

# 「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
  - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
  - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質  
《原子核物理学・原子力工学》
  - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
  - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
  - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
  - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
  - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
  - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壌肥料学》
  - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
  - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会是非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

# 放射線

鳥居 寛之  
小豆川勝見  
渡辺雄一郎  
著

中川 恵一  
執筆協力

科学的に  
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

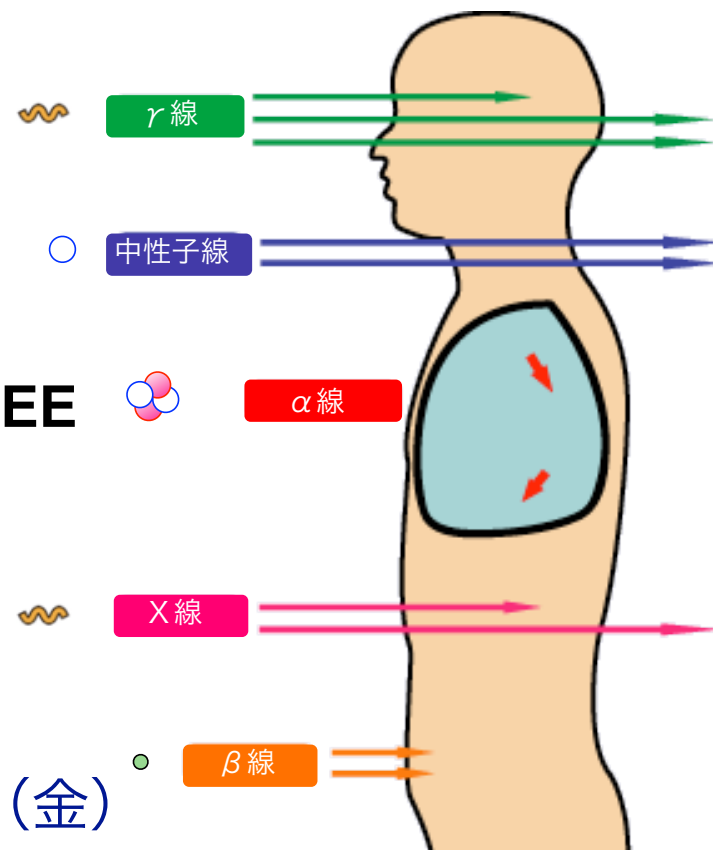
丸善出版



金曜 5 限

@ 21 KOMCEE  
(West)  
K303教室

2016 / 12 / 16 (金)



第10回

## 放射性物質汚染と農業

植物によるセシウムの吸収と輸送

藤原 徹

東京大学 農学部 応用生命化学

# 放射線を科学的に理解する

- 9/30 放射線入門 【鳥居】
- 10/ 7 放射線物理学 【鳥居】
- 10/14 放射線計測学 【小豆川】
- 10/21 放射線物理・化学 【鳥居】
- 10/28 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 4 放射線生物学 【渡邊】
- 11/11 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 12/ 2 原子核物理学・原子力工学
- 12/ 9 放射線医療 【芳賀】 【鳥居】
- 12/16 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 12/23 環境放射化学 【小豆川】
- 1/ 6 放射線の利用 【渡邊】
- 1/12 加速器科学・放射線防護学  
(木曜振替) 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

坪倉 正治 《医科学研究所》

芳賀 昭弘 《医学部附属病院放射線科》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師



## 今日のお話

- 日本の農業の状況
- 植物が土に生えて栄養を吸うしくみとその応用
- 放射性セシウムの農業影響

## 自己紹介

- 藤原 徹(52歳)
- 大阪出身、植物が好き。食べるのも好き。
- 1983年理入学Ⅱ4組
- 農学部に進学
- 植物栄養・肥料学研究室に進む。
- 植物の栄養輸送の研究を通じてより沢山、より良い食べ物を作りたい。



