

総 合 論 文

ナトリウムの有用性に関する比較植物栄養学的研究

高橋英一, 前嶋一宏

近畿大学農学部農芸化学科

Comparative Research on Sodium as a Beneficial Element for Crop Plants

Eiichi TAKAHASHI and Kazuhiro MAEJIMA

Department of Agriculture, Kinki Univ., Nakamachi, Nara, 631-8505, Japan

Synopsis

To investigate the beneficial effects of sodium related to available potassium levels, 20 kinds of crops classified in 9 families were pot-cultured with Masa soil (weathered granitic soil) of low potassium availability. The main treatments were [+K-Na], [-K-Na], [-K+Na], [+K+Na]. Potassium and sodium were supplied at equimol as chlorides. The results obtained were as follows.

1) Growth responses to sodium much differed among the crops tested. The effect of sodium was most remarkable on chard (*Beta vulgaris*). The growth of -K+Na plants was quite normal and better than that of the control (+K-Na) plants, while -K-Na plants showed potassium deficiency symptoms and the growth was decreased to half that of the control plants. A similar but lesser effects were obtained for barley (*Hordeum vulgare*), okahijiki (*Salsola komarovii*), spinach (*Spinacia oleracea*), kikuna (*Chrysanthemum coronarium*), portulaca (*Portulaca grandiflora*), chinese cabbage (*Brassica rapa var. amplexicaulis*), pak-choi (*Brassica rapa var. pak-choi*), turnip (*Brassica rapa*), nozawana (*Brassica rapa var. nozawana*), komatsuna (*Brassica rapa var. komatsuna*), cabbage (*Brassica oleracea*), rice (*Oryza sativa*), and slight effect on wheat (*Triticum aestivum*), lettuce (*Lactuca sativa*), and tomato (*Lycopersicon esculentum*). Contrary to these crops, sodium did not have any effect on edible amaranthus (*Amaranthus mangostanus*), strawberry (*Fragaria chiloensis*), kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) and maize (*Zea mays*).

2) The differences in the effects of sodium were mainly attributable to the differences in the rates of sodium uptake by the plant top. The beneficial effects of sodium seemed to be mainly due to the substitutional effect of sodium for potassium in producing osmotic pressure in the apoplast of plants. This might contribute to keeping water content in the plant tissue and increasing the fresh weight.

緒 言

ナトリウムはカリウムとともに、土壌の主要な一価アルカリカチオンとして存在している。土壌溶液中のナトリウム濃度は、温帯地域では0.1~1 mMの範囲にあり、カリウムより高いのが普通である。ところが植物中のナトリウム濃度は、多くの場合、カリウムの10分の1以下という低さである¹⁾。そしてカリウムが多量必須元素であるのに対して、ナトリウムは多量必須元素になっていない。一方、動物

体中のナトリウム濃度はカリウムに匹敵する高さであり、ナトリウムはカリウムとともに動物の多量必須元素である。このような違いがあるため、草食動物は必要量のナトリウムを草から得られないという問題が生じる。

しかし植物の中には、塩類濃度が高い土壌に自生し、カリウムよりはるかに多くのナトリウムを含んでいる特殊な種類(塩生植物)がある¹⁾。また作物にもナトリウム塩の施用効果が認められているもの(サトウダイコン *Beta vulgaris var. saccharifera*

など)があり,その効果はカリウムの供給が制限されている場合に現れやすいことも知られている^{1~4)}。特定の植物種に対して,特定の環境下で生育に良好な影響を及ぼす元素は「有用元素」と呼ばれるが,ナトリウムはこの定義にあてはまる元素である。

本研究は,作物に対するナトリウムの有用性についての知見を深めるために,(1)ナトリウムのカリウム代替効果の作物種間差異,(2)ナトリウムの吸収移行性の作物種間差異,(3)ナトリウムの効果の認められる作物のスクリーニング,(4)作物のナトリウム吸収パターンと生育効果との関係,について検討を行ったものである。以下に,それらの成果の概要を報告する。

ナトリウムのカリウム代替性の作物種間差異

養分の少ないマサ土を用い,カリウム以外の肥料成分は常法通り施したポット試験をガラス室内で実施した。カリウムの施肥レベルは,標準,標準量の1/2,1/5,無施用の4段階とし,これにカリウム減量分をナトリウムで補ったナトリウム施用系列を加え,全部で7試験区(各区3反復)を設け,ナトリウムのカリウム代替性を9種類の作物について比較検討した。(詳細は参考文献5の5~7頁を参照)。

生育(地上部新鮮重)に対するナトリウムの効果は,作物の種間で大きな差異が認められた(Fig. 1)。その効果の最も著しいのはフダンソウ(*Beta vulgaris var. cicla*)で,カリウム減量分をナトリウムで補うと新鮮重は低下せず,むしろ若干増加した。オカヒジキ, (*Salsola komarovii*) マツバボタン (*Portulaca grandiflora*), オオムギ (*Hordeum vulgare*), キクナ (*Chrysanthemum coronarium*), ホウレンソウ (*Spinacia oleracea*) もカリウム減量に伴う生育低下はナトリウム施用によって大幅に軽減された。このようなナトリウムの効果は,コムギ (*Triticum aestivum*) でもある程度認められたが,トウモロコシ (*Zea mays*) とヒユナ (*Amaranthus mangostanus*) では全く見られなかった。ただしヒユナでは,カリウムもナトリウムも施用しなかった場合,途中ですべて枯死したのに対し,ナトリウムを施用すると生育は著しく低下したものの外観は正常であった。

このようなナトリウムの効果の差異の原因は,作物のナトリウム吸収性の違いにあることが Fig. 2, A~I から推察できる。フダンソウのナトリウム施用系列では,カリウムの不足を補うようにナトリウムを積極的に吸収し,カリウムとナトリウムの地上部吸収量の和はカリウム標準施用区(対照)よりも増大し,それが生育量に反映した (Fig. 2, A) フダ

ンソウに劣るもののオカヒジキ (Fig. 2, B), マツバボタン (Fig. 2, C), オオムギ (Fig. 2, D), キクナ (Fig. 2, E), ホウレンソウ (Fig. 2, F) もカリウム不足条件下で与えられたナトリウムをよく吸収し,ナトリウムとカリウムの地上部吸収量の和はナトリウムを与えられなかったものより増大し,それが生育量に反映した。これに比べてコムギ (Fig. 2, G) のナトリウム吸収性は小さく,さらにトウモロコシ (Fig. 2, H), ヒユナ (Fig. 2, I) では与えられたナトリウムをほとんど吸収しなかった。

フダンソウ,オカヒジキ,マツバボタン,キクナ,ホウレンソウに見られたナトリウムの効果の大部分は,ナトリウムの浸透圧作出作用(これは植物の吸水力あるいは保水力に関わる)にあると考えられる。それはこれらの作物においてナトリウム吸収に伴い含水率が上昇していることから推察できる(Fig. 3)。これに対しナトリウム吸収性の乏しいコムギ,トウモロコシ,ヒユナでは含水率の増加は全く認められなかった。

なおカリウムを施用しなかった場合ナトリウムはヒユナの枯死を防いだが,これは浸透圧作出作用とは別のナトリウムの効果の可能性がある。C₄-植物のあるものにはナトリウムが微量必須元素であるとの報告がある^{6,7)}。ヒユナはC₄-植物であり,ヒユナと同属のハゲイトウ (*Amaranthus tricolor*) の生育に対してナトリウム欠乏症が Matoh ら⁸⁾ によって認められている。このような特異性がヒユナにもあり,それがカリウム不足下で顕著に現れたのかもしれない。またオオムギの含水率がナトリウムの施用によって,生育に対する効果に見合うほど高まっているが,これはイネ科の葉の組織が葉菜類と異なっているためではないかと思われる。

ここで供試した作物の中でナトリウムの効果が最も大きかったフダンソウは,浸透圧作出のため一価アルカリカチオンの要求量が高いためと高く,それがナトリウム施用効果に反映した可能性がある。そこで,カリウムとナトリウムを等ミリモル与えた1/2 K+1/2 Na 区を基準に,その2倍 (K+Na), 3倍 (3/2 K+3/2 Na), 4倍 (2K+2Na), 6倍 (3K+3Na) を与えた5処理区を設けて同様な栽培試験を行った。その結果は基準量の3倍 (3/2 K+3/2 Na) までは生育量も一価アルカリカチオン,特にナトリウムの吸収量が増加した。このことからフダンソウは一価アルカリカチオンの要求量が高いが,ナトリウムの吸収量は全ての処理区でカリウムより多かった(1.6~1.7倍)ので,フダンソウは浸透圧の作出にはナトリウムを好んで利用する作物であると考えられた (Fig. 4)。

