

水耕栽培における培養液中のフッ素濃度とイネの生育 およびフッ素含量との関係

山内正見^{*、1)}・吉田弘一²⁾・谷山鉄郎¹⁾・梅崎輝尚¹⁾・長屋祐一¹⁾

(¹⁾三重大学・²⁾松阪大学)

要旨: 水質汚濁防止法による公共用水域に排出されるフッ素の許容濃度は 15 mg L^{-1} であるが、5~10 ppm のフッ素を含む培養液による水耕栽培でイネの生育は著しく抑制された。そこで水耕栽培で許容濃度内である低濃度域のフッ素がイネの生育に及ぼす影響を検討し、イネの経根的吸収によるフッ素の蓄積を明らかにしようとした。フッ素濃度が 0, 2, 4 および 6 ppm の 4 水準の水耕液でコシヒカリを栽培し、イネの生育に及ぼすフッ素の影響を検討した。その結果、フッ素はイネの草丈および分げつ数を抑制した。とくに分げつ数はフッ素の濃度による影響の差異が明確に認められ、フッ素濃度が高いほど分げつ数が低下することを明らかにした。1 株当り穂数および 1 株当り籾数もフッ素濃度が高いほど減少した。また、籾、葉身、葉鞘 (稈を含む) および根に及ぼす影響は出穂期以降が顕著で、フッ素濃度が高いほど乾物重は減少した。葉身中のフッ素含量 (ppm, w/w) は培養液中のフッ素濃度が高くなるほど、また生育期間が長くなるほど増大し、経根的に吸収されたフッ素は玄米、葉身、葉鞘 (稈を含む) および根に蓄積されることがわかった。

キーワード: イネ, 水耕栽培, 生育, フッ素, フッ素含量。

フッ素ガスは極めて微量であっても植物に有害であることが知られているが、イネに対する研究報告は比較的少ない。山添 (1962) は地上部へのフッ素ガス暴露処理によってフッ素がイネの生育に著しい影響を及ぼすことを明らかにした。市倉ら (1970) および松岡ら (1972) はフッ素ガスの大気汚染によるイネの被害を報告し、勝見ら (1980) は低濃度のフッ素ガスを長期間暴露させてイネの生育に及ぼす影響および体内のフッ素蓄積量を検討した。しかし、近年先端産業である IC や液晶体の製造ならびに金属の表面処理などに広く利用されているフッ化物は放流水中にフッ素として 3~14 ppm も含まれていることが報告されており (半野・松崎 1988), 河川ひいてはかんがい水の汚染が危惧される。水質汚濁防止法による公共用水域に排出されるフッ素の許容濃度ならびに下水道法による下水に排出されるフッ素の許容濃度はいずれも 15 mg L^{-1} である (環境庁環境法令研究会 1991)。河川のかんがい水中に含まれるフッ素は流域によって多少異なるが、通常 0.1 ppm 前後である (注: 三重県 1993, 平成 5 年度公共用水域および地下水の水質測定結果)。イネの生育に及ぼすかんがい水中フッ素の影響に関する研究も少ない。山添 (1962) はフッ素ガスとして地上部への暴露処理によってイネの生育に著しい影響を及ぼすことを明らかにするとともに、水耕実験としてフッ素 20 ppm・20 日間処理によってイネの生育に及ぼすフッ素の影響を明らかにした。著者らは前報 (山内ら 2000) においてフッ素濃度が 0~50 ppm 7 水準の水耕液でコシヒカリを栽培し、イネの生育に及ぼすフッ素の影響を検討した。その結果、5 および 10 ppm のフッ素はイネの出葉、草丈および分げつ数を抑制することを示した。5 および 10 ppm のフッ素は 1 株当り穂数および 1 株当り籾数も大きく減少させた。また、籾、葉身、葉鞘 (稈

を含む) および根の乾物重に及ぼすフッ素の影響は顕著であり、5 および 10 ppm のフッ素はイネの生育に著しい影響を及ぼすことを明らかにした。本報では水耕栽培において水質汚濁防止法の許容濃度内である低濃度域のフッ素がイネの生育に及ぼす影響の検討をおこない、あわせてフッ素の経根的吸収による玄米、葉身、葉鞘 (稈を含む) などへの蓄積について明らかにした。

