

津波による農地塩害軽減のための除塩計画策定手法

Planning Method on Salt Exclusion for the Reduction of Salt Damage of Farmlands by Tsunami

中矢哲郎¹・丹治 肇²・桐博英³・濱田浩正⁴

Tetsuo NAKAYA, Hajime TANJI, Hirohide KIRI and Hiromasa HAMADA

The amount of water required for an exclusion salinity of 0.5 g/cm² density in argillaceous soil was calculated by a field experiment for salt damage reduction of farmlands by Tsunami. Next, a simple salt damage estimation method that was proposed to be performed through meteorological observatory data was demonstrated. Stripping off the surface salinity soil so that the surface saline water with salt flows out by rainfall or watering through the drainage canal is effective as a salt exclusion measure that farmers can perform. A decision flow chart for salt exclusion planning to reduce tsunami salt damage was shown based on these results.

1. はじめに

津波により海水が浸水した農地では除塩対策が必要である。2004年12月26日に発生したインド洋津波による被害を受けたタイ南部は、塩害調査結果によると、被災時期や被災対象作物によっては年間1,000 mmを超す多雨地帯においても、甚大な被害が生じている(中矢ら, 2006)。この津波による塩害は、乾燥地や干拓地のように永続的に除塩対策が必要なケースと比較すると、塩水の侵入は短期的で、被災地の気象条件、塩分除去に必要な散水量等を適切に考慮した対策を講じれば大幅に軽減できる。また近年整備されつつあるハザードマップを活用し(内閣府他, 2006)農地への浸水域、浸水時間を考慮した適切な対策を講じることが望ましい。

ここでは、2004インド洋津波後のタイ南部塩害調査結果を基に、土壤塩分の洗脱に必要な散水量、津波浸水被害発生後の長期的な塩害状況を簡易に推定できる手法、被災地の農家や住民独自で行える対策について検討を行った。これらの結果を基に、被災地の実態に即した除塩計画の策定手法について検討を行った。

2. 調査方法

(1) 現地調査

津波被災後、タイ南部で行われた農地被害追跡調査では、津波浸水を受けた全ての農地で塩害が広がっていたが、降雨により土壤塩分は津波被災から約半年後に完全に除去されていた(中矢ら, 2006)。この津波の発生直後から土壤塩分が除去されるまでの過程を基にして除塩計画を策定するため、現地で土壤塩分濃度のデータを集集し、復旧状況の現地踏査を実施した。塩分濃度の測定には、塩分濃度の一つの指標であるEC(電気伝導度)の

値を用いた。ECの鉛直分布を求める場合は、Soil Sampler(DIK-100A)を用いて不攪乱試料を採取し、得られた試料を深さ方向2 cm ~ 5 cm 毎に切断し1:5水浸出法(土壤環境分析法編集委員会編, 1997)に準拠しEC(以下EC(1:5)と記す)の測定を行った。測定には電気伝導度計 TOA CONDUCTIVITY METER CM-210Pを使用した。現地調査は、津波発生以降、2005年1月、2月、7月、11月、2006年3月、7月の計6回行った。気象データの取得地点、対象とした被災地区を図-1に示す。

(2) 圃場試験

除塩に必要な散水量は、被災農地と同じ低透水係数で粘土質土壌の茨城県つくば市農村工学研究所内畑地灌漑実験圃場において除塩試験を実施し推定した。実験は図-2のアクリルの排水溝で囲った枠内に水分状態、水分移動方向把握を目的とした電圧出力式テンシオメータ

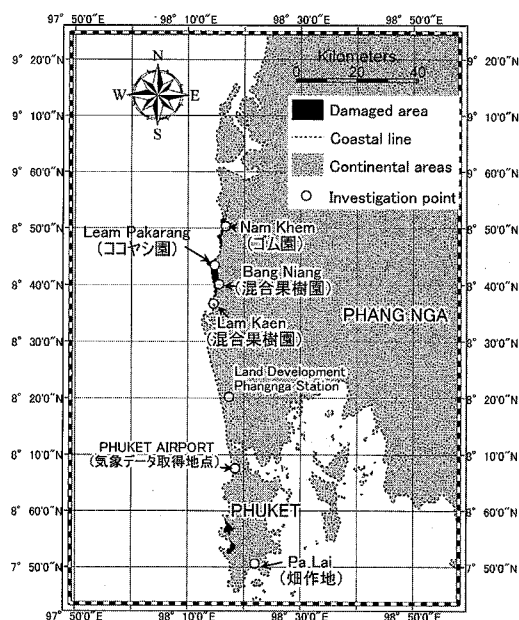


図-1 タイ南部調査地点

1 正 会 員 博(農) (独法) 農業・食品産業技術総合研究機構
2 正 会 員 農博 (独法) 農業・食品産業技術総合研究機構
3 正 会 員 (独法) 農業・食品産業技術総合研究機構
4 非 会 員 (独法) 国際農林水産業研究センター