植物はどこにでも生える。

その植物に依存して私たちは生活している。

植物が育つために必要なものは？

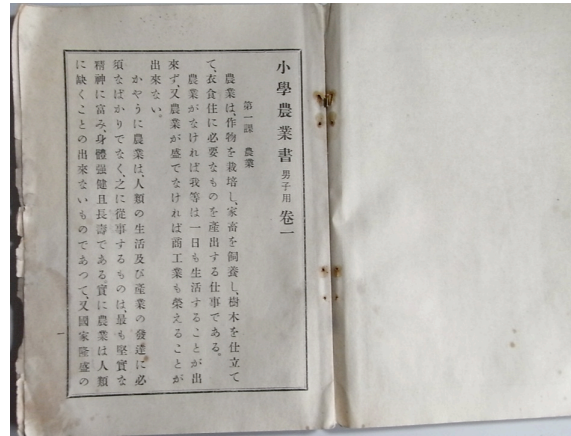
## メソポタミア文明の移動



図 I-5 メソポタミア地方  
首都はウルから、バグダッド(現在)へと移動した。

中央ヨーロッパにおける穀実収穫倍率の推移(Hushofer, 1976)  
1 kgの種子から得られる子実収量(kg)

	平均的土壌	最優良土壌
中世 (12-15世紀)	3~4	
16-17世紀	5~6	7~15
19世紀初頭	5~6	12~20



世界の人口の推移(推計)

先史時代 100万人? 1000万人?  
 紀元の前 2億人程度?  
 10世紀 2-3億人程度  
 1700頃 5億人  
 1800頃 10億人  
 1900頃 16億人  
 1940頃 23億人

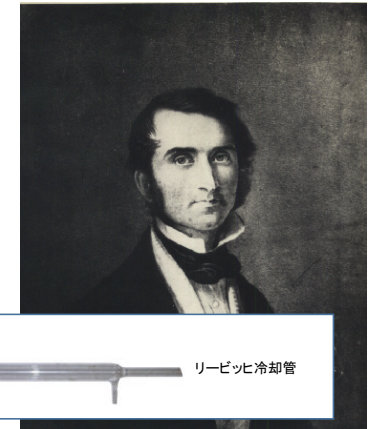
肥料による  
食糧増産

1970頃 37億人  
 2011 10.31. 70億人

緑の革命  
多肥による  
増産



Justus von Liebig  
(1803-1875)  
無機栄養説



表II-1 元素の必須性の発見経過

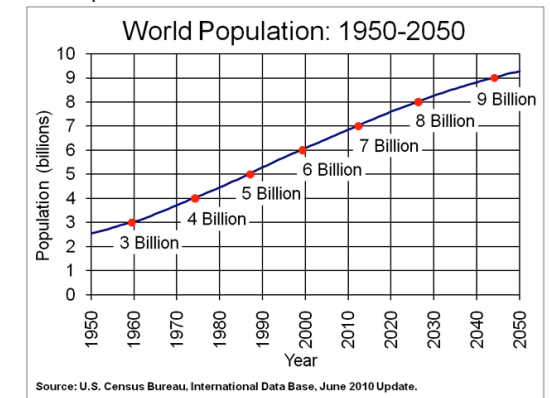
元素	発見者	発見年
C	De Saussure	1804
H	De Saussure	1804
O	De Saussure	1804
N	De Saussure	1804
P	Ville	1860
K	von Sachs, Knop	1860
Ca	von Sachs, Knop	1860
Mg	von Sachs, Knop	1860
Fe	von Sachs, Knop	1860
S	von Sachs, Knop	1865
Mn	McHargue	1922
B	Warington	1923
Zn	Sommer & Lipman	1926
Cu	Lipman & MacKinney	1931
Mo	Arnon & Stout	1939
Cl	Broyer et al.	1954
Ni	Brown et al.	1987

植物栄養学  
文永堂(2001)

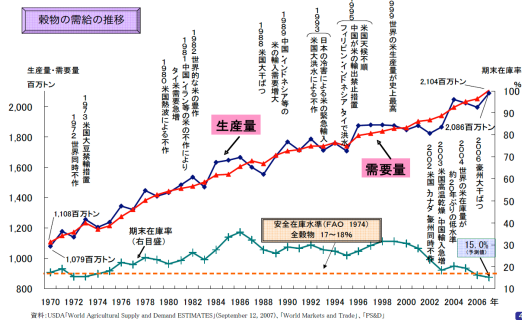


啓林館 化学II

World Population: 1950-2050



穀物需要量が増加する一方、生産量は変動を繰り返しつつ、これに対応



(農林水産省ホームページより)

