Deep Ocean Water Research, 16(3), 92–96, 2016

第3回海洋深層水利用学会賞（2015年度）　解　説

2015年度学会賞の受賞に当たって

沖縄県海洋深層水研究所　兼島盛吉

1. はじめに

沖縄県海洋深層水研究所が，平成27年11月に開催された海洋深層水利用学会第19回全国大会（久米島町）において，栄誉ある学会賞を授与できたことにお礼を申し上げます．

授与に至った理由が「海洋深層水の冷熱エネルギーを利用した亜熱帯環境での寒冷地農作物の新しい栽培技術確立と事業化」により海洋深層水利用に貢献したということでありました．

沖縄県海洋深層水研究所は平成12年に開所しましたが，農業分野での冷熱利用技術は平成10年より予備試験として開始されておりました．そこで，沖縄県のような夏場に高温になる地域でも地中（根域）のみの冷却で温帯性の葉菜類の栽培が可能であることが確認されました．この知見をもとに海洋深層水研究所でも研究が継続され，平成26年には久米島町が実証試験施設を作り10 a規模の栽培試験の実施に至った次第です．もちろんこれらの地中冷却栽培の知見は，1980年代にハワイ州立自然エネルギー研究所（NELHA）のJ. Cravenやハワイ大学のM. Vitousekの先駆的な栽培実験を参考したのは言うまでもありません．

以下に，海洋深層水研究所が行った海洋深層水の農業利用に関する研究の経緯を紹介し御礼に変えたいと思います．

2. 地中冷却効果

久米島で海洋深層水の取水事業が計画された当初，海洋深層水の取水水温は10℃前後で，熱交換後に農業などで利用できる淡水の水温は12℃位と想定されていました．NELHAの海洋深層水の取水温度は，4～6℃で熱交換後の水温は7～8℃と報告されており久米島で農業に利用できる水温はそれより4～5℃高めになります．そこで，久米島海洋深層水の冷熱で地中を冷却しようとする場合，いくつかの知見が必要となりました．

そこで，供試材料として沖縄県の夏場では栽培が特に困難なホウレンソウを供試し，12℃の冷水で地中を冷却することで生産が可能なのかを確かめることが研究のスタートとなりました．同時に，地中冷却の方法として，通水する冷水の温度や冷水を通水する管の材料，土壌に埋設する深さ，通水管の埋設間隔，通水量などを検討する必要があるとされました．通水管の材質に関しては，熱伝導はよくないけれどもコスト面から電気配線に使われているVE22管，外径26 mm，肉厚2 mmの管を使用し試験が実施されました．

2.1 月別の地温変化

冷水温度ごとに通水管からの距離が10 cmの部位の月別の平均地温を図1に示しました．冷却水温は，8℃（チラー使用），12℃（深層水との熱交換水原水），17℃, 22℃の4通りとしました．17℃および22℃については，12℃の熱交換水原水を三方弁の開閉により通水することで制御しました．

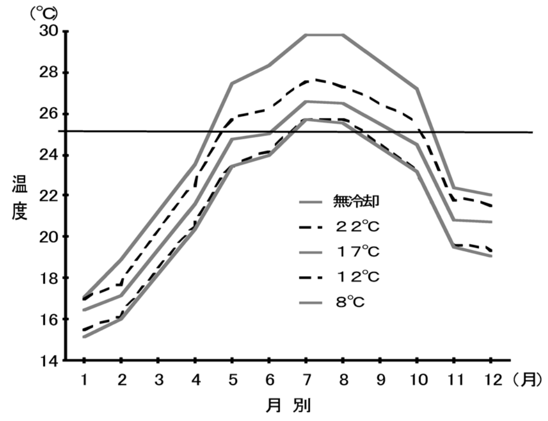

図1　月別平均地温と冷却区の平均地温

ハウス内の地温が26℃を上まわる5～10月期に地中冷却により通水管からの距離が10 cmの部位の地温を25℃台以下で制御できるのは，冷水温度22℃では5月と10月のみ，17℃では5, 6月と10月のみでしたが，12℃および8℃では年間を通して制御可能なことがわかりました．

