

### Ⅲ. 硝酸汚染軽減対策の評価

#### 1. 多様な作付体系における NiPRAS の有効性の検証

##### 1) 背景と目的

地下水の硝酸汚染においては、地表に投入した窒素が地下水に移行するまでにある程度の期間を要するため、地下水の硝酸性窒素濃度を直接の指標として対策を講じることには限界がある。そのため、対策技術の導入にあたっては、その導入効果を何らかの簡易な指標によって評価・予測することが必要となる。中央農試が開発した「地下水の硝酸性窒素汚染リスク評価ソフト (Nitrate Pollution Risk Assessment System, 以下, NiPRAS)」<sup>1)</sup>は、農地への窒素投入量, 作物による窒素持ち出し量, 余剰水量 (浸透水量) および肥培管理情報 (施肥, 生産物) から地下水の硝酸性窒素汚染リスクを簡易に評価できるソフトウェアである。本節では、収穫残渣のすき込みを含む多様な作付体系での浸透水の硝酸汚染リスク評価に対して NiPRAS を適用し、その有効性を検証する。

##### 2) NiPRAS の演算論理の概要

NiPRAS の演算論理では、地下水の汚染リスクを窒素環境容量に対する超過窒素量 (1 式) で評価し、超過窒素量がプラス (浸透水の硝酸性窒素濃度が 10 mg/L を超過) の場合にリスクが高いと判定する。なお 1 式の窒素環境容量は 2 式で定義される。

$$\text{超過窒素量} = \text{窒素投入量} - \text{窒素環境容量} \quad (1 \text{ 式})$$

$$\text{窒素環境容量} = \text{作物による窒素持ち出し量} \\ + \text{硝酸性窒素残存許容量} \quad (2 \text{ 式})$$

2 式の硝酸性窒素残存許容量は、土壤に残存した硝酸性窒素がすべて浸透水で流出した場合に浸透水の硝酸性窒素濃度が 10 mg/L となる量で、浸透水量に正比例する。

したがって、浸透水量に大差がない場合、1 式で定義される超過窒素量は、窒素投入量に対する窒素持ち出し量の大きさではば決まる。なお、NiPRAS では、想定した肥培管理をある程度継続した場合のリスク評価を対象としているため、圃場にすき込まれる収穫残渣中の窒素についてはいずれ分解・放出されるものと見なし、収支計算上は無機態の残存窒素と同様に扱っている。

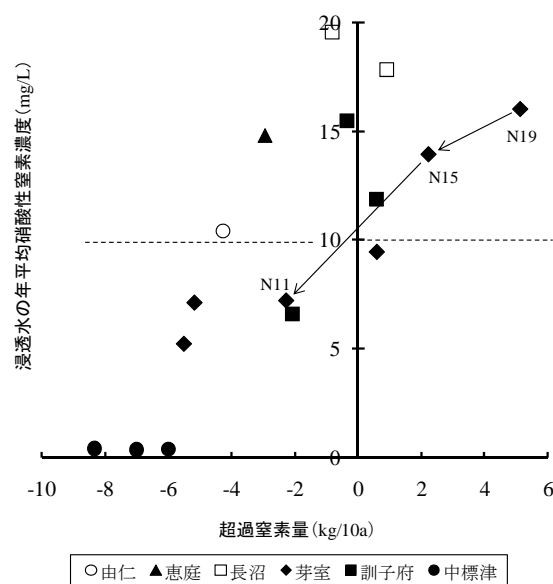
##### 3) 検証方法

土壤の種類, 栽培作物種および試験年次等が多様でかつ浸透水の年平均硝酸性窒素濃度が既知の 16 の連輪作事例 (キャベツやてんさい等の収穫残渣のすき込

み履歴を持つ輪作 8 事例を含む) を選定し (表Ⅲ-1-1), これらについて NiPRAS の演算論理を用いて超過窒素量を算定して、超過窒素量と浸透水の年平均硝酸性窒素濃度との関係を検討した。収穫残渣のすき込み履歴を持つ事例を含めたのは、上述の収穫残渣中の窒素の取り扱い方の妥当性を検証するためである。超過窒素量の算出に必要な年間浸透水量 (余剰水量) は、所在地近傍のアメダスデータ等から IV-3 に記載の土壤浸透水量推定モデルで求め、その他の窒素肥培管理および生産物に関する数値は表Ⅲ-1-1 に依った。

