

森林土壌のリン酸の形態について

河 田 弘⁽¹⁾・西 田 豊 昭⁽²⁾Hiroshi KAWADA and Toyoaki NISHIDA : Phosphorus
Forms in Representative Japanese Forest Soils

要 旨：わが国の森林土壌の生産力を支配する因子を、土壌の林木に対する養分の供給および葉分析による林木の栄養診断の面から見ると、NおよびとくにPが重要性を有することは、筆者らの一人河田およびその協力者らがしばしば指摘してきたことである。これらの一連の研究のつづきとして、筆者らは森林土壌の P_2O_5 の形態、土壌中における変化、林木に対する可給性等を検討することを計画した。

この報告はわが国の主な森林土壌20断面について、 P_2O_5 の形態を検討した結果を報告したものである。土壌中の P_2O_5 を有機態と無機態に分け、さらに後者を2.5% 酢酸可溶型、Al 型、Fe 型、Apatite 型、難溶型の5つに細分した。森林土壌の P_2O_5 の形態は農業土壌とはかなりの相違が認められ、また各土壌群ごとにかなり異なった特徴が見られた。さらに、母材料の影響、無機態 P_2O_5 の組成に見られる土壌の化学的風化過程の相違、全 P_2O_5 の組成に見られる各土壌の生成後の年代の経過の相違等について明らかにした。

供試土壌中人工造林地11断面について、深さ50 cmまでの土層中の P_2O_5 各フラクションの含有量を求めた。

森林土壌における林木に対する P_2O_5 の供給源として、有機態 P_2O_5 の分解無機化の過程がもっとも重要であろうとする作業仮説を提案し、さらに各土壌の表層土のC/有機態 P_2O_5 比を比較すると、この比はC/N比ときわめて相関性が高く、土壌有機物の分解過程を示す指標として用い得ることを明らかにした。

1. は じ め に

筆者らの一人河田らが、今までに報告した林地肥培試験も含めた主要造林樹種の葉分析による林木の栄養診断と、成長との関連性についての結果^{6)7)9)~12)}は、いずれの場合もわが国の森林土壌の生産力を、林木に対する土壌中の養分の供給という面から見ると、林木に対するNおよびPの供給力が、その成長を支配するもっとも重要な因子であることを明らかに示しているといえよう。

さらに、林木の葉の各養分比については、N/P比がいずれの場合も成長が良好なほど減少の傾向を示したことから、土壌中の P_2O_5 の林木に対する供給は、Nの供給よりもその生産力に対する支配的因子として、さらに大きな影響を示すものと考えられた。

したがって、森林土壌における可給態 P_2O_5 の量的な把握、およびその代謝の実態を明らかにすることは、森林土壌の生産力を解明するための当面の重要な課題の一つであろう。土壌中の可給態 P_2O_5 の定量法は、以前からすでに多くの方法が提案されているが、いずれもまだ満足できる段階には達していない。この点は、土壌中の P_2O_5 が複雑な多くの化合形態をなして存在していることによるものであろう。

筆者らは、林木に対する土壌中の P_2O_5 の可給性を検討するための基本的な問題として、土壌中の P_2O_5 の形態について検討した結果、各種森林土壌の P_2O_5 の形態の概要を明らかにするとともに、森林土壌に

おける林木に対する P_2O_5 の供給源として、有機態 P_2O_5 の分解無機化の過程がもっとも重要な影響をおよぼすであろうとする、作業仮説に達した。さらに、各土壤の $C/P_2O_5\text{-org}$ 比は C/N 比ときわめて高い相関性を示し、有機物の分解過程を示す指標として用い得ることが認められた。

この報告ではこれらの結果について報告する。

2. 分 析 方 法

2-1. 各種抽出液に対する Apatite 型 P_2O_5 の溶解度について

土壤中の P_2O_5 の分別定量は FISHER および THOMAS (1935) に始まり¹⁾³⁰⁾、以後多くの研究者により改良発展が行なわれたが、CHANG および JACKSON 法¹⁾によって無機態 P_2O_5 の分別定量の大綱は、ほぼ完成されたと見て良いであろう。

しかし、Ca 型 P_2O_5 についてはなお次のような問題が残されている。CHANG および JACKSON 法では土壤中の Ca 型 P_2O_5 は主として Apatite として存在し、di-, mono- および octa-Ca-phosphate の存在は少量に過ぎないか、または移行型であるとして、Apatite 型 P_2O_5 を対象とした Ca 型 P_2O_5 の分別定量が行なわれている。

これに対して、土壤中の Ca 型 P_2O_5 として各種の Ca-phosphate の存在を重視し、これを定量するために 2.5% 酢酸抽出を組み入れている分析方法も、GHANI 以後決して少なくない²⁶⁾³⁰⁾。筆者らは土壤中の Ca 型 P_2O_5 の形態に対する各研究者の見解の相違は、それぞれ対象とする土壤の性格、すなわち、自然土壤または施肥の行なわれている農業土壤等の相違によって、自ら生じたものであろうと考えている。

Ca-, Al- および Fe-phosphate の各種抽出液に対する溶解度はすでに詳細に検討されているが¹⁾²⁶⁾³⁰⁾、Apatite 型 P_2O_5 の溶解度—とくに 2.5% 酢酸に対する溶解度—は資料が少ないので、この点について次のような検討を行なった。

実験方法

Fluapatite [Mexico 産, P_2O_5 含有率 39.6% (理論値 42.1%)] を粉砕し、1 mm で篩別後供試した。その一定量 (3, 6, 12, 25 mg) をそれぞれ 250 ml のふた付き遠心分離管に秤取し、各種抽出液 100 ml を加え、N NH_4Cl 溶液、N NH_4F (中性) 溶液および 0.5 N H_2SO_4 は 1 hr、2.5% 酢酸は 2 hrs、0.1 N NaOH 溶液は 17 hrs 振盪後遠心分離 (8000 rpm, 15 min.) し、上澄み液を用いて $SnCl_2$ 還元法による phosphomolybdenblue の比色法で P_2O_5 の定量を行なった。

結果および論議

分析結果は Table 1 に示すとおりであった。

Apatite 型 P_2O_5 の N NH_4Cl 、N NH_4F (中性) および 0.1 N NaOH 溶液に対する溶解度はきわめて小さかったが、0.5 N H_2SO_4 に対する溶液度はきわめて高く、ほぼ完全に溶解ないしこれに近い状態であった。これらの結果は CHANG および JACKSON¹⁾ の結果とよく一致した。

2.5% 酢酸に対する溶解度は Apatite の量が多いほど減少したが、26~45% に達した。このことは 2.5% 酢酸に対する Apatite 型 P_2O_5 の溶解度は、各種 Ca-phosphate がほぼ完全に溶解²⁶⁾³⁰⁾ するのに比べると低いが、決して無視することのできないことを示しているといえよう。

WILLIAMS³⁰⁾ は各種の P_2O_5 化合物の 2.5% 酢酸 (1% 8-hydroxyquinoline 含有) に対する溶解度を検討して、土壤からの抽出液に可溶な P_2O_5 fraction には水溶性 phosphate, Ca-phosphate, Hy-

Table 1. Apatite 型 P_2O_5 の各種抽出液に対する溶解度
Amount of P_2O_5 in apatite extracted with various extractants

抽出液 Extractant	Apatite 秤取量 Amount of apatite (mg)	P_2O_5 含有量 P_2O_5 content (mg)	P_2O_5 抽出量 P_2O_5 extracted (mg)	抽出率 Rate of extraction (%)
2.5% 酢酸 2.5% acetic acid	25	9.90	2.57	26.0
	12	4.75	1.34	28.2
	6	2.38	1.03	43.3
	3	1.19	0.53	44.5
0.5N H_2SO_4	25	9.90	8.59	86.8
	12	4.75	4.60	96.8
	6	2.38	2.37	99.6
	3	1.19	1.18	99.2
N NH_4Cl 溶液 N NH_4Cl solution	25	9.90	0.16	1.6
	12	4.75	0.10	2.1
	6	2.38	0.08	3.4
	3	1.19	0.05	4.2
0.1N NaOH 溶液 0.1N NaOH solution	25	9.90	0.02	0.2
	12	4.75	0.02	0.4
	6	2.38	0.03	1.3
	3	1.19	0.02	1.7
N NH_4F 溶液 N NH_4F (pH 7.0) solution	12	4.75	0.07	1.5
	6	2.38	0.04	1.7
	3	1.19	0.02	1.7

注) Apatite $Ca_5(F(PO_4)_3)$

Remarks) P_2O_5 含有率: P_2O_5 content

理論値 Theor. 42.1%

分析値 Analysed 39.6%

droxy-apatite, Carbonate-apatite, Mg-phosphate, Mn-phosphate およびある程度の Chloro-apatite および Fluor-apatite が含まれるとしている。筆者らの結果からも 2.5% 酢酸可溶 P_2O_5 中には、Apatite の一部が含まれることは明らかであろう。

2-2. 土壌中の P_2O_5 の形態の分析方法

土壌中の P_2O_5 の分析方法は関谷法²⁶⁾を用いて全 P_2O_5 (P_2O_5-t), 2.5% 酢酸可溶型 P_2O_5 (P_2O_5-ac), Al 型 P_2O_5 (P_2O_5-Al), 鉄型 (P_2O_5-Fe), 難溶型 (P_2O_5-ins) および有機態 P_2O_5 (P_2O_5-org) に区分した。

2-1 で述べたように, Apatite 型 P_2O_5 (P_2O_5-ap) の 2.5% 酢酸に対する溶解度が大きいために, この方法では P_2O_5-ac が Ca-phosphate または Apatite のいずれに由来するかを明らかにし得ないので, CHANG および JACKSON 法²⁾にしたがって, N NH_4F (中性) および 0.1 N NaOH 溶液で逐次抽出後の残渣を 0.5 N H_2SO_4 抽出を行なって, Apatite 型 P_2O_5 (P_2O_5-ap) の定量を別個に行なった*。

P_2O_5-ins の計算は次のように行なった。各供試土壌の P_2O_5-ac および P_2O_5-ap の定量値, P_2O_5-ap の 2.5% 酢酸に対する溶解度から, 各土壌の鉱質土層の場合には, P_2O_5-ap に由来する部分が P_2O_5-ac の主

* Ca-phosphate は N NH_4F (中性) 溶液で完全に抽出されるので, C-J. 法の N NH_4Cl 溶液による抽出は省略した。C-J. 法の 0.5 N NH_4F (中性) 溶液の代りに関谷法の N NH_4F (中性) 溶液を用いた。

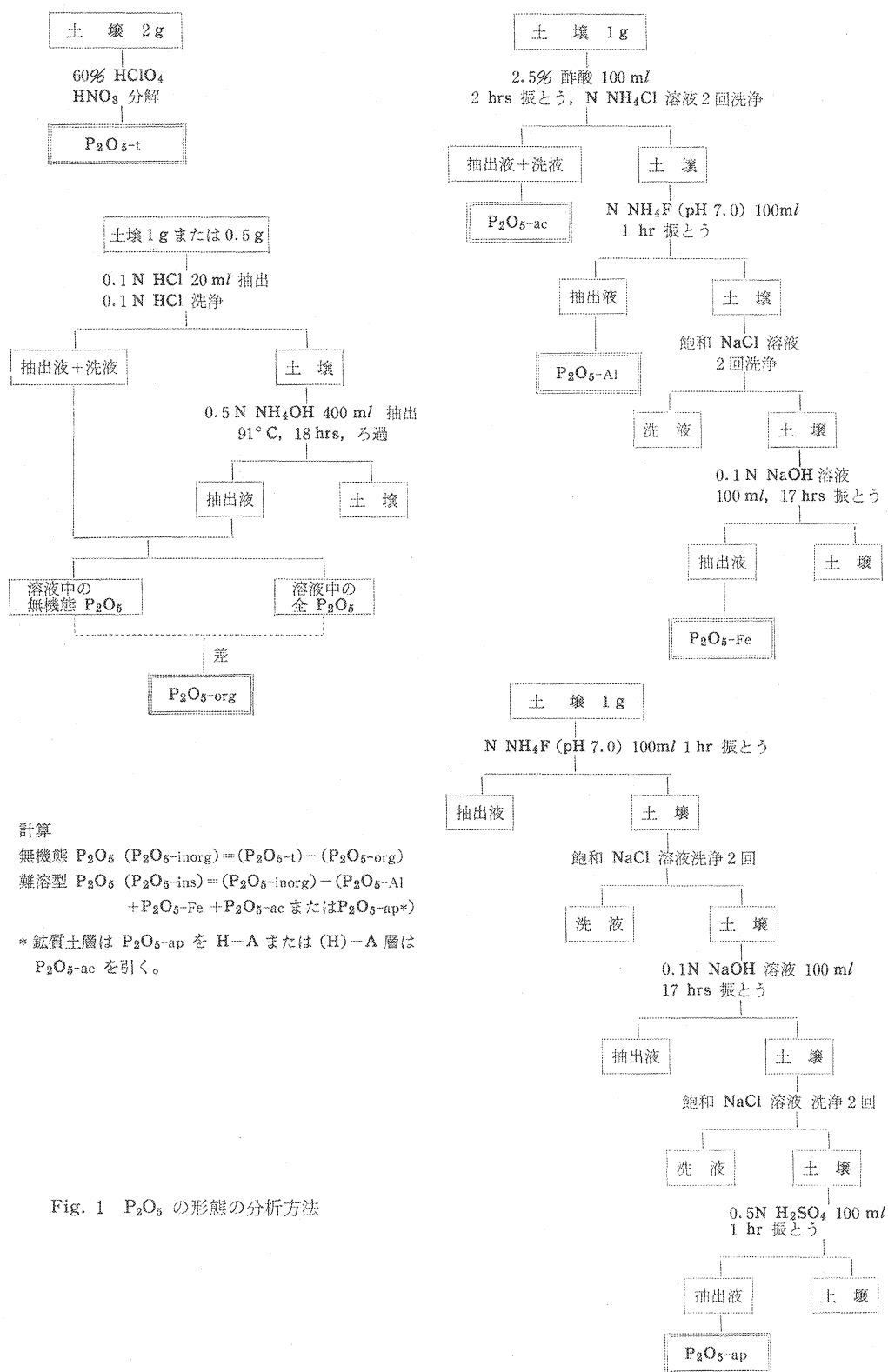


Fig. 1 P_2O_5 の形態の分析方法

体を占める場合がきわめて多かったが、これに対してポドゾルの H-A 層および B_B 型土壌の (H)-A 層では、Ca-phosphate が $P_2O_5\text{-ac}$ の主体を占め、 $P_2O_5\text{-ap}$ に由来する部分は少ないと考えられた。したがって、 $P_2O_5\text{-ins}$ の計算は、前者の場合は無機態 $P_2O_5(P_2O_5\text{-inorg})$ から $P_2O_5\text{-ap} + P_2O_5\text{-Al} + P_2O_5\text{-Fe}$ の含量をさし引いて求め、後者の場合は $P_2O_5\text{-ap}$ の代わりに $P_2O_5\text{-ac}$ をさし引いて求めた。

分析方法の概要は Fig. 1 に示すとおりである。

3. 供 試 土 壌

今回供試した土壌は各種母材料に由来する褐色森林土、乾性および湿性ポドゾル、黒色土壌、退色型黒色土壌、赤色土、暗赤色土^{*1} および Rendzina 様土^{*2} 等 20 断面を供試した。

各試料の採取地は Fig. 2 に、土壌型、母材料および化学的性質等は Table 2 に示すとおりである。



Fig. 2 Sample 採取箇所 (沖縄を除く)
Location of sampling forests (Except Okinawa Islands).

