中性子放射化分析による生体中微量元素の研究 (第 1 報)
大麻の機器的多元素放射化分析¹⁾

志野木正樹, 村井康子, 森 五彦,^{2a)} 武内孝之^{2b)}
神戸女子薬科大学,^{2a)} 京都大学原子炉実験所^{2b)}

The Study of the Trace Element in Organisms by Neutron Activation Analysis. I.
Multielement Instrumental Neutron Activation Analysis of Cannabis

MASAKI SHINOBI, YASUKO MURAI, ITSUHIKO MORI^{2a)} and TAKAYUKI TAKEUCHI^{2b)}
Kobe Women's College of Pharmacy^{2a)} and Research Reactor Institute, Kyoto University^{2b)}

(Received April 17, 1974)

Examinations were made on optimal experimental conditions for instrumental determination of various elements in cannabis by neutron activation analysis, without any radiochemical separation, and the following conditions were found to be useful. Irradiation samples to be used are about 300 mg of the leaves or stem bark, and about 100 mg of the root. For soil sample, about 50 mg is used for the determination of short half-life nuclides and about 300 mg for long half-life nuclides. For short half-life nuclides, the samples are irradiated for 1 min, activity is measured for 200 sec after a decay of 3 min, and for 400 sec after a decay of 10 min. For long half-life nuclides, the samples are irradiated for 60 min and the activities are measured for 4 K sec after 1 week and for 10 K sec after 1 month. Use of supersonic waves is also convenient for cleansing of the samples. Thirty-five kinds of interesting elements were determined by this method from cannabis cultivated in Maizuru area.

生物と微量元素との関係について, Bowen はその著書³⁾で 1965 年までの多くの報文を紹介している. 一方, 1970 年頃から, 無機化学と生物化学の境界領域として生物無機化学 (bioinorganic chemistry) とよばれる分野が注目されている.

一般に生体中には数多くの微量元素が存在すると予想され, 現在までに一般植物体中から検出され, 報告されている元素は, 16 の生元素 (植物体における生元素) を含む約 60 種あまりであり,⁴⁾ このことは, 地球上に存在するすべての岩石・鉱物中には, すべての元素が存在するという Noddack の “元素普存説”⁵⁾を想起させる. また, 1972 年に Morrison ら⁶⁾は, 植物生体に微量の Fe, Cu, Zn, Mn, B, Na, Co, Mo および V が必要であり, 動物生体には Fe, I, Ca, Zn, Mn, Co, Mo および Se のほかに F, B, Ba および Sr も必要であると述べているが, しかし多くの元素は必要以上に存在すると有害な影響を与えるとも報じている.

このような多数の元素を分析するには, 放射化分析が最も適した方法であり, 唯一の手段である. 近年, 本法の生体試料への応用は急激に増加し, 一般植物の放射化分析についても多数報告されている. 竹尾ら⁷⁾は, 茶葉を中性子照射後, 超遠心分離により 5 分画にわけそれぞれの分画について Cu, Mn, Br, Na, K を定量し, Cu および Mn のタンパクとの complex について検討しており, Souliotis⁸⁾は, 植物生長に重要な役割をする微量元素 Cu, Zn を, オリーブ, とうもろこしなど 8 種類の植物から定量している.

1) 日本薬学会近畿支部第 23 回総会で発表, 京都, 1973 年 11 月.

2) Location: a) Motoyama-kitamachi, Higashinada-ku, Kobe; b) Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka.

3) H.J.M. Bowen, "Trace Elements in Biochemistry," Academic Press, London and New York, 1966.

4) 服部明彦編, “海洋科学基礎講座 11 巻 海洋生化学,” 東海大学出版会, 東京, 1973.

5) W.I. Noddack, *Angew. Chem.*, **47**, 637 (1934); *idem, ibid.*, **49**, 835 (1936).

6) G.H. Morrison, N.M. Potter, Abstracts of Papers, IUPAC, International Congress on Analytical Chemistry, Kyoto, April, 1972, p. 441.

7) T. Takeo, M. Shibuya, *Radioisotopes*, **20**, 25 (1971).

8) A.G. Souliotis, *Analyst*, **94**, 359 (1969).

