

일본에 있어서 정밀농업 연구 (제1회)

— 질소시비량 산출모델과 포장지도의 작성에 관한 연구 —

Research of Precision Agriculture in Japan (Part 1)

우메다 미키오*
정회원
M. Umeda

이 총 근*
정회원
C. K. Lee

1. 머리말

인류의 생산성은 1960년대 이후, 공업생산, 농업생산과 함께 급격하게 증가되었고 인구증가와 생활수준의 향상에 따른 식료(食料), 환경, 에너지 문제에 대한 대응은 21세기의 세계적 과제로 되고 있다. 농업에 있어서는 이러한 문제를 해결하는 수단으로 정밀농업(precision agriculture)이 주목받고 있다. 일본의 농업은 수도작을 중심으로 한 농업이고 수도작은 표 1에 나타나 있듯이 농업에 의한 환경부하보다 오히려 농업을 실시함에 따라 환

경보전 효과가 크고, 전작(田作)을 주체로 하는 농업과 환경부하의 관계는 상이한 점이 존재한다.

한편, 일본의 식량 자급률은 표 2에 나타난 것과 같이 1억2천만 인구가 사는 국가로서는 예를 찾아보기 힘든 아주 낮은 수치를 보이고 있다. 식료의 수입은 매년 3천만톤에 달하고 있고, 이들 식료와 함께 매년 5백억톤의 물, 8십만톤의 질소, 2십만톤의 인산 등의 토양 영양분이 일방적으로

Table 1 수도작 재배의 장점

토양침식에 대한 완벽한 대책
수질정화의 기능
초산대 질소의 보지(保持)기능이 큼
연작장해의 피해가 적음
저수능력과 홍수방지 기능
포장전면에 걸친 물의 증발에 의한 기온 조절 기능
양분의 천연 공급
영양분의 풍부

Table 2 일본의 식량자급률

	(단위 : %)			
	1960	1990	1994	1996
칼로리	79	47	46	42
곡 물	40	30	33	28
총 합	91	67	62	63
쌀	102	91	120	101
밀	39	12	9	7
콩	28	5	5	5
과 일	100	63	47	47
소고기	91	70	60	58
계 란	101	98	96	96
우 유	89	78	73	72

자료출처 : 아사히신문사 Japan Almanic.

* Lab. Farm Machinery, Division of Environmental Science and Technology Graduate School of Agriculture Kyoto Univ. Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan. E-mail: <lee@elam.kais.kyoto-u.ac.jp>.

일본에 수입되고 있다. 이것은 식료와 사료로 이용된 후, 소로부터 나오는 연간 9백만톤의 분뇨는 토양에 환원되어야만 하지만, 이 양은 일본 전 경지면적 5백만ha에 환원되어야 할 퇴비에 상당한다. 이와 같은 대량의 축산폐기물을 환원지에 수송시키는 일은 어렵고, 수출한 국가로 되돌리는 것은 더욱 더 어렵다. 이 때문에 축산폐기물이 야적되어 악취와 수질오염 등의 원인이 되고 있다. 환경보전이란 물질이 순환하는 것이다. 도시 쓰레기가 원래대로 돌아갈 수 없게 되어 매립의 대상이 된다면, 쓰레기는 도시의 환경문제로 된다. 식료수입이 수출국가와 지역의 자원수탈에 가담하고 그 곳에서의 물질순환의 기회를 빼앗고 있을 뿐만 아니라 일본의 환경오염을 증폭시키고 있다. 식료의 과도한 수출입에 의한 환경오염으로의 위험, 이것이 우리들이 정밀농업의 연구를 시작하게 된 동기중의 하나이다. 정밀농업으로 물질의 순환을 분석하는 일에 의해서 식료수입이 환경에 미치는 영향을 분석하는 것이 가능하리라고 생각했다.