*1 暗赤色土 (関富 P1) は経済企画庁の日本全国土地分類図 (土壌図) 1/500,000¹⁴⁾ および林野土壌層断面図集 (2)²⁴⁾ にしたがって、暗赤色土として仮に区分した。森林土壌の分類体系における暗赤色土の分類上の位置はまだ公式に決定されていない。

*2 Rendzina 様土 (伊吹山 P1 および沖縄 P82) のうち、沖縄 P82 は本場土壌部土壌調査科長黒島 忠博士および土壌第 1 研究室員小島俊郎技官によって採取された試料で、Rendzina 様土として仮に分類¹⁷⁾されている。この土壌の分析値は同氏らのご厚意により、未発表資料を引用させていただいた。伊吹山 P1 は黒褐色の腐植に富む A—C (層) 型の土壌で、石灰岩に由来する中性ないし微塩基性の土壌である。同様に、仮に Rendzina 様土として扱った。これらの Rendzina 様土の分類上の位置は、公式には未決定である。

Table 2. 供 試
Analysed

土 壤 群 Soil group	試 料 名 Name of sample	断面番号 Profile no.	土 壤 型 Type of soil	層 位 Horizon (Layer)	厚 さ Thickness (cm)	C %	N %
褐色森林土 Brown forest soil	川 本 Kawamoto	P 4	B _B	(H)-A B ₁ B ₂	4 26 20+	11.2 3.17 2.27	0.36 0.10 0.09
		P 6	B _D	A ₁ A ₂ A-B B	5~6 12~13 16~24 20+	9.14 6.98 5.02 1.79	0.42 0.34 0.26 0.12
		P 9	B _B	A B ₁ B ₂	10~13 17~20 40+	6.60 3.83 1.94	0.26 0.16 0.08
		P 14	B _D	A ₁ A ₂ A-B B	18 20 22 20+	3.58 1.88 1.49 0.98	0.30 0.18 0.14 0.07
	福 山 Fukuyama	P 11	B _A	Am B ₁ B ₂	3~8 13~15 30+	4.25 1.55 1.22	0.08 0.04 0.04
		P 7	B _D	A B ₁ B ₂	7~9 20 25+	3.50 0.86 0.29	0.17 0.06 0.02
		P 18	B _B	A B ₁ B ₂	12~15 15 20+	2.81 0.97 0.47	0.10 0.50 0.01
		P 22	B _D	A B ₁ B ₂	10~15 15~20 20+	1.44 0.56 0.31	0.09 0.04 0.02
湿性ポドゾル ~褐色森林土 Wet podzol ~Brown forest soil	王 滝 Ôtaki	P 3	Pw(h)-III ~B _E	H-A A ₁ A ₂ B	11 20 8 10+	25.0 13.1 12.5 6.15	1.66 0.87 0.86 0.47
		P 4	Pw(h)-III ~B _D	H-A A ₁ A ₂ B	7 12 20 10+	26.0 16.8 8.64 4.60	1.53 1.20 0.59 0.31
		P 1	Pw(i)-I	H-A A ₂ B ₁ B ₂	10 8 15 20+	34.1 2.93 3.25 2.73	1.67 0.18 0.17 0.07
乾性ポドゾル Dry podzol	面 河 山 Mt. Omogo*		P _{DI}	H-A ₁ A ₂ B ₁ B ₂	10 7~10 5~7 10~15	19.0 4.8 6.8 2.7	0.75 0.15 0.31 0.12
黒色土壌 Black soil	大 門 Daimon	P 14	B _{Lo}	A ₁ A ₂ B	12 16~18 20+	16.2 13.6 7.39	0.98 0.78 0.43
	新 見 Niimi	P 17	B _{Lo}	A ₁ A ₂ A ₃ B	5 27 18 20	28.7 17.2 10.8 1.91	1.35 0.77 0.47 0.13

試 料

materials

(On dry basis)

C/N	CEC	Exch.		飽 和 度		pH (H ₂ O)	母 材・林 況 Parent material, Forest type
		CaO (me/100g)	MgO	Rate of saturation (%) CaO	MgO		
31.1	28.7	0.76	1.01	2.6	3.5	4.20	Granite, <i>Chamaecyparis</i> <i>obtusa</i> forest
31.7	10.3	0.24	0.29	2.3	2.8	4.75	
25.2	5.08	0.13	0.31	2.6	6.1	4.90	
21.8	25.1	2.82	1.08	11.2	4.3	5.00	
20.5	21.9	1.65	0.60	7.5	2.7	5.05	
19.3	17.4	1.76	0.59	10.1	3.4	5.55	
14.9	8.80	0.70	0.46	8.0	5.2	5.70	Quartz porphyry <i>C. obtusa</i> forest
25.4	20.6	1.44	0.58	7.0	2.8	4.35	
23.9	13.8	0.70	0.16	5.1	1.2	4.80	
24.3	8.40	0.65	0.16	7.7	1.9	5.05	
11.9	16.5	5.27	1.53	31.9	9.3	5.30	
10.4	12.1	4.87	1.51	40.2	12.5	5.65	
10.6	10.9	3.15	1.08	28.9	9.9	5.60	Granite <i>Pinus densiflora</i> forest
14.0	9.04	2.22	0.79	24.6	8.7	5.60	
53.1	16.3	1.00	0.04	6.1	0.2	4.40	
38.6	11.3	1.42	0.04	12.2	0.4	4.90	
28.0	9.89	1.61	0.10	16.3	1.0	5.00	
20.5	13.9	4.62	1.12	33.2	8.1	5.40	
14.3	8.32	1.45	0.23	17.4	2.8	5.15	Liparitic tuff <i>P. densiflora</i> forest
14.5	7.12	1.31	0.29	18.4	4.1	5.40	
28.1	11.2	1.16	0.26	10.3	2.3	4.70	
19.4	8.55	0.93	0.29	10.8	3.3	5.10	
47.0	8.14	0.80	0.11	9.8	1.3	5.10	
16.0	6.52	1.26	0.27	19.3	4.1	5.20	
14.0	7.27	0.84	0.11	11.5	1.5	5.20	Pyroxene andesite <i>Chamaecyparis</i> <i>pisifera</i> forest
15.5	5.05	1.04	0.09	20.5	1.7	5.30	
15.1	62.6	8.13	1.75	13.0	2.8	3.80	
18.0	51.8	1.11	0.29	2.1	0.6	4.55	
15.0	51.4	0.37	0.22	0.7	0.4	4.70	
13.1	44.5	0.45	0.19	1.0	0.4	5.20	
17.0	73.6	2.26	0.79	3.1	1.1	4.00	Olivine basalt <i>C. pisifera</i> forest
14.0	73.3	1.12	0.38	1.5	0.5	4.40	
14.6	49.4	0.48	0.08	1.0	0.2	4.80	
14.8	34.9	0.18	0.06	0.5	0.2	4.80	
20.4	66.5	2.12	0.78	3.2	1.2	3.50	Quartz porphyry <i>C. obtusa</i> forest
16.2	15.7	0.26	0.09	1.7	0.6	3.90	
19.1	21.8	0.28	0.07	1.3	0.3	4.10	
24.7	13.9	0.14	0.04	1.0	0.3	4.60	
25.3	46.4	1.13	0.69	2.4	1.5	3.6	Rhyolite and Volcanic ash Natural coniferous forest
32.0	16.2	0.34	0.02	2.1	0.1	3.8	
21.9	31.4	0.20	0.06	0.6	0.2	4.2	
22.5	13.7	0.19	0.02	1.3	0.1	4.7	
16.5	46.9	6.76	1.68	14.4	3.6	5.50	Volcanic ash <i>Larix leptolepis</i> forest
17.4	44.4	3.68	0.75	8.3	1.7	5.45	
17.1	30.6	0.84	0.15	2.7	0.5	5.30	
21.3	78.7	24.1	3.29	30.6	4.2	4.35	Volcanic ash and Quartz-porphry <i>C. obtusa</i> forest
22.3	68.4	0.41	0.14	0.6	0.2	4.00	
23.0	48.7	0.13	0.11	0.3	0.2	4.25	
14.7	20.5	0.14	0.24	0.7	1.2	4.40	

Table 2. (つづき) (Continued)

土 壌 群 Soil group	試 料 名 Name of sample	断面番号 Profile no.	土 壌 型 Type of soil	層 位 Horizon (Layer)	厚 さ Thickness (cm)	C %	N %
黒色土壌 Black soil	新 見 Niimi	P 6	(B/D) _D	A ₁	5	10.1	0.51
				A ₂	20~25	3.62	0.20
				B ₁	16~18	1.78	0.12
				B ₂	25	0.88	0.07
赤 色 土 Red soil	蚊 野 Kano	P 1	R _B	R ₁ (A-B)	18	1.35	0.11
				R ₂ (B ₁)	20	0.53	0.03
				R ₃ (B ₂)	47	0.18	0.02
	潮 岬 Shionomisaki	P 1	R _B	R ₁ (A-B)	20	1.33	0.06
				R ₂ (B ₁)	30	0.51	0.03
				R ₃ (B ₂)	10	0.34	0.02
暗赤色土 Dark red soil	関 宮 Sekimiya	P 1	dR _B (d)	A	12	3.07	0.20
				B ₁	11	1.50	0.10
				B ₂	25+	0.95	0.09
レンジナ様土 Rendzina-like soil	伊 吹 山 Mt. Ibuki	P 1		A ₁	5	18.5	1.85
				A ₂	40+	11.3	1.23
	沖 縄 Okinawa**	P 82		A ₁	12	8.70	0.79
				A ₂	20	3.88	0.43
				B-C	20	3.00	0.33

注) * 面河山の試料は本場土壌部の厚意によって提供された。分析値は林野土壌層断面図集(Ⅱ)²⁴⁾から引用した。

** 沖縄 P 82 の試料および分析値は本場土壌部黒島 忠博士および小島俊郎技官の厚意によって提供された。

Remarks:

* The Mt. Omogo soil is provided by the courtesy of Forest Soil Division of our Station, Tokyo, and

** The Okinawa P 82 soil and its analytical data is provided by the courtesy of Dr. T. KUROTORI and The type of soil is as follows.

BA-soil Dry brown forest soil with surface horizon where loose granular structure or sometimes

BB-soil Dry brown forest soil with surface horizon where granular or nutty structure is well

BD(d)-soil Subtype of BD-soil with A horizon where granular or nutty structure is well developed in

BD-soil Moderately moist brown forest soil.

BE-soil Slightly wetted brown forest soil.

Pw(h)-III-soil Wet slightly podzolized soil (Humus type).

Pw(i)-I-soil Wet podzol (Iron type).

B/D-soil Moderately moist black soil.

(B/D)-soil Ibid. (Degraded type).

RB-soil Dry red soil with similar profile characteristics to BB-soil except color of soil.

dRD(d)-soil Subtype of dDD-soil with similar profile characteristics to BD(d)-soil except color of soil.

dRD-soil Moderately moist dark red soil.

Rendzina-like soil It is a temporary nomenclature. Soil originated from limestone with well deve-

4. わが国の森林土壌の P_2O_5 の形態

—[結果および考察— (1)]—

4-1. 結 果

供試土壌の P_2O_5 の形態は Table 3 および Table 4 に示すとおりである。

4-2. 全般的な傾向

供試土壌における P_2O_5 -t 含有率は、いずれの場合も表層から下層に向かって漸減を示した。しかし、

C/N	CEC	Exch.		飽 和 度		pH (H ₂ O)	母 材・林 況 Parent material, Forest type
		CaO (me./100g)	MgO	Rate of saturation (%) CaO	MgO		
19.6	33.6	15.2	2.28	45.2	6.8	5.40	Granite and Volcanic ash <i>C. obtusa</i> forest
17.2	18.2	4.15	0.77	22.8	4.2	5.30	
14.8	14.3	1.28	0.62	8.0	4.4	5.20	
12.6	12.8	0.52	0.61	4.1	4.8	5.15	
12.3	9.74	0.43	0.26	4.4	2.7	4.65	Dilvium and (Volcanic ash) <i>P. densiflora</i> forest
17.7	7.75	0.18	0.12	2.3	1.5	4.60	
9.0	9.69	0.37	0.14	3.8	3.8	4.95	
22.2	10.1	1.15	0.91	11.4	9.0	4.85	Gabbro <i>P. densiflora</i> forest
17.0	11.6	0.68	0.69	5.9	5.9	4.90	
17.0	9.4	0.56	0.72	6.0	7.7	5.00	
15.4	13.4	2.60	2.88	19.4	21.5	5.50	Serpentine <i>P. densiflora</i> forest
15.0	11.2	1.31	4.02	11.7	35.9	5.65	
10.6	15.2	2.15	9.30	14.1	61.2	5.90	
10.0	85.7	70.0	9.0	81.7	10.5	7.00	Limestone grass land
9.2	62.9	65.7	3.2	105	5.0	7.75	
11.0	51.5	62.0	5.25	120	10.2	7.40	Limestone Evergreen deciduous forest
9.0	43.3	53.4	2.58	123	6.0	7.48	
9.1	35.9	66.0	1.40	184	3.9	7.70	

なお Ex. Ca および飽和度は常法 (PERCH 法) による。

its analytical data are cited from "Forest Soil Profiles(2)" ²⁴⁾.

Mr. T. KOJIMA, Forest Soil Division of our Station, Tokyo.

mycellial layer is well developed.

developed.

place of crumb structure.

loped and dark colored A horizon. Its reaction is neutral or slightly basic.

$P_2O_5\text{-inorg}$ 含有率は表層土と下層土では大きな相違が見られず、下層土の方が大きい場合も少なくなかった。したがって、 $P_2O_5\text{-inorg}$ の $P_2O_5\text{-t}$ に対する割合はいずれも表層から下層にかけて増加を示した。この点は $P_2O_5\text{-org}$ の含有率および $P_2O_5\text{-t}$ に対する割合が、表層から下層に向かって減少したことによるものである。

$P_2O_5\text{-org}$ の含有率および $P_2O_5\text{-t}$ に対する割合は、表層から下層に向かって湿性型の土壌*では漸減し、乾性型の土壌では急激な減少を示した。このような $P_2O_5\text{-org}$ の層位間の変化は、各土壌の水分環境

Table 3. 供試土壌の P_2O_5 各フラクションの含有率
Phosphorus fractions in analysed soils (mg of P_2O_5 per 100 g dry soil)

