

東北活性研との共同研究

成果報告書

岩手大学農学部応用生物化学研究室 河合成直

1. はじめに

2011年3月11日の大震災の直後は、東北地方の人々は直接被害にあった人も直接被害が無かった人も一様に、呆然としていたというのが実態であったと思われる。津波被害を受けた岩手県沿岸の現地を訪れればその被害の大きさに、非常に無力感を感じるものである。



大槌町の被害の様子

それでも、私共大学関係者は、東北各地の津波被害を受けた地域の復興のために、何かをしなければならないという使命感を持って、この共同研究を開始した。

最初に、津波を受けた農地は海水を被ったために、土の塩分含量が高くなっていることが予想された。その塩分含量を見積るために最も簡易な方法は、その土の電気伝導度 (Electron Conductivity, EC) を測定することであった。宮古市や久慈市の津波を受けた土壤を採取し、その EC を測定したところ、3 から $10 \text{ dS}^{-1} \text{ m}^{-1}$ (デシジーメンス/メーター)

を示していた。私の塩類土壌を用いた研究によれば、塩類に耐性が無い通常の作物は土壌の EC が $2 \text{ dS}^{-1} \text{ m}^{-1}$ を超えるところでは、生育できないことが示されていた。しかし、一部の塩類耐性作物は、そのような高い EC の土においても生育可能であることが示されていた。

そこで、本実験では、最も早く大学と連絡が取れ、直ちに実験圃場を借りることができた久慈市内に試験地を設けた。久慈市周辺は比較的被害が小さく、農家の住宅にはさほど大きな被害が無かったため、農家が協力できる状態にあったともいえる。その畑において、正直にいえば、作物が生育可能であるという確信は無かったが、おそらく塩類耐性が強いと言われているソルガムは生育できるのではないかと考え、その種子を播き、その生育を見ながら、そして、その植物による塩類の除去効果を測定する実験を開始した。

2. 材料と方法

岩手県久慈市内の小向馬吉さん、及び、小向晶子さんの畑に $3\text{m} \times 3\text{m}$ の実験圃場を設定し、除塩作物として知られるソルガムを播種した。その際、化学肥料を施用した施肥区、化学肥料を施用しない無施肥区を設けた。植物の生育と土壌の性質（土壌の pH と塩類の濃度を反映する電気伝導度（Electron Conductivity））を 6 カ月にわたり調査した。土壌は、畑の中の表面から 0-10 cm、10-20 cm、20-30 cm、30-40 cm の深さの土壌を採取した。

3. 結果



小向馬吉さんの畑のソルガムの生育の様子

小向馬吉さん、小向晶子さんの畑の位置は数百m離れているだけで被った海水の深さはほぼ同じであったが、その植物の生育には大きな違いが有った。その理由は、晶子さんの

畑は、水道水が利用可能で、津波後 1 カ月ころから大量の水を散布したことであった。そのため、早く塩類が洗浄出来たと考えられる。

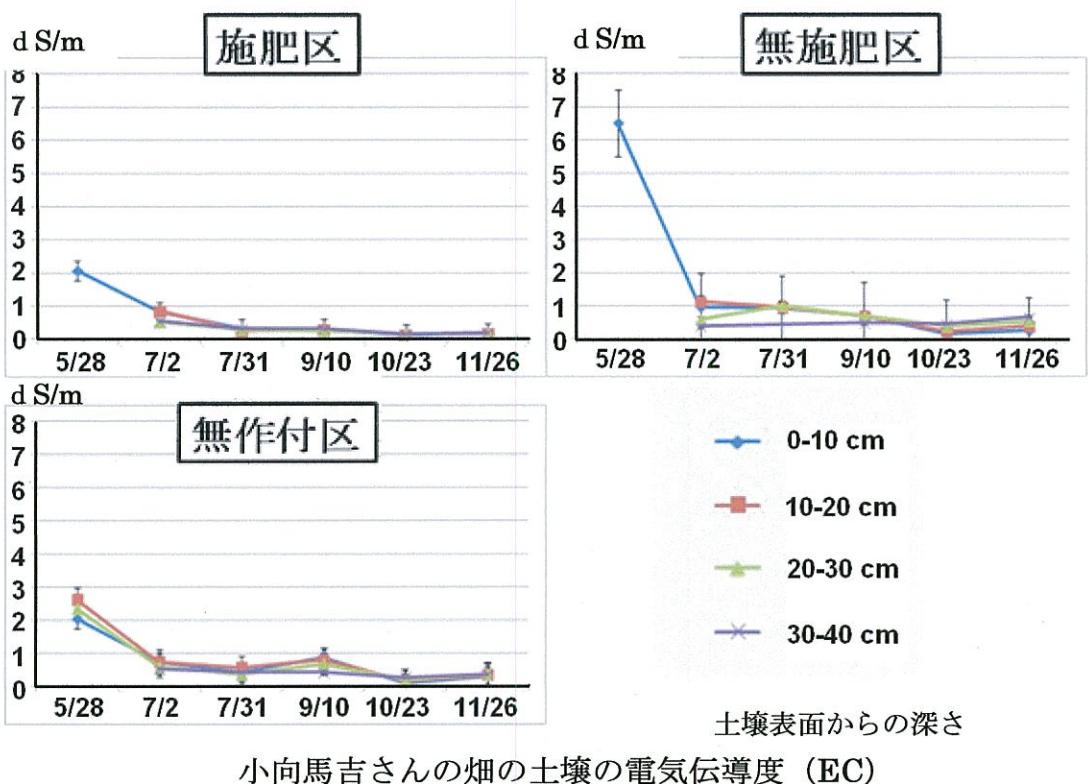
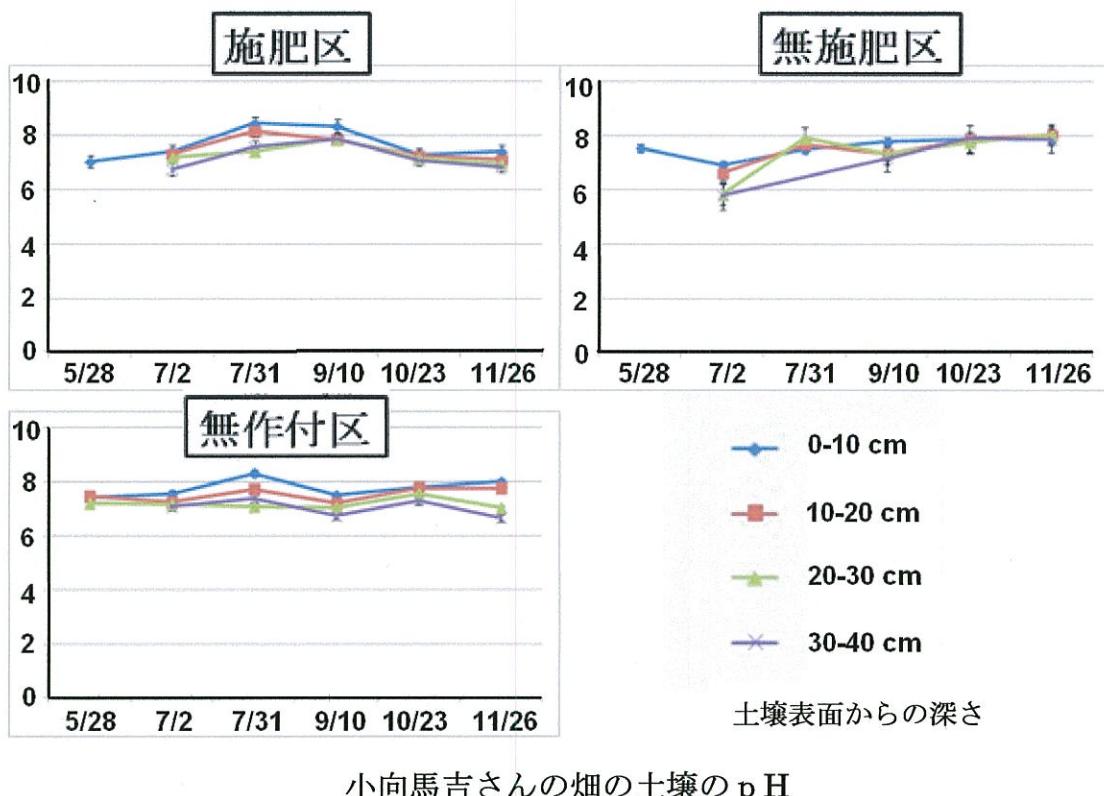


小向晶子さんの畑

5月 28 日に播種した後、7月 2 日、7月 31 日、9月 1 日、10月 23 日、11月 26 日に土壤を採取し、11月 26 日に植物を刈り取った。次ページに小向馬吉さんの畑の土壤の pH と土壤の電気伝導度 (EC) の変化を図示した。

pH については、7・8 の間を推移した。作物の生育には 5.5・6.5 が望ましいとされていることから、高すぎることが指摘できる。これも、海水の影響であると考えられる。通説によれば、塩害にはカルシウム資材を施用することが望ましいとされているが、カルシウムを施用すると土壤 pH が上昇するため、本実験ではカルシウムを施用しなかったことが良かったと思われる。また、通説では海水中のイオウが夏季に酸化し硫酸となり、土壤 pH を低下させると言っていたが、そのような傾向は見られなかった。今後、pH は降雨により低下すると考えられ、さほど心配はないと思われる。

電気伝導度 (EC) については、これが高いと塩分が多いことを示し、塩分が多いと作物の生育は著しく阻害されるが、夏季の間をとおして、EC は低下を続けた。夏季の降雨が EC 低下に寄与したと思われた。そして、その値は 0.5 前後であり、窒素、リン酸、カリなどの 3 要素やカルシウム、マグネシウムが適正に施用されれば植物の生育は可能であると考えられる。よって、来年度は、塩分をさほど気にする必要はなく、土壤養分を有機物などと共に施用することが重要であるとの結論が得られた。津波被害を受けた三陸地域の水はけが比較的良い畑においては、同様の結果が得られているものと思われる。この結果は、来年以降の三陸各地での農耕復興実験の貴重な基礎データとなると思われる。



平成 24 年 3 月 30 日

成果報告書

除塩復旧農地の健全性の早期検証技術の開発

岩手大学農学部

農学生命課程

庄野 浩資

1. はじめに

震災による津波被災農地の復興には除塩処理が必要となるが、処理の状況によっては NaCl を代表とする生育阻害物質が微量残留する事態が十分に考えられる。微量生育阻害物質の早期検出は必ずしも容易でなく、また植物の生育にどのような影響を与えるのかも不明である。本研究の最終目的は、生育阻害物質の残留を植物を用いた生物検定により検出する技術の開発である。まず今回は微量濃度 NaCl を対象とし、塩感受性植物に与える生理的な影響の解析を通じて指標作物としての適性、有効な生育調査項目の検討を行った。