## クイズ2

- あなたが1年に食べるお米を作るにはどれくらいの面積の田んぼが必要でしょう？

## ホウ素とは？

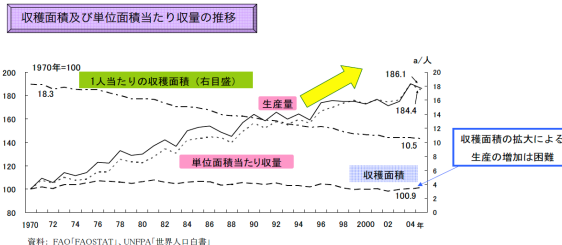
### 生活でのホウ素の利用

- ガラス(ホウケイ酸ガラス)
- ゴキブリ駆除のホウ酸だんご、目薬
- ガン中性子捕捉療法
- 原子力発電の制御棒 など

### 生物にとってのホウ素

- 生物にとって必須であり、高濃度では有毒
- ヒトはホウ素を主に植物由来食品から摂取
- WHOの大人のホウ素の摂取基準1~13mg/日
- 日本の環境基準(健康項目) 1mg/L

単位面積当たり収量の伸びにより、需要に応じた生産を実現



(農林水産省ホームページより)

## クイズ3

- 日本でイネを1ha栽培すると、いくら収入がえられるでしょう？

植物の生育に必要な元素は17種類。

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	A	Uuq	Uuh	Uus	Uuo	Uuq	Uur	Uus	Uuo	Uuq	Uur	Uus	Uuo	Uuq	Uur	Uus

L	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
A	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

## ホウ素は植物の生育に必須

(島根県でのホウレン草のホウ素欠乏症の例)



写真55 葉身の奇形(萎縮)

ホウ素欠乏症状の発生は80カ国、132種の作物で報告。日本でもホウ素を含む肥料が用いられている。

## 過剰のホウ素は植物に有害

(トマトのホウ素過剰症の例)



(Watanabe, 1985)

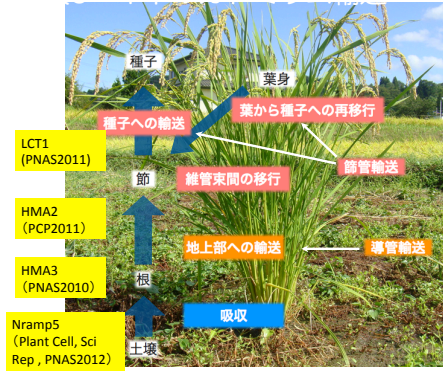
ホウ素が少なすぎても多すぎてもうまく生育できない。

## クイズ

- 日本でイネを1ha栽培すると、何kgのお米が収穫できるでしょう？



# カドミウムの輸送プロセス



## イネにおけるカドミウム輸送とLCT1の発見

茎葉から種子へのCd輸送を担う遺伝子 (LCT1) を発見

カドミウムの種子への輸送の3段階

- 1) 根による吸収
- 2) 茎葉への移行
- 3) 茎葉から種子への移行

LCT1は節の維管束で発現

LCT1は細胞膜にある。

LCT1のCd輸送活性

低LCT1イネをRNAiで作出

低LCT1イネでは玄米のCdが減少

## LCT1抑制によるカドミウム低減技術の開発

LCT1の発現抑制によって種子Cdの低減を実現。

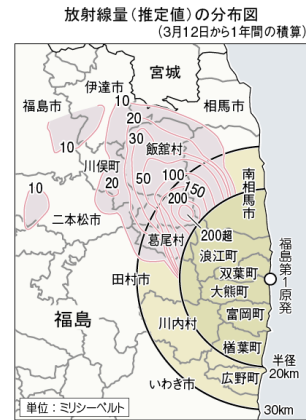
成果はPNASに発表され、新聞やNHK、ネットで配信された

2011年12月13日 日本農業新聞

2011年12月13日 NHKおはよう日本

研究者チーム(東京大学など) コメ カドミウム濃度を半減させる技術の解明へ 稲の葉・茎にある「節」の細胞膜に注目

2011年3月11日



### 植物の生育に必要な元素は17種類。

## 塚田さんの論文の紹介

### イネのセシウムとカリウムの挙動を比較したもの

ENVIRONMENTAL POLLUTION

Environmental Pollution 117 (2002) 403–409

www.elsevier.com/locate/envpol

Rice uptake and distributions of radioactive <sup>137</sup>Cs, stable <sup>133</sup>Cs and K from soil