試料名 Sample name	土壌型 Type of soil	層位 Horizon	無機態 P_2O_5 : Inorganic P_2O_5						有機態 P_2O_5	全 P_2O_5
			P_2O_5 -ac	P_2O_5 -Al	P_2O_5 -Fe	P_2O_5 -ap	P_2O_5 -ins	P_2O_5 -inorg	P_2O_5 -org	P_2O_5 -t
川本 Kawamoto P4	B _B	(H)-A	0.7	7.4	3.4	tr.	11.2	22.7	27.7	50.4
		B ₁	tr.	3.1	2.3	tr.	21.6	27.0	5.0	32.0
		B ₂	tr.	2.7	1.6	tr.	20.5	24.8	4.5	29.3
同上 Ibid. P6	B _D	A ₁	1.0	5.1	4.3	0.4	11.4	21.2	40.9	62.1
		A ₂	0.5	3.9	4.1	0.5	12.0	20.5	32.8	53.3
		A-B	0.5	3.7	3.8	0.4	15.6	23.5	27.0	50.5
		B	tr.	3.4	2.7	0.2	19.2	25.5	9.4	34.9
同上 Ibid. P9	B _B	A	0.9	3.3	4.3	0.5	11.9	20.0	16.2	36.3
		B ₁	0.5	2.6	3.6	0.4	11.5	18.1	8.8	26.9
		B ₂	tr.	tr.	2.6	0.2	12.7	15.5	1.3	16.8
同上 Ibid. P14	B _D	A ₁	0.7	8.5	4.9	0.8	12.8	27.0	38.6	65.6
		A ₂	tr.	2.6	3.7	0.4	17.1	23.8	37.7	61.5
		A-B	tr.	1.3	3.3	0.3	24.7	29.6	23.1	52.7
		B	tr.	1.4	2.2	0.5	24.1	28.2	12.9	41.1
福山 Fukuyama P11	B _A	Am	tr.	1.8	2.4	0.4	9.2	13.8	4.8	18.6
		B ₁	tr.	1.6	2.0	0.4	11.4	15.4	2.7	18.1
		B ₂	tr.	1.3	1.9	0.2	12.1	15.5	2.3	17.8
同上 Ibid. P7	B _D	A	0.9	4.1	3.1	0.8	7.4	15.4	16.5	31.9
		B ₁	tr.	1.9	2.3	0.2	5.5	9.9	6.2	16.1
		B ₂	tr.	1.2	1.0	0.4	9.7	12.3	0.7	13.0
同上 Ibid. P18	B _B	A	0.8	3.4	2.7	0.3	6.8	13.2	7.9	21.1
		B ₁	0.2	0.7	1.6	tr.	12.6	14.9	2.3	17.2
		B ₂	tr.	tr.	1.4	tr.	15.2	16.6	2.0	18.6
同上 Ibid. P22	B _D	A	0.5	4.0	3.2	0.6	5.0	12.8	6.8	19.6
		B ₁	tr.	0.6	2.2	0.5	5.7	9.0	5.0	14.0
		B ₂ -C	tr.	tr.	1.9	0.5	7.1	9.5	1.7	11.2
王滝 Ôtaki P3	Pw(d)-III ~B _E	H-A	20.7	57.8	23.5	1.5	9.0	111	251	362
		A ₁	0.8	33.8	15.9	1.2	13.1	64	269	333
		A ₂	0.5	12.4	17.7	0.9	89.0	120	232	352
		B	tr.	11.4	22.9	2.9	138	175	127	302
同上 Ibid. P4	Pw(d)-III ~B _D	H-A	7.6	58.4	84.6	5.1	106	257	304	561
		A ₁	5.0	47.4	121	4.5	112	285	311	596
		A ₂	0.7	17.2	61.6	4.0	183	266	222	488
		B	tr.	19.3	87.1	3.2	247	356	117	473
同上 Ibid. P1	Pw(h)-I	H-A	6.4	32.7	6.1	0.9	22.2	67.6	85.4	153
		A ₂	0.7	4.0	4.5	0.6	23.3	32.4	10.4	42.8
		B ₁	0.2	2.1	5.6	0.2	28.7	36.6	1.4	38.0
		B ₂	0.2	tr.	3.4	0.4	26.8	30.6	0.8	31.4
面河山 Mt. Omogo	P _{D1}	H-A ₁	2.9	19.0	4.6	tr.	9.2	35.7	30.7	66.4
		A ₂	tr.	9.1	2.6	tr.	8.7	20.4	9.9	30.3
		B ₁	tr.	9.7	6.3	tr.	19.1	35.1	9.6	44.7
		B ₂	tr.	8.5	5.3	tr.	8.4	22.2	5.6	27.8
大門 Daimon P14	B _D	A ₁	0.8	34.6	29.3	11.2	19.9	95.0	237	332
		A ₂	0.5	26.3	19.9	4.8	62.0	113	205	318
		B	tr.	18.8	19.0	4.0	78.2	120	110	230
新見 Niimi P17	B _D	A ₁	2.9	25.0	8.7	1.5	52.4	89.0	151	240
		A ₂	0.5	11.2	5.5	0.8	27.5	45.0	143	188
		A ₃	tr.	10.8	5.8	1.3	60.9	78.8	63.2	142
		B	tr.	4.2	5.8	1.1	40.7	51.8	10.4	62.2

Table 3. (つづき) (Continued)

試料名 Sample name	土壌型 Type of soil	層位 Horizon	無機態 P_2O_5 : Inorganic P_2O_5						有機態 P_2O_5 P_2O_5 -org	全 P_2O_5 P_2O_5 -t
			P_2O_5 -ac	P_2O_5 -Al	P_2O_5 -Fe	P_2O_5 -ap	P_2O_5 -ins	P_2O_5 -inorg		
同上 Ibid. P6	(Bl) _D	A ₁	2.6	6.7	8.2	1.2	21.3	38.8	54.9	98.2
		A ₂	0.2	5.2	4.6	0.8	26.5	37.1	26.3	63.4
		B ₁	tr.	2.4	3.5	0.9	28.3	35.1	12.4	47.5
		B ₂	tr.	tr.	3.5	0.3	26.1	29.9	8.4	37.9
蚊野 Kano P1	R _B	R ₁ (A-B)	tr.	1.8	4.2	0.2	54.0	60.2	6.3	66.5
		R ₂ (B ₁)	tr.	0.7	3.2	0.4	58.8	63.1	2.2	65.3
		R ₃ (B ₂)	tr.	0.7	3.2	0.4	67.0	71.3	2.2	73.5
潮岬 Shiono- misaki	R _B	R ₁ (A-B)	0.3	tr.	2.9	0.7	44.4	48.2	6.5	54.5
		R ₂ (B ₁)	tr.	tr.	2.7	0.7	56.1	59.5	tr.	59.5
		R ₃ (B ₂)	tr.	tr.	2.0	0.6	87.2	89.8	tr.	89.8
関宮 Sekimiya P1	dR _D (d)	A	0.2	1.8	3.7	0.7	38.5	44.7	18.7	63.4
		B ₁	tr.	0.7	4.7	0.7	39.3	45.4	9.7	55.1
		B ₂	tr.	tr.	4.0	0.6	50.7	55.3	1.9	57.2
伊吹山 Mt. Ibuki	Rendzi- na-like soil	A ₁	373	259	113	874	484	1730	788	2520
		A ₂	197	244	172	1300	560	2280	579	2860
沖縄 Okinawa P82	Ibid.	A ₁	290	78.1	120	250	492	940	215	1150
		A ₂	447	127	190	360	543	1220	252	1470
		B-C	105	109	203	173	565	1050	187	1240

注) Remarks :

 P_2O_5 -ac : 2.5 % acetic acid soluble P_2O_5 (2.5 % 酢酸可溶 P_2O_5) P_2O_5 -Al : Al-phosphate (アルミニウム型 P_2O_5) P_2O_5 -Fe : Fe-phosphate (鉄型 P_2O_5) P_2O_5 -ap : P_2O_5 in apatite (アパタイト型 P_2O_5) P_2O_5 -ins : Insoluble P_2O_5 (難溶型 P_2O_5) P_2O_5 -inorg : Inorganic P_2O_5 (無機態 P_2O_5) P_2O_5 -org : Organic P_2O_5 (有機態 P_2O_5) P_2O_5 -t : Total P_2O_5 (全 P_2O_5)

の相違にともなう腐植の下層への浸透の相違と関連性を示すものといえよう。

P_2O_5 -inorg の各 fraction の状態は母材料および土壌型によって相違が見られたが、全般的に次のような傾向を示していた。

P_2O_5 -ac および P_2O_5 -ap 含有率は、石灰岩に由来する Rendzina 様土以外ではきわめて少なかった。前述 (2-2) のように、各土壌の鉱質土層では P_2O_5 -ac の大部分が P_2O_5 -ap に由来するものと思われたが、ポドゾルの H-A 層および B_B 型土壌の (H)-A 層では、 P_2O_5 -ac の大部分は Ca-phosphate に由来するものと思われた。

P_2O_5 -Al および P_2O_5 -Fe 含有率はいずれの場合も P_2O_5 -ac よりかなり増加していたが、 P_2O_5 -inorg 中とくに大きな割合を占めるに至らなかった。これらの各 fraction の含有率は、ポドゾルの B₁ または B_B 層において P_2O_5 -Fe が増加した以外は、いずれも表層から下層に向かって減少を示した。

P_2O_5 -ins 含有率は以下に述べるように、母材料および土壌の化学的風化過程等の影響によって相違がみられたが、一般に P_2O_5 -inorg のきわめて主要な部分を占め、その含有率は多少の例外を除くと、一般

* この場合の湿性および乾性の区分は相対的な比較として用いている。前者には B_D, P_w 型土壌および Rendzina 様土 (供試土壌の場合は B_D 型土壌と類似した形態的特徴を示している) が、後者には B_A, B_B, P_D, dR_D(d) および R_B 型土壌が含まれる。

Table 4. 供試土壌の P_2O_5 各 fraction の比率
Rates of phosphorus fractions in analysed soils

試料名 Sample name	土壌型 Type of soil	層位 Horizon	P_2O_5 -t に対する % : % of P_2O_5 -t						
			P_2O_5 -ac	P_2O_5 -Al	P_2O_5 -Fe	P_2O_5 -ap	P_2O_5 -ins	P_2O_5 -inorg	P_2O_5 -org
川 本 Kawamoto P4	B _B	(H)-A B ₁ B ₂	1.4 (3.1) tr. (tr.) tr. (tr.)	14.7(32.6) 9.7(11.5) 9.2(10.9)	6.7(15.0) 7.2 (8.5) 5.5 (6.5)	tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.)	22.2(49.3) 67.5(80.0) 70.0(82.6)	45.0 (100) 84.4 (100) 84.6 (100)	55.0 15.6 15.4
同 上 Ibid. P6	B _D	A ₁ A ₂ A-B B	1.6 (4.7) 0.9 (2.4) 1.0 (2.1) tr. (tr.)	8.2(24.1) 7.3(19.0) 7.5(16.2) 9.7(13.3)	6.9(20.3) 7.7(20.0) 7.5(16.2) 7.7(10.6)	0.6 (1.9) 0.9 (2.4) 0.8 (1.7) 0.6 (0.9)	18.4(53.8) 22.5(58.5) 30.9(66.4) 55.0(75.3)	34.1 (100) 38.5 (100) 46.5 (100) 73.1 (100)	65.9 61.5 53.5 26.9
同 上 Ibid. P9	B _B	A B ₁ B ₂	2.5 (4.5) 1.9 (2.8) tr. (tr.)	9.1(16.5) 9.7(14.4) tr. (tr.)	11.8(21.5) 13.4(19.9) 15.5(16.8)	1.4 (2.5) 1.5 (2.2) 1.2 (1.3)	32.8(59.5) 42.8(63.5) 75.6(81.9)	55.2 (100) 67.3 (100) 92.3 (100)	44.8 32.7 7.7
同 上 Ibid. P14	B _D	A ₁ A ₂ A-B B	1.1 (2.6) tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.)	13.0(31.5) 4.2(10.9) 2.5 (4.4) 3.4 (5.0)	7.5(18.1) 6.0(15.5) 6.3(11.1) 5.4 (7.8)	1.2 (3.0) 0.7 (1.7) 0.6 (1.0) 1.2 (1.8)	19.5(47.4) 27.8(71.8) 46.9(83.5) 58.6(85.4)	41.2 (100) 38.7 (100) 56.2 (100) 68.6 (100)	58.8 61.3 43.8 31.4
福 山 Fukuyama P11	B _A	Am B ₁ B ₂	tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.)	9.7(13.0) 8.8(10.4) 7.3 (8.4)	12.9(17.4) 11.0(13.0) 10.7(12.3)	2.2 (2.9) 2.2 (2.6) 1.1 (1.3)	49.5(66.7) 63.0(75.0) 68.0(78.1)	74.2 (100) 85.1 (100) 87.1 (100)	25.8 14.9 12.9
同 上 Ibid. P7	B _D	A B ₁ B ₂	2.8 (5.8) tr. (tr.) tr. (tr.)	12.9(26.6) 11.8(19.2) 9.2 (9.8)	9.7(20.1) 14.3(23.2) 7.7 (8.1)	2.5 (5.2) 1.2 (2.0) 3.1 (3.3)	23.2(48.1) 34.2(55.6) 74.6(78.8)	48.3 (100) 61.5 (100) 94.6 (100)	51.7 38.5 5.4
同 上 Ibid. P18	B _B	A B ₁ B ₂	3.8 (6.1) 1.2 (1.3) tr. (tr.)	16.1(25.8) 4.1 (4.7) tr. (tr.)	12.8(20.5) 9.3(10.7) 7.5 (8.4)	1.4 (2.3) tr. (tr.) tr. (tr.)	32.2(51.5) 73.3(84.5) 81.7(91.6)	62.6 (100) 86.6 (100) 89.2 (100)	37.4 13.4 10.8
同 上 Ibid. P22	B _D	A B ₁ B ₂ -C	2.6 (3.9) tr. (tr.) tr. (tr.)	20.4(31.3) 4.3 (6.7) tr. (tr.)	16.3(25.0) 15.7(24.4) 17.0(20.0)	3.1 (4.7) 3.6 (5.6) 4.5 (5.3)	25.5(39.1) 40.7(63.3) 63.4(74.7)	65.3 (100) 64.3 (100) 84.8 (100)	34.7 35.7 15.2
王 滝 Ôtaki P3	Pw(h)-III~BE	H-A A ₁ A ₂ B	5.7(18.6) 0.2 (1.3) 0.1 (0.4) tr. (tr.)	16.0(52.1) 10.2(52.8) 3.5(10.4) 3.8 (6.5)	6.5(21.2) 4.8(24.8) 5.0(14.8) 7.6(13.1)	0.4 (1.4) 0.4 (1.9) 0.3 (0.8) 1.0 (1.7)	2.5 (8.1) 3.9(20.5) 25.3(74.2) 45.7(78.9)	30.7 (100) 19.2 (100) 34.1 (100) 57.9 (100)	69.3 80.8 65.9 42.1

同 上 Ibid. P ₄	Pw(h)-III~B ₀	H-A A ₁ A ₂ B	1.4 (3.0) 0.8 (1.8) 0.1 (0.3) tr. (tr.)	10.4 (22.7) 8.0 (16.6) 3.5 (6.5) 4.1 (7.5)	15.1 (32.9) 20.3 (42.5) 12.6 (23.2) 18.4 (24.5)	0.9 (2.0) 0.8 (1.6) 0.8 (1.5) 0.7 (0.9)	18.9 (41.2) 18.8 (39.3) 37.5 (68.8) 52.2 (69.3)	45.8 (100) 47.8 (100) 54.5 (100) 75.3 (100)	54.2 52.2 45.5 24.7
同 上 Ibid. P ₁	Pw(i)-I	H-A A ₂ B ₁ B ₂	4.2 (9.5) 1.6 (2.2) 0.5 (0.5) 0.6 (0.7)	21.5 (48.7) 9.3 (12.3) 5.5 (5.7) tr. (tr.)	4.0 (9.0) 10.5 (13.9) 14.7 (15.3) 10.8 (11.1)	0.6 (1.3) 1.4 (1.9) 0.5 (0.5) 1.3 (1.3)	14.8 (32.8) 54.4 (71.9) 75.5 (78.4) 85.4 (87.5)	44.2 (100) 47.8 (100) 96.3 (100) 97.5 (100)	55.8 24.3 3.7 2.5
面 河 山 Mt. Omogo	P ₀ -I	H-A ₁ A ₂ B ₁ B ₂	4.4 (8.1) tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.)	28.6 (53.2) 30.0 (44.6) 21.7 (27.6) 30.6 (38.5)	6.9 (12.9) 8.6 (12.7) 14.1 (17.9) 19.1 (23.9)	tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.)	13.9 (25.8) 28.7 (42.6) 42.7 (54.4) 30.2 (37.8)	53.8 (100) 67.3 (100) 78.5 (100) 79.9 (100)	46.2 32.7 21.5 20.1
大 門 Daimon P ₁₄	B ₀	A ₁ A ₂ B	0.2 (0.8) 0.2 (0.4) tr. (tr.)	10.4 (36.4) 8.3 (23.3) 8.2 (15.7)	8.8 (30.8) 6.3 (17.6) 8.3 (15.8)	3.4 (11.8) 1.5 (4.3) 1.7 (3.3)	6.0 (20.9) 19.5 (34.9) 34.0 (65.2)	28.6 (100) 35.5 (100) 52.2 (100)	71.4 64.5 47.8
新 見 Niimi P ₁₇	B ₀	A ₁ A ₂ A ₃ B	1.2 (3.3) 0.3 (1.1) tr. (tr.) tr. (tr.)	10.4 (28.1) 6.0 (24.9) 7.6 (13.7) 6.8 (8.1)	3.6 (9.8) 2.9 (12.2) 4.1 (7.4) 9.3 (11.2)	0.6 (1.7) 0.4 (1.8) 0.9 (1.6) 1.8 (2.1)	22.4 (60.4) 14.6 (61.1) 42.9 (76.3) 65.4 (78.6)	37.1 (100) 23.9 (100) 55.5 (100) 83.3 (100)	62.9 76.1 44.5 16.7
同 上 Ibid. P ₆	B ₀	A ₁ A ₂ B ₁ B ₂	2.6 (6.7) 0.3 (0.5) tr. (tr.) tr. (tr.)	6.8 (17.3) 8.2 (14.0) 5.1 (6.8) tr. (tr.)	8.4 (21.1) 7.3 (12.4) 7.4 (10.0) 9.2 (11.7)	1.2 (3.1) 1.3 (2.2) 1.9 (2.6) 0.8 (1.0)	21.7 (54.9) 41.8 (71.4) 59.6 (80.6) 68.9 (87.3)	39.5 (100) 58.5 (100) 73.9 (100) 78.9 (100)	60.5 41.5 26.1 21.1
蚊 野 Kano P ₁	R _B	R ₁ (A-B) R ₂ (B ₁) R ₃ (B ₂)	tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.)	2.7 (3.0) 1.1 (1.1) 1.0 (1.0)	6.3 (7.0) 4.9 (5.1) 4.4 (4.5)	0.3 (0.3) 0.6 (0.6) 0.5 (0.6)	81.2 (99.7) 90.0 (93.2) 91.2 (94.0)	90.5 (100) 96.6 (100) 97.0 (100)	9.5 3.4 3.0
潮 岬 Shionomisaki P ₁	R _B	R ₁ (A-B) R ₂ (B ₁) R ₃ (B ₂)	0.6 (0.6) tr. (tr.) tr. (tr.)	tr. (tr.) tr. (tr.) tr. (tr.)	5.3 (6.0) 4.5 (4.5) 2.2 (2.2)	1.3 (1.5) 1.2 (1.2) 0.7 (0.7)	81.5 (92.5) 94.3 (94.3) 97.1 (97.1)	88.1 (100) 100 (100) 100 (100)	11.9 100 100
関 宮 Sekimiya P ₁	dR ₀ (d)	A B ₁ B ₂	0.3 (0.4) tr. (tr.) tr. (tr.)	2.8 (4.0) 1.3 (1.5) tr. (tr.)	5.8 (8.3) 8.5 (10.4) 7.0 (7.2)	1.1 (1.6) 1.3 (1.5) 1.0 (1.1)	60.7 (86.1) 71.3 (86.6) 88.6 (91.7)	70.5 (100) 82.4 (100) 96.7 (100)	29.5 17.6 3.3
伊 吹 山 Mt. Ibuki P ₁	Rendzina-like soil	A ₁ A ₂	14.8 (21.2) 6.9 (8.6)	10.3 (15.0) 8.5 (10.7)	4.5 (6.5) 6.0 (7.5)	34.7 (50.5) 45.5 (57.0)	19.2 (28.0) 19.6 (24.6)	68.7 (100) 79.7 (100)	31.3 20.2
沖 繩 Okinawa P ₈₂	Rendzina-like soil	A ₁ A ₂ B-C	25.2 (30.9) 30.4 (36.6) 8.5 (10.0)	6.8 (8.3) 8.6 (10.4) 8.8 (10.4)	10.4 (12.8) 12.9 (15.6) 16.4 (19.3)	21.7 (26.6) 24.5 (29.5) 14.0 (16.5)	42.8 (52.3) 36.9 (44.5) 45.6 (53.8)	81.7 (100) 83.0 (100) 84.9 (100)	18.7 17.1 15.1