2. 材料および方法

(1) 供試材料

代表的 NaCl 感受性植物であるインゲンマメ (*Phaseolus vulgaris* L. 'モロッコ') を用い、これが微量濃度 NaCl の指標作物となり得るか、またその際の調査項目として何が適切かを策定した。

(2) 栽培ならびに処理方法

培地にはサカタのタネ(株)製の育苗用培土ジフィーセブンを用い、発芽後ガラス温室に移動、さらに適宜間引きをして各個体間の生育状態が一定となるように調整した。さらに初生葉が展開した直後から濃度を数段階に調整した NaCl 水溶液を継続的に添加した。この際、各培地で乾き具合がなるべく一定になるよう十分に注意した。設定した濃度は、0M (対照区)、0.01M、0.03M、0.05M、0.1M の 5 段階とし、サンプル数は各処理区 5 株の計 25 株とした。尚、本研究では 0.01M、0.03M 区を微量濃度区と称する。実験の日程は、10 月 7 日に播種、その後 10 月 14 日に塩水処理を開始し、測定は 10 月 27 日まで行った。

(3) 生育調査項目

生育状況を調査するために、葉幅 × 葉長(葉面積の指標値)、SPAD 値(葉緑素含量の指標値)、気孔コンダクタンス、Fv/Fm(光合成活性)を生育と共に経時的に測定し、さらに栽培終了時には、含水率、クロロフィル含量、Na⁺および K⁺濃度を測定した。

3. 結果および考察

葉幅 × 葉長は、生育が進むにつれて高濃度区ほど値が小さくなつたが、測定最終日の 10 月 27 日においても、対照区、微量濃度区間に有意差は見られなかつた(以下すべて 5% 有意水準における Tukey-Kramer の HSD 検定による)。

気孔コンダクタンスは、生育が進むにつれて高濃度区ほど値が小さくなつたが、興味深

いことに処理 3 日後の測定初日のみ 0.01M 区で値が対照区を有意に上回った（図 1）。

SPAD 値は、高濃度区では生育に伴う値の減少が小さく、最終日でも対照区と有意差がないのに対し、微量濃度区では値が大きく減少し、特に 0.01M 区では処理開始 7 日後の時点から対照区を有意に下回った（図 2）。

Fv/Fm は、SPAD 値と同様の傾向を示し、0.01M 区において処理開始 10 日後から対照区を有意に下回った（図 3）。

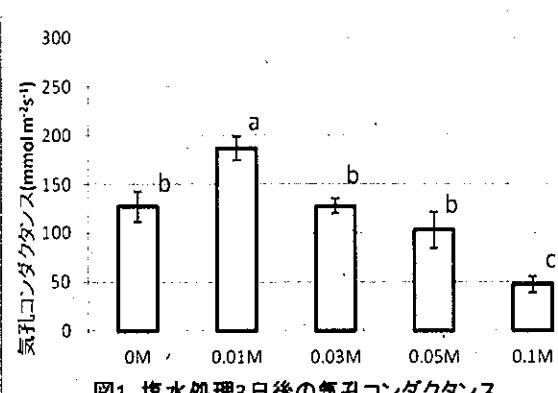


図1 塩水処理3日後の気孔コンダクタンス

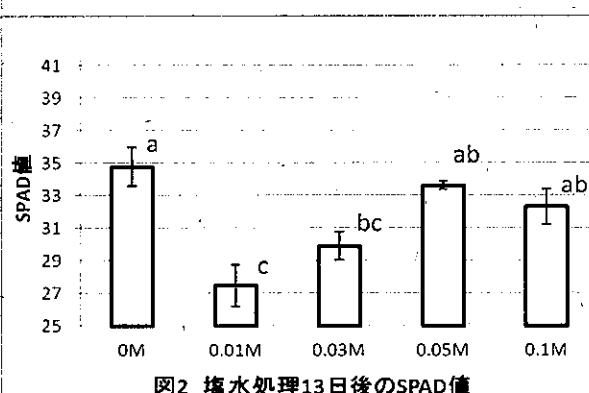


図2 塩水処理13日後のSPAD 値

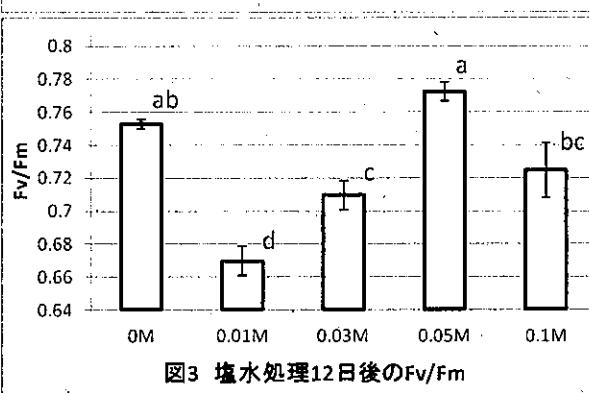


図3 塩水処理12日後の F_v/F_m

ここで、気孔コンダクタンスには水ストレス、SPAD 値ならびに F_v/F_m には塩ストレスによる光合成系への影響がそれぞれ反映されると考えられる。このため、気孔コンダクタンスが低い高濃度区では、水ストレスすなわち吸水阻害が伺えるが、逆に、気孔コンダクタンスが高い微量濃度区では塩水をより多く吸水していることが伺える。この結果、微量濃度区の植物体内でより多くの毒性イオンが蓄積して光合成系を破壊し、その結果が塩ストレスとして SPAD 値、 F_v/F_m に現れたと考えられる。

今回、微量濃度区では、処理開始から 2~3 日に気孔コンダクタンスが対照区より有意に上昇した。また同様に、塩水処理開始から 10 日~14 日では SPAD 値、 F_v/F_m 値が対照区より有意に下降した。これらの結果から、インゲンマメは微量濃度塩の影響を顕著に受け、その指標作物となり得ると考えられる。また、生育調査項目としては、気孔コンダクタンス、SPAD 値、 F_v/F_m がそれぞれ有効と考えられる。さらに今後は、栽培環境の影響に関して検討する予定である。

謝辞

本研究の一部は本学農学部農学生命課程・武氣壯平君の平成 23 年度卒業論文研究として行われた。同氏のご協力に心より感謝の意を表する。

以上

津浪被災農地で栽培されたソルガムの光合成活性および気孔コンダクタンス

岩手大学 松嶋卯月

背景

被災農地には、海水による塩ストレスに加えて、表土の流失や海砂およびヘドロなどの堆積、地下水位の上昇などが観測され、作物の生育不良を引き起こす要因がいくつも複雑に作用する。そのため、被災農地における塩の滞留等の土壤状況変化が、植物育成にどの程度のストレスを与えるか知る必要がある。そこで本研究では、水田および畑の塩害被害の実態把握と対策技術の確立のために、被災農地で栽培されたソルガムの生長と土壤状況の変化との関係を明らかにするために、塩ストレスの程度に敏感な気孔コンダクタンス、および、植物の生長を左右する光合成活性を調査した。

調査方法

本調査では、久慈市の被災農地に2011年5月28日に播種されたソルガム(*Sorghum bicolor*)のうち、施肥および無施肥の2試験区で栽培されたものを供試植物とした。調査は同年7月31日に行い、気孔コンダクタンスは、リーフポロメータ(SC-1, Decagon)で、光合成活性はPAMクロロフィル蛍光測定器(Junior-PAM, Walz)で測定した。また、草丈および葉身長もあわせて測定した。なお、土壤の電気伝導度(EC)は、同年5月28日、7月2日、7月31日に土壤試料を採取し、その後1:5抽出法を用いて測定した。

結果および考察

5月25日から約1ヶ月間で表層土壤におけるECは1/6程度に減少し、津浪によって一時上昇した土壤塩濃度が降雨等により低下したことが示された(図1)。ソルガムの草丈は、施肥区が無施肥区に比べ大きく(図2)、t検定の結果にも有為な差があった。一方、無施肥で栽培したソルガムの気孔コンダクタンスは草丈との相関が低く、施肥をして栽培したソルガムの気孔コンダクタンスは草丈の増加とともに高くなった(図3)。一般に、生育不良の原因が塩ストレスによるものであれば、気孔コンダクタンスの低下が観察される。無施肥区のソルガムにおいては生長の程度と気孔コンダクタンスは相関が低く、塩ストレスによって代謝系に何らかの障害が生じた可能性が示唆された。一方で施肥区のソルガムは生長と気孔コンダクタンスにある程度の相関が見られ、健全な代謝が行われたことが推察された。クロロフィル蛍光により測定された電子伝達速度(ETR)は、植物の光合成速度に関連が深い。無施肥区のソルガムのETRは草丈と弱い逆相関を示し、一方、施肥区のソルガムのETRは草丈の増加とともに高くなかった(図4)。施肥区、無施肥区におけるETRの値に顕著な差はみられなかつたが、無施肥区において草丈が高くともETRが増加しない傾向から、光合成代謝系の何らかの障害が予想された。施肥区で同じ現象がみられなかつたことは、施肥を施

