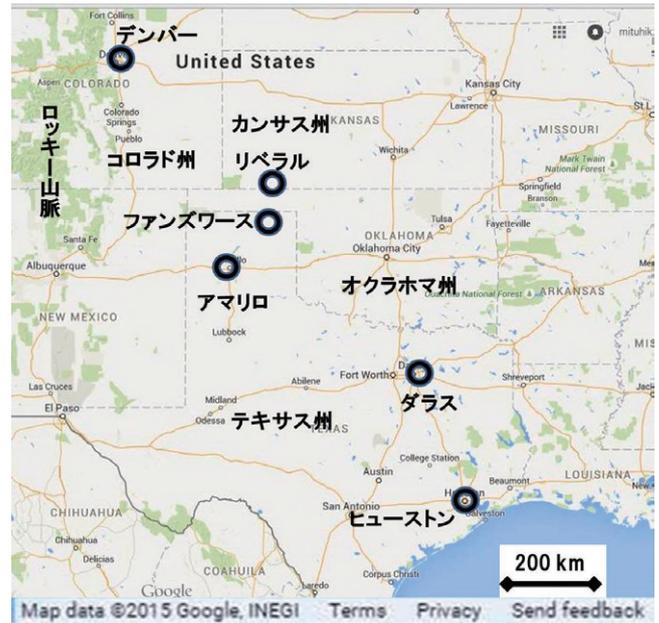


テキサス州ファンズワースでの重力計測の手記

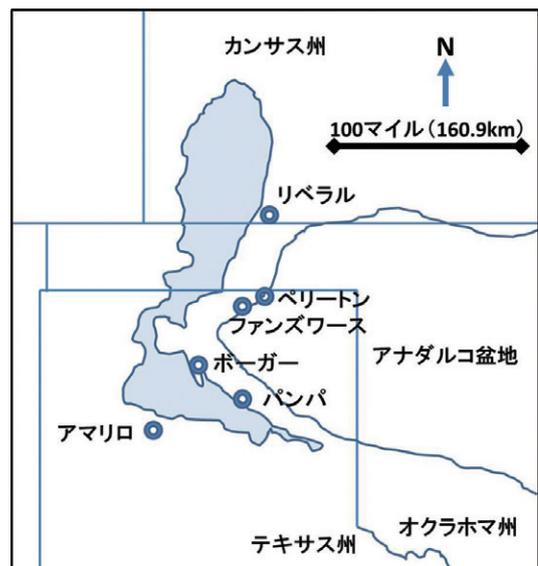
杉原光彦¹⁾

1. アマリロ

米国テキサス州北端のファンズワースに度々出張した。二酸化炭素 (CO₂) 地中貯留テストサイトでのモニタリング調査 (杉原ほか 2014; 相馬ほか, 2014) のためである。ファンズワースにはテキサス州北部の中心都市アマリロから北東に車で約 2 時間走ると到達する。日本からアマリロ空港への直行便は無い。テキサス州のヒューストンかダラス, またはコロラド州デンバーで乗継ぐ (第 1 図)。成田空港で手続きの際に航空会社の職員から最終目的地を尋ねられ, 「アマリロ」と答えると, 「それはアメリカ国内ですか?」と再確認されることが度々あった。アマリロは多くの日本人になじみのない地名かも知れないが実は意外に身近な話題が多い。アマリロを通過して西海岸に向かう旧国道ルート 66 は今なおポップカルチャーの中で親しまれている (蟹澤, 2003)。アマリロの地名をタイトルに含む 1970 年代のヒット曲「Is this the way to Amarillo?」がある。邦題は「恋のアマリロ」でリバイバルヒットもした。往年の人気プロレスラー, ジャンボ鶴田やスタンハンセンはアマリロの道場でトレーニングした (門馬, 2014)。マンガ「宇宙兄弟」ではアマリロ郊外が宇宙飛行士のサバイバル訓練の場として描かれている (小山, 2010a, b)。アマリロ空港に隣接してヘリコプター工場があり, ここで製造された「オスプレイ」を空港でも時々見かけた。しかし何と言ってもアマリロが世界的に有名なのはヘリウム資源の中心地としてである (福田・永田, 1983a, b)。アマリロ市内にはヘリウムにまつわる記念碑もある。アマリロからファンズワースにかけてのテキサス州北部, さらにはオクラホマ州西部, カンサス州西部に至るアナダルコ盆地周縁部は北アメリカ最大のガス田であるが, ヘリウム濃度が高く, 圧倒的に世界最大のヘリウム生産地となっている (第 2 図)。ヘリウムは宇宙の中では水素に次いで多く存在する元素だが, 現在の地球での存在量は少ない。ヘリウムが極めて散逸しやすいためだ。放射線のアルファ線はヘリウム原子核であり, 地球のヘリウム資源も放射性崩壊起源だ。



