

## 46. プラヤと地下水 (2)

### (4) テキサス High Plains のプラヤ

筆者が当地を訪れたのは、故山本荘毅先生を団長とする地盤沈下をメインとした視察団の一員に加えてもらい、アメリカの東西を横断するツアーの途中で立ち寄った時のことである。今から40年も前のことなので視察現場の様相や訪問先の関係機関<sup>脚注1)</sup>での意見交換の内容の多くは記憶の彼方へと消えてしまったが、今でも強烈に頭に残っているのは、空中からみたテキサス州の広大な高原と、そこに散在するプラヤの景観である(写真25, 26)。その大きさがほぼ揃っていることや配置に規則性が認められる、など



写真25 テキサス High Plains の上空からみたプラヤ①

の点が特に印象的であった。またそれらのほとんどが水を湛えているのも注目を惹いた。

テキサス High Plains におけるプラヤの数は論文やレポートによって20,500~37,000と、幅があつて、正確には把握されていない。また成因についても風蝕や溶解による沈下あるいは構造運動<sup>脚注2)</sup>などの諸説があつて意見の一致をみない。



写真26 テキサス High Plains の上空からみたプラヤ②

プラヤの形成年代もこれに付随する風下の砂丘堆積物から数千年から33,000年と推定されているが詳しいことは分かっていないようである。

先にその大きさが揃っていると述べたが、現地に降り立つと直径数10mから数kmにおよぶものまで大小様々であ

脚注1: Texas Tech University, や High Plains Underground Water Conservation District など。

脚注2: 地盤の沈下はオガララ帯水層の堆積時(中新世~鮮新世)から続いているという説もある。

る。元々成因や年代も一概ではないということなのだろうか。

さて、その分布特性に関してはプラヤの成因に係る問題であるが、これもまだ定説をみない。このことはテキサス High Plains における地下水の涵養機構の把握と適正な地下水管理、あるいはプラヤを利用した人工涵養につながる課題でもあり、このような視点から行われた研究も多数ある。たとえばプラヤはランダムに分布するのではなく、集団性を示すものと、ある規則性をもって分布するものがあり、規模も含めて、それらは High Plains の中であって、図 14 のように地域によって異なるとしている<sup>脚注)</sup>。

筆者が訪れた場所は図 14 の Lubbock 郡で、ここに“High Plains Underground Water Conservation District No.1”という名のオフィスがある。写真 27 はここを訪問した時にいただいた記念メダルで、右下の部分でテキサス州、左上の部分でそのうちの□の範囲を拡大したものである。地下水管理地域はその凹んだ部分である。

