

重量を合せて100とした場合の3者の%を計算し、図8の土性三角図によって土性を決定する。この図に示されている土性の正式名は以下の通りである。

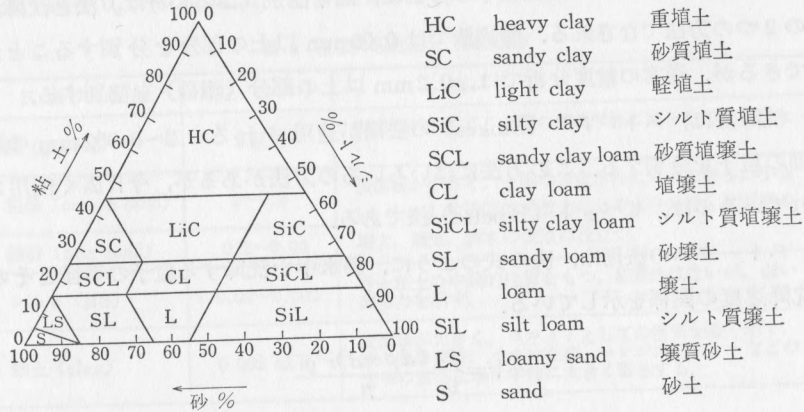


図8 三角図による土性区分

(3) 土性の意義

粗粒質の土壌は耕うん(耘)しやすく、透水性や通気性がよいなど好適な物理性を持つ。しかしこのような土壌では、天然の養分が少ないばかりでなく、施肥された養分の保持力が小さく流亡しやすい。さらに、作物に有効な水分が少ないために高い生産をあげることが困難である。一方、微粒質の土壌は本来養水分の天然供給力が高い。しかし粗孔隙の割合が小さいために透水性や通気性が不良となり、根の障害を受けやすい。またこのような土壌では耕うんが容易でない。中粒質ないし細粒質の土壌では高い生産が得られやすい。したがって土性は土壌の生産力の評価に対する1つの目安となる。

Ⅳ. 土壌の有機成分

1. はじめに

土壌の表面あるいは土壌中の植物・動物・微生物などの遺体は、土壌微生物などにより分解されて土壌の有機成分となる。土壌中の有機成分(土壌有機物 soil organic matter)は、分解して作物の養分の給源となるばかりでなく、土壌中の微生物や動物の栄養およびエネルギーの給源として利用される。この間に土壌有機物はさらに分解し、あるいは重合し、あるいは分解困難な有機構成成分と反応する。さらに、土壌動物や微生物が絶えず代謝生成物を排出するとともに、それらの遺体もまた土壌の有機構成成分の中に加わっていく。かくして、土壌有機物は生きた土壌の活力の源となり、無機体の土ではなく、森林、原野の土壌となり、あるいは農耕可能な土壌を形成する。

表7 各種土壌の全炭素量, 全窒素量の例¹⁾

土 壤 ²⁾	測定試料数	全炭素量 (%)		全窒素量 (%) ³⁾	
		平均 (最高~最低)	平均 (最高~最低)	平均 (最高~最低)	平均 (最高~最低)
日本 褐色森林土 B _B 型 B _D 型 赤黄色土 黒色土 低位泥炭土 高位泥炭土 無機質水田土耕土層	8	5.51 (10.7~1.23)	0.27 (0.57 ~0.02)		
	24	10.1 (18.9~4.75)	0.64 (1.29 ~0.31)		
	9	2.25 (4.39~1.01)	0.156 (0.227~0.084)		
	46	11.8 (26.3~2.73)	0.66 (1.64 ~0.14)		
		40.1 (56.5~21.7)	1.92 (2.64 ~0.93)		
		50.0 (55.4~45.6)	1.16 (2.23 ~0.61)		
	19	1.87 (3.56~0.87)	0.19 (0.30 ~0.08)		
タイ グラムソル・レンジナ 褐色森林土 赤褐色ラテライト性土 赤黄色ラトゾル 赤黄色ポドゾル性土	4	2.49 (3.03~2.00)	0.207 (0.246~0.148)		
	3	1.81 (1.95~1.65)	0.160 (0.181~0.137)		
	5	1.61 (2.08~0.55)	0.106 (0.168~0.059)		
	3	0.74 (1.24~0.32)	0.056 (0.094~0.033)		
	5	2.09 (2.38~1.79)	0.112 (0.164~0.071)		

