

## 寒地水稻における施肥法別の窒素利用率と各器官への分配率が白米タンパク質含有量に及ぼす影響

後藤英次・野村美智子・稲津脩

(北海道立上川農業試験場)

**要旨：**近年、北海道米の食味は良食味品種の育成と肥培管理技術の開発などにより大きく向上してきたが、依然として白米タンパク質含有量の低減と変動幅の縮小が求められている。白米タンパク質含有量の変動は水稻の窒素吸収の影響が大きく、水稻の窒素吸収量は施肥量と施肥法に関係していることから、重窒素標識硫酸を用いた水稻の窒素施肥法に関わる試験を行い、水稻への利用率、稲体各器官における分配及び白米タンパク質含有量に及ぼす影響について検討した。全層施肥の窒素利用率は32.4～41.2%であり、窒素施肥量の増加とともに利用率や白米タンパク質含有量が高まった。また、全量全層施肥窒素8 g m<sup>-2</sup>区において吸収された施肥窒素の分配率は茎葉部36.5%、穂部63.5%であり、白米には45.4%が集積した。全層+表層施肥は白米タンパク質含有量を低下させるが、全量全層施肥および全層+側条施肥よりも窒素利用率が低く、収量性が劣っていた。側条施肥の窒素利用率は全量全層施肥より高いが、その吸収は止葉期以前に集中しており、穂および白米への分配率が全量全層施肥と比較して低いことから、白米タンパク質含有量は低かった。全量全層施肥された窒素の次年度以降の利用率は、2年目が2.9～4.0%、3年目が1.3～1.8%、3カ年を合計した窒素利用率は41.9～48.6%であった。また、施肥後3年目でも、施肥された窒素のうち20%近くが土壌に残存していた。したがって、低タンパク質米生産には、施肥窒素量の適正化を図るとともに生育初期の窒素吸収を促進させる側条施肥を組み合わせることが合理的と判断できる。

**キーワード：**重窒素、水稻、施肥位置、タンパク質含有量、窒素利用率。

近年、米の流通は自由化が大きく進行したことから、日本国内の産地間における競争や良食味・高品質化・安全性による差別化が顕著となった。北海道米の食味は「きらら397」、「ほしのゆめ」などの良食味品種の育成と肥培管理技術の開発などにより大きく向上してきたが、白米タンパク質含有量は依然高い（北海道米高水準食味確立緊急対策協議会2004）。

白米タンパク質含有量が高いほど食味評価値が劣り、米飯の粘性、弾性も低下する。この傾向は白米タンパク質含有量85 g kg<sup>-1</sup>以上で顕著であることが報告されている（南・土居1973、石間ら1974、稲津1988）。食味官能試験ではタンパク質含有量の差が5 g kg<sup>-1</sup>以上で判別が可能であり、10 g kg<sup>-1</sup>以上では明らかな差が認められるとの報告もある（清藤ら1992）。実需においては、地域内における白米タンパク質含有量の変動幅の縮小も求められている。

白米タンパク質含有量の変動は水稻の窒素吸収の影響が大きく、水稻の窒素吸収量は施肥量と施肥法に関係している。水稻に対する窒素施肥技術は、これまでに多くの研究が行われ、その中には重窒素を用いた施肥窒素の利用率に関する報告もある（古山ら1974、御子柴1982、藤原ら1991、廣川ら1992、清藤ら1992）。これらの報告を見ると、特に、北海道における施肥窒素の利用率は、全層施肥窒素(8 g m<sup>-2</sup>)の平均値が27～35%であった（古山ら1974）。ただし、北海道の基肥施用技術は近年になり全層施肥以外に、表層施肥（西潟ら1960、坂本ら1985）、側条施肥（北海道農政部1984、土居1985、大山1987、三浦ら1991）が

開発され指導・普及されてきた。具体的には表層施肥が作土表層0～5 cmに、側条施肥が株横3 cm、深さ3～5 cmの局所に条施する方法である（三浦1996）。これらは生育初期の吸収が高く、生育の促進が求められる寒地稲作において重要な技術であるが、両施肥法とも土壌窒素肥沃度の低い場合には生育後期の凋落も見られるため、全層施肥との組み合わせ（全層+表層、全層+側条）が推奨されている。ただし、これらの施肥技術は主に水稻の安定多収を目的としており、白米タンパク質含有量に及ぼす影響は未検討な点が多い。

そこで本試験では、重窒素標識硫酸を用いた施肥窒素量および表層施肥、側条施肥に関する試験を水田圃場で実施し、窒素施肥法別に見た窒素の利用率とこれの分配、白米タンパク質含有量及び土壌への残留を解析した。その際、北海道では幼穂形成期～止葉期（減数分裂期）頃に1回程度追肥することも少なくないが、追肥の可否や時期は苗の種類（三浦1996）、気象、幼穂形成期前の土壌診断（北海道農政部1999b）などにより異なる。本試験では、基肥窒素の吸収と分配に関する解析を目的とするため、窒素追肥は行わなかった。

### 材料と方法

#### 1. 供試圃場および栽培概要

試験は1991年～1993年に北海道旭川市永山の上川農業試験場水田（腐植質褐色低地土）で実施した。作土の土色は暗灰、土性がCL、化学性は全炭素含量：64.6 g kg<sup>-1</sup>、

全窒素含量:  $4.9 \text{ g kg}^{-1}$ , CEC:  $27.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ): 5.8 であり, 60 cm 以下に砂礫層が出現する排水良好な土壌である. 試験区は1連制で水田圃場内に木枠を組み, 木枠の左右2カ所には幅5 cm 程度の穴を設け, 代かき時以外は田面水を枠外と連絡させた. 試験規模は  $1.2 \text{ m}^2$  ( $1.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ ) で実施した.