第 1 図 テキサス州北部および周辺の位置図。ファンズワースはテキサス州北端にある。



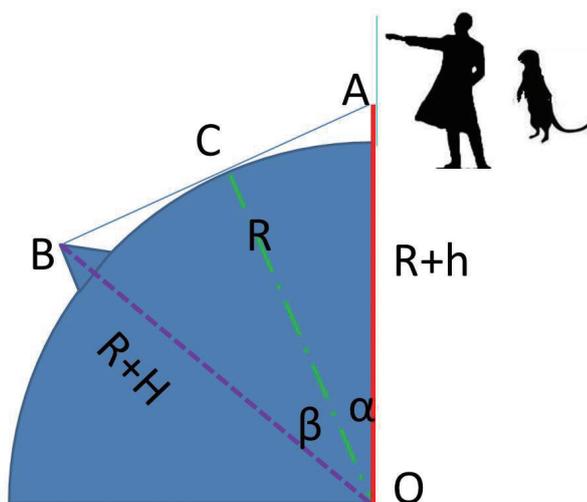
第 2 図 テキサス州北部からオクラホマ州西部, カンサス州西部にかけてのヘリウムを多く含むガス田分布域 (網点部分) とアマリロ, ファンズワースの位置関係 (福田・永田, 1983a を改変)。

1) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

キーワード: ファンズワース, テキサス, CO₂地中貯留, 超伝導重力計, 重力モニタリング, 赤い川の谷間, センターピボット式スプリンクラー, アマリロ, ヘリウム, プレーリー



第3図 ファンズワースの現場の日の出の風景.



第4図 地球表面に立つ観察者の視野の範囲と地平線に見える山の高さの関係.

ヘリウム資源形成上で必要な条件は、放射性元素を含む地層内で長年にわたって発生したヘリウムが散逸せずに蓄積されることである。油田やガス田形成にも遮蔽性が必要であるが、 CO_2 地中貯留にとっても遮蔽性が重要である。ヘリウム資源を形成できるとなるとテキサス州北部の地層の遮蔽性は折り紙つきとも言える。尤もテキサス州での CO_2 地中貯留テストサイトはヘリウムを含むガス田ではなく、その内側にある。我々の調査の主役は超伝導重力計（杉原ほか、2014）で、センサー部分が入った容器に液体ヘリウムを満たした状態で使用する。ヘリウムガスはファンズワースでの調査にも欠かせなかった。現場に入る前にアマリロでヘリウムガスポンペを調達することがあり、その意味でもアマリロ経由は便利だった。

2. 大平原プレーリーの景観

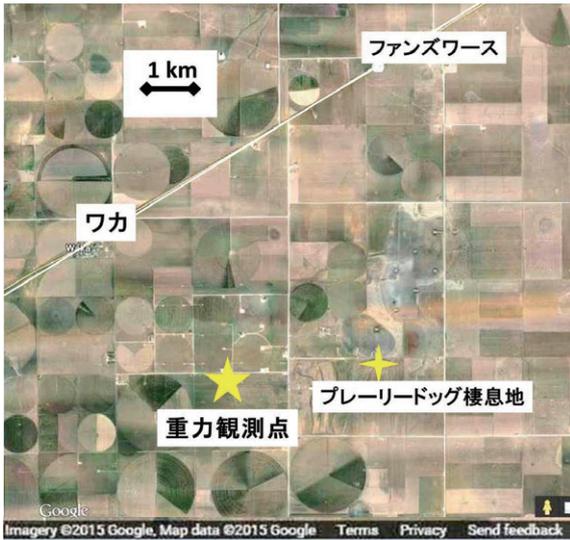
「行く末は空も一つの武蔵野に草の原より出づる月影」。新古今集を代表する歌人、藤原良経の短歌である。良経が