Fourcy ら⁹⁾ は、放射化分析による植物の無機成分の研究についての応用をまとめており、また高分解能の Ge (Li) 検出器を使用した非破壊放射化分析による Mn, K, Cu など 15 元素を種々の植物体から定量した報告¹⁰⁾ もある。一方、Pappas ら¹¹⁾ は 1963 年に 4 ケ国のアヘンについて、Au と希土類元素を分析し、これらの含有量の相対的な相違から地域的な特徴のあることを報告し、Perkons¹²⁾ および Rayudu ら¹³⁾ は、20 ケ国から採取した 30 種のアヘンを分析し、13 元素を定量して、それぞれの元素の有無により産地を推定している。最近では Mo-Hsiung Yang ら¹⁴⁾ が 3 ケ国 8 品種のタバコ葉から 13 元素を定量し、その水銀含有量の相違から産地推定の可能性を論じている。

このように微量元素の定性および定量結果は種々の立場に興味あるデータを提供している。著者らは、食物連鎖（無機元素サイクル）的にも興味ある植物で、しかも薬学的にも重要である薬用植物中の微量元素含有量を明らかにし、種々検討しているが、本報ではマリファナとして知られている幻覚剤で、その入手が比較的容易であるため、乱用が問題となっている大麻の非破壊中性子放射化分析を行なうために最も都合の良い条件を検討し、若干の知見を得たので報告する。

実 験

多数の試料について多種類の微量元素を同時定量するために、1 つの標準試料で検出されるすべての元素を定量することができる、モノスタンダード法¹⁵⁻¹⁸⁾ による非破壊熱中性子放射化分析法を応用した。

なお、データ処理および定性、定量は電子計算機 (OKITAC 5090H 型) を使用し、武内らの方法¹⁵⁾ により解析した。

試料および標準試料の調製 試料は、1972 年 9 月に採取した舞鶴産大麻全長 130 cm と 140 cm の 2 本を、頂上部の新芽部分を上葉部とし、残りの茎の上部を中葉部、下部を下葉部とし、さらに茎の皮および根の 5 部位

Fig. 1. Typical Gamma-ray Spectra of Upper Leaves of Cannabis irradiated for 1 Minute and counted for 3 Minutes after a Decay of 3 Minutes
(SESC; single escape peak DESC; double escape peak)

- 9) A. Fourcy, M. Neuburger, *Bull. Soc. Chim. France*, **11**, 4681 (1968).
- 10) W.A. Haller, L.A. Rancitelli, T.A. Cooper, *J. Agr. Food Chem.*, **16**, 1036 (1968).
- 11) A.C. Pappas, J. Alsted, G. Lunde, *Radiochemica Acta*, **1**, 109 (1963).
- 12) A.K. Perkins, R.E. Jervis, Proc. 1st National Symposium on Law Enforcement Science and Technology, Chicago, March, 1967, p. 257.
- 13) G.V.S. Rayudu, B. Tiefenbach, R. E. Jervis, Trans, 14th Annual Meeting of the ANS/CNA, Toronto, June, 1968, p. 81.
- 14) M.-H. Yang, S.-F. Lai, S.-J. Yeh, *Radioisotopes*, **22**, 118 (1973).
- 15) T. Takeuchi, T. Hayashi, *Annu. Rep. Res. Reactor Ins. Kyoto Univ.*, **3**, 9 (1970).
- 16) T. Takeuchi, T. Hayashi, Y. Kusaka, *Annu. Rep. Res. Reactor Ins. Kyoto Univ.*, **4**, 63 (1971).
- 17) T. Takeuchi, T. Hayashi, *Annu. Rep. Res. Reactor Ins. Kyoto Univ.*, **5**, 49 (1972).
- 18) T. Takeuchi, M. Shinogi, *Annu. Rep. Res. Reactor Ins. Kyoto Univ.*, **6**, 68 (1973).