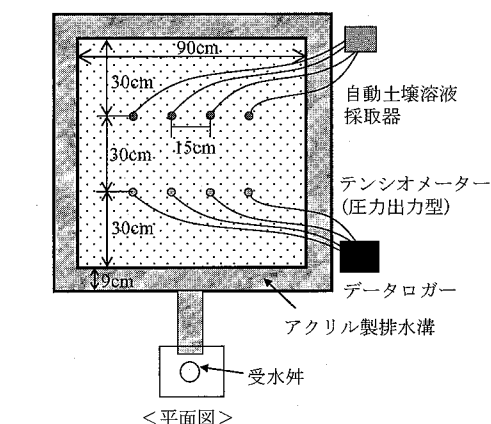


図-2 圃場実験装置の概要

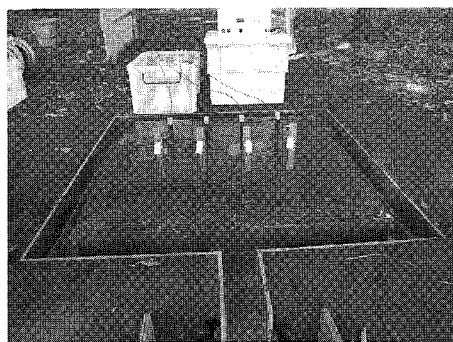


写真-1 圃場実験装置の概観（散水状況）

ー(DIK3023), 塩分濃度測定のための自動土壌溶液採取器(DIK-3951)を4深度に設置した。具体的な試験手順を以下に記す。

- ① 塩化ナトリウム 50 g/L(塩分濃度 5%)を 48.6 L (90 cm × 90 cm × 2 cm を 3 回浸透させた値) 浸透させる。塩分総量は 2,430 g である。
 - ② 降雨強度 100 mm/h で表面流出水の塩分濃度が十分低くなるまで散水を行う。(写真-1)
 - ③ 湛水浸透により塩分除去を行う。
- ①の浸透塩分量は、試験浸透によりタイ現地の塩分濃

度実測値に近い条件を探索して決定した。単位面積あたりの塩分総量は 0.33 g/cm^2 である。散水強度は表層からの塩分の流出を促進するために現地の降雨強度より大きい値を設定した。③は②の処置より表層塩分はほとんど除去されているため、下方浸透のみで除塩を行うことにより除塩に要する時間を短縮させる措置である。

自動土壌溶液採取器の真空ポンプで任意の負圧を与え土中に埋設したポーラスカップから採取した土壌溶液は、HORIBA Twin Cond CONDUCTIVITY METER B-173 を使用し EC(以下水飽和抽出溶液の EC と記す)を測定した。

3. 結果及び考察

(1) 簡易予測による塩害対策

津波や高潮の浸水による塩害被害は、乾燥地のように永続的に塩害が継続する条件とは異なり、本来塩害が発生しない多雨地帯が多く含まれる。よって降雨量によっては塩分は短期間で除去可能である。以下では塩分の洗脱傾向の有無を簡易に判断する方法について検討する。

不飽和土壌中では、降雨により下層より表層の含水量が増加すると、全ポテンシャル(マトリックポテンシャル(= - 水分張力) + 重力ポテンシャル(= - 地表面からの深さ))の表層から下層方向の勾配は負になり水分移動は下向きに生じ、干天が続く表層の含水量が減少すれば全ポテンシャルの勾配は正になり水分は上向きに移動する。長期的な塩分集積傾向の把握を行う場合は、月別の降雨量と蒸発散量を求め、降雨量 > 蒸発散量のとき土壌中に浸水した塩水は、下方に移動し、降雨量 < 蒸発散量のときは土中から水分が失われ水分が上方に移動し塩分が集積すると考えられる。この計算を過去のデータを用いて月別に計算すれば季節的な塩分の挙動、年間を通しての塩分の残留状況の傾向を把握できる。月単位の長期的な塩分集積傾向の把握には簡易手法が実用的である。

