

1 実験法

実験は第1節に示した現地試験地に隣接したほ場で実施した。このほ場は蛇紋岩質洪積土壌であるが、腐植に富むやや泥炭質がかった排水不良地である。地形は平川であるが、周囲の植物群はヤチダモ、ハンノキ、アシ類などの湿性植物が群生している。供試土壌の理化学性は第31表のとおりである。土性はLiCからHCの粘土含量が40%以上の粘性の強い蛇紋岩質土壌である。作土層の塩基飽和度は43%と低く、pHもH₂Oで5.3と低い。リン酸吸収係数は1,700 mg/100 gとやや高い土壌である。

このほ場は中央で2分し、一方には炭酸カルシ

ウムを施用(800 kg/10 a)し、残りの半分は原土のまま使用した。試験規模は1区15 m²、2連制とした。供試作物と施肥量は第32表のとおりである。

なお、重金属の分析定量は吸光光度法、アルカリ土類金属はEDTAによるキレート滴定法を用いた。

2 実験結果および考察

1) 生育収量および障害症状の発生: 各作物の発芽は順調であった。ニッケルによる特有の障害症状は発芽直後に強く現われ、その後生育の進展に伴って緩和されていくのが一般的であったが、この年は5月から6月中旬にかけてやや早魃状態

第31表 供試土壌の理化学性

層 位	深 さ (cm)	腐 植 (%)	土 性	pH		CEC (me/100g)	置換性塩基 (me/100g)			塩 基 飽和度 (%)	吸収係数 P ₂ O ₅ (mg/100g)
				H ₂ O	KCl		CaO	MgO	K ₂ O		
1	0~13	22.2	LiC	5.3	4.0	48.4	9.6	10.9	0.4	43.2	1,736
2	13~25	10.7	HC	5.6	3.9	30.8	9.5	23.2	0.1	106.5	1,630
3	25~65	2.4	SiC	5.6	3.6	18.1	2.4	20.0	0.1	124.3	1,028

第32表 供試作物と施肥量

作 物 名	kg/10a				備 考 (品種名)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ B ₄ O ₇	
チ モ シ ー	5	10	10	—	前 進 エロー 農林1号 導入2号 時 無
ベレニアルライグラス	5	10	10	—	
オーチャードグラス	5	10	10	—	
アルファルファ	2	5	10	—	
アカクローバ	2	5	10	—	
ラジノクローバ	2	5	10	—	
小 豆	2	10	10	—	
菜 豆	2	10	10	—	
大 豆	2	10	10	—	
え ん 麦	5	5	5	—	
と う も ろ こ し	10	5	10	—	
馬 鈴 しょ	10	10	10	—	
て ん 菜	10	10	10	2	
大 根	10	5	10	2	
キ ャ ベ ツ	10	5	10	2	

注) N = 硫酸、P₂O₅ = 過石、K₂O = 硫酸
播種期 = 5月20日

第33表 作物間差異比較試験の収量結果

作物名	CaCO ₃ 施用区 (kg/10a)			原 土 区 (kg/10a)			備 考
	1 番草	2 番草	総 量	1 番草	2 番草	総 量	
チ モ シ ー A	845	700	1,545	845	1,035	1,880	生草重 * 区全体 が黄化 する
B	600	690	1,290	822	850	1,672	
ベ レ ニ ア ル A	1,195	1,180	2,375	1,125	1,080	2,205	
ラ イ グ ラ ス B	760	780	1,540	940	1,100	2,040	
オーチャード A	1,300	655	1,955	1,170	456	1,626	
グ ラ ス B	1,280	460	1,740	1,180	500	1,680	
アルファルファ A	1,700	945	1,645	550	185	735	
B	1,560	830	2,390	772	380	1,152	
アカクローバ A	1,725	800	2,525	1,570	1,165	2,735	
B	1,470	222*	1,692	1,770	685	2,455	
ラジノクローバ A	2,130	—	2,130	1,344	—	1,344	
B	1,880	—	1,880	1,335	—	1,335	
	子実重	茎葉重	総 重	子実重	茎葉重	総 重	
小 豆 A	170			34			子実重 は生重 } 塊 茎
B	238			31			
菜 豆 A	86			5			
B	114			8			
大 豆 A	182			173			
B	206			132			
え ん 麦 A	345	345	690	306	300	606	
B	250	234	484	200	200	400	
とうもろこし A	2,760	5,620	8,380	1,290	3,820	5,110	
B	1,750	3,930	5,680	1,770	3,790	5,560	
馬 鈴 しょ A	3,300			3,790			
B	3,740			3,750			
	菜根重	茎葉重	総 重	菜根重	茎葉重	総 重	
て ん 菜 A	2,920	5,270	8,190	2,980	4,220	7,200	} 完全結球なし
B	3,240	2,640	5,880	1,920	2,900	4,820	
大 根 A	2,130	1,570	3,700	2,340	1,960	4,300	
B	1,980	1,590	3,570	2,130	1,570	3,700	
キャベツ A			2,190			1,640	
B			3,450			3,570	

で経過した。しかし、6月下旬から7月上旬にかけてかなりの降雨量があり、その直後に一斉に障害症状が発現した。第33表には供試作物の収量調査結果を示した。

チモシー、ベレニアルライグラス、オーチャードグラス：発芽時、原土区の一部にえん麦と類似した白化現象を呈したが、生育に伴ってオーチャードグラスは症状が消失した。ベレニアル

イグラスは止葉にその痕跡を残す程度であった。チモシーは生育の全過程で症状が認められた。

アルファルファ：CaCO₃施用区に比べ原土区の生育は著しく悪く、一部の葉身には不定形の白化現象が観察された。この症状は直径1～2 mmの斑点で、ところによっては黒色の斑点も発生した。原土区の収量はCaCO₃施用区の1/2から1/3以下となった。

アカクロバ、ラジノクロバ：CaCO₃施用区と原土区の間に若干の生育差は生じたものの、白化現象またはその他の生育障害は認められなかった。ただし、アカクロバの二番草のCaCO₃施用B区のみが全体に黄化し、著しい収量の減収となった。これについては、ニッケルによるものとは考えられず、原因は不明であった。その他の区は順調な生育をし、CaCO₃施用区に比べて原土区がやや収量が低くなる程度であった。ラジノクロバはアカクロバに比べて原土区の減収率がやや高くなった。

小豆、菜豆、大豆：原土区の小豆と菜豆は発芽時から葉身のカップリングと萎縮現象が目立ち、降雨後はさらにクロロシス症と若干の褐色の斑点が発生した。これらの現象は小豆よりも菜豆の方が顕著で、生育の遅延も伴い、降霜期まで成熟しないところもあった。菜豆におけるニッケルの影響は第33表と第35表からも明らかのように、CaCO₃施用区においても認められ、いずれも正常な生育に至らなかった。大豆は小豆や菜豆よりもニッケルの影響が少なく、おおむね順調な発芽と生育であった。生育中期頃から葉面に褐色の斑点が発生したが、特に顕著な症状は認められなかった。

えん麦：発芽と同時に白化現象が観察され、強く影響を受けたところは横縞模様となった。CaCO₃施用区の方にはこれらの症状は発生しなかった。生育の進展に伴いクロロシス症も薄れたが、6月下旬の降雨後、それまでまったく障害症状の発生していなかったCaCO₃施用B区の一部の葉身にもクロロシスが発生した。これら障害症状の顕著だったところは出穂、成熟とも7日から10日の遅れが認められた。

とうもろこし：全生育期間にわたって特異な症状は認められなかった。収量も原土区よりCaCO₃施用区で、やや高めとなったが、これは障害軽減による増収とは認められなかった。

馬鈴しょ：とうもろこしと同様に、ニッケルによる障害症状はまったく認められず、CaCO₃施用効果も認められなかった。

てん菜：全生育期間にわたって特別な症状は認められなかった。ただし、CaCO₃施用区の草丈が若干高かったことと、原土区の葉色が一般に淡く、ところによってクロロシスと類似の症状が観察された。てん菜は中性を好む作物であることから、土壌のpH上昇効果とニッケルの抑制効果の双方で収量の増収があったものと考えられる。

大根：初期生育時には原土区に生育の遅れが認められ、中期から後期にはその差はほとんどなくなった。しかしながら、原土区の大根には一般のは場で観察することのできない2、3の症状が発生した。すなわち、葉柄の裏側が黒色化し、葉面には灰白色の斑点のネクロシス症が観察された。このような障害症状が発生したにもかかわらず、この影響は収量にまったく認められなかった。

キャベツ：供試作物15種類のうち、最も顕著な障害症状を呈したのはキャベツであった。発芽当時から全区にわたって障害が認められた。キャベツ特有の粉をふき出したような青みがかった緑色はほとんど見られず、葉身のカップリングや、光沢のある葉色を呈した。特に6月下旬の降雨後から、葉面に灰白色のネクロシス斑点が目立ち出し、著しいものは葉脈を残すのみとなった。8月下旬頃からネクロシスの部分は脱落し、網状の葉身が目立つようになった。したがって、第33表に示した収量は総量の単なる参考すぎず、正常なキャベツはどの区からも得られなかった。

以上の現地試験の結果から、蛇紋岩質土壌における生育障害に対する抵抗力の差異を植物の一般的分類方法であるイネ科、マメ科、ナス科、アブラナ科、アカザ科などによって分類することはきわめて困難であることが明らかになった。

2) 分析結果およびニッケル障害抵抗性の要因解析：実験は場は同一区においても不均一性が目

立ち、特に区の代表地点を選択することの困難なところは地上部の作物とその下の土壌を同時に採取するとともに、1区1点と限定せず、障害症状別に分析用試料を採取した。

跡地土壌の分析結果と、植物体中リン酸、カルシウムおよびマグネシウムの一般分析値は第34表に示した。すでに示した(第13図)ごとく、土壌pHの増大は置換性ニッケル濃度の減少となる関係にあり、この土壌での生育障害の発生や収量の減収は特定の作物を除くと、大半がpH(H₂O) 6.5以下で認められた。すなわち、置換性ニッケルでは10 ppm以上で明らかな障害が認められた。

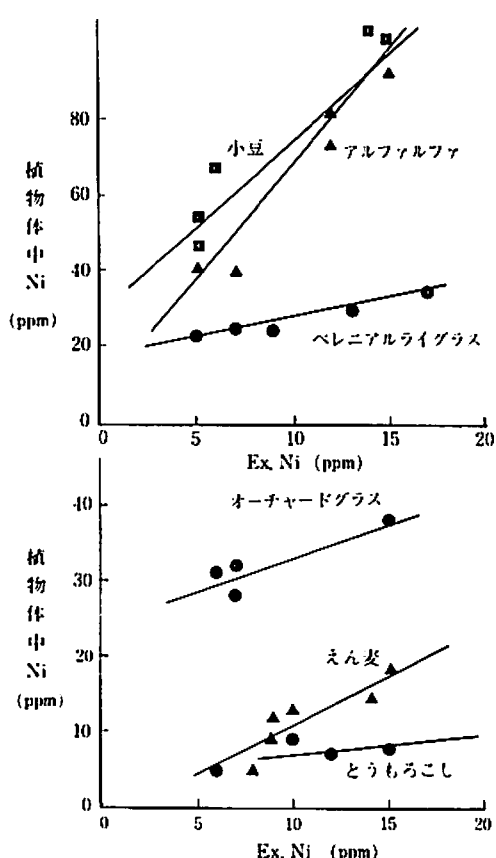
アルファルファ、菜豆、キャベツなどの抵抗力の弱い作物は置換性ニッケルが5~6 ppm以上でクロロシスやネクロシスが認められた。植物体中のリン酸、カルシウム、マグネシウム濃度と土壌pH、または生育障害と特定の関係を認めることはできなかった。

つぎに第35表には生育障害、収量比および植物体中ニッケル、鉄、銅、亜鉛、マンガンなどの重金属濃度とニッケルに対する各重金属の濃度比を求めて示した。

第35表から植物体中ニッケル濃度と生育障害または収量の関係を求めることはきわめて困難なことがわかった。すなわち、茎葉中ニッケル濃度で比較すると、チモシー、えん麦などは低濃度でも障害が認められるのに対し、馬鈴しょやアカクロバ、ラジノクロバは高濃度でも障害が認められないなど、各作物によってニッケルの吸収濃度水準がまちまちで、この濃度から抵抗力の差異を判定することは不可能であることが明らかになった。

そこで、土壌の置換性ニッケル濃度と、植物体中ニッケル濃度の関係が各作物間でどのようになっているかを知るため、一部の作物を抽出して第16図に示した。

これから、ベレニアルライグラス、オーチャードグラス、とうもろこしなどのように、ニッケル障害の発現しにくい作物は置換性ニッケルに対してあまり敏感な反応を示さず、置換性ニッケル濃度が低くても一定量の植物体ニッケル濃度を維持



第16図 土壌中置換性Ni濃度と植物体中Ni濃度の関係

するにもかかわらず、置換性ニッケル濃度が高くなってもそれほど植物体ニッケル濃度が高くないことが明らかになった。

これら抵抗力のある作物に対して、アルファルファ、えん麦などのように抵抗力の弱い作物は置換性ニッケルの増大に対応した植物体ニッケル濃度になることが認められ、置換性ニッケルに対してきわめて鋭敏に反応していることがわかった。

そこでニッケルに対する抵抗力の尺度になると考えられる置換性ニッケルに対する各作物のニッケル吸収の型を求めるため、置換性ニッケルが約5~20 ppmの狭い範囲ではあるが、置換性ニッケル濃度をx軸に、植物体ニッケル濃度をy軸において両者の相関関係一次式 $y = ax + b$ を求めた。

ここでaは置換性ニッケルに対する勾配を表わし、bは低濃度の置換性ニッケルにおける植物体

第34表の1 跡地土壌と植物体の一般分析結果

作物名	No	跡 地 土 壌					植 物 体		
		pH		置 換 性 成 分			(%)		
				(ppm)	(mg/100g)				
		H ₂ O	KCl	Ni	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Ca	Mg
チモシー	1	6.9	6.3	5	628	150	0.50	0.25	0.32
	2	6.2	5.3	11	432	196	0.44	0.28	0.49
	3	5.9	6.3	21	173	145	0.49	0.20	0.43
	4	5.5	4.2	13	284	117	0.43	0.25	0.26
	5	5.4	4.0	13	426		0.60	0.25	0.33
ベレニアル ライグラス	1	6.9	6.3	5	647	147	0.53	0.41	0.50
	2	6.6	5.7	7	518	174	0.63	0.49	0.38
	3	6.3	5.5	9	518	186	0.55	0.49	0.36
	4	5.7	4.4	13	320	145	0.60	0.38	0.50
	5	5.5	4.1	17	242	188	0.55	0.30	0.50
オーチャード グラス	1	7.2	6.6	6	732	157	0.52	0.41	0.57
	2	6.7	5.7	7	627	160	0.58	0.37	0.55
	3	6.5	4.9	7	340	170	0.53	0.35	0.46
	4	5.7	4.4	15	250	180	0.49	0.32	0.48
アルファル ファ	1	7.4	6.7	5	817	200	0.52	1.31	0.65
	2	6.7	5.6	7	544	140	0.62	0.89	0.58
	3	5.9	4.3	12	233	200	0.49	0.86	0.84
	4	5.9	4.2	12	161	168	0.54	1.14	0.60
	5	5.6	4.1	15	225	153	0.48	0.66	1.01
アカクローバ	1	7.3	6.5	5	787	150	0.59	1.08	0.92
	2	7.1	6.5	7	805	140	0.64	1.12	0.64
	3	6.1	4.5	11	525	190	0.75	1.09	0.85
	4	5.5	3.9	15	173	155	0.63	1.09	0.83
ラジノクローバ	1	7.0	6.2	6	660	150	0.74	0.99	0.56
	2	7.0	6.1	5	627	172	0.66	0.78	0.77
	3	5.6	4.1	12	198	140	0.73	1.34	0.58
	4	5.5	3.9	19	167	130	0.58	1.11	0.49
小 豆 (茎葉部)	1	6.8	6.2	5	800	106	0.60	0.68	0.37
	2	6.8	6.1	5	382	140	0.67	0.27	1.09
	3	6.7	5.6	6	417	85	0.78	0.25	1.10
	4	5.4	4.0	14	221	114	0.52	0.66	1.02
	5	5.3	4.1	15	259	147	0.99	0.34	1.64
菜 豆 (茎葉部)	1	7.1	6.2	6	817	102	0.74	0.61	0.64
	2	6.3	5.6	6	518	124	0.64	0.49	0.66
	3	5.6	4.2	12	244	114	0.58	0.72	0.92
	4	5.5	4.2	13	244	130	0.58	0.64	0.73
大 豆 (茎葉部)	1	6.9	6.1	6	740	124	0.63	0.58	0.78
	2	6.5	5.7	8	432	232	0.58	0.62	1.04
	3	5.7	4.4	12	354	98	0.58	0.56	0.88
	4	5.1	3.8	15	182	100	0.58	0.43	0.95

第34表の2 跡地土壌と植物体の一般分析結果

作物名	No	跡 地 土 壌				植 物 体			
		pH		置 換 性 成 分		(%)			
				(ppm)	(mg/100g)				
		H ₂ O	KCl	Ni	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Ca	Mg
えん麦 (茎葉部)	1	6.5	5.7	8	506	164	0.15	0.25	0.13
	2	6.3	5.2	9	466	180	0.18	0.14	0.17
	3	6.1	4.8	10	400	127	0.14	0.20	0.20
	4	5.9	4.6	9	425	77	0.13	0.16	0.15
	5	5.7	4.6	14	403	150	0.18	0.18	0.31
	6	5.5	4.0	15	201	118	0.13	0.09	0.13
とうもろこし (茎葉部)	1	7.0	6.6	6	830	141	0.40	0.23	0.49
	2	6.5	5.8	10	642	128	0.49	0.21	0.55
	3	6.1	4.7	12	365	150	0.34	0.39	0.39
	4	5.6	4.3	15	190	160	0.37	0.35	0.41
馬鈴しょ (茎葉部)	1	7.0	6.4	7	883	112	0.48	1.29	0.91
	2	6.6	5.6	8	543	168	0.38	1.34	1.31
	3	5.3	4.1	13	239	120	0.55	1.25	1.14
	4	5.1	4.0	15	287	110	0.44	1.11	1.45
馬鈴しょ (塊茎部)	1						0.28	0.06	0.30
	2						0.18	0.05	0.30
	3						0.25	0.05	0.20
	4						0.36	0.04	0.27
てん菜 (茎葉部)	1	6.6	5.7	6	516	166	0.51	0.95	1.18
	2	6.1	5.4	13	576	147	0.64	0.49	1.53
	3	5.7	4.5	8	327	116	0.49	1.03	1.00
	4	4.9	4.0	13	296	126	0.42	0.93	1.61
てん菜 (茎葉部)	1						0.40	0.12	0.46
	2						0.41	0.16	0.58
	3						0.34	0.10	0.47
	4						0.28	0.05	0.27
大 根 (茎葉部)	1	6.8	6.2	7	627	157	0.73	0.39	1.39
	2	6.7	5.8	11	737	104	0.64	0.74	0.92
	3	5.6	4.3	12	271	186	0.60	0.35	1.37
	4	5.3	4.0	14	222	125	0.80	0.76	1.69
大 根 (根 部)	1						1.06	0.60	0.71
	2						1.23	0.51	0.71
	3						1.58	0.75	0.72
	4						1.21	0.58	0.70
キャベツ	1	6.8	5.7	8	472	145	0.54	1.11	1.36
	2	6.3	5.1	10	490	130	0.82	0.84	1.35
	3	5.1	4.1	13	380	52	0.57	1.16	1.62
	4	4.9	3.9	15	216	97	0.49	1.08	1.51

第35表の1 作物別の障害症状程度、収量比と重金属濃度およびNiとの比

作物名	No	障害 症状	収量比 (%)	重金属濃度(ppm)					Niに対する濃度比			
				Ni	Fe	Cu	Zn	Mn	Fe/Ni	Cu/Ni	Zn/Ni	Mn/Ni
チモシー	1	+	100	15	120	34	29	47	8.0	2.3	1.9	3.1
	2	+	69	17	135	19	41	59	7.9	1.1	2.4	3.5
	3	+	92	21	116	13	24	78	5.5	0.6	1.1	3.7
	4	+	100	19	116	5	28	105	6.1	0.3	1.5	5.5
	5	+	96	36	105	8	61	89	2.9	0.2	1.7	2.5
ペレニアル ライグラス	1	+	100	23	510	7	49	51	22.2	0.3	2.1	2.2
	2	+	156	25	620	11	39	69	24.8	0.4	1.6	2.8
	3	+	147	24	400	17	34	77	16.7	0.7	1.4	3.2
	4	+	152	29	425	7	38	108	14.7	0.2	1.3	3.7
	5	+	122	34	239	14	62	110	7.0	0.4	1.8	3.2
オーチャード グラス	1	—	100	41	620	11	35	200	15.1	0.3	0.9	4.9
	2	—	145	32	340	13	31	225	10.6	0.4	1.0	7.0
	3	—	135	40	300	6	29	225	7.5	0.2	0.7	5.6
	4	—	90	38	130	8	34	460	3.4	0.2	0.9	12.1
アルファル ファ	1	+	100	41	645	16	29	20	15.7	0.4	0.7	0.5
	2	—	112	39	420	14	30	41	10.8	0.4	0.8	1.1
	3	+	44	73	170	11	20	73	2.3	0.2	0.3	1.0
	4	+	40	81	290	12	38	111	3.6	0.1	0.5	1.4
	5	+	66	91	167	12	37	20	1.8	0.1	0.4	0.2
アカクローバ	1	—	100	70	3,000	84	40	65	42.9	1.2	0.6	0.9
	2	—	118	50	1,870	70	40	65	37.4	1.4	0.8	1.3
	3	—	107	63	850	28	52	65	13.5	0.4	0.8	1.0
	4	—	121	105	1,670	34	53	120	15.9	0.3	0.5	1.1
ラジノ クローバ	1	—	100	65	3,410	91	33	77	52.5	1.4	0.5	1.2
	2	—	114	76	3,410	100	39	83	44.9	1.3	0.5	1.1
	3	—	72	103	1,160	34	31	122	11.3	0.3	0.3	1.2
	4	—	72	115	1,160	37	34	110	10.1	0.3	0.3	1.0
小 豆	1	+	100	46	145	8	29	40	3.2	0.2	0.6	0.9
	2	+	54	54	335	7	33	42	6.2	0.1	0.6	0.8
	3	+	41	67	450	15	35	29	6.7	0.2	0.5	0.4
	4	+	22	103	460	10	26	120	4.5	0.1	0.3	1.2
	5	+	28	101	440	15	33	91	4.4	0.1	0.3	0.9
菜 豆	1	+	100	40	155	7	32	37	3.9	0.2	0.8	0.9
	2	+	80	32	140	7	25	33	4.4	0.2	0.8	1.0
	3	+	56	99	264	15	42	110	2.7	0.2	0.4	1.1
	4	+	64	94	240	15	38	90	2.6	0.2	0.4	1.0
大 豆	1	—	100	32	150	12	41	29	4.7	0.4	0.1	0.9
	2	+	70	36	180	11	28	40	5.0	0.3	0.8	1.1
	3	+	71	43	130	8	34	55	3.0	0.2	0.8	1.3
	4	+	25	59	315	12	38	130	5.3	0.2	0.6	2.2