すことで、植物に対する塩ストレス等の負荷が低減されたためと考えられる。

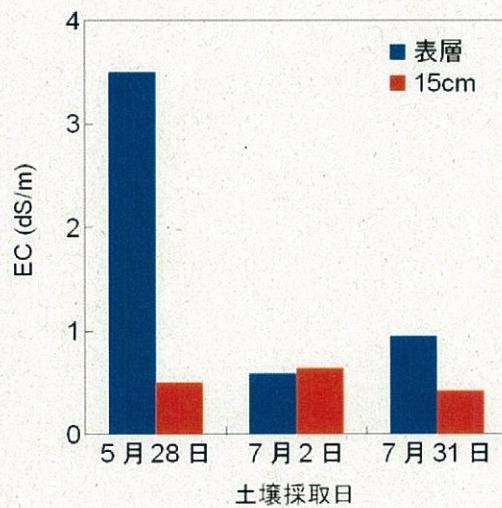


図1 試験地における土壌ECの変化

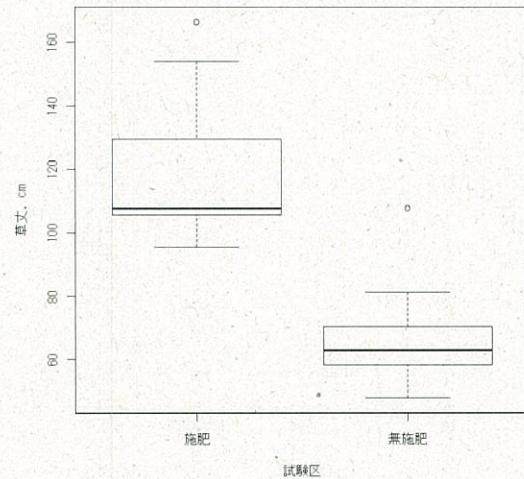


図2 施肥区、無施肥区における草丈

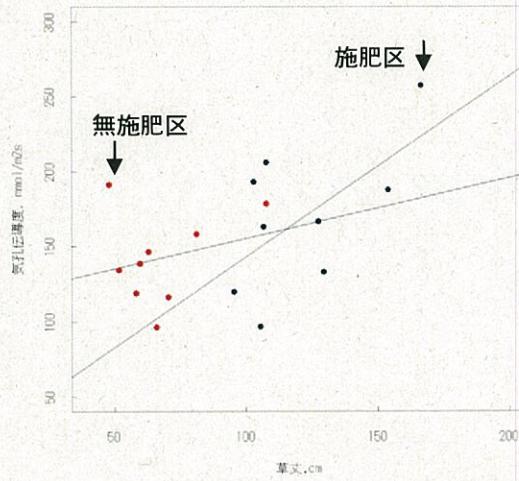


図3 草丈と気孔伝導度の関係

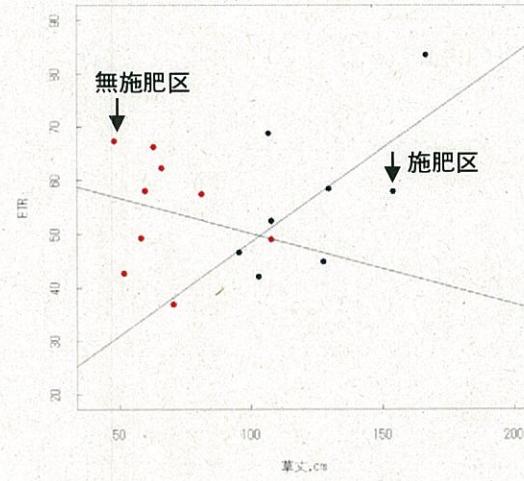


図4 草丈とETRの関係

平成 24 年 3 月 30 日

財団法人東北活性化研究センター・国立大学法人岩手大学共同研究

岩手県内の放射性物質による汚染状況調査

岩手大学農学部 築城幹典

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い、各地で放射性物質の降下による空間放射線量率の上昇が観測された。岩手県では牧草で 5 月 13 日、肉牛で 7 月 22 日に暫定規制値を超える放射性物質が検出された。しかし、岩手県では 6 月 22 日までは盛岡市のみで空間線量率および降下物のモニタリングが行われていたため、原発事故に伴う放射性物質降下量の分布や各地点の量についての情報が得られなかった。このことは、農畜産物への放射性物質対策を策定する上で大きな問題であった。そこで本研究では、線量計を用いて県内各地で空間放射線量率を測定し、岩手県における放射性物質降下量の分布を推定するとともに、その結果を用いて、岩手県の空間放射線量率のマップを作成した。また、県内の牧草地において空間線量率の分布を測定し、その分布状況について検討した。

2. 材料および方法

1) 岩手県の放射線量マップの作成

調査は 2011 年 6 月 1 日から 9 月 9 日の間に 8 回行った。測定に用いた線量計は、DOSERAE2 (RAEsystems 社製) である。岩手県内を自動車で移動しながら、5 分おきに車内で空間放射線量率と緯度経度を記録した。また、約 10km おきに地表 1cm の空間放射線量率を測定した。測定地点は原則として草本植生のある地表面付近とした。空間放射線量率の等値線マップ作成には ArcGIS を用いた。放射性セシウム (Cs) の自然崩壊による空間線量率の変化を考慮するため、6 月 1 日から 9 月 9 日の測定データを 9 月 9 日の値に減衰補正してマップを作成した。 ^{134}Cs および ^{137}Cs の降下量比、空間線量率への寄与割合、および半減期は、それぞれ 1 : 1, 73 : 27, および 2.0648y : 30.17y とした。

2) 牧草地の放射性物質の分布調査

調査は 2011 年 6 月 20 日から 11 月 18 日の間に行った。測定に用いた線量計は、DOSERAE2 (RAEsystems 社製) および PA-1000Radi (堀場製作所製) である。岩手県内の 6ヶ所の牧草地において、1 牧区当たり 28 から 195 地点で地表 1cm の空間放射線量率と緯度経度を測定した。空間放射線量率の等値線マップ作成には ArcGIS を用いた。また、各牧区について 95% 信頼区間で空間線量率の平均値 ± 10% の値を得るために必要なデータ

数を推定した。調査地の概要を表 1 に示した。

3. 結果

1) 岩手県の放射線量マップの作成

車内で測定した空間放射線量率の分布を図 1 に示した。調査地点数は 715 地点であった。最も高い値は $0.28 \mu\text{Sv/h}$ (9月9日測定) であった。この調査結果を用いて作成した空間放射線量率マップを図 2 に示した。奥州市、平泉町、一関市の境あたりに線量分布の中心があり、この付近にもっと多くの放射性物質が降下したと考えられる。

地表面付近で測定した空間放射線量率の分布を図 3 に示した。調査地点数は 506 地点であった。最も高い値は $0.98 \mu\text{Sv/h}$ (7月9日測定) であった。この調査結果を用いて作成した空間放射線量率マップを図 4 に示した。図 2 に示した車内測定の結果と同様、奥州市、平泉町、一関市の境あたりに線量分布の中心があり、この付近にもっと多くの放射性物質が降下したと考えられる。本調査で得られた空間放射線量率の分布は、その後行われた文部科学省による航空機モニタリングの結果ともよく一致していた。

岩手県では、県南地域において牧草や稻わらから、暫定許容値を超える放射性物質が見つかったが、これは本研究で示したとおり、この地域に降下した放射性物質の量が多かつたためと考えられる。一方、この線量の高い地域よりも事故現場に近い仙台市では、これらの地域よりも線量が低く、放射性物質の降下が均一に生じたのではないことを示している。また、岩手県では、空間線量率が必ずしも高くない県央の滝沢村においても、牧草で放射性物質の暫定許容値を超える例が見られた。このことは、単に降下物量だけではなく、農地土壌の種類や管理状態などが影響していることを示すと考えられる。

放射性セシウムの自然崩壊による空間線量率の変化予想を図 5 に示した。空間線量率への寄与割合が高い ^{134}Cs の半減期が短いため、空間線量率は 3 年で 52%，5 年で 38%，15 年で 20%，30 年で 13% にまで低下すると考えられる。

2) 牧草地の放射性物質の分布調査

(1) 牧草地の空間放射線量率マップ

牧草地 1 の調査地点数は 104 地点、空間放射線量率は最大値 $0.105 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、最小値 $0.035 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ であった。この調査データを用いて作成した等値線図を図 6 に示した。この牧区の調査データから求めた平均値は $0.077 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、標準偏差は $0.014 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、変動係数は 17.7% であった。

牧草地 2 の調査地点数は 41 地点、空間放射線量率は最大値 $0.090 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、最小値 $0.040 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ であった。この調査データを用いて作成した等値線図を図 7 に示した。この牧区の調査データから求めた平均値は $0.077 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、標準偏差は $0.010 \mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、変動係数は 12.7% であった。牧草地 1 と比べると平均値は同じであるが、データの変動はやや小さかった。

牧草地 3 の調査地点数は 33 地点、空間放射線量率は最大値 $0.100\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、最小値 $0.050\mu\text{Sv hr}^{-1}$ であった。この調査データを用いて作成した等值線図を図 8 に示した。この牧区の調査データから求めた平均値は $0.075\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、標準偏差は $0.014\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、変動係数は 18.9% であった。牧草地 1 および 2 と比べると平均値はほぼ同じであり、データの変動は牧草地 1 に近い。

牧草地 4 の調査地点数は 28 地点、空間放射線量率は最大値 $0.100\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、最小値 $0.050\mu\text{Sv hr}^{-1}$ であった。この調査データを用いて作成した等值線図を図 9 に示した。この牧区の調査データから求めた平均値は $0.070\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、標準偏差は $0.009\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、変動係数は 13.6% であった。牧草地 1~3 に比べると平均値はやや小さめだが、データの変動は牧草地 2 に近い。

牧草地 5 の調査地点数は 61 地点、空間放射線量率は最大値 $0.12\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、最小値 $0.07\mu\text{Sv hr}^{-1}$ であった。この調査データを使用して作成した等值線図を図 10 に示した。この牧区の調査データから求めた平均値は $0.103\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、標準偏差は $0.012\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、変動係数は 11.8% であった。牧草地 1~4 と比べると平均値はやや高くなっているが、変動係数は牧草地 2 および 4 に近く、今回調査した牧草地では変動係数が最も小さくなっている。

牧草地 6 の調査地点数は 195 地点、空間放射線量率は最大値 $2.552\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、最小値 $0.336\mu\text{Sv hr}^{-1}$ であった。この調査データを用いて作成した等值線図を図 11 に示した。この牧区の調査データから求めた平均値は $0.809\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、標準偏差は $0.238\mu\text{Sv hr}^{-1}$ 、変動係数は 29.5% であった。牧草地 1~5 と比べると平均値は約 8~10 倍で、変動係数もほかの牧草地と比べると 10% 以上大きい値となっている。

(2) 正確な平均値を得るために必要なデータ数の導出

各牧草地の調査データを用いて、それぞれの牧草地の空間放射線量率について 95% の信頼区間で平均値 $\pm 10\%$ の値を得るために必要なデータ数を求める統計手法を用いるうえで、各牧草地で得られたデータがこの統計手法の前提条件である正規分布となっているか調べる必要がある。そこで、牧草地 1~6 について空間放射線量率の度数分布を表すヒストグラムを作成し、それぞれ図 12~17 に示した。結果として、牧草地 5 を除く、全ての牧区で平均値を中心に正規分布していることがわかる。次に、平均値と標準偏差を用いて 95% の信頼区間で平均値 $\pm 10\%$ の値を得るために必要なデータ数を求めた。牧草地 5 は正規分布にはなっていなかったが、牧草地 1~6 における空間放射線量率の調査結果から得られた各牧区の平均値、標準偏差、変動係数、95% の信頼区間で平均値 $\pm 10\%$ の値を得るために必要なデータ数についてまとめ、さらに 1haあたりに必要なデータ数を求めて表 2 に示した。この表から牧草地 1~5 では 1haあたり 3 個以上、牧草地 6 では 1haあたり 29 個以上のサンプルをとることで 95% の信頼区間で平均値 $\pm 10\%$ の値を得られることがわかった