材料と方法

1. 水耕栽培とフッ素処理方法

水稻品種コシヒカリを供試してみのるポット (直径上 16 mm, 下 13 mm, 高さ 25 mm) を用い、1992 年 5 月 1 日に 1 穴 1 粒ずつ播種し、ガラス室内で栽培した。同年 5 月 30 日に生育のそろった 5.5 葉苗を、 $25 \times 25 \times 20 \text{ cm}$ (縦, 横, 高さ) の木枠にビニルを張りつめ、厚さ 3 cm の発泡スチロールのふたをかぶせた水耕槽に、1 水耕槽当り 5 本植えて移植し、1 区 4 水耕槽の 4 反復で水耕栽培を行った。水耕液は春日井 (1939) の春日井氏 A 液を一部改変したものを基本培養液として用いた。水耕液は生育ステージにあわせて、井上ら (1982) の方法にしたがって基本培養液を 1~8 倍に希釈して用いた。水耕液の更新は 4~5 日に 1 回とした。処理は水耕栽培開始よりはじめ、水耕液中のフッ素濃度はフッ化水素酸を添加し、フッ素として 0, 2, 4 および 6 ppm (w/w) に設定した。フッ化水素酸を溶かした水耕液は 1 N NaOH で pH 5.0~5.5 に調整した。さらに、水耕液中のフッ素濃度は所定の濃度であることを測定して確認した。水耕液中のフッ素の定量方法はイオンメータ (東亜電波工業製, IM-40 S 型) を用い、イオン電極法 (JIS K 0102 1986) によって定量した。

2. 測定項目と方法

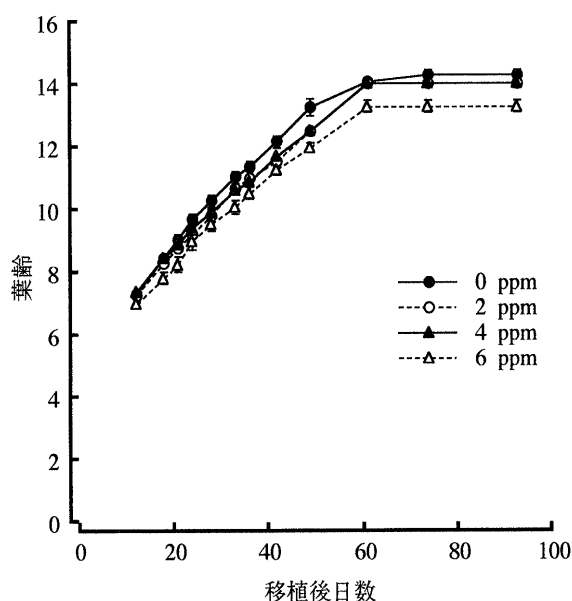
葉齢、草丈および1株当たり分けつ数は移植後11日目の6月10日から調査を開始し、その後7~10日間隔でおこなった。移植後28日目の6月27日、移植後60日目の7月28日および移植後93日目の8月30日の収穫期にサンプリングを行ない、各器官の乾物重を測定した。移植後28日目および移植後60日目では各処理槽1株、各処理区4株を採取し、移植後93日目の収穫期には各槽3株、1処理区12株を採取した。イネは籾、葉身、葉鞘（稈を含む）および根の各器官に分け、約80°Cで30分間、その後約65°Cで48時間以上通風乾燥し、デシケータで放冷後乾物重を測定した。ただし、葉身および葉鞘（稈を含む）の枯死したものは除外した。各処理区のデータについてShefféの多重検定を用いて評価を行った。玄米、籾殻、葉身、葉鞘（稈を含む）および根のフッ素分析は千葉県水質保全研究所の方法（注：千葉県水質保全研究所，水保研資料 No. 15 1979）によった。すなわち各器官を130°C 60分間乾燥した後、ブレンダーで粉碎し分析試料とした。試薬に用いた石灰乳はフッ素を含まない特級炭酸カルシウムをマッフル炉で1000°Cまで加熱し、酸化カルシウムとしたのち、放冷後蒸留水を加えて調整した。白金皿に分析試料4gを精秤し、石灰乳20mLをよく混合し、これを110°Cの通風乾燥機で約2時間乾燥後、550°Cのマッフル炉で灰化させた。灰化させた試料は、めのう製の乳鉢で粉碎混合した。灰化試料を蒸留フラスコにとり、蒸留水40mL、リン酸1mLおよび過塩素酸40mLを加え、これに沸騰石を加えて水蒸気蒸留をおこなった。蒸留装置の各部分を連結したあと、蒸留フラスコを加熱し液温が140°Cになったら水蒸気を通じ始め、蒸留温度を145±5°Cを保つように炎を調節した。留液が200mLになったら蒸留を止め、pHを5.0~5.5に調節し、さらに蒸留水を加えて250mL