1) 熊田: 土壌有機物の化学(1981)より抜粋
 2) 泥炭土および水田土を除きいずれもA層土壌
 3) 土壌中の窒素の大部分は有機態窒素である。

土壌中の有機物を腐植 (humus) と呼ぶこともある。腐植の定義は幾分あいまいで、土壌有機物と同義語で用いられる場合もある。ここでは、生物体自体とまだ明確な形を残している比較的新鮮な生物遺体を除く、土壌中および土壌表面の有機物を腐植と呼ぶこととする。したがって土壌の有機物の大部分は腐植といえる。また腐植物質 (humic substances) の語も、腐植と同義語で用いられることがある。しかし一般には、腐植のうちで暗色無定形の高分子物質を腐植物質と称し、それ以外の腐植を非腐植物質 (nonhumic substances) と呼ぶ。

2. 腐植の集積形態

地球上の生体量 (biomass) の 98% 以上は植物体で、動物は約 0.6%、微生物は約 1% とされている。生体量の大部分を占める樹木の落葉・落枝や、枯死した樹木、草などは地表面に落ちると、動物により解体されたり、あるいは微生物により次第に分解されながら、腐植として土壌に集積していく。その分解や集積の過程は、水分や温度によって大きく左右される。

腐植は、その生成環境から、陸成腐植、半陸成腐植、水成腐植に大別される。陸成腐植は陸地で集積した腐植、半陸成腐植は湿地や沼沢地などで集積した腐植、水成腐植は湖や海の水底で集積した腐植である。

陸成腐植の集積形態を、モル (mor, または粗腐植) 型、モーダー (moder) 型、ムル (mull) 型に分ける。モーダー型はモル型とムル型の中間型である。

モル型は、地表面にほとんど有機物からなる粗腐植層 (A_0 層あるいは O 層) があり、その下の有機物を含む土壌層 (A 層) は腐植の含量が低く、層の厚さが薄い。 A_0 層は 3 層に区別される。最上層 (L 層または A_{00} 層) は、落葉落枝が原形のまま残っている層で、中間層 (F 層) は、落葉落枝がかなり腐朽したり破碎されて繊維状になっているが、なお植物組織が識別できる黄褐色ないし赤褐色からなる層である。 F 層は白色の菌糸網で充たされている場合がある。最下層 (H 層) は、さらに腐朽が進み、植物遺体の組織は破壊され、無定形で暗褐色などの腐植からなる層である。 L, H, F の 3 層を合わせて A_0 層と呼ぶ場合と、 H, F 層のみを A_0 層とし、 L 層を A_{00} 層として分けて呼ぶ場合とがあ

る。モル型は、森林土壌に多くみられ、特に寒冷湿潤な地域の針葉樹林では A_0 層の発達が著しい。

ムル型は、地表面での植物遺体の集積が極めて少なく、 L 層が主体で、 F 層の発達は極めて弱いか、まったくみられない。その下には腐植と無機物がよく混りあって暗黒褐色を呈する厚い A 層がみられ、その腐植含量は高い。ムル型は草原土壌、火山灰土、適潤性褐色森林土などによくみられる。

モーダー型は、モル型とムル型の中間的なものであるが、これらの型に明確な区分があるわけではない。

半陸成腐植の代表的なものは泥炭 (peat) である。寒冷地方の湿地帯などでは、ヨシ、スゲ、ヌマガヤ、ミズゴケなどの植物遺体が厚く堆積して泥炭層を形成する。泥炭層の地下水位が下って、さらに酸化腐植化が進んだものが黒泥 (muck) である。

なお水成腐植にはディ (dy), サプロペル (sapropel), ギッチャ (guttja) などと呼ばれるものがある。

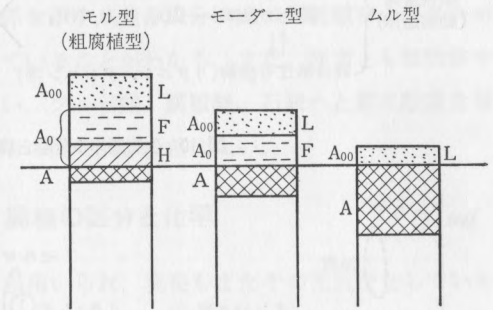


図 9 陸成腐植の集積型

L, F, H 層を合わせて A_0 層と呼ぶこともある。

3. 有機物の分解と腐植化

生物遺体の一部は土壌動物によって解体されるとともにその体内で分解されるが、大部分は各種微生物により分解される。微生物による分解の難易は遺体の化学成分により大きく異なり、炭水化物、蛋白質、脂肪などは速かに分解されるが (易分解性有機物)、リグニン、タンニン、テルペン類などは比較的分解を受け難い (難分解性有機物)。