(注) カッコ内の数字は P₂O₅-inorg に対する%. Remark: Figures in parentheses are % of P₂O₅-inorg.

に表層から下層に向かって増大を示した。また、 $P_2O_5\text{-inorg}$ に対する割合も赤色土、暗赤色土、Rendzina 様土等がとくに明りょうな相違を示さなかった以外は、いずれも下層ほど明りょうに増大を示した。

4-3. 母材料の影響

各供試土壌の P_2O_5 の形態—とくに $P_2O_5\text{-t}$ 含有率—は母材料の影響を反映して、次のようなけんちよな相違が見られた。

石灰岩に由来する Rendzina 様土は、いずれも他の母材料に由来する土壌に比べると、 $P_2O_5\text{-t}$ 含有率がきわめて高いことが注目された。岩石の平均化学的組成では石灰岩の P_2O_5 含有率は低い⁴⁾、変性石灰岩はとくにリン灰石の含有率が高いといわれている²⁵⁾。伊吹山の場合は、母材料の石灰岩は強い変成作用を受けているものと推定された。沖縄 P82 の母材料は珊瑚礁に由来する石灰岩である。この両者に由来する土壌がきわめて高い $P_2O_5\text{-t}$ 含有率を示したことは、このような母材料の影響によるものであろう。

かんらん石玄武岩、複輝石安山岩および塩基性（安山岩質）火山灰に由来する王滝 P4、同 P3 および大門土壌が、これについて $P_2O_5\text{-t}$ 含有率の高いグループに属していた。一般に火成岩の場合には、 SiO_2 含有率が増大するにともなって、 P_2O_5 含有率は減少するといわれている⁴⁾¹⁹⁾。また、火成岩中のリン灰石の含有率は塩基性の火成岩にとくに多いといわれている²⁵⁾。各種火成岩の元素組成（平均値）では、玄武岩は他の岩石より P_2O_5 含有率はとくに高いように思われる⁴⁾²⁸⁾。玄武岩ないし塩基性岩に由来する土壌が、酸性岩に属する石英質の岩石に由来する土壌より、 P_2O_5 含有率の高い例も報告されている⁵⁾²¹⁾。今回の試料の場合も、このような母材料の影響を反映しているように思われる。

その他の花こう岩、石英斑岩、流紋岩、流紋岩質凝灰岩、洪積層等の酸性の火成岩ないし堆積岩に由来する土壌の $P_2O_5\text{-t}$ 含有率は、低いレベルに属するといえよう。この点は上述のように、母材料の影響によるものであろう。しかし、斑れい岩および蛇紋岩等のように、塩基性岩および超塩基性岩に由来する関宮および潮岬土壌も、 $P_2O_5\text{-t}$ 含有率は同様に低いレベルに属していた。この点は上述の岩石中の P_2O_5 含有率についての一般的な傾向を反映しているとはいえないが、同じ岩石でもその性状や産地によって、元素組成はかなりの相違が見られる⁴⁾といわれているが、このような影響によるものかもしれない。また、次に (4-4) に述べるように、これらの $P_2O_5\text{-t}$ の少ない土壌は、化学的風化がいちじるしく進んでいる暗赤色土および赤色土に属している。これに対して、上述の塩基性の火成岩に由来する $P_2O_5\text{-t}$ に富む土壌は、化学的風化の過程が未熟な段階にある土壌である。このような土壌の化学的風化の進行程度も、土壌の $P_2O_5\text{-t}$ 含有率に影響をおよぼすことも予想されるが、これらの諸点の解明は今後の研究にゆずりたい。

4-4. 土壌の化学的風化過程および生成年代の影響

土壌中の P_2O_5 の形態については $P_2O_5\text{-inorg}$ の組成、および $P_2O_5\text{-org}$ と各 $P_2O_5\text{-inorg}$ fraction の割合等は、土壌の化学的風化の進行程度、および土壌の生成作用が始まってからの時間（年代）の経過等の影響によって、それぞれ特徴のある相違が認められるといわれている。

CHANG および JACKSON²⁾ は土壌中の $P_2O_5\text{-inorg}$ 各 fraction の組成は、pH、各種 cation、各 P_2O_5 fraction の solubility product、土壌の化学的風化過程の進行状況等によって影響されるという。すなわち、土壌の化学的風化の初期には、おそらく $P_2O_5\text{-ca}$ *1 および $P_2O_5\text{-Al}$ は $P_2O_5\text{-Fe}$ より多いと考えられるが、時間の経過とともに $P_2O_5\text{-Fe}$ 、 $P_2O_5\text{-occl}$ *1 の順に順次安定した形に変化し、したがって、土壌

*1 CHANG および JACKSON の $P_2O_5\text{-ca}$ は筆者らの $P_2O_5\text{-ap}$ と、 $P_2O_5\text{-occl}$ は $P_2O_5\text{-ins}$ と同じ。

の化学的風化の進行にともなう P_2O_5 -ca, P_2O_5 -Al, P_2O_5 -Fe, P_2O_5 -occl の順に P_2O_5 -t に対する割合が増大するという。

WALKER²⁹⁾ は土壌生成が始まった後時間 (年代) の経過にともなう P_2O_5 各 fraction の形態および P_2O_5 -t に対する割合は Fig. 3 に示すような変化を生ずるという。すなわち、土壌の生成作用が始まった直後は、 P_o *²⁾ および P_f *²⁾ はきわめてとばしく、土壌中の P は P_a *²⁾ によって占められているが、時間の経過とともに P_a は減少をつづけ、 P_f および P_o は増加をつづける。ある時期 (stage A, Fig. 3) を過ぎると、max. に達した P_o は減少し始め、 P_f は引きつづき増大をつづけ、 P_a はゆるやかな減少をたどる。したがって、最終段階では土壌中の P の大部分は P_f によって占められるという。

これらの変化は次のように考えられる。土壌中の P_2O_5 は、土壌生成の最初の段階には P_2O_5 -ap であろう。これが風化するにつれて、Ca-phosphate から、 P_2O_5 -Al, P_2O_5 -Fe, 最終的には P_2O_5 -ins に、CHANG および JACKSON が指摘するように順次化学的に安定した形態に変化するであろう。主として Ca-phosphate, おそらく P_2O_5 -Al および P_2O_5 -Fe の一部はその間に植生によって吸収され、植物遺体中の P_2O_5 -org として土壌に還元され、土壌中に P_2O_5 -org が集積するであろう。土壌中の P_2O_5 -org は分解し、Ca-phosphate から P_2O_5 -ins に至る変化の過程をたどり、一部はふたたび植生により吸収されるであろう。このようにして、土壌と植生の間に P_2O_5 の循環が行なわれるが、その循環系には土壌中の P_2O_5 -ap の風化による P_2O_5 の付加と、 P_2O_5 -ins への変化による P_2O_5 の一部の離脱が行なわれるであろう。このように考えれば、WALKER の示した土壌中の P_2O_5 の土壌生成の時間の経過にともなう変化は、容易に理解されよう。

このような見地に立って供試土壌を見ると、次のような諸点が認められた。

赤色土 (蚊野および潮岬土壌) はいずれも、表層土の P_2O_5 -org は P_2O_5 -t の 10% 前後に過ぎず、下層ではさらに急激な減少を示した。各層位いずれも P_2O_5 -ac および P_2O_5 -ap はきわめて少なく、 P_2O_5 -Al, P_2O_5 -Fe の順に多少の増大を示したが、 P_2O_5 -ins は表層では 80% 前後に達し、下層では 90% ないしそれ以上に達していた。各層位の一定体積中の細土重量を求めているので、断面全体の P_2O_5 各 fraction の含有率は計算し得なかったが、 P_2O_5 -org は P_2O_5 -t の数% に過ぎず、 P_2O_5 -ac, P_2O_5 -ap, P_2O_5 -Al および P_2O_5 -Fe はきわめて少なく、 P_2O_5 -ins が P_2O_5 -t の約 90% 前後に達することは容易に推定されよう。この

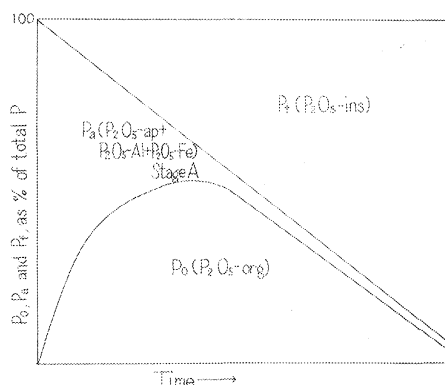


Fig. 3 湿潤な気候下における土壌生成の時間の経過にともなう土壌 P_2O_5 fraction の形態と割合の変化 (模式図) (WALKER²⁹⁾ より引用)

Idealized changes in forms and proportions of soil phosphorus fractions in a chronosequence of soils in a humid climate (cited from WALKER'S "The significance of phosphorus in pedogenesis")²⁹⁾.

P_o : Organic P

P_a : N H_2SO_4 soluble inorganic P

P_f : N H_2SO_4 insoluble inorganic P

The authors' corresponding phosphorus forms are expressed in parentheses.

*2 WALKER²⁹⁾ は土壌断面の一定の深さまでの全土層中に含まれる P_2O_5 fraction の含有量 (lbs/acre) を用いている。 P_2O_5 の区分は 1) P_o (有機態 P_2O_5), 2) P_a (無機態の N H_2SO_4 可溶 P_2O_5), 3) P_f (無機態の N H_2SO_4 不溶 P_2O_5) に区分している。筆者らと分析方法は異なるが、1) は筆者らの P_2O_5 -org, 2) は P_2O_5 -Al + P_2O_5 -Fe + P_2O_5 -ap (または P_2O_5 -ac) の含量, 3) は P_2O_5 -ins にそれぞれ近いものであると考えられる。

ような P_2O_5 の形態は、わが国の赤色土の特徴をなすものと考えられる。

大政、黒鳥、木立⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽²²⁾によれば、わが国の赤色土は現気候下に生成されたものではなくて、更新世ギョーツーミンデル間氷期に、lateritic な土壤生成作用が行なわれた古土壤 (fossil soil) と推定されている。この土壤の P_2O_5 の形態的な特徴は、CHANG および JACKSON²⁾ の示した、高温多雨な気候下に化学的風化がいちじるしく進んだ Latosol の P_2O_5 -inorg の形態的な特徴とよく一致する。同時に WALKER²⁹⁾ の考え方を適用すると、他の土壤より生成年代がいちじるしく古いことが推定される。この土壤の以上のような P_2O_5 の形態的な特徴から推定される生成過程は、上述の大政、黒鳥、木立⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽²²⁾ の理論ともよく一致する。

暗赤色土の P_2O_5 -inorg の形態は、各層位いずれも P_2O_5 -ins の割合が赤色土よりわずかに低かったが、全般的にきわめて類似していた。しかし、表層土の P_2O_5 -org は P_2O_5 -t の約30%に達し、下層では低下を示したが、いずれも赤色土の場合より高かった。したがって、 P_2O_5 -ins の P_2O_5 -t に対する割合は赤色土より低かったが、しかしその他の土壤に比べればいちじるしく高い値を示していた。これらの諸点は、この土壤の P_2O_5 の形態的な特徴を示すものといえよう。この土壤の生成過程はまだ明らかにされていないが、 P_2O_5 の形態から赤色土と同様に、土壤の化学的風化過程がいちじるしく進行していることが容易に推定されよう。同時に、断面全体の P_2O_5 各 fraction の含有量は計算し得なかったが、この土壤の生成年代は赤色土ほど古くはないが、他の土壤に比べるとかなり古いことは、 P_2O_5 -t 中 P_2O_5 -org の割合が小さく、 P_2O_5 -ins の割合がきわめて高いことから容易に推定されよう。

さらに、王滝地区の母材料の異なる P1, P3 および P4 を比較すると次のような事実が認められた。この場合も各断面全体の P_2O_5 各 fraction 含有量は計算し得なかったので、厳密には比較し難いが、それぞれ対応する各層位の P_2O_5 の組成の比較から、P3, P4, P1 の順に P_2O_5 -t に対する P_2O_5 -org および P_2O_5 -Al + P_2O_5 -Fe + P_2O_5 -ap の含量の減少、 P_2O_5 -ins の割合の増大が容易に推定されよう。これらの土壤はいずれも御岳山麓の標高1300m付近の準平原地形に位置し、母材料以外の地形、気候等の環境諸条件はほぼ同様である。柴田²⁷⁾によれば、P1 が位置する石英斑岩がもっとも生成年代が古く、P4 が位置する玄武岩地帯は御岳火山活動の先駆として、石英斑岩地帯の裂目からの放出物で、P3 の位置する複輝石安山岩地帯はその後の御岳火山活動の初期の摩利支天放出物で、いずれも石英斑岩を覆っているという。WALKER²⁹⁾ の考え方を適用すると、各土壤の P_2O_5 の形態から推定された各断面の生成年代の順位が、母材料の生成年代の順位とよく一致したことは興味ある事実であった。

4-5. 各土壤群の P_2O_5 の形態の特徴

供試土壤中赤色土および暗赤色土の P_2O_5 の形態的な特徴はすでに4-4で述べたが、その他の土壤群に属する土壤については次のとおりであった。

石灰岩に由来する Rendzina 様土がとくに高い P_2O_5 -t 含有率を示したことは、4-3で述べたとおりである。さらにこの土壤では、各層位いずれも P_2O_5 -ac および P_2O_5 -ap 含有率、および P_2O_5 -inorg に対する割合がきわめて高いことが注目された。2-1で述べた P_2O_5 -ap の2.5%酢酸に対する溶解度から、伊吹山土壤の場合は P_2O_5 -ac の大部分が、沖縄土壤の場合はかなりの部分が P_2O_5 -ap に由来するものであろうと推定された。このように P_2O_5 -ac および P_2O_5 -ap がきわめて豊富なことは、母材料の影響によるものと推定されるが、同時にこの土壤の P_2O_5 の形態的な特徴を示すものといえよう。さらに、4-4で述べた CHANG and JACKSON²⁾ および WALKER²⁹⁾ の考え方を適用すると、この土壤は他の土壤に比