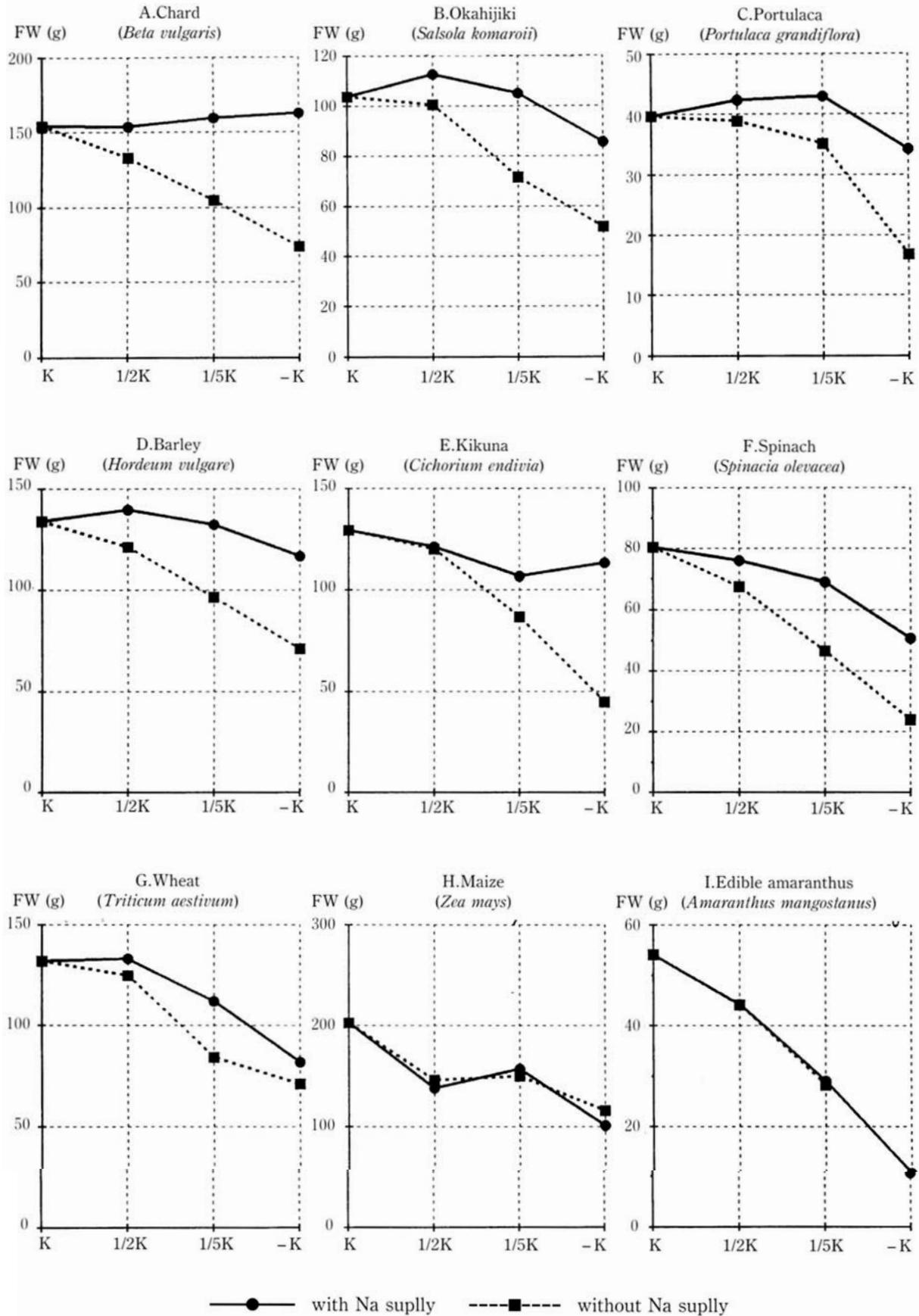


Fig. 1 Effects of Na on the fresh weight of crops under different supply levels of K.

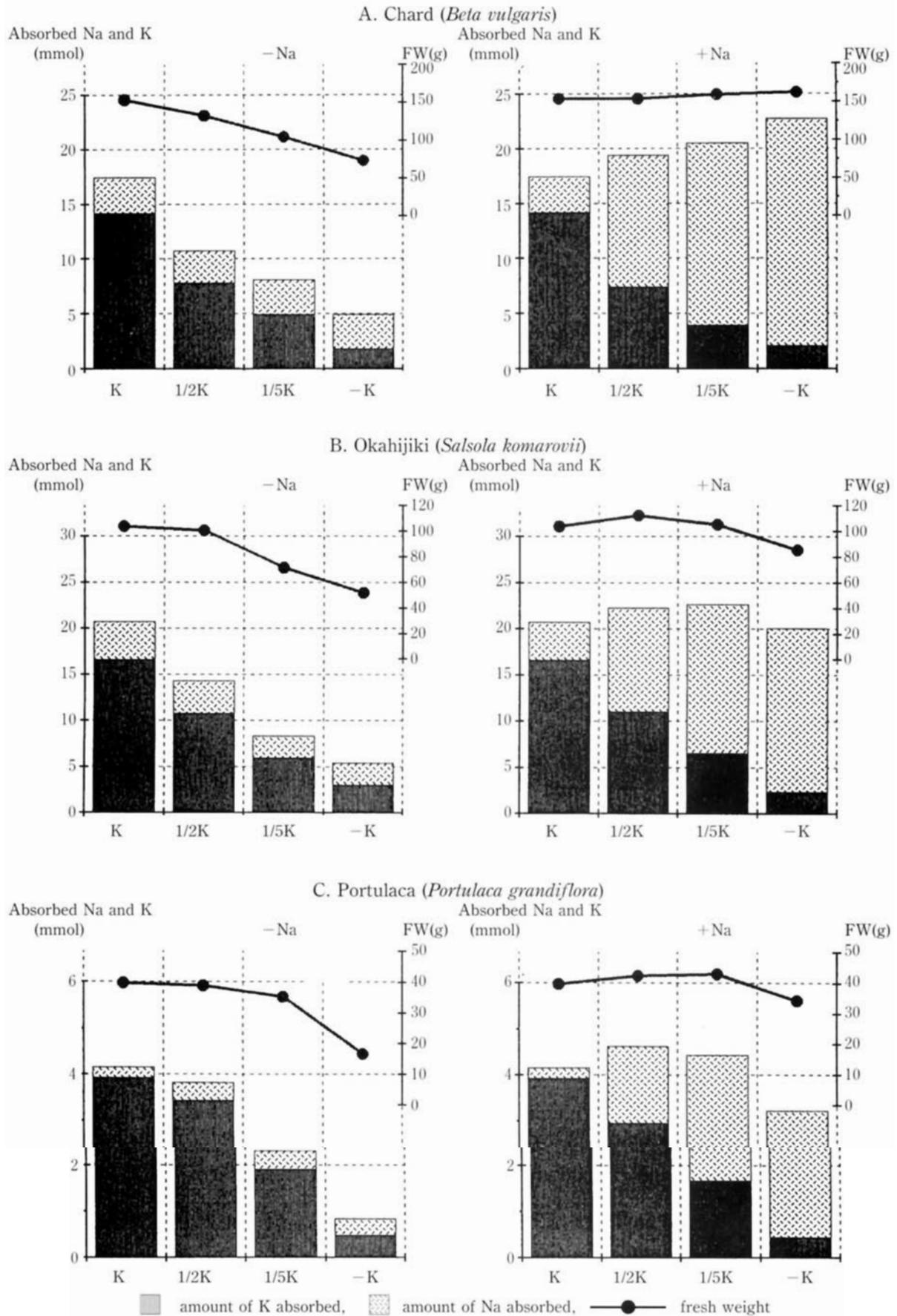


Fig. 2 Effects of Na on the uptake amounts of Na, K and on the fresh weights of crops.