蒸発散量の推定は畑地灌漑における消費水量の算出に用いられるペンマン式を用いる。ペンマン式より得られる蒸発散位に作物係数を乗じて作物蒸発散量を求める。蒸発散位は「草丈が短い植物で完全に覆われた地表面に十分な水が供給されている場合に失われる地表からの蒸発散量」と定義されている。蒸発散位は土壌水分量の制限を受けない蒸発散量で可能蒸発散量とも呼ばれ、気象台データで決定できる。今回はこの蒸発散位を蒸発散量として水収支計算に用いる。蒸発散位算定には降雨量、風速、温湿度、日射量データの入手が必須であるが、これらの気象データを入手できない場合は、計器蒸発量で代用する。松井(2003)は計器蒸発量と実際の蒸発散量は同一ではないものの、データが整備されている計器蒸発量は参考値としては有用であることを示している。ペンマン式の算定方法は三浦・奥野(1993a, 1993b)によ

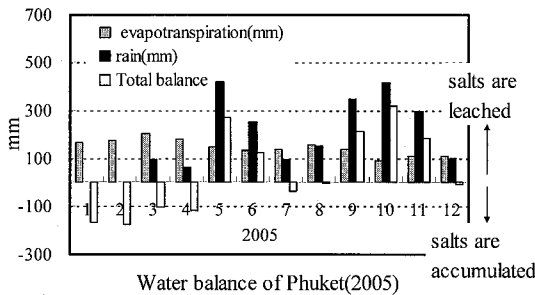


図-3 津波被災地における水収支の例 (タイ南部プーケット県, 年間降雨量 2266mm, 年間蒸発散量 1746mm)

って詳細に示されている。

図-3 にインド洋津波発生後の 2005 年の塩害農地 (プーケット県) における水収支計算結果を示す。蒸発散量算定にはプーケット空港 (index station 48565, $8^{\circ}7'N$, $98^{\circ}18'E$) における気象データを用いた。2005 年 10 月の日射量データが欠測であったため、10 月の蒸発散量は計器蒸発量で代用した。年間を通じて降雨量 (2,241 mm) > 蒸発散量 (1,746 mm) であり、自然降雨による塩分の洗脱により塩分残留の長期化は避けられると予想できる。また蒸発散量として計器蒸発量を用いた場合は 1,677 mm であり、年間の傾向は蒸発散量 (蒸発散位) と概ね一致する。

月別の傾向を見ると被災直後の 1～2 月は乾期でありほとんど降雨がないため、蒸発散量 > 降雨量となり 2004 年 12 月の津波被災時よりも表層に塩分が集積し被害が大きくなったことが予想される。よって年間で蒸発散量 < 降雨量であっても、月別に見ると蒸発散量 > 降雨量である場合は、人為的に散水を行い塩分を除去する必要がある。このように簡易な水収支計算でも塩害の概要と対策の必要性の有無の推定ができる。

(2) 除塩に必要な降雨量の推定

a) 現地調査結果

図-4 に津波被災後の果樹園 (Bang Niang) における EC (1:5) の降雨量毎の変化を示す。この農地は海岸から約 2.3 km 離れているランブータン、マンゴズティン、バナナなどの混合果樹園地である。津波被災後、表層付近の塩分濃度は作物の生長障害を起こす境界である 4 dS/m を大きく越えており、作物は枯死していた (写真-2)。大きな塩害被害を受けたバンガー県農地は、被災後約半年間の雨期 (2005.7) に 1,397 mm の降雨があり塩分は除去されていた。津波浸水から一年経過後 (2006.3) も表層への塩分の集積はなく、塩分が長期的に残留することはなかった。この傾向は Bang Niang 果樹園以外のココヤシ園、ゴム園においても同じであり雨期 (2005.7) の 1000 mm 以上の降雨により塩分はほぼ除去されていた。

b) 圃場試験結果

図-5 に実験圃場における浸透水量毎の EC (1:5) の

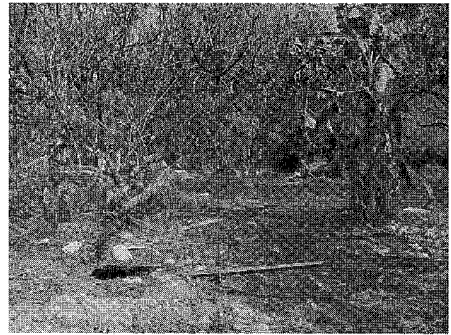


写真-2 津波による塩害の状況 (2005 年 1 月, バンガー県 Bang Niang 混合果樹園, 枯れているのはランブータンの木)