として試験溶液とした。この試験溶液40mLをビーカーにとり、1ppmフッ素標準液10mL加え、さらにイオン強度調整剤TISAB50mL加え混合したのちイオンメータ(IM-40S型、東亜電波工業製)に接続したフッ素イオン電極を浸して電位を読みとり、あらかじめ作成した検量線からフッ素イオン濃度を求めた。なお対照として蒸留水40mLをビーカーにとり、1ppmフッ素標準液10mL、TISAB50mLを加え、同様の操作をおこなってフッ素イオン濃度を求め、その差から試料中のフッ素イオン濃度とした。分析は各処理区とも2連とし、その平均値を用いた。

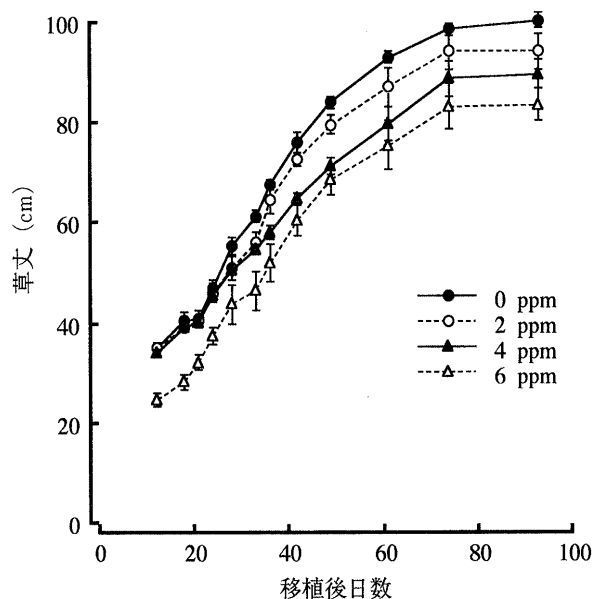
結 果

1. イネの生育に及ぼすフッ素の影響

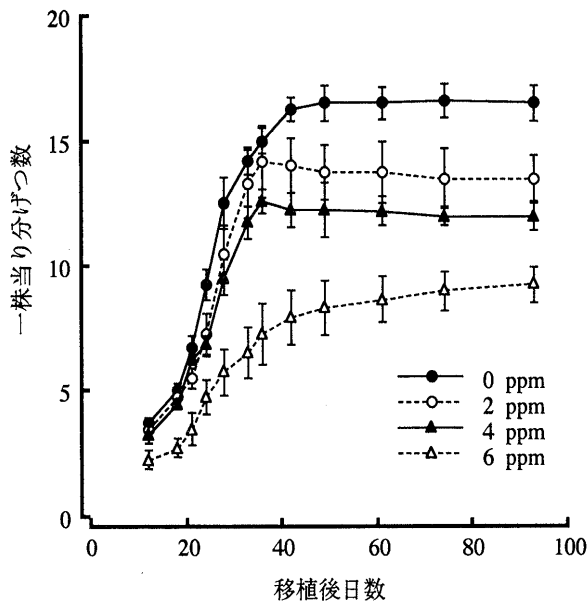
出穂は移植後57~59日目の7月25~27日であった。フッ素処理による出穂時期への影響は認められなかった。出穂経過、草丈および1株当たり分けつ数の経時的变化を第1~3図に示した。フッ素6ppmの葉齢は対照区、フッ素2ppmおよびフッ素4ppmに比べ小さく推移し、フッ素6ppmの葉齢は対照区、フッ素2ppmおよびフッ素4ppmに比べ約1葉少なかった。しかし、対照区とフッ素2ppmおよびフッ素4ppmの間に差は認められなかった（第1図）。出穂期にあたる移植後61日目には、フッ素4ppmの草丈は対照区に比べ10cm以上も抑制され、フッ素6ppmでは約20cm抑制された（第2図）。1株当たり分けつ数に及ぼすフッ素の影響は顕著で、生育が進むにつれて、またフッ素濃度の増加に伴って分けつ数の減少が認められた。移植後93日目にはフッ素2ppmの1株当たりの分けつ数は対照区の85%に、フッ素6ppmでは63%まで抑制された（第3図）。