に区分した。なお、根に付着した土も参考のために試料とした。

葉および根試料は、精製水による 30 秒間の超音波洗浄後、蒸留水で噴射洗浄を行ない、凍結乾燥後、メノウ製乳鉢で 80 メッシュ以下に粉碎し、よく混合した。茎は同様に洗浄、乾燥後、細かく刻んだ。土は風乾後、メノウ製乳鉢で 80 メッシュ以下に粉碎した。各試料を粉末にして保管しておいたので秤量する時点において乾燥状態が全試料一定ではないので、あらためて全試料を電気定温乾燥器により 45° で 45 時間乾燥した。その後精秤し、よく洗浄した 4×3 cm のポリエチレン袋に溶封し、さらに 6×4 cm のポリエチレン袋で 2 重に封入した。照射試料は約 350 mg (根は 100 mg) とし各 2 個ずつ作製して 1 分および 5 分照射の試料とした。

モノスタンダード法の標準試料として、短寿命核種 (半減期が 1 日以内) には Au, 長寿命核種 (半減期が 1 日以上) には Co を用いた。それぞれ調製の簡単な、Al-0.1% (w/w) Au 合金, および Al-2.0% (w/w) Co 合金 フォイル (厚さ 0.1 mm, Belgium Bureau Central de Mesures Nucleaires 社製) を直径 1 cm の円型に切りぬき使用した。Au の重量は約 24 μ g, Co の重量は約 480 μ g であった。

中性子照射 試料をおのおの標準試料とともに照射用カプセルにつめ、京都大学原子炉実験所の圧気輸送管 No. 1 (熱中性子束 1.9×10^{13} neutron/cm²/sec) において、1 分、5 分、および 1 時間照射を行なった。なお、1 分および 5 分照射した試料を測定後、各シリーズにまとめて 1 時間照射の試料とした。

Fig. 2. Typical Gamma-ray Spectra of Upper Leaves of Cannabis irradiated for 1 Minute and counted for 400 Seconds after a Decay of 30 Minutes (SESC; single escape peak DESC; double escape peak)

Fig. 3. Typical Gamma-ray Spectra of Upper Leaves of Cannabis irradiated for 60 Minutes and counted for 4K Seconds after a Decay of 7.7 Days (DESC; double escape peak)

Fig. 4. Typical Gamma-ray Spectra of Upper Leaves of Cannabis irradiated for 60 Minutes and counted for 20K Seconds after a Decay of 32.8 Days

γ線スペクトロメトリー 照射終了後、試料をカプセルからとり出し外袋を取り除いて、どのような化学分離操作も行わずに直接γ線の測定を行なった。短寿命核種測定のために1分および5分照射した試料は照射終了後、3分後に200秒、さらに30分後に400秒測定した。長寿命核種測定のために1時間照射した試料は、3日後に1K秒、1週間後に4K秒、2週間後に8K秒、さらに1カ月後には20K秒測定した。使用した測定器は、24.7 mlの同軸型 Ge(Li) 検出器 (ORTEC 社製) を装備した 4096 チャンネル波高分析器 (Nuclear Data 社製)、および1カ月後の測定には42.7 mlの同軸型 Ge(Li) 検出器 (ORTEC 社製) を装備した 4096 チャンネル波高分析器 (Northern Scientific社製) を使用し、β線吸収板として、厚さ1 cmのアクリル板を用いた。

得られたγ線スペクトルの代表的な例を、Fig. 1—4 に示す。

結 果

照射時間と冷却時間の関係から、検出された核種の結果を Table I に示す。

同一元素で、2本以上のエネルギーの異なるγ線を放出するもの、および異なる測定時に2回以上検出された核種の定量には、それぞれ定量誤差の最も小さいγ線エネルギーを採用した。以上の結果、大麻(葉、茎、根)より検出された35元素を含む全検出元素41元素とその定量値を Table II に示す。

TABLE I. Nuclear Data for Elements Determined in Cannabis

Measurement	Irradiation time	Decay time	Count interval	Radioisotope measured	Half-life	Best γ-ray energy used. (MeV)
1.	1.0 min and 5.0 min	3.0 min	3.0 min	²⁸ Al	2.31m	1.779,
				¹³⁹ Ba	82.9m	0.166
				⁴⁹ Ca	8.80m	3.084
				³⁸ Cl	37.3m	1.643, 2.168
				⁶⁰ Cu	5.15m	1.039
				¹⁶⁵ Dy	139m	0.095
				^{116m} In	54.2m	1.293, 2.111
				²⁷ Mg	9.45m	1.014
				⁵⁶ Mn	2.58 h	0.847, 1.811
				⁵¹ Ti	5.80m	0.320
				⁵² V	3.76m	1.434