鉛直分布を示す。塩水散水直後の塩分濃度は現地と同様に表層のみ 4 dS/m を超えて、以深は急激に減少する分布となった。洗脱水散水後は表層塩分は表面流出により除去され、更に湛水浸透 300 mm においては表層直下の残留塩分が 30 cm 程度まで下方へ移動し、1,000 mm に

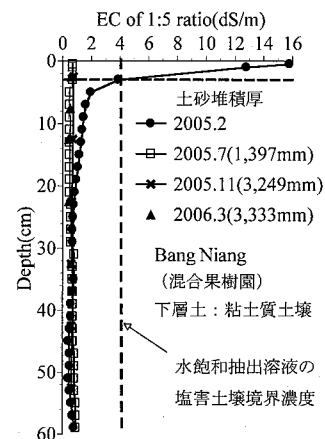


図-4 現地 (タイ南部バンガー県) の EC (1:5) の鉛直分布

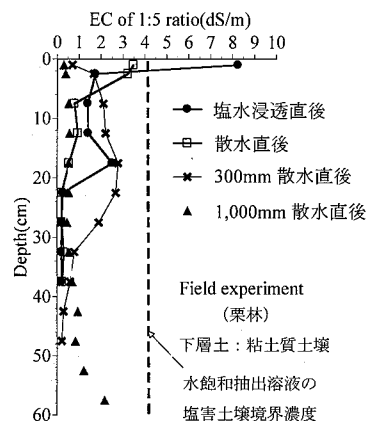


図-5 実験結果の EC (1:5) の鉛直分布

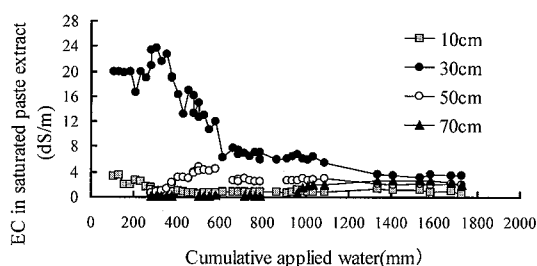


図-6 各深さにおける水飽和抽出溶液の EC と浸透水量との関係

おいては 60 cm 程度まで移動している。

図-6 に浸透水量毎の深さ別の自動土壌採取器で採取した水飽和抽出溶液の EC の変化を示す。洗脱水浸透中は全ての深さで全ポテンシャル勾配は負であり下向きの水分移動のみであることをテンシオメータにより確認している。1,100 mm ～ 1,300 mm 程の浸透により各深さの塩分が 4 dS/m 以下に除去されていることがわかる。浸透塩分総量から 1 g/cm^2 の塩分量の除去に必要な散水量を算定する。0.33 g/cm^2 の除塩に要した散水量 + 浸透量はおよそ 1,100 mm ～ 1,300 mm であるため、1 g/cm^2 の塩分除去に必要な散水量は 3,677 mm ～ 4,333 mm と算出できる。実際の現地では 1 g/cm^2 の塩分量は過大であるため、0.5 g/cm^2 の除塩に必要な散水量 1,839 mm ～ 2,167 mm で表示する。

これらの値を実際の津波被災地に適用する場合は以下の手順を用いる。

- ① EC(1:5)は飽和抽出液の EC よりかなり低い値になることが知られているため、飽和抽出溶液の EC に換算する。換算には $9.7 \times \text{EC}(1:5)$ を用いる (Al-Busaidi ら, 2006)。
- ② 塩分濃度と水飽和抽出溶液の EC との回帰式より各深さの塩分濃度を算定する。回帰式は次式を用いる。(農林水産省北海道農業試験場, 2000)

$$y = 0.0006x^2 + 0.0538x - 0.0077 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 y : 塩分濃度 (%), x : 水飽和抽出溶液の EC