第1図 イネの出穂経過に及ぼすフッ素の影響。
図中の縦棒は標準誤差を示す。



第2図 イネの草丈に及ぼすフッ素の影響。
図中の縦棒は標準誤差を示す。



第3図 イネの1株当り分けつ数に及ぼすフッ素の影響。図中の縦棒は標準誤差を示す。

2. イネの生育量に及ぼすフッ素の影響

イネの水耕栽培の各生育時期における器官別の乾物重を第1表に示した。移植後28日目の分けつ盛期において、葉身および根の乾物重に影響はみられず、葉鞘の乾物重はフッ素6 ppmでわずかに低下する傾向を示した。移植後60日目の出穂期において、葉身と葉鞘(稈を含む)の乾物重は対照区とフッ素2および4 ppmとの間に差はなかったが、フッ素6 ppmでは低下する傾向を示した。根の乾物重は対照区とフッ素処理区の間には差はなかった。移植後93日目の収穫期においてフッ素濃度処理によっていずれの器官も著しい影響を受け、フッ素2 ppmにおいて籾、葉身、葉鞘(稈を含む)および根の乾物重はそれぞれ68%、67%、64%および70%まで有意に減少した。さらにフッ素濃度が高くなるほど各器官の乾物重は低下した。このように培養液中のフッ素のイネの生育に及ぼす影響は移植後28日目の分けつ盛期および移植後60日目の出穂期では比較的小さかったが、移植後93日目の収穫期では大

第1表 イネの各生育時期における器官別乾物重に及ぼすフッ素の影響。

時期	フッ素濃度 (ppm)	器官			
		籾 (g/株)	葉身 (g/株)	葉鞘 (稈を含む) (g/株)	根 (g/株)
分けつ盛期 (移植後28日目)	0		1.0 ± 0.1a	1.3 ± 0.1a	0.8 ± 0.1a
	2		1.1 ± 0.1a	1.4 ± 0.1a	0.6 ± 0.0a
	4		1.1 ± 0.1a	1.3 ± 0.1a	0.6 ± 0.1a
	6		0.9 ± 0.0a	0.9 ± 0.1a	0.6 ± 0.0a
出穂期 (移植後60日目)	0	1.3 ± 0.1a	4.2 ± 0.4a	7.3 ± 0.5a	1.8 ± 0.2a
	2	0.7 ± 0.1ab	4.1 ± 0.4a	7.4 ± 0.6a	1.9 ± 0.2a
	4	0.3 ± 0.0b	4.0 ± 0.4a	6.7 ± 0.6a	2.1 ± 0.2a
	6	0.3 ± 0.1b	3.3 ± 0.9a	4.5 ± 0.7a	1.8 ± 0.3a
収穫期 (移植後93日目)	0	15.7 ± 0.3a	4.2 ± 0.2a	12.1 ± 0.2a	3.7 ± 0.2a
	2	10.7 ± 0.9b	2.8 ± 0.2b	7.7 ± 0.5b	2.6 ± 0.2ab
	4	8.0 ± 0.8c	2.5 ± 0.2b	6.4 ± 0.5b	2.5 ± 0.2bc
	6	5.6 ± 0.8d	1.2 ± 0.3c	3.5 ± 0.5c	2.1 ± 0.3c