H. Tsukada<sup>a,\*</sup>, H. Hasegawa<sup>a</sup>, S. Hisamatsu<sup>a</sup>, S. Yamasaki<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Radiocology, Institute for Environmental Sciences, 1-7 Jinnomae, Obauchi, Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212, Japan

<sup>b</sup>Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, 1-1 Aramaki-cho, Taihaku-ku, Sendai 981-8555, Japan

Received 6 September 2000; accepted 13 July 2001

\*Capsule\*: Uptake and distribution of <sup>137</sup>Cs in polished rice and rice bran was similar to that of <sup>133</sup>Cs, but different than uptake by K.

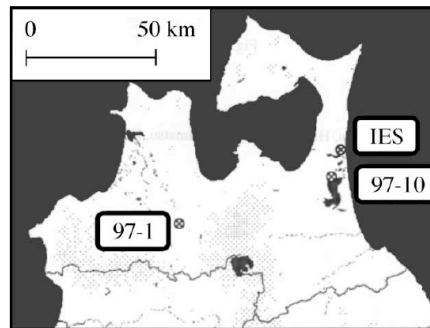


Fig. 1. Sampling sites for rice plant samples. IES, Experimental field (40°57'46" N, 141°21'54" E); 97-1, Kuroishi (40°38'42" N, 140°35'04" E); 97-10, Rokkasho (40°50'50" N, 141°19'15" E).

Table 1  
Concentrations of <sup>137</sup>Cs, <sup>133</sup>Cs and K in the surface paddy soil

Sampling site <sup>a</sup>	<sup>137</sup> Cs (Bq kg <sup>-1</sup> )	<sup>133</sup> Cs (mg kg <sup>-1</sup> )	K (mg kg <sup>-1</sup> )
IES	4.4 ± 0.4 <sup>b</sup>	3.4	7900
97-1	14 ± 0.8	2.4	5900
97-10	2.5 ± 0.2	2.6	6800

<sup>a</sup> IES, Experimental field; 97-1, Kuroishi; 97-10, Rokkasho.  
<sup>b</sup> The errors indicate one standard deviation of counting statistics.

日本の土壤には「もともと」放射性セシウムがあった。



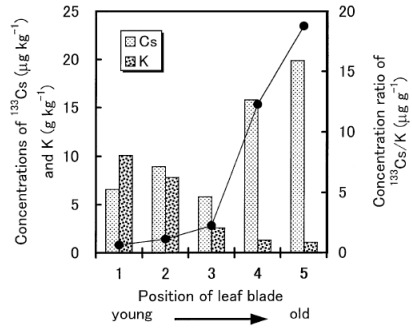


Fig. 4. Concentrations of <sup>133</sup>Cs (solid circles) in different leaf positions and K contents in the soil corrected for <sup>133</sup>Cs/Al and K.

植物体内でのセシウムとカリウムの挙動は違う。

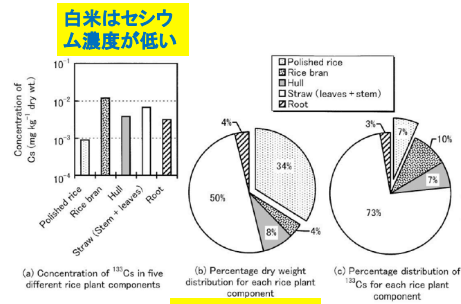


Fig. 5. Concentration of <sup>137</sup>Cs, and percentage distribution for each rice plant component in rice plant components collected from an experimental field at harvest time. The subtracted <sup>137</sup>Cs content in rice plant components corrected for <sup>137</sup>Cs/Al ratio.

白米はセシウム濃度が低い  
イネの半分はわら、1/3が白米

Table 2 Transfer factors and removal percentages of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs for rice plant components

Sample	Transfer factor		Removal percentage <sup>a</sup>	
	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Rice plant component				
Polished rice	0.0021	0.0011	0.00059	0.00031
Rice bran	0.062	0.0094	0.0019	0.00029
Hull	0.051	0.0049	0.0035	0.00033
Straw	0.21	0.0050	0.088	0.0021
Aboveground part	0.12	0.0038	0.094	0.0030

<sup>a</sup> The percentage of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs removed from the upper soil layer to the plants.