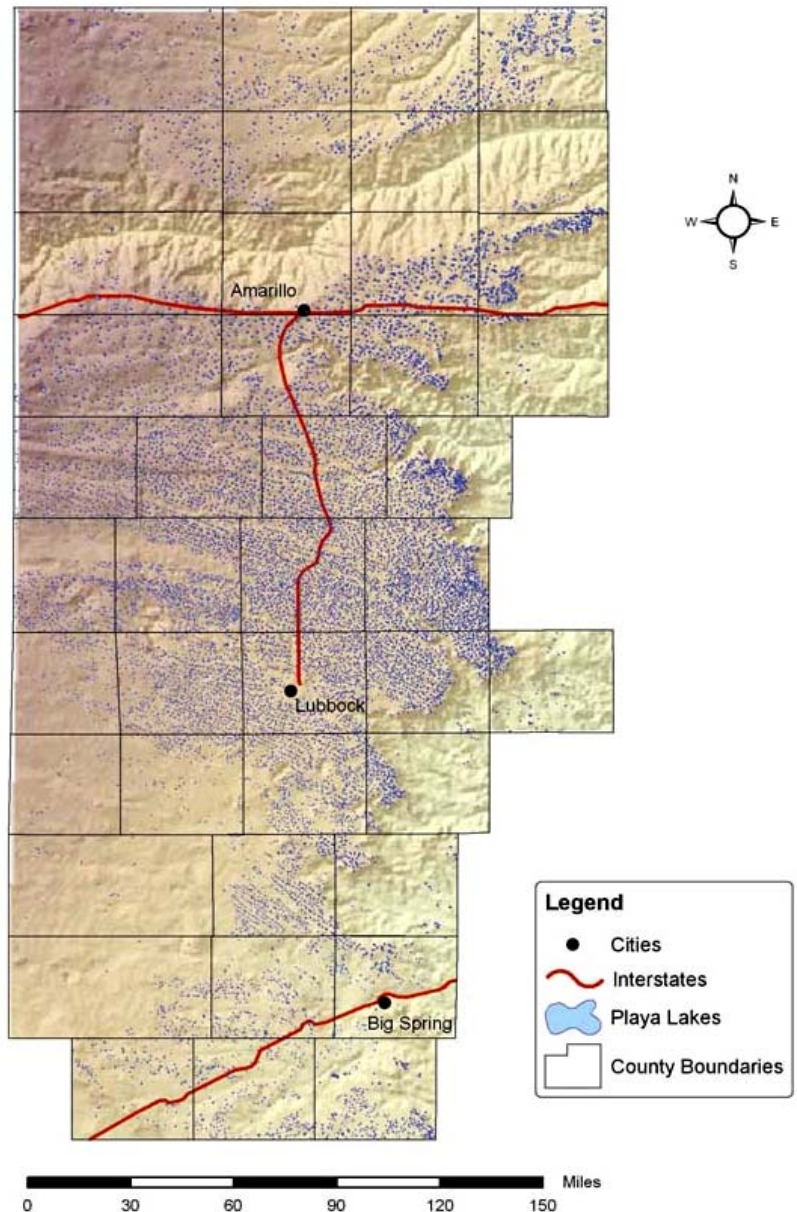


図 14 Texas High Plains 南部におけるプラヤの分布

(出典：脚注参照)



写真 27 High Plains Underground Water Conservation District No.1 の記念メダル (直径 75 mm)

脚注：J. P. Quillin et al.(2005): Spatial Distribution of playa basins on the Texas high plains. The Texas Journal of Agriculture and Natural Resources. 18: 1-14 など。



ところで世界最大規模と言われるオガララ帯水層 (Ogallala Aquifer)<sup>脚注)</sup> は、北アメリカ大陸中西部のロッキー山脈と東側のプレーリー (Prairie) と呼ばれる中央平原の間に広がる台地状の堆積平野にあって、地下数 10m から 300m 程度の比較的浅いところに存在し、アメリカにおける灌漑地の 27%はこの帯水層の地下水に依存している。

オガララ帯水層の範囲とプラヤの分布は図 15 のようによく対応していて、両者は密接な関係にあることが推察されるが、筆者が訪れた時代にはそれらを取り巻く水文地質環境に関する知見は乏しく、むしろ両者は直接の関係はなく、オガララ帯水層の地下水は涸渇性であると考えられていたようである。