と土壌の化学的な風化過程は未熟な段階にあって、生成後の時間（年代）の経過も若い段階にあるものと考えられる。

褐色森林土、ポドゾルおよび黒色土壌等については、4-3 および 4-4 で述べたように、母材料、土壌の化学的風化過程、生成年代等の影響によって、各土壌群に属する個々の土壌の P_2O_5 の形態はかなりの相違が見られ、同時に一部には相互に重複する面も見られるので、各土壌群ごとに特有な P_2O_5 の形態的な特徴を見出すことはかなり困難であった。

しかしながら、黒色土壌の表層土および深さ 50 cm までの土層中の、 $P_2O_5\text{-org}$ (Table 5 参照) の $P_2O_5\text{-t}$ に対する割合が 60~70% および 60% に達し、全般に他の土壌より高かったことは黒色土壌の P_2O_5 の形態の特徴といえよう。

ポドゾルにおいては 4-2 で述べたように、 B_1 ないし B 層における $P_2O_5\text{-Fe}$ 含有率が A_2 層より増大を示していたことは、 Fe の溶脱および集積の影響と見なすことができるであろう。この点は同時に、ポドゾルの P_2O_5 の形態的な特徴を示すものといえよう。

以上の黒色土壌およびポドゾルの P_2O_5 の形態は、これらの土壌と褐色森林土との P_2O_5 の形態の相違を示すものといえよう。

4-6. 森林土壌の P_2O_5 の形態の特徴 (農業土壌との比較)

上述の森林土壌の P_2O_5 の形態を畑土壌²⁰⁾²⁶⁾ および茶園土壌¹³⁾¹⁸⁾ と比較すると、次のような特徴が認められた。

畑土壌および茶園土壌の黒ボクおよび赤黄色土、 A_p 層ないし I 、 II 層をそれぞれ森林土壌の火山灰およびその他の母材料に由来する土壌、表層土 (A_1 または A 層) と比較を行なった*。

森林土壌の場合は、前述のように母材料、化学的風化過程、生成年代、水分環境等の相違によって、農業土壌はおそらく施肥、その他の人為の影響等の相違によって、それぞれかなりの相違が認められる。しかしながら、全般的に森林土壌は農業用土壌に比べると、 $P_2O_5\text{-t}$ 含有率は低いように思われる。また、 $P_2O_5\text{-org}$ の $P_2O_5\text{-t}$ に対する比率は高く、 $P_2O_5\text{-inorg}$ の各 fraction の組成については $P_2O_5\text{-ac}$ の占める割合がいちじるしく小さく、 $P_2O_5\text{-ins}$ の占める割合がきわめて高いことが注目された。

このような相違は主として施肥をともなう農業土壌と、自然土壌に属する森林土壌との相違によって、もたらされたものであらうと思われる。

5. 表層から深さ 50 cm までの土層中の P_2O_5 各 fraction の含有量

上述の供試土壌中褐色森林土、黒色土壌および同退色型等 11 断面は、土壌採取円筒を用いて自然状態の一定体積中に含まれる細土重量の測定を行なったので、林木の根系が主として分布していると考えられる。表層から深さ 50 cm までの土層中の P_2O_5 各 fraction の含有量を求めて、実態の把握を行なった。

計算結果は Table 5 に示すとおりであった。

$P_2O_5\text{-t}$ 含有量は褐色森林土では川本地区は 0.9~1.7 ton (ha 当たり、以下同様)、福山地区のやや未熟なアカマツ林土壌では 0.6~1.1 ton で、両地区とも湿性型の土壌は乾性型の土壌より多かった。黒色土壌では 4.4~5.8 ton、同退色型では 2.5 ton であった。

黒色土壌の $P_2O_5\text{-t}$ 含有量は、原田ら³⁾ の箱根地方の黒色土壌 (4 点) の 4.1~8.6 ton とほぼ同じレベ

* 気候条件のいちじるしく異なるポドゾル、母材料として分布の少ない Rendzina 様土は除外した。

Table 5. 表層から深さ 50 cm までの土層中の C, N および P_2O_5 fraction 含有量
Amounts of carbon, nitrogen and phosphorus fractions in soil to 50 cm in depth from surface
[Carbon: ton/ha, N and P_2O_5 fractions: kg/ha]

試料名 Sample name	土壌型 Type of soil	C	N	P_2O_5 -ac	P_2O_5 -Al	P_2O_5 -Fe	P_2O_5 -ap	P_2O_5 -ins	P_2O_5 -inorg	P_2O_5 -org
川本 Kawamoto P4	Bb	115	3870	2	109	72	tr.	695	876	217
同上 Ibid. P6	Bb	159	8200	13	124	119	12	515	770	793
同上 Ibid. P9	Bb	128	5380	14	62	119	12	430	637	260
同上 Ibid. P14	Bb	57.9	5330	3	88	107	12	560	767	950
福山 Fukuyama P11	BA	53.3	3960	tr.	48	68	3	402	521	90
同上 Ibid. P7	Bb	42.2	2460	6	79	76	15	304	474	225
同上 Ibid. P18	Bb	60.9	2250	12	49	97	3	721	872	180
同上 Ibid. P22	Bb	43.4	2850	8	75	151	3	427	656	268
大門 Daimon P14	B/b	233	13600	7	510	446	119	1270	2350	3480
新見 Niimi P17	B/b	395	17700	22	359	158	29	1200	1750	2650
同上 Ibid. P6	(B/b)	135	7690	12	163	186	34	1140	1520	935
試料名 Sample name	P_2O_5 -t	C/N	C/ P_2O_5 -org	P_2O_5 -t に対する % : % of P_2O_5 -t						
				P_2O_5 -ac	P_2O_5 -Al	P_2O_5 -Fe	P_2O_5 -ap	P_2O_5 -ins	P_2O_5 -inorg	P_2O_5 -org
川本 Kawamoto P4	1090	29.7	530	0.2 (0.2)	10.0 (12.4)	6.6 (8.2)	tr. (tr.)	63.8 (79.4)	80.1 (100)	19.9
同上 Ibid. P6	1560	19.4	200	0.8 (1.7)	7.9 (16.1)	7.6 (15.5)	0.8 (1.6)	33.0 (66.8)	49.3 (100)	50.7
同上 Ibid. P9	883	23.8	493	1.6 (2.2)	7.0 (10.0)	13.5 (18.6)	1.4 (1.9)	48.7 (69.5)	70.6 (100)	29.4
同上 Ibid. P14	1720	10.9	60.9	0.2 (0.4)	5.1 (11.5)	6.2 (16.0)	0.7 (1.6)	32.6 (73.0)	44.8 (100)	55.2
福山 Fukuyama P11	611	13.5	592	tr. (tr.)	7.9 (9.2)	11.1 (13.1)	0.5 (0.6)	65.8 (77.1)	85.3 (100)	14.7
同上 Ibid. P7	699	17.2	188	0.9 (1.3)	11.3 (16.7)	10.9 (16.0)	2.1 (3.2)	43.5 (65.2)	67.8 (100)	32.2
同上 Ibid. P18	1050	27.1	338	1.1 (1.4)	4.7 (5.6)	9.2 (11.1)	0.3 (0.3)	68.7 (82.9)	82.9 (100)	17.1
同上 Ibid. P22	924	15.2	162	0.9 (1.2)	8.1 (11.4)	16.3 (23.0)	0.5 (0.5)	46.2 (65.1)	71.0 (100)	29.0
大門 Daimon P14	5830	17.1	67.1	0.1 (0.3)	8.7 (21.7)	7.7 (19.0)	2.0 (5.1)	21.8 (54.0)	40.3 (100)	59.7
新見 Niimi P17	4400	22.3	149	0.5 (1.3)	8.2 (20.5)	3.6 (9.0)	0.7 (1.7)	27.3 (68.6)	39.8 (100)	60.2
同上 Ibid. P6	2460	17.5	144	0.5 (0.8)	6.6 (10.7)	7.6 (12.2)	1.4 (2.2)	46.3 (75.0)	62.0 (100)	38.0

注) カッコ内の数字は P_2O_5 -inorg に対する%。

Remark: Figures in parentheses are % of P_2O_5 -inorg.

ルに近いと見なせるであろう。

$P_2O_5\text{-ac}$ 含有量は各土壌いずれもきわめて少なく、全土壌について $\text{tr.} \sim 22 \text{ kg}$ に過ぎず、 $P_2O_5\text{-ap}$ 含有量は 120 kg に達した大門土壌を除くと、 $\text{tr.} \sim 34 \text{ kg}$ で同様にきわめて少なかった。 $P_2O_5\text{-Al}$ および $P_2O_5\text{-Fe}$ 含有量はそれぞれ褐色森林土では $50 \sim 120 \text{ kg}$ および $70 \sim 150 \text{ kg}$ 、退色型黒色土壌では 160 kg および 190 kg 、黒色土壌では $360 \sim 510 \text{ kg}$ および $160 \sim 450 \text{ kg}$ に達し、かなりの増大を示していたが、 $P_2O_5\text{-t}$ および $P_2O_5\text{-inorg}$ 含有量中とくに大きな割合を占めるには至らなかった。 $P_2O_5\text{-ins}$ は各土壌いずれもきわめて多く、 $P_2O_5\text{-inorg}$ 含有量の $55 \sim 80 \%$ に達していた。

$P_2O_5\text{-org}$ 含有量は褐色森林土の川本地区は $220 \sim 950 \text{ kg}$ で $P_2O_5\text{-t}$ の $20 \sim 55 \%$ 、福山地区は $90 \sim 270 \text{ kg}$ で $15 \sim 30 \%$ 、退色型黒色土壌は 940 kg で 40% 、黒色土壌は $2.7 \sim 3.5 \text{ ton}$ で約 60% に達していた。褐色森林土の場合は、湿性型土壌は乾性型土壌より、 $P_2O_5\text{-org}$ 含有量および $P_2O_5\text{-t}$ に対する割合はきわめて大きかった。

土壌中の P_2O_5 の各形態の植物に対する可給性については、次のように考えられている。農業土壌の場合には、 $P_2O_5\text{-ac}$ と作物の成長との相関性の高いことが認められている⁽²⁰⁾⁽²⁶⁾⁽³¹⁾。しかし、 $P_2O_5\text{-ac}$ は森林土壌の場合は可給態の Ca-phosphate が主体ではなく、4-2 で述べたように、 $P_2O_5\text{-ap}$ に由来する部分が主体であろう。 $P_2O_5\text{-ap}$ は可給性は低い¹⁾が、徐々に風化されて、可給態 P_2O_5 の給源をなしているものと考えられる。CHANG および JACKSON¹⁾ によれば、 $P_2O_5\text{-Al}$ および $P_2O_5\text{-Fe}$ 中 Variscite 様および Wavellite 様の Al-phosphate ($P_2O_5\text{-Al}$)、Stengite 様および Dufrenite 様の Fe-phosphate ($P_2O_5\text{-Fe}$)、Barrandite 様の Al-Fe-phosphate の P_2O_5 の可給性は低い¹⁾が、alumino-silicate または Gibbsite および iron oxide 上に、それぞれ沈殿している Al- および Fe-phosphate の P_2O_5 は、Ca-carbonate 上に沈殿している Ca-phosphate の P_2O_5 と同様に高い可給性を有するという。しかし、 $P_2O_5\text{-ins}$ は非可給態と見て良いであろう¹⁾。

わが国の主要造林樹種の樹体各部の養分現存量については、かなり明らかにされているが、年間に土壌から吸収する養分量についてはほとんど明らかにされていない。森林においては毎年かなりの養分量が落葉落枝として土壌に還元され、同時に年間に新たに形成される樹体各部に必要な、かなりの養分量が土壌から吸収される。このような土壌からの吸収および土壌へ還元される養分量の差が年々樹体内に蓄積される。したがって、毎年樹体内に蓄積される養分量よりもはるかに多量の養分が、林木と土壌との間に循環していると考えるべきであろう。筆者らは年間に林木が土壌から吸収する P_2O_5 の量を、樹種および成長量によって異なるが、壮齡林の場合 $10 \sim 30 \text{ kg/ha}$ ぐらいであろうと推定した*。

林木の年間の P_2O_5 吸収量をどの程度に見積るかによってそれぞれ異なるであろうが、いずれにもせよ、Table 5 に示したわが国の森林土壌における $P_2O_5\text{-inorg}$ 各 fraction の現存量は、その可給性を考

*1 この計算は筆者らの一人河田⁸⁾が森林生態系における養分循環についての総説で引用した資料にもとづいて行なわれた。すなわち、主要造林樹種の壮齡林の養分現存量について、全針葉中の P_2O_5 の含有量を着葉年数で割って、毎年新たに生成される針葉中の P_2O_5 含有量を求めた。その他年々新たに生産される幹、枝、根等の P_2O_5 含有量の概算値を加算してあるが、これらの部分の P_2O_5 含有量は針葉に比べればかなり低い。この場合に毎年新たに生産される樹体各部の P_2O_5 含有量がすべて土壌から吸収されるものと仮定した。林木では落葉の前に葉から幹に養分が移動するとの報告、春期の開葉直前に下枝の葉から養分が移動するとの報告もあり、また常緑針葉樹の場合に新葉と旧葉の養分濃度の相違等樹体各部間の養分の移動を示唆する面も多いが、その量的な実態が明らかでないので上述の仮定を用いざるを得なかった。今までの資料は樹種により、また同じ樹種でも、養分現存量にはかなりの相違が見られる。したがって、この推定値は今後の研究の進展によって修正されるであろうが、現段階ではこのような推定値を用いざるを得なかった。

慮に入れると、長期にわたって林木の P_2O_5 要求量を満たすには不十分であろうと考えられる。

しかし、森林土壌における P_2O_5 の形態は固定されたものではなく、すでに 4-4 で述べたように、土壌と林木の間の P_2O_5 の循環が、一方では Apatite 型 P_2O_5 の風化による補給と、他方では林木の樹体内における P_2O_5 の固定、および $P_2O_5\text{-ins}$ への変化による循環系からの離脱*をとめないながら、dynamic に行なわれている。

筆者らは森林土壌における P_2O_5 の可給性を考える場合に、 $P_2O_5\text{-org}$ とその分解無機化の過程をもっとも重要視したい。なぜならば、先に示した P_2O_5 の形態 (Table 3~5 参照) を見ると、 $P_2O_5\text{-ac}$ はきわめてとほしく、 $P_2O_5\text{-Al}$ および $P_2O_5\text{-Fe}$ は可給性の低い fraction も含むと考えられるが、もし全部が可給性の高い fraction で占められていると仮定しても、長期にわたって林木の P_2O_5 要求量を満たすには不十分であろう。 $P_2O_5\text{-org}$ は分解無機化によって可給態 P_2O_5 を供給する潜在能力を有すると考えられるが、非可給態と考えられる $P_2O_5\text{-ins}$ を除く P_2O_5 各 fraction 中もっとも多量に存在する。さらに、われわれが経験的に認めている一般的な傾向として、林木の成長の良好な湿性型の土壌は有機物の分解が良好なムルに属し、これに対して林木の成長の不良な乾性型の土壌は、有機物の分解の不良なモダーまたはモルに属する。

これらの諸点は森林土壌の P_2O_5 の可給性を考える場合に、有機態 P_2O_5 の分解無機化の過程を重視しなければならないことを示唆していると思われる。この点についてはまだ筆者らの作業仮説の域を脱していないが、今後の研究の進展にともなって十分な検討を行なう予定である。

6. 森林土壌における有機物の分解過程の指標としての $C/P_2O_5\text{-org}$ 比について

森林土壌における有機物の分解過程を示す指標として、表層土における C/N 比が一般に用いられているが、筆者らは $C/P_2O_5\text{-org}$ 比も C/N 比と同様の考え方に立てば、有機物の分解過程を示す指標になり得るであろうと考えている。

