、今後、機器類と成分分析法についてさらなる検討を進めることでより安価にすることができると予想される。

6 結言

土壌の健康度を新たなブランドに育てることを目的として、実際に現場(農家)が必要としている情報を収集するとともに、ニーズ調査を行った。その結果、多くの農家が興味を示したことからニーズがあることを確認した。実務上の課題を見出すため、各農家から提供していただいた14の試験圃場にて検討を行ったところ、土壌の前処理の最適化が時間短縮に不可欠であることがわかっ

た。1サンプル当たりの経費試算を行ったところ、現状では1サンプル当たりの分析費用が高く、ニーズに応えられる状態になっていないことが分かった。特に、分析に使用する機器類の更新・維持費用が多くを占めていることから、不要項目の削除や関連項目の統一を行うとともに簡便で安価な分析方法に変更する必要があることがわかった。データに統計学的処理を施したところ、5箇所3深度のサンプリング数を2、3箇所3深度、もしくは1箇所3深度のサンプリング数で対応できることが示された。

現在も農家の協力を得て、式(4)による分析方法を検討しており、圃場周辺の地形や地下構造を加味した簡便・迅速・安価な評価方法の研究・開発に挑戦している。

参考文献

- 化学工学会：基礎化学工学、培風館(1999)
- 久馬一剛ら：土壌の事典、朝倉書店(1993)
- 外島忍：要説 品質管理 [増補改訂版]、日本規格協会(1975)
- 日本規格協会：JISハンドブック53 環境測定II 水質(2004)
- 日本土壌協会：土壌機能モニタリングのための土壌、水質及び植物体分析法(2001)

profile

大平 勇一 おおひら ゆういち

1969年新潟県亀田町(現新潟市)生まれ。'93年新潟大学大学院工学研究科化学工学専攻修了。博士(工学)。室蘭工業大学工学部応用化学科助教授。専門分野は環境化学工学、排水処理工学。

小幡 英二 おばた えいじ

1948年生田原町生まれ。'71年室蘭工業大学工学部化学工学科卒業。工学博士。室蘭工業大学工学部応用化学科教授。専門分野は化学工学、粉体工学。

古川 克彦 ふるかわけつひこ

1955年三笠市生まれ。'80年室蘭工業大学大学院工学研究科開発工学専攻修了。工学修士。大北土建工業株式会社取締役営業部長。専門分野は造園土木。

吉田 豊 よした ゆたか

1947年室蘭市生まれ。'71年北海道大学大学院工学研究科鉱山工学専攻修了。工学博士。室蘭工業大学工学部応用化学科教授。専門分野は光波応用計測、粉体工学。