##### 4) 結果

NiPRAS は想定した肥培管理をある程度継続したときの浸透水の硝酸性窒素汚染リスクを評価するものなので、超過窒素量と浸透水の年平均硝酸性窒素濃度との関係を、各事例の調査年次 (3~5 カ年) における平均値で検討した (図Ⅲ-1-1)。



図Ⅲ-1-1 超過窒素量と浸透水の年平均硝酸性窒素濃度との関係

超過窒素量 = 窒素投入量 - 窒素環境容量。各ケースの調査年次 (3~5 カ年) の平均値で表示。図中の N11, N15, N19 は各プロットにおける平均窒素投入量 (kg/10a) で、矢印は窒素投入量の削減に伴い窒素超過量が低下することを示している。

表Ⅲ-1-1 超過窒素量と浸透水の年平均硝酸性窒素濃度との関係解析に用いたデータ

ケース No.	地点および土壌の種類	年次	作物 <sup>1)</sup>	窒素		有機物		収穫残渣		窒素投入量 <sup>3)</sup> (kg/10a)	作物収穫部位による持ち出し窒素量 <sup>2)</sup> (kg/10a)	年間浸透水量 <sup>4)</sup> (mm)	浸透水の年平均硝酸性窒素濃度 <sup>5)</sup> (mg/L)	出典
				施肥量 <sup>2)</sup> (kg/10a)	種類	施用量 (t/10a)	種類	すき込み量 (t/10a)						
1	由仁町 普通褐色低地土	1997	たまねぎ	20					20	7.9	805	12.7		
		1998	秋まき小麦	2					2	14.0	621	1.1		
		1999	たまねぎ	20					20	8.6	591	7.4		
		2000	たまねぎ	15					15	13.6	964	14.4		
		2001	たまねぎ	15					15	12.9	656	13.3		
2	恵庭市 普通黒ボク土	1997	にんじん	11	牛糞堆肥	7.0	茎葉	1.7	18	4.1	639	21.0		
		1998	だいこん(2作)	11	牛糞堆肥	8.0			19	23.4	573	9.1		
		1999	キャベツ	16	牛糞堆肥	8.0	外葉	4.6	24	10.2	579	24.2	松本ら (2005)	
		2000	小豆	2	牛糞堆肥	5.0			11	13.0	905	14.3		
		2001	ばれいしょ	8	牛糞堆肥	3.0			11	13.2	687	6.7		
3	長沼町 普通褐色低地土	1999	たまねぎ	15				15	6.0	609	15.5			
		2000	たまねぎ	15				15	6.8	980	18.7			
		2001	たまねぎ	15				15	6.8	674	18.7			
4	普通褐色低地土	1999	たまねぎ	10	牛糞堆肥	5.0		15	7.3	609	17.9			
		2000	たまねぎ	10				10	6.9	980	20.2			
		2001	たまねぎ	10	牛糞堆肥	5.0		16	6.9	674	20.2			
5		2002	てんさい	15				15	18.2	577	1.7			
		2003	小豆	4				8	5.9	451	7.1			
		2004	春まき小麦	9				9	10.3	403	8.3			
6		2002	てんさい	15	牛糞堆肥	1.5		20	24.9	577	3.2			
		2003	小豆	4	牛糞堆肥	1.5		13	9.7	451	9.4			
		2004	春まき小麦	9	牛糞堆肥	1.5		14	12.3	403	10.3			
7	芽室町 (十勝農試) 淡色黒ボク土	2002	てんさい	15			茎葉	6.8	15	7.1	577	2.3	平成16年度 成績会議資料「普通畑およびたまねぎ畑における地下水 中硝酸性窒素の削減対策」	
		2003	小豆	4			茎葉	0.2	8	7.6	451	8.8		
		2004	春まき小麦	9			麦稈	0.6	9	10.0	403	12.6		
2002	てんさい	28			茎葉	8.0	28	9.3	577	4.4				