過ごした京都では太陽も月も山から昇り山へと沈むが、「東国の武蔵野では何と、草原から月が昇るといふのだ！」という歌意、遠い異郷での想像上の月の景色を詠んだこの歌に触発されて、「武蔵野の月」は数多く歌に詠まれ絵にも描かれた（小山、2012）。しかし、武蔵野で長く暮らした筆者にとってもファンズワースの大平原の日の出・日の入りは桁はずれの光景だった。テキサスの朝は早く、多くの人々は午前8時前には作業を始め午後4時には作業を終える。冬季には日の出前に作業を開始し日没の頃に作業終了となるので、我々も現場で日の出・日の入りを見る機会が多くあった。第3図はファンズワースの現場で見た日の出だ。地平線に見えるのは、昆虫が合体したような特異なシルエットのポンプジャックとそれに電気を供給するための電柱だ。ポンプジャックは石油を汲み上げるポンプであり油田地帯の景観を特徴づける。

ここで武蔵野とファンズワースを比べてみよう。ファンズワースと比較すべき武蔵野が武蔵野台地（角田、2015）か、武蔵野台地を含む関東地方の平地かという問題はあるが、後者のスケールで考えてみる。関東地方の地平線には多くの山々が見える（須藤、2012）のに対して、ファンズワースの地平線上には起伏を全く認識できないことが大きな違いだ。地平線の眺めについて数値的に考察してみよう。地球の半径を R 、観察者 A の目の高さを h 、地平線の突起物 B の高さを H 、地平線までの角距離を α 、突起物までの地平線の角距離を $(\alpha + \beta)$ とすると（第4図）、

$$R = (R+h) \cos \alpha \quad \text{および} \quad R = (R+H) \cos (\beta)$$

の関係式が得られる。地球半径を 6378 km、観察者の目の高さを 160 cm とすれば、自分と同じ標高にある物は水平距離 4518 m 範囲内ならば見える。アメリカの大平原はプレーリーと呼ばれ、小動物のプレーリードッグが息を吐く。彼らの視点（背伸びした状態を考慮して仮に地上 16 cm としておこう）では視野の半径は 1429 m である。



第5図 ファンズワース周辺の空中写真。灌漑システムによる耕作地が円グラフのように見える。



第6図 トウモロコシ畑を稼働中の灌漑システム、センターピボット式スプリンクラーシステム。

一方、高さ 3000 m の山が視野に入る条件は 196 km (第 4 図の BC に相当) が加算されて、人とプレーリードッグに対して各々、水平距離 200 km, 197 km までに山が位置することである。テキサス北部地方の西方には 3000 m 超級のロッキー山脈がそびえているのだが、ファンズワースからは 200 km 以上離れている (第 1 図) ので地平線の下に隠れてしまって見えないのだ。

起伏が小さい大平原は独特の灌漑システムを可能にした。テキサス北部を含む大平原地帯を上空から眺めると無数の円グラフが分布しているように見える (第 5 図)。ファンズワース周辺の地下には油田が広がるが、地上は灌漑システムに支えられた大規模農場が広がっている。この灌漑システムはセンターピボット式スプリンクラーと呼ばれる。長い給水管沿いに一定間隔でスプリンクラーが多数ぶら下がっている (第 6 図)。給水管には約 50 m 間隔で巨大なタイヤが取り付けられており、1 分ごとに断続的に自走するのだが、両隣のタイヤと一直線を保つように動くので、