炭水化物や蛋白質は微生物によって分解され、大部分は二酸化炭素、水、アンモニアとなるが、一部は菌体成分として再構成され、微生物の死滅とともに

に腐植として土壤中に再放出される。土壌中の炭水化物中の構成糖、蛋白質の構成アミノ酸などは、微生物起源のものが多い。一万年以上を経た火山性埋没腐植層の中にも多量の炭水化物が見出されるが、年代が古くなるにつれ多糖類中の構成ウロン酸含量が多くなる。また微生物は、各種ポリフェノール類、キノン類その他の色素なども生産するので、これらは酸化重合を受けて腐植物質

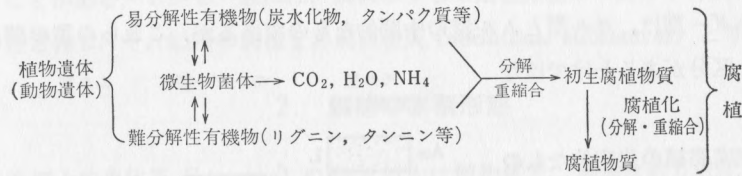


図 10 生物遺体の分解と腐植化

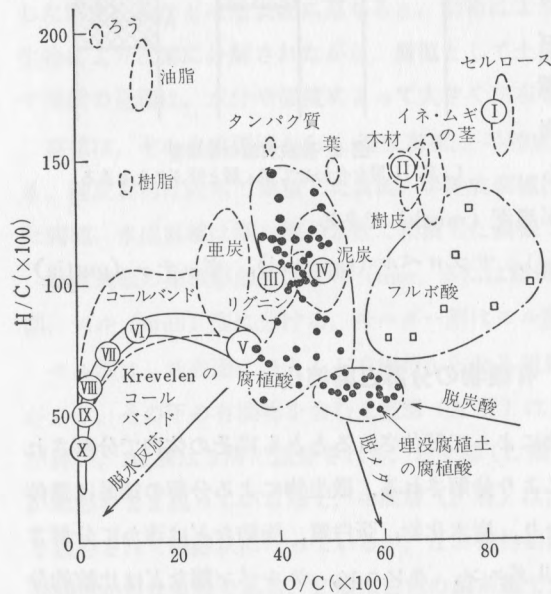


図 11 フルボ酸、腐植酸、石炭および各種植物成分の H/C - O/C の関係 (Kuwatsuka ら, 1978; 熊田, 1981)

I セルロース, II 木材, III リグニン, IV 泥炭, V 褐炭, VI 低品位瀝青炭, VII 中品位瀝青炭, VIII 高品位瀝青炭, IX 半無煙炭, X 無煙炭

の給源となる。

一方、リグニン、タンニンなどの芳香族高分子のポリフェノール類も、植物遺体中の物質そのままの形で存在するのではなく、部分的には速かに分解したり重合する。また、これらの物質に、さらにペプチドや多糖類などが結合して、次第に複雑な高分子重合物を形成していく。

土壌中の有機物は、長い年月の間にさらに部分的な分解と重縮合を重ねながら、酸化による脱水

素により、共役二重結合が増加し、縮合環を形成し、化学的に安定な暗色無定形な高分子重合物の混合物すなわち腐植物質を形成していく。腐植の大部分は、土壌の粘土鉱物に吸着または結合した状態で存在しているが、その一部は極めて強固に結合している。このように生物遺体が分解し、腐植物質を生成していく過程を腐植化 (humification) または腐熟化 (maturation) と呼ぶ。また、腐植化の比較的初期の腐植を初生腐植物質と呼ぶこともある。

図 11 に、腐植酸、フルボ酸と石炭および各種植物成分の炭素含量に対する水素含量と酸素含量との間の関係を示す。他の成分に比べ腐植酸およびフルボ酸の元素組成が広範囲に分布していることがわかる。また、両者とも植物体や植物成分よりも水素含量が少ない。フルボ酸、腐植酸、石炭へと順次酸素含量が少なくなるが、水素含量は三者の間で大きい差はない。