単位: $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ⬤ 0.1以下 ⬤ 0.2以下 ⬤ 0.3以下 ⬤ 0.4以下 ⬤ 0.5以下 ⬤ 0.6以下 ⬤ 0.6超 (最小値:0.02 最大値:0.28)

図 1. 走行サーベイによる各地点の空間放射線量率 ($\mu\text{Sv hr}^{-1}$)

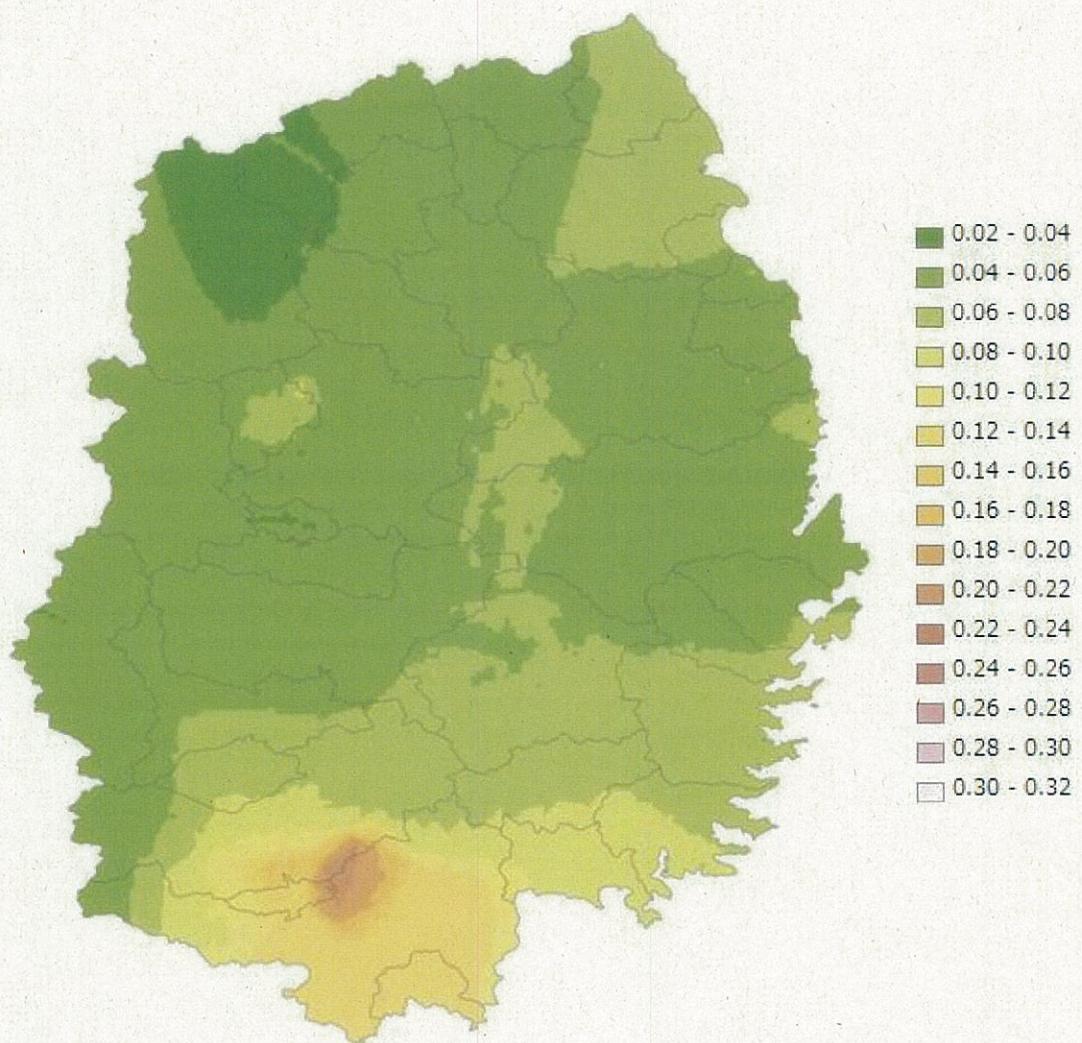
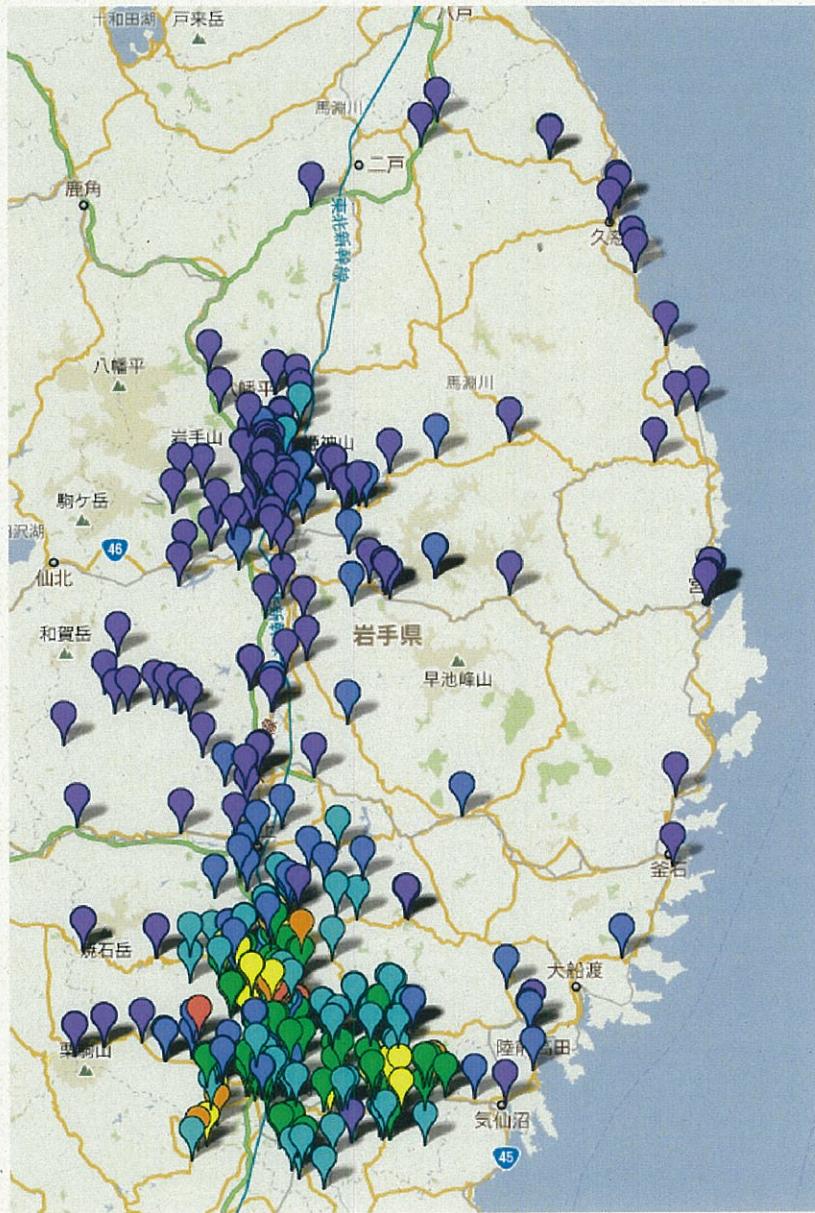


図 2. 岩手県の空間放射線量率（車内測定, $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）
2011年6月1日～9月9日測定データを9月9日現在の値に減衰補正して作成



単位: $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ● 0.1以下 ● 0.2以下 ● 0.3以下 ● 0.4以下 ● 0.5以下 ● 0.6以下 ● 0.6超(最小値0.025 最大値0.975)

図3. 地表1cmにおける各地点の空間放射線量率 ($\mu\text{Sv hr}^{-1}$)