給水管の一端を中心として給水管全長 (1/4 マイル = 約 400 m 長が多いが 2 倍の約 800 m 長のものもある) を半径とする円運動を行う。灌漑によって作物が生育した結果、上空から眺めると円グラフを呈する。円グラフの色彩と濃淡は植物の種類と生育状況を反映する。ファンズワース付近では円内の耕作植物の多くはトウモロコシで、一部、綿花が栽培されていた。綿花は灌漑システムの外側でも耕作されるし、小麦も円の外側で耕作される。最も灌漑水を必要とするのがトウモロコシだ。トウモロコシの収穫期が近づくと灌漑を停止するが、それまでは灌漑システムは稼働し続ける。農場主に稼働状況を質問したら 3 日で 1 周と答えたが、1 日半で 1 周している場合もあった。散水量の把握は重力観測データの評価にとって重要だったので、散水量の計測を試行して得られた成果だ。たまの大雨の際にも稼働している灌漑システムがあったが、ほとんどの灌漑システムは大雨の時には一旦停止させる。大雨が止んだ後でポンプを作動しに来た人と話す機会があったが、「トウモロコシを食べたければ、この先に丈の高さが違う畑がある、それは食用だから好きなだけ持って行っていいよ」と言われた。お礼を言ったものの間違いがあってもいけないので、実際に採って持ち帰ることはしなかった。別の日にスーパーマーケットで 5 本 1 ドルの特売品を購入してホテルの電子レンジで調理して食べた。テキサス産ではなくコロラド産だったが甘くておいしかった。

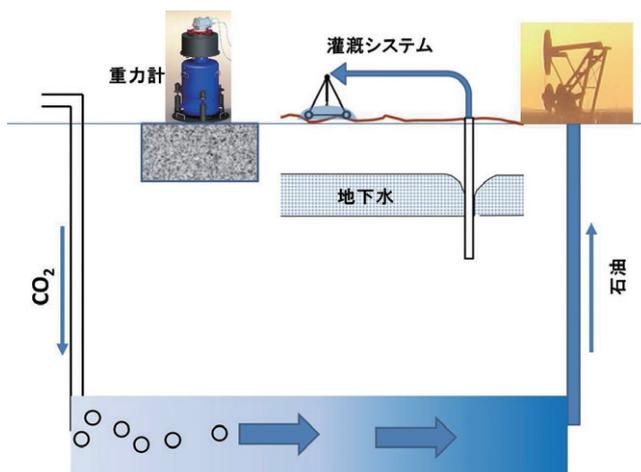
ポンプでくみ上げた地下水は灌漑システムの中心から給水管を端点まで流れる途中でスプリンクラーから散水される。スプリンクラーからの散水量が中心からの距離に比例していれば、面積当たりの散水量が一定値になるはずだが、現場で観察すると確かにそのように設定されていた。昔は地下水のくみ上げの動力はレトロな風車だったが現代の灌漑システムは全て電動だ。ファンズワース付近ではポンプジャックとセンターピボット式スプリンクラーが景観の主役とも言えるが、最近では、さらに風力発電機が急速に目立ってきた。現場の北側にはこの 1 年で風力発電機が林立した。出張中に風車の巨大な部品を運搬中の重量物積載車と行きかうことも多かった。

3. CO₂ 地中貯留の重力モニタリング

大気中の二酸化炭素 CO₂ の濃度は近年急速に増加しており、その温室効果による過度の地球温暖化が地球規模の気候変動をもたらす恐れから国際的に対策の必要性が認識されている。二酸化炭素回収・貯留技術 (CCS) は CO₂ を

大規模排出源から分離回収し、地中または海底に長期間にわたって貯留・隔離することで、気候変動を抑制しようとする技術である。CCSは、化石燃料の使用にある程度依存すると見込まれる今後の中長期的なエネルギー展望の中で、化石燃料に依存したエネルギー消費社会から低炭素社会への脱却を図るまでの過渡的な段階において、CO₂を即効的に削減可能な技術として注目されている（中尾ほか，2014）。CO₂地中貯留事業のうちモニタリングは、地下に圧入したCO₂の貯留層内での挙動を探知し監視することや、貯留層からのCO₂漏洩という潜在的なリスクに備えることを目的に実施され、CCS事業にとって不可欠である（相馬ほか，2014）。CO₂地中貯留における標準的なモニタリングは各種の弾性波探査を繰り返し実施するのであるが、我々は弾性波探査を補完し費用対効果に優れた可能性のある手法の一つとして重力モニタリングに注目し、とりわけ高感度な超伝導重力計による連続観測の適用を試行している。高感度重力連続観測では貯留層の密度という弾性波速度とは別の物性の時間変化に注目していること、繰り返し計測ではなくて連続観測であることという二つの意味で弾性波探査の補完的な手法と言える。高感度重力連続観測によって漏洩の空間分布を明確に描き出すのは難しいが、連続観測により漏洩の兆しをとらえたら弾性波探査などの手法を実施する手掛かりとして利用できる。