2.	1.0 min and 5.0 min	30 min	400 sec	¹³⁹ Ba	82.9m	0.166
				³⁸ Cl	37.3m	1.643, 2.168
				¹²⁸ I	25.0m	0.443
				^{116m} In	54.2m	1.293, 2.111
				⁴² K	12.5 h	1.525
				²⁷ Mg	9.45m	1.014
				⁵⁶ Mn	2.58 h	0.847, 1.811
				²⁴ Na	15.0 h	1.369
				¹⁹⁸ Au	2.70 d	0.412
				⁸² Br	35.5 h	0.777, 1.317
3.	60 min	1 week	4 K sec	^{115m} Cd	43.0 d	0.485
				¹⁴¹ Ce	33.0 d	0.145
				¹⁹² Ir	74.2 d	0.317, 0.468
				¹⁴⁰ La	40.2 h	0.487, 1.596
				²⁴ Na	15.0 h	1.369
				⁴⁶ Sc	83.9 d	0.889, 1.121
				¹⁵³ Sm	47.0 h	0.103
				⁸⁶ Rb	18.7 d	1.079
				^{110m} Ag	253 d	0.658
				¹³¹ Ba	12.0 d	0.496
4.	60 min	1 month	20 K sec	¹⁴¹ Ce	33.0 d	0.145
				⁶⁰ Co	5.26 y	1.173, 1.333
				⁵¹ Cr	27.8 d	0.320
				¹³⁴ Cs	2.05 y	0.796
				¹⁵² Eu	12.7 y	0.344, 1.408
				⁵⁹ Fe	45.0 d	1.099, 1.292
				¹⁵³ Gd	242 d	0.097
				¹⁸¹ Hf	42.5 d	0.482
				²⁰³ Hg	46.9 d	0.279
				¹⁹² Ir	74.2 d	0.317, 0.468
				¹⁷⁷ Lu	6.74 d	0.208
				⁸⁶ Rb	18.7 d	1.079
				¹²⁴ Sb	60.4 d	0.603, 1.691
				⁴⁶ Sc	83.9 d	0.889, 1.121
				¹⁸² Ta	115 d	1.189
				¹⁶⁰ Tb	72.1 d	0.879
				²³³ Th	27.0 d	0.312
				¹⁶⁹ Yb	32.0 d	0.198
				⁶⁵ Zn	245 d	1.115

TABLE II. Elemental Concentration in Cannabis Bred in Maizuru (ppm)

	Leaves			Stem bark	Root	Soil
	Upper	Middle	Lower			
Ag	—	—	0.12	—	—	—
Al	130	140	170	68	5300	41000
Au	0.0020	0.0023	0.0051	0.0014	0.10	0.69
Ba	46	70	92	90	100	160
Br	2.0	2.9	2.7	1.1	2.8	3.2
Ca	21000	24000	54000	9700	5700	7800
Cd	—	—	540	2.2	—	—
Ce	0.87	1.9	1.1	0.13	7.5	23
Cl	1500	1800	1800	2800	230	—
Co	0.11	0.11	0.099	0.32	1.9	6.1

Cr	—	—	—	—	—	80
Cs	α)	0.011	0.013	—	0.26	3.0
Cu	6.0	13	300	—	—	—
Dy	—	—	—	—	0.39	—
Eu	0.0082	0.016	0.015	—	0.12	0.49
Fe	130	220	210	53	2900	26000
Gd	—	—	—	—	19	140
Hf	—	—	—	—	—	3.4
Hg	0.093	0.14	0.30	0.055	—	—
I	—	—	—	—	5.3	—
In	0.11	0.14	2.4	0.20	0.24	α)
Ir	0.000032	0.00012	0.000066	0.00027	—	—
K	20000	17000	19000	22000	9600	14000
La	0.61	1.5	1.7	0.12	3.9	14
Lu	—	—	—	—	—	0.47
Mg	5000	4100	10000	2200	6500	23000
Mn	110	120	150	54	100	140
Na	46	68	88	210	940	6500
Pr	—	—	—	430	—	—
Rb	4.4	5.6	3.7	5.5	8.3	45
Ru	—	—	α)	1.3	—	—
Sb	0.035	0.055	0.10	0.61	1.4	0.50
Sc	0.012	0.017	0.18	0.016	1.4	8.3
Sm	0.54	0.16	0.18	—	—	6.1
Ta	—	—	—	—	—	0.28
Tb	0.0067	0.013	α)	α)	α)	0.91
Th	—	—	—	—	—	5.0
Ti	—	—	—	—	580	4500
V	—	—	—	—	8.7	61
Yb	—	—	—	—	—	0.41
Zn	38	40	33	41	84	4700