供試品種は北海道の奨励品種である「きらら397」を用いた. 中苗箱マツト苗を用いて条間30 cm, 株間12 cm で, 8株 $\times$ 4列=32株を手植え(4本植)した. 移植は1991年: 5月21日, 1992年: 5月21日, 1993年: 5月20日, 止葉期(葉耳間長0の茎が40~50%抽出した日, 減数分裂期に相当)は1991年: 7月21日, 1992年: 7月24日, 1993年: 7月27日, 成熟期は1991年: 9月18日, 1992年: 9月28日, 1993年: 10月4日であった. 稲わらは毎年圃場から搬出し, 水管理は移植から8月上旬まで連続湛水した.

## 2. 窒素施肥法と施肥量

窒素は硫酸を用いて全量全層施肥, 全層+表層施肥および全層+側条施肥を行い, 全量全層施肥および全層と組み合わせた. 表層, 側条施肥分の窒素には重窒素標識硫酸を用いた. 全量全層施肥処理では施肥窒素量0, 4, 8, 12,  $16 \text{ g m}^{-2}$  区を設け, 全層+表層施肥および全層+側条施肥処理では全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区を標準として, 全層  $4 \text{ g m}^{-2}$  + 表層  $4 \text{ g m}^{-2}$  (以下, 全層+表層区), 全層  $4 \text{ g m}^{-2}$  + 側条  $4 \text{ g m}^{-2}$  (以下, 全層+側条区) で施肥した. 重窒素標識硫酸の重窒素濃度は, 全量全層  $4 \text{ g m}^{-2}$  区と表層および側条施肥では7.12 atom%, 全量全層8, 12,  $16 \text{ g m}^{-2}$  区では4.13 atom%のものをを用いた. リン酸( $\text{P}_2\text{O}_5$ )とカリ( $\text{K}_2\text{O}$ )はPK化成肥料で各々  $8 \text{ g m}^{-2}$  となるように全量全層施肥で与えた.

全層施肥は耕起時に施用し, 深さ15 cm まで混和した. 表層施肥は代かき後に落水し, 表面施用してから深さ5 cm を目安に土壌と混和した. 側条施肥は代かき後に落水し, 稲株の横3 cm, 深さ5 cm の溝を作って施用した.

重窒素標識硫酸を用いた施肥の処理は1991年と1992年の2カ年行ったが, 1991年に施用した圃場では1992年と1993年に同様の施肥を非標識硫酸で行い, 初年目に施肥した窒素の残効を調査した.

## 3. 調査分析方法

各処理の茎葉分析用試料として, 止葉期に試験枠の4列目の8株の茎数, 成熟期には試験区の枠内2列目に位置する8株の穂数を調査し, その中から中庸な株(止葉期2株, 成熟期3株)を抜き取った. 成熟期のサンプルは稈, 葉鞘, 葉身, 穂に区分し, 穂以外の画分を70°Cで乾燥, 粉碎した. 全窒素の定量はケルダール法によった. また, 重窒素の定量は硫酸を受液としてケルダール法により蒸留, 受液をホットプレート上で濃縮したものを, 昭光通商(株)に分析依頼した. 分析には質量分析計(中根1963)(日立RMI-2型)

を用いて定量した.

穂部は試料と別に枠内から20株を収穫し, 脱穀して稲わらと籾の重量を測定した. その後, 籾摺りをして籾殻と玄米に分画し, この玄米重と栽植密度から収量を算出した. さらに, 得られた玄米は搗精歩合90%になるように設定した小型精米機(ケット社, パーレスト)を用い, 糠と白米に分画した. これらを茎葉と同様に乾燥, 粉碎, 分析した. これにより得られた吸収窒素量の施肥窒素量に対する割合を施肥窒素の利用率, 吸収された総施肥窒素量に占める各器官の比率を吸収された施肥窒素の分配率とした.

分析用の抜き取り調査および収穫調査では, 地際刈りとして地上部のみを取り扱い, 地中の茎部および根は圃場に残留した. 成熟期の茎葉部の窒素吸収量の算出には, 茎葉試料の稈, 葉鞘, 葉身乾物重の比率を, 脱穀により得られた稲わらの乾物重に掛け合わせて得られた換算重量を用いた. 穂部の場合は, 脱穀後に得られた各画分の乾物重を用いた. また, 白米タンパク質含有量は白米中の窒素含有量に5.95を乗じて乾物あたりで示した.

収穫後に枠内の作土(深さ0~15 cm)の土壌を採取・風乾した後, ケルダール法(土壌環境分析法編集委員会-硫酸分解法1997)により全窒素を分析し, 重窒素についても硫酸分解液を用いて作物体と同様に処理した後, 分析依頼した. これにより得られた窒素を土壌残存窒素とし, 施肥窒素から水稻吸収窒素と土壌残存窒素を差し引いた値を消失窒素(脱窒, 溶脱, 流失の合計)として取り扱った.

## 結 果

### 1. 全量全層施肥における窒素量別の窒素利用率および各器官への分配

試験は1991年と1992年の2カ年に行ったが, 両年ともほぼ同様の傾向にあったので, 本報では主に平均値を用いて検討する. 成熟期の総窒素吸収量は施肥窒素量に伴って増加し, 2カ年平均で最低の全量全層  $4 \text{ g m}^{-2}$  区が  $9.98 \text{ g m}^{-2}$ , 最高の  $16 \text{ g m}^{-2}$  区が  $16.42 \text{ g m}^{-2}$  であった(第1表). また,  $0 \text{ g m}^{-2}$  区における成熟期の総窒素吸収量は  $6.52 \text{ g m}^{-2}$  であった. 重窒素分析により得られた成熟期の施肥窒素吸収量も施肥窒素量に伴って増加し, 2カ年平均で最低の全量全層  $4 \text{ g m}^{-2}$  区が  $1.30 \text{ g m}^{-2}$ , 最高の  $16 \text{ g m}^{-2}$  区が  $6.58 \text{ g m}^{-2}$  となった(第1表). 成熟期の総窒素吸収量から施肥窒素吸収量を差し引いた土壌由来の窒素吸収量は, 若干であり有意な差ではないことが多いものの, 施肥量に伴って増加する傾向にあった.