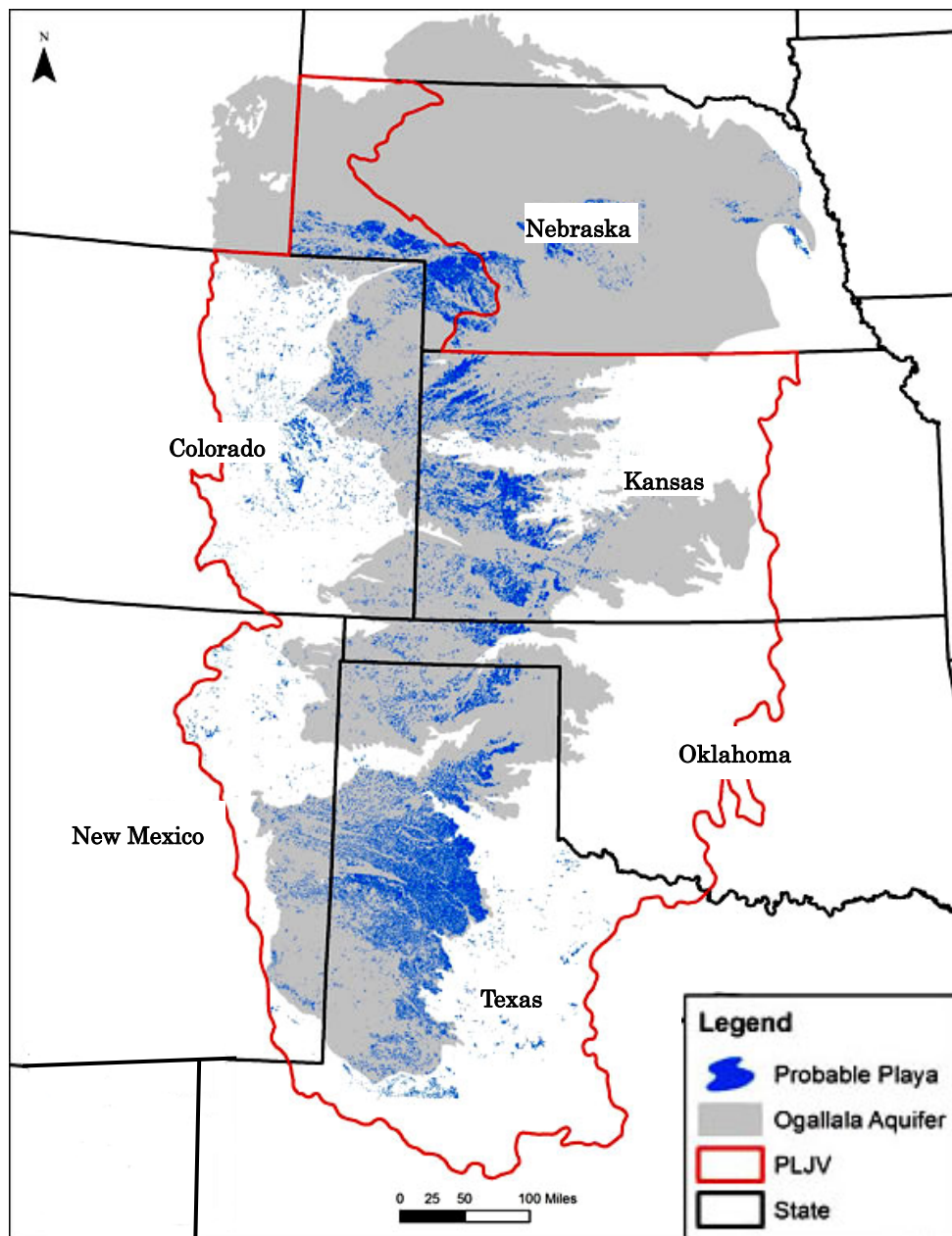


図 15 オガララ帯水層とプラヤ  
(出典：Playa Lakes Joint Venture. 略称 PLJV)

脚注：中新世後期から鮮新世初期とされ、ロッキー山脈の構造運動がまだ活発だった時代に堆積した。

筆者が視察した頃よりさらに遡る 10 年以上も前から、その地下水保全対策としての人工涵養が行われはじめ、その初期のものはプラヤのオーナーが取り組める程度の簡単なピットや堅穴を通しての涵養、または揚水と涵養を兼ねた多目的 (dual-purpose) 井戸であった。しかしこれらを効果的に進めるためにはさらに実験を重ねる必要がある

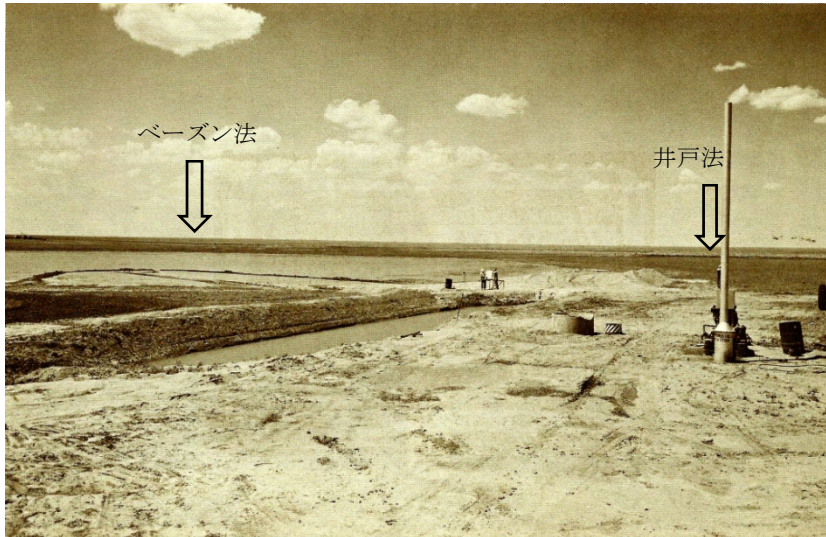


写真 28 Artificial groundwater recharge site  
(Castro county, Texas)  
(出典 : Groundwater management on the high plains of Texas)

ことが分かってきた。筆者が訪ねたのはその頃で、ベースン法<sup>脚注 1</sup>と井戸法の両者を備えた涵養方法 (basin recharge and well recharge) などが一部で実行に移されていた (写真 28)。