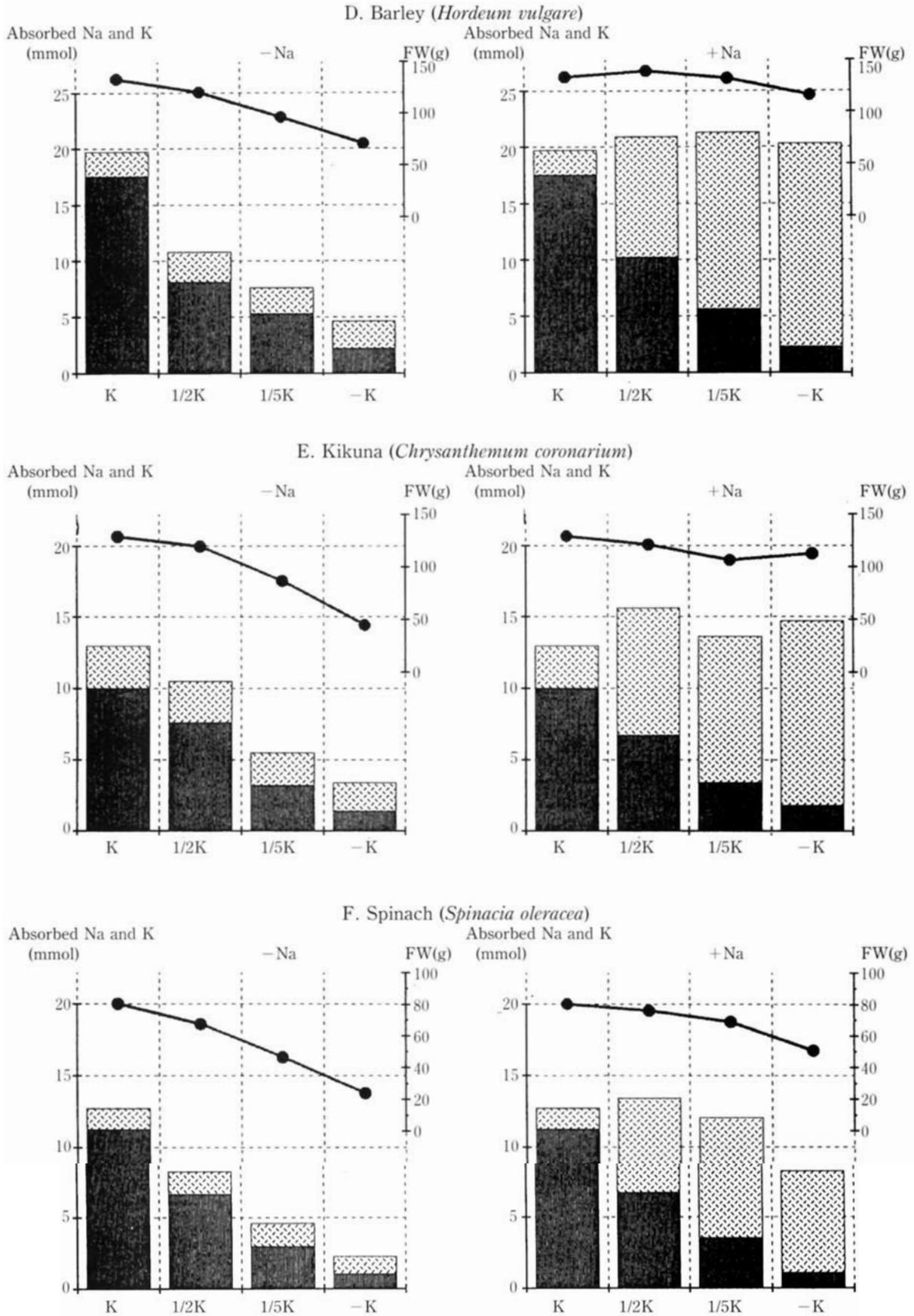


Fig. 2 (cont.)

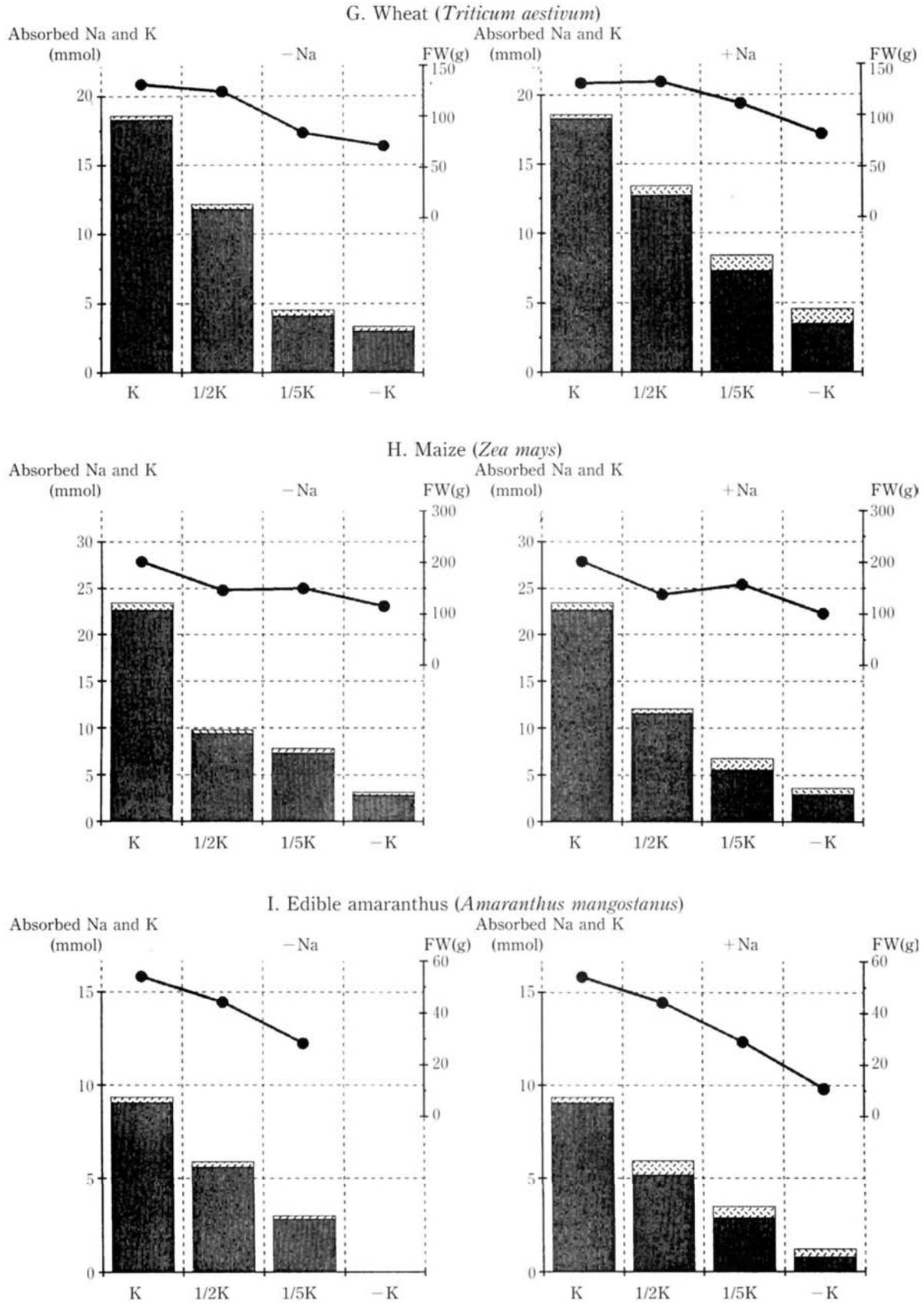


Fig. 2 (cont.)