イネの移行係数は低い。

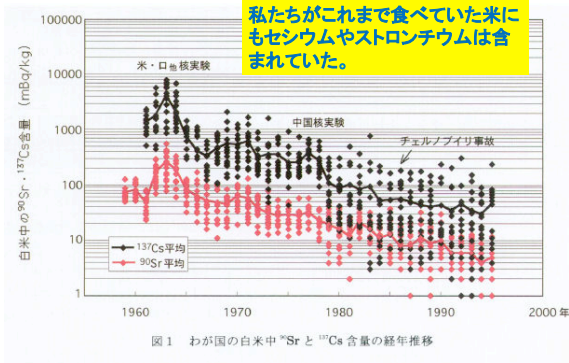
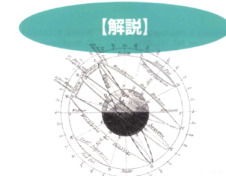


図1 わが国の白米中<sup>90</sup>Srと<sup>137</sup>Cs含量の経年推移

(農業環境技術研究所)

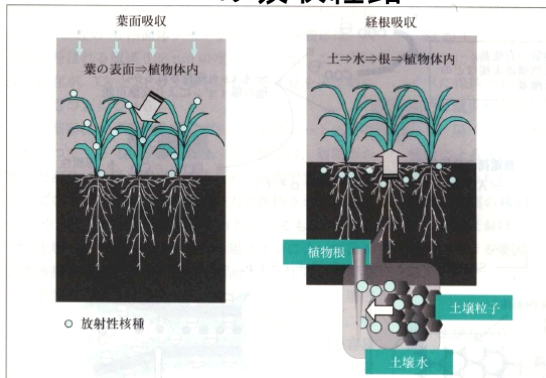


【解説】  
土壌-作物系における放射性セシウムおよび放射性ストロンチウムの動態

塚田祥文\*1, 山口紀子\*2, 高橋知之\*3

(化学と生物 2011年12月号)

二つの吸収経路



137Csの垂直分布  
フォールアウト

137Csは比較的浅い。

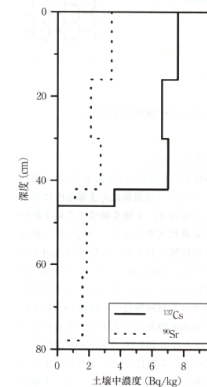


図2 畑土壌における<sup>137</sup>Csおよび<sup>90</sup>Srの鉛直分布  
黒ボク土、1998年2月採取

福島での測定例 (東京大学 塩沢らによる)

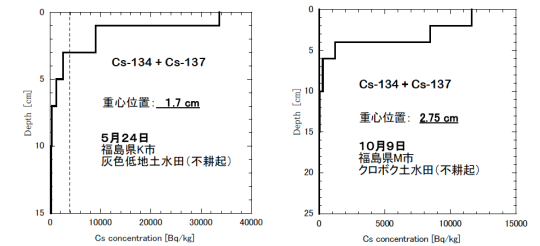


図1 a 水田土壌の放射性Csの鉛直分布例1

図1 b 水田土壌の放射性Csの鉛直分布例2

137Csは浅い。表土1cmにほとんどある。

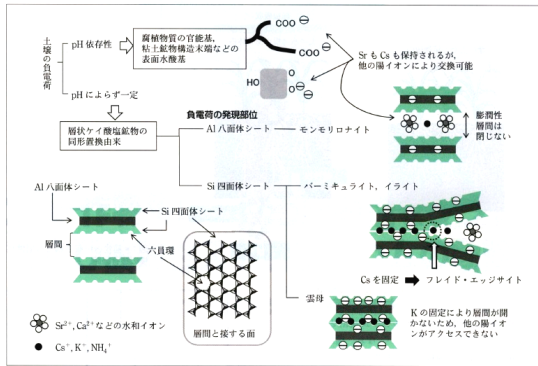


図3 ■ 土壌の負電荷へのCs, Sr保持メカニズム

表1 ■ 日本における土壌からイネ(乾物)へのフォールアウト<sup>137</sup>Csおよび<sup>90</sup>Srの移行係数

放射性核種	作物	幾何平均値	±95% 信頼区間	文献
<sup>137</sup> Cs	白米	0.0016	0.00021 ~ 0.012	14
	白米*	0.0018	0.00017 ~ 0.016	15
	玄米	0.0033		16
	玄米*	0.0047	0.00057 ~ 0.033	15
<sup>90</sup> Sr	白米	0.0048	0.0021 ~ 0.0094**	17
	白米*	0.0043	0.00097 ~ 0.019	15
	玄米*	0.026	0.0049 ~ 0.15	15