2. 정밀농업 연구의 현황

교토대학에서는 1996년에 생물계 특정 산업기술 연구추진기구(이하 생연기구)의 프로젝트로서 연구준비를 시작했고, 토양학 연구분야의 연구자들과 공동으로 1997년 가을부터 교토대학 대학원 농학연구과 부속농장(오사카부의 타카쓰키시)에서 0.5ha의 논을 대상으로 토양지도와 수확량 지도를 작성하였다. 1999년부터는 부속농장을 담당하고 있는 재배시스템학 연구분야도 우리의 연구에 참가를 하게 되어 토양지도와 수확량지도 뿐만 아니라, 가변시비에 의한 안정된 벼 수확량을 확보하기 위한 수단으로서 벼의 꽃수(벼알수) 제어에 관한 모델작성도 시작하였고, 재배시스템학, 토양학, 농업기계학의 3분야에 의한 정밀농업 공동연구의 체제가 정립되었다. 동경 농공대학 농학연구부에서는 1996년경부터 초산태 질소를 조사하는 토양 센서를 개발함과 동시에 정밀농업 세미나 개최와 해외조사를 실시하고 있다. 이 세미나는 국내외의 제1선의 연구자를 다수 초청하고 있고 동시에 각

분야의 관계자가 출석하고 있다. 2000년 3월까지 9회의 세미나가 열렸는데 이것이 일본에서의 정밀농업 연구에 큰 공헌을 하고 있다. 1998년부터 농림수산성 북륙농업시험장에서는 기관장(機關長)을 리더로, 지역선도 기술 종합연구로서 종합연구 제1팀을 중심으로 7개의 전문분야가 참여해서 생육정보 수집 처리기술을 활용한 저투입형 고품질 수·도작 영농 시스템의 확립이란 과제로 연구가 시작되었다. 현재, 통상산업성의 지역연구 컨소시엄으로서 북해도 대학, 북해도 임농업 시험장, 공업시험장, 전문업체 등이 다수 참여해 대규모 프로젝트를 수행하고 있다. 같은 해, 생연기구에서도 21세기형 긴급개발사업으로 정밀농업 연구를 선택하였고 농림수산기술정보 협회에서는 정밀농업용 센서 개발의 지원을 시작하였다. 2000년부터는 농림수산성 농림 수산기술 회의의 경료화(輕勞化) 제3기에 정밀농업이 채택되었다. 이 외, 류큐(琉球)대학, 미에(三重)대학, 이시가와(石川)현 농업시험장, 또한 미국에서의 재외 연구로 정밀농업 연구를 수행했거나, 연구를 계속하고 있는 사람 등 다수의 사람이 정밀농업의 연구를 행하고 있다. 현재 일본에서는 정밀농업에 관한 연구가 본격적으로 시작되었다.

3. 질소시비량 산출 모델

벼에는 수확량을 최적으로 하는 면적당의 벼의 꽃수(벼알수)가 존재한다. 이런 벼알수는 출수기의 벼의 질소 보유량에 의해 결정된다. 벼알수는 조건의 불균형에 의해 포장내에서도 변동한다. 벼알수를 일정하게 하기 위해서 이삭거름 살포시 질소 함유량을 추정하고 토양으로부터 공급되어지는 질소, 즉 토양으로부터의 질소를 고려해서 가변시비를 수행하는 것이 필요하다. 좁은 의미로는 이런 일을 정밀농업이라고도 부른다. 시비법의 개념으로서 한대지역에서는 초봄에 미생물의 활동이 충분하지 않아 전년도의 수확량에 기초를 둔 밀거름의 살포계획이 중요하다. 이삭거름 시에는 지온(地溫)의 상승으로 인한 미생물의 활동이 활발해지기 때문에 토양으로부터 영양분이 공급된다. 이

에 반해 온대지역에서는 초봄에도 미생물의 활동이 활발하게 되어 토양으로부터 영양분이 공급되어지기 때문에 이삭거름 시는 토양에서의 질소 공급은 부족한 기미가 있다. 이렇기 때문에 이삭거름의 조정에 의한 벼알수 제어가 필요하다. 실험을 하고 있는 교토대학 대학원 농학연구과 부속농장은 온대지역에 속하기 때문에 밀거름을 균일 살포하고 이삭거름을 가변시비 할 것을 전체로 정밀농업 연구를 진행하고 있다. 이에 반해 한대지역에 속하는 농립수산성 북육농업시험장에서는 수확량지도로부터 지력질소를 추정해 실시하는 밀거름 설계를 증시하고 있다. 실험농장에서 우리들이 조사한 면적당의 벼알수와 수확량의 관계 및 벼알수와 출수기의 최적질소보유량(N_{op})의 관계를 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 수확량을 증가시키는데에는 적당량의 벼알수가 필요하지만 너무 증가하면 등숙보합(登熟歩合)이 감소하기 때문에 수확량에는 상한(上限)이 존재한다.