なお井戸法では雨期に湛水したプラヤの水は圧力をかけない状態で自然流入させていた<sup>脚注 2</sup>。これら

の方法は基本的には現在も引き継がれているようである。

さてプラヤとオガララ帯水層の関係をめぐるとの問題であるが、次の 2 点が課題とされてきたようである。すなわち一つは物質循環を含めた地下水の循環機構に関する問題であり、他はそれを支配している水文地質環境である。

まず前者についてであるが、プラヤとオガララ帯水層の間には厚い粘性土層が介在していて、これが不透水性を示すことから、かつてプラヤは都市排水や工業廃水などの処分地として利用されていたことがある。そのためオガララ帯水層への地下水汚染の拡大の危険性は早くから懸念されており、1968



写真 29 Tail water の再利用 (Lubbock county, Texas)

年ごろには灌漑水や降水によって生じる“末端余水”ともいえる Tail water の再循環

脚注 1 : ベースン法の最大の欠点は蒸発による損失で、夏期には降水量の 75% は蒸発によって失われるという報告もある。

脚注 2 : オガララ帯水層へは圧力をかけて注入する方法も一部では採られている。



やプラヤ水の回復システム (tail water and playa water recovery system) による沈殿物、栄養塩分、その他の化学物質の除去、濃度抑止対策が試行された。これは 1972 年にラボックの北に隣接するカストロ県(Castro County)で実証試験を経て実施に移され、その数は 3 年後には 125 ユニット、率にして 28%に達した。

図 16 はプラヤに集められた灌漑余水や降水①を凝集剤処理して②、沈澱池に集め③、その清澄水④を涵養井戸⑤によって地下に浸透させるシステムを模式的に示したものである。なおここで⑤の井戸法に代わってベーズン法が採られている場合もある。

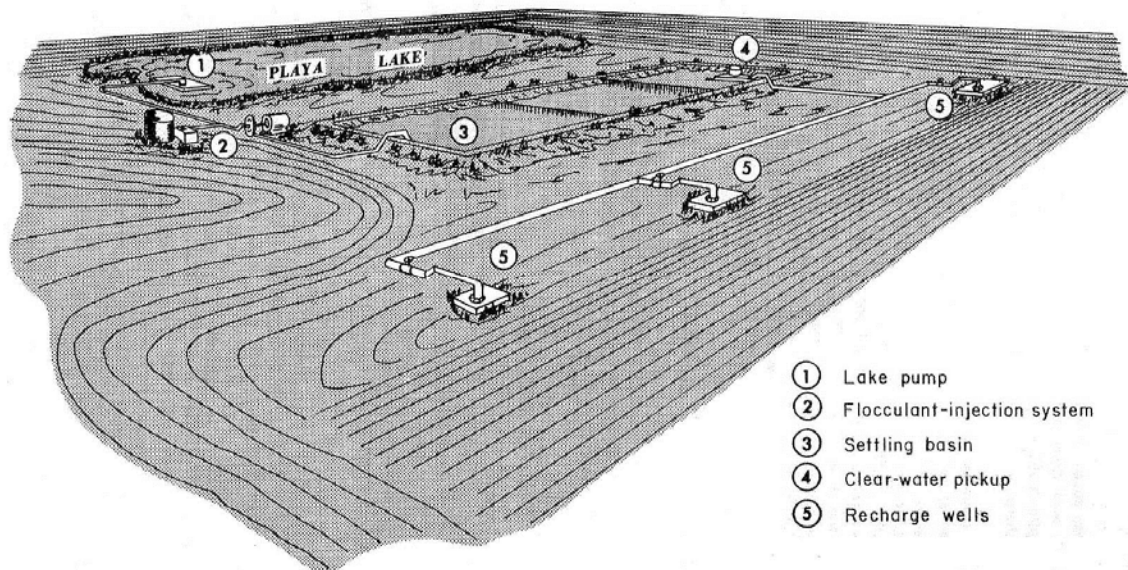


図 16 Tail water による地下水涵養システムの概要

[ 出典 : Richmond F. Brown et al.(1978), Artificial groundwater Recharge as a Water-management on the Southern High Plains of Texas and New Mexico. ]

先にも触れたようにプラヤ底とオガララ帯水層の間にある風成のローム質層<sup>脚注1)</sup>は、通常は不飽和<sup>脚注2)</sup>の状態にあり、以前はプラヤからの自然涵養は行われず、蒸発計の水のように大気中に消えるだけだ、といった意見が強かったようである。しかし近年に至って、乾燥期にプラヤ底に堆積している粘性土層に形成される深さ 1m 以上に達するクラックが地下水涵養に深く係っているといった見解が出されるようになった。写真 30 は筆者が観察したプラヤ底にみるクラック