第35表の2 作物別の障害症状程度、収量比と重金属濃度およびNiとの比

作物名	No	障害 症状	収量比 (%)	重金属濃度(ppm)					Niに対する濃度比			
				Ni	Fe	Cu	Zn	Mn	Fe/Ni	Cu/Ni	Zn/Ni	Mn/Ni
えん麦	1	—	100	5	120	7	16	58	24.0	1.4	3.2	11.6
	2	+	122	9	84	5	17	70	9.3	0.6	1.9	7.8
	3	++	112	13	150	6	25	107	11.5	0.5	1.9	8.2
	4	+	132	12	84	5	25	75	7.0	0.4	2.1	6.3
	5	+++	78	14	100	5	32	77	7.1	0.4	2.3	5.5
	6	++	68	18	65	6	27	140	3.6	0.3	1.5	7.8
とうもろこし	1	—	100	5	77	4	22	37	15.4	0.8	4.4	7.4
	2	—	147	9	130	8	34	55	14.4	0.7	2.6	7.9
	3	—	97	7	130	6	23	71	18.6	0.9	3.3	10.1
	4	—	90	8	230	10	29	42	28.8	1.3	3.6	5.3
馬鈴しょ	1	—	100	82	3,200	194	76	103	39.0	2.4	0.9	1.3
	2	—	114	81	2,660	135	68	61	32.8	1.7	0.8	0.8
	3	—	115	84	3,100	184	134	167	36.9	2.2	1.6	2.0
	4	—	114	132	3,200	97	78	168	24.2	0.7	0.6	1.3
馬鈴しょ (塊 茎)	1	—	100	11	124	10	26	—	11.3	0.9	2.4	—
	2	—	114	8	65	9	27	—	8.1	1.1	3.4	—
	3	—	115	19	65	9	33	—	3.4	0.5	1.7	—
	4	—	114	14	45	8	27	—	3.2	0.6	1.9	—
てん菜	1	—	100	48	440	32	37	78	9.2	0.7	0.8	1.6
	2	+	90	117	663	36	43	247	5.7	0.3	0.4	2.1
	3	++	92	111	410	16	42	180	3.7	0.1	0.4	1.6
	4	+++	59	122	450	16	47	300	3.7	0.1	0.4	2.5
てん菜 (根 部)	1		100	11	400	14	33	33	36.4	1.3	3.0	3.0
	2		90	15	115	5	37	57	7.7	0.3	2.5	3.8
	3		92	11	200	5	32	67	18.2	0.5	2.9	6.1
	4		59	8	150	1	29	75	18.8	0.1	3.6	9.4
大 根	1	—	100	28	1,000	8	36	33	35.7	0.3	1.3	1.2
	2	+	96	54	1,430	24	48	75	26.5	0.4	0.9	1.4
	3	++	116	48	990	25	52	89	20.6	0.5	1.1	1.9
	4	+++	100	81	1,610	14	63	138	19.9	0.2	0.8	1.7
大 根 (根 部)	1		100	72	587	20	43	17	8.2	0.3	0.6	0.2
	2		96	105	265	9	38	17	2.5	0.1	0.4	0.2
	3		116	110	670	12	39	10	6.1	0.1	0.4	0.1
	4		100	111	265	8	25	33	2.4	0.1	0.2	0.3
キャベツ	1	++	100*	81	675	18	34	33	8.3	0.2	0.4	0.4
	2	+	63	104	1,230	20	34	33	11.8	0.2	0.3	0.3
	3	+++~++++	48	123	1,500	62	35	140	12.2	0.5	0.3	1.1
	4	++	103	75	315	14	42	74	4.2	0.2	0.6	1.0

*結球するような正常な生育はしなかった。

中ニッケル濃度の水準になると判断されるので、おのおのの一次式から〔 $a < 5$, $b > 20$ 〕,〔 $a < 5$, $b < 20$ 〕,〔 $a > 5$, $b > 20$ 〕,〔 $a > 5$, $b < 20$ 〕の4グループに分類し、第36表に示した。

〔 $a < 5$, $b > 20$ 〕に属する作物はオーチャードグラス、ラジノクローバ、アカクローバおよび馬鈴しょで、これらはニッケル水準が高いにもかかわらず、クロロシスやネクロシスも発現しにくく、また収量への影響も小さい。

〔 $a < 5$, $b < 20$ 〕に属する作物はとうもろこし、チモシー、ペレニアルライグラス、えん麦および大豆などである。この中でとうもろこしは症状、収量にもニッケルの影響は認められなかったが、他の作物は障害が認められた。また、このグループの中では a の大きいほど、すなわち吸収勾配の大きいほど障害が強く現われる傾向を示した。

〔 $a > 5$, $b > 20$ 〕と〔 $a > 5$, $b < 20$ 〕の2グループはいずれもクロロシスまたはネクロシスが認められ、ニッケルの吸収勾配が大きい作物は

と障害を受けやすいことを示した。

抵抗力の強い作物のニッケル吸収は置換性ニッケルに対してゆるやかな勾配になるが、ニッケルのほとんど存在しない土壌でも同水準のニッケルを吸収するとは考えられない。

そこで置換性ニッケル濃度の広い範囲の土壌を用いて追加試験を行った。抵抗力の強い作物には馬鈴しょ、障害の発現しやすい作物にはえん麦を用いた。

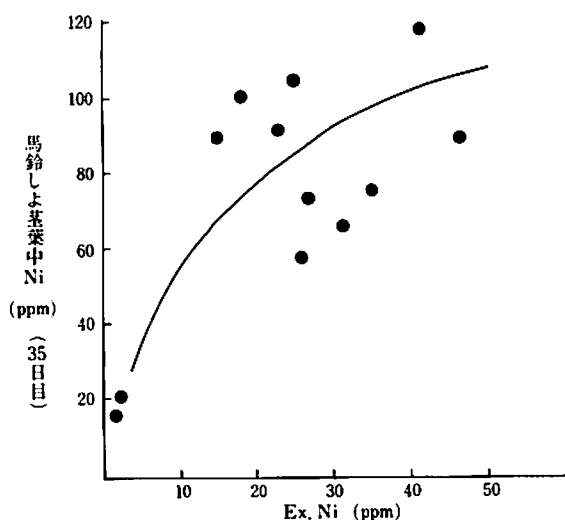
これらの植物体内ニッケル濃度と置換性ニッケルの関係を第17図に示した。これから明らかなように、ニッケルに対して抵抗力の弱いえん麦の植物体内ニッケル濃度は置換性ニッケルに比例して直線的に増大する。これに対し、抵抗力の強い馬鈴しょの植物体内ニッケル濃度は低濃度の置換性ニッケル土壌でのとり込みが速やかに行われているが、置換性ニッケルの高濃度の条件ではそのとり込みが緩慢となり、植物体内のニッケルは速やかに飽和状態に達するような傾向を示した。

第36表に示した作物でこの馬鈴しょの型に属

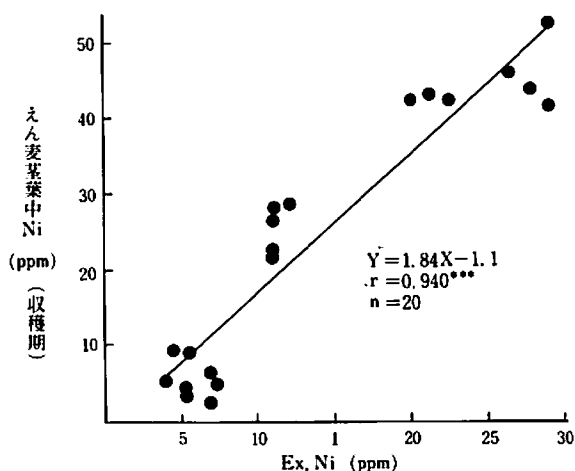
第36表 置換性 Ni と植物体 Ni の相関関係および Ni 抵抗性

分 類	作 物 名	$y=ax+b$	抵 抗 性	
			症 状*	収 量
$a < 5$, $b > 20$.	オーチャード グ ラ ス	$y = 0.90x + 24$	強	強
	ラジノクローバ	$y = 3.37x + 54$	"	"
	アカクローバ	$y = 3.93x + 35$	"	"
	馬 鈴 し ょ	$y = 4.91x + 42$	"	"
$a < 5$, $b < 20$.	とうもろこし	$y = 0.29x + 4$	強	強
	チ モ シ ー	$y = 0.44x + 16$	やや強	"
	ペ レ ニ ア ル ス ラ イ グ ラ ス	$y = 0.91x + 18$	"	"
	え ん 麦	$y = 1.30x - 2$	弱	やや弱
	大 豆	$y = 2.84x + 13$	やや強	弱
$a > 5$, $b > 20$.	小 豆	$y = 5.10x + 28$	弱	弱
	て ん 菜	$y = 7.97x + 20$	やや強	やや強
$a > 5$, $b < 20$.	アルファルファ	$y = 5.63x + 8$	弱	弱
	大 根	$y = 6.88x - 20$	"	強
	菜 豆	$y = 9.14x + 18$	弱	弱

* クロロシスまたはネクロシス



第17図 馬鈴しょとえん麦の茎葉中 Ni 濃度と置換性 Ni の関係



するものは $[a < 5, b > 20]$ のグループと、とうもろこしやチモシー、ペレニアルライグラスなどがこれに属する。

えん麦型の作物はアルファルファ、大根などのように a が大きく、かつ b が小さいもの、または a が小さくても b が極端に小さい場合はこれに属するであろう。

以上は作物間におけるニッケル抵抗性の差異を置換性ニッケルに対する植物体内にとりこまれるニッケルの特徴から検討した結果であるが、このようなニッケル吸収の特徴からは植物体内で生理的にどのような変化が起って障害の有無を生じるのか不明である。

そこで生育障害やクロロシス、またはネクロシス発生に重要な関係があると指摘されている鉄や銅との関係^{33,61)}をニッケルとの比から検討した。

すでに第1節でも検討したように、植物体内における Fe/Ni 比のほか植物にとって必須元素となっているその他の重金属の銅、亜鉛、マンガンについても同様にそれぞれニッケルに対する比を求め、第35表に示した。

この実験でみるかぎり、Zn/Ni 比、Mn/Ni 比については収量比との間に特定の傾向を認めることができなかった。

これに対して、Fe/Ni 比と Cu/Ni 比はニッケル

に対して抵抗力の強い作物で高く、また障害の強くなるほどこれらの比が低下していく傾向を示した。ただし、小豆、菜豆、大豆のみは CaCO_3 施用区の高 pH 土壌においても Fe/Ni 比と Cu/Ni 比が低いにもかかわらず、ニッケルの吸収に伴って鉄や銅の吸収も高まるところから、置換性ニッケルの増大によっても Fe/Ni 比、または Cu/Ni 比はあまり変化しなかった。

そこで、Fe/Ni 比、Cu/Ni 比と収量比もしくは障害症状との関係をさらにくわしく知るため、各作物別に置換性ニッケルと Fe/Ni 比、Cu/Ni 比の一次式を求め、統計的に置換性ニッケル 10 ppm と 15 ppm におけるそれぞれの比を計算して第37表に示した。

この結果から、キャベツなどの一部の作物を除くと、収量の減少が著しい作物は Fe/Ni 比、Cu/Ni 比とも低い値となった。

また、ネクロシスやクロロシスのまったく認めることのできなかったアカクローバ、ラジノクローバ、馬鈴しょおよびとうもろこしは Fe/Ni 比のみでなく、Cu/Ni 比も高い値が得られた。これに対して、収量の減少は認められなかったが、ネクロシスの強く発現した大根は Fe/Ni 比が高い(葉身中)にもかかわらず、Cu/Ni 比は低い値となった。

Fe/Ni 比がおおむね7, 8 以上の場合は、収量への影響は認められなかった。

以上の結果から、多くの場合、ニッケル過剰障害は、生育抑制とネクロシスやクロロシスの発現は平行するが、作物によってはこれらが分離して発現することが認められた。

第4節 ニッケル過剰障害植物体の EMX 分析

第1節および第3節でニッケルに対して抵抗力のある作物、または同一作物でもニッケル濃度に対して障害の軽い作物は鉄濃度の高いことが明らかになった。そこで植物体内でこれら鉄やニッケルがどのような分布を示すか EMX による線分析

で確かめた。

1 実験法

供試作物はいずれもニッケル過剰のため、クロロシス、またはネクロシスの発生しているものを用いた。分析法は処定の処理後、線分析に供した。いずれも健全部とクロロシスまたはネクロシス両方にわたって連続的に分析したが、どの部分が健全部分であるかは EMX の光学顕微鏡が不鮮明で確認することはできなかった。

2 実験結果

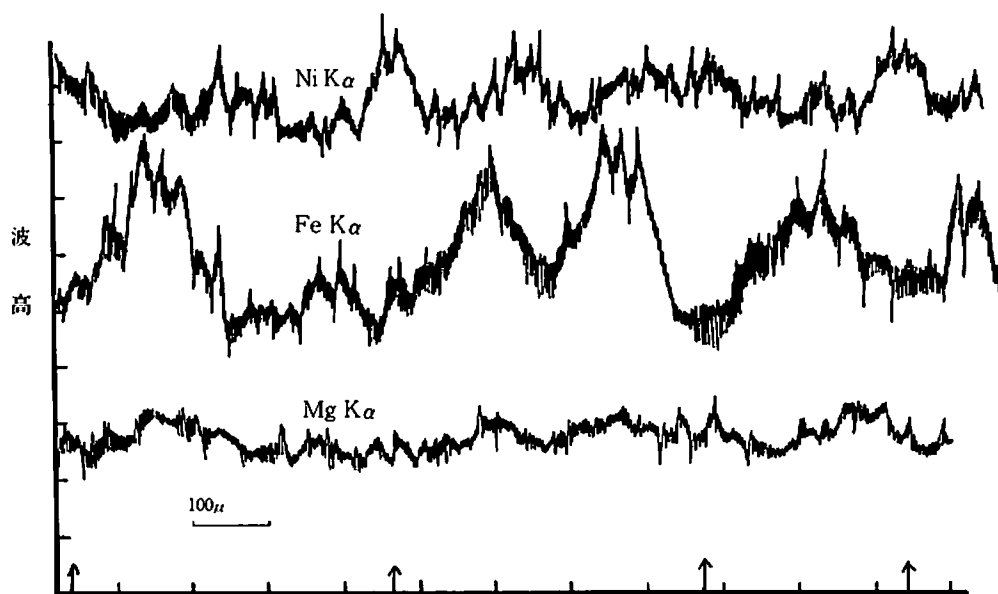
えん麦葉身部の線分析の結果を第18図に示した。分析には2チャンネルを同時に使い、Ni K α , Fe K α を同時測定した。Mg K α は同一測定部分を改めて計測した。これから鉄の分布には400 μ から500 μ の間隔で低濃度部分が存在していることが明らかになった。これに対し、ニッケルの分布は鉄ほど大きな濃度差がなく、また鉄の分布にあまり関連のない分布状態を示した。この鉄濃度の濃淡の間隔はえん麦のクロロシスの縞の間隔とほぼ一致した。また CROOKE と KNIGHT (1955)¹⁷⁾ による放射性同位元素の⁶⁵Ni と ⁵⁹Fe, ⁵⁵Fe での実験結果とも一致することが明らかになった。

つぎに第19図には大根の葉身部、第20図にはキャベツ、第21図にはアルファファ、第22図には水耕によるニッケル過剰症の小豆の葉身をそれぞれ EMX による線分析の結果を示した。これらは分析後に線分析の跡の確認から、いずれもネクロシスと健全部分を通過しているにもかかわらず、鉄、ニッケルのいずれの測定結果にもえん麦の

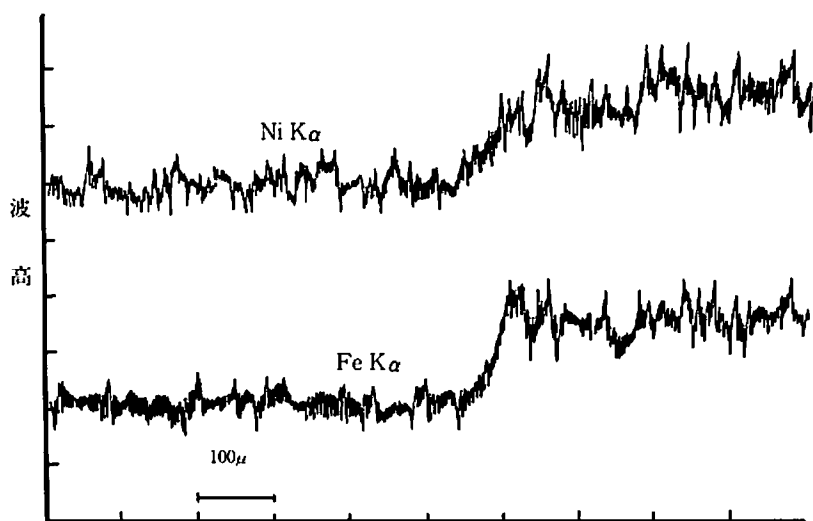
第37表 置換性 Ni に対する Fe/Ni比と Cu/Ni比

作物名	Fe/Ni比		Cu/Ni比	
	Ex. Ni (ppm)		Ex. Ni (ppm)	
	10	15	10	15
チモシー	6.6 (24.0)	5.7 (18.5)	1.17 (0.43)	0.63 (0.37)
ベレニャス ライグラス	17.3 (19.9)	10.5 (15.6)	0.40 (0.18)	0.38 (0.09)
オーチャード グランド	8.0 (15.6)	3.1 (9.7)	0.26 (0.37)	0.20 (0.42)
アルファファ	7.1 (15.7)	0.2 (3.0)	0.25 (0.22)	0.07 (0.10)
アカクロバ	25.9 (19.0)	10.7 (14.5)	0.77 (0.68)	0.02 (0.98)
ラジノクロバ	31.2	16.0	0.86	0.44
小豆	4.9	4.4	0.13	0.09
菜豆	3.2	2.0	—	—
大豆	4.5	4.4	0.28	0.17
えん麦	11.8	3.6	0.68	0.25
とうもろこし	18.2	25.4	0.88	1.15
馬鈴薯	34.1	28.4	1.85	1.21
てん菜	5.6 20.2	3.5 6.7	0.34 0.55	0.12 0.11
大根	28.1 5.6	16.1 1.8	0.35 0.18	0.33 0.02
キャベツ	9.9	7.5	0.26	0.34

() = 2 番草, * = 根部



第18図 EMX によるえん麦葉身の線分析 (横断)