실험농장에서의 적당한 벼알수는 평방미터당 35,000~40,000립(粒)으로 나타났고 출수기에 보유한 벼의 질소량은 $N_{op}=12\sim 13\text{kg}/10\text{a}$ 였다. 이삭거름의 질소시비량의 산출은 다음 식으로 표현된다.

$$N_c = N_f/j = (N_{op} - h - N_s)/j \text{ ----- (1)}$$

여기서,

- N_c : 실제의 질소시비량
- N_f : 이삭거름의 살포시 비료로부터 흡수해야 할 질소량
- j : 이삭비료의 이용률
- N_{op} : 벼의 꽃수로부터 결정되는 출수기의 최적 질소보유량
- h : 이삭거름 살포시 벼가 보유하고 있는 질소량
- N_s : 이삭거름 살포시로부터 출수기까지 벼가 흡수하는 토양으로부터의 질소량

이삭거름의 살포시, 벼가 보유하고 있는 질소량(h)은 머신비전에 의한 벼 잎색의 반사율로부터 추정한다.

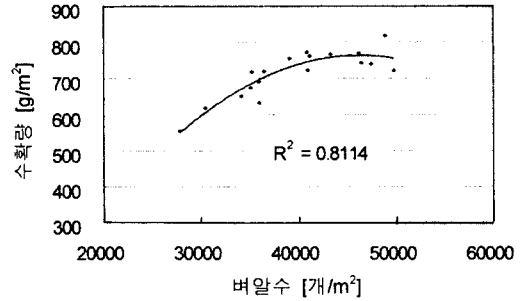


Fig. 1 벼알수와 수확량의 관계.

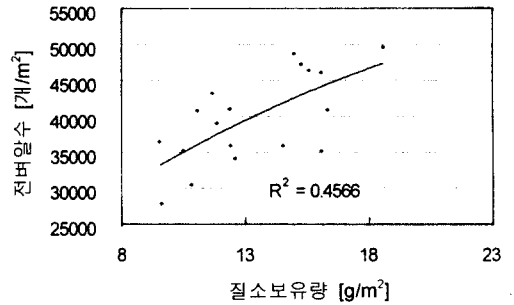


Fig. 2 출수기에 있어서 질소보유량과 벼알수의 관계.

4. 식생지수-머신비전을 이용한 질소량 h 의 측정

광합성의 지표인 엽록소는 500nm부근의 녹색광과 650nm부근의 적색광을 흡수한다. 이 때문에 엽록소의 함유량에 따라 녹색과 적색의 반사율은 변화한다. 이에 반해 800nm의 근적외선은 엽록소의 함유량에 따라 변화하지 않는다. 1998년에 실내실험에서 단색 CCD 카메라를 사용해 영상을 획득하고 535nm(녹), 670nm(적), 800nm(근적외)의 반사율을 조사하였다. 이 결과에서 녹색과 적색의 흡수율은 잎이 보유한 엽록소량에 의해 변화하지만 근적외선에서는 변화하지 않는 것을 확인하였다. 이 반사율의 상이(相異)를 식생지수라 부르고 지수로서 표현한다. 가장 기본적인 것이 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)라고 부르고 다음과 같이 표현한다.