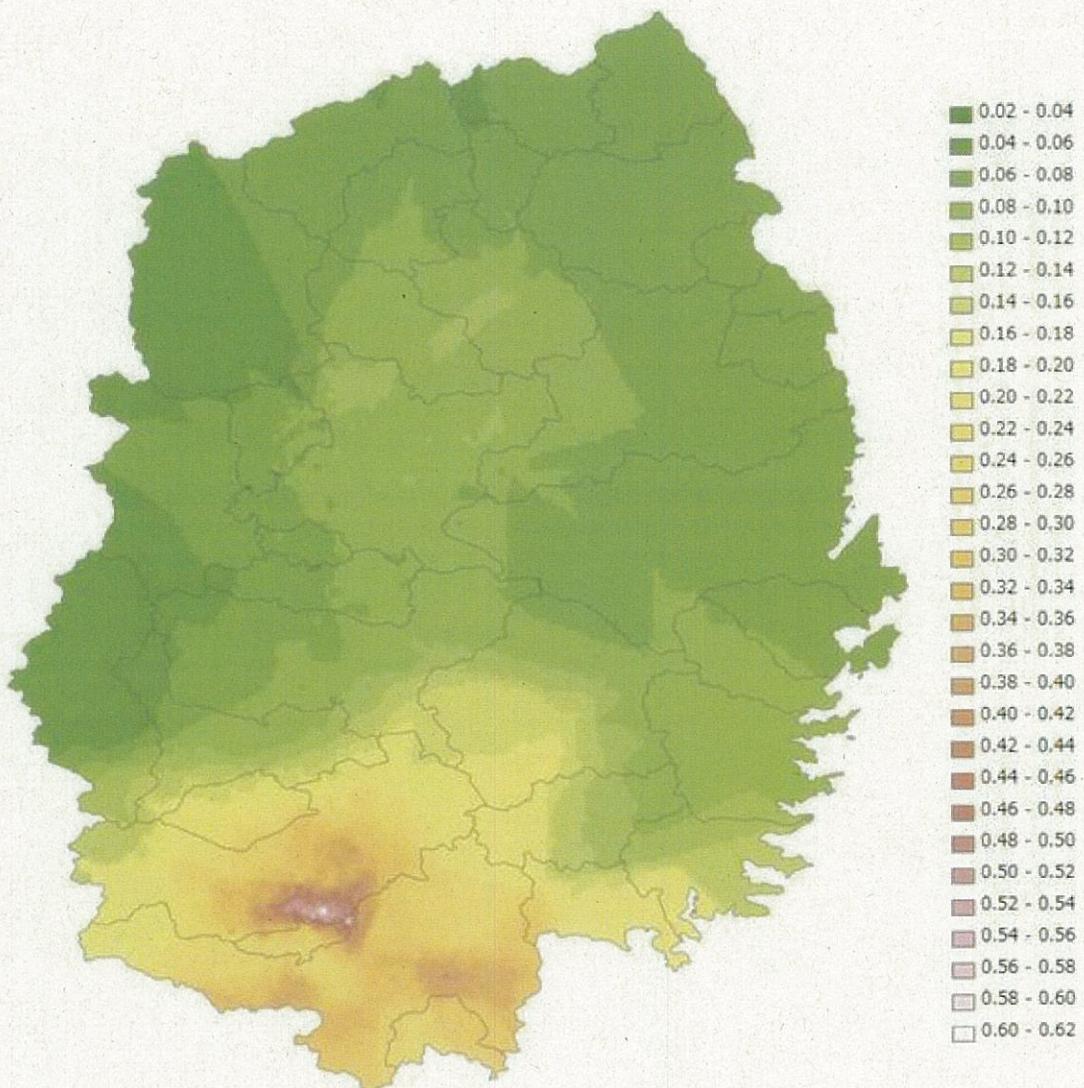


図4. 岩手県の空間放射線量率（車内測定, $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）
2011年6月1日～9月9日測定データを9月9日現在の値に減衰補正して作成

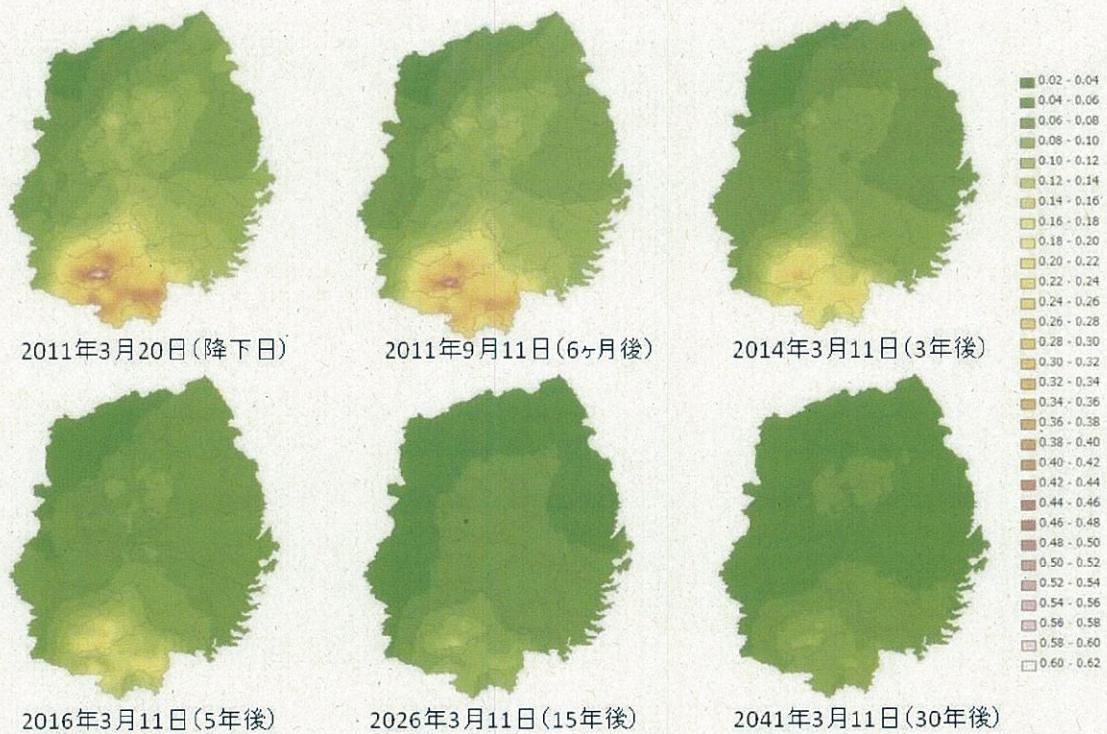


図 5. 放射性セシウムの自然崩壊による空間線量率の変化予想

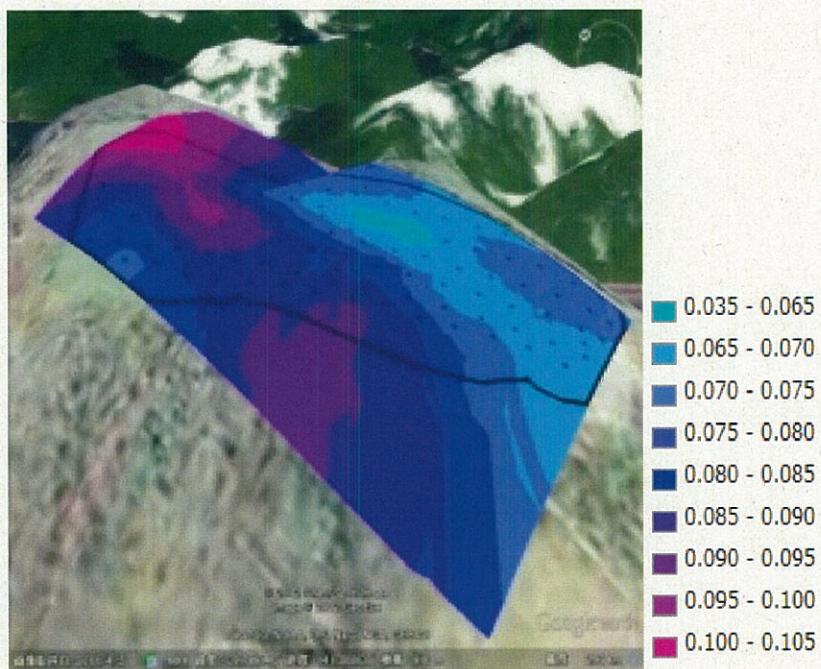


図 6. 牧草地 1 の空間放射線量率マップ（単位： $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）

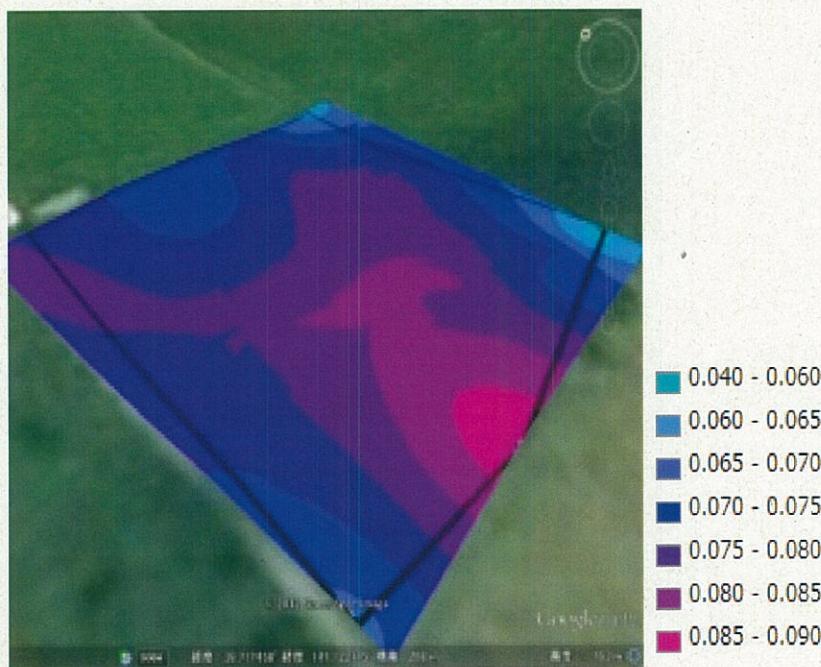


図 7. 牧草地 2 の空間放射線量率マップ（単位： $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）