4. 腐植の区分と化学

腐植を研究する場合、古くから用いられ、現在もまたその主流をなしている抽出・分別の方法は、酸、アルカリの溶液に対する溶解性の相違に基づいて区分する方法である。

すなわち、土壌から粗大有機物を除いたあと、土壌を水酸化ナトリウム、ピロリン酸ナトリウムなどの溶液またはその混合溶液で抽出すると、腐植の 60~80% が抽出され、暗赤褐色の溶液が得られる。このアルカリ抽出液に塩酸または硫酸を加えて強酸性にすると黒褐色の綿屑状のものが沈殿し、上澄液は黄色ないし橙色となる。酸によって沈殿する腐植画分を腐植酸 (humic acid, 地球化学の分野ではフミン酸と呼ぶ) または腐植酸画分と呼び、酸を加えても沈殿しない画分をフルボ酸 (fulvic acid) または

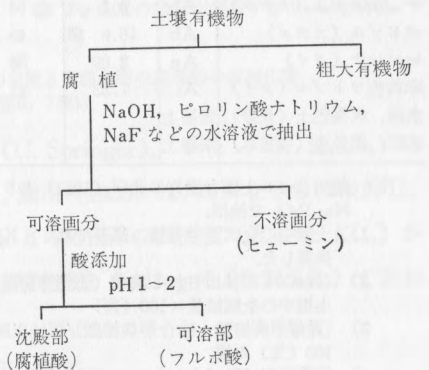


図 12 腐植の分別

フルボ酸画分と呼ぶ。腐植酸画分またはフルボ酸画分を、さらに脱塩したり非腐植物質を除いたもののみを腐植酸またはフルボ酸と呼ぶこともあり、必ずしも統一されていない。土壌からアルカリ溶液で抽出されない腐植画分をヒューミン (humins) と呼ぶ (図 12)。

腐植酸の中でエタノールに可溶の画分をヒマトメラン酸 (hymatomelanic acid) として区分することもある。また、土壌からエタノール・ベンゼン混液

表 8 各種土壌の腐植組成

土 壤	層位	全炭素量 ¹⁾ (%)	腐植抽出割合 ²⁾ (%)	沈殿部割合 ³⁾ (%)	遊離形腐植割合 ⁴⁾ (%)		腐植酸の型	
					腐植酸	フルボ酸	遊離形	結合形
赤色土 (伊勢)	F ₁	47.8	51	69	90	93	Rp	Rp
	F ₂	33.7	71	70	98	98	Rp	P±
	A	2.22	79	47	95	94	Rp	B
	B	0.91	70	26	79	85	Rp	B
	C	0.70	62	9.9	49	80	Rp	B
ポドゾル (イギリス)	H	12.4	37	54	94	97	A	A
	A ₁	6.61	49	76	97	95	A	A
	A ₂	0.57	46	42	92	97	B±	P ₀
	B ₁	2.69	77	19	61	74	P±	P+
	B ₂	3.76	84	23	85	91	P+	P++
	B ₂	1.67	87	27	88	94	P+	P++
赤黄色土 (東山)	A	7.14	70	59*	98	97	P ₀	B
黒色土 (猪之頭)	A	27.0	67	55*	95	98	A	A
チェルノゼム (カナダ)	Ah	3.1	54	70*	51	83	B±	A
ポドゾル (カナダ)	Ah	18.6	45	56*	85	88	P+	P+
レンジナ (タイ)	Ap	2.89	38	62	3	61	Rp	A
赤黄色ラトゾル (タイ)	A ₁	7.33	41	66	89	94	A	A±
水田, 灰褐色土 (長野)	表層上			59*	87	93	Rp	P ₀
水田, 黒色土 (各務原)	表層上			74*	90	96	B	A