写真 30 乾期に生じるプラヤ底のクラック

脚注 1: Black-water Draw formation と呼ばれ、第四紀の風成層である。層厚は 30m 前後で Southern High Plain のほぼ全域にわたってオガララ帯水層をカバーしている。

脚注 2: 不飽和帯の厚さは数 10 から数 100 フィートに達する。

の一例であるが、実際にはもっと規模の大きいものがある。

1990年代頃からこのようなクラックの存在を考慮した地下水の涵養機構に関する研究が数多く行われるようになった。それらの一例としてプラヤの中心部で乾燥期に形成されたクラックから洪水初期の1分間に水柱高にして270~340 mm/hr、といったように大きな浸透量を観測したとの報告もあり、クラックが地下水涵養に大きな役割を果たしていることが注目されるようになった<sup>脚注1)</sup>。ここでプラヤからの涵養は洪水初期に大きく、時間経過とともに低下して、上記の例の場合1時間後には1.25~2.25mm/hrと急減した。これはプラヤの粘性土が吸湿するに従い膨張して亀裂が塞がるためである。

プラヤの地下には過去の気候を反映した湖沼堆積物や時には風成の砂質層、あるいは古土壌が挟在し、これらが複数層準に堆積していて、プラヤの周りの環状の縁にはその規模の消長を反映した堆積物も見られる。

プラヤとその周辺には粘性土やロームに加えて乾燥地に特有な caliche 層が見られる。これは炭酸カルシウムを主剤とする蒸発の激しい乾燥地特有の堆積物で、セメントのように固いが孔隙性に富み、また溶解によって生じたチャネルも発達しているのも、より深部への水の移動に貢献している。たとえばテキサスの Southern High Plains の変動の少ないプラヤでは涵養量は年間7cm~10cmを越えるという報告がある。しかし一方70%以上のプラヤでは耕作、掘削その他の地形改変によって浸透機能が低下し、地下水涵養が阻害されたプラヤの水は殆ど蒸発によって失われているという報告もある<sup>脚注2)</sup>。

次の課題であるプラヤの成因を含む地形・地質環境に関しては、アプローチの立場によって異なるようである。前号に述べたように風の作用によるものとする説の他に構造運動によるものとする見解があるが、テキサスの高原という環境では西側のロッキー山脈から吹き降ろす風の作用を考えるのが順当であり、その形態や堆積物からみても説得性はある。

図17はプラヤと“lunette”と呼ばれる三日月状の砂丘の関係を発達段階ごとに示したもので、図にあるように、両者は一体的である。

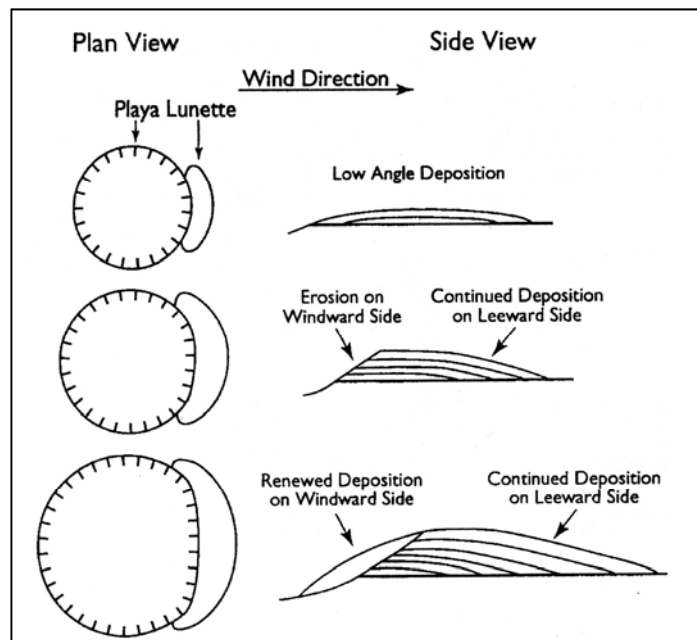


図17 プラヤとそれを給源とする風成層の発達を示す模式図

(出典：Vance T. Holliday(1996), Origin and Evolution of Texas and New Mexico, Department of Geography, University of Wisconsin)