2.2　冷却水通水管の埋設間隔

図2は，8月（9～16日）の地中温度を，冷却水の温度と通水管からの距離との関係を示したものです．冷却水温は，8℃, 12℃, 17℃, 22℃の4通り，通水管との距離は，10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cmの4通りとしました．

平均の地温は，通水管の埋設深度を10 cmとした場合に，通水管との距離が30 cmまでは送水管に近いほど，また，冷水温度が低いほど低くなる傾向が見られ，40 cm以上離れるといずれの温度でも冷却効果がないことがわかりました． また，冷水温度と地温の関係は，以下に示す対数式によく一致することがわかりました．

冷水温度8℃　15.69 + 11.32・LOG(x)　R^2 = 0.984

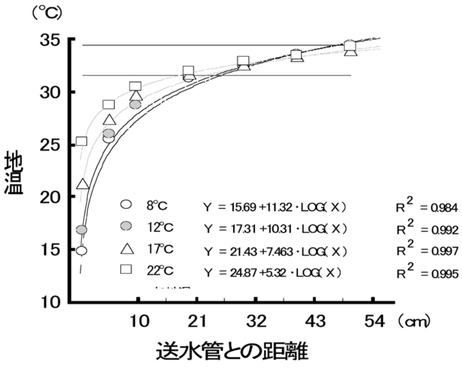

図2　送水管との距離および冷水温度と地温の関係

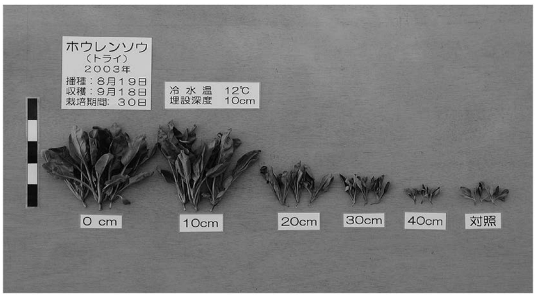

図3　通水管からの距離とホウレンソウの生育

冷水温度12℃　17.31 + 10.31・LOG(x)　R^2 = 0.992

冷水温度17℃　21.43 + 7.463・LOG(x)　R^2 = 0.997

冷水温度22℃　24.87 + 5.32・LOG(x)　R^2 = 0.995

この式をもとに地温制御を25℃とした場合の通水管の埋設間隔を推定すると，冷水温度8℃では14 cm, 12℃では12 cm, 17℃では6 cm, 22℃では1 cmと考えられました．このことは，久米島の海洋深層水との熱交換で得られる冷水温度が12℃程度と想定されており，予備実験で栽培実験を行うときに暫定的に送水管間隔を20 cmにしていたことがほぼ妥当であったことがわかりました．以後の栽培実験では通水管の埋設間隔は20 cmとすることとなりました．尚，同期間の非（無）冷却区の平均地温は，34.4℃であったので，冷却水の温度が12℃の場合，地中冷却により約9℃前後の地温を低下させていることがわかりました．

図3に通水管を1本とし，通水管の真上を0 cmとし，そこから植付け距離を10 cm置きに40 cmまで離してホウレンソウを栽培した場合の生育状況を示しました．通水管からの距離が10 cmまでは，生育が順調ですが，それ以上になると生育が劣り，先の通水管の埋設間隔は20 cm程度が適当だということが栽培上でも確認されました．

2.3　冷水通水管の埋設深度

通水管の埋設深度を10 cmとした場合，通水管の埋設間隔は20 cm程度が適当と判断されましたので，次に通水管を設置する深さが検討されました．表1に通水する冷水の温度と通水管の埋設深度がホウレンソウの生育（草丈）に及ぼす影響を示しました．通水温度は前述の4温度とし，埋設深度は，

表1　ホウレンソウの草丈に及ぼす冷水温度と通水管埋設深度

冷水温度	通水管の埋設深度			
	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm
8℃	21.6	17.3	16.4	17.0
12℃	18.3	16.2	14.8	15.2
17℃	17.5	14.4	10.3	8.3
22℃	13.4	4.1	4.1	4.6
非冷却	0（全個体枯死）			