日本国内では2016年度から北海道苫小牧市で実証試験が始まる（中尾ほか，2014）が、苫小牧への適用に先立って我々は、重力モニタリング手法をCO₂地中貯留が行われるテキサス州ファンズワースで試行してきたのだ。アメリカではエネルギー省が主導して8つの地域でCO₂地中貯留プロジェクトが実施されている。我々は南西部地域パートナーシップ（SWP）に参加した（相馬ほか，2014）。石油生産においては、CO₂を注入することで石油増産を行う石油増進回収（EOR）の技術が1970年代から適用されている。ファンズワースでもEORとして5年間で約100万トンのCO₂を深度2400mの砂岩層に圧入する計画である。CO₂を地中に圧入することで地下の密度分布が変化する。地表で感じ、計測される重力とは、地球全体の物質からの万有引力の総和と地球回転による遠心力の合力の鉛直成分だが、地下の密度分布が変わると重力も変化する。100万トンの物質が2400mの地下に注入されると11.6マイクロガル増加することになる。これは地表での標準的な重力値980ガル（9.8 m/s²）の約1億分の1の微量だが検出可能である。実際には注入されたCO₂は地下流体中に溶け込んで流動するので、数値シミュ



第7図 CO₂を注入することで石油増産を図る石油増進回収（EOR）による地下での質量分布変化と灌漑による地下水分布変化は、いずれも地表での重力変化要因となる。

レーション計算によって変化量を見積もって（石戸ほか，2014）観測値と比較する。ファンズワースのように石油生産を行うEORでは石油を取り出す分だけ重力を減少する効果が重なるが、これ以外の重力変動要因もある（第7図）。ファンズワースでは地下水をくみ上げて畑に散水することの影響が大きい。こうした影響を差し引くことでCO₂注入の影響を評価することになる。

CO₂地中貯留現場で重力モニタリングを適用する試みとしては、ノルウェー近海のスライプナーで海底重力計により計測された実績がある（杉原，2011b）。また孔内重力計を利用する試み（杉原，2011a）も始まっている（Gerst *et al.*, 2014）。海底重力計も孔内重力計も陸上で一般に使用される可搬型スプリング式重力計を改造したもので、重力計の測定精度は数マイクロガルである。これに対して超伝導重力計はさらに千分の一のナノガルレベルという桁違いの分解能がある。センサー部分は液体ヘリウムに浸され、超伝導状態において生ずる磁気浮上力とバランスさせて重力を計測する（杉原ほか，2014）。すぐそこに絶対温度4度（マイナス269℃）の領域があるというのが何とも頼もしい。超伝導重力計による高感度連続観測をCO₂地中貯留モニタリングに適用するのは我々の試みが世界初であるが、超伝導重力計自体は1970年代末に登場し、測地学分野の観測所で使用されてきた。その後、小型化が進んで取り扱いも容易になった（杉原，2010）。我々は、小型化された第4世代の超伝導重力計を主力装置として導入して連続測定に使用し、周辺では可搬型重力計による巡回測定を併用している。これは主に重力空間分布の変化を計測することで、重力変動要因の解析の参考データにするためである。また、超伝導重力計と絶対重力計による並行測定を