成熟期の窒素吸収量に占める施肥由来窒素の割合は2カ年平均で  $4 \text{ g m}^{-2}$  区が13.0%,  $8 \text{ g m}^{-2}$  区が24.3%,  $12 \text{ g m}^{-2}$  区が32.6%,  $16 \text{ g m}^{-2}$  区が40.1%であり, 施肥窒素量の増加に伴って直線的に高まった(第1表). 同様に, 施肥窒素の利用度も2カ年平均で  $4 \text{ g m}^{-2}$  区が32.4%,  $8 \text{ g m}^{-2}$  区が35.5%,  $12 \text{ g m}^{-2}$  区が37.7%,  $16 \text{ g m}^{-2}$  区が41.2%であり, 施肥窒素量の増加に伴って高まる傾向に

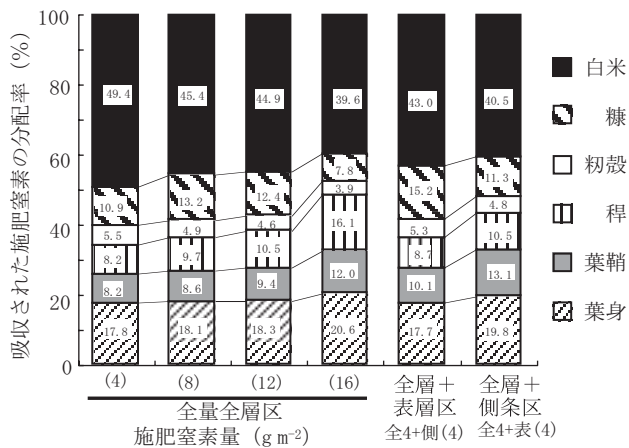
第1表 施肥窒素用量および施肥位置が施肥窒素の利用率に及ぼす影響.

項 目	全量全層区					全層+表層区	全層+側条区
	施肥窒素量 ( $\text{g m}^{-2}$ )					( $\text{g m}^{-2}$ )	( $\text{g m}^{-2}$ )
	0	(4)	(8)	(12)	(16)	全4+表(4)	全4+側(4)
成熟期窒素吸収量 A ( $\text{g m}^{-2}$ )	6.52 a	9.98 ab	11.65 ab	13.87 bc	16.42 c	10.74 ab	12.31 bc
成熟期施肥窒素吸収量 B ( $\text{g m}^{-2}$ )	—	1.30 a	2.84 b	4.52 c	6.58 d	0.95 a	1.48 a
土壌由来の窒素吸収量 (A-B)	6.52 a	8.68 ab	8.81 ab	9.35 ab	9.84 b	—	—
成熟期窒素吸収量に占める 施肥由来窒素の割合 (%)	—	13.0 a	24.3 b	32.6 c	40.1 d	—	—
施肥窒素の利用率 (%)	—	32.4 ab	35.5 ab	37.7 ab	41.2 b	23.8 a	37.0 ab

施肥窒素の吸収量および利用率は ( ) 内の施肥窒素を対象とする.

1991年, 1992年の平均値.

各項目における異なる英小文字は, Tukey-Kramer test により 5%水準で有意差があることを示す.



第1図 吸収された施肥窒素の各器官への分配率.  
1991年, 1992年の平均値.  
分配率は ( ) 内の施肥窒素を対象とした.

あった.

水稻に吸収された施肥窒素の各器官への分配率を図に示した (第1図). 茎葉 (葉身, 葉鞘, 稈) の分配率は, 施肥窒素量の増加に伴って高まったが, 白米への分配率は施肥窒素量の増加に伴って低下した. 北海道における施肥窒素量は概ね  $8 \sim 9 \text{ g m}^{-2}$  程度であるが (北海道農政部 2001), 本試験の  $8 \text{ g m}^{-2}$  区の分配率でみると, 葉身: 18.1%, 葉鞘 8.6%, 稈 9.8%, 籾殻 4.9%, 糯 13.2%, 白米: 45.4% であり, 葉身合計が 36.5% に対し, 穂部が 63.5% と大きかった.

白米タンパク質含有量については有意な差ではないが, 最低が  $4 \text{ g m}^{-2}$  区:  $71.8 \text{ g kg}^{-1}$ , 最高が  $16 \text{ g m}^{-2}$  区:  $84.9 \text{ g kg}^{-1}$  であり,  $0 \text{ g m}^{-2}$  区の  $73.6 \text{ g kg}^{-1}$  を除いて全層施肥窒素量の増加に伴って高まった (第2表). また, 2カ年平均の精玄米収量は  $0 \text{ g m}^{-2}$  区が  $299 \text{ g m}^{-2}$  と最も低く, 4

第2表 窒素施肥用量および施肥位置が収量構成要素に及ぼす影響.