α) only qualitative

考 察

多数の試料について多種類の微量元素を非破壊放射化分析により同時定量するためには適当な実験条件が必要であり、以上の実験結果から、最も良い実験条件を検討し、また、実験結果についても考察した。

試料調製の検討

a. 試料洗浄について 放射化分析における試料洗浄に関し、詳細な報告はない。しかし、洗浄による成分の溶出や、洗浄不足による汚染の誤差が生じる懸念があり、完全な洗浄は非常に困難である。したがって各試料について最適と思われる一定条件を定める必要があり、今回は多数の植物試料について、その葉の表裏に付着したチリを落とす目的で超音波洗浄法を検討した。試料は水耕法により2週間栽培し、さらに2日間⁶⁰Coを根から吸収させた茶臼インゲン豆の葉を使用し、ビーカーに精製水 100 ml と試料を入れ、30 秒間および 60 秒間の超音波洗浄を行ない、この洗浄液を 5 ml 採取して井戸型 NaI (TI) シンチレーション検出器でその放射能を測定した。

以上の結果から、30 秒間の洗浄では葉中の⁶⁰Coの溶出はまったくみられず、60 秒間では3—4%の溶出がみられた。したがってこの場合、大麻とインゲン豆との間に細胞表面の強度差がほとんどないものとすれば、30 秒程度の超音波洗浄が利用できる。

また、大麻の葉の表面に⁶⁰Coを吸着させたタルクをぬり、よく乾燥させて洗浄を行なった結果では、30 秒間の超音波洗浄後、蒸留水により噴射洗浄することで表面のタルクはほとんど除かれることが判明した。

b. 乾燥について 特定元素 (Hg, Br, As, Se, S) の揮発損失を防ぐため生体試料の乾燥には最も良いとされている凍結乾燥を用いた。

c. 粉碎について 一般に粉碎はさけた方がよいといわれるが使用する試料の量が少ないので、サンプリング誤差を小さくするため、よく混合する目的でメノウ製乳鉢を用い、80 メッシュ以下に粉碎した。なお、外部汚染を防ぐため篩は木ワク付ナイロン網製、ピンセットはケミフロン製のものをを用いた。

d. 照射試料の重量について 照射試料の重量については各照射条件により異なるが、今回の条件のもとで最も都合の良い重量を検討した。葉試料は 1 分照射の場合、約 350 mg で適当であったが、5 分照射では全生成放射能が 1 分照射より約 4 倍大きくなるので、照射重量は多少減じてても良く、茎、根試料では、各々 300 mg、100 mg が適当であった。土試料は 350 mg では短時間照射の場合 ^{28}Al の生成放射能が強くなるので、3 分後の測定において測定距離を 1 m 離さなければならなかった。したがってこの場合 50 mg 以下にした方が良く、なお、長時間照射の場合、1 週間後および 1 ヶ月後の測定では 350 mg 程度の量が適当であったため、照射時間の長短によって試料重量を変える必要がある。

照射時間の検討

短寿命核種測定のための短時間照射について 1 分および 5 分で検討を行なった。

Fig. 5. Gamma-ray Spectra of Middle Leaves of Cannabis irradiated for 1 Minute and 5 Minutes, and counted for 3 Minutes after a Decay of 3 Minutes

(SESC; single escape peak DESC; double escape peak)

irradiation time

A: 5 min

B: 1 min

TABLE III. Comparison of Photopeak Area of Short Half-lived Nuclides in Middle Leaves of Cannabis by Irradiated for 1 Minute and 5 Minutes

Unit in counts/minute/gram

Nuclide	γ -Ray energy (MeV)	Irradiation time	
		1 minute	5 minutes
^{28}Al	1.779	8710	7770
^{66}Cu	1.039	190	172
^{49}Ca	3.084	2370	3220
^{27}Mg	1.014	1460	1740
^{56}Mn	0.847	3510	5540

Fig. 5 のスペクトルから、検出された元素については、1 分および 5 分照射で相違は認められないが、短寿命核種のピーク面積の比較では、Table III に示すように ^{49}Ca , ^{27}Mg , ^{56}Mn は 5 分照射, ^{28}Al , ^{66}Cu は 1 分照射の方が面積は大きくなる。