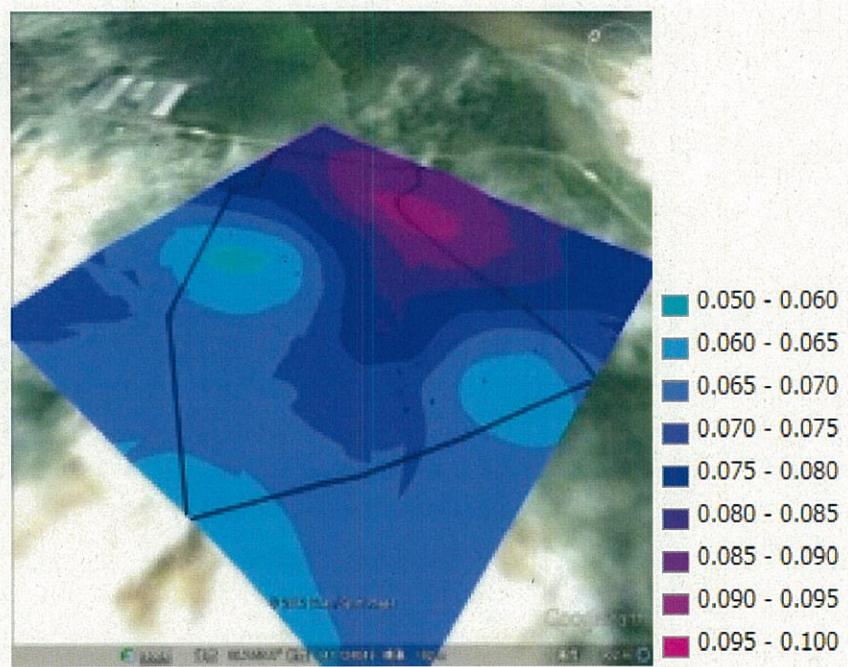


図8. 牧草地3の空間放射線量率マップ（単位： $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）

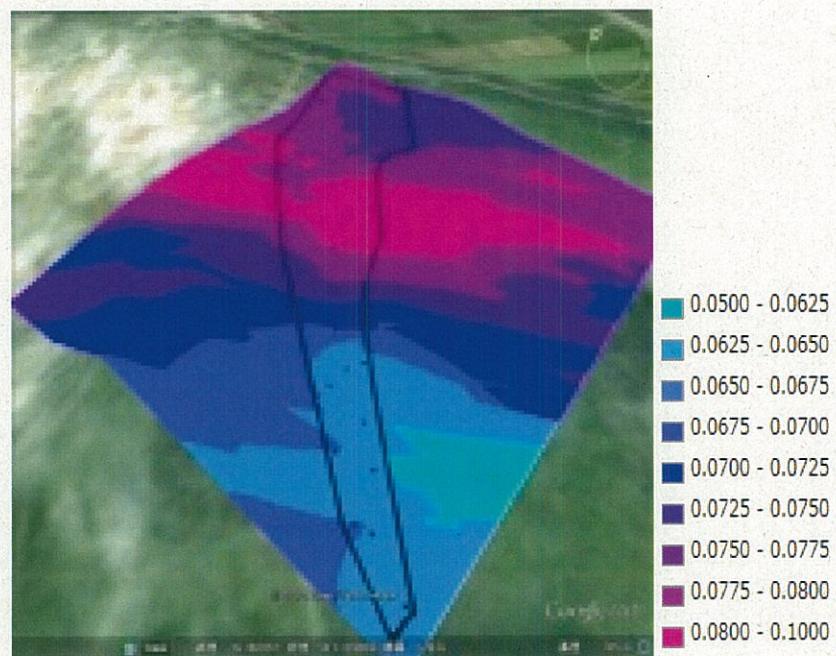


図9. 牧草地4の空間放射線量率マップ（単位： $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）

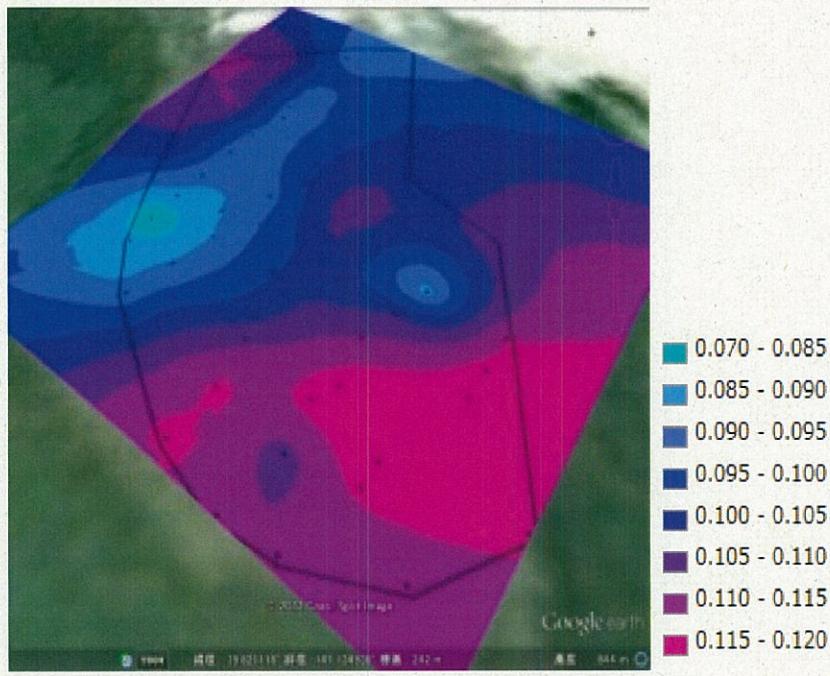


図 10. 牧草地 5 の空間放射線量率マップ（単位： $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）

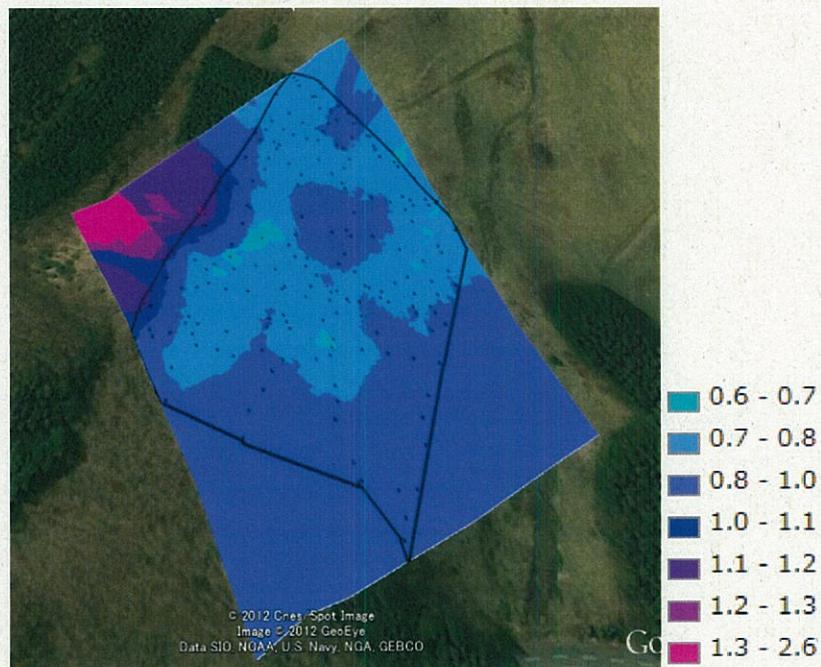


図 11. 牧草地 6 の空間放射線量率マップ（単位： $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ ）

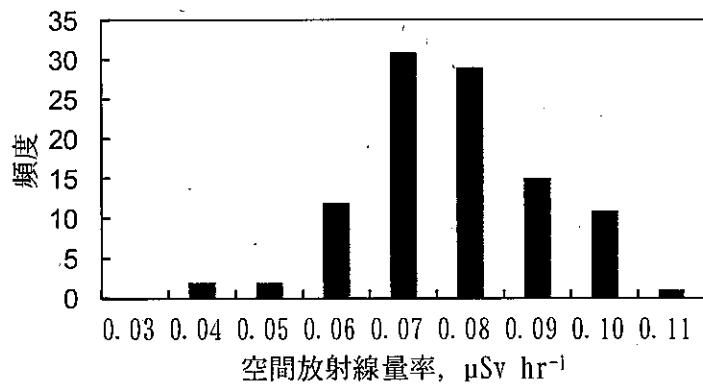


図 12. 牧草地 1 の空間放射線量率の度数分布

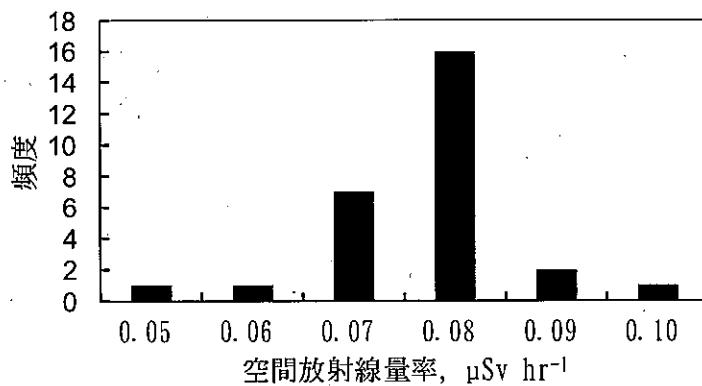


図 13. 牧草地 2 の空間放射線量率の度数分布

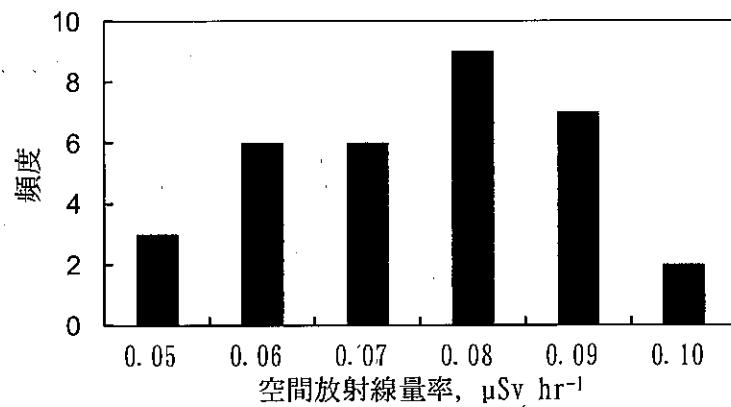


図 14. 牧草地 3 の空間放射線量率の度数分布

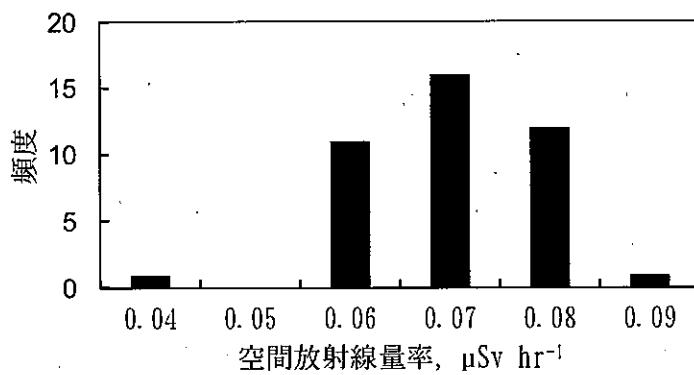


図 15. 牧草地 4 の空間放射線量率の度数分布

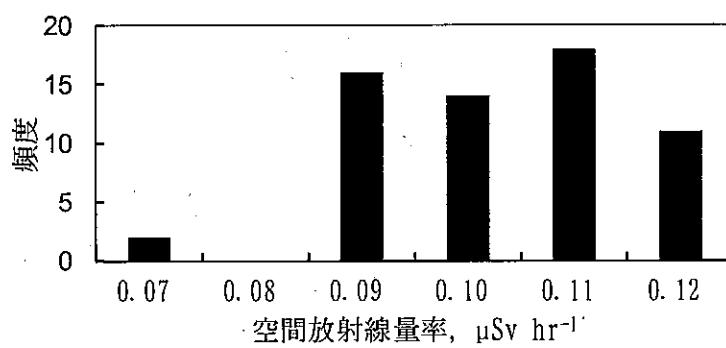


図 16. 牧草地 5 の空間放射線量率の度数分布

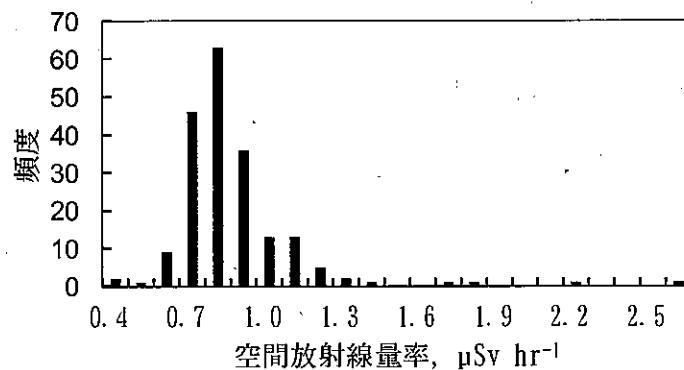


図 17. 牧草地 6 の空間放射線量率の度数分布

表 1. 各牧草地の詳細

牧区	場所	標高(m)	面積(ha)	土壌	調査地点数
牧草地1	盛岡市	813~949	10.80	黒ボク土	104
牧草地2	滝沢村	204~215	3.86	黒ボク土	28
牧草地3	滝沢村	180~193	5.05	黒ボク土	33
牧草地4	滝沢村	178~193	2.96	黒ボク土	41
牧草地5	滝沢村	243~252	2.42	黒ボク土	61
牧草地6	一関市	351~408	1.16	黒ボク土	195