項 目	全量全層区					全層+表層区	全層+側条区
	施肥窒素量 ( $\text{g m}^{-2}$ )					( $\text{g m}^{-2}$ )	( $\text{g m}^{-2}$ )
	0	(4)	(8)	(12)	(16)	全4+表(4)	全4+側(4)
総粒数 ( $\times 1000 \text{ 粒 m}^{-2}$ )	14.7 a	24.2 ab	29.5 ab	37.4 b	38.7 b	24.7 ab	31.3 b
千粒重 (g)	22.3 a	21.1 ab	21.0 ab	20.5 b	20.2 b	21.1 ab	20.9 ab
不稔歩合 (%)	4.9 a	6.7 a	15.7 b	17.4 b	33.3 c	10.0 ab	11.5 ab
稈実粒数 A ( $\times 1000 \text{ 粒 m}^{-2}$ )	14.0 a	22.6 ab	24.9 ab	30.9 b	25.8 ab	22.2 ab	27.8 ab
精玄米収量 ( $\text{g m}^{-2}$ )	299 a	448 a	510 a	549 a	525 a	452 a	517 a
白米へ分配された施肥窒素 吸収量 B ( $\text{g m}^{-2}$ )	—	0.64 ab	1.29 bc	2.04 cd	2.60 d	0.41 a	0.60 ab
白米当りに分配された施肥窒素量 B/A (1000 粒当りの窒素 mg)	—	28.4 ab	51.5 bc	66.2 c	100.8 d	18.4 a	21.9 a
白米タンパク質含有量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	73.6 a	71.8 a	73.8 a	78.1 a	84.9 a	69.9 a	71.4 a

施肥窒素の吸収量および分配は ( ) 内の施肥窒素を対象とする.

1991年, 1992年の平均値.

各項目における異なる英小文字は, Tukey-Kramer test により 5%水準で有意差があることを示す.

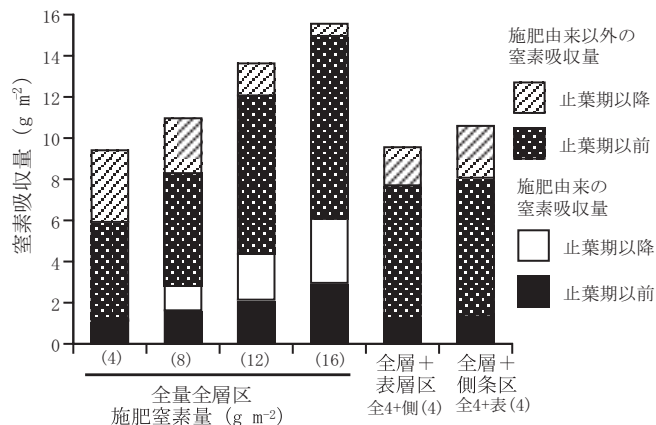


$\text{g m}^{-2}$  区 $\sim 12 \text{ g m}^{-2}$  区は施肥窒素量に伴って増加し、 $16 \text{ g m}^{-2}$  区では  $12 \text{ g m}^{-2}$  区と比較して若干減少した (第2表). 収量構成要素を見ると, 総粒数と不稔歩合は施肥窒素量に従って増加し, 反対に千粒重は低下した. 特に,  $16 \text{ g m}^{-2}$  区では不稔歩合の増加が顕著だった. また, 白米当りに分配された施肥窒素量 (1000 粒当たりの吸収施肥窒素 mg) は, 施肥量の増加に伴って顕著に高まった.

## 2. 施肥法別の窒素利用率および各器官への分配

成熟期の総窒素吸収量は2カ年平均で全層+表層区が  $10.7 \text{ g m}^{-2}$ , 全層+側条区が  $12.3 \text{ g m}^{-2}$ , 重窒素分析により得られた表層および側条に施用された施肥窒素 ( $4 \text{ g m}^{-2}$ ) の吸収量は全層+表層区が  $0.95 \text{ g m}^{-2}$ , 全層+側条区が  $1.48 \text{ g m}^{-2}$  であった (第1表).

表層および側条に施用された施肥窒素 ( $4 \text{ g m}^{-2}$ ) の2カ年平均の利用率は全層+表層区が 23.8%, 全層+側条区が 37.0% であり, 全量全層区  $4 \text{ g m}^{-2}$  区および全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区と比較して全層+表層区で低く, 全層+側条で同程度または高い傾向にあった.



第2図 時期別の吸収窒素量.

1992 年の分析値.

施肥窒素の吸収量は ( ) 内の施肥窒素を対象とした.

全層+表層区および全層+側条区では, 「施肥由来以外の窒素吸収量」に全層施肥窒素  $4 \text{ g}$  が含まれる.

寒冷な北海道では水稻の生育が遅く, 最高分け時期は幼穂形成期以降に現れ, その後止葉期頃までに形成された穎花の退化が起こるとされる (志賀 1994). 穎花の退化防止は窒素含有量と相関があり, 止葉期までの窒素吸収が総粒数の確保に重要であることから, 1992 年の試験では止葉期以前と以降における施肥法別の窒素吸収についても検討した. 表層および側条施肥の窒素吸収は全てが止葉期前であるのに対して, 全層施肥では止葉期以降でも施肥窒素の吸収が行われていた (第2図). 止葉期以降の施肥窒素の吸収は, 全層施肥窒素量が多いほど増加した. 止葉期以前の総窒素吸収量 (施肥由来と施肥由来以外の加算) は全層+側条区で全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区より多かった.

1991 年と 1992 年の2カ年平均の吸収された表層および側条施肥窒素の茎葉への分配率は, 全層+表層区が 36.5%, 全層+側条区が 43.4% であり, 全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区の 36.5% の場合と比較して全層+側条区で高かった (第1図). さらに茎葉を区分すると, 全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区と比較して, 特に全層+側条区で葉鞘への分配が高かった. 白米への分配率は, 全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区が 45.4% であるのに対して, 全層+表層区が 43.0%, 全層+側条区が 40.5% となり, 特に全層+側条区では穂部および白米への窒素の移行が少なかった (第1図).

2カ年平均の白米タンパク質含有量は全層+表層区が  $69.9 \text{ g kg}^{-1}$ , 全層+側条区が  $71.4 \text{ g kg}^{-1}$  であり, 総施肥量が同等である全量全層施肥  $8 \text{ g m}^{-2}$  区よりも低かった (第2表). 収量構成要素を見ると, 総粒数は全層+側条区>全量全層施肥  $8 \text{ g m}^{-2}$  区>全層+表層区の順であり, 不稔歩合は全量全層施肥  $8 \text{ g m}^{-2}$  区が全層+側条区や全層+表層区より高く, 精玄米収量は全層+側条区 $\sim$ 全量全層施肥  $8 \text{ g m}^{-2}$  区>全層+表層区の順であった.