これは、試料中に多量存在する Mn のコンプトンピークが 5 分照射では大きくなり、後者のピーク面積を減少させるためと考えられ、また、エネルギーの低い短寿命の微量核種も検出されない場合が考えられる。

また、全生成放射能は 5 分照射では 1 分照射より大きくなるので、実験時における実験者の被曝線量を減じるためにも短時間照射は、1 分が適当である。

冷却時間の検討

短時間照射による短寿命核種の測定は、照射終了後ただちに測定を行なうのが良く、全生成放射能が強いときは減衰を待つより、測定距離を離して行なう方がよい。しかし今回は照射終了後、試料の輸送および外袋の交換などのため、測定までに約 3 分を要した。

30 分後の測定は ^{28}Al ($T=2.3$ 分) が減衰し、このためにかくれていた他の核種のピークが検出でき、さらに定量誤差も小さくなるものと予想したが、半減期の短い ^{51}Ti ($T=5.8$ 分), ^{52}V ($T=3.7$ 分), ^{66}Cu ($T=5.1$ 分) のような微量核種はすでに減衰しており検出できなかった。したがって半減期が 10 分以内の短寿命核種の冷却時間を検討するために、植物体の平均元素組成¹⁹⁾ を基準として、1 分照射時における短寿命核種の ^{28}Al に対する生成放射能およびその減衰の関係を Fig. 6 に示した。

この図より、 ^{28}Al は 30 分後には十分減衰しているが ^{49}Ca , ^{27}Mg 以外の核種も減衰しており測定できない、しかし 10 分程度では ^{28}Al は 3 分後の約 1/10 に減衰し、他の核種への影響も少なくなっている、3 分後に測定できなかった他の核種の測定が期待できる。以上の結果、30 分後よりも 10 分後に測定する方が 3 分後の予備的測定として適当である。

長寿命核種の測定において、半減期が 2 日以内の核種の冷却時間について、3 日と 1 週間の検討を行なった。

Fig. 7 の γ 線スペクトルから、3 日後では試料中の Na や K の量が多いため、 ^{24}Na および ^{42}K のコンプトンピークによるバックグラウンドが高く、ここで測定すべき ^{82}Br ($T=35.5$ 時間), ^{140}La ($T=40.2$ 時間) の S/N 比が小さくなり測定誤差が大きくなる。1 週間後では ^{24}Na ($T=15.0$ 時間) や ^{42}K ($T=12.5$ 時間) は共に減衰しており、これらの核種による影響はなく、測定誤差も小さくなる。さらに 3 日後で検出できなかった核種も定量可能となる。したがってこの場合は、1 週間の測定の方が有効であった。

半減期が 2 日以上核種については、Fig. 8 に示す γ 線スペクトルから、2 週間後でも、まだ ^{82}Br , ^{140}La , ^{153}Sm などの核種が残っている。

これらの核種は多くの γ 線を放出するので他の核種への妨害となり、その定量誤差を大きくする。1 ヶ月後では、完全に ^{82}Br , ^{140}La , ^{153}Sm は減衰し、これらによる妨害もなくなる。したがってこの場合は 1 ヶ月後に測定を行なう方がよい。

以上の実験条件の考察より、植物体に含まれる多数の諸元素を放射化分析により、非破壊的に同時定量できる方法が確立できた。

Fig. 6. Induced Radioactivity and Decay Against ^{28}Al in Short Half-lived Nuclides in Plants by 1 Minute Irradiation

19) Y. Miyake, "Element of Geochemistry," Maruzen, Tokyo, 1965.