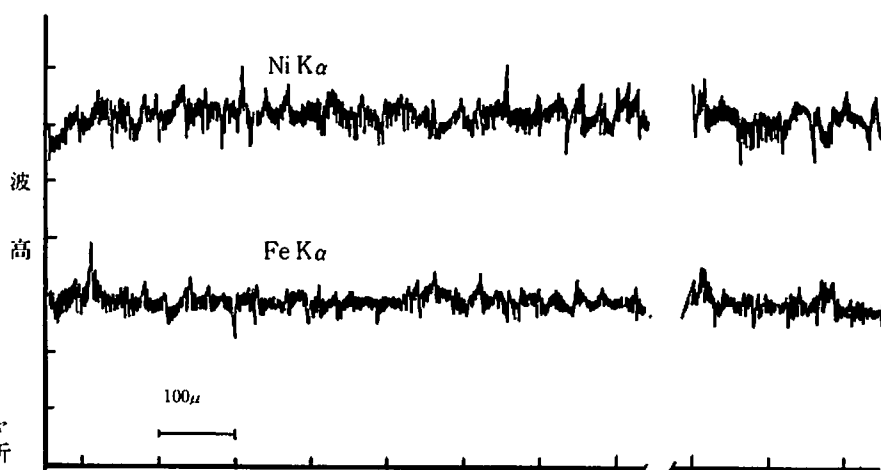


第19図 EMX による大根葉身の線分析

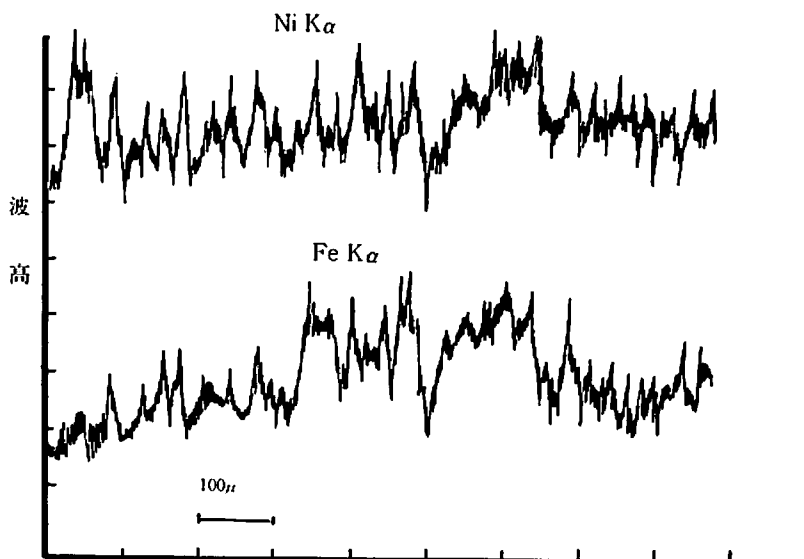
ような明瞭な差異を見い出すことができなかった。ただ、小豆において葉脈中に鉄の集積が見られ、この結果は CROOKE ら¹⁷⁾の結果と一致をみた。

第5節 とうもろこしと馬鈴しょの生育障害の検討

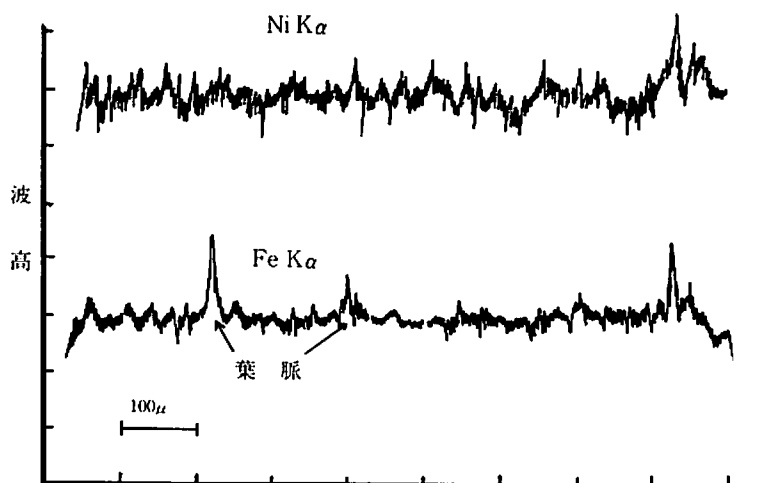
幌加内町の洪積土では、とうもろこしと馬鈴しょにニッケルによる障害は発現しなかった。しかし HUNTER ら³²⁾は馬鈴しょにニッケルによるクロロシスと褐色のネクロシスの散在を認めている。また増田ら⁴⁹⁾はこの双方の作物に障害の発現



第20図 EMXによるキャベツ葉身の線分析



第21図 EMXによるアルファルファ葉身の線分析



第22図 EMXによる小豆葉身の線分析（水耕によるNi過剰）

第38表 供試土壌の理化学性

No.	pH (H ₂ O)	土性	CEC (me/100g)	置換性塩基 (me/100g)				塩基飽和度 (%)	Ex. Ni (ppm)
				Na	K	Mg	Ca		
1	6.5	LiC	32.3	0.3	0.9	17.5	7.9	82.4	32
2	5.5	LiC	34.0	0.3	1.0	10.2	7.7	56.5	55
3	5.1	LiC	25.5	0.1	0.6	1.2	5.6	29.4	0

を観察している。もしニッケルによる障害がFe/Ni比またはCu/Ni比などによって発現するとしたら、鉄の吸収しにくい条件、または鉄が一定であってもニッケルの吸収が促進される条件が必ずおこるはずである。したがってこのような条件では、障害は必ず発生すると考えなくてはならない。

そこで、この節では置換性ニッケルのより高い土壌を中川町と幌加内町から採取してきて、無底 pot をほ場に埋設してとうもろこしと馬鈴しょを栽培し、障害発現の有無とその特徴を検討した。

1 実験方法

供試土壌：中川町の沖積土 (No. 1)、幌加内町の洪積土 (No. 2) と、その対照に長沼町の非蛇紋岩質土壌である洪積土 (No. 3) を用いた。これらの理化学性は第38表のとおりである。

pot：内径 30 cm、深さ 30 cm の素焼土管をほ場に埋設し、これにおのおのの土壌をつめて作物を栽培した。施肥量は第39表のとおりである。

降雨量：現地試験においても、降雨によって障害の発現が強まったことから、作物栽培期間の降雨量と日数を第40表に示した。

2 実験結果および考察

馬鈴しょ：同じ土壌を用いながら、生育期間中に降雨の少なかった1974年度と、ほぼ1日おきに降雨のあった1978年度栽培の馬鈴しょではまったく異なった生育と障害症状の発現を呈した。ほぼ早慥気味に経過した1974年度栽培の馬鈴しょ

第39表 pot 当り施肥量

(g)

作物	年度	硫安	過石	硫加	硫苦	炭カル
馬鈴しょ	1974	10	10	8	3*	0
	1978	10	10	5	0	100**
	1975	10	10	4	0	0

* No. 3 のみ, ** CaCO₃ 系列のみ。

第40表 栽培期間中の降雨量

mm (日)

旬 別	1974	1978	1975
5 月	中旬 16.5 (2)	68.5 (5)	36.0 (2)
	下旬 28.5 (4)	55.0 (6)	8.0 (3)
	上旬 38.0 (1)	36.0 (4)	40.5 (3)
6 月	中旬 53.5 (6)	43.5 (7)	23.5 (3)
	下旬		12.5 (2)
7 月上旬			57.5 (4)
計	136.5 (13)/41日	203.0 (22)/41日	178.0 (17)/71日

第41表 生育調査および症状

No.	草丈(cm)	Ni過剰症	Ca欠乏症	年度(系列)
1	23	—	+	1974
2	18	—	—	
3	33	—	—	
1	12	十~十	0~十	1978
2	8	卅~卅	—	
3	15	—	—	
1	17	—	—	1978
2	11	—	—	(CaCO ₃)

にはニッケルによるクロロシスやネクロシスはまったく発生せず、マグネシウム濃度の高い中川土壌である No. 1 では、新しく展開してくる葉の外周が褐色になってややカップングし、カルシウム欠乏症状を呈した (第41表)。

第42表 跡地土壌の分析値

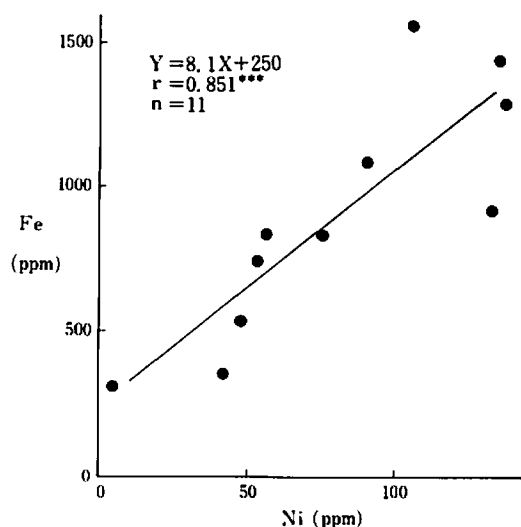
No.	pH (H ₂ O)	Ex.Ni (ppm)	置換性塩基(me/100g)		Ca/Mg	年 度 (系列)
			Mg	Ca		
1	6.0	34	14.0	3.8	0.27	1974
2	5.3	43	9.8	5.4	0.55	
3	5.0	2	0.8	9.9	12.38	
1	5.5	38	20.4	9.6	0.47	1978
2	4.3	34	8.2	10.9	1.33	
3	5.0	0	1.2	8.0	6.67	
1	6.5	22	15.2	22.9	1.51	1978 (CaCO ₃)
2	5.6	20	9.5	20.2	2.13	

それに比較して、1978年度栽培の馬鈴しょにはニッケル過剰症が現われ、この症状はクロロシスと褐色の不規則の斑点のネクロシスが葉面に現われた。カルシウム欠乏症はNo. 1にわずかに現われたにすぎなかった。炭酸カルシウム施用系列はどちらも発現しなかった。

跡地土壌の分析結果は第42表に示した。これからも明らかなように、置換性ニッケルはいずれも30 ppm以上でありながら、すでに現地試験の場合でも示したように、降雨の量が障害発現にとって大きな要因になることがわかった。また、このような土壌でも炭酸カルシウムの施用はニッケル過剰障害にとっても、カルシウム欠乏症にとっても有効であることが明らかになった。

第43表から明らかなように、同じ土壌でありながら、ニッケルの吸収濃度は1978年の方が30%から80%も高い水準に達している。しかし、第23図でも明らかなように、馬鈴しょ茎葉部のニッケルと鉄の濃度は高い正の相関関係にあって、そのため体内におけるFe/Ni比も1974年度に比較して1978年度はほとんど同じか、むしろ後者の方がやや高い結果になっている。したがって1978年度に発現したニッケル過剰障害は鉄欠乏によるものでないであろう。

この鉄と異なり、馬鈴しょ茎葉部の銅の濃度は1978年度の方が低く、障害の発生した蛇紋岩質土壌におけるCu/Ni比は1974年度に比較して2分の1以下であることがわかる。この1974年度の馬



第23図 馬鈴しょ茎葉部のNiとFeの関係 (1978年度)

鈴しょ茎葉部中銅濃度も、第3節に示した現地試験の馬鈴しょの銅濃度水準に比較して著しく低い濃度ではあるけれども、第43表の結果は植物体内におけるCu/Ni比がネクロシスやクロロシス発現の要因になりうることを、またはFe/Ni比のみでニッケル障害の程度を示す尺度にはなりえないことを物語っているといえよう。

これまでの蛇紋岩質土壌に関する研究ではカルシウム欠乏症の発現についての研究報告⁹⁸⁾もあったが、その後の多くは研究についてはマグネシウム過剰に伴うカルシウム欠乏の発生については否定的な考えが多かった。

しかし、第41表に示した馬鈴しょのニッケル過剰症とカルシウム欠乏症の症状はまったく異なり、第43表に示したとおり分析の結果からも1974年度のNo. 1の馬鈴しょはカルシウム欠乏症であると判断せざるを得なかった。

同じ土壌に栽培したえん麦では馬鈴しょほどCa/Mg比が減少することはなく、このことは、作物によっては蛇紋岩質土壌にマグネシウムとの拮抗作用からカルシウム欠乏症の発生することを示した例と考えられる。

また、この土壌を採取してきた農家の証言によっても、早魃年は馬鈴しょの葉の外周が褐変化し、カッピングするが、降雨の多い年はいもが腐ったり、消えていくことを認めている。この地帯の土壌はpHが高く、場所によってはpHが7～8もあるため、石灰の施用は不必要であるとの指導が行われているが、調査段階から石灰の施用をすすめたところ、現在では馬鈴しょのこのような障害の発生は認められなくなり、キャベツや大根に発生していたネクロシスも消失した。

とうもろこし：さきに示した馬鈴しょを栽培した同じ土壌で1975年にとうもろこしを栽培し、障害症状の発現の有無と土壌成分の吸収差異を検討した。栽培期間は播種後40日間だけであったが、カルシウム欠乏症またはニッケル過剰と思われる症状はまったく発現しなかった。茎葉部の分析結果を第44表に示す。

ニッケルの吸収濃度はかなり高い水準に達したが、鉄や銅の濃度もこれに伴って高まる傾向を示し(第24図)、Fe/Ni比またはCu/Ni比とも馬鈴しょより高い水準にあることが明らかになった。Ca/Mg比はカルシウム欠乏症の発生した馬鈴しょと同じ水準であったが、対照区に用いた長沼土壌との差は馬鈴しょより小さかった。

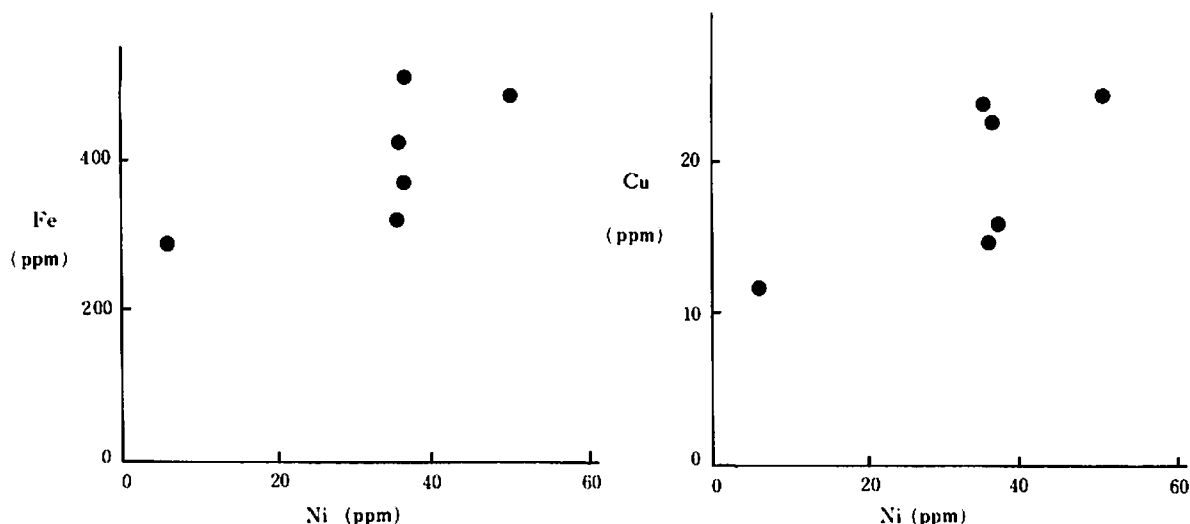
この欠乏の発現も作物のカルシウムに対する要求度によって異なるものと考えられるが、とうもろこしの場合も蛇紋岩質土壌ではマグネシウムの吸収が増大し、これに伴ってカルシウムの吸収が減少しているから、蛇紋岩質土壌においてはとうもろこしにおいてもいぜんカルシウム欠乏発生の

第43表 馬鈴しょ茎葉部の分析値(播種後35日目)

No	Ni (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Mg (%)	Ca (%)	Fe/Ni	Cu/Ni	Ca/Mg	年 度 (系列)
1	74	488	11	0.65	0.10	6.6	0.15	0.15	1974
2	103	676	18	0.50	0.13	6.6	0.17	0.26	
3	17	268	9	0.20	0.68	15.8	0.53	3.40	
1	133	923	8	0.70	0.35	6.9	0.06	0.50	1978
2	138	1,292	8	0.42	0.25	9.4	0.06	0.60	
3	4	308	7	0.30	0.85	77.0	1.63	2.83	
1	57	828	4	0.82	0.82	14.5	0.08	1.00	1978 (CaCO ₃)
2	76	824	6	0.72	1.09	10.8	0.07	1.52	

第44表 とうもろこし茎葉部の分析値(播種後40日目)

No.	Ni (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Mg (%)	Ca (%)	Fe/Ni	Cu/Ni	Ca/Mg	年 度
1	36	320	15	0.62	0.09	8.9	0.42	0.15	1975
2	50	470	23	0.61	0.11	9.4	0.48	0.18	
3	6	280	12	0.18	0.30	50.9	2.09	1.67	



第24図 とうもろこし茎葉中のFeとNiおよびCuとNiの関係

可能性が存在すると思われる。

ニッケル過剰症についてはFe/Ni比、またはCu/Ni比でみるかがり発現しにくい作物であるといえよう。

第6節 水稻に対するニッケルの影響

すでに報告⁶⁴⁾したごとく、北海道における蛇紋岩質土壤地帯でも、水稻にはニッケルの過剰障害を見い出すことができない。そこでこの節では、水稻に対するニッケルの用量試験を行い、障害の発生において畑作物との共通性や相異点がどのようなものであるか検討した。

1 実験方法

1) 栽培方法：本実験に用いた土壤は沖積土とローム質の火山性土の2種類である。供試土壤の理化学性は第45表のとおりである。

供試作物の水稻(ゆうなみ)は育苗後、2000分の1aのポットに2個体ずつ2株に移植した。施肥量はポット当りN:2.0g、 P_2O_5 :2.4g、 K_2O :1.7gを化成肥料で施用した。

2) ニッケルの添加方法：ニッケルの種類：硫酸ニッケル($NiSO_4 \cdot 6H_2O$)および硫化ニッケル(NiS)を用いた。硫酸ニッケルは沖積土と火山性土で添加量が異なり、沖積土はNiで100, 200, 400, 800ppmとし、火山性土は200, 400, 600, 800ppmとした。硫化ニッケルの方は同じくNiとして各土壤とも500, 1000, 2000, 4000とした。また、各処理濃度ともpHの影響を知るため、pH7.0相当の炭酸カルシウムを施用した。

土壤はニッケル添加後1年間予備栽培を行ってから実験に供した。

2 実験結果

1) 添加ニッケルと置換性ニッケルの関係：実験後、添加したニッケルと置換性ニッケルの関係がどのようなになっているか硫酸ニッケル(第25図)と硫化ニッケル(第26図)に分けて示した。

この結果、硫酸ニッケルの添加では沖積土と火山性土で異なった傾向が得られた。すなわち、炭酸カルシウム無施用では沖積土の方の置換性ニッケルが高く、炭酸カルシウム添加では火山性土の

第45表 供試土壤の理化学性

土 壤	土性	腐植 (%)	pH		Y_1	CEC (me/100g)	置換性塩基 (me/100g)				塩 基 飽和度 (%)	P_2O_5 吸収係数 (mg/100g)
			H ₂ O	KCl			Ca	Mg	K	Na		
褐色低地土(沖積土)	SL	2.4	5.4	4.4	1.95	10.0	6.2	1.4	0.5	0.1	82.0	720
褐色火山性土(火山性土)	SL	0.9	6.1	5.0	1.25	9.7	3.0	0.9	1.2	0.3	55.7	1,680

方が高くなる結果となった。

そこでこの2種類の土壌をみると、原土では沖積土のpHが1近くも低いのにに対し、炭酸カルシウム施用土壌では火山性土の方が低くなる結果が得られた。この土壌pH低下の原因をニッケル添加の関係から検討し、第27図に示した。これから、ニッケル添加によるpHの低下は火山性土の方が大きくなることが明らかになった。したがって、両土壌による置換性ニッケルの濃度差は土壌pHの影響を強く受けていることがわかった。

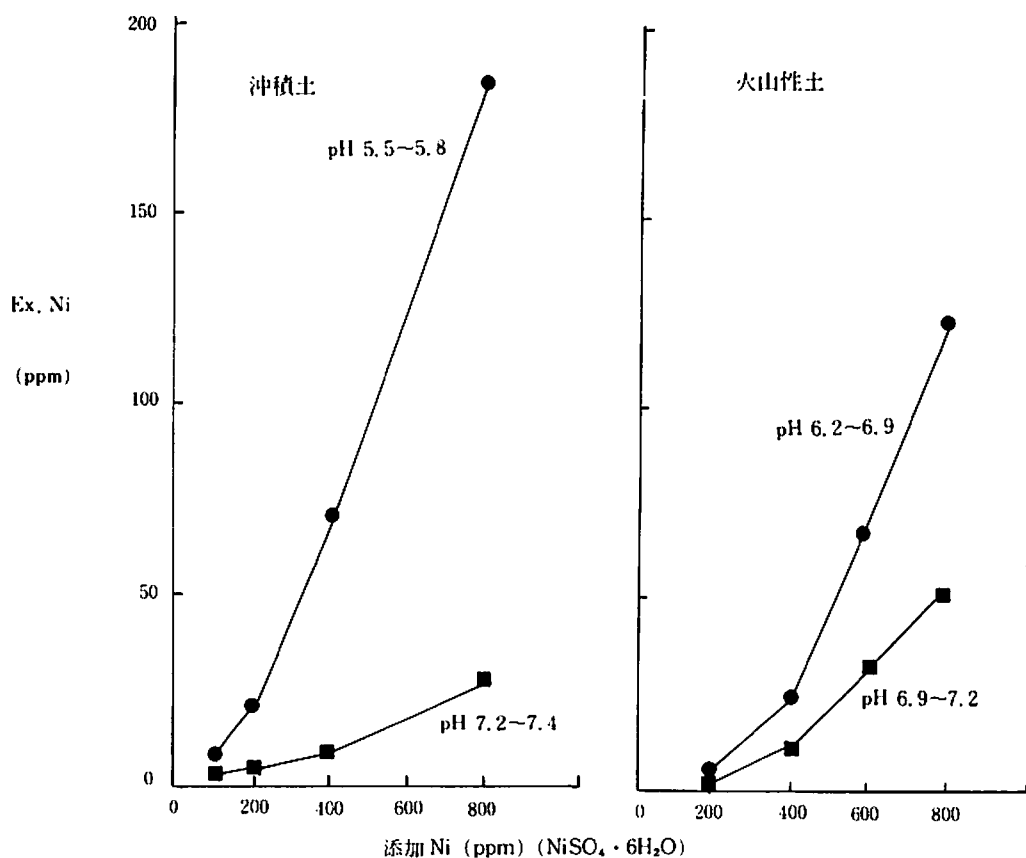
硫酸ニッケルと硫化ニッケルでは2作後であっても、添加ニッケルに対する置換性ニッケルは硫化ニッケルの方が硫酸ニッケル添加の約2分の1程度であった。