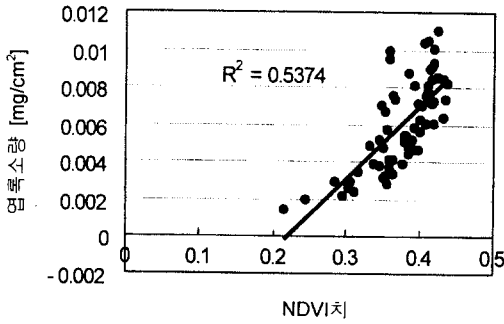


Fig. 3 식생지수(NDVI)와 엽록소량의 관계.

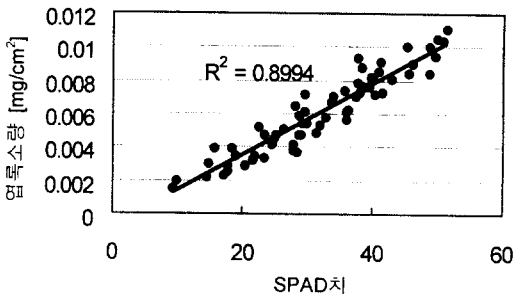


Fig. 4 실내실험에 있어서 SPAD치와 엽록소량의 관계.

$$NDVI = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670}) \dots\dots\dots (2)$$

이 외에 근적외선과 적색의 비, 근적외선과 녹색의 비를 식생지수로 하는 방법도 이용되었다. 식생지수와 엽록소 함유량의 관계를 그림 3에 표시하였다. 그 결과, 식생지수에서 엽록소 함유량을 추정하는 것이 가능하다는 것이 시사되었다.

식생지수보다 좀 더 정확하게 엽록소량을 추정하는 방법으로서 농림수산성에서 개발한 질소량계 SPAD-502를 사용하는 방법이 있다. 이 측정기는 적색과 근적외선의 발광 다이오드와 수광부를 가지고 있으며 잎을 끼워서 적색과 근적외선의 통과량을 측정해 엽록소 양을 추정한다. SPAD-502로 측정한 SPAD치와 엽록소 양의 관계를 그림 4에 나타내었다. 실내 실험에서는 정확하게 SPAD치로부터 엽록소 함량을 추정할 수 있다는 것이 확인되었다.



Fig. 5 생육량조사 포장의 준비 (1999년 6월).

5. 질소량 h 추정을 위한 포장실험

실험농장의 토질은 회색저지토(灰色低地土)로 점토질 롬(점토 23%, 실트 30%, 모래 47%)으로 구성되어 있다. 약 10a(20m×50m)의 포장에서 휴반판(畦畔板)을 이용해서 한 구획을 5m×6m로 분할하여 총 27구획으로 분할하여 질소비료를 밀거름으로서 각각 0, 3, 6kg/10a, 이삭거름을 각각 0, 3, 6kg/10a의 모두 9가지로 변화시켜 조합되어진 것을 3조로 살포했다. 질소비료는 NK비료를 사용했고 칼리도 질소와 동일한 만큼 증감시켰지만, 인산은 밀거름에만 3kg/10a를 균일하게 살포했다. 살포비료가 변화한 만큼 잎색이 변화되지 않을 것을 걱정해 중앙의 8구획에 대해서는 일정기간 차광막을 설치해 일사량을 감소시켰다. 그림 5에서는 생육량조사를 위한 포장준비작업의 모습을 나타내고 있다.

토양시료는 썩어질 전인 1999년 5월 10일, 1구획 1 샘플링으로 모두 27개를 채취하였다. 각 시료는 구획의 중심에서 반경 100cm 안에서 깊이 15cm까지 5점을 채취한 후 그것을 혼합시켜 합성시료로 했다. 토양시료를 건조한 후, 2mm 메쉬의 체로 선별 후 전탄소, 전질소 그리고 무기화 질소를 분석하였다. 무기화 질소는 토양을 통풍이 잘 되는 곳에서 건조한 후 30℃의 향온실에서 4주간 배양해 구한 값으로서 지력질소의 지표이다. 실제

의 포장에서의 무기화 질소량은 유효적산 온도법의 개념을 적용해, 측정일로부터 일수와 포장에서의 적산온도로부터 환산할 필요가 있다.