数字は平均値±標準誤差 (n=4) を示す。

同一文字を付した値の間には5%水準で有意差のないことを示す (Shefféの多重検定による)。

第2表 イネの収穫期における1株当り穂数、1株当り籾数および1穂籾数に及ぼすフッ素の影響。

フッ素濃度 (ppm)	1株当り穂数	1株当り籾数	1穂籾数
0	15.1 ± 0.8a	866.4 ± 24.0a	57.9 ± 3.2a
2	12.3 ± 0.9b	626.7 ± 59.0b	55.6 ± 8.8a
4	10.4 ± 0.4bc	508.3 ± 46.5bc	50.8 ± 4.5a
6	8.6 ± 0.5c	425.4 ± 40.4c	51.3 ± 6.8a

数字は平均値±標準誤差 (n=4) を示す。

同一文字を付した値の間には5%水準で有意差のないことを示す (Shefféの多重検定による)。

第3表 イネの各生育時期における葉身中のフッ素含量。

フッ素濃度 (ppm)	分けつ盛期 (移植後28日目)	出穂期 (移植後60日目)	収穫期 (移植後93日目)
0	2.3	2.4	2.4
2	5.2	6.5	10.8
6	20.7	21.2	80.2

数字は葉身(乾物)中のフッ素含量(ppm, w/w)を示す。
フッ素の分析値は各時期とも2連の平均値を示す。

第4表 イネの収穫期における器官別のフッ素含量。

フッ素濃度 (ppm)	器官			
	玄米	籾殻	葉鞘(稈を含む)	根
0	2.3	2.0	2.3	4.7
2	7.5	4.3	2.5	16.7
6	10.4	9.5	5.9	467.1

数字は器官別の乾物重のフッ素含量(ppm, w/w)を示す。
フッ素の分析値は各器官とも2連の平均値を示す。

きかった。イネの生育に及ぼすフッ素の影響は移植後の日数が長いほど、つまりフッ素処理日数が長いほど、フッ素濃度が高いほど著しくなることがわかった。

収穫期における1株当たり穂数、1株当たり籾数および1穂籾数を第2表に示した。1株当たり穂数はフッ素2ppmで対照区に比べ有意に低下し、対照区の81%まで減少した。さらにフッ素濃度が高くなるほど減少した。1株当たり籾数は1株当たり穂数と同様にフッ素2ppmで対照区に比べ有意に低下した。さらにフッ素濃度が高くなるほど減少した。1穂籾数は処理区間に差は認められなかった。

3. イネの葉身中のフッ素含量

イネの各生育時期における葉身中のフッ素含量(ppm, w/w)を第3表に示した。フッ素2ppmの葉身中フッ素含量は移植後28日目の分けつ盛期では対照区の2.3倍の5.2ppm、移植後60日の出穂期では対照区の2.7倍の6.5ppm、収穫期の移植後93日目では対照区の4.5倍の10.8ppmであった。フッ素6ppmの葉身のフッ素含量は分けつ盛期では対照区の9.0倍の20.7ppm、出穂期では対照区の8.8倍の21.2ppm、収穫期では対照区の33.4倍の80.2ppmであった。対照区の葉身中フッ素含量は2.3~2.4ppmといずれの時期でもほとんど変わらなかった。このことから経根的なフッ素の吸収による葉身中のフッ素の蓄積は生育がすすむにつれて、またフッ素濃度が高いほど増加することがわかった。