## 3. 施肥窒素の次年度以降における利用率と土壌への残存

施肥初年目 (1991 年) における施肥窒素の利用率は, 各区で異なるが 24.0 $\sim$ 44.3% の範囲にあった (第3表). そ

第3表 施肥窒素の利用率と土壌残存および消失の経年推移.

施肥処理	窒素 ( $\text{g m}^{-2}$ )	施肥窒素利用率				土壌残存窒素			差し引き法による消失窒素		
		A				B			(100-A 累積-B)		
		(%)				(%)			(%)		
		1 年目	2 年目	3 年目	合計	1 年目	2 年目	3 年目	1 年目	2 年目	3 年目
全量全層区	(4)	36.0	4.1	1.8	41.9	48.0	33.4	26.2	16.0	26.5	31.9
	(8)	35.5	4.0	1.8	41.3	37.1	22.3	19.9	27.4	38.2	38.8
	(12)	39.2	2.9	1.6	43.7	33.5	25.9	18.0	27.3	32.0	38.3
	(16)	44.3	3.0	1.3	48.6	25.8	17.0	17.0	29.9	35.7	34.4
全層+表層区	全4+表 (4)	24.0	2.7	1.0	27.7	33.1	24.5	13.3	42.9	48.8	59.0
全層+側条区	全4+側 (4)	41.7	2.5	2.0	46.2	45.0	20.9	13.5	13.3	34.9	40.3

施肥窒素の利用率および土壌残存窒素は ( ) 内の施肥窒素を対象とする.

1991 年 $\sim$ 1993 年に継続調査.

の後、本試験では1991年の試験区と同様の処理を3カ年にわたって継続栽培し、初年目に施肥された窒素の追跡を試みた。

2年目(1992年)では全量全層区(4, 8, 12, 16 g m<sup>-2</sup>区)で2.9~4.1%, 全層+表層区で2.7%, 全層+側条区で2.5%であった(第3表)。3年目(1993年)には各区とも2%以下となった。3カ年間を合計した施肥窒素利用率は全量全層区(4, 8, 12, 16 g m<sup>-2</sup>区)で41.9~48.6%, 全層+表層区で27.7%, 全層+側条区で46.2%であった。

土壌に残存した施肥窒素について見ると、初年目の収穫後には全量全層16 g m<sup>-2</sup>区を除いて施肥窒素の30%以上が土壌に残存していた(第3表)。その後2年目、3年目と減少したが、3年目終了後においても全量全層区で17.0~26.2%, 全層+表層区で13.3%, 全層+側条区で13.5%が土壌に残存していた。差し引き法による消失窒素の年次累積は全量全層施肥で施肥初年目に16.0~29.9%, 2年目に26.5~38.2%, 3年目に31.9~38.8%と増加した。表層施肥の消失窒素は施肥初年目に42.9%と多いが、2年目の増加は少なく48.8%, 3年目は59.0%になった。側条施肥は初年目の消失窒素が各施肥法の中で最も少ない13.3%であるが、2年目に増加して34.9%となった。

## 考 察

北海道の水田において用いられる施肥法は全層施肥、および全層施肥と局所施肥の組み合わせ(全層+表層、全層+側条)がある。ここでは施肥法が白米タンパク質含有量に及ぼす影響を定量的に解析するため、重窒素標識硫酸を用いて窒素利用率とこれの分配および土壌中への残留について検討した。

### 1. 全層施肥窒素量が水稻の窒素吸収および各器官への分配に与える影響

全層施肥は湛水前に施肥・混和するために窒素成分の大部分が還元層に入り、脱窒作用を受けにくく、肥効が高い。このような利点から、北海道の水田における施肥法は全層施肥が基本となっている。本試験における施肥窒素の利用率は全量全層施肥の場合、ほぼ30~40%の範囲にあり、施肥窒素量の増加に伴って多くなる傾向にあった(第1表)。施肥窒素利用率は北海道における標準的な施肥量(8 g m<sup>-2</sup>) (北海道農政部2001)の2倍程度の多肥(16 g m<sup>-2</sup>)条件までは頭打ちとならず、土壌由来の窒素吸収量に上乗せされることが考えられる。

成熟期の窒素吸収量に占める施肥由来窒素の比率も直線的に高まった。これは、全量全層区(4, 8, 12, 16 g m<sup>-2</sup>区)の土壌由来窒素の吸収量が全量全層区で8.68~9.84 g m<sup>-2</sup>と若干増加しているのに対し、施肥窒素の吸収量(第1表, A-B)は施肥量によって1.30~6.58 g m<sup>-2</sup>と顕著に増加するためである。

施肥窒素量の増加に伴う施肥窒素利用率の増加について

は施肥による根域拡大作用と、Added Nitrogen Interaction (ANI: 窒素添加交互作用) という概念が報告されている (Jenkinson ら1985, 渡辺1988)。ANIでは、施肥された重窒素の有機化量に見合うだけの土壌無機窒素の残存量が増加するという「代理効果」により、見かけの無機化を促進するのようになるとされる。したがって、本試験における土壌由来の窒素吸収量の増加傾向も根域拡大作用とANIによる可能性が高い。また、施肥窒素の有機化は土壌微生物に由来するため、炭素源を伴わずに窒素のみを倍量施用しても、有機化量が2倍になるものではない。その結果、施肥窒素量の増加にともなって有機化される施肥窒素の比率が減少し、施肥窒素の利用率が増加した可能性もある。これは土壌由来の窒素(第1表, A~B)が無窒素区と窒素施肥した区の間では差が大きいのに対して、施肥窒素量の増加に伴う差が比較的小さく、直線的に増加するものでないことから推察される。