2003	小豆	4			茎葉	0.2	8	9.1	451	11.5				
2004	春まき小麦	9			麦稈	0.6	9	10.2	403	14.5				
2002	てんさい	15	牛糞堆肥	1.5	茎葉	7.6	20	7.8	577	3.5				
2003	小豆	4	牛糞堆肥	1.5	茎葉	0.1	13	6.7	451	19.1				
2004	春まき小麦	9	牛糞堆肥	1.5	麦稈	0.6	14	10.2	403	23.2				
2002	てんさい	28	牛糞堆肥	1.5	茎葉	7.9	32	10.3	577	9.0				
10		2003	小豆	4	牛糞堆肥	1.5	茎葉	0.2	13	7.7	451	22.5		
		2004	春まき小麦	9	牛糞堆肥	1.5	麦稈	0.6	14	10.5	403	18.9		
		2000	秋まき小麦	12				12	12.0	418	7.9	鈴木・志賀 (2004)および平成14年度 成績会議資料「畑地における地下水 の硝酸汚染防止のための 投入窒素限界量」		
2001	てんさい	16			茎葉	3.8	16	6.3	462	4.4				
2002	ばれいしょ	4				4	7.4	368	7.9					
12	訓子府町 (北見農試) 多湿黒ボク土	2000	秋まき小麦	12	牛糞堆肥	2.0		15	13.3	418	13.4			
		2001	てんさい	16	牛糞堆肥	2.0	茎葉	3.8	20	8.5	462	10.4		
		2002	ばれいしょ	4	牛糞堆肥	2.0		9	8.4	368	12.0			
13		2000	秋まき小麦	8	牛糞堆肥	4.0		15	16.4	418	18.2			
		2001	てんさい	12	牛糞堆肥	4.0	茎葉	3.8	20	9.2	462	14.0		
		2002	ばれいしょ	0	牛糞堆肥	4.0		10	7.9	368	14.3			
14		2001	チモシー	5				5	4.0	500	0.8			
		2002	チモシー	16				16	11.0	900	0.3			
		2003	チモシー	16				16	16.0	1000	0.3			
15	中標津町 (根釧農試) 普通黒ボク土	2001	チモシー	0	乳牛スラリー	9.3		10	7.0	500	0.7	平成18年度 成績会議資料「スラリー 運用条件下の火山灰草 地における窒素の 収支」		
		2002	チモシー	0	乳牛スラリー	9.3		8	7.0	900	0.4			
		2003	チモシー	0	乳牛スラリー	9.3		9	10.0	1000	0.2			
16		2001	チモシー	0	乳牛スラリー	13.9		15	13.0	500	1.2			
		2002	チモシー	0	乳牛スラリー	13.9		12	13.0	900	0.3			
		2003	チモシー	0	乳牛スラリー	13.9		14	16.0	1000	0.2			

1) 網掛けは収穫後にその残渣を圃場にすき込んだ作物。  
 2) 1年に複数回作付の場合は複数作の合計。  
 3) 窒素施肥量+施用有機物の無機態窒素換算量。ただし、小豆については窒素固定量として4 kg/10aを加算。  
 4) 浸透水量推定モデルで算出(ただし、No.14~16は出典に記載の値)。  
 5) 定期的に測定した浸透水中の硝酸性窒素濃度を浸透水量で加重平均して年平均値を算出。

これによると、多少の例外はあるが、超過窒素量がプラスとなる事例の多くで浸透水の硝酸性窒素濃度が10 mg/Lを超えたのに対し、マイナスの場合はこれを下回ることが多く、3~5カ年の期間についてNiPRASで算出した平均超過窒素量は浸透水の硝酸汚染リスク評価に有効であることが検証された。土壌の種類との関連では、黒ボク土(黒塗りのプロット)の方が低地土(白抜きのプロット)よりも妥当な評価を示す場合が多く、この差異には降雨時の主たる浸透過程の違い(黒ボク土:マトリクス流, 低地土:バイパス流)に起因する実測値の不確実性などが影響している可能性