- ③ ②の塩分濃度を、 $1 \text{ cm}^2 \times$ 各深さ (cm) の体積中に含まれる塩分量 (g) に換算し合計し、単位面積 (1 cm^2) あたりの塩分量を算出する。
- ④ ③の値に 0.5 g/cm^2 の塩分量の除去に必要な散水量 1,839 mm ～ 2,167 mm をかけ 2 倍し必要散水量を算出する。

図-4 の EC(1:5) の分布に対し、除塩に必要な散水量を上記の方法で算出する。①, ②, ③の計算より単位面積あたりの塩分量は 0.46 g/cm^2 になる。この計算過程を表-1 に示す。④の計算より必要散水量は 1,687 mm

表-1 単位面積あたりの塩分量の算定過程

深さ (cm)	EC(1:5) (dS/m)	水飽和 EC(dS/m)	塩分濃度 (%)	$1 \text{ cm}^2 \times$ 深さ (cm) の土層に含まれる塩分量 (g)
0.5	15.80	153.26	22.33	0.112
1	12.80	124.16	15.92	0.080
3	3.89	37.73	2.88	0.058
5	1.97	19.11	1.24	0.025
7	1.63	15.81	0.99	0.020
9	1.47	14.26	0.88	0.018
11	1.38	13.39	0.82	0.016
13	1.30	12.61	0.77	0.015
15	1.18	11.45	0.69	0.014
17	1.08	10.48	0.62	0.012
19	0.97	9.41	0.55	0.011
21	0.87	8.44	0.49	0.010
23	0.79	7.66	0.44	0.009
25	0.75	7.28	0.42	0.008
27	0.70	6.79	0.39	0.008
29	0.72	6.98	0.40	0.008
35	0.80	7.76	0.45	0.027
37	0.70	6.79	0.39	0.008
合計 (単位面積あたりの塩分量 (g/cm^2))				0.457

～ 1,993 mm と算出される。実測値である 1,397 mm より若干多く評価しているが、除塩に必要な降雨量の概算値としては使用できる。

(3) 現地事例に基づく農地復旧対策

津波被災後の大規模な農地復旧は予算上困難であるため、農家や住民独自で実施可能な復旧対策の選定と提案が重要である。調査の対象としたバンガー県 BangNiang 地区では、多くの塩害対策を実施し早期の農地復旧を実現している。この地区でなされた対策を以下に示す。

- ・表土の塩分土壌をはぎとり、客土を行った。
- ・排水を促進させるために、農地内に幅 1 m 程度の排水路を設置した (写真-3)。
- ・塩害を受けたランブータン、マンゴスチン、ランサなどの果樹は伐採し、新たに耐塩性作物であるオイルパームの木を植栽した。(EC と作物の生育との関係は FAO (1992) などに記されている。)



写真-3 除塩のための排水路掘削の例 (2005 年 7 月, タイ南部バンガー県 Bnag Niang 混合果樹園)

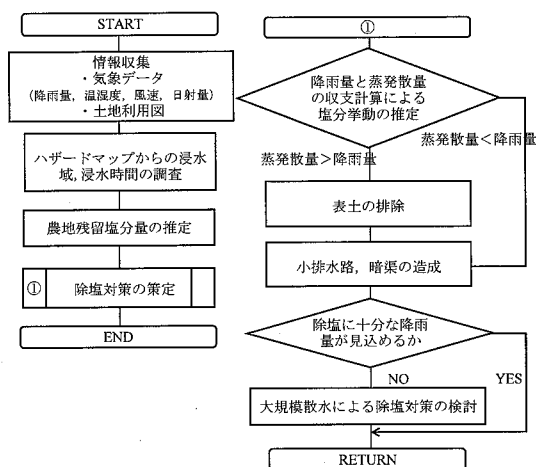


図-7 除塩計画策定のフローチャート

・オイルパームは収穫までに6年を要するため、樹木間に収穫の早い胡瓜を栽培した。

オイルパーム、胡瓜は雨期の降雨により、深さ2mまで塩分が洗脱されていたため順調に生長していた。

これらの農地復旧対策のうち除塩対策内容の有効性を検討する。年間を通じて蒸発散量 < 降水量であるが、蒸発散量 > 降水量の乾期に被災した今回の場合は、多量の蒸発散によって塩分が地表にとどまったため、表層土壌のはぎ取りが有効であった。表層土壌を除去した上で、更に小排水路、暗渠を造成することで、雨期の降雨によって土壌中の残留塩分の洗脱が促進されたと予想できる。