2) 置換性ニッケル濃度と収量の関係：畑作物の場合、土壌中置換性ニッケルと生育障害とは密

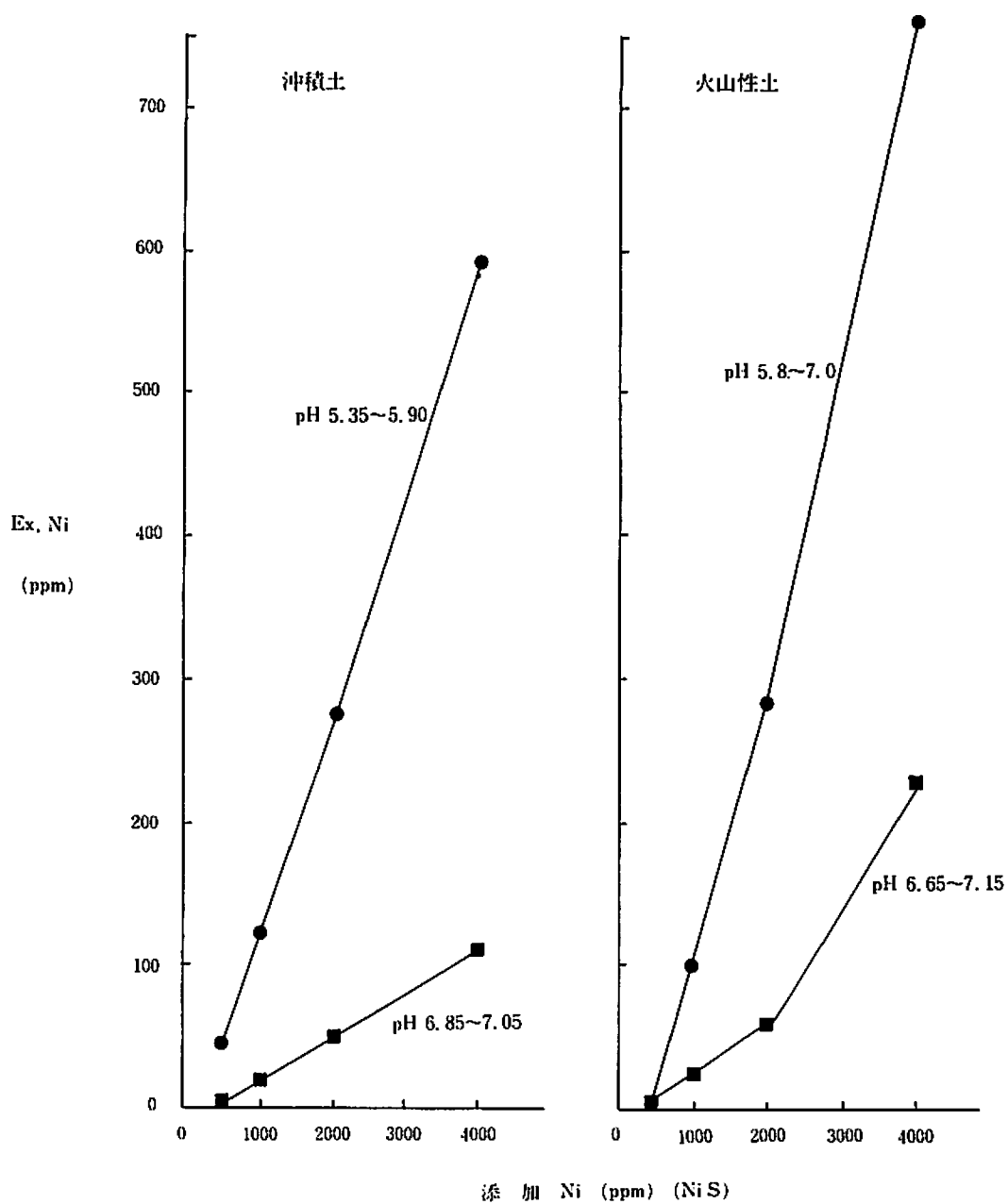
接な関係にあることを示した。そこで同様なことが水稲でも認められるかどうか第28図には玄米収量と土壌中の置換性ニッケル濃度が100 ppm以上であっても影響のない場合と、30 ppm以上ですでに収穫皆無状態になる場合のあることがわかった。このことは土壌中の置換性ニッケル濃度のみでは水稲に対する障害の尺度にならないことを意味する。

さらに、このようなニッケル障害発生に対する土壌中ニッケル濃度水準の差異が生ずる原因を明らかにするため、畑作物の場合と同様に作物体中のFe/Ni比を計算し、Fe/Ni比と収量の関係求めて第29図に示した。

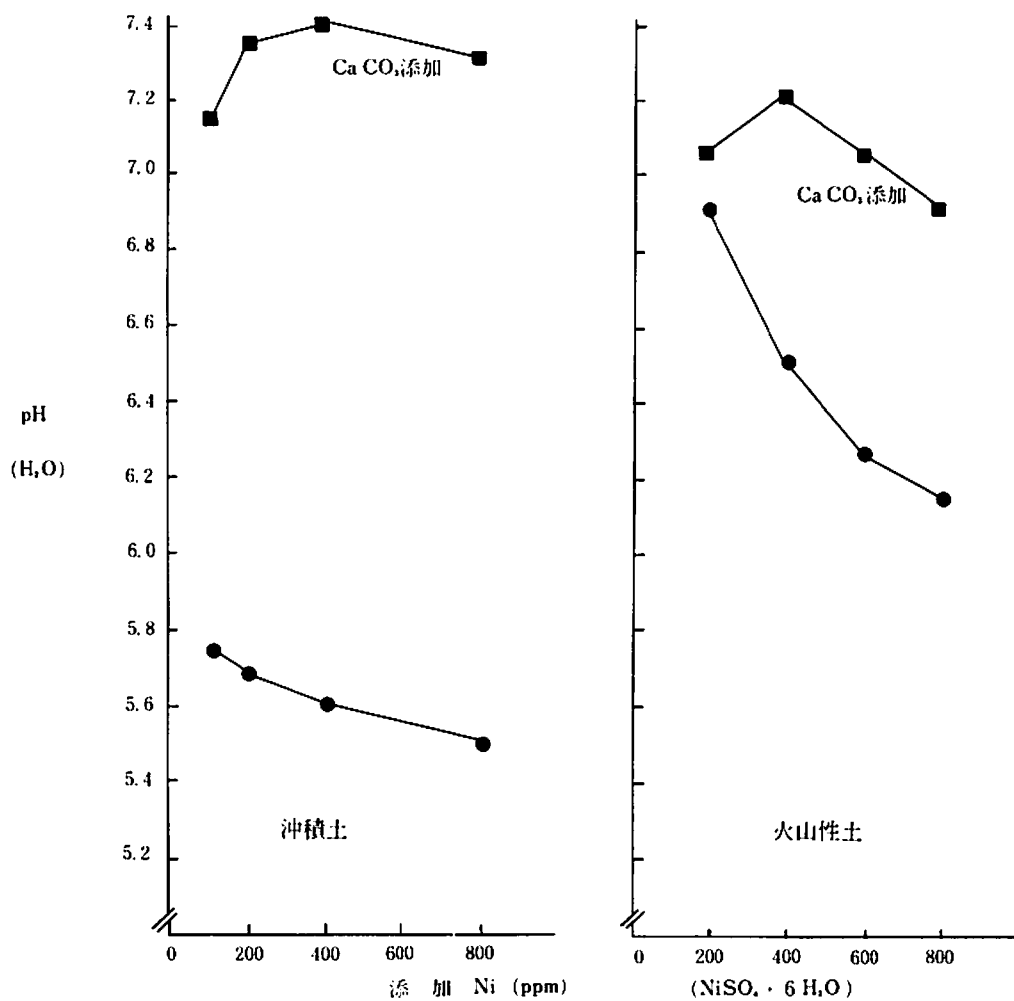
これから明らかなように、葉身中のFe/Ni比が8以下になると、玄米収量は急激に減少することが明らかになった。



第25図 添加Niと置換性Niの関係

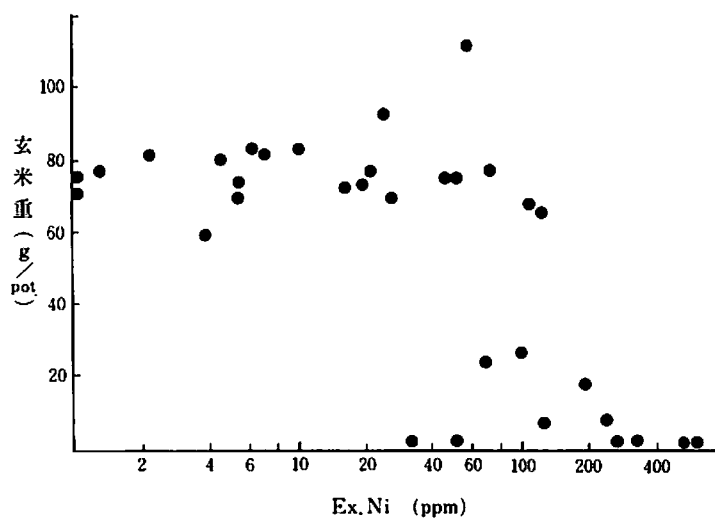


第26図 添加 Ni と置換性 Ni の関係

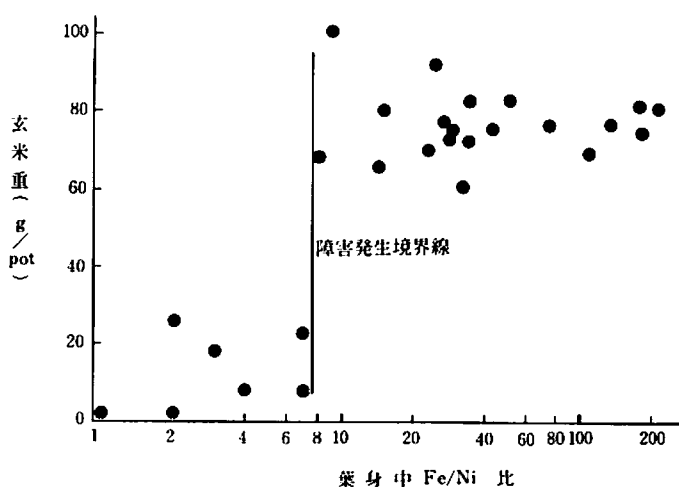


第27図 Ni の添加と土壤 pH の変化

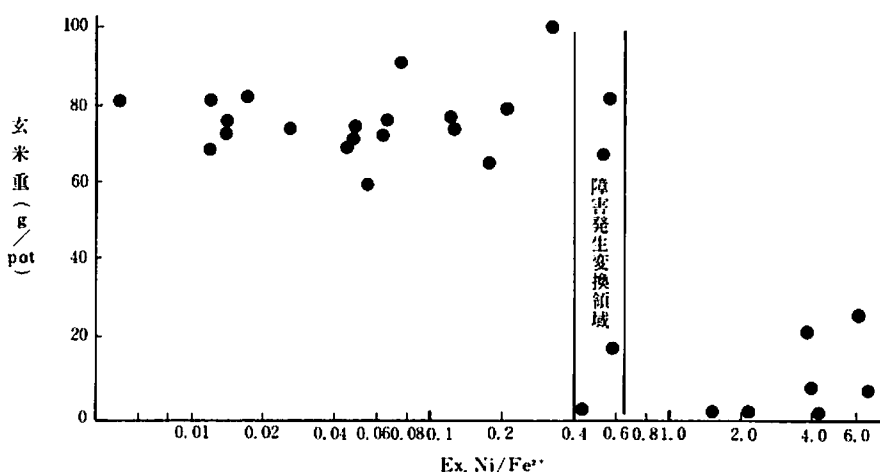
第28図 土壤中置換性 Ni と収量の関係



第29図 水稻葉身中
Fe/Ni 比と収
量の関係



第30図 置換性Ni：
活性2価Fe
(移植20日後)
比と収量の関
係



3) 植物体中ニッケルおよび鉄濃度におよぼす土壌中のニッケルと鉄濃度の関係：水稻のニッケル障害も植物体中の Fe/Ni 比がある一定値以下になると発現することが明らかになったので、これらニッケルおよび鉄吸収に対する土壌の影響を検討した。

まず、土壌中のニッケルと鉄濃度がどのように作物の障害に影響するかを明らかにするため、置換性ニッケルと水稻の生育前期における土壌中の活性2価鉄 (Fe^{2+}) を定量し、この両者の比と玄米収量の関係を求め第30図に示した。

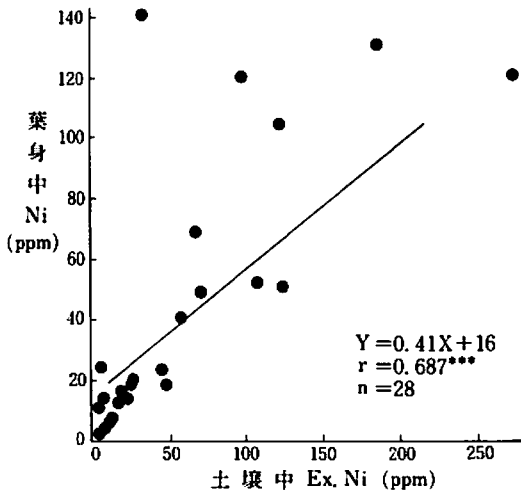
これから明らかなように、玄米の収量、すなわちニッケルによる生育障害は土壌の置換性ニッケルと活性2価鉄 ($\text{Ex. Ni}/\text{Fe}^{2+}$) の比と密接

な関係にあり、置換性ニッケルが活性2価鉄の2分の1以上になってくると水稻にも障害の出ることが明らかになった。

そこで、置換性ニッケルや活性2価鉄が水稻に吸収されるニッケルや鉄濃度とどのような関係にあるかを明らかにするため、水稻葉身中のニッケル濃度と置換性ニッケル濃度、または葉身中铁濃度と活性2価鉄の関係を求め、それぞれ第31図と第32図に示した。

これから、土壌中のニッケルや鉄濃度と葉身中のニッケルや鉄濃度はいずれも正の高い相関関係にあることが明らかになった。

つぎに、葉身中ニッケル濃度に対して葉身中铁濃度がどのような関係にあるかを明らかにするた



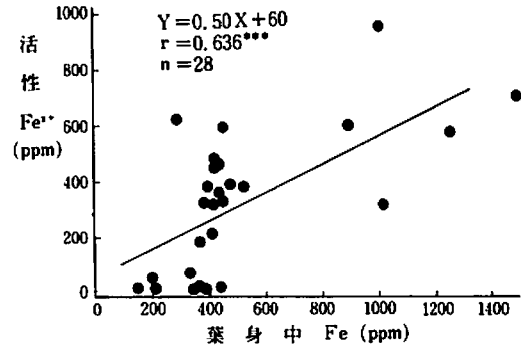
第31図 土壌中置換性 Ni 濃度と水稻の葉身中 Ni 濃度の関係

め、活性 2 価鉄濃度水準の同じような土壌を試料として選び出し、比較検討した。この結果を第 33 図に示した。

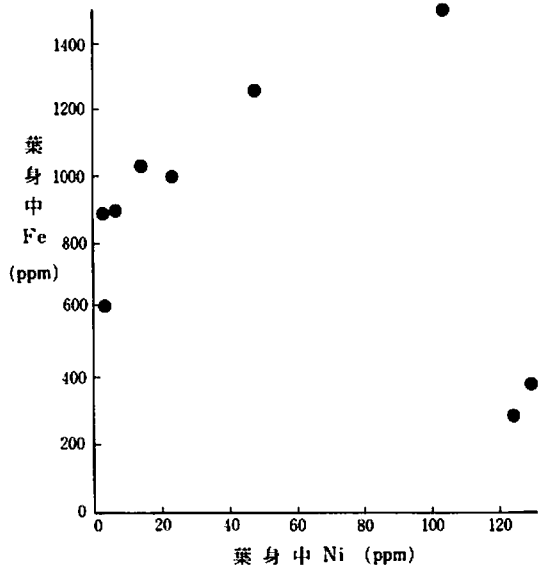
これから葉身中ニッケル濃度が 100 ppm 程度まではニッケルの吸収に伴って鉄の吸収も増大するが、葉身中ニッケル濃度 120 ppm 以上では鉄濃度が著しく低下し、活性 2 価鉄の存在にもかかわらず、鉄の吸収は抑制されることがわかった。

この鉄の吸収が抑制される傾向は他の土壌にも認められ、活性 2 価鉄の少ない火山性土とか、沖積土でも pH の高い土壌では葉身中のニッケルが増大しても鉄の供給が伴わないため、葉身中铁濃度の増大する現象は認められず、また鉄濃度の減少も認められなかった。しかしながら、葉身中のニッケル濃度が 120 ppm 以上になると明らかに鉄濃度は低下をしていくことが認められた。

4) 葉身中塩基およびリン酸濃度に対するニッケルの影響：第 46 表には実験に用いた水稻葉身中のマンガ、カルシウム、マグネシウムおよびリン酸の濃度と総収量を示した。水稻のマンガンの吸収は火山性土で著しく高く、鉄の場合と対照的な傾向を示した。しかしこのマンガ濃度も炭酸カルシウムの施用によって低下し、またニッケルの添加によって生育障害の発現した状態ではいずれも 0.2% 程度まで低下する傾向が認められた。



第32図 活性 2 価 Fe と水稻葉身中 Fe 濃度の関係



第33図 葉身中 Fe 濃度と Ni 濃度の関係 (沖積土、石灰無添加)

カルシウム濃度には一定の傾向を認めることができなかったが、マグネシウムはニッケルの添加量の増加に伴って減少する傾向を示した。

3 考察

ニッケルによる水稻の過剰障害は畑作物のように明瞭な白色のクロロシスを認めることはできず、黄緑色になる程度であった。またネクロシスはいずれも認めることができなかった。

水稻の鉄の吸収は可溶性の鉄濃度と相関があるために、水稻のニッケル障害は置換性ニッケルや葉身中のニッケル濃度を尺度に使用することはできない。

また、鉄の吸収は可溶性鉄濃度ばかりではなく、

第46表 水稻葉身中塩基およびリン酸の含量

土壌	Ni 添加量 (ppm)	CaCO ₃ 施用	Mn (%)	Ca (%)	Mg (%)	P ₂ O ₅ (%)	総 収 量 (g/pot)
沖	0 (NiSO ₄)	無	0.26	1.26	0.43	0.26	132
	100 "	"	0.23	0.95	0.32	0.23	149
	200 "	"	0.25	1.08	0.37	0.31	143
	400 "	"	0.23	1.10	0.33	0.33	153
	800 "	"	0.29	0.70	0.18	0.64	43
	0 (NiSO ₄)	有	0.20	1.28	0.37	0.18	139
	100 "	"	0.17	1.23	0.33	0.19	146
	200 "	"	0.12	1.18	0.32	0.13	150
	400 "	"	0.15	1.30	0.35	0.15	153
	800 "	"	0.20	1.33	0.41	0.23	143
土	500 (NiS)	無	0.25	1.13	0.33	0.31	150
	1,000 "	"	0.19	1.15	0.26	0.56	123
	2,000 "	"	0.17	0.53	0.12	0.78	7
	4,000 "	"	—	—	—	—	—
	500 "	有	0.17	1.33	0.40	0.25	134
	1,000 "	"	0.21	1.35	0.41	0.17	134
	2,000 "	"	0.22	1.20	0.35	0.26	148
	4,000 "	"	0.19	1.18	0.25	0.45	143
火 山 性 土	0 (NiSO ₄)	無	0.70	0.98	0.29	0.11	150
	200 "	"	0.83	0.95	0.28	0.21	126
	400 "	"	0.48	1.13	0.26	0.13	189
	600 "	"	0.21	0.80	0.16	0.42	52
	800 "	"	0.22	0.58	0.12	0.62	27
	0 (NiSO ₄)	有	0.55	1.05	0.24	0.14	123
	200 "	"	0.35	1.05	0.28	0.08	144
	400 "	"	0.41	1.08	0.27	0.07	160
	600 "	"	0.37	1.05	0.23	1.58	8
	800 "	"	—	—	—	—	—
土	500 (NiS)	無	0.91	0.78	0.22	0.12	158
	1,000 "	"	0.26	0.65	0.17	0.40	60
	2,000 "	"	—	—	—	—	—
	4,000 "	"	—	—	—	—	—
	500 "	有	0.27	1.18	0.25	0.11	135
	1,000 "	"	0.49	1.10	0.25	0.20	155
	2,000 "	"	0.28	1.05	0.21	0.13	194
	4,000 "	"	0.31	0.70	0.17	0.51	27

ニッケルの存在はある程度まで鉄の吸収を促進する。この傾向は馬鈴しょやとうもろこしと類似している。しかし、これも葉身中ニッケル濃度が 120 ppm 以下までであって、それ以上では鉄の吸収は急激に低下するため、葉身中ニッケル濃度が 120 ppm 以上の水稲はいずれもニッケルによる生育障害が発現した。また鉄吸収が順調にいかない土壌では葉身中ニッケル濃度が 50 ppm 以下でも生育障害の発生が認められた。

以上の実験から、水稲にもニッケル過剰障害の発生することは明らかになったが、ここでも Fe/Ni 比がある一定水準以下になった場合にのみ発生するため、鉄吸収の高い水稲はきわめて抵抗力の強い作物といえよう。おそらく、主要な農作物中