(注) 熊田恭一: 土壌有機物の化学 (1981) より抜粋集録。0.1N NaOH で抽出したのち 0.1N Na₄P₂O₇ で抽出。

- 1) 土壌中の全炭素含有量, 原著で 0.1N KMnO₄ 滴定量として表わしてあるものは, C 量に換算した。
- 2) [NaOH で抽出される腐植 (遊離形腐植) + Na₄P₂O₇ で抽出される腐植 (結合形腐植)] / 土壌中の全腐植量 × 100 (%)
- 3) [遊離形腐植酸 + 結合形腐植酸] / 両抽出腐植 × 100 (%). * は遊離形腐植酸 / 遊離形腐植 × 100 (%) の値。
- 4) 遊離形腐植酸 (またはフルボ酸) / [遊離形腐植酸 (またはフルボ酸) + 結合形腐植酸 (またはフルボ酸)] × 100 (%)

で抽出した脂溶性物質をビチューメンと呼ぶことがある。

これらの化学的実態は、近年、分析機器および技術の急速な発達とともに次第に明らかにされつつあるが、いずれも大部分が複雑な構造の高分子物質の混合物であるため、不明な点が多い。

(1) 腐 植 酸

腐植酸は、黄褐色ないし黒褐色の無定形の粉末として容易に得られる。土壌中の腐植物質を代表するものと考えられ、古くから多くの研究が行われてきた。

腐植化の進行とともに、腐植酸の色調が黄褐色から次第に黒色へと変わるこ

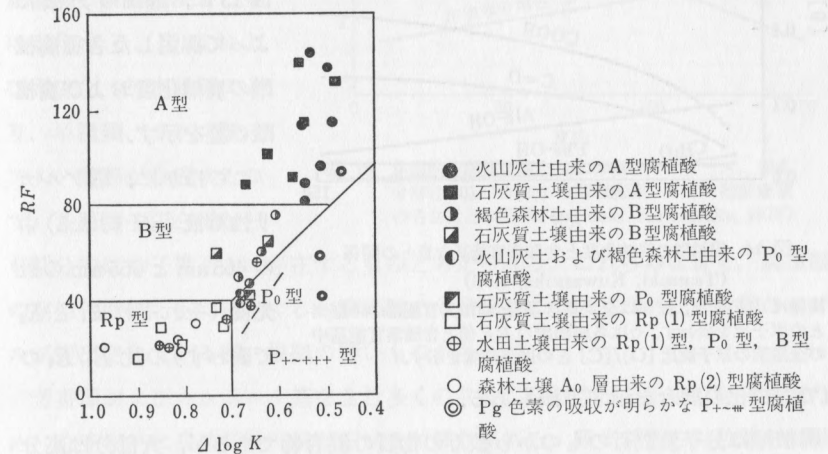


図 13 腐植化度に基づく腐植酸の分類と各種土壌の腐植酸の腐植化度 (Kuwasuka ら, 1978, 熊田, 1981)

とに着目し、ドイツのスプリンガー (U. Springer), シモン (K. Simon) らは黒色化の度合で腐植化度を表わした。熊田 (1955) は、これをさらに検討し、0.1N NaOH 中の腐植酸溶液の 400nm と 600nm の吸光度 (K₄₀₀ と K₆₀₀) から、腐植化度を以下のように、RF (相対色度) と Δlog K (色調係数) で表わした。

$$RF = \frac{\text{腐植酸溶液の } K_{600}}{\text{同溶液 30ml 当たりの 0.1N KMnO}_4 \text{ の消費量 ml}} \times 1000$$

$$\Delta \log K = \log K_{400} - \log K_{600} [= \log(K_{400}/K_{600})]$$

RF は腐植酸単位量当たりの色の濃さを意味し、 $\Delta \log K$ は腐植酸の吸収スペクトルの波長軸に対する傾きの近似値、すなわち色の深さを意味する。腐植酸化度の進行にともない、RF は大きくなり、 $\Delta \log K$ は小さい値を示す。

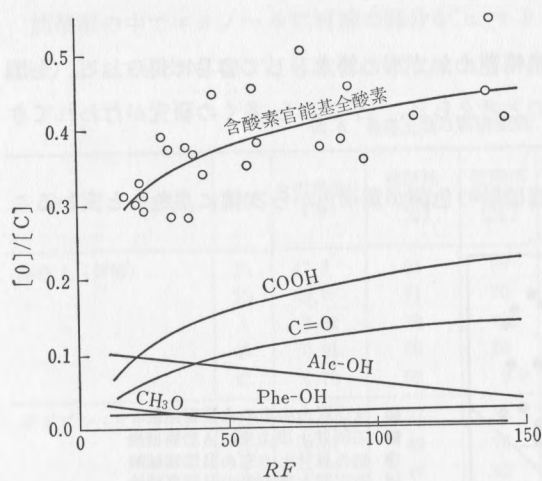


図 14 腐植酸の腐植化度と含酸素官能基含量との関係 (Tsutsuki, Kuwatsuka, 1978)