脚注1：最大290 cm/hrといった途轍もない浸透量を示した例もある。

脚注2：Jason J. Gurdak and Cassia D.Roe(2009), Recharge Rates and Chemistry Beneath Playas of the High Plains Aquifer - A literature Review and Synthesis, U.S. Geological Survey, などのプラヤに関する調査研究は2008年にUSGSとPlaya Joint Ventureの協力によって進められた。



lunette(≒dune)<sup>脚注)</sup>は石灰質の砂質ロームあるいはローム質の砂で少量のセピオライト(海泡石)を含む。これらはプラヤベーンから風力によって運ばれたもので、<sup>14</sup>C年代から8,000～25,000年B.P.に堆積したものとされている。この間、寒暖、乾湿といった気候変動の影響を反映して地下水面も上下を繰り返し、lunetteの構造も変化してきたが完新世にいたってこれらは安定したとされている。

図18はLunette堆積物の給源と発達過程を示した模式図、写真31は耕地化されたプラヤとその前方に広がるLunette、写真32はlunetteの露頭で、傾斜は東方向である。中央に見える不整合面より上位の地層の年代は11,670±80 yrs B.P.と計測されている。

以上を総括してテキサスSouthern High Plainの模式断面を示すと図19のようになり、以下のようにまとめられる。

- ① ニューメキシコ州東部からテキサス州北西部に跨るSouthern High Plainには厚さ30mほどの第四紀風成層(Black Draw Formation)が広く覆っている。
- ② それを構成する堆積物は南西から北東方向へ砂質からシルト質へと漸移する。これらには乾燥気候を反映する風成層が卓越する部分とともに、湿潤な

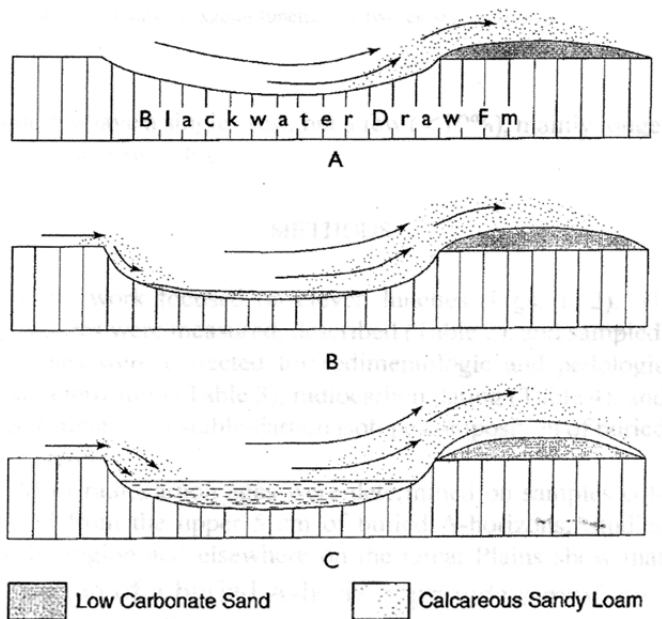


図18 Lunette堆積物の給源の模式図

AはBlack water formationから直接風力によって運搬されたケース、Bはプラヤおよびプラヤ壁から、Cは湖成堆積物およびBlack water formationから風力運搬されたもの(出典:図17に同じ)



写真31 耕地化されたプラヤと前方のlunette



写真32 lunetteの構造、右前方が風下側(出典:図17に同じ)