稲体に吸収された施肥窒素は水稻の各器官に分配・転流された後、その多くが米粒中に移行する(本庄・平野1979, 有馬1990)。移行した結果として稲体における分配を見ると、吸収された窒素の穂部への分配率は全量全層4 g m<sup>-2</sup>区で65.8%, 8 g m<sup>-2</sup>区で63.5%, 12 g m<sup>-2</sup>区で61.9%, 16 g m<sup>-2</sup>区で51.3%であり、特に白米部への分配率は全量全層4 g m<sup>-2</sup>区で49.4%, 8 g m<sup>-2</sup>区で45.4%, 12 g m<sup>-2</sup>区で44.9%, 16 g m<sup>-2</sup>区で39.6%と施肥窒素量の増加に伴って低下した。反対に、葉鞘および稈への分配率は施肥窒素量の増加に伴って増加する傾向にあった(第1図)。その要因として、施肥窒素量の増加に伴って茎葉が繁茂するものの、不稔歩合の増加や登熟歩合の低下をもたらすことが挙げられる(第2表)。吸収された窒素の穂部への分配率の低下は、一見白米タンパク質含有量の低下につながるようにも考えられるものの、施肥窒素量に伴う施肥窒素吸収量の増加(8 g m<sup>-2</sup>区: 2.84 g m<sup>-2</sup> → 16 g m<sup>-2</sup>区: 6.58 g m<sup>-2</sup>)が大きいことにより、分配率を乗じた白米への分配施肥窒素量(8 g m<sup>-2</sup>区: 1.29 g m<sup>-2</sup> → 16 g m<sup>-2</sup>区: 2.60 g m<sup>-2</sup>)が増加した。8 g m<sup>-2</sup>区に対して16 g m<sup>-2</sup>区の白米へ分配された施肥窒素量が約2倍になっているのに対して、総粒数の増加は1.23倍にすぎなく、不稔歩合も2倍以上になっていたため、稔実粒数は1.03倍であった(第2表)。このため、白米当たりには分配された施肥窒素量(1000粒当たりの窒素mg)は8 g m<sup>-2</sup>区で51.5 mg, 16 g m<sup>-2</sup>区で100.8 mgと明らかに高まることから、結果的に白米中のタンパク質含有量(8 g m<sup>-2</sup>区: 73.8 g kg<sup>-1</sup> → 16 g m<sup>-2</sup>区: 84.9 g kg<sup>-1</sup>)が高められることになったものと考えられる。

生育前期に吸収された窒素は茎葉に一度蓄積された後、出穂後に穂部に転流されることが考えられるが、16 g m<sup>-2</sup>区のように不稔が増すと吸収した窒素の転流先となるシンク能が十分でなくなる。そのため、葉、葉鞘および稈に蓄積された窒素の多くが転流しないまま成熟期に達した結果、吸

収された施肥窒素の葉鞘や稈および葉身への分配率が  $12 \text{ g m}^{-2}$  以下の区より高くなったと考えられる。また、 $16 \text{ g m}^{-2}$  区では、葉身への分配率と比較して葉鞘や稈への比率の増加が顕著であり、穂部への転流は葉鞘や稈より葉身で優先された可能性がある。

精玄米収量は  $12 \text{ g m}^{-2}$  区が最も高かったが、白米中のタンパク質含有量の差異は  $8 \text{ g m}^{-2}$  区（標準施肥水準）の白米タンパク質含有量（ $73.8 \text{ g kg}^{-1}$ ）に対して、 $12 \text{ g m}^{-2}$  区で  $4.3 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $16 \text{ g m}^{-2}$  区で  $11.1 \text{ g kg}^{-1}$  増加していた。近年の北海道の研究において、「きらら 397」の白米タンパク質含有量と食味官能値の関係を検討したところ、一般的に評価基準とされる「日本晴」を越えるには、白米タンパク質含有量は  $75 \text{ g kg}^{-1}$  以下に低下する必要がある（古原ら 2002）。現在求められているのは売れる米作りであることから、良食味米生産が収量性に優先すると考えられる。したがって一定以上の食味水準には、低タンパク質米生産が必須であり、この観点から標準施肥水準を維持すべきであると判断される。

## 2. 施肥位置が水稻の窒素吸収および各器官への分配に与える影響

表層施肥と側条施肥はともに苗移植時の根近傍に窒素を施肥することにより、初期生育の促進を目的としている。これらの窒素施肥法は下位分げつの促進を通じて早期に茎数を確保でき、寒冷な北海道でも安定・多収が得られるとされる。したがって、これらの窒素施肥法では生育初期の茎葉の形成に対する関与が大きく、穂への窒素の転流は少ないことが予想された。

表層施肥の利用率は全層施肥より低く、側条施肥に比較するとさらに低かった。また、側条施肥は全層施肥に比較して、穂部および白米への窒素の移行が少ない特徴があった。茎葉に関して詳細に見ると、側条施肥で葉身と葉鞘、特に葉鞘への分配が高まっていた。葉鞘への分配が大きいことは、水稻初期の窒素吸収が高まったことで分げつが促進され、分げつした茎の形成に必要な窒素が葉鞘に移行したためと考えられる。出穂後には茎葉から穂へ窒素の転流が起こるものの、個体を維持していくために窒素を葉鞘および稈に保持する必要がある、茎葉に分配された窒素が高く維持されたものと推察される。

全層施肥由来の窒素は止葉期以降においても吸収されているが、表層および側条施肥に由来する窒素はほとんどが止葉期以前に吸収されていた（第2図）。このことは施肥位置によって窒素の利用率が異なるだけでなく、吸収時期や稲体各器官への分配が異なしたことを示すものと考えられる。吸収窒素の穂部への分配率は、幼穂形成期と比較して出穂期で大きいことが指摘されている（古山ら 1974）。このことから、全層施肥された窒素は生育後半まで吸収が持続し、生育後半に吸収された窒素の多くが穂部に移行したと推察される。全層+表層区で白米タンパク質含有量が