4. イネの器官別フッ素含量

イネの収穫期における器官別のフッ素含量(ppm, w/w)を第4表に示した。玄米中のフッ素含量はフッ素2

ppmでは対照区の3.2倍に、フッ素6ppmでは対照区の4.5倍の10.4ppmであった。籾殻のフッ素含量はフッ素2ppmでは対照区の2.2倍に、フッ素6ppmでは対照区の4.8倍の9.5ppmであった。葉鞘(稈を含む)のフッ素含量はフッ素2ppmでは対照区とほとんど変わらなかったが、フッ素6ppmでは対照区の2.6倍の5.9ppmであった。根のフッ素含量はフッ素2ppmでは対照区の3.6倍に、フッ素6ppmでは対照区の99.0倍467.1ppmと著しく蓄積した。以上のことから培養液から経根的に吸収されたフッ素は葉身に蓄積されるだけでなく、玄米、籾殻、葉鞘(稈を含む)および根、つまりすべての器官に蓄積されることが明らかになり、とくに根の蓄積が著しいことがわかった。

考 察

本実験は水耕栽培で培養液中のフッ素濃度0~6ppmの4水準として、イネの生育に及ぼすフッ素の影響を検討した。その結果、分けつ数の抑制はフッ素2ppmで認められた。フッ素濃度処理による分けつ盛期の葉身、葉鞘および根の乾物重の減少は比較的軽微であった。出穂期の葉身、葉鞘(稈を含む)および根の乾物重の減少は比較的軽微であったが、収穫期にはフッ素濃度処理によって籾、葉身、葉鞘(稈を含む)および根の乾物重は明らかに減少した。イネの生育に及ぼすフッ素の影響として分けつ盛期以降に分けつ数が抑制され、穂数は減少した。山添(1962)は培養液中のフッ素20ppm、20日間処理でイネの葉身、葉鞘および根の乾物重に影響することを明らかにした。著者ら(山内ら2000)は培養液中のフッ素濃度0, 5, 10, 15, 20, 30および50ppmの7水準、99日間の処理で、

フッ素5および10 ppmでイネの生育に影響を及ぼし、草丈、分げつ数等の栄養生長の抑制を認めた。また収穫時における1株当たり穂数、1株当たり籾数および1穂籾数と籾、葉身、葉鞘(稈を含む)および根の乾物重はフッ素によって減少することを明らかにした。さらに本実験からイネの生育はフッ素2 ppmでも影響を受けることを明らかにした。一方、放流水中には3~14 ppmのフッ素が含まれていることが報告されている(半野・松崎1988)が、放流水はかんがい水として利用される可能性もあり、イネの栽培上注意が必要であると考えられる。

勝見ら(1980)は1~2 ppbの低濃度フッ素ガスの68日間処理による出穂期および収穫期の葉位別のフッ素含量を測定し、フッ素処理区では出穂期および収穫期ともフッ素含量は上位葉より下位葉の方が高く、またいずれの葉位でも出穂期より収穫期にフッ素含量は高くなることを報告している。したがって、ガス処理によるフッ素の経葉的な吸収でも、培養液からの経根的吸収でも、処理期間が長いほど、処理濃度が高いほど葉身中のフッ素含量は増大するものと考えられた。

山添(1962)は大気中のフッ化水素に暴露されたイネ植物体のフッ素の蓄積は葉身>葉鞘>根の順で葉身が最も大きく、根部への移動は少なく、根外への排出も全く認められないと報告した。本実験のごとく、培養液中にフッ化水素酸を添加し経根的に吸収させた場合、根から吸収されたフッ素は葉鞘および稈を通じて葉身や籾に移動すると考えられるが、フッ素濃度は根>葉身>玄米>葉鞘(稈を含む)という順であり、とりわけ根部において著しいフッ素の蓄積があった。これはイネ体内のゲル状珪酸や細胞液中のカルシウムと結合し、珪フッ化カルシウムのような比較的難溶性の塩類として被害局所に存在する(山添1962)フッ素が根部に蓄積したものと考えられた。

玄米中のフッ素濃度が比較的高いということは重要である。動物における気中フッ素の被害はほとんど経口的なものにより発生する。フッ素症(fluorosis)は骨障害が特徴で斑状歯(mottled teeth)および骨硬化症(osteoscler-

osis)に代表される(山本ら1975)。日本人の主食である米についてSakuraiら(1986)は長年の調査によって大気中のフッ素が1 ppbを越えると玄米中のフッ素は40 ppm以上になることを指摘している。祐田・山本(1975)は玄米中のフッ素蓄積量が増加しても、可食部である白米中のフッ素蓄積量は12 ppmを越えず、糠部分への蓄積が増大することを示した。本実験においてフッ素6 ppm処理区の玄米に対照区の4.5倍の10.4 ppmのフッ素が蓄積することを明らかにしたが、人の健康への影響についても検討することが必要であろう。