がある。

次に、てんさい茎葉等の収穫残渣すき込み履歴のある芽室(ケースNo.7~10, ◆のプロットの一部)および訓子府(No.11~13, ■のプロット)の事例に着目すると、いずれの場合もリスク評価は概ね適切であった。したがって、NiPRASでの収穫残渣中の窒素の取り扱い方は妥当と認められた。ただし、このことには、芽室および訓子府での収穫残渣がてんさい茎葉, 小豆茎葉, 麦稈などであり、すき込み後の窒素放出時期が翌年春・夏以降または2年後と比較的遅いことが関係していると思われる。

以上のことから類推すると、Ⅱ-2-1)で述べた汚染軽減策としての後作緑肥(すき込み後の窒素放出時期は翌年春から)の位置付けは、てんさい茎葉と同等と考えてよい。すなわち、緑肥としてすき込まれた窒素は数カ年の間に作物に吸収利用され、当面の溶脱リスクからは隔離されよう。ただし、図Ⅲ-1-1(矢印付きの◆のプロット)から理解されるように、超過窒素量を削減し、汚染リスクを根本的に低減するには、すき込んだ緑肥等からの窒素放出を見込んだ次作物での減肥が必須となることに留意する必要がある。

## 5) 要約

NiPRASで算出した超過窒素量は、収穫残渣のすき込みを含む多様な栽培体系での浸透水の硝酸汚染リスク評価指標として有効であることを検証した。

## 6) 引用文献

- 1) 唐星児, 志賀弘行, 中本洋, 日笠裕治.” 肥培管理情報を利用した地下水の硝酸性窒素汚染リスク評価ソフト「NiPRAS」”. 土肥誌. 78. 607-610 (2007).

(中辻敏朗)

## 2. 小流域における各種軽減対策の導入効果

### 1) 目的

ここまでの検討により、I-4で解析対象とした小流域Aは、水理地質および営農現状からみて地下水の硝酸汚染リスクが高い地域であることが明らかとなった。本節では、小流域A内の想定した地区に対し、地下水の硝酸汚染軽減に有効な既往の各種技術や本課題で開発した新しい技術を導入した場合、地下水の汚染リスクがどの程度低減されるかについて、前節でその有効性が検証されたNiPRASを活用して推定する。

### 2) 対象地域の概要

小流域Aの一部であるA1, A2, A3, A4, A5の5地区からなる合計663haを対象とした(表III-2-1)。I-4での実態調査に基づく地域の営農の現状を以下に述べる。

輪作体系としては、単純化のため、いずれの地区とも「秋まき小麦→てんさい→たまねぎ(1作目)→たまねぎ(2作目)」の3作物による4年連輪作を想定した。各作物の作付割合は、秋まき小麦が20~30%で地区間差は小さいが、たまねぎとてんさいの割合が地区によって異なり、A3地区ではてんさいが多く(40%)、A1およびA2地区ではたまねぎが多い(58~60%)という特徴を持つ。4作平均の窒素投入量は地区全体では16kg/10aであるが、作物の作付割合や土壌特性等の違いを反映してA3地区が19kg/10aと多く、A2地区は14kg/10aと少ない。収量は、秋まき小麦が640~710kg/10a、てんさいが5160~5910kg/10a、たまねぎが6320~6550kg/10aで、いずれの作物も概ね標準~高収レベルにある。

### 3) リスク低減効果の評価法

前述の営農現状(表III-2-1)を踏まえながら作成した以下の2つの改善シナリオ(表III-2-2, 3)の導入効果を、NiPRASで推定した超過窒素量(窒素投入量-窒素環境容量)を指標として評価した。すなわち、各地区について、改善シナリオ1および2を導入後の超過窒素量をNiPRASで作物ごとに算出後、各作物の作付面積割合で加重平均した値をそれぞれの地区の平均的な超過窒素量とし、現状における超過窒素量と比較検討した。改善シナリオ1および2の概要は以下の通りである。