表 2. 各牧区の平均値、標準偏差、変動係数と必要データ数

牧区	空間線量率 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)		変動係数 (%)	必要データ数	面積 (ha)	1 ha当たりの必要データ数 (個 ha^{-1})
	平均値	標準偏差				
牧草地1	0.077	0.014	17.7	12.0	10.80	1.1
牧草地2	0.077	0.010	12.7	6.2	3.86	1.6
牧草地3	0.075	0.014	18.9	13.7	5.05	2.7
牧草地4	0.070	0.009	13.6	7.1	2.96	2.4
牧草地5	0.103	0.012	11.8	5.4	2.42	2.2
牧草地6	0.809	0.238	29.5	33.3	1.16	28.7

2012年3月30日

「岩手県の一次産業及び二次産業の基盤復旧と新事業創出により復興を目的とする調査研究
二次産業領域

岩手大学 農学部 応用生物化学課程 三浦 靖

1. はじめに

東日本大震災により、東北地方太平洋沿岸部は甚大な津波被害を被り、さらに北関東は福島第一原子力発電所事故による放射線汚染で、震災と放射線の二重苦に陥っている。これらの地域は日本の食料基地であり、津波被害および放射線汚染の影響で、農林畜水産物の供給量不足が懸念されている。また、工場等の被災は地域雇用に大きな影響を及ぼしており、被災地住民の生活再建のためにも二次産業の復旧・復興は喫緊の課題である。

壊滅的な被害を被った水産加工設備を再建するためには、多大な費用と日数を要する。そこで、低経費で収入を得ることが期待できる水産加工品として、前浜ものを原料にした魚類乾製品（干物）を選択し、従来からの天日乾燥に変わる高効率かつ高品質な製品を製造するための技術開発を行うことを本研究の目的とした。すなわち、「低温除湿乾燥装置」を試作し、基本性能の評価、ならびに好適な運転条件の設定を実施した後に、当該装置を被災地に移設し、水産加工業者による実証試験を行い、試作製品の試験販売を実施して消費者目線での品質評価を行う。最終的には、著名な干物産地（千葉県、神奈川県、静岡県、和歌山県、山口県など）での製品よりも安価かつ高品質（ハーブ抽出物で油脂酸化を抑制、保存性が良好など）な製品を「ハーブ干物」としてブランド化する。

2. 魚介類乾製品の現状

2-1. 魚類の一般成分

魚介類の筋肉または可食部の一般成分含量は、水分が70~85%(w/w)、タンパク質が15~20%(w/w)、脂質が1~10%(w/w)、糖質が0.5~1.0%(w/w)、灰分1.0~1.5%(w/w)である。しかし、魚介類は種類が極めて多く、年齢や季節、栄養状態、産卵期などの因子によって各成分が変動する。タンパク質や糖質、灰分などは、水分や脂質に比較すると比較的変動が小さい。また、タンパク質含量は、水分含量が多い種類ほど少ない傾向にある。

三陸沿岸で秋期～冬期に多く漁獲される魚種の内、乾製品によく使用されているマサバ（水分：65.5%，タンパク質20.7%，脂質12.1%，糖質0.3%，灰分1.2%）とサンマ（それぞれ55.8%，18.5%，24.6%，0.1%，1.0%）は脂質含量が多く、ホッケ（それぞれ77.1%，17.8%，4.4%，0.1%，1.1%）は水分含量が多い。これらの乾製品でも、マサバ（水分50.1%，脂質28.5%，食塩相当量1.7%）とサンマ（それぞれ59.7%，19.0%，1.3%）では脂質含量が多く、ホッケ（それぞれ71.9%，6.9%，1.7%）では水分含量が多い。そして、乾製品とは言え、食塩相当量が多い割には水分含量がさほど減少していない。このことが、乾製品の保存性はそれほど高くなく、脂質の劣化が速く、食塩を過剰摂取しがちになることの原因となっている。

次に、魚肉の非極性脂質組成 [mg/100 g] を見てみると、サンマでは全脂質が890、トリアシルグリセロールが10,200、遊離脂肪酸が52、ステロールやジアシルグリセロール、ステロールエステル、炭化水素が177というように、トリアシルグリセロールが多い。そして、非極性脂質の脂肪酸組成を見ると、代表的な魚種では不飽和脂肪酸含量が42~75%もある。

したがって、マサバやサンマ、ホッケなどは、乾製品の原料としては脂質含量が高く、不飽和脂肪酸含量が高いために脂質の酸化抑制が必須となる。

2-2. 魚介類乾製品の従来製法

魚介類の乾製品は、水分活性を低下させて保存性を向上させ、生鮮品にはない独特の風味を付与するためには製造されている。しかし、製造工程中に酵素反応が進行（旨味成分の分解、タンパク質の加水分解など）するために、プランチングなどの前処理を必要とする場合がある。また、化学反応が進行（成分濃縮によるタンパク質変性、脂質酸化など）するために、低温・短時間の加工、酸化防止剤の使用が必要になる。さらに、微生物汚染の危険性が高いために、洗浄・殺菌などの前処理を施したり、清潔な雰囲気で加工する必要がある。

代表的な乾製品には次の4種類がある。①素干品は水洗し、適宜に前処理してから乾燥して製造され、するめ、干しダラ、身欠きニシン、田作り、フカヒレが代表例である。②塩干品は水洗し、前処理、塩漬け処理（撒塩、立塩）してから乾燥して製造され、塩干しアジ、塩干しサンマ・サバ・イワシ・タラ、からすみなどが代表例である。③煮干品・焼干品は、水洗し、煮熟・焼成してから乾燥して製造され、煮干しイワシ、シラス干し、煮干し貝柱、干しアワビ、干しナマコなどが代表例である。④焙乾品は水洗し、煮熟、焙乾、日乾、カビ付け (*A. glaucus*, *A. ruber*, *A. repens* など) という工程で製造され、カツオ・マグロ・サバ・イワシ節が代表例である。当方らが検討している乾製品は、塩乾品に分類される。

乾製品を製造するための乾燥方法は、次の5種類に大別される。①天日乾燥法は、太陽の放射熱で原料を加温して水の蒸発を促進し、原料表面の湿度が高い空気層を風によって更新させることに乾燥させる方法であり、乾燥（昼間）と放置（夜間）の反復による表層の乾燥、水の内層から表層への水の拡散を繰り返している。特別な設備や技術を必要としないので経済的であるが、雨天時には適用できず、紫外線により脂質酸化が起こりやすい。②凍乾法は、夜間の気温が-5°C前後、日中の気温が0°C以上になる寒冷環境で、凍結（夜間）と解凍（昼間）の反復より脱水・乾燥させる方法である。乾燥物は多孔質になり、水溶性成分（旨味成分など）が損失することが多い。③熱風乾燥法は、高温空気の吹き付けにより原料を加熱して水の蒸発を促進し、原料表面の湿度が高い空気層を風によって更新させることに乾燥させる方法である。水産物の乾製品の製造に広く適用されているが、乾燥器の庫内を適切に排気させないと高湿度環境になり、乾燥が進行しにくくなる。④冷風乾燥法は、冷風（15~35°C, 20%RH前後）の吹き付けにより乾燥させる方法である。乾燥は原料表面と冷風との水蒸気圧差により起こり、原料は必要以上に加熱されないので、脂質酸化や褐変（アミノ-カルボニル反応、メラニン合成）が起こりにくい。⑤焙乾法は、蒸籠に原料を並べ、これを数段積み重ねて焙乾炉に乗せて乾燥する方法である。加熱により水の蒸発を促進し、原料表面の湿度が高い空気層を自然対流によって更新させることに乾燥させる方法である。しかし、乾燥効率が良くないために原料が高温にさらされ、表層のみの乾燥になりやすい。

ここで、水分子の熱力学的自由度を表す物理量であり、食品の保存性の指標になっている水分活性 (a_w , water activity) に触れておく。これは、

$$a_w = (\text{ある温度での食品中の水の平衡水蒸気圧}) / (\text{同じ温度での純水の平衡水蒸気圧})$$

で定義され、0~1の値をとり、値が小さいほど食品の保存性が高いことを示す。水産加工食品では、塩味が強いわりには水分活性が高く、食塩により水分活性を低下させようとするとかなり塩辛くなってしまうばかりでなく、食塩の過剰摂取の原因になる。

近年、わが国ではガン、糖尿病、高血圧症、高脂血症などの、いわゆる「生活習慣病」を患者者が

激増している。これらの多くは偏った食事などによるところが大きく、生活習慣病の予防や進行を抑制するには規則正しく、かつ栄養素のバランスがとれた食事をとる必要がある。この背景には食の欧米化や簡便な加工食品の普及による栄養バランスの偏りや、食塩を多量に摂取することに起因するところが大きい。厚生労働省健康局の平成21年国民健康・栄養調査（平成23年10月公表）によると、食塩摂取量は1人1日当たり男性全体平均で11.1g、女性全体平均で9.6g、全体平均で10.3gであり、1995年以降は年々減少している。年齢階級別に見ると、男女とも年齢とともに摂取量が増加する傾向にあり、60歳代で男性12.4g、女性10.5gと最も高かった。しかし、政府が目標としている1日10gとは非常に大きな開きがあり、食品の減塩化に対する需要が高い現在ではこれに対応した製品開発が急務となっている。