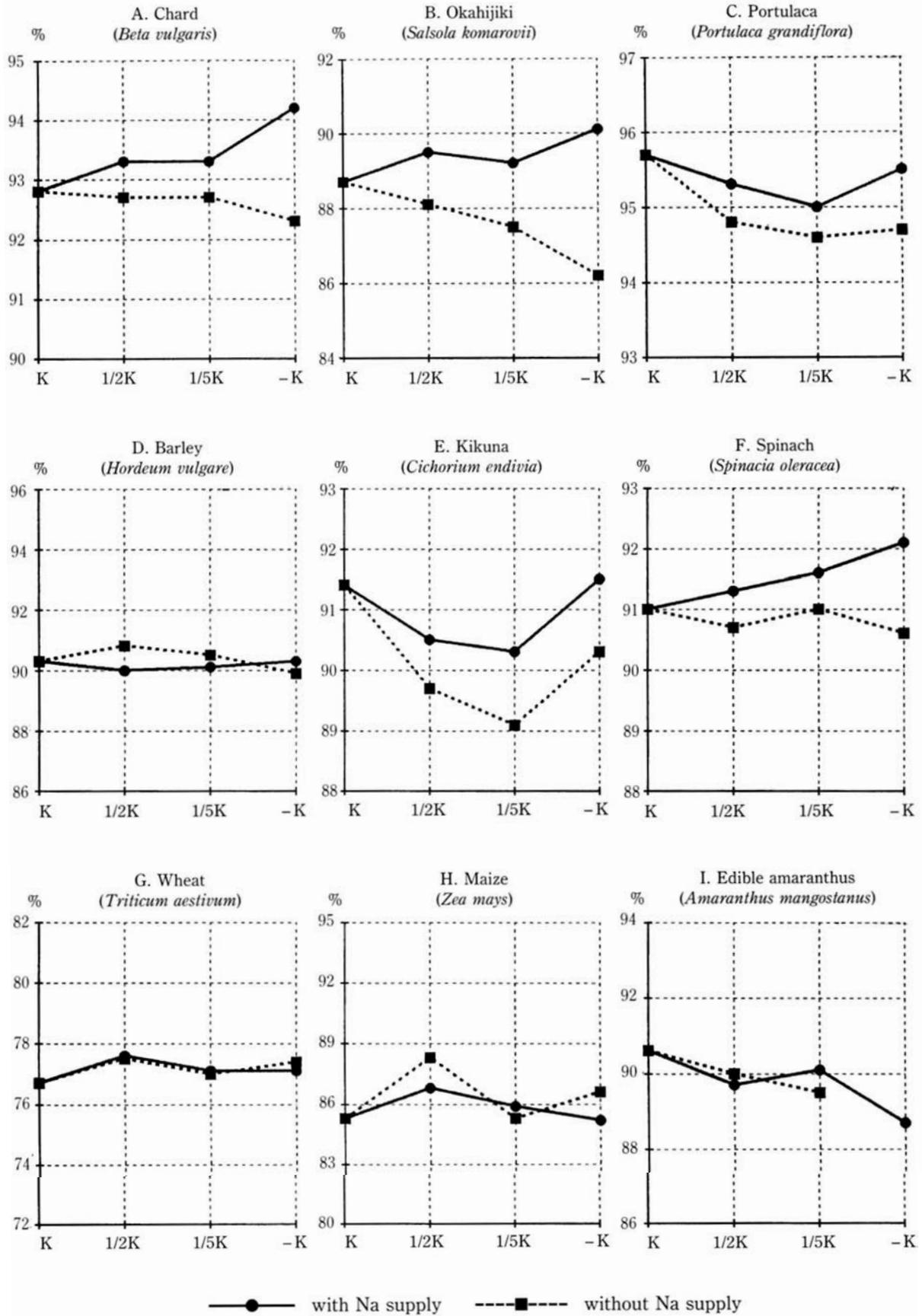


Fig. 3 Effects of Na on the water contents of crops under different supply levels of K.

ナトリウムの吸収移行性の作物種間差異

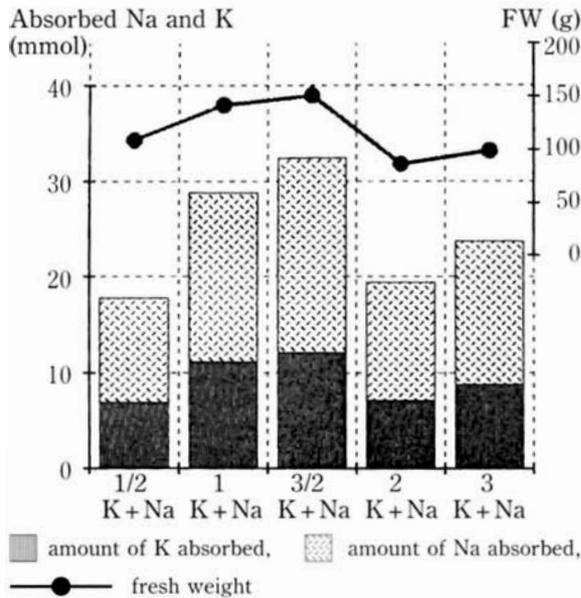


Fig. 4 Effects of various supply levels of equimolar Na, K mixture on the uptake of Na, K and on the fresh weights of Chard (*Beta vulgaris*)

先の実験結果から、地上部の生育量に対するナトリウムの効果の作物種間差異は、地上部のナトリウムの吸収量と関係があることがわかった。そこでこの差異が根の吸収性によるものか、地上部への移行性によるものかを明らかにするために水耕試験を行った。試験は、+K-Na, -K-Na, -K+Na, +K+Naの4処理区を設け、4種類のイネ科作物イネ (*Oryza sativa*), オオムギ, コムギ, トウモロコシとインゲン (*Phaseolus vulgaris*) を供試した。(試験方法については文献5の31~32頁を参照)

この実験では+K-Na区と-K-Na区の新鮮重の差はカリウムの効果に相当し、-K+Na区と-K-Na区の差はナトリウムの効果に相当するため、その効果の比はナトリウムのカリウム代替率とみなすことができる。ナトリウムの施用効果が最も大きかったのはオオムギで、代替率は78%、ついでイネの48%、コムギの15%で、トウモロコシおよびインゲンではナトリウムの効果は認められなかった (Fig. 5)。さらに、オオムギではカリウム施用下でもナトリウムの効果が認められた (+K+Na区の生育量は+K-Na区の117%)。

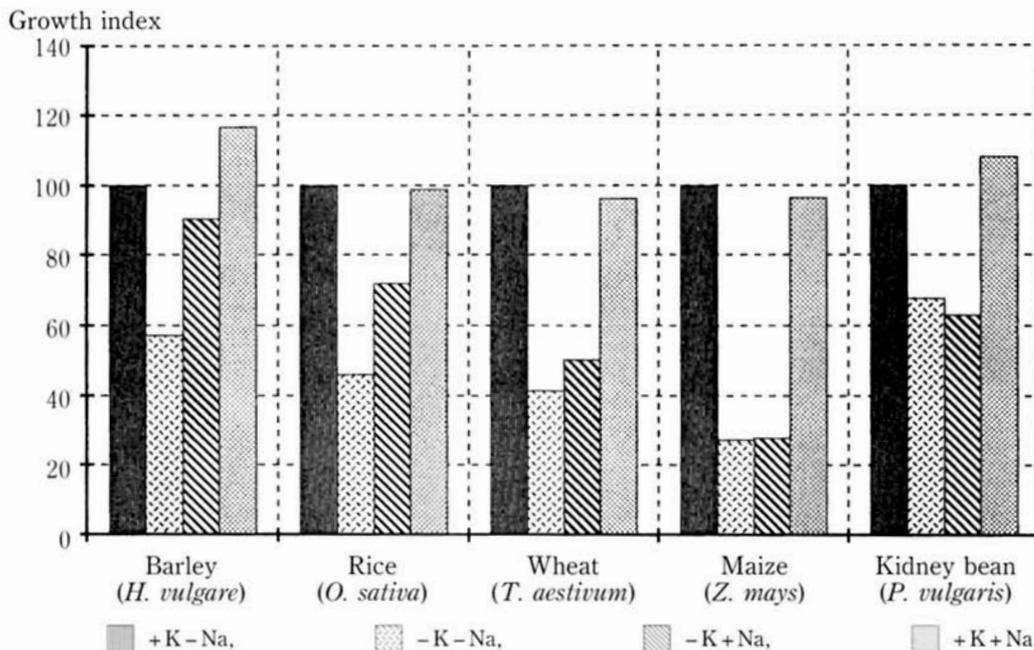


Fig. 5 Effects of Na on the growth of crops with and without K supply.