#### <改善シナリオ1(窒素投入量の適正化)>

秋まき小麦、てんさいおよびたまねぎ2作目では土壌窒素診断に基づき、また、たまねぎ1作目では前作ですき込まれたてんさい茎葉からの窒素供給を見込んで、いずれも窒素投入量を適正化(ただし、たまねぎでは収量レベルが高い実態を考慮し、土壌窒素診断等に基づく施肥量に2kg/10a上積み)。

#### <改善シナリオ2(窒素投入量の適正化+土壌改良+たまねぎ畑への後作緑肥導入)>

改善シナリオ1に加え、たまねぎ1作目跡地へ後作緑肥を導入し、たまねぎ2作目ではこの緑肥からの窒素供給を見込んでさらに減肥。ただし、後作緑肥の導入はたまねぎ早生種栽培時に限られるため、その面積は全たまねぎ作付面積の3割と仮定。あわせて、たまねぎ畑へ振動式全層破碎処理を導入し、たまねぎの収量が5%増加、また同処理の残効で次作以降の秋まき小麦とてんさいの収量も3%増加と想定。

表III-2-1 小流域Aの各地区における各種作物の作付面積・割合、収量および作物に対する窒素投入量の現状

	作物 <sup>1)</sup>	A1地区	A2地区	A3地区	A4地区	A5地区	平均値 または合計 <sup>2)</sup>
作付面積 <sup>3)</sup> (ha)	秋まき小麦	30	41	58	16	25	170
	てんさい	29	28	85	17	28	187
	たまねぎ(1作目)	44	47	35	10	17	153
	たまねぎ(2作目)	44	47	35	10	17	153
	合計	147	163	213	53	87	663
作付面積割合 <sup>3)</sup> (%)	秋まき小麦	20	25	28	30	28	26
	てんさい	20	17	40	32	32	28
	たまねぎ(1作目)	30	29	16	19	20	23
	たまねぎ(2作目)	30	29	16	19	20	23
平均 窒素投入量 <sup>4)</sup> (kg/10a)	秋まき小麦	11	10	15	12	11	12
	てんさい	21	17	26	19	20	21
	たまねぎ(2作共通)	15	15	16	18	15	16
	平均	16	14	19	16	15	16
平均収量 <sup>5)</sup> (kg/10a)	秋まき小麦	640	640	650	670	710	662
	てんさい	5270	5880	5160	5910	5600	5564
	たまねぎ(2作共通)	6360	6550	6510	6450	6320	6438
年間浸透水量 <sup>6)</sup> (mm)	300	300	300	300	300	-	

<sup>1)</sup>「秋まき小麦→てんさい→たまねぎ(1作目)→たまねぎ(2作目)」の3作物による4年輪作を想定。

<sup>2)</sup>作付面積については合計、その他については平均値。

<sup>3)</sup>たまねぎの1および2作目の作付面積は等しいと仮定。

<sup>4)</sup>窒素施肥量+施用有機物の無機態窒素換算量。

<sup>5)</sup>秋まき小麦は子実重、てんさいは根重。

<sup>6)</sup>当地域の平均的な値。

表Ⅲ-2-2 改善シナリオ1 (窒素投入量の適正化)