この点についての筆者らの基本的な考え方は次のとおりである。

土壌中で有機物が土壌微生物の作用によって分解無機化する場合に、 N と P_2O_5 は相互に関連性を有し、両者は相互に同じような変化の過程をたどると考えられる。すなわち、 N および P_2O_5 は微生物に不可欠な菌体の構成物質の一部として、有機物の分解過程において微生物によって吸収同化され、同時に分解無機化された N および P の一部は林木に吸収されるであろう。有機物中の carbon は同様に一部は菌体の構成物質として再合成されるが、一部は energy 源として消費され、 CO_2 として失われる。

土壌中の有機物の C/N 比が大きいほど、 N が菌体の構成物質として再合成される割合が大きく、carbon が energy として消費される割合が大きい。したがって、有機物の分解過程が進むにつれて C/N 比はしだいに減少し、 C/N 比が 10 に近づいた後は carbon および N 化合物は、いずれも同様の割合で分解されるために、以後は C/N 比はほぼ 10 に保たれる。このことは、土壌の C/N 比に関する理論としてすでに確立されている。

筆者らは $P_2O_5\text{-org}$ の分解過程についても C/N 比と同様に、 $C/P_2O_5\text{-org}$ 比が大きいほど菌体の構成物

* $P_2O_5\text{-inorg}$ のある fraction から他の fraction への変化は長期間を要し、 $P_2O_5\text{-ins}$ は数世紀の間に集積されたものであろうと考えられている²⁾。

Table 6. 供試土壌の C/N 比および C/P₂O_{5-org} 比
C/N and C/P₂O_{5-org} ratios in analysed soils

試料名 Sample name	土壌型 Type of soil	層位 Horizon	C/N	C/P ₂ O _{5- org}	試料名 Sample name	土壌型 Type of soil	層位 Horizon	C/N	C/P ₂ O _{5- org}
川 本 Kawamoto P 4	B _B	(H)-A B ₁ B ₂	31.1 31.7 25.2	404 634 504	王 滝 Ôtaki P 1	Pw(i)-I	H-A A ₂ B ₁ B ₂	20.4 16.2 19.1 24.7	399 282 2320 2160
同 上 Ibid. P 6	B _D	A ₁ A ₂ A-B B	21.8 20.5 19.3 14.9	223 213 186 190	面 河 山 Mt. Omogo	P _D I	H-A ₁ A ₂ B ₁ B ₂	25.3 32.0 21.9 22.5	619 485 708 482
同 上 Ibid. P 9	B _B	A B ₁ B ₂	25.4 23.9 24.3	407 435 1380	大 門 Daimon P 14	B/D	A ₁ A ₂ B	16.5 17.4 17.1	68.4 66.4 67.2
同 上 Ibid. P 14	B _D	A ₁ A ₂ A-B B	11.9 10.4 10.6 14.0	92.7 49.9 64.5 76.0	新 見 Niimi P 17	B/D	A ₁ A ₂ A ₃ B	21.3 22.3 23.0 14.7	190 120 171 184
福 山 Fukuyama P 11	B _A	Am B ₁ B ₂	53.1 38.7 28.0	885 574 487	同 上 Ibid. P 6	(B/I) _D	A ₁ A ₂ B ₁ B ₂	19.6 17.2 14.8 12.6	170 138 144 110
同 上 Ibid. P 7	B _D	A B ₁ B ₂	20.5 14.3 14.5	212 139 414	蚊 野 Kano P 1	R _B	R ₁ (A-B) R ₂ (B ₁) R ₃ (B ₂)	12.3 17.7 9.0	214 241 81.8
同 上 Ibid. P 18	B _B	A B ₁ B ₂	28.1 19.4 47.0	356 422 235	潮 岬 Shiono- misaki P 1	R _B	R ₁ (A-B) R ₂ (B ₁) R ₃ (B ₂)	22.0 17.0 17.0	205 ∞ ∞
同 上 Ibid. P 22	B _D	A B ₁ B ₂ -C	16.0 14.0 15.5	212 112 182	関 宮 Sekimiya P 1	dR _D (d)	A B ₁ B ₂	15.4 15.0 10.6	164 155 500
王 滝 Ôtaki P 3	Pw(h)-III ~B _E	H-A A ₁ A ₂ B	15.1 18.0 15.0 13.1	99.6 48.7 53.9 48.4	伊 吹 山 Mt. Ibuki P 1	Rendzina like soil	A ₁ A ₂	10.0 9.2	23.5 19.5
同 上 Ibid. P 4	Pw(h)-III ~B _D	H-A A ₁ A ₂ B	17.0 14.0 14.6 14.8	85.5 54.0 38.9 39.5	沖 縄 Okinawa P 82	Rendzina like soil	A ₁ A ₂ B-C	11.0 9.0 9.0	40.5 15.4 16.0

質として P₂O_{5-org} が再合成される割合が大きく、有機物の分解過程が進むにしたがって、C/P₂O₅ 比もしだいに減少し、C/N 比と同様に一定の値に近づいた後は C および P₂O_{5-org} は一定の割合で分解され、以後この比は一定の値を保つであろうと考えている。

このような考え方に立てば、土壌の C/N 比と C/P₂O_{5-org} 比は当然明りうな関連性を示すことが予想された。

この点を確認するために各供試土壌の C/P₂O_{5-org} を Table 6 に、表層土の C/N 比と C/P₂O_{5-org} 比の相関性を Fig. 4 に示した。

筆者らは各土壌におけるこれらの値の相関性を論ずる場合に、表層土の値を用いることにした。一般に土壌の有機物量および微生物の分解活動は、表層から下層にかけてしだいに低下し、同時に各土壌の生成に關与する環境諸因子の影響は、表層土にもっとも強く反映され则认为られるからである。

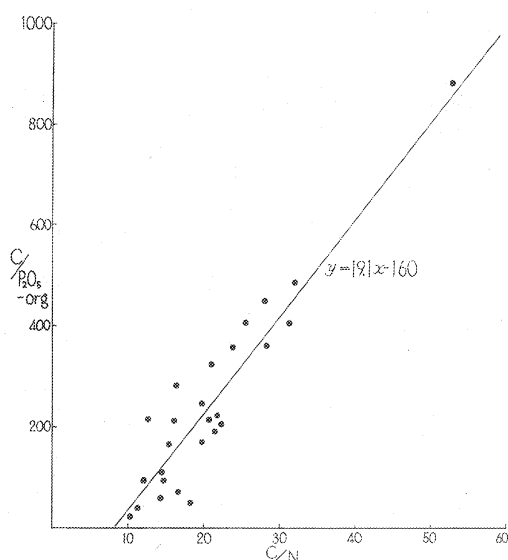


Fig. 4 表層土（鉱質土層）の C/N 比と C/
P₂O₅-org の相関性 ($r=0.939$) **
Correlation between C/N and C/P₂O₅-org
of surface mineral horizon ($r=0.939$) **.
** Significant at 1% level.

土ではこの値に達することはまれで、12~13が min. であろうと考えられる。供試土壤中 C/N 比が10ないし11を示した伊吹山および沖縄土壌の場合は、数少ない例に属するといえよう。

わが国の一般の森林土壌の C/P₂O₅-org 比の min. は、C/N 比の min. 12~13に対応する値として、Fig. 4 の回帰式から求めると70~90程度と考えられる。

7. お わ り に

1) この報文は森林土壌の生産力（林木の成長）を林木に対する養分の供給という面から見た場合に、もっとも重要視される N および P₂O₅ のうち、後者の可給性を検討するために、土壌の P₂O₅ の形態の検討結果をとりまとめたものである。

2) 供試土壌は褐色森林土、乾性および湿性ポドゾル、黒色土壌および同退色型、赤色土、暗赤色土、Rendzina 様土等 20 断面を用いた。

3) 分析方法は関谷法²⁶⁾を主とし、CHANG および JACKSON 法¹⁾を併用して、無機態 P₂O₅ を 2.5% 酢酸可溶型、Al 型、Fe 型、Apatite 型、難溶型に区分し、さらに有機態 P₂O₅ を定量した。

4) 森林土壌の P₂O₅ の形態の特徴は、全般的な傾向として全 P₂O₅ 中有機態 P₂O₅ の占める割合が大きく、無機態 P₂O₅ 中 2.5% 酢酸可溶型および Apatite 型 P₂O₅ の占める割合がきわめて低く、難溶型 P₂O₅ の占める割合がきわめて高いことが認められた。

5) 各種土壌群ごとの P₂O₅ の形態の特徴、母材料の影響、無機態 P₂O₅ の組成に見られる各土壌の化学的風化過程の相違、全 P₂O₅ の組成に見られる各土壌の生成後の年代の経過の相違等について論じてある。

6) 供試土壌中褐色森林土、黒色土壌、同退色型等 11 断面について、深さ 50 cm までの土層中に含まれる P₂O₅ 各 fraction の含有量を計算し、その実態を明らかにした。

C/N 比と C/P₂O₅-org 比の相関係数は $r=0.939$ **

を示し、両者はきわめて高い相関性を示した。以上の結果から、C/P₂O₅-org 比は土壌中の有機物の分解過程を示す指標として用い得ること、および分解過程において N と P₂O₅ は相互に関連性を有し、同じような変化の過程をたどることが認められるであろう。

供試土壌の表層土の C/P₂O₅-org 比は 24~885 を示し、いちじるしい相違が見られた。P₂O₅-t のとくに豊富な石灰岩に由来する Rendzina 様土では 24~41, P₂O₅-t の豊富な basalt, andesite および basic な火山灰に由来する王滝 P4 および P3 (A₁ 層)、大門土壌では 49~68, P₂O₅-t の少ないその他の母材料に由来する土壌では 93~885 を示し、いちじるしい相違が見られた。

一般の土壌では C/N 比の min. は約10前後といわれているが、わが国の森林土壌の場合は表層

7) 以上の結果から、森林土壌における林木に対する P_2O_5 の供給源として、有機態 P_2O_5 の分解無機化がもっとも重要であろうとする作業仮説を提案した。

8) 各土壌の Carbon/有機態 P_2O_5 比を求めた結果、各表層土について比較すると、carbon/有機態 P_2O_5 比は C/N ときわめて高い相関性を示し、土壌中の有機物の分解過程を示す指標として用い得ることを明らかにした。

稿を終るに当って、貴重な沖縄土壌を分与された本場土壌部土壌調査科長黒鳥 忠博士および土壌第1研究室小島俊郎技官に心からの感謝を捧げたい。また、乾性ポドゾルの試料を分与された本場土壌部土壌調査科に対し、さらにこの研究を遂行するに当たって多大のご配慮をいただいた当支場の関係各位に感謝する。

文 献

- 1) CHANG, S. C. and JACKSON, M. L.: Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci., 84, 133~144, (1957)
- 2) Ibid.: Soil phosphorus in some representative soils. J. Soil Sci., 9, 109~119, (1958)
- 3) 原田 洸・佐藤久男・堀田 庸・只木良也: 28年生スギ林およびヒノキ林の養分含有量, 日林誌, 51, 125~133, (1969)
- 4) 岩崎岩次: 地球化学概説, 大日本図書, 1~296, (1953)
- 5) JENNY, H.: Factors of soil formation. McGraw-Hill (New York), 1~281, (1941)
- 6) 河田 弘 (KAWADA, H.): 湿性ポドゾルにおけるカラマツ幼齢林の施肥試験, カラマツの成長および針葉の組成におよぼす施肥の影響 (A fertilizer treatment on young larch forest on wet podzolized soil. On effects of fertilizer on growth of larch and composition of needles.), 林試研報 (Bull. Gov. Forest Exp. Stat.), 162, 143~162, (1964)
- 7) 同上(Ibid.): カラマツ落葉病に関する調査研究 V 王滝国有林におけるカラマツ幼齢林の落葉病と土壌条件, 成長および針葉の組成について (Researches on the needle cast of larch. V, A study on correlations of the needle cast, soil conditions, growth and compositions of needles of young larch forests in Ohtaki National Forest.), 同上 (Ibid.) 178, 72~94, (1965)
- 8) 同上: 森林生態系における養分循環 (総説), 森林立地, 13 (1), 1~16, (1971)
- 9) 河田 弘・衣笠忠司 (KAWADA, H. and KINUGASA, T.): 関西地方における林地施肥試験, I 高野山国有林におけるスギ・ヒノキ幼齢林施肥試験 (Studies on forest fertilization in Kansai area. I A study on fertilization of young mixed forest of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* in Mt. Kôya National Forest.), 林試研報 (Bull. Gov. Forest Exp. Stat.), 191, 115~136, (1966)
- 10) 同上 (Ibid.): 同上 II スギ幼齢林施肥試験 (兵庫県山崎営林署 マンガ谷 国有林), (Ibid. II A study on fertilization on young *Cryptomeria japonica* forest in Mangatani National Forest.), 同上 (Ibid.), 216, 75~97, (1968)
- 11) 同上 (Ibid.): 同上 III 広島県姥ヶ原国有林におけるクロマツ幼齢林施肥試験 (Ibid. III A study on fertilization on young *Pinus Thunbergii* forest in Ubahara National Forest in Hiroshima Prefecture.), 同上 (Ibid.), 219, 121~136, (1969)
- 12) 河田 弘・丸山明雄・衣笠忠司 (KAWADA, H., MARUYAMA, A. and KINUGASA, T.): アカマツ針葉の養分組成と成長および土壌条件との関係 (A study on correlations among nutrient concentrations of *Pinus densiflora* needle, growth and soil conditions.), 同上 (Ibid.), 199, 67~97,

- (1967)
- 13) 河合惣吾：茶園土壌の特性について（第 9 報）リン酸に関する諸性質，茶業技術研究，29，56～66，
(1964)
 - 14) 経済企画庁国土調査科編：土地分類図（土壌図）（50万分の 1），（1969）
 - 15) 木立正嗣・大政正隆（KIDACHI, M. and OHMASA, M.）：赤色土壌の研究 III 本邦赤色土の生成に関する地質学的ならびに鉱物学的研究（Studies of red soils in Japan. III Geological and mineralogical study on formation of red soils in Japan），林野土調報（Forest soils of Japan），14，1～126，（1963）
 - 16) 黒鳥 忠・大政正隆（KUROTORI, T. and OHMASA, M.）：赤色土壌に関する研究 II 九州地方の赤色土とこれにともなう黒色土について（Studies of red soils in Japan. II Red soils and their accompanying black soils in Kyūshū.），同上（Ibid.），13，1～88，（1963）
 - 17) 黒鳥 忠・小島俊郎：沖縄の森林土壌概説，日林誌，51，227～230，（1969）
 - 18) 前原三利・平峯重郎・平田三千男・江崎勇：火山灰茶園土壌に関する研究（第 1 報）茶園における土壌理化学的性の経年的変化，茶業技術研究，31，87～97，（1965）
 - 19) 村上悠紀雄：生物地球化学，実験化学講座 14 地球化学，（丸善），343～431，（1958）
 - 20) 農林水産技術会議編：畑土壌の生産力に関する研究（別刷），561～570，（1962）
 - 21) NYE, P. H. and BERTHEUX, M. H. : The distribution of phosphorus in forest and savannah soils of the Gold Coast and its agricultural significance., J. Agr. Sci., 49, 141～159, (1957)
 - 22) 大政正隆・黒鳥 忠・木立正嗣（OHMASA, M., KUROTORI, T. and KIDACHI, M.）：赤色土壌の研究 I 新潟県に分布する赤色の森林土壌の分布，形態の性質および生成について（Studies of red soils in Japan. I Red soils of Niigata Prefecture.），林野土調報（Forest soils of Japan），8，1～24，（1957）
 - 23) PEARSON, R. W. : Determination of organic phosphorus in soils. Ind. Eng. Chem. Anal. Ed., 12, 198～200, (1940)
 - 24) 林業試験場編：林野土壌層断面図集（2），（1968）
 - 25) 佐伯秀章：農林地質学，（朝倉書店），1～330，（1950）
 - 26) 関谷宏三（SEKIYA, K.）：リン酸（肥沃度測定のための土壌養分分析法，土壌養分測定法委員会編）（Phosphorus. The analytical method of soil nutrients for the determination of fertility）（In Japanese）（養賢堂），229～245，（1970）
 - 27) 柴田秀賢：木曾谷地質図（同説明書）（長野営林局），1～45，（1963）
 - 28) 坪井誠太郎：岩石学 I，（岩波全書 91）（岩波書店），1～247，（1951）
 - 29) WALKER, T. W. : The significance of phosphorus in pedogenesis. [Experimental pedology: Edited by HALLSWORTH, E. G. and CROWFORD, D. W.], (Butterworth), (London), 295～316, (1965)
 - 30) WILLIAMS, C. H. : Studies on soil phosphorus. 1 A method for the partial fractionation of soil phosphorus. J. Agr. Sci., 40, 233～242, (1950)
 - 31) Ibid. : Ibid. III Phosphorus fractionation as a fertility index in south Australian soils. Ibid., 40, 257～262, (1950)

Phosphorus Forms in Representative Japanese Forest Soils

Hiroshi KAWADA⁽¹⁾ and Toyoaki NISHIDA⁽²⁾

1. Introduction

One of the authors, KAWADA, and his co-workers studied the relationship between the growth of forest stands and their nutrient conditions diagnosed by their foliar nutrient compositions (foliar analysis) on various forests including the fertilizer trials in our country⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾. They pointed out that nitrogen and phosphorus supplies to the forest stands from soil were more effective than other nutrients.