謝辞:本研究を遂行するにあたって実験にご協力いただいた山下敦史氏にたいし、深甚の謝辞を申し上げます。

引用文献

- 半野勝正・松崎淳三 1988. 先端産業事業場排水実態調査. 千葉県水保研年報 55-60.
- 市倉恒七・土山和英・長谷川利雄・山崎良明・久富啓次 1970. フッ化物による水稻および大豆の煙害について. 大阪府農技センター研報 7:25-31.
- 井上吉雄・森脇勉・栗原浩 1982. 水稻における根部の発達およびアンモニウム態窒素の吸収部位と体内分布の関係. 日作紀 51:492-498.
- 環境庁環境法令研究会編 1991. 環境六法(平成3年度版). 中央法規出版, 東京. 365-403, 554-580.
- 春日井新一郎 1939. 水耕法に関する研究. 土肥誌 13:669-822.
- 勝見太・板東義仁・山田正美 1980. 大気中のフッ化水素が植物におよぼす影響. 福井農試報 17:61-71.
- Sakurai,S., K.Itai and H.Tsunoda 1986. Prospective survey on fluoride contents of rice. Fluoride Research 27. Tsunoda,H. and M.H.Yu ed, Sci. Publ. B.V. Elsevier, Amsterdam. 99-106.
- 松岡義浩・高崎強・宇田川理 1972. フッ素系大気汚染による水稻葉中のフッ素集積について. 千葉県農試報 12:52-62.
- 祐田泰延・山本丈夫 1975. 植物に及ぼす気中フッ化物の影響. 農化 49:341-346.
- 山本丈夫・祐田泰延・三上栄一・佐藤善己 1975. 植物指標による気中フッ素汚染の環境評価. 農化 49:347-352.
- 山内正見・吉田弘一・谷山鉄郎・梅崎輝尚・長屋祐一 2000. 水耕栽培における培養中のフッ素濃度とイネの生育との関係. 日作紀 69:242-246.
- 山添文雄 1962. フッ化水素による煙害の実態ならびに機作に関する研究. 農技研報 B12:1-125.

Effect of Fluorine Added to the Culture Solution at Lower Concentrations on the Growth of Rice Plants: Masami YAMAUCHI^{*1)}, Hirokazu YOSHIDA²⁾, Tetsuro TANIYAMA¹⁾, Teruhisa UMEZAKI¹⁾ and Yuichi NAGAYA¹⁾ (¹⁾Mie Univ. Tsu 514-8507, Japan; ²⁾Matsusaka Univ.)

Abstract: The concentration of fluorine to the public water bodies permitted by water pollution law is 15 mg L⁻¹. The growth of rice plants was severely depressed by fluorine added to the culture solution at 5-10 ppm. The purpose of this investigation was to make clear the limit value of fluorine on the growth of rice plants and to clarify the absorbing mechanism by the roots of rice plants. The effect of the fluorine (HF) added to the culture solution at 0, 2, 4 and 6 ppm on the growth of *Oryza sativa* L. cv. Koshihikari was investigated. The increase in the leaf length and the number of stems per hill was depressed by the fluorine added. Especially, the number of stems per hill was obviously decreased by increasing the concentrations of HF. The number of ears and unhulled rice per hill were decreased by the lower concentrations of HF. It was clarified that the dry weights of unhulled rice, leaves, and roots were markedly decreased by fluorine at the lower concentrations. The fluorine content in leaves increased by increasing the concentration of HF and prolonging the growth period. It was shown that the fluorine absorbed through the roots was accumulated in brown rice, leaves, stems and roots.

Key words: Fluorine, Fluorine content, Growth, Rice plant, Solution culture.