（播種：7/16日，定植：7/24日，収穫：8/23日，在圃期間：30日）

5 cm，10 cm，20 cm，30 cmの4通りに設定しました．

生育は，冷水温度が低いほど，また，通水管の埋設深度が浅いほど生育が優れました．このことから，通水管の埋設深度は5 cm程度が適当と判断されました．

2.4 冷却効果が期待される期間

夏場において地中冷却によりホウレンソウの生育が促進されることがわかりましたが，地中冷却が有効な期間を確認するために，毎月中旬に播種し生育状況が調査されました．ここでは，図4に4月播き，図5に5月播き，図6に9月播き，図7に10月播きの地中冷却区および非（無）冷却区の草丈の継時的な変化を示しました．4月および10月播きでは，地中冷却の有無による生育差は見られませんでした．しかしながら，5月および9月播きでは，非（無）冷却区の草丈は出荷の目安となる草丈18 cm以上には生育しませんでしたが，冷却区では時間とともに伸長が見られ，顕著に地中冷却の効果が明らかとなりました．このことにより，沖縄県でホウレンソウ生産を行う場合，少なくとも，5月から9月間は地中冷却が必要であると判断されました．

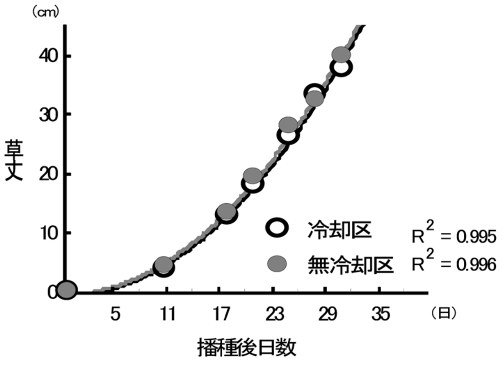

図4　4月播きホウレンソウの草丈の推移
（通水温度12℃，通水管埋設深度10 cm）

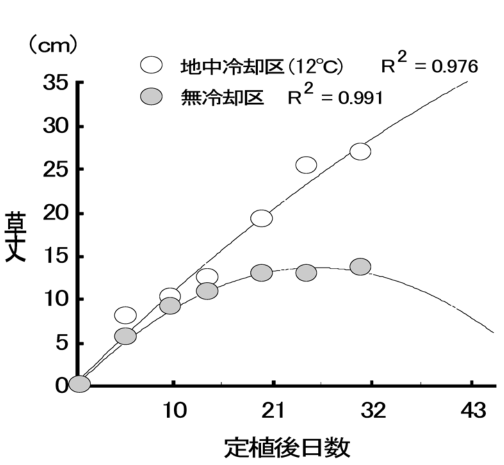

図5　5月播きホウレンソウの草丈の推移
（通水温度12℃，通水管埋設深度10 cm）

3. ホウレンソウ生産の収益性

これまで述べたように，亜熱帯に位置する沖縄県の夏場においても，海洋深層水の冷熱を利用し地中のみを冷却することによって，ホウレンソウの生産が可能であることがわかりました．また，3年間にわたり生産物を実際に沖縄県中央卸売市場に出荷して得られた競売実績も蓄積されたので，これらをもとに，10 a規模での栽培を行った場合の収益性の検討が行われました．

栽培施設は，沖縄県海洋深層水研究所の背後地に10 a（10 m×50 mの2連棟1,000 m^2）の低コスト耐候性・AETハウス（沖縄県農業試験場開発）を想定し