They also found the decrease of N/P ratio in foliar nutrient composition according to the increase of growth of stands. In their opinion, it suggested that the phosphorus supply would be more effective than the nitrogen supply on the growth of forest stands.

They conducted studies to get information on the status of available phosphorus in Japanese forest soils as it held an important key to make clear the forest soil productivity. Although various methods for the determination of available phosphorus in soil have been proposed, none of them gave adequate satisfaction. At the outset of a study on phosphorus availability in our forest soils, the authors resolved to make clear the phosphorus forms to get the basal information.

This paper deals with the phosphorus forms of twenty representative forest soils in our country. It also deals with the significance of carbon/organic phosphorus ratio as the index of the organic matter decomposition in forest soil, and the working hypothesis on the significance of decomposing process of soil organic phosphorus for the phosphorus supply to forest stands.

2. The analytical method

2-1. The Solubility of P_2O_5 in apatite in various extractants

The first attempt for the fractionation of soil phosphorus was done by FISHER and THOMAS (1935)⁽¹⁾⁽³⁰⁾. Various improved methods were proposed by many authors in the following years.

The present authors believe that the basal method for the fractionation of soil inorganic phosphorus was nearly accomplished by CHANG and JACKSON⁽¹⁾. In their opinion, the most part of soil phosphorus combined with Ca is apatite and di-, mono- and octa-Ca-phosphates are only in small amount or as the transitional forms. However, other authors attached great importance on various forms of Ca-phosphates as soil phosphorus combined with Ca. 2.5% acetic acid extraction for the determination of Ca-phosphates was often adopted in the fractionation of soil phosphorus since GHANI (1943)⁽²⁶⁾⁽³⁰⁾. The authors incline to the view that the difference of opinions among the researchers on the soil phosphorus combined with Ca would be induced by the difference of their objects, the unfertilized natural soils or the fertilized agricultural soils.

Although the solubilities of Ca-, Al- and Fe-phosphates in various extractants were ex-

Received May 17, 1972

(1)(2) Kansai Branch Station

amined in detail⁽¹⁾⁽²⁶⁾⁽³⁰⁾, that of the phosphorus in apatite in 2.5% acetic acid was not enough. At the beginning of this study the authors examined the solubility of phosphorus in apatite in various extractants.

The analytical method is as follows:

Ground to pass 1 mm sieve fluo-apatite from Mexico was analysed. Its P_2O_5 content was 39.6% (theor. 42.1%). The examined extractants are 2.5% acid, N NH_4Cl , N NH_4F (neutral), 0.1 N NaOH solutions and 0.5 N H_2SO_4 . Certain amount of apatite (3, 6, 12 and 25 mg, respectively) is taken into a 250 ml/ centrifuge bottle with a lid and 100 ml/ extractant is added. It is shaken for 1 hour with N NH_4Cl , N NH_4F solutions and 0.5 N H_2SO_4 , for 2 hours with 2.5% acetic acid and for 17 hours with 0.1 N NaOH solution. After that it is centrifuged (8000 rpm for 15 minutes) and P_2O_5 in the supernatant is determined colorimetrically by phosphomolybdenblue with $SnCl_2$.

Results and discussion.

The results are expressed in Table 1.

The P_2O_5 in apatite is slightly soluble in N NH_4Cl , N NH_4F (neutral) and 0.1 N NaOH solutions, but it is almost completely dissolved in 0.5 N H_2SO_4 . These results agree well with those of CHANG and JACKSON¹⁾. The percentage of P_2O_5 dissolved in 2.5% acetic acid decreased continuously with the increase of the solid-extractant ratio, and it is from 45% to 26%.

These results agree well with those of WILLIAMS³⁰⁾. Examining the solubilities of various phosphorus compounds in 2.5% acetic acid with 1% 8-hydroxyquinoline, he reached to the following conclusion, namely, that the soil phosphorus soluble in this extractant was from water soluble phosphate, Ca-phosphate, hydroxy- and carbonate-apatite, Mg- and Mn-phosphates and some extent of chloro- and fluo-apatite³⁰⁾.

Considering these results, it is clear that 2.5% acetic acid soluble soil phosphorus is not only from Ca-phosphate but also from apatite to some extent.

2-2. The analytical method of soil phosphorus form

The authors fractionate the soil phosphorus into total $P_2O_5(P_2O_{5-t})$, 2.5% acetic acid soluble $P_2O_5(P_2O_{5-ac})$, aluminium phosphate (P_2O_{5-Al}), iron phosphate (P_2O_{5-Fe}), insoluble phosphorus (P_2O_{5-ins}) and organic phosphorus (P_2O_{5-org}) by SEKIVA's method²⁶⁾. He adopted PEARSON's method²⁸⁾ for P_2O_{5-org} and modified CHANG and JACKSON's method¹⁾ for P_2O_{5-Al} and P_2O_{5-Fe} ²⁶⁾.

The authors added the determination of phosphorus in apatite (P_2O_{5-ap}) by CHANG and JACKSON's method¹⁾ to make clear that P_2O_{5-ac} is from either Ca-phosphate or apatite.

The analytical method is expressed in the following flow sheet.

3. Analysed soils

The authors analysed the phosphorus forms in twenty representative forest soils in our country. They are the brown forest soils, dry and wet podzols, black soils (ando soils), red soils, dark red soil and rendzina-like soils from various parent materials. Their sampling plots are expressed in Fig. 1 and their type of soil, parent material, chemical properties and forest stands in Table 2.

4. The phosphorus forms

4-1. The phosphorus forms of analysed soils

The phosphorus forms of analysed soils are expressed in Table 3 and 4.

Considering the amounts of $P_2O_5\text{-ac}$ and $P_2O_5\text{-ap}$ in analysed soils and the solubility of $P_2O_5\text{-ap}$ in 2.5% acetic acid described in 2-1, it is presumed that the major part of $P_2O_5\text{-ac}$ in the mineral horizons of every soil is from $P_2O_5\text{-ap}$ but that in the H-A and (H)-A layers of podzolic and Bb-soils is from Ca-phosphate. The $P_2O_5\text{-ins}$ is calculated by subtracting $P_2O_5\text{-ap}$, $P_2O_5\text{-Al}$ and $P_2O_5\text{-Fe}$ from $P_2O_5\text{-inorg}$ on the mineral horizons but $P_2O_5\text{-ac}$ instead of $P_2O_5\text{-ap}$ on the H-A and (H)-A layers.

4-2. The general trends

The $P_2O_5\text{-t}$ is most abundant in the surface horizon and it falls with the increase of depth in every soil.

No clear difference of $P_2O_5\text{-inorg}$ among the horizons in every soil is observed, and it often increased in the lower horizons in comparison with that in the upper one.

The $P_2O_5\text{-org}$ is most abundant in the surface horizon in every soil and the falling of its amount and rate to $P_2O_5\text{-t}$ from surface to lower horizon with the increase of depth is sharp in dry types of soil but gradual in wet types* of soil. The $P_2O_5\text{-ac}$ and $P_2O_5\text{-ap}$ are negligible or poor in every soil except in the rendzina-like soils from limestone.

As mentioned above, the most part of $P_2O_5\text{-ac}$ in the mineral horizons of every soil is from $P_2O_5\text{-ap}$ but that in the H-A and (H)-A layers of podzolic and Bb-soils is from Ca-phosphate.

The $P_2O_5\text{-Al}$ and $P_2O_5\text{-Fe}$ increase comparing with $P_2O_5\text{-ac}$ and $P_2O_5\text{-ap}$ in every soil but their rates to $P_2O_5\text{-t}$ and $P_2O_5\text{-inorg}$ are relatively low. These four fractions decrease from surface to lower horizons with the increase of depth in every soil except B₁ and B horizons of podzolic soils where $P_2O_5\text{-Fe}$ increases.

The $P_2O_5\text{-ins}$ is affected by the parent material and chemical weathering process of every soil as explained below. It is the most abundant component of $P_2O_5\text{-inorg}$ and it increases from surface to lower horizon with the increase of depth in every soil except the red, dark red and rendzina-like soils where no clear differences are observed among their horizons.

4-3. The effect of parent material

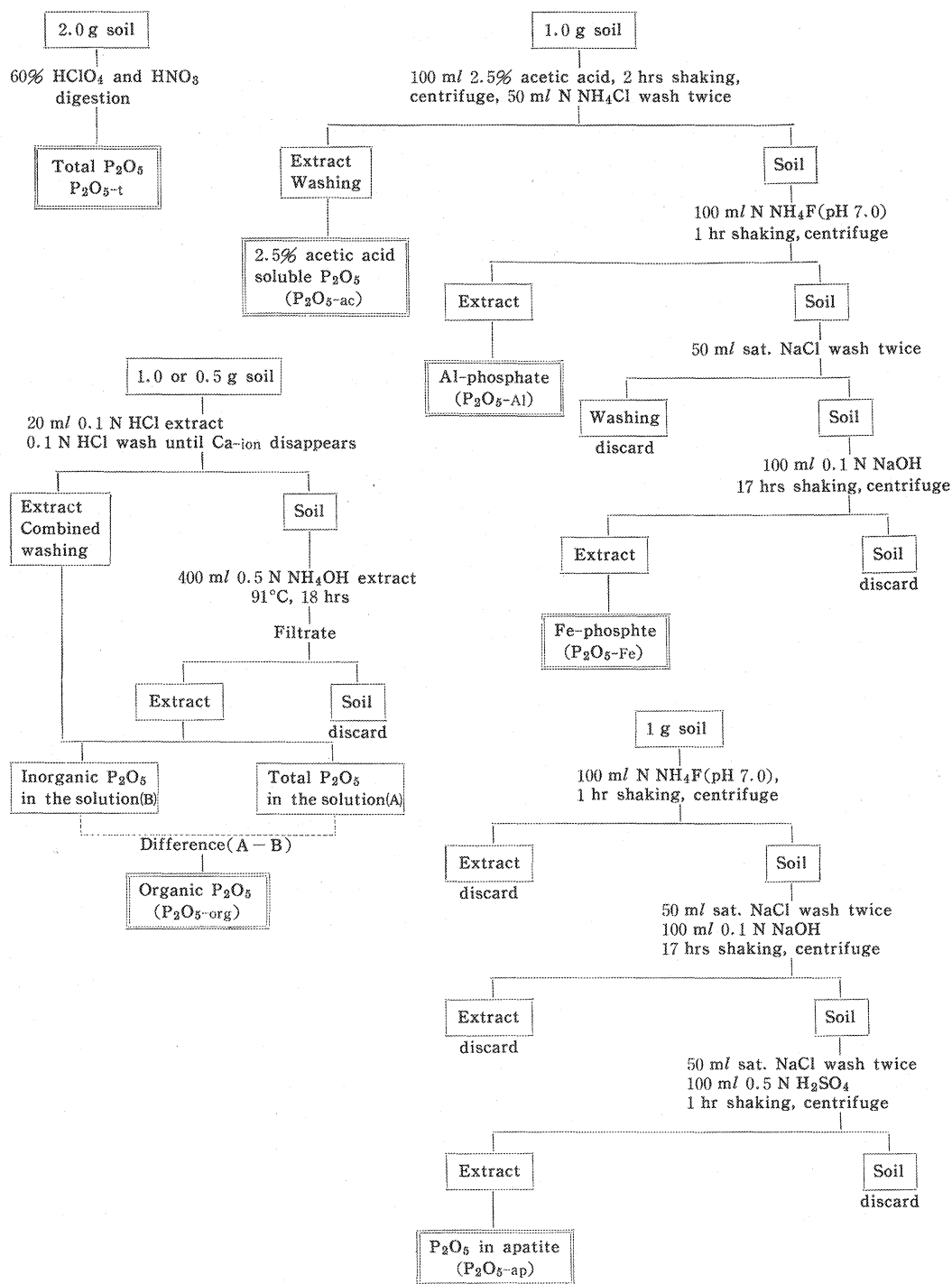
Among the analysed soils, their phosphorus forms, especially $P_2O_5\text{-t}$, are remarkably different by the effect of their parent materials.

The extraordinary abundant $P_2O_5\text{-t}$ in the rendzina-like soils from limestone, especially Mt. Ibuki soil, are noted. The geologists assert that the average P_2O_5 content of limestone is low but the metamorphic limestone contains abundant apatite. The parent material of Mt. Ibuki soil is the metamorphic limestone and that of Okinawa soil (P 82) is the limestone from coral reef.

The high $P_2O_5\text{-t}$ content of these soils would be the effect of their parent materials.

The soils from olivine basalt, pyroxine andesite and basic (andestic) volcanic ash, Ôhtaki P4 and P3, and Daimon soil are next in $P_2O_5\text{-t}$ abundance. The geologists pointed to a general trend that the decrease of P_2O_5 content accords with the increase of SiO_2 content in the

* In this paper the authors use the "dry type" and "wet type" as a relative comparison of the annual moisture status of soil. BA-, BB-, PD, dRD(d) and RB- soils belong to the former type and BD-, Pw-soils and rendzina-like soils to the latter type.



Calculation ;

Total inorganic P_2O_5 (P_2O_5 -inorg) = P_2O_5 -t - P_2O_5 -org

Insoluble P_2O_5 (P_2O_5 -ins) = P_2O_5 -inorg - (P_2O_5 -Al + P_2O_5 -Fe + P_2O_5 -ac or P_2O_5 -ap*)

* On the mineral horizons P_2O_5 -ap is subtracted but on the H-A and (H)-A layers P_2O_5 -ac is subtracted.

The flow sheet of analytical method for soil phosphorus fractionation.

igneous rocks. Comparing the average elementary composition of various igneous rocks, P_2O_5 content in basalt seemed to be higher than that in other rocks. The more abundant P_2O_5 content in the soils from these basic parent materials than those from quartzose or acidic rocks were often noticed⁵⁾²¹⁾. Our examined soils from basaltic and andestic parent materials express a similar trend.

The soils from other parent materials, granite, quartzporphyry, rhyolite, gabbro, serpentine, liparitic tuff and diavium, are low in P_2O_{5-t} . The P_2O_{5-t} in the red and dark red soils from gabbro and serpentine, one of the basic or ultrabasic rocks, are low. These soils are at the increased stages in chemical weathering process of soil as undermentioned. In the authors' opinion, the P_2O_{5-t} content of soil may be affected by not only its parent materials but also its chemical weathering sequence. However, these problems are left for future study.

4-4. The effect of chemical weathering and chronosequence of soil

It is said that the marked differences on the phosphorus form of soil, the composition of $P_2O_{5-inorg}$ fractions and the rates of P_2O_{5-org} and $P_2O_{5-inorg}$ fractions to P_2O_{5-t} , are induced by the effect of the chemical weathering process and the chronosequence of soil. CHANG and JACKSON²⁾ said that the inorganic phosphorus form in the soil was affected by pH, various cations, solubility product of every phosphorus fraction and the chemical weathering sequence of soil. Ca-phosphate and Al-phosphate were most likely to be formed than Fe-phosphate at the initial stage of chemical weathering of soil, and as the time elapsed Ca-phosphate and Al-phosphate transform into Fe-phosphate and finally into P_2O_{5-occl} (the authors' P_2O_{5-ins}), forming more chemically stable form. The rate of every $P_2O_{5-inorg}$ fraction increases in the following order as Ca-phosphate, Al-phosphate, Fe-phosphate and P_2O_{5-occl} , depending on the progress of the chemical weathering of soil.