では最も障害の発現しにくい部類に入るのであろう。

蛇紋岩質土壌地帯の水稲耕作適地ではかなりの面積が水田化しているが、これは営農上適切な方法であると思われる。しかし現在のように政府買上米の過剰から、水田の強制畑地転作が行われており、このような地帯での畑作物に対するニッケル過剰障害の増大が今後予測される。

第7節 モリブデン欠乏の可能性

蛇紋岩質土壌はモリブデン欠乏土壌であるとの報告がある⁹⁹⁾ことから、蛇紋岩質土壌で生育する作物のモリブデン吸収の特性と有効態モリブデン⁷⁷⁾の関係を検討した。また、この場合にニッケルとの関係についても非蛇紋岩質土壌と比較検討をした。

1 実験法

試料は第3節と同じものを用いた。ただし牧草類は2番草を分析に供した。

非蛇紋岩質土壌は安山岩質の沖積土に硫酸ニッケルを添加し、2週間後の置換性ニッケルが 15 ppm になるようにした。さらに炭酸カルシウムの添加区も併置した。

モリブデンの分析法は PURVIS と PETERSON ら⁷⁷⁾の方法を用いた。

2 実験結果

蛇紋岩質土壌で生育した小豆や菜豆、またはクローバ類の障害症状は Soil Sci., (1956, vol. 81) に報告されたモリブデン欠乏症ときわめて類似した症状であった。これらのうちから数種類の作物について、土壌の有効態モリブデンと併せて分析し、その結果を第47表に示した。また参考までに行ったニッケル添加の非蛇紋岩質土壌での実験結果についても第48表に示した。

第47表 蛇紋岩質土壌における作物と土壌中Mo濃度

作物名	植物体		土 壌	
	Ni (ppm)	Mo (ppm)	Mo* (ppm)	pH (H ₂ O)
ペレニアル ライグラス	45	0.84	0.25	6.9
	45	0.74	0.20	6.6
	55	0.48	0.20	6.3
	53	0.40	0.25	5.7
	68	0.44	0.25	5.5
アルファル ファ	27	0.74	0.30	6.7
	34	0.56	0.20	7.4
	78	0.16	0.10	5.9
	100	0.16	0.20	5.9
	77	0.10	0.20	5.6
アカクローバ	38	0.50	0.15	7.3
	44	0.68	0.20	7.1
	57	0.44	0.20	6.1
	66	0.20	0.15	5.5
オーチャード グラス	28	0.92	0.30	7.2
	31	1.12	0.15	6.7
	32	0.48	0.25	6.5
	38	0.56	0.25	5.7
馬鈴しょ (茎葉部)	82	0.60	0.25	7.0
	81	0.70	0.15	6.6
	84	0.68	0.25	5.3
	132	0.74	0.25	5.1

* 有効態Mo

蛇紋岩質土壤中に生育した作物のモリブデン吸収にみられる特徴はニッケルによる障害の激しかった作物ほどモリブデン濃度が低く、障害の発現しなかった作物はそれほど極端にモリブデン濃度の低下を示さなかった。この傾向は酸性土壌を好む作物と、アルカリ土壌を好む作物との分類ともほぼ一致した。

すなわち、アルファルファはニッケルの吸収濃度の増大に反比例して、モリブデンの濃度は炭酸カルシウムを添加してほぼ正常な生育をした場合の約7分の1以下にまで低下していたが、馬鈴しょなどは酸性土壌でもモリブデン濃度は低下しなかった。

有効態モリブデン濃度は0.1 ppm から0.3 ppm の範囲にあったが、これは土壌pHとの関係を見出すことができなかった。しかし、この濃度は安山岩質沖積土の2分の1以下であり、作物体モリブデン濃度もこれらに比較して2分の1から3分の1と低い値であった。

3 考察

モリブデンの著しい低下を示したアルファルファやまたはアカクロウバはモリブデン欠乏の発現しやすい作物として知られている^{1,80)}。またモリブデン欠乏症で発現するスポット状のクロロシス⁷⁹⁾は蛇紋岩質土壤中に観察される生理障害の症状ときわめて類似している。このようなスポット状のクロロシスは非蛇紋岩質土壌へのニッケル添加ではそれほど明瞭に発現しなかった。

アルファルファのモリブデン欠乏症は0.1 ppm以下で発現する⁸¹⁾とされているが、本実験のアルファルファ中のモリブデン濃度は0.1 ppmにまで低下しており、蛇紋岩質土壌で生育したアルファルファの障害発生の中にはモリブデン欠乏症とニッケルの過剰症の合併症があったものと考え

第48表 Ni添加の安山岩質沖積土における作物体と土壌中Mo濃度

作物名	植 物 体		土 壌	
	Ni (ppm)	Mo (ppm)	Mo (ppm)	pH (H ₂ O)
ラジノクロウバ	11	1.44	0.40	7.7
	8	2.92	0.45	7.5
	19	0.64	0.30	5.8
	13	0.74	0.35	5.7
アルファルファ	5	0.74	0.30	7.5
	6	1.10	0.50	7.5
	9	1.32	0.40	6.0
	14	0.96	0.50	5.7
アカクロウバ	6	1.76	0.40	7.7
	11	1.40	0.45	7.3
	17	0.44	0.30	5.9
	16	0.48	0.30	5.5
オーチャードグラス	14	2.40	0.75	7.7
	9	3.20	0.30	7.5
	17	1.80	0.70	5.8
	21	4.80	0.40	5.7

られる。

なお、蛇紋岩質土壌に栽培したえん麦に対するモリブデン施用試験ではその効果は認められず、作物によってその効果は異なるものと思われるが、どの作物にどの程度まで効果があるか、これらの試験では確認できなかった。

第8節 堆肥および微量金属元素の施用効果

炭酸カルシウムの施用は実用上の効果のあることを幾つかの試験ですでに示した。本節ではニッケルと生理的拮抗を示すと考えられる微量元素と堆肥の施用効果を検討したものである。

1 実験方法

供試土壌：幌加内町の蛇紋岩質洪積土を用い

第49表 供試土壌の性質

pH		CEC (me/100g)	置換性塩基 (me/100g)		
H ₂ O	KCl		Ca	Mg	K
5.1	3.9	18.1	16.4	10.8	0.2

第50表 えん麦に対する堆肥の施用効果

堆肥 施用量 g/pot	成 熟 期			収量 (g/pot)			障 害 程 度	植物体 45日目 Ni (ppm)	跡 地 土 壤		
	穗数 (本)	穗長 (cm)	稈長 (cm)	茎稈重	子実重	収量比			Ex. Ni (ppm)	pH (H ₂ O)	
原土 {	0	5	14	47	5.0	1.3	100	—	158	26.3	4.7
	200	18	19	69	14.3	6.1	469	—	118	25.3	4.8
CaCO ₃ {	0	25	27	98	83.1	70.1	100	— ~ +	28	7.4	6.3
	200	31	28	98	85.7	77.0	110	— ~ +	27	6.8	6.2

第51表 微量金属元素の施用効果

处 理 区 别		成 熟 期			収 量 (g/pot)			跡 地 土 壤			障 害 程 度
		穗数 (本)	穗长 (cm)	稈长 (cm)	茎稈重	子実重	原土比	Ex. Ni (ppm)	pH		
									H ₂ O	KCl	
原 土 区		5	14	47	5.0	1.3	100	26.3	4.7	4.2	—
Mn, Zn, Cu区		5	14	48	3.9	2.1	150	28.0	4.6	4.2	—
Mn 区		5	15	46	5.2	1.8	136	29.0	4.6	4.2	—
Zn 区		9	15	59	8.5	3.5	228	29.0	4.6	4.2	— ~ —
Cu 区		6	17	63	6.8	2.9	199	26.3	4.7	4.4	—
CaCO ₃ 施 用	原 土 区	25	26	94	88.5	79.0	100	6.8	6.3	5.8	—
	Mn, Zn, Cu区	21	27	95	84.2	78.6	101	5.3	6.5	5.7	—
	Mn 区	21	27	98	88.3	75.3	100	5.3	6.5	6.1	—
	Zn 区	22	28	95	88.1	80.9	104	4.2	6.6	5.8	—
	Cu 区	21	27	95	89.6	79.6	102	4.7	6.5	5.9	—

第52表 植物体分析結果

处 理 区 别		植 物 体 分 析 (ppm)								Ni 子実 茎葉 比	
		Ni			Mn		Cu		Zn		
		茎葉	子実	45日目*	茎葉	子実	茎葉	子実	茎葉	子実	
	原 土 区	57	75	158	75	18	38	57	92	143	1.3
	Mn, Zn, Cu区	45	92	74	40	23	40	33	90	67	2.0
	Mn 区	53	79	93	55	20	26	40	76	130	1.5
	Zn 区	42	91	95	127	67	17	13	84	66	2.2
	Cu 区	46	93	89	55	40	37	24	60	56	2.0
CaCO ₃ 施 用	原 土 区	3	14	22	75	36	9	9	62	50	4.7
	Mn, Zn, Cu区	9	13	22	82	33	28	8	62	44	1.4
	Mn 区	4	16	20	45	37	11	10	54	46	4.0
	Zn 区	5	16	21	68	47	15	9	60	48	3.2
	Cu 区	10	16	15	58	40	9	15	64	46	1.6

* 印以外は収穫期

た。この土壌の理化学性は第49表のとおりである。

実験はほ場に埋設した無底の素焼土管(内径23 cm, 高さ30 cm)に10 kgの土壌をつめこんで行った。

施肥量: N, P_2O_5 , K_2O を pot 当り各2 gを硫酸、過石、硫加で添加した。

微量元素の添加量 (mg/pot): Mn = $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ 780 mg, Cu = $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 104mg, Zn = $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 572mg。

供試作物: えん麦(前進)を用いた。栽培本数: 各区とも45日目の試料採取後に pot 当り5株に統一した。

分析法: 吸光光度法によった。

2 実験結果および考察

1) 堆肥の効果: 炭酸カルシウムの施用しない系列での堆肥無施用区では、発芽直後から葉身に白色帯が現われ、この部分から先は垂れ下り、枯死直前の症状を呈した。堆肥施用区も激しい症状を呈したが、葉先は垂れ下るまでに至らず、明らかに生育に差が認められた。発芽一週間目頃から、白色帯はニッケル障害特有の縦縞に変化していった。炭酸カルシウム施用系列は順調な生育を示し、障害症状は一部にわずかに認められる程度であった。

播種後45日目の試料採取後から、立本株数は各 pot とも5株に統一したが、炭酸カルシウムの入らない無堆肥区は成熟期まではほとんど分けつしなかった。これに対して堆肥区は3倍以上の分けつを示した(第50表)。

炭酸カルシウム施用系列では、障害の症状は無堆肥区、堆肥区ともほとんど認められなかったが、生育収量においてはやはり堆肥区の方が優った。

分析の結果では、堆肥区、無堆肥区でほとんど差がないにもかかわらず、茎葉中のニッケル濃度は堆肥の施用によって明らかに低下を示した(第50表)。炭酸カルシウム施用系列では両

者間に明瞭な差異を認めることができなかった。

以上の結果から、ニッケル過剰症の発現する蛇紋岩質土壌に対する堆肥の施用は障害の軽減効果のあることを認めることができる。しかし、この効果は炭酸カルシウム施用による効果からみて小さく、堆肥単独施用による障害の対策法としては期待できない。それにもかかわらず、炭酸カルシウム施用系列においても堆肥施用の効果が認められることから、改良対策法としては炭酸カルシウムと堆肥は併用することが望ましいと考えられる。

2) 微量元素の施用効果: えん麦に対する微量元素の施用効果は、炭酸カルシウムの施用による土壌 pH の上昇効果に比較してはるかに小さいものであったが、障害の激しい条件においては明らかにその効果が認められた。

特に亜鉛の施用は肉眼的にも明瞭な効果を示した。亜鉛施用による効果は特に初期生育において認められ、堆肥の効果と同様に、対照区のえん麦が白化現象によって葉先が垂れ下るのに対し、亜鉛施用区はそこまで障害症状の進行を示さなかった。

その他の銅、マンガンの施用区においてもいくらかその効果は認められたが、肉眼的観察では亜鉛ほどの効果を示さなかった。

炭酸カルシウム施用系列においては、これらの

第53表 微量元素元素の吸収総量

処 理 区 別		(mg/pot)			
		Ni	Mn	Cu	Zn
原 土		0.38	0.40	0.26	0.65
	Mn, Zn, Cu	0.37	0.20	0.23	0.49
	Mn	0.42	0.32	0.21	0.63
	Zn	0.68	1.31	0.19	0.95
	Cu	0.58	0.49	0.32	0.57
CaCO ₃ 施 用	原 土	1.37	9.48	1.51	9.44
	Mn, Zn, Cu	1.10	9.50	2.99	8.68
	Mn	1.56	6.76	1.72	8.23
	Zn	1.73	9.79	2.05	9.17
	Cu	2.17	8.38	2.00	9.40

効果は土壌 pH の効果でマスキングされ、各処理間にはほとんど差が認められなかった。

第 51 表には生育収量調査結果を、第 52 表には植物体の分析結果を示した。植物体の分析結果から明らかなとおり、播種後 45 日目の茎葉中ニッケル濃度は微量元素元素の施用で低下を示した。

収穫期における茎葉中ニッケル濃度は亜鉛施用区で最低となった。また、茎葉中ニッケル濃度に対する子実中ニッケル濃度の比率は亜鉛施用区が

最も高く、原土区のほぼ 2.2 倍となった。マンガンや銅の施用によっても茎葉中のニッケルの子実部への移行率は高まった。

この実験における亜鉛施用の効果は亜鉛吸収総量の増大とはなかった（第 53 表）が、濃度そのものの増大とはならなかった（第 52 表）。むしろマンガンの吸収濃度を高める結果となった。銅の濃度は亜鉛の施用によって減少した。マンガン、銅の施用では明瞭な関係は得られなかった。

第 IV 章 総合考察

第 1 節 土壌中可溶性ニッケルの地理的異質

北海道における主な蛇紋岩は北から間寒別、中川、音威子府にかけの地帯、幌加内、和寒、多度志に存在する群、富良野、芦別の中、夕張から日高、占冠、平取にかけの一群が大規模な地帯である。そのほか日高管内の太平洋沿岸近くに小規模な蛇紋岩帯が散発的に露出している。

すでに第 6 表でも明らかにしたように、蛇紋岩そのもののニッケル濃度は地帯別にそれほど特異的な差異は認められない。また、母岩の全ニッケルに対する可溶性ニッケルの溶出率についても、南部と北部によって明瞭な差異を見出すことはできなかった。したがって、土壌中置換性ニッケル濃度の地理的な差異は母岩の性質の差によるものとは考えられない。第 8 表にも示したように、ニッケルの大部分は軽鉱物やシルト、粘土などの部分に存在することと、現地の地形や蛇紋岩風化物の分布状態から判断して、中、北部の蛇紋岩帯は内陸に存在し、比較的平坦な地帯を流れる河川の流域には蛇紋岩風化物の洪積土や沖積土が広く存在する。これに対し、占冠以南の蛇紋岩地帯は深い溪谷の両岸に存在するために、蛇紋岩風化物の混入する沖積土地帯は少ない。

さらに静内や様似などの太平洋沿岸地帯は蛇紋岩帯そのものが小さいばかりでなく、蛇紋岩地帯から海までの距離が短く、この間に蛇紋岩風化物を堆積できるような場所がきわめて少ないために、蛇紋岩風化物特有の粘性のある沖積土をほと

んど見い出すことができなかった。以上のことから判断して、占冠、日高以南の地帯は、可溶性ニッケルを多く含んだ土壌の大部分が直接海まで運ばれてしまい、内陸に堆積したのはごくわずかであったと考えられる。

以上の条件のほかに、北海道において地理的条件を検討する場合に考慮しなければならないことは、占冠以南の地帯はいずれも厚い火山灰土壌で覆われていて²⁸⁾、蛇紋岩やその残積土の露出部分がきわめて少ないばかりでなく、沖積土にもこの火山灰の混入が多く見られる。このような希釈効果は蛇紋岩風化物の影響力を低下させるのに大いに役立っているものと考えられる。

第 2 節 pH、マグネシウム濃度およびニッケル溶出の相互関係

蛇紋岩質土壌の pH はマグネシウムの濃度によって支配されていることはすでに明らかにした。また農作物のニッケル過剰症は完全に土壌化していない蛇紋岩の風化物や残積土では見られず、また土壌化していてもある程度水に洗われた沖積土や洪積土で特に多く観察される。

この原因についてはマグネシウムがある程度流出してしまわないとニッケルの溶出が始まらないことに原因することについても明らかにした。

土壌に吸着されている陽イオンの溶出は各種塩類が水に溶解するのとは異なって、必ずイオン交換を伴う。このイオン交換に必要なだけの代替イ

オン、つまり自然条件では水素イオン (H^+) が主体であると考えられるが、この H^+ が溶媒中に十分に存在しない場合は土壌との結合力の弱いイオンから溶出するであろう^{67,69)}。この土壌との結合力は各イオンの置換侵入力^{41, 48)}で表わされるが、この順位はほぼ $H > Ba > Ca > Mg > K > NH_4 > Na$ となる^{26,27)}。置換侵入力は軽元素でありながら侵入力の強い H^+ の例外を除くとおおむね重元素ほど大となり、1価よりは2価イオンの侵入力が大であることを示している。

これから判断して、マグネシウムやカルシウムに比較して、ニッケルの置換侵入力は大きく、土壌からの溶脱ではマグネシウムの溶出の低下に伴ってニッケルの溶出が増大するのは当然であるといえよう。

第8図に示した CO_2 飽和水による蛇紋岩風化物の成分溶出実験でも明らかなように、最初に出現する溶出ピークの順位はまずマグネシウムが現われ、これよりわずかに遅れてカルシウム、つづいてニッケルとなる。この結果は、土壌から陽イオンの溶脱は置換侵入力の弱い元素から進行することを示しているといえよう。

また、いくら全ニッケル濃度が高くても、風化直後の土壌では農作物のニッケル過剰症は見い出されず、洪水などで洗われ、ある程度の距離を水で運搬された土壌の方がニッケル過剰症を発生しやすいのも同じ理由に基づくものと考えられる。

蛇紋岩における全マグネシウムと全カルシウム濃度の当量比はほぼ45:1と、圧倒的にマグネシウムの値が大きい。しかしながら、この蛇紋岩の風化初期の段階においては置換性塩基としても、その他の類似の可溶性成分も、その比率は2:1とか3:1ときわめて接近した値が得られる。このような値は全濃度の比率からは到底考えられない数値である。

このような現象の原因を究明することは岩石の風化過程における各種成分の溶脱順位の差異を検討する上で興味深いことである。蛇紋岩中に Dolomite の含まれていることはよく知られている⁹²⁾。しかしながら CARPENTER²³⁾によるカルシウムとマグネシウムの炭酸塩に関するダイヤグラムに従

うと、蛇紋岩のようにマグネシウムの多い条件下では Huntite ($CaMg_3(CO_3)_4$) の方が生成されやすいはずである。

一方、塩化カリウム溶液による抽出では、0.01 N と 1 N 溶液で抽出成分がまったく異なってくる。すなわち、第17表にも示したように、0.01 N KCl では $Mg:Ca$ 比はほぼ3:1であって、重炭酸イオン (HCO_3^-) は当量値で $Mg+Ca$ 値の約2分の1である。これに対し、1 N KCl では $Mg:Ca$ 比はほぼ1:1.5であり、 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 値は $Mg+Ca$ 値の約1.5倍となる。これから0.01 N KCl 可溶のマグネシウムとカルシウムの比率は Huntite のものであり、1 N KCl のそれは Dolomite が主体であることが推定される。

また、0.01 N KCl と 1 N KCl で抽出される合計値は置換性塩基の合計値とほぼ一致していて、0.01 N KCl と 1 N KCl で抽出されてくる塩基は置換性塩基として測定したものを溶解性の難易によってふり分けたにすぎないといえよう。

そしてこの置換性塩基の3分の2近くは0.01 N KCl で抽出されてくることから、これらの土壌との結合はきわめて弱いことが推定されるが、この塩基の値は CEC の約2倍に相当する。

しかしながら、この0.01 N KCl で溶出してくる HCO_3^- は $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 値のほぼ2分の1になることから、この0.01 N KCl で溶出してくる塩基は $MgHCO_3^+$ 、 $CaHCO_3^+$ の形態で存在していて、1価として土壌と結合しているとすると、この値はこの土壌の CEC とほぼ一致する。

これに対し、1 N KCl 抽出成分はその組成からみて Dolomite の溶出したものと判断される。したがって、これは本来土壌コロイドに吸着されていたものではあるまい。

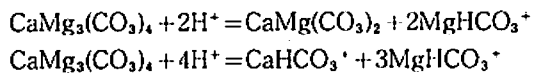
以上のような可溶性成分または鉱物種はもともと蛇紋岩に存在していたものか、それとも他の鉱物種から変化してきたものかどうか異論のあるところであろうが、CARPENTER²³⁾のダイヤグラムと蛇紋岩の成分比から判断して、これら可溶性成分は Huntite に由来するとしたら、つぎのような関係式によるであろう。つまり GARRELS ら²³⁾によると、Huntite から Dolomite に変化する平衡関

係はつぎの4通りが示されている。

- a. $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4\text{c} = \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\text{c} + 2\text{Mg}^{2+}\text{aq}$
 $+ 2\text{CO}_3^{2-}\text{aq}$
 b. $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4\text{c} + 2\text{H}^+\text{aq} = \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\text{c}$
 $+ 2\text{Mg}^{2+}\text{aq} + 2\text{HCO}_3^-\text{aq}$
 c. $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4\text{c} + 4\text{H}^+\text{aq} = \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\text{c}$
 $+ 2\text{Mg}^{2+}\text{aq} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2\text{g}$
 d. $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4\text{c} + 2\text{Ca}^{2+}\text{aq} + 2\text{CO}_3^{2-}\text{aq}$
 $= 3\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\text{c}$