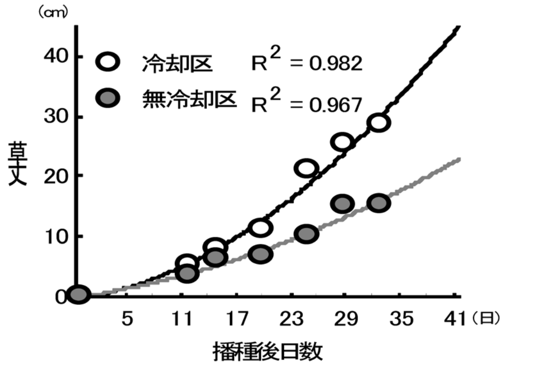

図6　9月播きホウレンソウの草丈の推移
（通水温度12℃，通水管埋設深度10 cm）

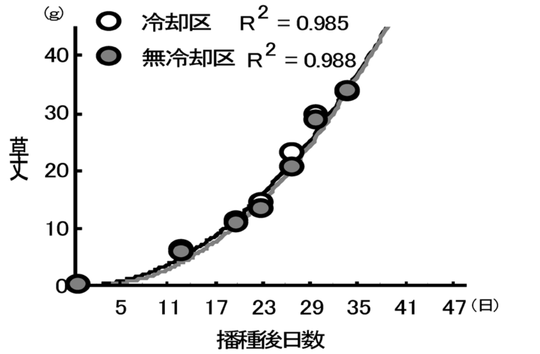

図7　10月播きホウレンソウの草丈の推移
（通水温度12℃，通水管埋設深度10 cm）

て，実栽培面積を540 m^{2}としました．冷却水は，研究所から約12℃の冷淡水を送水するシステムが想定されました．

3.1 生産額

生産額は，沖縄県海洋深層水研究所での栽培実績の平均収量である1.8 kg/m^{2}として，月当たり972 kg/540 m^{2}を見込み，夏作で5作，秋～春作で5作，年間で10作を想定して算出しました．夏作の販売単価は，平成15～18年の6月から10月間の沖縄県中央卸売市場に出荷しての競売実績である平均単価1,063円／kgとしました（表2）．秋～春作の単価は，平成15年から平成18年の中央卸売市場の平均単価210円／kgとしました（表3）．

これをもとに，試算された生産額は，夏作（6～10月）5,166千円，秋～春作（11～5月）1,020千円で，年間では6,186千円と推定されました（表4）．

表2 夏作（6～10月）のホウレンソウの平均単価

6月	7月	8月	9月	10月	平均
820	891	1,198	1,250	1,149	1,063

2002～2006年の沖縄県中央卸売市場における競売実績

表3 秋春作（11～5月）のホウレンソウの平均単価

11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	平均
266	221	238	187	165	180	214	210

2003～2006年の沖縄県中央卸売市場における平均単価

3.2 経営費

経営費は表4に示す通り，①種苗費，②肥料費，③冷水（深層水との熱交換水）使用量（6円/t），④光熱動力費（通水ポンプ用，業務用電力（基本料金1,664.25円，夏季料金16.33円／1 kWh），⑤諸材料費，⑥賃借料・料金（借地料1,500 m^2），⑦償却費（a. AETハウス，b. 配管設備，c. 送水設備，耐用年数14年），⑧償却資産修繕費，⑨販売経費（卸売市場手数料8.5%，農協久米島支店手数料5%，配送運賃，包装資材費）としました．

⑦償却費（AETハウス等）については，全額自己資本（モデルA）のみの場合と，補助金利用（補助率1/2（モデルB），2/3（モデルB），8/10（モデルD））の4モデルを想定しました．