カリウム施用下および無施用下における各作物の地上部、根部のナトリウム濃度はFig. 6および7に示すとおりである。ナトリウムの地上部/根部濃度比は、カリウム施用下においては、オオムギ2.0、イネ0.65、コムギ0.47、トウモロコシ0.07、インゲン0.33であった (Fig. 6)。また、カリウム無施用

下においては、オオムギ5.0、イネ3.4、コムギ0.53、トウモロコシ0.06、インゲン0.07であった (Fig. 7)。これらの結果から、ナトリウムの地上部への移行率には大きな種間差異があることがわかった。すなわち、トウモロコシおよびインゲンでは、カリウム施用の有無にかかわらず根部が吸収したナトリウムは

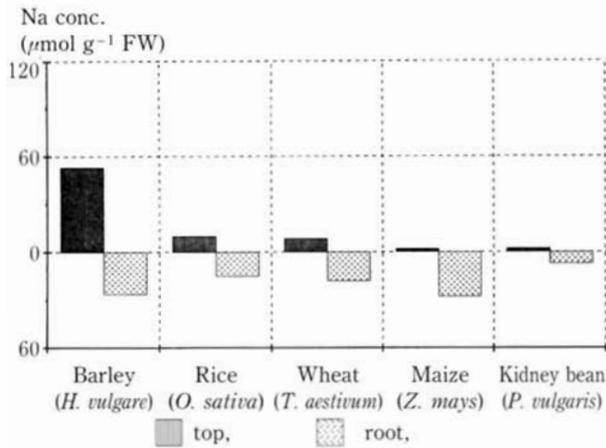


Fig. 6 Na concentrations of top and root in the K supplied series.

地上部にほとんど移行しなかった。コムギも移行率は小さいが、カリウムが施用されないとやや増加した。これに対しイネでは、カリウムが施用されるとナトリウムの移行率はコムギと変わらないが、カリウムが施用されないと地上部へナトリウムが多量に移行した。さらにオオムギではカリウム施用の有無にかかわらず、吸収したナトリウムの大部分は地上部に送られた。

このように地上部のナトリウムの濃度差は、根部での選択吸収性よりも地上部への移行性の違いに原

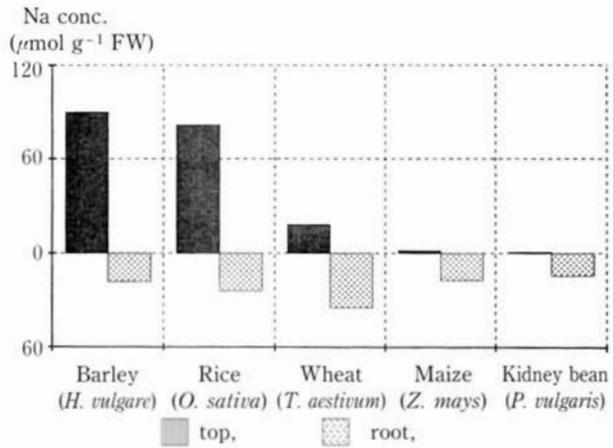


Fig. 7 Na concentrations of top and root in the none K supplied series.

因があった。そして、この違いがナトリウムの施用効果の差となって現れたと理解される。

供試したイネ科作物の中で、イネは培養液中のカリウムの有無によってナトリウムの吸収移行性が大きな影響を受けるという特異性を示した。そこでさらに培養液のカリウム濃度を1 mM, 1/2mM, 1/4 mM, 1/8mM と段階的に低下させていった場合の、ナトリウムの吸収と生育への影響について検討を行った（ナトリウム施用区のナトリウム濃度は1 mM）。

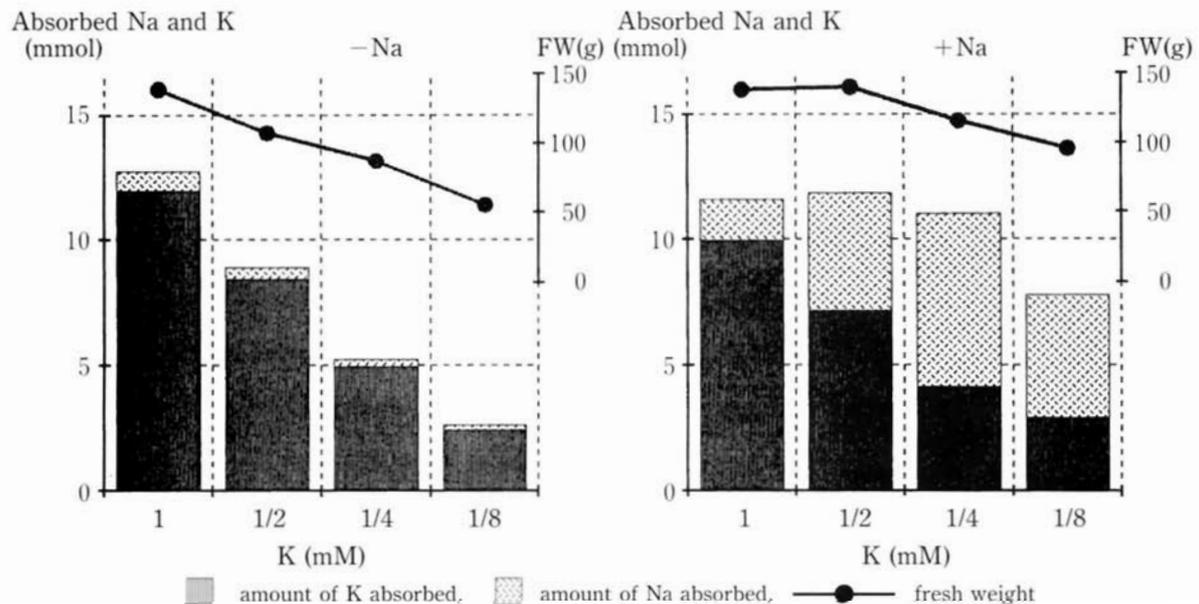


Fig. 8 Effects of Na on the uptake of Na, K and on the fresh weights of rice under different supply levels of K.

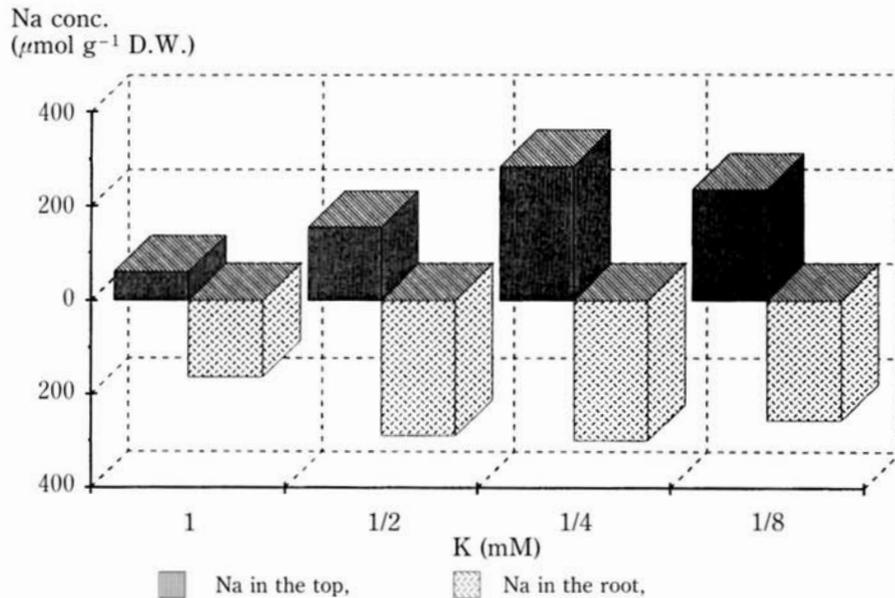


Fig. 9 Effects of K supply levels on the Na concentration in the top and the root (rice plant).