作物	現 状					→	改 善 <sup>1)</sup>					改 善 の 内 容
	A1地区	A2地区	A3地区	A4地区	A5地区		A1地区	A2地区	A3地区	A4地区	A5地区	
窒素投入量 <sup>2)</sup> (kg/10a)	秋まき小麦	11	10	15	12	11	—	—	12	—	—	秋まき小麦、てんさい、たまねぎ(2作目)では土壌診断に基づき、また、たまねぎ(1作目)では前作ですぎ込まれたてんさい葉からの窒素供給(4kg/10a)を評価して、いずれも窒素投入量を適正化(ただし、たまねぎでは収量レベルが高いことを考慮し、施肥対応による施肥量に2kg/10a上積み)。
	てんさい	21	17	26	19	20	13	13	13	13	13	
	たまねぎ(1作目)	15	15	16	18	15	13	13	13	13	13	
	たまねぎ(2作目)	15	15	16	18	15	14	14	14	14	14	
収量 <sup>3)</sup> (kg/10a)	秋まき小麦	640	640	650	670	710	—	—	—	—	—	
	てんさい	5270	5880	5160	5910	5600	—	—	—	—	—	
	たまねぎ(2作共通)	6360	6550	6510	6450	6320	—	—	—	—	—	

<sup>1)</sup>「—」は現状から変更なしを意味する。年間浸透水量は現状(300mm)のままとした。

<sup>2)</sup> 窒素施肥量+施用有機物の無機態窒素換算量。

<sup>3)</sup> 秋まき小麦は子実重、てんさいは根重。

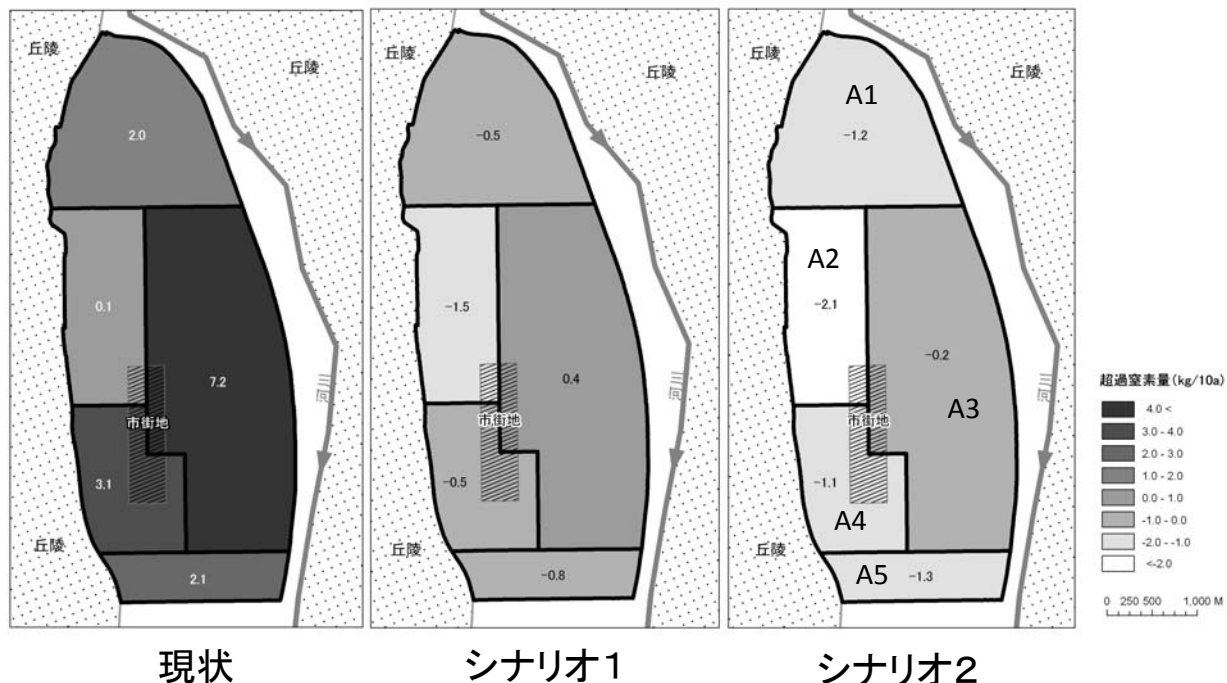
表Ⅲ-2-3 改善シナリオ2 (窒素投入量の適正化+土壌改良+たまねぎ畑への後作緑肥導入)