これをもとに，推定された経営費は，①種苗費（108千円），②肥料費（54千円），③冷水使用量（316千円），④光熱動力費（163千円），⑤諸材料費（4,371

表4 海洋深層水冷熱利用農業におけるホウレンソウ周年栽培の経営試算表

		モデルA 補助金活用無	モデルB 補助率1/2	モデルC 補助率3/2	モデルD 補助率10/8
A. 生産額	合計	**6,186,780**	同左	同左	同左
	夏作	5,166,180	同左	同左	同左
	秋春作	1,020,600	同左	同左	同左
B. 経営費		**5,003,582**	**3,514,761**	**3,018,467**	**2,621,468**
①種苗費		108,400	同左	同左	同左
②肥料費		54,670	同左	同左	同左
③冷水使用料		316,225	同左	同左	同左
④光熱動力費		163,111	同左	同左	同左
⑤諸材料費		4,371	同左	同左	同左
⑥賃借料（土地）		9,876	同左	同左	同左
⑦償却費（施設・設備）		**2,977,643**	**1,488,822**	**992,548**	**595,529**
⑧償却資産修繕費		2,236	同左	同左	同左
⑨販売経費		1,367,050	同左	同左	同左
a.手数料料金		475,575	同左	同左	同左
b.配送運賃		735,000	同左	同左	同左
c.包装資材費		156,475	同左	同左	同左
C. 所得（A－B）		**1,183,198**	**2,672,020**	**3,168,293**	**3,565,312**
D. 自家労働評価額		2,128,500	同左	同左	同左
E. 収益（C－D）		**－945,302**	**543,520**	**1,039,793**	**1,436,812**

円)，⑥賃借料・料金（9,876円），⑦償却費（補助制度利用無しの場合2,977千円（モデルA），補助率1/2の制度活用の場合1,488千円（モデルB），補助率2/3の場合992千円（モデルC），補助率8/10の場合595千円（モデルD）），⑧償却資産修繕費（2,236円），⑨販売経費（1,367千円（手数料料金475千円），配送運賃（735千円），包装資材費（156千円））となりました．

3.3 収益性

これらをもとに収益性を試算すると，補助金制度を活用しないモデルAの所得は，1,183千円となりますが，沖縄県のホウレンソウ生産の自家労働評価額2,128千円（212.8千円／1作×10作）と差し引きすると945千円の赤字となり，収益性はないと試算されました．一方，補助金制度を活用した場合，モデルBで2,671千円，モデルCで3,168千円，モデルDで3,565千円の所得となり，自家労働評価額を差し引くとモデルBで543千円，モデルCで1,039千円，モデルDで1,436千円の収益が見込めると推定されました（表4）．

このように，海洋深層水を利用したホウレンソウの周年栽培は，補助金制度を活用して施設や設備を導入できれば，十分に収益性が望めると思われます．

今後，収益性をより高めるためには，反収を増やし，生産額を高めることが最も重要であり，そのためにより収量の高い品種を選定することや増収技術の確立が必要であると考えられます．また，地中冷却条件として送水量を送水管1本当たり2L／分，24時間冷却としていますが，経費節減のために地温が低くなる夜間の土壌冷却条件（送水を停止するなど）を検討し，冷水使用量の軽減の可能性を探る技術開発も重要であると思われます．

4. おわりに

沖縄県海洋深層水研究所の農業分野の研究課題は，当初，沖縄県の夏場野菜類が高温により栽培が困難であることから，その対策として海洋深層水の冷熱を利用することで，夏場野菜の安定生産技術を確立し県内自給率を高めることにありました．しかし，現在，久米島町が「国際海洋資源・エネルギー利活用推進コンソーシアム」（平成26年設設立）で検討されている現在の約10倍量の海洋深層水の取水を想定した場合，研究開発目標を再考しなければいけない時期になっていると思われます．たとえば，現在の取水量においても，葉菜類としてホウレンソウ単品目だけの生産では県内需要量を上回るのは明白であり，また，久米島海洋深層水複合利用基本調査（平成23年）で示されているように10 haでホウレンソウのみを周年生産するというのも現実的ではなさそうです．

沖縄県海洋深層水研究所では，これまでに葉菜類は，ホウレンソウ以外にサラダナ，リーフレタス，コマツナ，ミズナ，カラシナ，ネギ，アイスプラント等，根茎菜ではラッキョウ等，果菜類ではトマト，イチゴ等の栽培試験が実施されてきていますが，今後，早急にホウレンソウ以外の葉菜類においても地中冷却効果があり，かつコスト面からも収益性がありそうな品目を選定し詳細な評価をしていく必要性があると考えられています．

海洋深層水の農業生産分野での研究は全国的に見ても少なく，沖縄県海洋深層水研究所の研究成果は海洋深層水の複合利用という観点から見ると，今後も重要性を増すものと考えています．