3. 低温除湿乾燥法による高品質かつ高効率な魚類乾製品の製法

3-1. 実験方法

(1) 試料

乾製品の原料には、(有)北三陸天然市場（岩手県久慈市）より提供された生ホッケを使用した。前処理にはグルコン酸カリウム（ヘルシャスK、扶桑化学工業株）、水溶性ローズマリー抽出物（RM-21Aベース、主成分：フェノールカルボン酸（ロスマリン酸等）およびフラボノイド類（ルテオリン類）、三菱化学フーズ株）、非水溶性ローズマリー抽出物（RM-21Bベース、主成分：フェノール性ジテルペノイド（ロスマノール、カルノソール、カルノシン酸等）、三菱化学フーズ株）、塩化ナトリウムを用いた。

(2) 低温除湿乾燥装置の試作

低温恒温恒湿器（TPAV-120-20、庫内容量120L、棚段数3段、庫内強制対流方式、温度制御範囲・精度：-20～120°C、±0.8°C、湿度制御範囲・精度：20～98%RH、±3.0%RH、温度・湿度分布精度：±0.8°C、±3.0%RH、温度・湿度制御方式：PID制御、加熱器ヒーター電気容量：0.5kW、加湿器ヒーター電気容量：0.75kW、冷凍機電気容量：0.25kW、（株）いすゞ製作所）を、温度制御範囲・精度：-20～120°C、±0.8°C、湿度制御範囲・精度：20～98%RH、±3.0%RH、加熱器ヒーター電気容量：0.7kW、加湿器ヒーター電気容量：0.9kW、冷凍機電気容量：0.2kWという仕様に変更した（図1）。

(3) 乾製品の製造

5°Cに調整した低温恒温恒湿器（MTH-4466、三洋電機メディカルシステム株）内で、開き魚体を前処理液に30分間攪拌しながら浸漬して前処置した。なお、前処理液は、①0.27mol·kg⁻¹（1.58%（w/w））塩化ナトリウム水溶液、②0.27mol·kg⁻¹（6.32%（w/w））グルコン酸カリウム水溶液、③0.02%（w/w）水溶性ローズマリー抽出物と0.01%（w/w）非水溶性ローズマリー抽出物を含む0.27mol·kg⁻¹（6.32%（w/w））グルコン酸カリウム水溶液、④0.02%（w/w）水溶性ローズマリー抽出物と0.01%（w/w）非水溶性ローズマリー抽出物、ならびに2.5%（w/w）塩化ナトリウムを含む0.27mol·kg⁻¹（6.32%（w/w））グルコン酸カリウム水溶液である。ここで、塩化ナトリウムを従来からの使用目的である水分活性調整剤としてではなく、適度な塩味を付与する調味剤として位置付けた。そして、グルコン酸カリウムは水分活性を調整するため、水溶性ローズマリー抽出物は変色の抑制ならびに魚臭の抑制のため、非水溶性ローズマリー抽出物は脂質の自動酸化の抑制のために使用した。ちなみに、塩化ナトリウムの飽和濃度は26.42%（w/w）[25°C]、生体の塩分濃度は約0.9%（w/w）である。

前処理した開き魚体を前述の低温恒温恒湿器に収納して、10°C、40%RH、所定時間→15°C、35%RH、

所定時間→20°C, 30%RH, 所定時間という3段階温度・湿度プログラムで低温除湿乾燥した(図2)。ここで、3段階の除湿乾燥時間を6, 12, 24時間の3水準に設定した。



図1 試作した低温除湿乾燥装置



図2 低温除湿乾燥装置内に設置した乾燥棚

(4) 乾製品の理化学的特性の測定

①水分含量

赤外線水分計(FD-800, (株)ケツト科学研究所)を用い、乾燥温度105°Cで30秒間の水分変化量が0.05%以下になったら測定終了にする乾燥減量法により水分含量を測定した。試料の水分含量は、以下の式のように質量基準水分 [% , w/w] として求めた。

$$\text{水分含量} = (W - D) / W \times 100 \quad (1)$$

ここで、Wは測定開始時の未乾燥質量 [g], Dは測定終了時の乾燥質量 [g] である。

②水分活性

水分活性恒温測定装置(TH-500, Novasina社)を用い、原料および乾製品の25°Cでの水分活性を測定した。

③過酸化物価(POV)

過酸化物価測定装置(794 POV2-20, メトローム・シバタ(株))を用い、n-ヘキサンを用いて試料から抽出した脂質のPOVを電位差滴定法に準じて測定した。

3-2. 結果および考察

各乾燥時間を24時間に設定した3段階の低温除湿乾燥法で調製したホッケ乾製品の外観を図3に示した。各乾燥時間を12, 24時間に設定すると、ホッケ開き魚体が過度に乾燥し、褐変も進行したために、今後は各乾燥時間を6時間に設定することにした。したがって、3段階の低温除湿乾燥法では、全乾燥時間が18時間で乾製品を製造することができ、従来法での標準的な全乾燥時間である36時間を半分に短縮することができる。

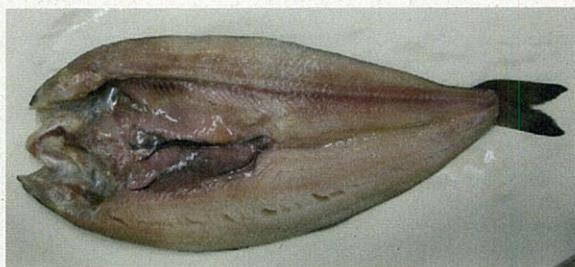
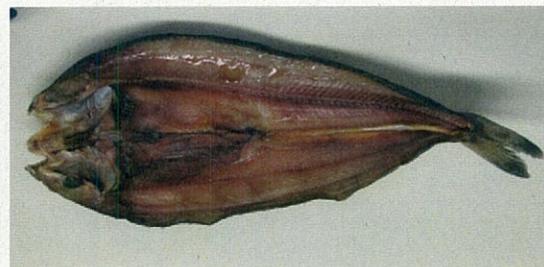


図3 原料のホッケ開き魚体(左側)と試作したホッケ乾製品(右側)



試作したホッケ乾製品の水分含量は、 $0.27\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ (1.58%(w/w)) 塩化ナトリウム水溶液で前処理した試料（塩化ナトリウム前処理区と称する）では 68.71%(w/w), $0.27\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ グルコン酸カリウム水溶液で前処理した試料（グルコン酸カリウム前処理区）では 63.73%(w/w), 0.02%(w/w) 水溶性ローズマリー抽出物と 0.01%(w/w) 非水溶性ローズマリー抽出物を含む $0.27\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ グルコン酸カリウム水溶液で前処理した試料（ローズマリー抽出物-グルコン酸カリウム前処理区）では 64.51%(w/w), 0.02%(w/w) 水溶性ローズマリー抽出物と 0.01%(w/w) 非水溶性ローズマリー抽出物、ならびに 2.5%(w/w) 塩化ナトリウムを含む $0.27\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ グルコン酸カリウム水溶液で前処理した試料（ローズマリー抽出物-グルコン酸カリウム-塩化ナトリウム前処理区）では 63.75%(w/w) であった。すなわち、溶質濃度（浸透圧）が高い前処理液に浸漬した処理区の水分含量は低くなっている、前処理液に浸漬すると開き魚体の脱水が進行することが確認できた。

同様に、試作したホッケ乾製品の水分活性は、塩化ナトリウム前処理区では 0.937, グルコン酸カリウム前処理区では 0.881, ローズマリー抽出物-グルコン酸カリウム前処理区では 0.898, ローズマリー抽出物-グルコン酸カリウム-塩化ナトリウム前処理区では 0.894 であった。すなわち、溶質濃度（浸透圧）が高い前処理液に浸漬した処理区の水分活性は低くなっている、前処理液に浸漬すると開き魚体の脱水が起こるとともに、溶質（水分活性調整剤としてのグルコン酸カリウム、塩味を付与する調味剤としての塩化ナトリウム）が魚肉に浸透することが示された。なお、生体外側表層、内層、生体内側表層の魚肉を採取し、それぞれに含まれるイオン濃度を測定する予定である。

そして、協力企業の現行のホッケ乾製品から抽出した脂質の POV は $37\text{meq} \cdot \text{kg}^{-1}$, ローズマリー抽出物-グルコン酸カリウム-塩化ナトリウム前処理区（各乾燥時間を 12 時間に設定）から抽出した脂質の POV は、 $50\text{ meq} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。全乾燥時間（36 時間）と同じである現行品に比較して、今回の試作品の POV が高かったのは、過度に乾燥が進行したことに起因すると思われる。しかし、今後は全乾燥時間を 18 時間に短縮するので、POV は現行品での値よりも低くなると期待される。

3月28日には久慈市アンテナショップ「北三陸天然市場 本宮店」において、ローズマリー抽出物-グルコン酸カリウム-塩化ナトリウム前処理区（各乾燥時間を 6 時間に設定し、全乾燥時間が 18 時間）の試食および試験販売を行った（別紙：ポスター）。

4. 今後の展開

低温・高湿度（10°C, 40%RH）→中温・中湿度（15°C, 35%RH）→高温・低湿度（20°C, 30%RH）という 3 段階温度・湿度プログラムに従って低温除湿乾燥装置を運転することにして、3 段階での処理時間を 3 因子にして、回転可能中心複合計画法（CCD）による応答曲面法（RSM）によって、最適な乾燥条件を探索する予定である。また、乾製品の品質評価項目として、本研究でも測定した水分含量、水分含量および抽出脂質の POV 以外に、色特性（国際照明委員会（CIE）規格の明度（L*）、色度（a*, b*）、彩度（C*）および色相角（h））、10°C に調整した試料の頭部・中央部・尾部の硬さ（ひずみ 0.25 のときの圧縮応力）を測定する。さらに、調味剤として位置付けた塩化ナトリウム、水分活性調整剤として位置付けたグルコン酸カリウム、脂質の自動酸化抑制剤として位置付けた水溶性ローズマリー抽出物の主成分であるフェノールカルボン酸（ロスマリン酸等）およびフラボノイド類（ルテオリン類）、非水溶性ローズマリー抽出物の主成分であるフェノール性ジテルペノイド（ロスマノール、カルノソール、カルノシン酸等）の魚肉における含量に対する浸漬時間依存性を測定し、これらの浸透・拡散を定量化する予定である。

そして、①三陸沖産の魚が原料であること、②脂質酸化が抑制されていること、③高効率（時間、エネルギー）で製造されること、④美味であること、⑤保存性が良好であること、などを特長にした「ハーブ干物」の製造法を確立し、被災地である三陸沿岸北部の久慈市、三陸沿岸中部の宮古市および釜石市、ならびに三陸沿岸南部の大船渡市等に技術移転したい。