その結果、イネはカリウム吸収量の減少を補うようにナトリウムを吸収することによって、生育の低下を抑えていた (Fig. 8)。また、地上部のナトリウムの濃度の上昇は、根から吸収されたナトリウムの地上部への移行率が増加したことによっていた (Fig. 9)。さらに根、稈、葉鞘、葉身、穂各部位のナトリウム・カリウム含有量の比は、培養液中のカリウム濃度の低下に伴い、葉鞘>稈=根>葉身の順で大きくなったが穂にはナトリウムはほとんど入らず、カリウム濃度の影響を受けなかった (Fig. 10)。すなわちイネの場合、地上部へ移行したナトリウムは、葉身よりも葉鞘と稈に集積した。

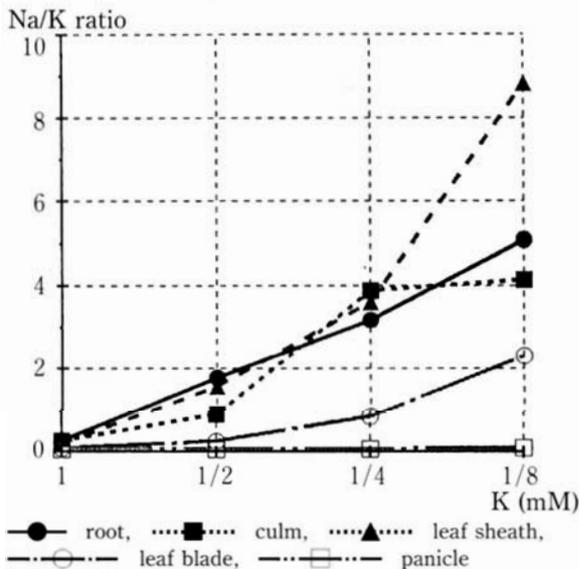


Fig. 10 Effects of K supply levels on Na/K concentration ratios of root, culm, leaf sheath, leaf blade and panicle (rice plant).

ナトリウムの効果の認められる作物のスクリーニング

これまでの実験結果から、カリウム不足時のナトリウムの効果は作物の種類によって著しく異なることがわかったが、ここではさらに多くの種類の作物について検討した。供試作物はハクサイ (*Brassica rapa* var. *amplexicaulis*), チンゲンサイ (*Brassica rapa* var. *pak-choi*), カブ (*Brassica rapa*), ノザワナ (*Brassica rapa* var. *nozawana*), コマツナ (*Brassica rapa* var. *komatsuna*), キャベツ (*Brassica oleracea*) (以上アブラナ科), オオムギ (*Hordeum vulgare*) (イネ科), トマト (*Lycopersicon esculentum*) (ナス科), レタス (*Lactuca sativa*) (キク科), イチゴ (*Fragaria chiloensis*) (バラ科), ヒユナ (*Amaranthus mangostanus*) (ヒユ科) の11種、前回と同じ土壌を用い、試験区は+K-Na, -K-Na, -K+Na, +K+Naの4処理区を設定した (試験方法については文献5の50~51頁を参照)。

アブラナ科の作物の生育に対するナトリウムの効果は大きく、ナトリウムのカリウム代替率はハクサイ130%, チンゲンサイ121%, カブ100%, ノザワナ96%で、カリウムと同等あるいはそれ以上のナトリウムの効果が認められた (Fig. 11)。またコマツナでは78%, キャベツでは58%の代替効果があった。アブラナ科以外の作物では、オオムギが78%と大きかった。これに対してトマト、レタスではそれぞれ17%, 16%と小さく、イチゴとヒユナではナトリウムの代替効果は全く認められなかった。

このような作物によるナトリウムの代替効果の違

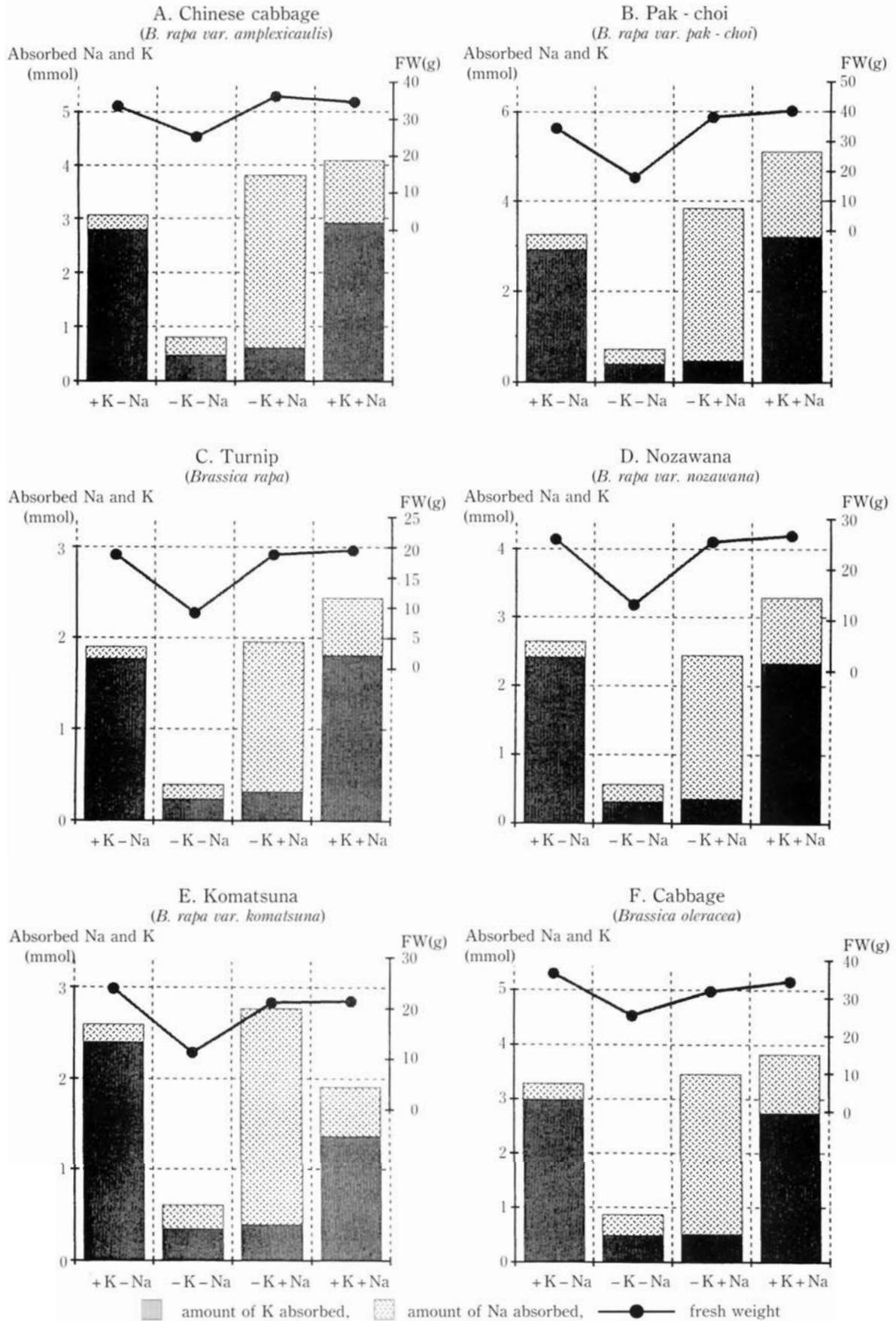


Fig. 11 Effects of Na on the uptake amounts of Na, K and on the fresh weights of crops with and without K supply.