(4) 除塩計画

(1)～(3)の検討を基に作成した除塩計画策定のフローチャートを図-7に示す。

事前対策として、過去5～10年の月別の降水量と、蒸発散量算定のための気象データ(温湿度、風速、日射量、計器蒸発量)を入手し、(1)の手法により水収支の傾向を把握しておく。既存のハザードマップから農地を判読し、浸水域と浸水時間を算定し、農地残留塩分を算定する。算定された残留塩分に対して(2)の手法により必要散水量を決定する。蒸発散量 > 降水量の乾期に被災した場合は(3)で示したように表土の除去を行い小排水路と暗渠の造成をすることで除塩効果を促進する。蒸発散量 < 降水量の雨期に被災した場合は降雨による浸透と表面流出による除塩効果があるため表土除去の必要性は小さく、自然降雨による塩分の洗脱が期待できるが、小排水路と暗渠の造成をすることで除塩効果を促進する。一方、調査事例地区のような雨期がなく、年間を通じて蒸発散量 > 降水量の場合は降雨による除塩効果が期待できないため、表層塩分土壌を除去した上で、水源から圃場への洗脱水確保のための、仮排水路を設置しなければならない。この方法は大規模な農地復旧となるため、津

波被災地への適用性については、今後の検討を要する。

4. まとめ

本研究では、津波による塩害の軽減対策の計画手法について検討を行い、以下の結論を得た。

- ① 圃場実験結果に基づき 0.5 g/cm^2 の塩分量の除去に必要な散水量 $1,839 \text{ mm} \sim 2,167 \text{ mm}$ を算定し、現地観測結果と整合する結果が得られた。
- ② 気象台データを用いた簡易な水収支計算により塩害傾向と対策の内容を概ね推定できた。
- ③ 津波被災農地の事例を基に農地復旧対策を提案した。ただし、年間を通じて蒸発散量 > 降水量となる場合は、大規模散水等の支援対策が必要となる。
- ④ ①～③を基に除塩計画策定のフローチャートを作成し、津波塩害軽減対策を提示した。

我が国は年間降水量が $1,000 \text{ mm}$ を超す多雨地帯であるため塩害に対する対策の必要性は過小評価されるが、簡易かつ農地被害軽減に効果的な対策は多いため、実施が望まれる。

謝辞：本研究は住友財団環境研究助成の援助を受けた。現地調査に際しては、タイ国農業協同組合省土地開発局の方々に多大な御協力を頂きました。蒸発散量の算定にあたっては岡山大学三浦教授に助言を頂きました。農村工学研究所水利施設機能研究室森主任研究員、渡嘉敷主任研究員、構造研究室増川室長には圃場実験に関する協力を頂きました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 土壤環境分析法編集委員会編(1997): 土壤環境分析法, 博友社, pp. 8-11.
- 内閣府(防災担当): 農林水産省農村振興局・農林水産省水産庁・国土交通省河川局・国土交通省港湾局(2004): 津波・高潮ハザードマップマニュアル
- 中矢哲郎・丹治 肇・桐 博英(2006): 2004年インド洋津波によるタイ南部農村地帯の長期的被害調査, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1381-1385.
- 農林水産省北海道農業試験場(2000): 塩分を含むかんがい用水の取水管理, 北海道農業平成12年度研究成果情報
- 松井宏之(2003): Hargreaves式に基づく月平均蒸発計蒸発量の推定, 水文・水資源学会誌, 第16巻6号, pp. 589-594.
- 三浦健志・奥野林太郎(1993a): ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細, 農業土木学会論文集, 第164巻, pp. 157-163.
- 三浦健志・奥野林太郎(1993b): ペンマン式の計算を容易にするための工夫と提案, 農業土木学会論文集, 第164巻, pp. 165-170.
- Al-Busaidi, A., T. Yamamoto, C. Bakheit and P. Cookson (2006): Soil Salinity Assessment by Some Destructive and Non Destructive Methods in Calcareous Soils, J. Jpn. Soc. Soil Phys. No. 104, pp. 27-40.
- FAO (1992): The use of saline waters for production, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 48, pp. 27-31.