\*1990~2000年の測定データを用いて計算、水分12%と仮定して乾物重量に補正。 \*\*最小値と最大値

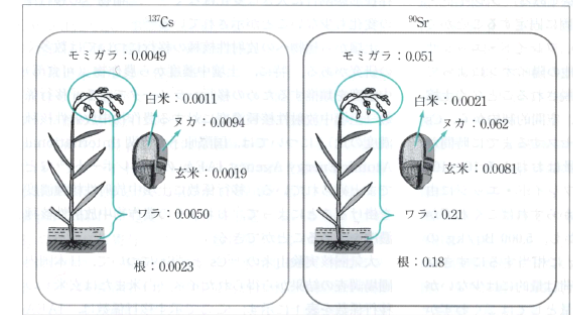


図5 ■ 土壌中濃度を1.0としたときのイネにおける部位別<sup>137</sup>Csおよび<sup>90</sup>Srの相対濃度

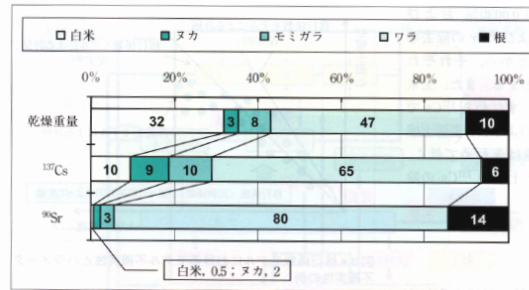
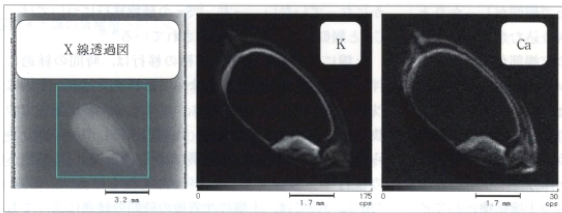
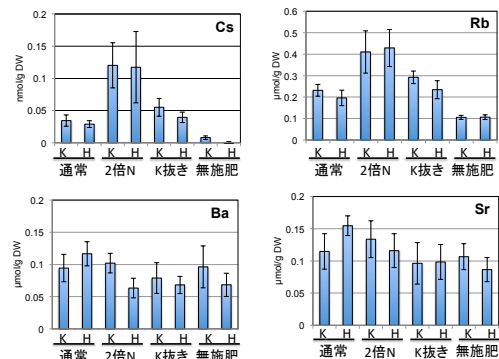


図6 ■ 収穫時におけるイネ部位別の乾物重量と<sup>137</sup>Csおよび<sup>90</sup>Srの存在割合

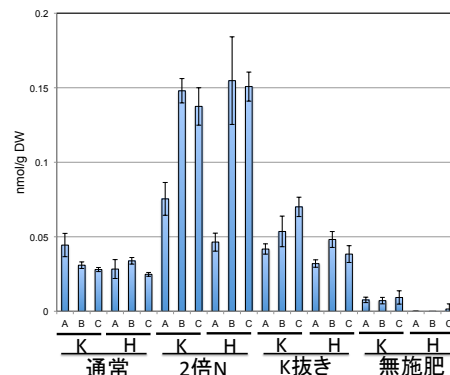




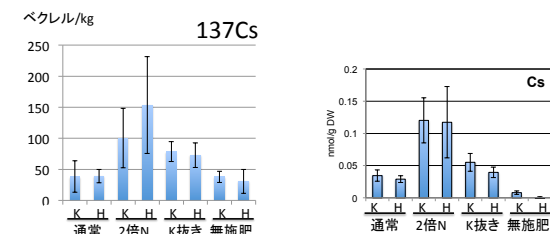
### 福島県川俣町水田での肥料試験(昨年8月)