適宜行うことで、超伝導重力計のドリフトや感度を評価している。

4. 過酷な計測環境

ファンズワースを含むアメリカ大平原の穀倉地帯は慢性的な旱魃^{かんぱつ}の危機にある。普及したセンターピボット式灌漑システムによる地下水利用が旱魃を助長しているという側面もある。ファンズワース周辺の年間降雨量は少ないが、降雨があると土地も道路もすぐにぬかるむ。冬季には降雪があって融雪直後はやはりひどくぬかるむ。農道の道幅は広くて日本では見かけないような大型車でさえも十分すれ違えるほどだが、ほとんどは舗装されておらず、ぬかるむと運転が危険なので広い道路の中央を十分に減速して走るか、走行を控えることもあった。

ファンズワースでは、ほぼ毎日強風が吹いている。西部劇では銃を構えて対峙した間を回転草が転がっていく印象があるが、実際に現場作業中あるいは運転中に回転草が西部劇のように、次々と転がっていくのを見た。野外で可搬型重力計による計測中に重力計が強風によって倒れかかってきたことがあって大変驚いた。1900年代初期に、隣のオクラホマ州で大規模な砂嵐によって土壌が失われたために耕作の場を失い、ルート66を西に向かって行った人々を描いたのがスタインベックのノーベル文学賞対象作「怒りの葡萄」だ(蟹澤, 2003)が、我々が経験した砂嵐も凄まじく、「怒りの葡萄」の世界を身近に感じた。超伝導重力計を搬入した日は特に強風で、砂嵐のため視界は遮られた。ドアを閉めていても換気扇の隙間などから観測小屋の中にも砂がたまっていった。強風に土砂が飛ばされたために大平原が作られたのではないか、と思いたくなるほどだった。またファンズワースは竜巻危険地帯の縁の部分にあたり(森田・森, 2014)、大型の竜巻が近くで発生したこともある(Vesilind, 2004)。観測小屋には竜巻警報器を備えていたが、幸いにして現場で警報を聞くことは無かった。

ファンズワースの日差しは強い。夏の日中の気温は45℃にもなる。観測小屋の中では超伝導重力計のために空調機が作動しているので、強い日差しの屋外から観測小屋に入ると冷気を感じてほっとする。しかし室内で作業しているとすぐに汗ばむのを感じて温度計を見ると室温が35℃を超えていたことがあった。南側の壁の近くでは室内であっても日射の影響を受けて高温になる。超伝導重力計のセンサー部分は液体ヘリウムの中にあるので温度コントロールは万全だが、制御用の電子回路などは室温にさらされ

ているので、室温が30℃を超えると重力値にも影響が現れる。振幅1マイクロガル以下の日周変化のノイズはフィルタ処理で除去されるので、重力モニタリングで注目する長期変動成分の評価に影響することはないが、念のため測定環境の改善を検討している。可搬型重力計による巡回測定や測量作業などの屋外作業をしていると日本に比べて低湿度のためか気温の数値ほどの暑さは感じないが、やはり暑い。木陰がほとんど無いファンズワースでは成長したトウモロコシ畑は貴重なオアシスだった。

雨二モマケズ風二モマケズ雪二モ夏ノ暑サ二モマケズに重力観測を試行して3回目の夏を迎えたが、ここにきて意外な危機に直面している。テキサス北部での調査が決まった時に、野外作業時に予想されるリスク要因として、竜巻などの気象要因に加えて、ガラガラヘビやピューマや毒蜘蛛タランチュラをリストアップした。マンガ「宇宙兄弟」のアマリロ郊外を描いた場面ではサソリやガラガラヘビが登場したしコヨーテへの警戒心も語られていた(小山, 2010a, b)。こうしたいかにも恐ろしげな動物に現場で出会うことは無かったのだが、思わぬ伏兵が登場した。観測を始めて間もなく観測小屋付近でウサギを見かけた。当初は我々を見ると逃げていたのだが、そのうちに視界にとどまるようになった。小屋の下から顔を出すウサギを目にして小屋の床下に棲みついたのを悟った(第8図)。出張で訪れるたびに大きさが違うウサギが現れ、世代も数も順調に増加しているようだった。超伝導重力計は高感度なので、重力計測用基台の直下に巣穴を作られたならば重力計測値に影響してしまう可能性がある。ウサギ及び巣の存在による重力の影響を見積もってみた。ウサギの身長は高々10 cm、10 cmの立方体の容積は1リットルである。巣穴は空洞として、そこに出入りするウサギの密度は水と同じくらいと思えば約1 kgの質量の増減に相当する。最も重力観測への影響が大きいのはコンクリート製重力計測基台の下面に接して巣がある場合だが、基台の厚みが1 mなので、そこで1 kgの質量の増減が生じたときの地表での重力差は6.7 ナノガルである。この程度ならば観測に影響はない。気になるのは巣穴によって基台が沈降する可能性だ。前例があった。ノルウェー近海のスライプナーでの重力モニタリングでは海底に計測用基台が設けられていたのだが、その下に深海魚が巣を作り予期せぬ沈降があった。1 cmの沈降があれば3マイクロガルの重力変化が生じる。ファンズワースでは重力計に取り付けた傾斜計がこの1年で2回、不審な動きを記録した。現場ではGPSと簡易水準測量の組み合わせで基台の標高変化を計測している。今のところ