脚注: 三日月形の飾りが本来の意味であるが、これと形状が似ているので付けられた用語

安定した古気候環境を反映する埋没古土壌が挟在する。

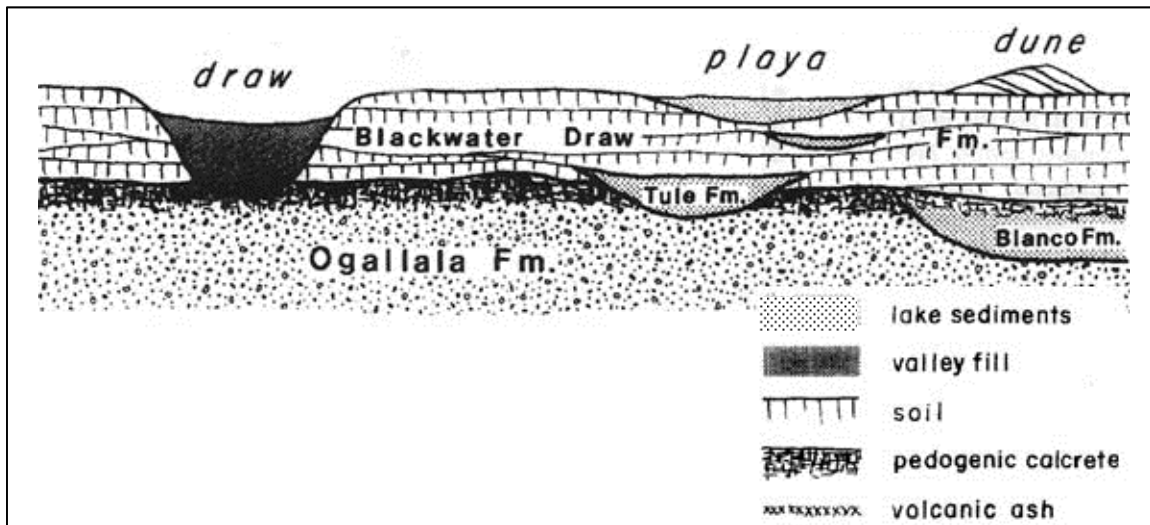


図 19 層序断面概念図 (出典: Vance T. Holliday(1990):Soils and landscape evolution of eolian plains: the Southern High plains of Texas and New Mexico Geomorphology, 3(1990)489-515)

- ③ オガララ帯水層は新生界の主な地層で中新世から鮮新世にかけて堆積し、更新世の Blackwater Draw Formation によって被覆されている。この地層中にはプラヤを伴う湖成層が挟在する。
- ④ Blackwater Draw Formation は High Plains の最上位を構成し、オガララ帯水層のキャップロックを構成する。
- ⑤ Lunettes(dune)は Blackwater Draw Formation、または湖沼堆積物の上に堆積している。

さてプラヤの成因に関しては上記のように風蝕という地表に近いところの現象とするもの以外に、この地域の基盤である二畳紀～三畳紀の蒸発岩の溶解に起因するという見解がある<sup>脚注1)</sup>。それを実証するために、テキサス州北部にある Panhandle というところにある Sevenmile Basin と称する大きな季節的に出現する湖（プラヤ）で浅層弾性波探査が実施された。なおここで取り上げたプラヤは、広さ 5.5×3.6km、深さ 14m で、そこに厚さ 20m の湖成層と風成層が第四紀の Blackwater Draw Formation と interfinger の関係で堆積している。

調査の結果、沈下は上部第三紀の Ogallala Formation の堆積時から続いていて、これがプラヤ形成の重要な要因であることが示唆された (図 20)。なおこの図中のオガララ帯水層中に認められた反射層は過去の地下水面の可能性があるとされている。

写真 33 の画像は Google Earth から抜粋したこの地域のものである。プラヤが直線状に配列している点も注目され、プラヤが風成に加えて地質要因も関係している可能性も排除できないような気がする<sup>脚注2)</sup>。

脚注 1 : その他パイピング、動物活動などを加えた説もある。

脚注 2 : 例えば Finely and Gustavson(1981)は多くのプラヤの配列が線状をなしていることから地下地質構造の影響をうけていることを注目している。最近の見解では土壌学、地形学、水文化学、気候学、生物作用の総合作用だとする見解が出されている。