### 福島県川俣町水田での肥料試験2-ばらつき

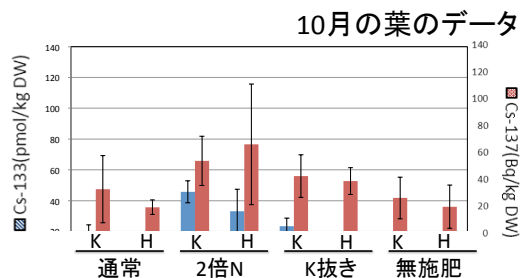


### 福島県川俣町水田での肥料試験137Csの吸収

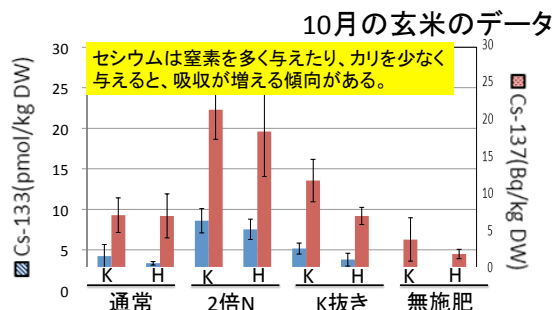


- 肥料によって吸収が実際の農地で変化する。
- 放射性セシウム放射性セシウムにはある程度の相関がある。

### 福島県川俣町水田での肥料試験 133Csと137Csの吸収



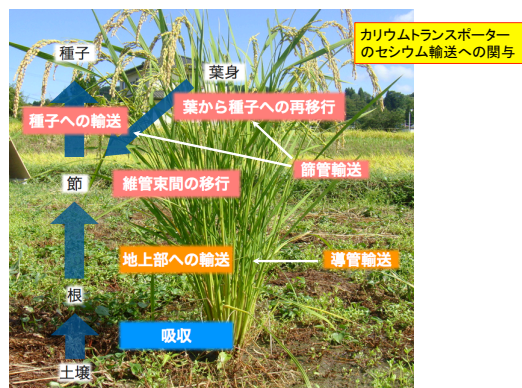
### 福島県川俣町水田での肥料試験 133Csと137Csの吸収



### 当時目指した研究

- 品種間差異や変異系統を利用して、セシウムの輸送を制御する遺伝子(トランスポーター?)を見つける。
- セシウムを蓄積しにくいイネを開発する。

間に合いますか?



### これまでの福島での試験を通じて 感じること

2011年:  
時間の限られた中での判断を求められる。  
誰が判断するのか?  
どこまでの根拠が必要なのか?  
影響をどこまで考えるのか?  
どのような立場で考えるのか?  
"皆さん"の理解とマスコミ。

その後:  
時間の経過と意識の変化

### 水田の作付け基準

- 2011年は  
5000ベクレル/Kg土壌以下。  
米の暫定基準は500ベクレル/Kg

つまり、移行係数0.1を想定している。  
実際には0.001程度なので、かなりの安全を見越している。  
さらには、収穫された米についての測定もなされる。

# 水田の作付け基準

- 2012年は  
昨年基準値超えしなかった農地。  
米の基準は100ベクレル/Kg  
全袋調査

表 1 日本における土壌から農作物（乾物）へのフォールアウトCs-137移行係数の例

作物	幾何平均値	±95%信頼区間	乾物割合(%)	試料数	引用文献
白米	0.0016	0.00021 - 0.012		n=20	Tsukadara, 2002b
白米	0.0030*			n=15	駒村ら, 1994
玄米	0.0033			n=12	Uchidaら, 2007
葉菜類	0.049			n=8	Kamei-Tshikawaら, 2008
キャベツ	0.026	0.0021 - 0.33	0.072	n=8	Tsukadara, 2002c
果菜類	0.029			n=8	Kamei-Tshikawaら, 2008
パレシヨ	0.030	0.0050 - 0.18	0.20	n=26	Tsukadara, 1999
パレシヨ	0.020			n=7	Kamei-Tshikawaら, 2008

\*算術平均値(水分12%と仮定して乾物重量に補正)