横軸は RF 値を、縦軸は全炭素含量と含酸素官能基中の酸素との原子比を表わす。○は各腐植酸の RF 値と含酸素官能基中の全酸素の原子数比 [O]/[C] との関係位置を示す。

値で腐植化の度合を示す方法もある。

腐植酸は分子量数百のものから数万の物質の混合物であるが、大部分は高分子物質である。土壌の種類あるいは腐植酸の腐植化度により異なるが、平均分子量は、数千から数万とされている。しかし、腐植酸は高分子電解質の混合物で、その溶液の条件によって分子の形や粒径が変化するため、絶対分子量の測定は極めて困難である。

Felbeck (1971) によると、腐植酸の 50~55% はアミノ酸、ヘキソサミン、多環芳香族、酸素含有官能基からなり、残りは、化学構造未知の、原子数比が [C]/[H] = 1 で 2 重結合の多い腐植物質特有な吸収を有する部分であろうとしている。

熊田はさらに、個々の腐植酸の RF と $\Delta \log K$ の値から、腐植酸を A 型、B 型、Rp 型、P 型の 4 つの型に分類した。図 13 に、熊田の方法によって測定した各種腐植酸の腐植化度および腐植酸の型を示す。

このほかに、弱アルカリ性溶液 (pH 約 8.5) 中の 465 nm と 665 nm の吸光度 (それぞれ E_4 と E_6 で表わす) の比 E_4/E_6 の

構成芳香環としては、ベンゼン環のほかにナフタレン、アントラセンその他の多環式縮合環も存在する。最近の研究によると、縮合環の数は 4~5 箇くらいまでとされている。元

素組成やカルボキシル基、カルボニル基、フェノール性およびアルコール性水酸基、メトキシル基、エステル、アミノ基などの官能基の含量は、腐植酸の腐植化度とともに変化する (図 14 および図 15)。

加水分解により、単糖類、ウロン酸、アミノ酸等が生成するので、多糖類や蛋白質なども部分的に分子構造中に存在するものと考えられる。これらの含量も、腐植酸の腐植化度とともに変化する。腐植酸の分子構造については、従来各種のモデルが提出されているが、根拠の薄いものが多い。

芳香環およびカルボニル基を含む多くの共役二重結合が分子中に存在するため、分光学的に長波長の可視部領域まで吸収がある。吸光係数の対数値を縦軸にとると、吸収スペクトルはほぼ直線になる。この直線の傾きは腐植酸の種類により異なる。腐植酸の化学構造中の不飽和度と腐植酸の腐植化度の間には、高い正の相関関係 ($r=0.898^{***}$) がみられる。

(2) フルボ酸

一般に土壌中には、フルボ酸と腐植酸はほぼ同程度の量が含まれており、土壌の下層に行くほどフルボ酸の占める割合が高くなる。フルボ酸の大部分は易分解性有機物から成り、植物の栄養や微生物の繁殖にとって重要な給源となる。また、土壌中の鉄やアルミニウムの移動に大きく関与するものと考えられ

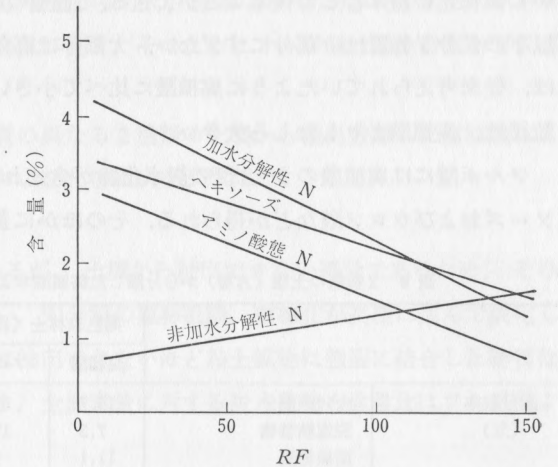


図 15 腐植酸の腐植化度と加水分解性ヘキソース、加水分解性および非加水分解性窒素、アミノ酸態窒素の各含量との関係 (Tsutsuki, Kuwatsuka, 1978)