注: c=固体, aq=液体, g=気体

そこで、蛇紋岩風化過程における Huntite から MgHCO_3^+ 、 CaHCO_3^+ または Dolomite への変化をその可溶性成分の組成から判断すると、b と c が主な反応と考えられる。このうち c の方はこれよりやや異なった反応を示すと思われる。すなわち、土壌 pH が高いことから、 H^+ が多くても CO_2 の発生まで至らず、反応式は、



となる。これらの関係式から計算すると、実験値の MgHCO_3^+ はやや低い値となるが、第 17 表からもわかるとおり、 MgHCO_3^+ と CaHCO_3^+ では前者の方が先に溶脱する傾向にあることからみても、風化過程における溶脱によって起こった差異であろうと思われる。

以上、カルシウムとマグネシウムの土壌からの可溶性成分溶出は、ニッケルとクロムの溶出率の差異と同様に、その全濃度にあまり関係なく、土壌中における形態がきわめて重要であることを示した。蛇紋岩中に存在するカルシウムの全濃度はわずか 1% 前後であるにもかかわらず、風化初期においてはそのうちの 7% も置換性成分として存在するのに対し、マグネシウムのそれはわずか 0.3% にすぎず、カルシウムの風化初期における溶脱率の良さがうかがえる。

これらの実験結果から、蛇紋岩風化物のニッケルの形態は明らかにすることができなかったが、炭酸飽和水抽出からみてほぼマグネシウムの形態に類似しているものと考えられる。そして同じ形態でありながら溶出にズレが生ずるのは元素の結

合力の相異によるものであると思われる。

第3節 土壌中可溶性成分からみた農作物生理障害の原因としての重金属

蛇紋岩質土壌における農作物生育障害の原因としての重金属はニッケル、クロムそれにコバルトなどが挙げられてきた⁸⁴⁾。これらのうちから、生育障害の原因になりうるものを土壌中の可溶性濃度から検討すると、ニッケルと同様に全含量の多いクロムはすでに指摘したように、大部分はクロマイトと考えられる黒色の堅い鉱物の中に含まれていて、この鉱物はアルカリ熔融でも簡単に溶けないほど安定した鉱物であった。またクロムはその他の鉱物に存在するものほとんど溶出してこないか、希塩酸などでわずかに溶出する程度である。ニッケル、クロムについて蛇紋岩質土壌に多いとされているコバルトは作物に吸収される量、土壌中の全含量および置換性濃度のいずれもニッケルの 10 分の 1 以下であることはすでに報告した⁶⁰⁾。

一方、農作物のクロロシス発生のための重金属毒性順位は HUNTER ら³³⁾によると、 $\text{Ni} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Mo} > \text{Mn}$ となり、また DEKOCK²⁰⁾は $\text{Cu} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Mn}$ という順位になる。また、茅野ら¹³⁾は水稻による生育抑制作用順位を $\text{Cu} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Zn} > \text{Mn}$ であるとし、鉄の吸収阻害作用は $\text{Cu}, \text{Co}, \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Mn}$ の順になることを明らかにし、一応キレート結合安定度の順位になることを示した。

いずれの報告でも蛇紋岩質土壌で指摘されている重金属では $\text{Ni} \geq \text{Co} > \text{Cr}$ の順位となり、毒性としてはニッケルが最も強い部類に入る。以上から判断して、農作物の生理障害の原因としてはその濃度から考えてもニッケル以外のクロムやコバルトはその可能性がない。

第4節 生理・生育障害の発生機作と抵抗性機能

農作物のニッケル過剰による障害は多くの場合、葉身にクロロシスやネクロシスを発生する生理障害と生育量の低下を示す生育阻害現象を同時に発現する場合が多い。しかし作物によっては、ク

クロロシスやネクロシスは示すが、生育障害は強く現われなかったり、また水稻に見られるように、明瞭なクロロシスやネクロシスは示さず、生育阻害のみ強く現われるなど作物によってその障害の発生は一定しない。

一方、同一作物で同一栽培条件のときはともかく、作物が異なったり、または栽培条件が著しく異なる場合、ニッケル過剰による障害の発生は植物体中のニッケル濃度のみでは律しきれず、むしろ植物体におけるFe/Ni比、Cu/Ni比、またはZn/Ni比などのように、植物にとって重要な金属酵素を形成する金属^{21,47)}とニッケルの比率の方が障害発生の尺度になることを示してきた⁶¹⁾。このことはニッケルの過剰吸収がこれら重金属の生体内における生理活性の阻害を何んらかの形で引き起している証といえよう。

しかしながら、茅野らの研究によると、水稻に対する重金属の影響は鉄の吸収抑制によるクロロシスの発現と、生育抑制作用に大別され、生育抑制に働く各元素の毒性順位は元素の電気陰性度の順位と深い関係にある¹⁰⁻¹³⁾。また、アルファルファによる実験でのコバルト誘導クロロシスは葉身内での鉄不活性化によるものでないことが明らかにされている¹⁴⁾。

蛇紋岩質土壌におけるえん麦の葉身中のクロロシス発現も、EMX分析結果ではアルファルファのコバルト誘導クロロシス発現¹⁴⁾と同様な結論が得られたが、他の作物、大根、キャベツ、アルファルファなどのクロロシスやネクロシス部分では明瞭な結果が得られなかった。また、第35表でも示したように、ペレニアルライグラス、オーチャードグラス、アルファルファなどはたしかに植物体内におけるニッケルの蓄積に伴って鉄濃度の減少は認められる。しかし、小豆、菜豆、大豆およびとうもろこしなどはむしろニッケル濃度の増大に伴って鉄濃度も高まる傾向を示し、ニッケルの存在によって鉄の吸収が減少するという共通した結果は得られていない。

また、このニッケルによる鉄吸収の差異はニッケルに対する作物別の抵抗力の差異とも関係が認められない。一部の作物を除くと、蛇紋岩質土壌

における作物の鉄濃度の水準は鉄を好む沼沢植物である水稻^{54,55)}を除けば一般の畑土壌で生育する作物に比較して著しく高い。このように高水準の鉄濃度を持つ植物は現地調査では特異な例として野性大麻に見出される⁸⁷⁾程度であった。

置換性ニッケル濃度の異なる土壌による実験によっても、馬鈴しょやとうもろこしはニッケルの吸収に伴って鉄濃度も増大する結果が得られ、また水稻でもニッケルの濃度がある程度までは鉄濃度も高まり、一定の限界を超えると鉄濃度は逆に低下して障害を発現する結果を得た。

したがって、ニッケルが存在して鉄吸収濃度が減少するかどうかは作物によっても異なるようであり、水耕と土耕による違いもあるように思われる。また同じ土耕であっても、栽培年次や土壌の種類によって、その鉄吸収水準や銅の吸収水準に大きな変動が認められ、その機作は複雑である。

一方、作物間のニッケル抵抗性の差異はニッケルの吸収の特性に現われてくる。えん麦やアルファルファのように抵抗力のない作物は置換性ニッケルに比例して植物体内ニッケル濃度も上下し、無制限にニッケルが吸収されるような傾向を示すが、抵抗力の強い作物は置換性ニッケルによる植物体ニッケル濃度の上下変化は小さい。すなわち、抵抗力の強い作物は置換性ニッケルの低濃度での吸収はすみやかであるが、高濃度でのニッケル吸収は鈍く、抵抗力の弱い作物に比べて置換性ニッケルの低い段階で体内吸収ニッケル濃度が飽和に達するような傾向を示す。このことから、抵抗力の強い作物はニッケルの体内侵入を何んらかの形で排除しているような傾向がうかがわれる。

鉄高濃度条件における水稻根は酸化能によって鉄排除能となって現われることを田中らは暗示している^{93,94)}。しかしニッケルの場合はその化学的性質から植物根の酸化力によって体内侵入が防止されているとは考えられない。

また、ニッケルは植物体における移動がすみやかであって、キャベツなどは移植後2日目ですでに葉身まで達し、ネクロシスの発現をするほどであるから、銅過剰のように根の組織中に固定³⁹⁾して吸収を抑制しているとも考えられない。

蛇紋岩質土壤には単にニッケル過剰のみでなく、すでに古くから指摘されていたように、カルシウム欠乏症⁹⁸⁾の発生することも本研究で確認された。また、モリブデン欠乏症⁹⁹⁾も作物によっては発現する可能性のあることをすでにのべた。

そのほか、この土壤ではすでに報告⁵²⁾されているように、亜鉛欠乏症の発現も容易に観察することができる。亜鉛欠乏症で最も発現しやすい作物はたまねぎととうもろこしであるが、著者の観察したこれら亜鉛欠乏の発生に共通している点は塩基飽和度が高く、いずれも 100% 以上の土壤であること、pH は 6.5 以上であり、置換性ニッケルは 10~20 ppm 以下である。そして 0.1N 塩酸可溶亜鉛は 6 ppm 以下である。作物体中の Zn/Ni 比は健全な作物では 3 前後であるのに対し、亜鉛欠乏症発生のそれは 1 前後であった。

とうもろこしの亜鉛欠乏症の観察された中川町の沖積土壌では pH 7.6 程度に達していた。

以上のように、その土壤における農作物の生理生育障害は単なるニッケルの毒性による障害として片づけられるほど単純ではなく、作物によって、土壤の条件によって色々なタイプの障害が発生する。そしてこのような障害の発生する最大の原因は、この土壤中に含有される特定の可溶性成分のアンバランスによるものであろう。その主なものはマグネシウムとニッケルである。そしてマグネシウムそのものがニッケル過剰症発現に大きな影響をおよぼしていることをすでに検討してきた。

植物の養分吸収は単にその養分の量そのものの影響で過剰または欠乏を発現するのみでなく、養分間のバランスや土壤 pH などが相互に関係し、拮抗作用や相助作用をしていることが今までの多くの研究で明らかにされてきている^{95,96)}。

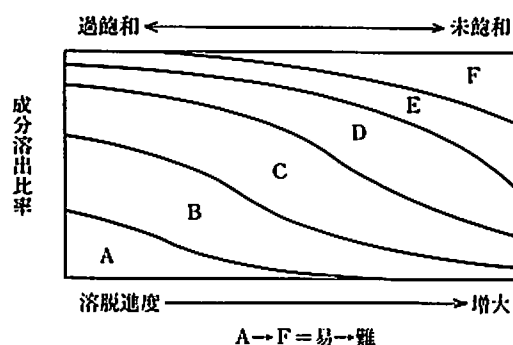
このようなことから参考にしなが、蛇紋岩質土壤における生理生育障害の発現を土壤からの各種成分の溶出とバランスから障害発生に至る関係を模式化してつぎに示す。第 54 表には成分溶出における形態別難易を示し、第 34 図にはその結果もたらされる土壤溶液中、また植物根圏に最も影響を与えと考えられる部分の各成分の比率の変化を溶脱の進展の関係から、模式化して示したも

のである。

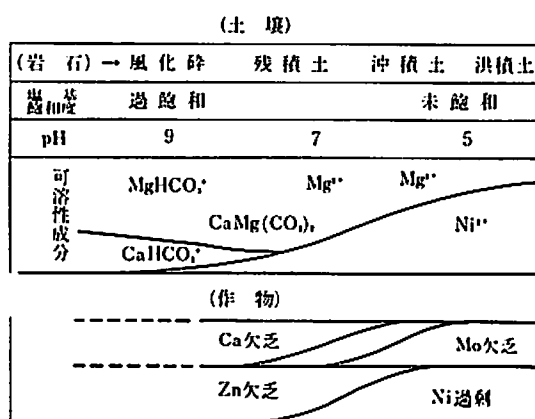
第 35 図には蛇紋岩の具体的な風化過程と、pH、障害発現に關与する可溶性成分の形態とバランス

第54表 鉱物別、元素別、イオン別の土壌イオン溶脱の難易

鉱物別	元素別	イオン別
重磁性鉱物	重元素	多価イオン
軽シアルト	軽元素	一価イオン
難 ← → 易	難 ← → 易	難 ← → 易



第34図 溶脱と成分溶出比率の関係模式図



第35図 蛇紋岩の風化、飽和度、pH および可溶性成分と作物の要素欠乏過剰の関係模式図

関係、作物の各種障害発生の関係を示した。

すなわち、風化の進展に伴い、土壌は酸性化し、マグネシウムとカルシウムは1価イオンの形態から2価イオンへ変り、その減少に伴ってニッケル溶出の増大を示した。

作物の障害は高pHにおけるカルシウムの絶対量の減少と、マグネシウムとの拮抗から、カルシウム欠乏が発生しやすくなり、亜鉛も高pHと高アルカリ度⁷²⁾から欠乏が発生しやすくなる。酸性側ではモリブデンの不溶化からモリブデン欠乏が発生しやすくなる反面、ニッケルの溶出が増大し、ニッケルの吸収は促進されることを示した。

第36図にはニッケル障害における土壌間および作物間差異の生ずる原因についての関係を示した。

作物間にみられるニッケル抵抗性の差異は鉄や銅、または亜鉛などとの体内バランスの差異によって生ずる程度であって、アフリカでみられる銅抵抗性植物^{30,31,78,102)}のように、有害な銅イオンを体内の細胞壁などにとじ込めて無毒化されるの

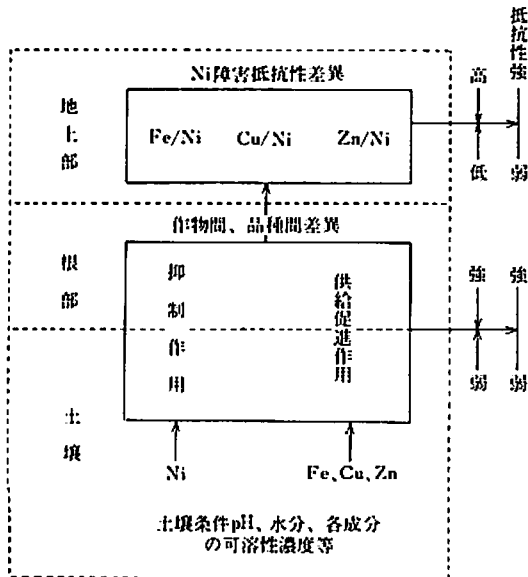
と異なり、土壌からのニッケルの吸収に対する他の必須養分の吸収割合によって決定されているにすぎないと考えられる。

そのためニッケル抵抗性の作物間差異はかなり広い幅で存在するにもかかわらず、その抵抗性は土壌条件などによって崩れる不安定性を持っている。すなわち、ニッケルの吸収に伴って鉄や銅、亜鉛または他の必要な成分が助長されて吸収される土壌条件の場合はよいが、これを支える土壌条件でない場合は本実験における馬鈴しょのようにたちまち障害発生を生ずる可能性が常に存在する。

一方、障害の対策法として効果のある炭酸カルシウム施用の効果は多くの場合、単に土壌pHを高めてニッケルの不溶化の促進にあるとの認識が強い⁸⁹⁾。しかし高岸ら⁸⁸⁾の現地聞きとり調査で得られた多肥栽培と同じように、土壌における競合物質の増大によるニッケル溶出の抑制も無視できないし、きわめてまれな土壌条件と作物に限られるが、カルシウム欠乏症抑制効果も存在すると考えられる。

また、限られた作物ではあるが、高pHとニッケルとの拮抗から生ずると考えられる亜鉛欠乏症には堆肥などの施用によって土壌溶液中のイオンバランスを変える⁷¹⁾とともに、直接亜鉛塩⁵²⁾を土壌や作物に施用して亜鉛の供給力の増大を計るべきであろう。飯塚³⁶⁻³⁸⁾の提案した、いわゆるネクロシス発生に関する尺度としての“T-value”= $[\text{Ni}] + 0.17 [\text{Fe}] + 0.38 [\text{Zn}]$ の概念も、ニッケルと鉄、亜鉛のアンバランスによって生ずるとの根拠に基づくものと考えられる。

土壌成分、特に重金属の過剰対策は欠乏対策よりはるかに困難な作業である。欠乏はその成分だけ加えてやればよいのに対し、過剰の場合、それを取り除くことは不可能だからである。したがって置土客土法をとらない限り、対策法としてはその物質を化学的に不活性化するための条件を整えてやることと、これと拮抗する他の成分を加えてやって、できるだけ正常な成分バランスにするしか方法がない。あとは栽培作物の選択以外に対策を見い出すことは不可能と思われる。



第36図 ニッケル過剰障害の抵抗性に関する土壌、根部、地上部の関係模式図

第V章 摘 要

本研究は北海道における蛇紋岩質土壌の化学的特性を明らかにし、ここに生育する農作物に発生する生理・生育障害の要因解析、障害発生に対する抵抗力の作物間差異、およびその改良対策法について検討したものである。

1 地理的特性

1) 本道における蛇紋岩帯は北緯42度から45度、東経142度から143度内の山間地帯に細長く存在する。そのため、蛇紋岩質土壌はこの周辺の沖積土、洪積土および泥炭土に存在する。

2) 本土壌のpHとマグネシウム濃度は本道中央部で低く、北部で高い。南部の土壌のpH、マグネシウム濃度はこの中間的な値となる。pH 7.0の1 N酢酸アンモニウムで抽出される置換性ニッケルは蛇紋岩質土壌地帯でも北部と西側で高い。

3) 置換性ニッケル濃度は全ニッケル濃度と相関がなく、母岩や残積土よりも、水である程度の距離を運搬された土壌である沖積土、洪積土で高い。0.1 N塩酸可溶クロムまたは置換性クロムはきわめて少ないか、ほとんど存在しない。

4) 蛇紋岩の全ニッケル、全クロムおよび全マグネシウム濃度には、地理的差異は認められない。全ニッケルの平均値は0.21%、全マグネシウムの平均値は23%である。全クロムの平均値は0.12%であるが、岩石によるバラツキが大きい。

2 重金属およびマグネシウムの鉱物別分布

1) ニッケル、マグネシウムは磁性鉱物、軽鉱物、シルトおよび粘土にほぼ均一に分布する。クロムは重鉱物中に集中して存在する。鉄は重鉱物と磁性鉱物に多く存在する。コバルトはシルトと粘土に多いが、銅と亜鉛は重鉱物に集中している。

2) クロムは重鉱物の中でも、クロマイトと思われる黒色の堅鉱物中に集中して存在する。この黒色堅鉱物はクロム：9、マンガン：1、鉄：2の成分割合である。これにはチタン、ニッケル、銅などは検出されない。

3) 磁鉄鉱はチタン、マンガンおよび鉄が検出さ

れる。クロムとニッケルは検出されない。

3 土壌中重金属の可溶性成分

1) 本土壌中の全ニッケル、クロムはいずれも高濃度である。水、中性の1 N酢酸アンモニウムおよび0.1 N塩酸可溶のクロムはニッケルの100分の1以下である。コバルトはニッケルと同様な傾向を示し、全濃度、可溶性成分ともほぼニッケルの20分の1程度である。

2) 可溶性クロム濃度の高い土壌（残積土）は母岩の可溶性クロム濃度も高い。粘土中の全クロム濃度が700 ppm以上の土壌は可溶性クロム濃度が高い。粘土中全クロム濃度が400 ppm以下の土壌では、可溶性クロムはほとんど溶出してこない。

3) 可溶性ニッケル（置換性、0.1 N塩酸可溶）の低い母岩に由来する土壌は可溶性ニッケル濃度が低い。

4 pHとマグネシウムの関係

1) 本土壌のpHとマグネシウムはきわめて高い正の相関関係（ $n=30$, $r=0.915^{***}$ ）にある。pHの低い土壌はMg/Ni比が低い。母岩および残積土などのMg/Ni比は約70から120程度となる。堆積年代の古い洪積土、または沖積土のMg/Ni比は10から50以下の低い値になる。

2) 置換性ニッケルが高く、低pH、低マグネシウムの多い北海道中央部の蛇紋岩質土壌は堆積年代の古い土壌が多い。

5 マグネシウムとニッケルの溶脱の差異

1) 完全に土壌化していない蛇紋岩風化物を炭酸水によって洗浄すると、最初にマグネシウムが溶出してくる。マグネシウムの溶出がやや低下始めるところにニッケル溶出のピークが出現する。カルシウム溶出のピークはマグネシウムよりわずかに遅れて出現するが、最初の1つのピークのみで、マグネシウムのようにいくつかのピークは出現しない。

2) 塩基飽和度400%近い蛇紋岩風化物を0.01 N塩化カリウムで抽出した結果、 $MgHCO_3^+$ と

CaHCO_3 はほぼ3:1の割合(化学当量比)で溶出してくる。これらの合計はCECに等しくなる。この MgHCO_3^+ と CaHCO_3^+ はHuntite ($\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$)の風化物と判断される。

3) 0.01 N塩化カリウム浸出後の1 N塩化カリウム浸出では、マグネシウム(Mg^{2+})とカルシウム(Ca^{2+})は1:1.5の割合で溶出してくる。炭酸(CO_3^{2-})と重炭酸(HCO_3^-)の合計は Mg^{2+} と Ca^{2+} の合計よりやや多く、これはDolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)の溶解によると判断される。

4) 0.01 Nと1 Nの塩化カリウムで溶出してくるマグネシウムとカルシウムはそれぞれ置換性マグネシウムと置換性カルシウムと一致する。なお、全カルシウム(Ca)は0.9%, 全ニッケル(Ni)は0.2%である。

5) 風化により土壌成分の溶脱は全濃度に関係なく、結合力の弱い元素から溶出してくる。同一元素では風化しやすい鉱物から溶出し、また同じ元素でも2価のものより1価の形態から溶出する。