注)ここに示す移行係数は農作物中濃度を乾燥重量として示した値である。従って、表の移行係数から農作物中生重量(新鮮重量)に換算するためには、乾物割合(例:IAEA, 1994; Tsukadara, 1998)で換算する必要がある。

日本土壌肥料学会

TableIII-12 非葉菜のCsの移行係数

Csの移行係数	データ数	対数平均値	中央値	(単位:(Ba/g-wet)/(Ba/g-dry))		
				対数標準偏差	最小値	最大値
全データ	35	3.4E-04	3.8E-04	0.68	1.0E-05	1.2E-02
ジャガイモ	6	9.0E-04	6.6E-04	0.64	1.7E-04	1.2E-02
サトイモ	2	1.1E-03	-	-	8.4E-04	1.5E-03
サツマイモ	2	7.5E-04	-	-	2.7E-04	2.1E-03
タマネギ	3	1.6E-05	1.6E-05	0.20	1.0E-05	2.6E-05
キュウリ	3	1.0E-04	1.0E-04	0.74	1.8E-05	5.5E-04
トマト	3	8.0E-04	7.8E-04	0.40	3.2E-04	2.0E-03
ナス	3	3.0E-04	3.6E-04	0.19	1.8E-04	4.2E-04
ピーマン	2	1.8E-04	-	-	1.1E-04	3.2E-04
ニガウリ	1	2.0E-03	-	-	-	-
ニンジン	2	7.1E-05	-	-	2.5E-05	2.0E-04
大豆	6	3.9E-04	3.2E-04	0.28	2.2E-04	1.2E-03
大豆	1	1.8E-03	-	-	-	-
ピーナッツ	1	9.1E-04	-	-	-	-

放医研 内田らの文献(2)

TableIV-4 葉菜のCsの移行係数

Csの移行係数	データ数	対数平均値	中央値	対数標準偏差	(単位:(Ba/g-wet)/(Ba/g-dry))	
					最小値	最大値
全データ	154	1.8E-02	2.0E-02	0.83	2.0E-04	2.5E+00
キャベツ	44	1.6E-02	1.3E-02	0.86	6.3E-04	4.7E-01
カリフラワー	3	1.6E-02	1.7E-02	0.39	6.2E-03	3.7E-02
コマツナ	15	7.3E-02	6.2E-02	0.30	5.2E-02	8.7E-01
セロリ	4	2.6E-03	2.7E-03	0.25	1.3E-03	5.0E-03
ハセリ	3	9.9E-02	1.9E-01	0.63	1.9E-02	2.7E-01
ホウレンソウ	21	5.6E-02	1.1E-01	0.75	1.9E-03	9.6E-01
レタス	42	1.4E-02	1.6E-02	0.67	3.3E-04	2.9E-01
からし菜	2	2.2E+00	-	-	2.0E+00	2.5E+00
その他	20	3.8E-03	2.8E-03	0.67	2.0E-04	7.0E-02

農作物への移行係数データの収集より評価パラメータ設定のため抽出したデータ

## 福島の農業のこと

Csによる汚染 2011年で米で20ベクレル/kg程度  
 去年は1ベクレルあるかないか。

実は、バナナ1本は20ベクレル程度。  
 米1kgのカリウム由来の放射能が20ベクレル/kg程度  
 私は7000ベクレル程度。

それでも人は福島産の農産物を買わないのではない  
 か？安心？安全？

その中で福島の農家が自立できる  
 農業と政策が必要。

## 私の現状認識(2012)

- 検出事例は減少している。
- “除染”され、人々が住める状況では作物への汚染は限定的
- ゼオライトの投与
- 流入を減少させる。
- 菌類への集積に注意が必要

## 私の現状認識(2013)

- 検出事例はさらに少ない。
- “除染”が進んでいて、農業を再開している地域が増えている。
- “汚染”は現象傾向
- しかし、福島のコメは東京のスーパーではほとんど売られていない。
- 海洋についてはさらに注意が必要

## 私の現状認識(2015)

- 全袋検査自体が話題に上らない。
- 農業は浪江町などでも再開している地域がある。
- しかし、福島のコメは東京のスーパーではあまり売られていない。
- 海洋については継続して注意が必要

## 今日の課題

あなたが福島県の農家であった場合、将来の農業をどのように展開すると良いと思うか、自由に記述せよ。