단색 CCD카메라에 535nm(녹), 657nm(적), 800nm(근적외선) 파장의 간섭필터를 붙여서, 포장의 상태를 구획별로 촬영했다. 촬영은 분얼기, 최고분얼기, 유수형성기, 출수기에 실시했다. SPAD치는 실내실험과 같이 SPAD-502를 이용해 분얼기, 최고분얼기, 유수형성기, 출수기에 측정하였다. 벼 1주(株)에 대해 한 장의 잎을 선택한 후 3곳을 측정하고, 1구획에 대해서는 8주를 조사해서 그 평균치를 1구획의 값으로 했다. 벼의 키는 SPAD치를 측정한 포기과 같은 8주를 대상으로 줄자를 이용하여 측정해 8주의 평균치를 그 구획의 대표치로 했다. 생육량 조사는 분얼수와 화학분석에 의한 질소보유량을 조사하기 위해 머신비전에 의한 촬영과 동시에 SPAD치의 조사를 실시한 분얼기, 최고분얼기, 유수형성기, 출수기에 실시했다. 조사주수(株數)는 1 구획에 벼 8주로 했다. 분얼수와 잎면적을 측정한 후 이삭, 줄기 그리고 잎을 분리해 건조한 후 각 부위별로 C/N코더를 이용해 질소농도를 측정했다. 이 작업에 의해 각 시기에 있어서 수량과 질소량의 관계, 식생지수와 질소 보유량, 질소농도, 벼의 키 및 건물량의 관계가 분명하게 되었다. 또한, 이삭거름을 살포하지 않은 실험구에 있어서 유수형성기에 벼가 보유하고 있는 질소량으로부터 출수기에 벼가 보유하고 있는 질소량의 차를 구함으로서 토양에서 공급되어진 질소, 즉, 토양으로부터 공급받은 질소량을 구할 수 있었다. 이번의 실험에서는 토양으로부터 공급받은 질소량은 약 6kg/10a이었다. 이 결과 최고분얼기의 식생지수와 관계는 낮았지만 이삭거름을 살포하는 유수형성기에서는 식생지수와 질소 보유량의 관계가 결정계수 $R^2=0.7$ 정도였고, 머신비전으로 질소량을 측정할 수 있는 가능성은 높을 것으로 판단되었다. 이것에 관해서는 금후에 실험을 계속할 예정으로 있다. SPAD치와 질소량의 관계는 결정계수 $R^2=0.75$ 로 높았지만 SPAD치와 머신비전에 의한 추정치는 상관이 낮았다.

수확량 조사는 1구획에 벼16주를 샘플링해서 10

일간 그늘에서 말린 후, 천립중(千粒重), 등숙보합, 벼알수를 조사했다. 평방 미터당의 벼알수, 질소보유량 그리고 수확량의 관계는 이 실험으로부터 산출한 것이다. 전에 언급한 벼알수와 수확량, 벼알수와 등숙보합, 질소 보유량과 벼알수 등도 이 실험에 의해 얻어진 것이다.

6. 포장지도의 작성

가. 실험포장

포장지도의 작성은 타카즈키 농장의 0.5ha의 포장에서 1997년부터 실시하고 있다. 1999년까지의 3년간은 밀거름과 이삭거름으로서 질소와 칼리비료는 3kg/10a, 인산비료는 밀거름으로만 3kg/10a를 균일하게 시비했다.

나. 토양지도

1997년 가을, 1998년 봄, 1999년 봄의 3회에 걸쳐서 0.5ha의 포장을 5m×10m의 구획으로 나누어 100점의 토양샘플링을 실시해 pH, 전기전도도, 전질소, 전탄소, 유기태 인산, 교환성마그네슘, 칼슘, 나트륨, 칼리 그리고 무기화 질소를 분석해 토양지도를 작성했다. 식물은 유기물이 미생물의 활동으로 무기화 된 영양분을 흡수하게 된다. 미생물의 활동이 활발하면 유기물을 포함해 전질소가 많은 곳은 무기화 질소가 증가한다. 그러나, 미생물의 활동에 변동이 있으면, 전질소와 무기화 질소의 경향은 일치하지 않는다. 미생물의 활동은 온도에 따라 틀리기 때문에 기후의 영향을 받는다. 무기화 질소지도의 예를 그림 6에 나타내었다.