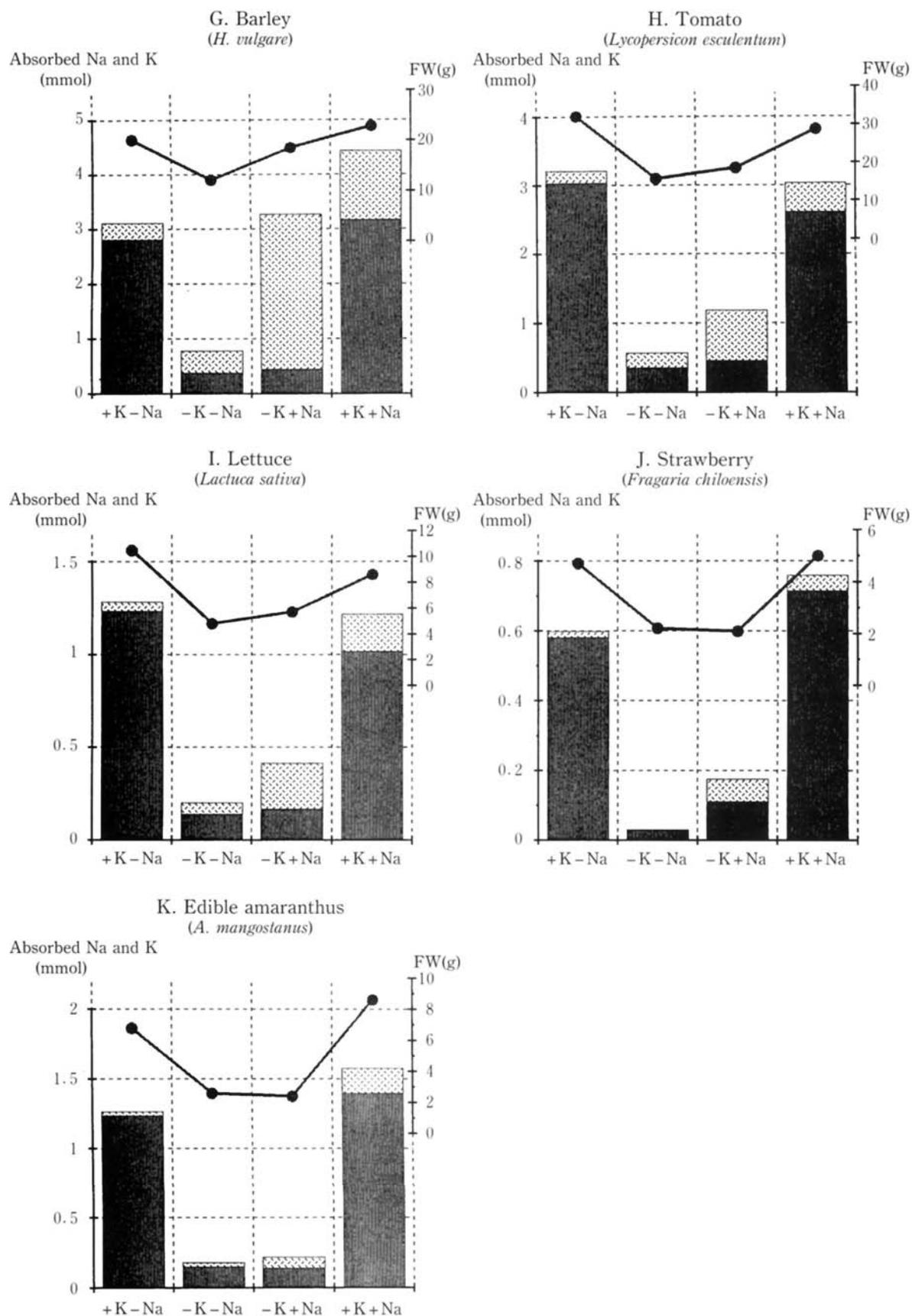


Fig. 11 (cont.)

いには地上部のナトリウム吸収量の違いがよく反映している。効果の大きかったアブラナ科6種類の作物とオオムギは、カリウム吸収量の低下をナトリウムを吸収することで補っていた。トマト、レタスもわずかではあるがナトリウムの吸収増加があり、生育に若干の寄与をしていた。しかし、効果のみられなかったイチゴ、ヒユナではほとんどナトリウムが吸収されなかった。ナトリウムの代替効果が大きかった作物は、カリウムの不足を補うため、ナトリウムを吸収して浸透圧の作出に使っていると考えられる。それは Fig. 12 に示すように、これらの作物ではカリウム不足時にナトリウムを与えると含水率が上昇することからうかがえる。

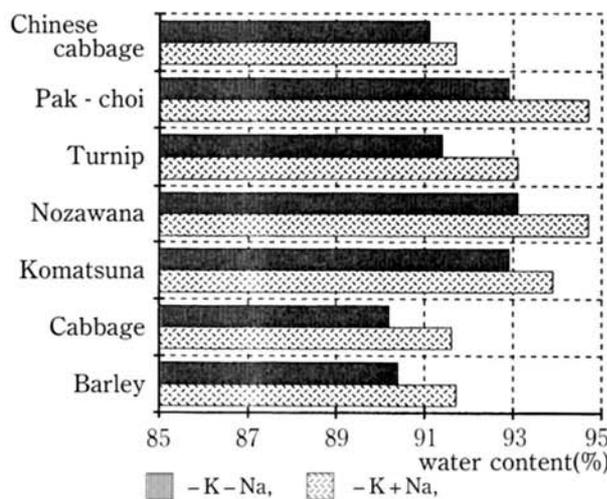


Fig. 12 Effects of Na on the water contents of crops with and without K supply.

作物のナトリウム吸収パターンと生育への効果との関係

これまで供試した20種の作物をナトリウムの吸収特性によって分類し、生育への効果との関係を検討した。

カリウムとナトリウムを等モル施用した場合、作物による両者の吸収量 (mmol) の比率を比較したところ、大きく3つのタイプに分類された (Fig. 13, A)。フダンソウとキクナは、カリウムの2倍近いナトリウム量を吸収した。オカヒジキ、ホウレンソウはカリウムと等量のナトリウムを、チンゲンサイ、マツパボタン、オオムギ、ノザワナ、ハクサイ、コマツナ、キャベツ、カブはカリウム量の1/2ないし2/3のナトリウムを吸収した。これらに対し、レタス、トマト、ヒユナ、コムギ、イネ、イチゴ、インゲン、トウモロコシのナトリウム吸収量はカリウムの1/20ないし1/5に過ぎなかった。

Fig. 13, Bはカリウムを施用しなかった場合の吸収比率を示したもので、多くの作物ではカリウムを施用したときに比べてナトリウムの吸収量が増加した。ナトリウムの吸収量の多い作物はカリウムの5倍量以上のナトリウムを吸収している。ところがナトリウム吸収量の少ない作物は3つのパターンに分かれた。すなわち、ナトリウムの吸収量がカリウムの約4倍となった作物 (イネ)、1.6倍から0.8倍になった (トマト、レタス、コムギ、ヒユナ、イチゴ)、ほとんど増加しなかった作物 (トウモロコシ、インゲン) である。

Table 1 Classification of crops according to the absorbability of Na

Type	absorbance pattern and crops
I	absorb Na more than K under sufficient K supply chard, kikuna
II	absorb Na considerably under sufficient K supply and absorb Na remarkably under insufficient K supply barley, okahijiki, spinach, portulaca, chinese cabbage, pak - choi, turnip, nozawana, komatsuna, cabbage
III a	absorb Na a little under sufficient K supply but absorb Na remarkably under insufficient K supply rice,
III b	absorb Na a little under sufficient K supply but absorb more Na under insufficient K supply wheat, lettuce, tomato, edible amaranthus, strawberry,
III c	scarcely absorb Na even under insufficient K supply kidney bean, maze,