低くなる原因としては、窒素の利用率が全層施肥に比べて低いことと、施肥窒素の吸収が生育の前期に集中するため穂部へ分配される窒素量が少なくなることが考えられる。全層+側条区における白米タンパク質含有量の低下は、施肥窒素の利用率が高いものの、全層+表層区と同様に窒素吸収が生育の前期に行われることと茎葉部への分配と比較して穂部への分配が小さくなることに由来すると考えられる。また、不稔歩合は総施肥窒素量が同等の全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区と比較して全層+側条区では少ない傾向にある（第2表）。これについてデータとして不十分であるが第2図の止葉期以前の総窒素吸収量（施肥由来と施肥由来以外の加算）が多いことから、全層+側条区の場合には初期生育が盛んになり、有効茎を早期に確保できたと推察される。これに対して、全量全層施肥では止葉期以降の窒素吸収も多く、遅発分げつから出穂した籾が総粒数に含まれており、結果的に不稔歩合が高まった可能性がある。ゆえに、全層+側条区では全量全層  $8 \text{ g m}^{-2}$  区と比較して稔実粒数が明らかに多い。白米当たりに分配された施肥窒素量（1000粒当たりの窒素 mg）は全量全層  $4 \text{ g m}^{-2}$  区の  $28.4 \text{ mg}$  と比較して、全層+側条区の側条分  $4 \text{ g m}^{-2}$  で  $21.9 \text{ mg}$  と少ないことも（第2表）、白米タンパク質含有量の低下に寄与したと推察される。

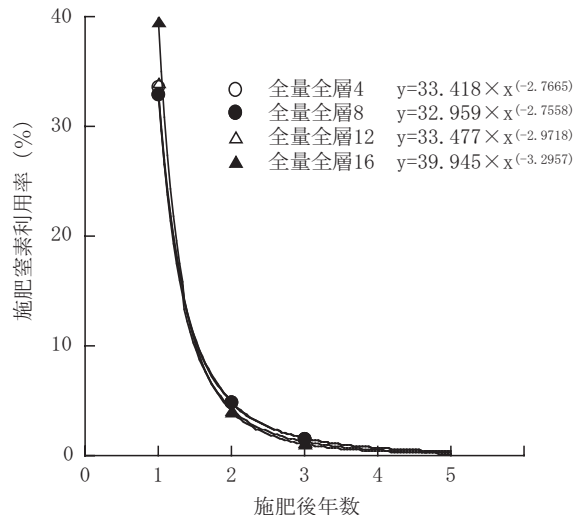
以上の結果から、白米への窒素集積を少なくするには生育初期の窒素吸収を促進し、なおかつ生育後期の窒素吸収を少なくすることにより達成されることが考えられ、全層施肥と側条施肥の組み合わせが合理的と判断できる。

## 3. 施肥窒素の土壌残存と次年度以降への影響

施肥初年目に未利用であった窒素は次年度以降に吸収され、白米タンパク質含有量に影響する可能性がある。施肥された窒素の利用率は施肥方法および施肥窒素量によって異なるが、施肥窒素は初年目にほとんどが利用され、2年目は初年目の  $1/10$  程度、3年目は初年目の  $1/20$  程度であった（第3表）。さらに、全量全層施肥（4, 8, 12,  $16 \text{ g m}^{-2}$  区）の3カ年の利用率をプロットし、回帰曲線を第3図に示した。4年目以降は試験場移転に伴う廃耕によりデータが得られなかったため、同式を延長して表示した。回帰曲線から推定される4年目以降の利用率は全ての施肥窒素用量で1%以下となり、水稻への影響は極めて小さくなると考えられる。

差し引き法による消失窒素は、全層+表層区で施肥初年目に、全層+側条区で2年目に多い結果となった。全層+表層区は作土表面の酸化層に分布する肥料が多いことから脱窒を受けやすく、また灌漑水による肥料流亡も多いことから、初年目の消失分が大きかったと推察される。全層+側条区は、初年目の土壌残存が多く、これは側条に施肥された窒素の拡散範囲が限定され、部分的に集中して存在し、生育初期に多く利用されることから、灌漑水などによる肥料の流亡が小さかったものと考えられる。2年目以降に付





第3図 施肥窒素利用率の経年推移。  
実線は全層施肥処理（1～3年後）  
から求めた回帰式を示す。また、  
4年目以降は同式を用いて推定した。

いては、代かきを行うことで全層施肥と同様になったものと推察される。また、施肥後3作終了時においても施肥窒素の13.3～26.2%が土壌に残存していることが明らかとなった（第3表）。先に述べたように3年目以降の水稲への利用率は著しく低いことから、無機化～有機化を繰り返す過程で若干が系外に持ち出されていく程度であり、施肥法による残存窒素量の差が後年次の白米タンパク質含有量に与える影響は小さいと推察される。

**謝辞：**本報告をご指導して頂いた香川大学農学部 楠谷彰人教授，北海道大学農学部 大崎満教授，北海道立農業試験場前農業環境部長 能代昌雄氏に心から敬意と謝意を表する。

## 引用文献

- 有馬泰紘 1990. 窒素の吸収. 松尾孝嶺代表編集, 稲学大成第2巻—生理編—, 農文協, 東京. 247—253.
- 土居晃郎・古山芳広 1985. 水稲に対する側条施肥の表層施肥効果. 北農 52 (1): 45—56.
- 土壌環境分析法編集委員会 1997. 土壌環境分析法. 博友社, 東京. 234—239.
- 藤原耕治・古山光夫・山根忠昭 1991. コシヒカリの窒素施肥反応と適正保有量. 島根農試研報 25: 15—29.
- 古山芳広・藤原耕治・南松雄 1974. 水稲品種の栄養生理的特性に関する研究Ⅲ. 15 Nトレーサー法により施肥窒素の吸収利用特性. 北海道立農試集報 30: 32—44.
- 廣川智子・北川靖夫・伊藤純雄 1992. 各種土壌における施肥窒素及び土壌窒素のコシヒカリによる吸収とその変動要因について. 富

山農業技セ研報 13: 11—20.