다. 생육량지도

생육량지도는 벼의 보유질소량, 키, 건물량(乾物量)의 지도이다. 질소량은 녹(535nm), 적(670nm), 근적외선(800nm) 파장의 반사율을 측정해 식생지수로부터 추정한다든가, 또는 SPAD치를 구해서 추정 가능하다. 2000년도에는 헬리콥터로부터 반

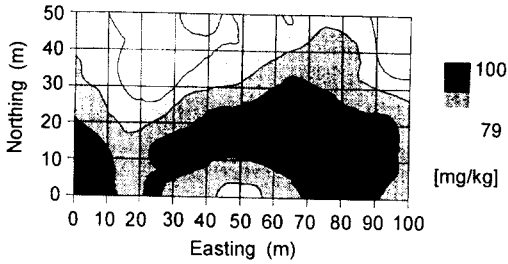


Fig. 6 무기화 질소 지도.

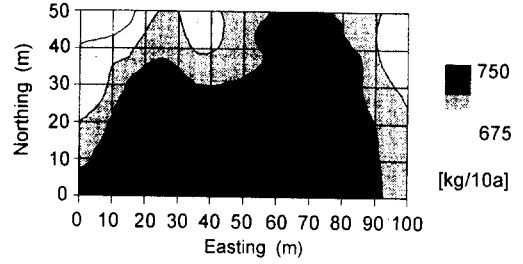


Fig. 7 곡물수확량 지도.

사율을 측정할 예정으로 있지만 1999년도는 엽록소계 SPAD-502로 SPAD치 지도를 작성했다. 이 결과로부터, 균일시비를 실시했기 때문에 비의 이양 직후는 밀거름의 영향으로 SPAD치에는 거의 차가 없지만, 밀거름이 흡수되면 토양의 영양분의 변화에 의한 변동이 생겼다. 또 이삭거름 직후는 질소스트레스가 많은 벼는 잘 흡수하기 때문에 변동이 급속히 감소한다는 사실이 일어났다. 그후 성장해 감에 따라 이삭거름이 흡수되고 토양영양분 분포의 영향으로 비의 질소 보유량에도 변동이 생긴다는 사실을 알았다. 이 데이터는 엄밀하게 이삭거름의 살포를 실시하지 않고도 균일한 이삭거름에 의해 SPAD치, 즉 비의 질소 보유량의 변동이 감소한다는 사실을 나타내고 있다. 가변시비에 관해서는 2000년부터 실시할 예정으로 있으며 어떤 시비법이 유효한가에 관해서는 금후의 과제이다.

라. 수확량 지도

1997년 가을부터 비의 곡물 수확량조사를 실시하고 있고 동시에 벧짚수확량 조사도 실시하고 있다. 왜냐하면, 벧짚은 바이오매스 자원으로서 활용이 가능하고 자탈형 콤바인은 예취한 벧를 가지런히 정리해 피드체인으로 파지한 상태에서 탈곡을 실시하기 때문에 벧짚수확량으로부터 곡물의 수확량을 추정할 수 있기 때문이다. 곡물수확량지도의 예를 그림 7에 나타낸다. 이삭거름의 균일시비에 의해 시비후, SPAD치는 변동이 감소했지만, 수확량은 변동했다. 수확량의 변동은 무기화 질소의 변동과 유사하지만 무기화 질소의 변동과 동일한

게 변화하고 있지는 않다. 이 때문에 포장의 고저차지도의 작성, 유기물을 살포한 이력지도, 관계수의 흐름 등의 포장 전 정보를 종합해 고찰하고 있다. 실험포장은 관계수입구가 그림 7의 상부좌측(북서)의 모서리이고 관계수 출구는 우측하부(남동)의 모서리이다. 이 포장은 과거에 5개의 포장을 1개의 포장으로 기반정비를 실시했기 때문에 포장전체가 파도의 형태로 변화하고 있었다. 수확량에 영향을 미치는 요인의 고찰을 하기 위해서는 금후에도 계속해서 연구를 실시할 예정으로 있다. 이상의 포장지도를 작성함에 있어서는 공간통계학, 즉 지오스타티스틱스 (geostatistics)를 이용해 포장정보의 공간변동과 의존성을 해석한 후에 크리깅 수법을 이용해 지도를 작성하였다. 지도작성 프로그램은 현재 시판되고 있는 컴퓨터용 소프트웨어, GS+ Version 3. 1 for Windows (Gamma Design Software)를 이용하였다.