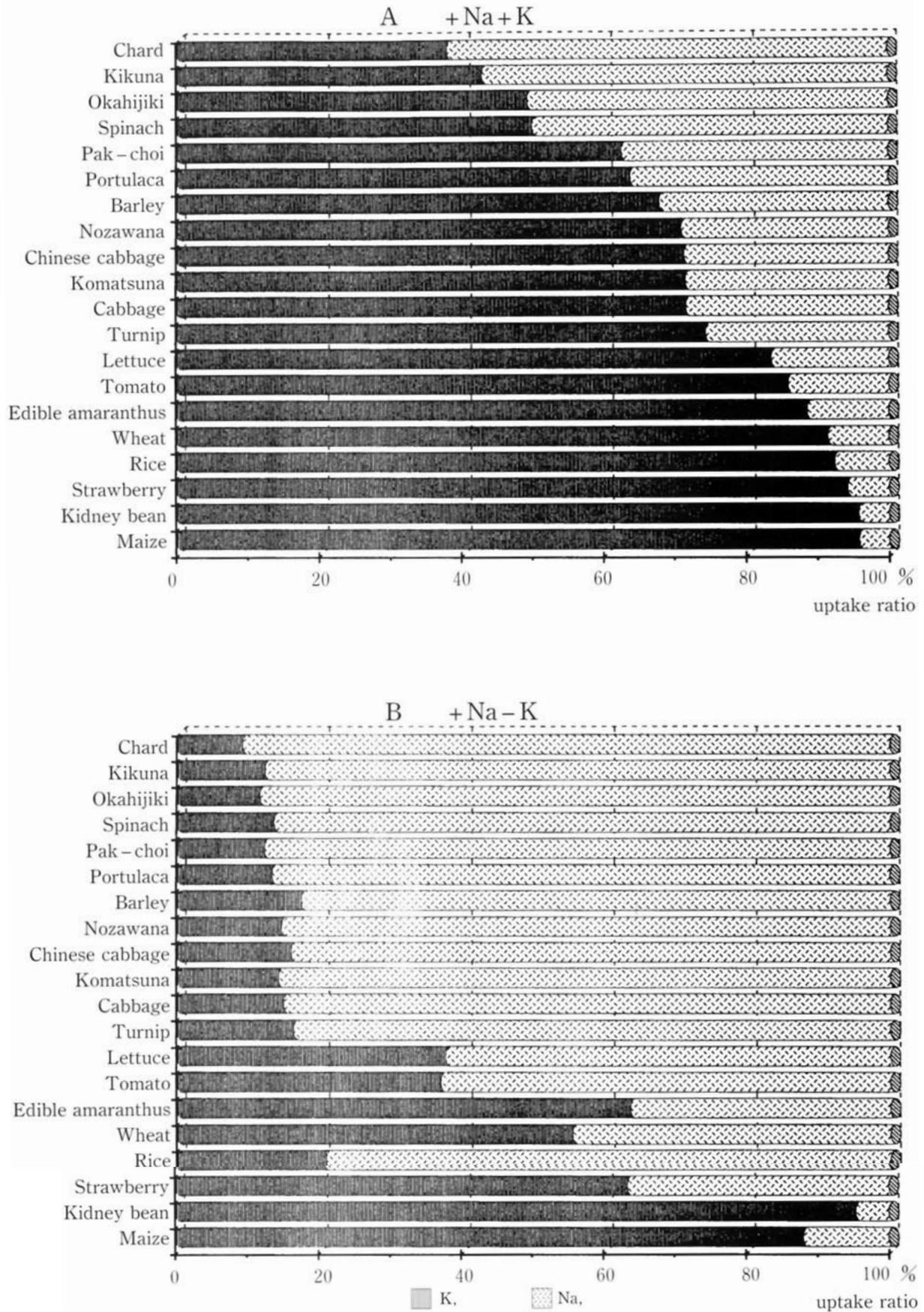


Fig. 13 Na/K uptake ratios of tops of crops A: with K supply (equimol to supplied Na) and B: without K supply (Na supplied as same amount as A).

これらの結果から、供試した20種の作物におけるナトリウムの吸収パターンを5つに分類することができる (Table 1)。Type I: カリウム施用の有無に関わらずナトリウムをカリウム以上に吸収するもの、Type II: カリウム施用時のナトリウムをかなり吸収し、カリウム不足時にナトリウム吸収性が著しく大きくなるもの、Type IIIa: カリウム施用時のナトリウムをわずかしか吸収しないが、カリウム不足時にナトリウム吸収性が著しく大きくなるもの、Type IIIb: カリウム施用時のナトリウムをわずかしか吸収しないが、カリウム不足時にナトリウム吸収性が若干大きくなるもの、Type IIIc: カリウム施用の有無に関わらずナトリウムをほとんど吸収しないものである。また20種類の作物においてナトリウムの吸収性と生育への効果の関係を明らかにするために、カリウムを与えずにナトリウムを与えた場合の地上部のナトリウム/カリウム含有量比率とナトリウムのカリウム代替率との関係を示したのが Fig.14 である。これからカリウムに対するナトリウムの代替率は、作物地上部のナトリウム吸収性に比例して大きくなるのがわかる。

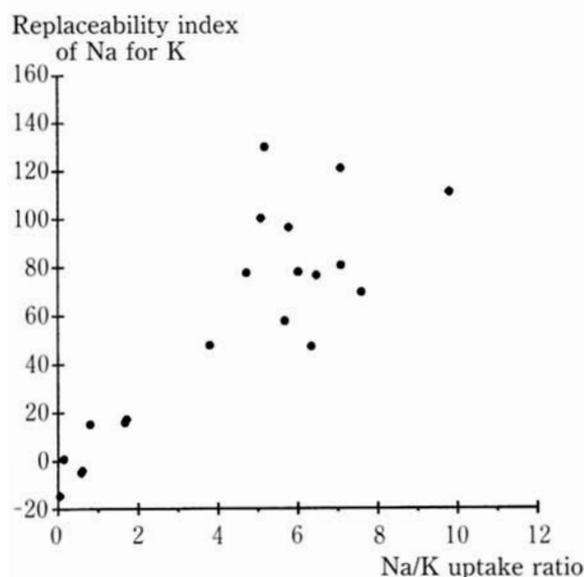


Fig.14 The relation between Na/K uptake ratios and replaceabilities of Na for K (20 species crops)

要 約

ナトリウムは植物の必須元素にはなっていない。しかし、植物の中にはナトリウムを吸収することによって生育のよくなるものがあり、その効果はカリウムの供給が十分でないときに現れやすいことも知られている。本研究は、ナトリウムの施用効果がどのような作物に認められ、それがどのような栄養特

性と関係があるのかを明らかにするために行った。

供試した作物はアカザ科 (*Chenopodiaceae*) 3種 (フダンソウ, オカヒジキ, ホウレンソウ), スベリヒユ科 (*Portulacaceae*) 1種 (マツバボタン), アブラナ科 (*Brassicaceae*) 6種 (ハクサイ, チンゲンサイ, カブ, ノザワナ, コマツナ, キャベツ), イネ科 (*Gramineae*) 4種 (オオムギ, イネ, コムギ, トウモロコシ), キク科 (*Asteraceae*) 2種 (キクナ, レタス), ナス科 (*Solanaceae*) 1種 (トマト), ヒユ科 (*Amaranthaceae*) 1種 (ヒユナ), バラ科 (*Rosaceae*) 1種 (イチゴ), マメ科 (*Leguminosae*) 1種 (インゲン) の9科20種であった。

これらの中でナトリウムのカリウム代替率が50%以上の作物は13種で、アカザ科, スベリヒユ科, アブラナ科の全ての種と、イネ科のオオムギとイネ, キク科のキクナがこれに含まれていた。アカザ科, スベリヒユ科には耐塩性の強いものが多いが、それがナトリウムの要求性に反映しているようである。アブラナ科も供試した6種類の作物すべてがナトリウムに反応したが、これはアブラナ科のもつ特性かもしれない。これに対してイネ科とキク科では種によって大きな違いがみられた。両者とも多数の種を含む大きな科であり、その中にはテンツキ (*Fimbristylis diphylla*, イネ科), ウラギク (*Aster tripolium*, キク科) などの塩生植物が存在していることが知られている¹⁾。本研究の結果からも、両科ではナトリウムに対する生理的反応に科内分化が起きているように思われる。

ナトリウムによる生育促進効果と地上部のナトリウム含有量との間には比例関係が認められ、また生育量の増加には含水量の増加が伴った。これらのことからナトリウムは、作物体内でカリウムの代わりに浸透圧を作出することによって、作物の保水力, 吸水力に寄与し、生育に貢献していると推察された。さらに根部から地上部へのナトリウムの移行性に大きな種間差異が認められ、これがナトリウムの施用効果の種間差異の主要な原因になっていることが明らかになった。

謝 辞

本論文の内容は日本土壤肥料学会関西支部講演会, 平成7年11月 (松江市) および平成8年12月 (松山市) において口答発表した。また一部は日本土壤肥料学雑誌68巻4号363~368頁 (1997年8月) に発表した。本研究は平成7年度近畿大学学内助成金の助成を得た。

文 献

- 1) 高橋英一：生命にとって塩とは何か，農文協（1987）
- 2) P.M.HARMER and E.J.BENNE: *Soil Science*, **60**, 137~148 (1945)
- 3) 串崎光男，安田環：北海道農試報，**84**，47~51 (1964)
- 4) G.W.COOKE: in "Fertilizing for Maximum Yield" P.64 Crosby Lockwood and Son, London (1972)
- 5) 前嶋一宏：修士論文（近畿大学），ナトリウムの有用性に関する比較植物栄養学的研究（1997）
- 6) P.F.BROWNELL, : Sodium as an essential micronutrient element for higher plant (*Atriplex vesicaria*). *Plant Physiol*: **40**, 460~468 (1965)
- 7) P.F.BROWNELL, and D.J.CROSSLAND, : The requirement for sodium as a micronutrient by species C4 dicarboxylic photosynthetic pathway. *Plant Physiol*: **49**, 794~797 (1972)
- 8) T.MATOH, D.OHTA, E.TAKAHASHI: *Plant Cell Physiology*, **27**, 182~192 (1986)

(受理：1997年9月30日)