作物	現 状					→	改 善 <sup>1)</sup>					改 善 の 内 容
	A1地区	A2地区	A3地区	A4地区	A5地区		A1地区	A2地区	A3地区	A4地区	A5地区	
窒素投入量 <sup>2)</sup> (kg/10a)	秋まき小麦	11	10	15	12	11	—	—	12	—	—	改善シナリオ1に加え、たまねぎ(1作目)跡地へ後作緑肥(えん麦)を導入。たまねぎ(2作目)では、緑肥からの窒素供給(4kg/10a)を考慮し、窒素投入量をさらに削減。ただし、後作緑肥の導入は早生種栽培時に限られるため、その面積は作付け面積の3割と仮定。
	てんさい	21	17	26	19	20	13	13	13	13	13	
	たまねぎ(1作目)	15	15	16	18	15	13	13	13	13	13	
	たまねぎ(2作目)	15	15	16	18	15	10	10	10	10	10	
収量 <sup>3)</sup> (kg/10a)	秋まき小麦	640	640	650	670	710	660	660	670	690	730	全層破砕処理の導入で、たまねぎの収量が5%増加。また同処理の残効で次作以降の秋まき小麦とてんさいの収量も3%増加。
	てんさい	5270	5880	5160	5910	5600	5430	6060	5320	6090	5770	
	たまねぎ(2作共通)	6360	6550	6510	6450	6320	6680	6880	6840	6770	6640	

<sup>1)</sup>「—」は現状から変更なしを意味する。年間浸透水量は現状(300mm)のままとした。

<sup>2)</sup> 窒素施肥量+施用有機物の無機態窒素換算量。

<sup>3)</sup> 秋まき小麦は子実重、てんさいは根重。



図Ⅲ-2-1 改善シナリオの導入による各地区の平均超過窒素量の変化

改善シナリオの内容は表Ⅲ-2-2および3を参照。超過窒素量=窒素投入量-窒素環境容量。図中の数値は各地区の超過窒素量(kg/10a)で、作物ごとの超過窒素量を作物の面積割合で加重平均して算出。

#### 4) 結果

各種改善シナリオ導入後の各地区の超過窒素量を現状とともに図Ⅲ-2-1に示した。

現状の超過窒素量をみると、いずれの地区ともにプラスで、A3地区が7.2 kg/10aと最も多く、次いでA4地区(3.1)、A5地区(2.1)、A1地区(2.0)の順序で、A2地区は0.1 kg/10aであった。これらの超過窒素量は、各地区の窒素投入量の平均値の序列とほぼ一致していた。A3地区の超過窒素量が特異的に多かった理由の一つとしては、3作物のなかで窒素投入量が最も多いてんさいの面積割合が5地区なかで最も大きいことが挙げられる。

この現状に対し、3作物への窒素投入量の適正化を想定した改善シナリオ1を導入したところ、超過窒素量は-1.5~0.4 kg/10aへと減少した。窒素投入量の適正化は超過窒素量の削減に極めて有効であったが、現状で超過窒素量が多いA3地区では未だプラスのままであった。シナリオ2では、シナリオ1に加え土壌改良による作物収量の増加と後作緑肥の導入によるさらなる減肥を見込ん

だところ、超過窒素量は-2.1~-0.2 kg/10aといずれもマイナスに転ずると推定され、地下水の硝酸汚染リスクは現状よりも大幅に低減した。

以上のように、地下水の硝酸汚染防止には、超過窒素量を指標とした窒素負荷の現状把握に基いて、各種の個別対策技術を組み合わせた総合的な対策が不可欠と考えられた。

#### 5) 要約

水理地質および営農状況からみた地下水の硝酸汚染高リスク地域を対象に、各種改善シナリオの導入効果を超過窒素量に基づき評価したところ、窒素投入量の適正化の効果が顕著であったが、これに土壌改良による作物生産性の向上や後作緑肥などのクリーニングクロップの導入等を組み合わせ、総合的に改善すると、その効果がさらに高まると推定された。

(中辻敏朗, 高田雅之, 三島啓雄)