7. 맺 음 말

정밀농업의 기초로 되는 벧알수 모델, 머신비전에 의한 질소 보유량의 추정 그리고 포장지도에 관해서 간략하게 소개를 하였다. 본 프로젝트에서는 가변시비에 의한 변동의 감소를 계측하기 전에 수도작 논에 있어서 공간변동은 어떤 것인가를 파악하는데 중점을 두었다. 이 때문에 밀거름과 이삭거름을 균일하게 시비했다. 토양질소량의 변동, 특히 영양분의 기초가 되는 무기화 질소의 변동과 수확량에 관해서는 상관관계가 있지만, 무기화 질소의 변동만이 수확량을 결정하는 것은 아니다. 금후, 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다. 2년

정도 전에 어떤 농업기계 회사의 한 분으로부터 “일본에서도 정밀농업의 연구를 시작할 필요가 있는가”라는 질문을 받은 적이 있었다. 그때 본인은 수도작이 전작에 비해 환경보전효과가 크고, 일본의 평균 경영규모는 북해도를 제외하고 1ha 미만이며, 현재에도 정밀하게 관리되고 있기 때문에 정밀농업이 사회 전반에 걸쳐서 관심사항으로 대두되기에는 상당히 이르다는 생각을 해 “필요 없습니다. 필요하게 될 것 같으면 5년 전에 미리 가르쳐 드리겠습니다”라고 말했었다. 정밀농업의 연구에 몰두한지 4년이 경과하면서 1999년의 데이터로부터 일본에서도 정밀농업이 유효할 것이라고 생각하였다. 이 때문에 일본에서의 정밀농업은 아직 연구단계에 있지만 최근에는 아직 “5년전과 같이 생각하지는 않지만 정밀농업에 관심을 가지고 계시는 게 좋을 것 같습니다”라고 말을 바꾸고 있다. 다음 호에서는 정밀농업에 필요한 센서와 가변작업기에 관해서 소개를 할 예정으로 있다.

참 고 문 헌

1. 久馬 一剛. 1997. 食料生産と環境. 化學同人
2. 梅田幹雄. 1998. 農業と環境. 化學工學 62(5) : 269-271.
3. 特集 21世紀の技術 フレッシュアグリカルチャ (2). 1999. 日本農業機械學會誌 61(4) : 4-19.
4. 李 民贊, 他. 1999. 土壤マッピングにおけるグリッド内サンプリングサイズの検討. 日本農業機械學會誌 61(5) : 65-73.
5. 澁澤 榮, 他. 1999. リアルタイム土中光センサーの開発. 日本農業機械學會誌 61(3):131-133.
6. 山根 一郎. 1988. 土と微生物と肥料のはたらき. 農文協.
7. 日本土壤肥料學會編. 1990. 水田土壤の窒素無機化と施肥. 博友社.
8. Iida K. et al. 2000. Estimation of Nitrogen Content Using Machine Vision in a Paddy Field. ASAE paper No. 003021.
9. Lee C-K. et al. 2000. Field Information Maps Using Geostatistics in the Paddy Field. ASAE paper No. 001108.
10. Lee C-K. et al. 2000. Spatial Variability of Soil Properties in the Paddy Field. Soil Science and Plant Nutrition. 46(2) : 473-482.
11. 李 忠根, 外3人. 2000. ジオスタティスティクスを用いた水田における土壤化學特性値の空間變動解析. 土壤肥料學會誌. 71(4) : 520-529.
12. Stewart, B. A. 1985. Advances in Soil Science. Vol. 3 : 8-34.