1 mm 以上の明瞭な変化はとらえてはいないが、ウサギ達の動向は今後も引き続き注意深く見守る必要がある。

5. カンサス州とオクラホマ州

出張中の宿泊先は最寄りのテキサス州ペリートン市のホテルが第一候補となるが、ここは満室であることが多かった。また作業内容に応じて資材を調達するには小さいホームセンターしかないペリートン市では不便な場合もある。そこでファンズワースから約 100 km 離れたテキサス州内のボーガー市かパンパ市、カンサス州リベラル市（第 2 図）のホテルを利用することも多かった。一般道の制限速度は州によって異なるが時速 105 ~ 120 km なのでいずれも片道 1 時間の距離だ。リベラル市とボーガー市はファンズワースに対して北と南西に位置するが、いずれも既設の CO₂ パイプラインに組み込まれていて、両市にある工場で排出される CO₂ をファンズワースでの圧入に利用できる。これは我々も関わる SWP プロジェクトのアピールポイントの一つでもあった。リベラル市はカンサス州にあるので州境を 2 つ越えて行く。オクラホマ州とカンサス州の境にあるカンサス州側の看板には虹が描かれているように見える（第 9 図）。カンサス州が「オズの魔法使い」の舞台であることを連想した。リベラル市内には「オズの魔法使い」博物館があり、ナショナルジオグラフィック誌の竜巻特集号でもユーモラスに紹介されている（ヴェシンド、2004）。リベラル市には飛行場があってデンバーからの便があるが、運行しているのは小型プロペラ機であり、欠航も多いのでほとんど利用しなかった。

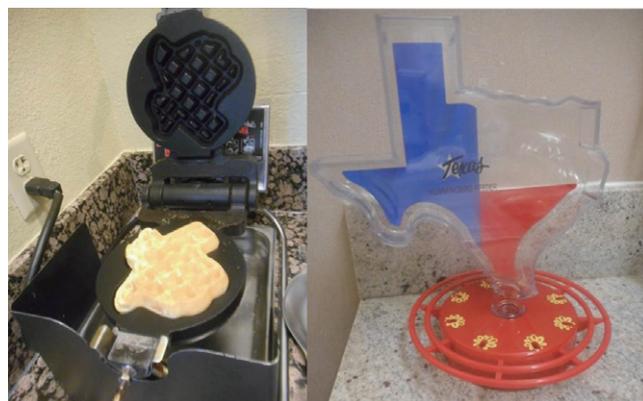
一方、オクラホマ州とテキサス州の境にあるテキサス側の看板にはテキサスの州旗「ローンスター」が描かれていて、その横のフェンスには回転草がたまっていた（第 9 図）。テキサス州は独立運動もあると言われるがひとときわ愛郷精神が強く、ローンスターの州旗や州の地図を至る所で目にする。宿泊したホテルのほぼすべての朝食用食堂にはテキサス州の形のワッフル製造器が備え付けられていた（第 10 図）。カンサス州とテキサス州の間に入り込んだオクラホマ州西部の細長い地域はパンハンドル地方と呼ばれる。パンハンドルは「フライパンの柄」のことだ。実はアマリロやファンズワースを含むテキサス州北部もパンハンドル地方と呼ばれていて、近くにはパンハンドルという名の町もある。しかし、度々の出張によってすっかりテキサス最奥になった筆者が見ても、よりパンハンドルらしい形状という点ではオクラホマ州に分があるように思った。