北海道米高水準食味確立緊急対策協議会 2004. 北海道米の食味向上栽培マニュアル. 北海道, 札幌. 1—2.

北海道農務部 1984. 水稲に対する粒状化成の側条施肥効果. 昭和 59 年普及奨励ならびに指導参考事項. 北海道農政部, 札幌. 323—327.

北海道農政部 1999. 北海道土壌診断基準と施肥対応. 北海道農政部, 札幌. 27.

北海道農政部 2001. 米に関する資料. 北海道農政部, 札幌. 58.

本庄一雄・平野貢 1979. 米のタンパク含量に関する研究 第3報 登熟に伴う体内窒素及び穂前期追肥窒素の穂への移行. 日作紀 48: 517—524.

稲津脩 1988. 北海道産米の食味向上による品質改善に関する研究. 北海道立農試報 66: 1—86.

石間紀男・平宏和・平春枝・御子柴穆・吉田誠次 1974. 米の食味に及ぼす窒素施肥および精米中のタンパク質含有率の影響. 食糧総合研究所報告 29: 9—15.

Jenkinson, D.S., R.H.Fox and J.H.Rayner 1985. interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen — the so-called 'priming' effect. J. Soil Sci. 36: 425—444.

清藤文仁・中堀登示光・高城哲男・小山田善三 1992. 白米のタンパク質含有率と食味評価及び施肥法との関係. 東北農業研究 45: 31—32.

古原洋・渡辺祐志・竹内晴信・田中英彦・丹野久・五十嵐俊成・後藤英次・長谷川進・沼尾吉則 2002. 北海道米の食味・白度の変動要因解析と高位安定化技術. 北農 69 (1): 17—25.

御子柴穆 1982. 水稲の施肥位置. 日本土壤肥料学会編, 施肥位置と栽培技術—現状と問題点—. 博友社, 東京. 139—194.

南松雄・土居晃郎 1973. 北海道産米の品質に関する物理化学的研究 第2報 米の食味特性とタンパク質含有率との関係. 北海道立農試集報 26: 49—58.

三浦周 1996. 施肥量および施肥法. 相馬暁編監修, やさしい施肥管理の手引き—水稲編—. ホクレン, 札幌. 50—57.

三浦周・坂本宣崇・古山芳広 1991. 寒地における側条施肥水稲に対する窒素追肥の影響. 北海道立農試集報 63: 31—39.

中根良平 1963. 質量分析法による同位体比測定Ⅲ. 質量分析 22: 51—56.

西潟高一・藤森信四郎・藤森利夫・藤田勇・首藤良一 1960. 水稲の施肥法について. 北農 27 (8): 9—18.

大山信雄 1987. 東北地方における水稲側条施肥の肥効. 農業技術 42: 49—53.

坂本宣崇・古山芳広・岩淵晴郎 1985. 寒地水田における移植後の気温と表層施肥効果の発現との関係. 北海道立農試集報 53. 51—60.

志賀一一 1994. 水田の土壌肥料. 石塚喜明監修, 北海道の稲作, 北農会, 札幌. 256—304.

渡辺巖 1988. 水田土壌における有機物の動態〔5〕土壌窒素代謝研究に重窒素を使用するときの問題点. 農及園 63 (12): 1348—1352.

**Effect of Method of Nitrogen Fertilizer Application on Recovery Rate of Applied Nitrogen and its Distribution in the Rice Plant in a Cold Region** : Eiji GOTO<sup>1),2)</sup>, Michiko NOMURA<sup>1)</sup> and Osamu INATSU<sup>1)</sup> (<sup>1)</sup>*Hokkaido Kamikawa Agric. Exp. Stn.* ; <sup>2)</sup>*Hokkaido Cent. Agric. Exp. Stn. Iwamizawa Branch Office, Iwamizawa, Hokkaido 069-0365, Japan*)

**Abstract** : To examine the effect of the method of nitrogen fertilizer application (incorporation into plow layer, surface layer application and side dressing) on the recovery rate of applied nitrogen and its distribution in rice plant, we investigated the absorption of <sup>15</sup>N-labeled (ammonium sulphate) in Hokkaido Kamikawa Agric.Exp.Stn. (Humic Brown Lowland soil). The average recovery rate of nitrogen incorporated into the plow layer (4, 8, 12, 16 g N m<sup>-2</sup>) ranged from 32 to 41%. The distribution of applied nitrogen in the plants fertilized with 8 g m<sup>-2</sup> incorporated into the plow layer was 36.5% to leaves and stems, 63.5% to ears and 45.4% to polished rice. The surface layer application method (combined with incorporation into plow layer) of nitrogen reduced the recovery rate and protein content of polished rice and yield. The side dressing combined with incorporation into the plow layer increased the recovery rate of nitrogen and grain yield compared with incorporation of all of the fertilizer into the plow layer. However, side-dressed nitrogen was mainly absorbed by the plants before the flag leaf stage, and was less distributed to ear and grains resulting in a low protein content of polished rice. The recovery rate of nitrogen incorporated into the plow layer ranged from 2 to 4% in the next year, and from 1 to 2% in the third year. The amount of applied fertilizer nitrogen remaining in the soil after the third year of harvest was about 20% on the average. We concluded that the combination of side dressing and incorporation into the plow layer could be a valuable method for the production of low protein-content rice in high yields.

**Key words** : Fertilizer placement, Labeled nitrogen (<sup>15</sup>N), Protein-content, Recovery rate, Rice plant.

---