6) 蛇紋岩風化物、残積土の置換性ニッケル濃度の低い理由は、マグネシウムの溶脱がニッケルの溶出がおこるまで進んでいないためと結論される。沖積土、洪積土で置換性ニッケル濃度の高くなる理由は溶出しやすいマグネシウムやカルシウムの洗脱がすでに完了しているためである。

6 生育障害の要因としての土壌成分

1) 既往の研究による重金属の植物に対する毒性順位と、本土壌の可溶性重金属の濃度から判断して、クロムとコバルトの毒性作用はありえない。ニッケルは植物の毒性作用に充分なだけの可溶性成分と全含量が存在する。

2) 本土壌はマグネシウムが異常に高いため、土壌によってはCa/Mg(me)比が1以下のものも存在する。それゆえ、この土壌で生育する作物にはカルシウムとマグネシウムの拮抗作用からカルシウム欠乏の可能性を有する。

7 えん麦によるニッケルの吸収特性と障害発生

1) 障害症状は発芽直後から発現する。障害の程度は茎葉中ニッケル濃度と比例し、茎葉中ニッケル濃度は置換性ニッケル濃度(1 N酢酸アンモニウム抽出)と比例する。

2) 茎葉中ニッケル濃度が同一の場合、障害の程度は茎葉中Fe/Ni比の低いほど著しい。塩化第2鉄の施用は鉄の吸収またはFe/Ni比の増大とはならない。

3) ニッケルは茎葉中から子実への移動が容易である。また、茎葉中ニッケルよりも子実中濃度が高くなる。茎葉中ニッケル濃度は初期生育ほど高く、生育の進展に伴って減少する。そのため、障害の程度は生育後期ほど軽減し、特に出穂後の障害は進展しない。

4) 置換性ニッケル濃度は土壌pHの増大に伴って減少する。また置換性ニッケル濃度は難溶性化合物である水酸化ニッケル、または炭酸ニッケルの溶解度に比較してきわめて低い濃度である。

5) 炭酸カルシウムの施用による土壌pHの増大は、置換性ニッケルと茎葉中ニッケルを減少させ、生育障害を軽減する。

6) えん麦の茎葉中Ca/Mg比は大きな差異がなく、また生育障害とCa/Mg比の関係は認められなかった。

7) 土壌への硫酸ニッケルの添加は蛇紋岩質土壌における生育障害と同様の障害症状を呈した。障害の程度はニッケルの添加量に伴って増大した。

8) ニッケル添加による障害の程度は炭酸カルシウムと炭酸ナトリウムの添加で減少した。これらの添加は土壌pHを増大し、置換性ニッケルの減少を促進した。

8 ニッケル過剰障害の作物間差異

1) pH 5~7、置換性ニッケル10~20 ppmの範囲における土壌では、えん麦、アルファルファ、小豆、菜豆、キャベツは著しい障害を呈した。とうもろこし、馬鈴しょの障害症状は認められなかった。チモシー、ペレニアルライグラス、オーチャードグラス、アカクロバ、ラジノクロバ、大根、てん菜等は中程度の抵抗力を示した。

2) 植物体中ニッケル濃度水準はニッケルに対する抵抗力の作物間差異の尺度にはならない。

3) ニッケルに対して抵抗力の弱い作物は置換性ニッケルに対し植物体ニッケル濃度が一定の割合で増し、両者間には直線的な相関関係がある。しかし抵抗力の強い作物は置換性ニッケル低濃度に

おいての吸収率は高いが、置換性ニッケルの増大に伴い吸収率は低下し、植物体内濃度は飽和に達するような状態を示す。

4) ニッケルの存在で減収の著しい作物は植物体中の Fe/Ni 比, Cu/Ni 比とも低い。Fe/Ni 比が高くても Cu/Ni 比の低い作物はクロロシスまたはネクロシス症を呈する。生育障害は Fe/Ni 比 4~10, Cu/Ni 比 0.1~1.0 以下でそれぞれ認められる。正常な生育をするための Fe/Ni 比下限の許容範囲はきわめて小さい。Fe/Ni 比, Cu/Ni 比の下限の許容範囲は栽培年別, 生育時期別, 作物別などによって異なる。

9 植物体内の微小部分におけるニッケルと鉄の分布状態—EMX によるライン分析

1) えん麦葉身中のニッケル濃度は鉄濃度の低い部分で高くなる傾向を示した。鉄濃度の上下の振幅はニッケルより大きく、ピークの間隔はクロロシスまたはネクロシスの縦縞の間隔に類似していた。

2) 大根, キャベツ, アルファルファ, 小豆等の葉身に発生したネクロシス部分と健全部分における分析では, えん麦のような明瞭な結果は得られなかった。

10 とうもろこしと馬鈴しょの生育障害

1) 置換性ニッケルが 30 ppm 以上の土壌において, 馬鈴しょは多雨年に激しいニッケル過剰症を発現した。しかし同じ土壌においても旱魃年には発現しなかった。炭酸カルシウム施用によって置換性ニッケルが 20 ppm 程度に低下した土壌では, 多雨年においても障害の発現は認められなかった。

2) 置換性のカルシウムとマグネシウムの比 Ca/Mg (me 比) が 0.5 以下の土壌では, 馬鈴しょはカルシウム欠乏症を発現した。植物体中 Ca/Mg 比 (%比) は非蛇紋岩質土壌が 3.4 であったのに対し, カルシウム欠乏発生植物体は 0.15 まで低下した。

3) 馬鈴しょ茎葉中のニッケルと鉄は高い正の相関関係にあり, 非蛇紋岩質土壌の 5 倍以上の鉄濃度に達するものもあった。

4) とうもろこしにはニッケル過剰症, カルシウ

ム欠乏症とも発現しなかった。茎葉中の鉄と銅濃度はニッケルの増大に伴って増加した。

11 水稻に対するニッケルの影響

1) 蛇紋岩質土壌地帯で水稻のニッケル過剰症は見い出されない。硫酸ニッケルと硫化ニッケルの添加実験で, 玄米の収量は置換性ニッケル 30 ppm から 100 ppm 以上で減収を示した。

2) 葉身中 Fe/Ni 比 8 以下で急激に玄米の減収を示した。葉身中のニッケル濃度は置換性ニッケル濃度と正の高い相関関係にあり, また葉身中鉄の濃度は活性 2 価鉄 (Fe^{2+}) と正の相関関係にある。Ex.Ni/ Fe^{2+} の値が 0.7 以上では玄米の収量は急激に低下した。葉身中鉄濃度は葉身中ニッケル濃度が 100 ppm まで増大したが, 葉身中ニッケル濃度がそれ以上ではむしろ減少した。

3) 炭酸カルシウムの添加は置換性ニッケル濃度を低下させ, ニッケルによる障害を軽減した。

4) 水稻のニッケル障害はわずかに黄化するのみで, えん麦に見られるようなクロロシスやネクロシスは認められなかった。

5) ニッケルによる障害の発現は葉身中のリン酸濃度を高める。葉身中マグネシウム濃度は障害の発現に伴って減少する。

12 モリブデン欠乏症

1) 蛇紋岩質土壌で生育障害の発生したアルファルファの症状はモリブデン欠乏症と類似していた。茎葉中モリブデン濃度は欠乏症発生限界まで低下した。炭酸カルシウムの施用は茎葉中モリブデン濃度を高め, 生育障害を消失させた。

2) 土壌 pH の低下, 置換性ニッケルの高い条件は作物のモリブデン吸収を低下させた。

3) ニッケル過剰症の発生しやすい作物はモリブデンの吸収も低下しやすい。ニッケル障害の発生しない作物はモリブデン濃度の低下を示さなかった。

13 営農上の対策

1) 作物間差異を利用すること。水稻は最も強い抵抗性を示した。したがって, 水稻栽培可能地は水田にすることが望ましい。畑作物ではとうもろこし, 馬鈴しょは抵抗力が強い。イネ科牧草, アカクローバ, ラジノクローバ, 大根, 小麦などは

比較的強い。アルファルファ、えん麦、小豆、菜豆、キャベツは弱い。

2) 炭酸カルシウムの施用をすること。本土壌における生育障害の主因はニッケル過剰であるが、その他作物によってはマグネシウム過多によるカルシウム欠乏症、低pHによるモリブデン欠乏症も併発する可能性があるので、炭酸カルシウムの施用はこのいずれの場合にも効果が認められる。

3) 排水を良好にすること。現地の蛇紋岩質土壌での観察結果、春先の早魃条件においてニッケルの過剰障害は発生しなくても、生育中期、または後期において激しい降雨があると、2、3日後に

はニッケル過剰症は発生する。またこの障害は過湿土壌で発生しやすく、同一ほ場では凹地で強く発現する。

4) 堆きゅう肥を施用すること。単独でも効果が認められるが、炭酸カルシウムとの併用が望ましい。

5) 亜鉛欠乏症の発現しやすい作物には硫酸亜鉛を施用すること。亜鉛の施用は欠乏の明瞭でないえん麦にもわずかながら効果が現われた。とうもろこし、たまねぎなどの亜鉛欠乏症は置換性ニッケルが同程度でも、土壌pHが高く、可溶性亜鉛の低いところで発現を示した。

文 献

- Anderson, A. J. (1956). Molybdenum deficiencies in legumes in Australia. *Soil Sci.* 81, 173-182.
- 浅見輝男, (1972). 日曹金属株式会社社会津製錬所の排煙、排水に含まれるカドミウム、亜鉛、鉛および銅による水田土壌汚染。土肥誌, 43, 339-343.
- ベイカー, ハーバート G. (1975). 植物と文明。阪本寧男, 福田一郎訳。東京, 東京大学出版会, p. 20.
- Bard, A. J. (1966). *Chemical Equilibrium*. Tokyo, Harper International Edition, John Weatherhill, p. 95-105.
- Bickoff, E. M., Kohler, G. O., Smith, D. (1956). Chemical Composition of Herbage, Alfalfa science and technology. *Agronomy*. No. 15, p. 274.
- Cescas, M. P., Tyner, E. H., Gray, L. J. (1968). The electron microprobe X-ray analyzer and its use in soil investigations. *Adv. Agron.* 20, 153-198.
- シャルロー, G. (1969). 定性分析化学 I - 溶液中の化学反応 -, 曾根興三, 田中元治訳。東京, 共立出版, p. 120-126.
- Cheng, K. L., Bray, R. H. (1953). Two specific methods of determining copper in soil and in plant material. *Anal. Chem.* 25, 655-659.
- Chilton, J. M. (1953). Simultaneous colorimetric determination of copper, cobalt, and nickel as di-ethyldithiocarbamates. *ibid.* 25, 1274-1275.
- 茅野充男, 北岸確三, (1966). 重金属元素の過剰による水稲の被害に関する研究, 第1報, 銅, ニッケル, コバルト, 亜鉛およびマンガンの処理濃度を変えたときの水稲の生育。土肥誌, 37, 342-347.
- 茅野充男, 北岸確三, (1966). 重金属元素の過剰による水稲の被害に関する研究, 第2報, 銅, ニッケル, コバルト, 亜鉛およびマンガンの処理開始時期を変えたときの水稲の生育。土肥誌, 37, 372-377.
- 茅野充男, 三井進午, (1967). 重金属元素過剰の際の水稲による鉄の吸収, 移行および体内分布, 第1報, 重金属誘導鉄クロロシスの発生に関する研究。土肥誌, 38, 249-254.
- 茅野充男, 三井進午, (1967). 水稲地上部の鉄濃度に及ぼす重金属元素処理の影響, 第2報, 重金属誘導鉄クロロシスの発生に関する研究。土肥誌, 38, 255-259.
- 茅野充男, 三井進午, (1967). アルファルファにおける重金属誘導鉄クロロシスの発生と⁵⁹Fe, ⁶⁰Coおよび⁵⁴Mnの分布, 第3報, 重金属誘導鉄クロロシスの発生に関する研究。土肥誌, 38, 280-286.
- Crooke, W. M., Hunter, J. G., Vergnano O. (1954). The relationship between nickel toxicity and iron supply. *Ann. Appl. Biol.* 41, 311-324.
- Crooke, W. M., Inkson, R. H. E. (1955). The relationship between nickel toxicity and major nutrient supply. *Plant and Soil*. 6, 1-15.
- Crooke, W. M., Knight A. H. (1955). The relationship between nickel-toxicity symptoms and the absorption of iron and nickel. *Ann. Appl. Biol.* 43, 454-464.
- Crooke, W. M. (1955). Further aspects of the relationship between nickel toxicity and iron supply. *Ann. Appl. Biol.* 43, 465-476.
- Crooke, W. M. (1956). Effect of soil reaction on uptake of nickel from a serpentine soil. *Soil Sci.* 81, 269-276.
- Dekock, P. C. (1956). Heavy metal toxicity and iron chlorosis. *Ann. Bot.* 20, 133-141.
- Dixon, M., Webb, E. C. (1962). *Enzymes*. p. 672-785.
- Freiser, H., Fernando, Q. (1967). イオン平衡-分析化学における-, 藤本太一郎, 関戸栄一訳。東京, 化学同人, p. 139-143.

23. Garrels, R. M., Christ, C. L. (1965). *Solution, Minerals, and Equilibria*. New York, Harper and Row, p. 376-378.
24. Gordon, A., Lipman, C. B. (1926). Why are serpentine and other magnesian soils infertile? *Soil Sci.* 22, 291-302.
25. 半谷高久, (1960). 水質調査法, 東京, 丸善, p. 268-271.
26. 原田登五郎, 久津郡浩三, (1955). 土壌中に於ける塩基の行動, 第1報, Negative Chargeの主因と NH_4 及び Ca の吸着に就いて, 農技研報告, B5, 1-26.
27. 原田登五郎, 久津郡浩三, (1960). 土壌中における塩基の行動, 第2報, Negative Chargeの主因と NH_4 , Ca の吸着(続), 農技研報告, B10, 37-79.
28. 北海道火山灰命名委員会編, (1972). 北海道の火山灰分布図, No. 1.
29. 本間美文, 平田照, (1974). 水稻の生育, 収量およびカドミウム, 亜鉛, 銅含有率におよぼす重金属添加の影響, 土肥誌, 45, 368-377.
30. Howard-Williams, C. (1971). Morphological variation between isolated populations of *Becium homblei* (De Wild.) duvign & plancke growing on heavy metal soils. *Vegetatio*, 23, 141-151.
31. Howard-Williams, C. (1972). Factors influencing copper tolerance in *Becium homblei*. *Nature*, 237, 171.
32. Hunter, J. G., Vergnano, O. (1952). Nickel toxicity in plants. *Ann. Appl. Biol.* 39, 279-284.
33. Hunter, J. G., Vergnano, O. (1953). Trace-element toxicities in oat plants. *Ann. Appl. Biol.* 40, 761-777.
34. 飯村康二, (1973). 土壌中のカドミウムの形態と水稻による吸収, 近代農業における土壌肥料の研究, 第4集, 東京, 養賢堂, p. 46-52.
35. 飯塚浩二, (1950). 人文地理学, 東京, 有斐閣, p. 201-202.
36. 飯塚隆治, (1974). 福島県川俣町に発生した障害桑における微量金属元素間の相互作用について, 蚕糸研究, 92, 1-15.
37. Iizuka, T. (1975). Interaction among nickel, iron, and zinc in mulberry tree grown on serpentine soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 21, 47-55.
38. 飯塚隆治, (1976). 桑の葉脈間クロシス症状の発現におけるニッケルとマグネシウムおよびマンガンの相互作用, 土肥誌, 47, 69-74.
39. 石塚喜明, (1942). 植物に対する銅イオン有害作用の起因に就て, 第2報, 根部生長点附近に於ける銅の異常集積, 土肥誌, 16, 43-45.
40. 伊藤秀文, 飯村康二, (1976). 水稻によるカドミウムの吸収・移行および生育障害-亜鉛との対比において, 第1報, 重金属による土壌汚染に関する研究, 北陸農試報告, 19, 71-139.
41. 川口桂三郎, 熊田基一, 青峰重範, 古坂澄石, 佐々木清一, 高井康雄, 山根一郎, 牧引真吾, (1965). 土壌学, 東京, 朝倉書店, p. 115.
42. 北岸雄三, (1966). 原子吸光分光分析法, 土肥誌, 37, 119-125.
43. 北野康, (1969). 水の科学, 日本放送出版協会, p. 65-105.
44. 北野康, 市川勝, 長哲郎, 井上祥平, 浅田浩二, (1976). 炭酸ガスの化学, 東京, 共立出版, p. 16.
45. 小林純, (1969). イタイイタイ病の原因の追究-カドミウムをめぐる生物地球化学-, 科学, 39, 286-293, 309-375, 424-429.
46. 久保彰治, (1958). 植物体中のマンガン(比色法), 実験化学講座, 15, 分析化学, 下, 日本化学会編, 東京, 丸善, p. 206-208, 306-307.
47. 熊沢喜久雄, (1974). 植物栄養学大要, 東京, 養賢堂, p. 125-136.
48. ライオン, T. L., バックマン, H. O. (1948). 土壌学, 三井進午ら訳, 東京, 朝倉書店, p. 75.
49. 増田敏春, 佐藤亮八, (1961). 蛇紋岩土壌における作物生育障害について, 予報, 土壌ならびに生育障害実態調査, 北海道立農試集報, 8, 37-48.
50. 増田敏春, 佐藤亮八, (1962). 蛇紋岩土壌における作物生育障害について, 第1報, Ni, Ca, Mgの相互関係, 土肥誌, 33, 201-204.
51. 増田敏春, (1963). 蛇紋岩土壌における作物生育障害について(障害要因と土壌反応の影響), 北海道立農試集報, 11, 52-58.
52. 南松雄, 古山芳広, 土居晃郎, (1971). 亜鉛欠乏に起因する玉ねぎの生育障害, 北海道立農試集報, 23, 20-30.
53. Mitchell, R. L. (1945). Cobalt and nickel in soils and plants. *Soil Sci.* 60, 63-70.
54. 三井進午, 矢崎仁也, (1960). 作物の養分吸収に関する動的的研究, 第31報, 水稻の呼吸酵素系の銅・鉄栄養環境と生育時期および器官別変動とその意義に就て, 土肥誌, 31, 403-406.
55. 三井進午, 矢崎仁也, 熊沢喜久雄, (1960). 作物体の鉄, マンガンの代謝に及ぼす銅の影響について, 第3報, 麦に及ぼす影響, 土肥誌, 31, 455-458.
56. 水野直治, 林謙次郎, (1967). 土壌中の置換性ニッケルの吸光光度定量, 分析化学, 16, 38-41.
57. 水野直治, 平井養孝, 小林莊司, 佐藤亮八, 増田敏春, (1967). 蛇紋岩質土壌に関する研究, 一作物の生育障害とその改良対策-, 地力保全研究報告, No. 1, 北海道立中央農業試験場, 27 p.
58. 水野直治, (1967). 北海道蛇紋岩質土壌の化学的特性に関する研究, 第1報, 土壌と植物中のニッケルとモリブデン含有量の差異, 北海道立農試集報, 15, 48-55.
59. 水野直治, (1967). 北海道蛇紋岩質土壌の化学的特性に関する研究, 第2報, 土壌と植物中の亜鉛, 銅, マンガンおよび鉄含有量の差異, 北海道立農試集報, 16, 1-9.
60. 水野直治, (1968). 北海道蛇紋岩質土壌の化学的特