WALKER²⁹⁾ said that the soil phosphorus form changed by the effect of chronosequence of soil genesis. At the initial stage of soil genesis P-a* is the most part of total soil phosphorus and P-o* and P-f* are negligible. As time elapses, the decrease of P-a and the increase of P-o and P-f are advanced by the effect of the vegetation and the chemical weathering sequence of soil. From a certain critical stage, P-o, arriving at its maximum, begins to decrease, but P-f increases successively. In the final stage of soil genesis, the most part of total phosphorus changes into P-f (See Fig. 3).

From these points of view, the following facts are noted on our examined soils. The phosphorus form of the red soils are unique. Their P_2O_{5-org} are very poor comparing with that of other soils. They are only 10% of P_2O_{5-t} in their surface horizons and they fall sharply with the increase of depth. On their $P_2O_{5-inorg}$ fractions, P_2O_{5-ac} , P_2O_{5-Al} , P_2O_{5-Fe} and P_2O_{5-ap} are poor and the most part of $P_2O_{5-inorg}$, 90% or more, is P_2O_{5-ins} .

OHMASA, KUROTORI and KIDACHI¹⁵⁾¹⁶⁾²²⁾ pointed out that the red soils in our country are the fossil soils where their genesis had evolved under the warm and humid climatic conditions similar to that of current tropics in Günz-Mindel interglacial age.

The characteristic $P_2O_{5-inorg}$ forms of the red soils agree well with that of the latosols by CHANG and JACKSON²⁾ where their chemical weathering sequence is at a very increased stage. According to WALKER's opinion²⁹⁾, the P_2O_5 forms of the red soils suggest their very long

* WALKER discussed the phosphorus in the whole profile. His fractionation of the soil phosphorus is as follows: P-a is the inorganic P_2O_5 soluble in NH_4SO_4 , P-o is organic P_2O_5 and P-f is the inorganic P_2O_5 insoluble in NH_4SO_4 . In the authors' opinion, although the analytical method is different from his, P-a corresponds to the sum of their $P_2O_{5-Al} + P_2O_{5-Fe} + P_2O_{5-ap}$ (or P_2O_{5-ac}), P-o to P_2O_{5-org} and P-f to P_2O_{5-ins} .

chronosequence on their genesis. These facts well agreed with the theory on the genesis of these soils by OHMASA *et al.*

The characteristic of the $P_2O_5\text{-inorg}$ form of the dark red soil is very similar to that of the red soils, although the rate of $P_2O_5\text{-ins}$ to $P_2O_5\text{-inorg}$ in corresponding horizons of this soil is slightly less than that of the red soils. However, the $P_2O_5\text{-org}$ of this soil increased in comparison with that of the red soils. It is about 30% in surface horizon and falls with the increase of depth.

The genetical process of this soil is a problem awaiting solution. Its $P_2O_5\text{-inorg}$ form expressed that the chemical weathering sequence of this soil is at a very advanced stage comparing with that of other soils except the red soils. Its less $P_2O_5\text{-org}$ rate to $P_2O_5\text{-t}$ and remarkably higher rate of $P_2O_5\text{-ins}$ than those of other soils except the red soils suggest the longer chronosequence on its soil genesis.

Comparing the three forest soils in Ôtaki district, Ôtaki P1, P3 and P4 from different parent materials, respectively, the following facts are observed. These soils locate on the peneplane near the foot of Ontake volcano. Their heights above sea level are similar, about 1,300 m, and their site conditions, topographies and climatic condition are similar, too. The geogenesis of igneous rocks at the foot of Ontake volcano is clarified and it is as follows: The parent material of P1 is quartzporphyry and it is the oldest stratum in this district. The olivine basalt, the parent material of P4, erupted at the chasm of quartzporphyry stratum at the stage of pre-activity of Ontake volcano. The pyroxine andesite, the parent material of P3, is the eruption at the initial stage of volcanic activity of Ontake. Comparing the corresponding horizons of these soils, the decrease of $P_2O_5\text{-org}$ rate to $P_2O_5\text{-t}$, that of $P_2O_5\text{-ap} + P_2O_5\text{-Al} + P_2O_5\text{-Fe}$ rate to $P_2O_5\text{-inorg}$ and the increase of $P_2O_5\text{-ins}$ to $P_2O_5\text{-inorg}$ in the following order as P3, P4 and P1 are clearly noticed (see Table 4). The order of chronosequence of soil genesis of these soils according to WALKER's opinion well agreed with that of their parent materials.

4-5. The characteristics of soil phosphorus form in every soil group

The characteristics of phosphorus form of the red soils and dark red soil are described in 4-4. Those of the other soils are as follows:

The remarkably abundant $P_2O_5\text{-t}$ in the rendzina-like soils from limestone are as mentioned above (see 4-3). Their extraordinary higher $P_2O_5\text{-ac}$ and $P_2O_5\text{-ap}$ and their rates to $P_2O_5\text{-inorg}$ than those of other soils are noted. As to the solubility of $P_2O_5\text{-ap}$ in 2.5% acetic acid described in 2-1, the most part of $P_2O_5\text{-ac}$ in Mt. Ibuki soil and the major part of it in Okinawa P82 soil would be from $P_2O_5\text{-ap}$. These phosphorus forms would be induced by the effect of their parent material and they characterized the phosphorus form of this soil group.

On the brown forest soils, podzolic soils and black soils (ando soils), the marked differences of phosphorus form by the effect of their parent materials, stages of chemical weathering sequence and chronosequence and annual moisture status are observed among the soils belonging to the same soil group as above mentioned. The authors meet some difficulty in getting the exact characteristics common to all soils of each soil group and those distinguished clearly from other soil groups; however, in detail, the abundant $P_2O_5\text{-org}$ in surface horizons and whole profiles of black soils, from 60 to 70% and 60%, respectively, would be the characteristic of this soil group. On every podzolic soil, the increase of $P_2O_5\text{-Fe}$ in B_1 or B horizon compared with that in A horizon (see Table 3) suggests the effect of leaching and accumula-

tion of iron. This fact expresses the characteristic of phosphorus form in the podzolic soils.

4-6. The characteristics of phosphorus form of forest soils (The comparison with agricultural soils)

In comparing the phosphorus forms of the examined forest soils with those of the agricultural soils, field soils and tea soils, in our country, the following differences are observed.

The P_2O_5-t in the surface horizons of forest soils are less than those of the agricultural soils in average. The higher rates of P_2O_5-org to P_2O_5-t , the much lower rates of P_2O_5-ac and very higher rates of P_2O_5-ins to $P_2O_5-inorg$ in the forest soils than those of the agricultural soils are noted. These differences of phosphorus forms between the forest and agricultural soils would be induced by the effect of fertilization on the latter.

5. The amount of phosphorus fractions in whole profile to 50 cm in depth from surface

The authors measured the amounts of fine soil in a certain bulk in natural condition in every horizon of the eleven soils belonging to the brown forest soils, black soils and degraded black soil, and they calculated the amounts of phosphorus fractions in whole profile to 50 cm in depth from surface where the major part of the roots of forest stands developed.

The results are expressed in Table 5.

The amounts of P_2O_5-t are from 0.9 to 1.7 ton/ha in the brown forest soils under *Chamaecyparis obtusa* stands in Kawamoto district, from 0.6 to 1.1 ton/ha in the rather immature brown forest soils under *Pinus densiflora* stands in Fukuyama district, from 4.4 to 5.8 ton/ha in the black soils and 2.5 ton/ha in the degraded black soil. Among the brown forest soils, the amount of P_2O_5-t in the wet type of soil is more abundant than that in the dry type of soil in every district.

The amounts of P_2O_5-ac and P_2O_5-ap except that of P_2O_5-ap in Daimon soil are very poor in every soil. Those of P_2O_5-Al and P_2O_5-Fe are fairly increased but the major part of $P_2O_5-inorg$, about from 60 to 80%, is P_2O_5-ins in every soil. The amount of P_2O_5-org is most abundant among the phosphorus fractions except P_2O_5-ins in every soil.

The availabilities of soil phosphorus fractions to plants are summarized as follows: A good correlation between the amount of P_2O_5-ac and the crop growth or its phosphorus absorption existed on the agricultural soils²⁶⁾³¹⁾. Some agricultural researchers in our country often attach importance on P_2O_5-ac for the determination of the available phosphorus in soil. The major part of P_2O_5-ac in our agricultural soils would be from Ca-phosphates but that in our forest soils from apatite as mentioned above in 4-2. The P_2O_5-ap is somewhat available to plants but it changes gradually into the available form during a long term by its chemical weathering. CHANG and JACKSON¹⁾ said that variscite- and wavelite-like Al-phosphates, stengite- and dufrenite-like Fe-phosphates, barrandite-like Al-Fe-phosphate are somewhat available. However, Al- and Fe-phosphates precipitated on aluminosilicate, gibbsite or iron oxide are most available as Ca-phosphates precipitated on Ca-carbonate and the occluded phosphates are little available.

The exact information on the P_2O_5 amount annually absorbed by forest stands in Japan is little up to the present time, although the total amounts of nutrients in needles, trunks, branches and roots of forest stands were frequently measured by forest ecologists and forest

edaphologists. The authors roughly estimated from their data that the amount of P_2O_5 annually absorbed by established coniferous forest stands in our country would be about from 10 to 30 kg/ha. This value is calculated as follows: The P_2O_5 requirement for the current needle production is estimated by dividing the total P_2O_5 amount in whole needles with their survival years. Furthermore, the roughly estimated P_2O_5 requirements for the annual production of trunks, branches and roots are added. These are less than those for the needle production and they would not have any marked effect on the estimation of total phosphorus requirement of forest stands. It has not yet been clarified whether the annual P_2O_5 requirement of the forest stands for their current production is entirely supplied from soil, or a part of it by the transference of P_2O_5 among the vegetational parts, e. g. from the aged needles to the current one, etc. However, the authors presumed that the whole phosphorus requirement of forest stands would be supplied from soil.

Considering the amounts of P_2O_5 -inorg fractions in whole profile and their availabilities to forest stands, the authors presumed that they are insufficient for the phosphorus requirement of forest stands for a long term in every soil except the black soils.

The phosphorus form in forest soil is not stationary, and it keeps the dynamic changes. The annual litterfalls from forest stands supply the organic matter to the soil. They are decomposed and the mineralized and liberated nutrients are absorbed by the forest stands. A part of the absorbed nutrients is fixed in the stands for their annual production of trunks, branches and roots, but the major part of them return to the soil as litterfalls. The phosphorus and other nutrients cycling between soil and forest stands proceed in such way. The chemical weathering of parent material of soil supplies the available nutrients except nitrogen to the nutrient cycling, and on the other hand a part of them is lost out of it by leaching. At the initial stage of the mineralization of the organic matter and the chemical weathering of parent material of soil the liberated phosphorus form would be Ca-phosphates. They change gradually in the order as Ca-phosphate, Al-phosphate, Fe-phosphate and finally insoluble phosphate during a long term, changing into the more chemically stable form. The phosphorus absorption by forest stands would be done during these changes from Ca-phosphate to Fe-phosphate and the phosphorus changed into the insoluble phosphate is removed out of the phosphorus cycling between soil and forest stands.

As for the phosphorus supply to the forest stands from soil, the authors attach most importance to the decomposing process of soil organic matters, e. g. soil organic phosphorus. The following facts support their opinion: The amount of P_2O_5 -inorg fractions are insufficient for the phosphorus requirement of forest stands for a long term as above mentioned. Furthermore, they accept empirically that the decomposition of soil organic matter is well expressed in low C/N ratio in the wet type of soil, being productive and belonging to mull, and vice versa in the dry type of soil, being unproductive and belonging to mor or moder.

6. The carbon/ P_2O_5 -org ratio as the index of decomposing process of forest soil organic matter

The authors' opinion that the decomposing process of soil organic matter, especially soil organic phosphorus, would be the most effective factor on the phosphorus supply to the forest stands described in 5, still remains as their working hypothesis. They shall clarify it

in their following papers.

The C/N ratio of the surface horizon of forest soil used to be the index of the decomposing process of the forest soil organic matter. In the authors' opinion, carbon/ P_2O_5 -org ratio would be useful for the same object, too. Their basal opinion is as follows: The transformation of phosphorus and nitrogen would be similar during the decomposing process of soil organic matter. A part of the decomposed and mineralized phosphorus and nitrogen would be assimilated by soil microorganisms for their synthesis of microbial substances and the residual of them would be absorbed by forest stands, too. At the same time the carbon of the soil organic matter is decomposed and a part of it is assimilated by soil microorganisms alike to phosphorus and nitrogen. The residue of it is consumed for the energy source of the soil microbial activity and finally lost into the atmosphere as CO_2 . At the initial stage of decomposition where C/N and C/ P_2O_5 -org ratios of soil organic matter are wide, the rates of nitrogen and phosphorus assimilated by soil microorganisms is high, and the rate of carbon consumed by them as their energy source is high, too. Thus the C/N and C/ P_2O_5 -org ratios of soil would be gradually decreased according to the advance of decomposing process of soil organic matter. The rate of decomposed nitrogen assimilated by soil microorganisms gradually decreases according to the gradual decrease of C/N ratio of soil organic matter. With the C/N ratio arrived at about 10, carbon and nitrogen are liberated in the similar ratio and C/N ratio of soil organic matter is kept about 10. Such mechanism of the change of C/N ratio is well known.

In the authors' opinion, although the change of C/ P_2O_5 -org of the soil organic matter is still vague in detail, C/ P_2O_5 -org ratio should keep within a certain value alike to C/N ratio after the decomposing process of soil organic matter well proceeds. Allowing this, a good correlation between C/N and C/ P_2O_5 -org ratios could be expected.

The C/ P_2O_5 -org ratios of the examined soils are expressed in Table 6 and the correlation between C/N and C/ P_2O_5 -org ratios in the surface horizon of every soil in Fig. 4.

In the authors' opinion, as the amount of organic matter and P_2O_5 -org are most abundant and soil microbial activities are most vigorous in the surface horizon of every soil where the effects of the environmental factors are reflected most distinctly, these relations in the surface horizons would be most suitable for the examination of this correlation.

The C/N and C/ P_2O_5 -org ratios expressed very well a correlation where its correlation coefficient $r = 0.939^{**}$. This being so, it is clear that C/ P_2O_5 -org ratio should be able to represent the index of the decomposing process of soil organic matter.

The C/ P_2O_5 -org ratios of the surface mineral horizons of the examined soils expressed remarkable differences ranging from 24 to 885. The C/ P_2O_5 -org ratios of the rendzina-like soils from limestone are from 24 to 41, those of the soils from basalt, pyroxine andesite and basic (andestic) volcanic ash, rich in P_2O_5 -t, are from 49 to 68 and those of the soils from other parent materials, poor in P_2O_5 -t, are from 93 to 885.

It is said that the minimum value of C/N ratio in idealized soil is about 10. However, considering the data gathered by the authors and other forest soil researchers up to the present time, the authors presume that the minimum value of C/N ratios in the surface horizons of our forest soils would be about from 12 to 13. The Mt. Ibuki and Okinawa P 82 soils where their C/N ratios of the surface horizons are from 10 to 11 belong to the rather rare cases in our forest soils.

From the regression curve expressed in Fig. 4, the minimum $C/P_2O_5\text{-org}$ ratios corresponding to the minimum C/N ratios from 12 to 13 in our usual forest soils would be about from 70 to 90.

7. Acknowledgement

The authors desire to express their appreciation to Dr. T. KURATORI and Mr. T. KOJIMA, forest soil researchers in our Experiment Station, Tokyo, for providing them the precious soil samples from Okinawa Islands. They also wish to thank the Forest Soil Division of our Experiment Station, Tokyo, for giving them the soil samples of dry podzol in Mt. Omogo and the officers of this Branch for their encouragement in carrying out this work.