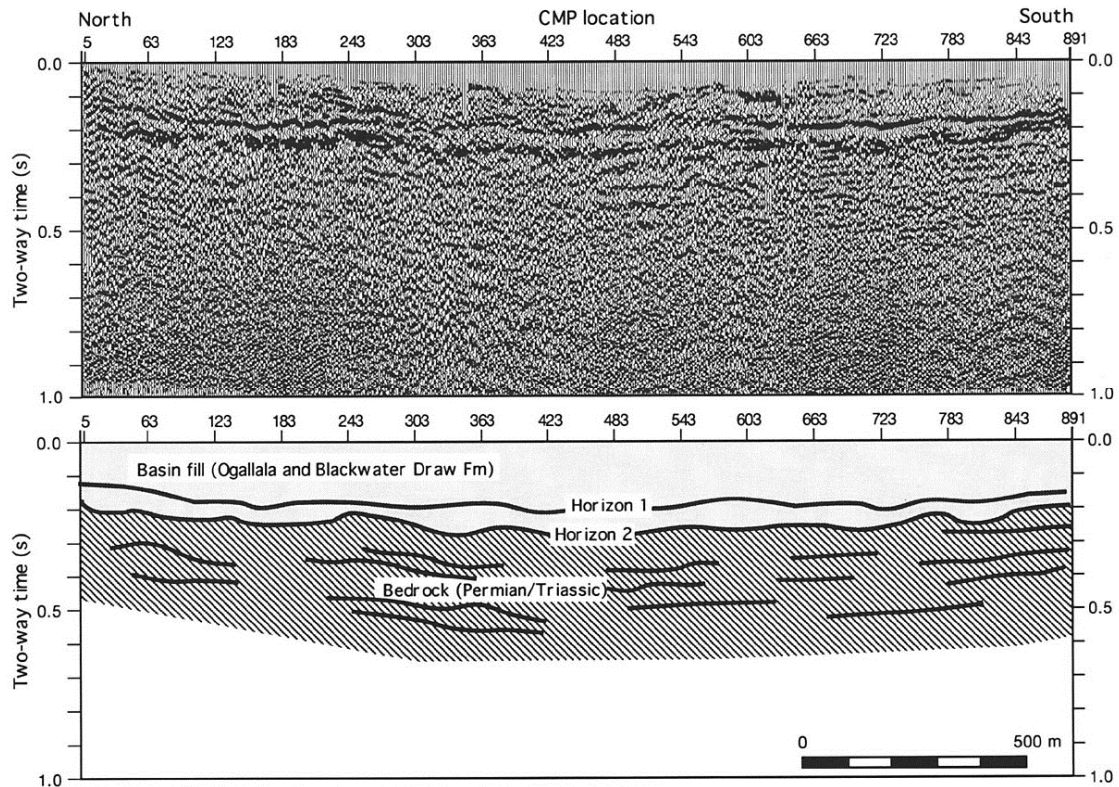


図 20 上図：反射波の生データ。下図：同解析結果

Horizon 1: 中部オガララ層の反射面、Horizon 2: オガララ層基底の反射面、  
 その他は基盤岩（二畳紀～三畳紀）の反射面  
 出典：脚注 3：Jeffrey G. Paine(1994): Subsidence beneath a playa basin  
 on the Southern High Plains, U.S.A.: Evidence from shallow seismic data.



写真 33 Seven mile basin とその周辺のプラヤの配置

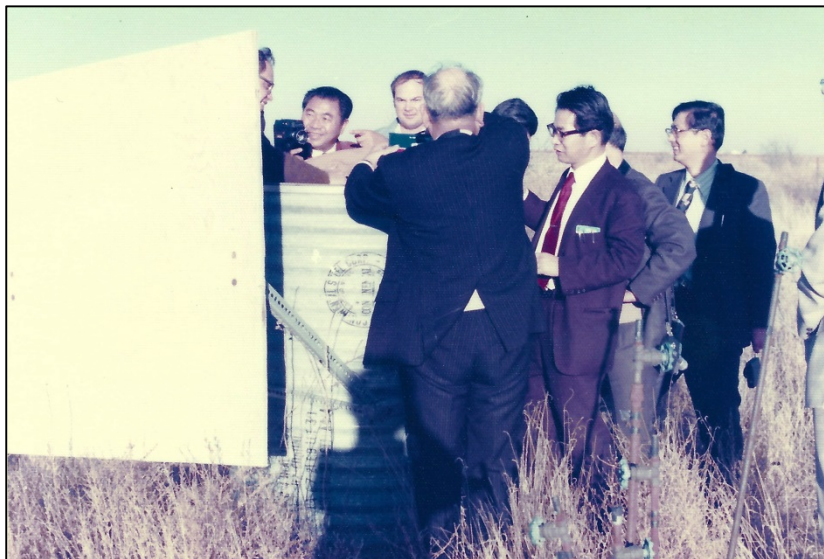
オガララ帯水層とプラヤの関係、そしてその涵養機構に関して、以下の一文が注意を喚起する。重要な指摘なので原文のまま引用しておく。また最後に今は亡き山本莊毅先生のありし日の姿を偲んで埋め草として添える。

### Dry Playas Still Function

One might think that a dry playa doesn't have much to offer. But the truth is that playas require periods of drying out for proper function.

During dry periods, cracks that are essential for aquifer recharge form in the clay bottom. When this layer dries, it develops deep cracks and fissures, which are channels for recharge. If playas never dried out, recharge to the Ogallala Aquifer would be significantly compromised.

Playa Lakes Joint Venture



埋め草：今は亡き山本莊毅先生の後ろ姿と筆者  
(テキサス州ラボックのプラヤにて)