- 性に関する研究, 第3報, 土壌と植物のコバルト含有量と土壌からのコバルトと他の要素(銅・亜鉛・ニッケル)の植物吸収率の差異, 北海道立農試集報, 17, 62-72.
61. Mizuno, N. (1968). Interaction between iron and nickel and copper and nickel in various plant species. *Nature*. 219, 1271-1272.
 62. Mizuno, N., Hayashi, K., Hasebe, T. (1969). Extraction-spectrophotometric determination of copper in soil and in plant material using iso-propyl ether. *Bull. Hokkaido Prefect. Agric. Exp. Stn.* 19, 59-62.
 63. 水野直治, 鈴木智, 高尾欽弥, (1971). 有珠地方における小豆の生育障害に関する研究, 第1報, エレクトロンマイクロプローブX線アナライザーによる無機元素組成の解析, 土肥誌, 42, 163-166.
 64. 水野直治, 小林莊司, (1971). 蛇紋岩質水田土壌地帯における微量要素の研究-水稻体および土壌中のマンガ、鉄、銅、亜鉛ならびにモリブデン含量とニッケルの影響について-, 土肥誌, 42, 214-220.
 65. 水野直治, (1972). 土壌の酸化還元電位による土壌中カドミウムの挙動と米のカドミウム含量変化に関する一考察, 土肥誌, 43, 179-181.
 66. 水野直治, 山上良明, (1972). 玄米中のカドミウム含量予測に関する一考察, 一重金属汚染土壌地区における土壌中カドミウム、亜鉛、銅含量と玄米中カドミウム含量の関係-, 土肥誌, 43, 383-387.
 67. 水野直治, (1976). 希塩酸による土壌中銅抽出の限界, 土肥誌, 47, 251-255.
 68. 水野直治, 兼田裕光, 鎌田賢一, 目黒孝司, 土岐和夫, 後藤計二, (1977). 北海道農用地の土壌成分, 北海道立農試資料, 8, 1-62.
 69. 水野直治, 目黒孝司, (1978). 希塩酸, 希硝酸および希硫酸による土壌中カチオン抽出の差異, 土肥誌, 49, 1-5.
 70. 水野直治, (1978). 土壌からの陽イオン抽出におよぼす炭酸ガスの効果, 土肥誌, 49, 6-11.
 71. 水野直治, 宮森康雄, 鎌田賢一, (1978). 土壌溶液中陽イオン濃度と水稻の養分供給に対する有機物施用の効果, 土肥誌, 49, 85-89.
 72. Nelson, J. L., Boawn L. C., Viets, F. G. (1959). A method for assessing zinc status of soils using acid-extractable zinc and "titratable alkalinity" values. *Soil Sci.* 88, 275-283.
 73. Nicholas, D. J. D., Thomas, W. D. E. (1954). Some effects of heavy metals on plants grown in soil culture. *Plant and Soil*. 5, 182-193.
 74. 西村雅吉, (1958). 温泉の化学的研究, 第37-38報, 分光分析による北海道諸温泉の微量金属成分の研究, 日本化学雑誌, 79, 172-187.
 75. 大八木義彦, (1976). 原子吸光分析, ぶんせき, 14, 62-71.
 76. Painter, L. I., Toth, S. J., Bear, F. E. (1953). Nickel status of New Jersey soils. *Soil. Sci.* 76, 421-429.
 77. Purvis, E. R., Peterson, N. K. (1956). Methods of soil and plant analyses for molybdenum. *Soil Sci.* 81, 223-228.
 78. Reilly, C., Stone, J. (1971). Copper tolerance in *Becium homblei*. *Nature*. 230, 403.
 79. Reisenauer, H. M. (1956). Molybdenum content of alfalfa in relation to deficiency symptoms and response to molybdenum fertilization. *Soil Sci.* 81, 237-242.
 80. Rubins, E. J. (1956). Molybdenum deficiencies in the United States. *Soil Sci.* 81, 191-197.
 81. Sandell, E. B., Perlich, R. W. (1939). Determination of nickel and cobalt in silicate rocks. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 11, 309-311.
 82. Sandell, E. B. (1959). *Colorimetric Determination of Traces of Metals*, 3rd, New York, Interscience Publishers.
 83. 白石直典, 長谷川忠光, 久行恒芳, 高橋博明, (1972). メチルイソブチルケトンの塩類溶液に対する溶解-カドミウムおよび鉛の定量-, 分析化学, 21, 705-710.
 84. Soane, B. D., Saunder, D. H. (1959). Nickel and chromium toxicity of serpentine soils in Southern Rhodesia. *Soil Sci.* 88, 322-330.
 85. スタイルズ, W., コッキング, E. C. (1971). 植物生理学入門, 倉石晋, 西沢典子訳, 東京, 東京大学出版会, p. 52-89.
 86. Suzuki, S., Mizuno, N., Kimura, K. (1971). Distribution of heavy metals in serpentine soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 17, 195-198.
 87. 橘高毅, 本間正一, 金島弘恭, 森三佐雄, 水野直治, 大垣昭一, (1971). 道産大麻の研究, 第4報, 野生大麻の成育土壌と微量要素について, 北海道立衛研所報, 21, 191-193.
 88. 高岸秀次郎, 東野正三, 飯塚隆治, (1973). ジャ紋岩質土壌に生育する桑の異常障害に関する研究, I. 異常症状および症状発生桑園土壌の化学性と桑の無機組成, 日蚕雑, 42, 135-143.
 89. 高岸秀次郎, 飯塚隆治, (1974). ジャ紋岩質土壌に生育する桑の異常障害に関する研究, II. 桑生育に対するカルシウム塩の施用効果, 日蚕雑, 43, 361-368.
 90. 高尾欽弥, 鈴木智, 水野直治, (1971). りんご粗皮病のエレクトロンマイクロプローブX線アナライザーによる解析, 土肥誌, 42, 29-32.
 91. Takeuchi, T., Suzuki, M., Yanagisawa, M. (1966). Some observations on the determination of metals by atomic absorption spectroscopy combined with extraction. *Anal. Chim. Acta.* 36, 258-260.
 92. 玉虫文一ら編, (1971). 理化学辞典, 第3版, 東京, 岩波書店, p. 348.
 93. 田中明, 但野利秋, (1969). 水稻の鉄栄養に関する研究, 第1報, 鉄の吸収および体内分布に及ぼす培養液中鉄濃度の影響, 土肥誌, 40, 380-384.
 94. 田中明, 但野利秋, (1969). 水稻の鉄栄養に関する

- 研究, 第2報, 水稻根の鉄排除機能について, 土肥誌, 40, 469-472.
95. 高橋治助, (1960), 無機成分の吸収と移行, 作物生理学講座, 2, 戸蒔義次ら編, 東京, 朝倉書店, p. 1-24.
96. 上野景平, (1960), キレート滴定法, 東京, 南江堂.
97. Vergnano, O., Hunter, J. G. (1952). Nickel and cobalt toxicities in oat plants. *Ann. Bot.* 17, 317-328.
98. Vlamis, J., Jenny, H. (1948). Calcium deficiency in serpentine soils as revealed by adsorbent technique. *Science*, 107, 549.
99. Walker, R. B. (1948). Molybdenum deficiency in serpentine barren soils. *Science*, 108, 473-475.
100. Walsh, A. (1955). The application of atomic absorption spectra to chemical analysis. *Spectrochimica Acta*, 7, 108-117.
101. ウェーバ, マックス, (1959), 古代社会経済史—古代農業事業, 上原専祿ら訳, 東京, 東洋経済新報社, p. 4-5.
102. Wild, H. (1968). Geobotanical anomalies in Rhodesia, 1—The vegetation of copper bearing soils. *Kirkia*, 7, 1-71.
103. Yamane, I. (1970). Eh-pH diagrams of iron systems in relation to flooded soils. *Rep. Inst. Agric. Res. Tohoku Univ.* 21, 39-63.
104. 山根一郎, (1974), たん水土壤中の土壤溶液中のpH, 土肥誌, 45, 303-305.

Studies on Chemical Characteristics of Serpentine Soils and Mineral Deficiencies and Toxicities of Crops

by
Naoharu MIZUNO

Summary

Metal toxicity due to an abnormally high nickel concentration in serpentine soils is known to have a seriously harmful effect on crops. Chromium which has a concentration in the soils as high as nickel, however, causes almost no metal toxicity to crops, suggesting that this harmlessness is closely related to low solubility. It is indicated that the concentration of soluble nickel has no relation with the total nickel concentration of serpentine soils and that many crops present toxic symptoms when soluble nickel has a high concentration in the soils. An abnormally high concentration of magnesium is also known to be present in the soils. This paper tries to clarify relationships between chemical characteristics of serpentine soils and physiological disorders of crops due to mineral deficiency and toxicities, as well as a mechanism behind the relationships.

1. Geographical characters.

1) Serpentine rocks cover mountainous regions of Hokkaido in the form of a long belt extending between lat. 42° – 45° N and long. 142 – 143 E. Serpentine soils are accordingly observed in alluvial, diluvial and peat soils in and around the rocks.

2) As for pH and magnesium concentrations in serpentine soils, their values are high in the northern part, low in the central part and medium in the southern part of Hokkaido. The concentration of exchangeable nickel (extracted with neutral ammonium acetate) in the soils is high in the northern and western parts of Hokkaido.

3) The concentration of exchangeable nickel in the soils has no correlation with the total nickel concentration in them. Meanwhile, the concentration of exchangeable nickel of weathering serpentine rocks or sedentary soils deriving from them is lower than that of alluvial or diluvial soils which were formed by soils washed out and carried downstream by floods. As for chromium, the concentration of soluble chromium extracted with 0.1 N hydrochloric acid or exchangeable chromium is found extremely small or almost none.

4) No geographical difference is shown in the total metal concentration of serpentine rocks as to each of nickel, chromium, and magnesium. The average of total concentration of nickel is 0.2 %, and that of magnesium is 23 %, that of chromium is 0.12 %, but shows wide variations over individual rocks.

2. Distribution of heavy metals and magnesium in minerals.

1) Nickel and magnesium show an almost homogenous distribution in ferromagnetic minerals, light minerals, silts and clays. Chromium is found concentrated in heavy minerals. Not a little iron is found in heavy minerals and ferromagnetic minerals. Cobalt is found much in silts and clays, while copper and zinc are found concentrated in nonmagnetic heavy minerals.

2) Chromium is concentrated in a black hard mineral considered to be chromite, one of nonmagnetic heavy minerals. In this mineral, chromium, manganese and iron are found in 9 : 1 : 2, but titanium, nickel and copper are undetectable. Chromite, which is fairly stable in nature, is hard to weather, hence chromium tends to stay in the mineral.

3) Titanium, manganese and iron are detectable in a ferromagnetic mineral which is considered as magnetite, but chromium and nickel are not, using an electron microscope X-ray analyzer.

3. Soluble heavy metals in soils.

1) Nickel and chromium in serpentine soils show high values of total concentration. The concentration of soluble chromium extracted with water or neutral 1 N ammonium acetate or 0.1 N hydrochloric acid is less than 1/100 that of soluble nickel.

2) Analyses show high values of concentration of soluble chromium in parent rocks of serpentine soil which have a high concentration of soluble chromium. Also shown are high values of concentration of soluble chromium in serpentine soils (eluvia) whose total concentration of chromium in clays are more than 700 ppm. Almost no soluble chromium is extractable in case of soils whose total concentration of chromium in clays is less than 400 ppm.

3) The concentration of soluble nickel is low in serpentine soils deriving from serpentine rocks whose concentration of soluble nickel (exchangeable ; soluble in 0.1 N hydrochloric acid) is low.

4. Relationships between pH and magnesium concentration in soils.

1) A fairly high positive correlation ($n=30$; $r=0.915^{***}$) is found between pH and magnesium concentration in serpentine soils. Low-pH soils have a low concentration ratio of magnesium to nickel. The concentration ratio of magnesium to nickel ranges roughly from 70 to 120 in serpentine rocks or sedentary soils and ranges as low as from 10 to 50 in diluvial and alluvial soils which accumulated in the distant past.

2) Serpentine soils in the central part of Hokkaido, which are high in concentration of exchangeable nickel, low both in pH and concentration of magnesium, abound in soils accumulating in the distant past.

5. Difference between magnesium and nickel as to extractions from soil.

1) When a weathered product from a serpentine rock is leached with carbonated water, magnesium starts getting extracted first. As the leaching rate of magnesium starts dropping a little, that of nickel in solution attains a peak. The peak of leaching rate of calcium comes slightly later than the peak of that of magnesium. In case of calcium it has only one peak, differently from magnesium which has a number of peaks.

2) The result of leaching with 0.01 N potassium chloride of a weathered product from a serpentine rock, whose saturation by a base is nearly 400 %, indicates that MgHCO_3^+ and CaHCO_3^+ are extracted in the equivalent ratio of 3:1 and that their aggregate equals CEC of the weathered product. The two ions are suggested to coincide with the ions deriving from products weathered from huntite ($\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$).

3) Leaching of a weathered product with 1 N potassium chloride subsequently to leaching with 0.01 N potassium chloride results in the extraction of Mg^{2+} and Ca^{2+} in the ratio of 1:1.5. The total of carbonate and bicarbonate in leaching solution is slightly larger than the total of Mg^{2+} and Ca^{2+} , which is suggested to have been caused by the dissolving of dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

4) Magnesium and calcium leached (with 0.01 N and 1 N solutions of potassium chloride) coincide respectively with exchangeable magnesium and exchangeable calcium in the weathered product, in which the total concentration of calcium is 0.9 %, that of nickel 0.2 %, and that of magnesium 25.0 %.

5) Eluviation of soil elements by weathering does not depend on the total concentration, but on the degree of coherence ; namely, soil elements of the weaker degree of coherence eluviate earlier. As for the same one element, minerals which are more efflorescent eluviates more easily, while monovalent ions eluviate more easily than bivalent ions.

6) It is concluded that the low concentration of exchangeable nickel in the weathered products or eluvia of serpentine rocks is explained by the level of progress of eluviation of magnesium which has not reached the level at which nickel starts eluviating. The reason for the higher concentration of exchangeable nickel in alluvial, diluvial and peat soils is that such magnesium and calcium that easily eluviate have already been leached out.

6. Soil elements as factors of growth disorder.

1) The absence of toxicity of chromium and cobalt on crops is suggested by past studies by which heavy metals are ranked in order of increasing toxicity on crops, as well as by this study of concentrations of soluble heavy metals in serpentine soils. As for nickel, it has soluble and total concentrations sufficient to cause toxicity on crops.

2) The magnesium concentration of serpentine soils is so abnormally high that some soils show the ratio of calcium to magnesium lower than 1. Hence, crops grown on the soils have a possibility of being deficient in calcium due to an antagonism between calcium and magnesium. Application of lime to such calcium-deficient soils reduces physiological disorders of crops as the result of an increase in calcium in the soils.

7. Uptake characteristics of nickel by oat plants and occurrence of growth disorders by nickel.

1) Symptoms of disorder due to an excessive nickel concentration occur on leaves of oat plants immediately after the germination. The degree of growth disorder is in proportion to the nickel concentration in the tops, which is in proportion to the concentration of exchangeable nickel with 1 N ammonium acetate.

2) The degree of growth disorder is more striking for the lower ratio of iron to nickel in the tops,

when they are in the same level of nickel concentration. Application of ferric chloride does not result in an absorption of iron or an increase in the ratio of iron to nickel.

3) While nickel moves easily from tops to grains, the nickel concentration is higher in the latter than in the former. The nickel concentration rises during the early growing stage, and drops as the growth advances. Hence, the degree of growth disorder lessens as the growth reaches later stages ; in particular, no development of growth disorder takes place after the heading period.

4) The concentration of exchangeable nickel decreases as pH in soils increase.

5) An increase in pH in soils due to application of calcium carbonate results in a decrease in concentrations of exchangeable nickel and of nickel in the tops whereby the degree of growth disorder is lessened.

6) Not much difference was noted in the ratio of calcium to magnesium in tops of oat plants, while a relation was not observed between the growth disorder and the ratio.

7) Addition of nickel sulphate to normal soils brought about the same kind of nickel toxic symptoms as growth disorders that occurred in serpentine soils, whereas the degree of growth disorder increased with an increase in amount of nickel added.

8) The degree of growth disorder due to addition of nickel lessened with addition of calcium carbonate or sodium carbonate, which contributed to an increase in pH in soils and a decrease in exchangeable nickel.

8. Difference in resistance to nickel toxicity among crops.

1) Resistance to nickel toxicity was tested using number of crops grown on serpentine soils whose pH and exchangeable nickel concentrations were changed over the ranges from 5 to 7 and 10 ppm to 20 ppm respectively by adding various amounts of calcium carbonate. Showing a weak resistance, oats, alfalfa, azuki beans, kidney beans and cabbage had strong necrosis or chlorosis. The effect of nickel toxicity was medium on timothy, perennial rye grass, and orchard grass which showed longitudinal chlorosis, as well as on radish and sugar beets which showed necrotic areas or slight chlorosis on leaves. Potato and Indian corn plants showed such a strong resistance to nickel toxicity that neither chlorosis nor necrosis occurred.

2) Levels of nickel concentration in plants do not serve as measures telling differences among crops concerning their nickel toxic symptoms or resistance to nickel toxicity.

3) Absorption of nickel by plants with a weak resistance to nickel toxicity increases as exchangeable nickel in soils increases. Plants with a strong resistance show, however, that the level of nickel concentration varies slightly even though exchangeable nickel increases in soils.

4) Plants of crops whose yields are markedly low have low ratios of iron to nickel as well as copper to nickel. Even if plants of crops (e.g. radish) have a high ratio of iron to nickel, they have symptoms of chlorosis or necrosis, if their ratio of copper to nickel is low. Growth disorders are observed among plants whose ratios of iron to nickel as well as copper to nickel are lower than 4–10 and 0.1–1.0 respectively. For plants to follow normal growth the range of tolerance of the lower limit in the ratio of iron to nickel is extremely small. Such a range of tolerance varies with the crop year, growing stage and crop.

9. Mineral deficiencies and toxicities of Indian corn and potato plants.

1) When the growing season was rather rainy, potato plants grown on a soil with a high content more than 30 ppm of exchangeable nickel presented intensive toxic symptoms, while, when the growing season was rather dry, they did not show disorders. However, necrosis produced by nickel was not observed on leaves of potato plants growing in the season of a copious rainfall on the soil in which exchangeable nickel was reduced to about 20 ppm with addition of calcium carbonate.

2) Potato plants presented a symptom of calcium deficiency when grown on serpentine soils whose adverse ratio (me ratio) of calcium to magnesium was 0.5 and less. The ratio (% ratio) calcium to magnesium dropped to 0.15 in plants having symptoms of calcium deficiency against the ratio of 3.4 observed in plants grown on nonserpentine soils.

3) A high positive correlation was found between iron and nickel concentrations in leaves of potato plants. As for iron concentrations, some potato plants grown on serpentine soils showed five times the value shown by plants grown on otherwise soils. This experiment did not confirm an earlier suggestion that the iron concentration was reduced by nickel.

4) Indian corn plants grown on serpentine soils whose concentration of exchangeable nickel is more than 30 ppm had symptoms neither of nickel toxicity nor calcium deficiency. The plants presented, however, symptoms of zinc deficiency on serpentine soils of high pH due to a high magnesium concentration.

10. Effects of nickel on rice plants.

1) Rice plants are nickel tolerant. Nickel toxicity symptoms were not observed in those rice plants grown in serpentine soil areas, where usually the ratio of iron to nickel is above 10 in the plants as a result of a high level of iron concentration.

2) An iron concentration in leaves increases in proportion to a nickel concentration, while an iron concentration decreases in an condition in which a nickel concentration in leaves is as high as 100 ppm or more.

3) It followed from the results of experiments that (1) in an condition in which the ratio of iron to nickel in leaves is 8 or less, the yield decreased even though symptoms of necrosis or chlorosis did not occur ; (2) when soluble iron in soil was in a low level of concentration, the ratio of iron to nickel decreased and the yield decreased.

11. Molybdenum deficiency.

1) Symptoms of molybdenum deficiency were presented in alfalfa leaves growing on serpentine soils. A molybdenum concentration in the tops decreased to less than 0.1 ppm on a dry weight basis, which constitutes the limitation for the normal growth of alfalfa plants. Symptoms of molybdenum deficiency reduced as the result of application of lime to the soils, which brought about an increase in a molybdenum concentration in the plants.

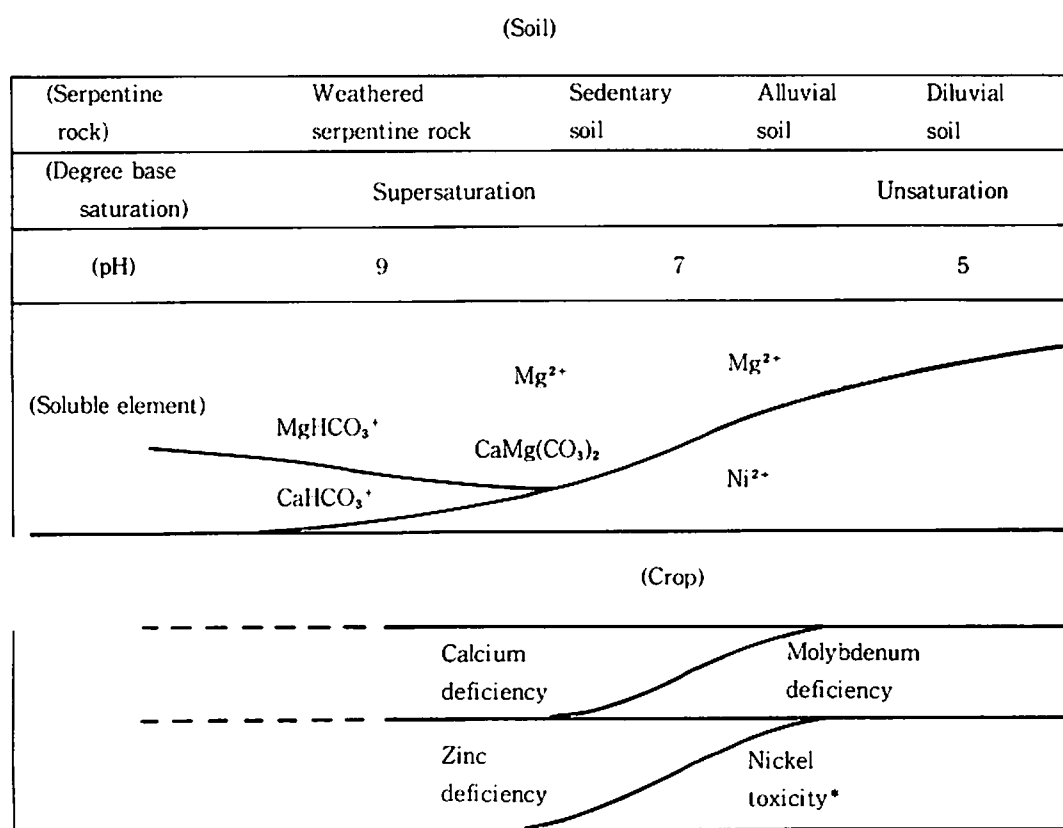
2) The molybdenum concentration did not decrease in nickel tolerant plants grown on serpentine soils of low pH.

12. Zinc deficiency.

1) Symptoms of zinc deficiency were presented in crops grown on serpentine soils of high pH. The symptoms characteristic of this deficiency were observed in Indian corn and onion plants grown on alkaline soils. Zinc fertilization allows a rapid recovery of the plants from the symptoms.

13. Relationships of mineral deficiencies and toxicities of crops to conditions of soils.

Figure 1 summarizes relationships of mineral deficiencies and toxicities of crops to conditions of serpentine soils.



* Mostly accompanied by iron and/or copper deficiency.

Fig. 1 Relationships of mineral deficiencies and toxicities of crops to conditions of soils : weathering of rocks, degree of base saturation, soil pH, and soluble elements.