Fig. 7. Gamma-ray Spectra of Middle Leaves of Cannabis irradiated for 60 Minutes and counted after a Decay of 3 Days and 7 Days

(DESC; double escape peak)

decay time

A: 3 days

B: 7 days

Fig. 8. Gamma-ray Spectra of Middle Leaves of Cannabis irradiated for 60 Minutes and counted for 10K Seconds after a Decay of 2 Weeks

定量結果について

葉の各部位、根および土のすべてにおいて、検出された元素について、その含有量の土に対する根の割合と、根に対する葉の各部位の割合を Fig. 9 に示した。

葉の各部/根>根/土の元素として Ca, Mn, K, Ba, Mg, Rb, Zn があり、これらの元素は、根が土から吸収する割合より、根から葉の各部へ移動し、蓄積される割合が大きいことを示している。また、葉の各部/根<根/土

の元素として, Sb, Co, Ce, Eu, Sc, Au, Al, Fe があり, これらの元素は, 根にはよく吸収され蓄積されるが葉の各部への移動は小さいことを示している。

なお, 検出された各元素について, 前述¹⁹⁾の植物体の平均元素組成との比較では, ほとんど大差はないが, 特に Hg については大麻の方が含有量が大きく, これは農業によるものと考えられる。

本報は実験条件の確立を目的として実験を行なったこと, および使用した試料の数が少ないこと, サンプルング時期, 雌雄の別などについての正確な情報が得られなかったことで, これ以上の分析結果への考察は期待できない。最後に, 植物体における生元素中で, 今回検出できなかった元素に H, O, B, C, N, P, S, Mo がある。これらの元素中, H, C は熱中性子放射化分析法では検出できない。また B, N, O については各々 $^{11}\text{B}(\text{n}, \gamma)$ ^{12}B ($T=0.02$ 秒), $^{15}\text{N}(\text{n}, \gamma)$ ^{15}N ($T=7.14$ 秒), $^{18}\text{O}(\text{n}, \gamma)$ ^{19}O ($T=29.1$ 秒) と生成核種の半減期が非常に短いため技術的にも測定は困難である。

S は存在度および放射化断面積がともに小さく, 生成放射能は非常に少ないが核反応として欠の反応がおこる。 $^{36}\text{S}(\text{n}, \gamma)$ ^{37}S ($T=5.0$ 分), $^{34}\text{S}(\text{n}, \gamma)$ ^{35}S ($T=87.9$ 日), このうち ^{37}S の γ 線エネルギー 3.102 MeV は ^{49}Ca ($T=8.8$ 分) の 3.084 MeV と重なり, しかも半減期が短かく化学分離を行なっても測定は困難なため検出できない。しかし ^{35}S は γ 線を放出しないが半減期が長いので化学分離を行ない, その β 線を測定すれば定量が可能となる。

P についても $^{31}\text{P}(\text{n}, \gamma)$ ^{32}P ($T=14$ 日) によって生成した ^{32}P の β 線を測定すれば定量できるが化学分離の操作を必要とする。

一方, Mo は $^{92}\text{Mo}(\text{n}, \gamma)$ $^{93\text{m}}\text{Mo}$ ($T=6.95$ 時間), $^{98}\text{Mo}(\text{n}, \gamma)$ ^{99}Mo ($T=69.7$ 時間), $^{100}\text{Mo}(\text{n}, \gamma)$ ^{101}Mo ($T=14.6$ 分) が生成し, それぞれ多くの γ 線を放出する。 $^{93\text{m}}\text{Mo}$, ^{101}Mo はその半減期から 1 分照射し, 3 分後あるいは 30 分後に測定できるはずであるが, この測定時には ^{28}Al , ^{56}Mn によるコンプトンピークの妨害が大きく検出できない。また ^{99}Mo については 1 時間照射後, 1 週間後の測定で検出できるはずであるが, この測定時には ^{82}Br , ^{140}La の多数の γ 線による妨害があり, 今回は測定できなかった。しかし 1 時間照射後, 半減期の長い ^{99}Mo を化学分離し, その 740 keV の γ 線を測定すれば定量できる。

したがって, 今回検出できなかった植物の重要な生元素である S, P, Mo は化学分離操作を併用すれば放射化分析による定量が可能となるので, 今後これらの元素についても分析方法を検討したい。

謝辞 本研究を行なうにあたって γ 線スペクトルの測定に関し種々御便宜を与えて下さった神戸商船大学原子力研究所の道嶋正美教授, 三宅 寛助教授に謝意を表するとともに, 試料を御提供下さった近畿麻薬取締官事務所の遠藤 勝氏に感謝致します。

Fig. 9. Relative Content of Each Element in Cannabis (root/soil ratio and various parts of leaves/root ratio)

●—●: root/soil ratio
○—○: upper leaves/root ratio
⊙—⊙: middle leaves/root ratio
⊖—⊖: lower leaves/root ratio