第 8 図 降雪のあった翌日に重力観測小屋の下から現れたウサギ。重力観測小屋の中では観測用基台上に超伝導重力計が設置してあって連続観測を行っている。小屋の外では気象観測と GPS 計測も行っている。



第 9 図 オクラホマ州との州境のテキサス州の看板（左）とカンサス州の看板（右）。



第 10 図 日常生活の中で見かけるテキサス州地図と州旗。（左）テキサス州の多くのホテルには朝食用食堂にテキサス州の形のワッフルメーカーがある。（右）テキサス州の地図の形をした小鳥用の給餌器。右上部分はオクラホマ州との州境を流れる赤川を辿ることができる。

6. 赤い川

日本への帰路、アマリロからヒューストン行の飛行機が離陸して間もなく、平原に切り込みが入り、やがて川幅が広がって赤い川筋が目立つようになる（第 11 図）。それを眺めながら思わず「赤い川の谷間よ、切り立つ岩山よ、昼なお暗い森よ」と口ずさんだ。テキサスの赤い川は上空

が開けているから昼なお暗い森ではないと思った。東京ディズニーランドの西部地域を模したエリアでBGMとして流れているこの曲を筆者が最初に記憶した場面は中学生の頃、たまたまテレビ観戦した高校バレーボール全国大会決勝戦だった。岩手・秋田両県代表の対戦後に、優勝チームの選手達が輪になってこの曲を歌ったのだ。なぜこの曲をという場違いな印象はあったが控えめに感激をこめた歌声は妙に記憶に残った。その10数年後に八幡平の岩手県側と秋田県側の地熱地帯の変質帯にそれぞれある赤川を訪れた際に「赤い川の谷間」の歌の記憶がよみがえった。八幡平の赤川はいずれも沢の趣きで、切り立つ岩山ではなかったが昼なお暗い森を流れていた。後日、地図を眺めていてアマリロ空港離陸後に見た川の名称が「赤川 (Red River)」であること、さらに「赤い川の谷間」の曲の由来の川であることも知った。筆者が記憶していた歌詞は原曲の訳詩ではなく、小林幹治作詞であった。テキサスの「赤川」は少し下るとオクラホマ州との州境となり、その先はミシシッピ川に合流する。テキサス州の州境を西から辿ると、カクカクと直線の境界が続

いたあとでうねうねとした不規則なパターンに転じる(第1図, 第2図, 第10図)。この部分は蛇行する「赤川」が州境となっている。これを逆にたどればアマリロへ至る道にも見える。「赤い川の谷間」の原曲の歌詞は去っていく男性を女性が想う内容だという。アマリロの女性を想う内容のヒット曲「Is this the way to Amarillo?」は「赤い川の谷間」の返歌ではないかと思った。

一方、日本への帰国の際にアマリロからデンバーへの飛行機に乗ると離陸して間もなく、やはり平原を刻む赤い川筋が目に入る。川に行く手にはダム湖も見える。こちらは「カナダ川 (Canadian River)」。近くにはカナディアンという名の町もある。名称の由来は諸説あるようだが、流れ下った先はこちらもミシシッピ川となってメキシコ湾に注ぐ。テキサスの「赤川」は上流域を飛行機から眺めただけで間近に見たことはなかったが、カナダ川は何度も渡った。アマリロからファンズワースへ行くルートは3通りあり、いずれの距離も大差はないが、ナビが最短ルートとして示すのはダムを渡る道だ。このダム湖はこの地域有数の観光スポットでもある。ボーガー市に宿をとってファンズワー



第11図 テキサスの赤川。(上) アマリロ付近の平地で浸食が始まって赤川の支流の源流となっている。(下) 川幅が広がって赤い色が認識できる。さらに下流では赤川はオクラホマ州との州境となる。



第12図 ペリートン近くのメサ地形。手前には石油生産用のポンプジャックが見える。

スに通うときにはボーガー市を出て間もなくカナダ川を渡る。広がった川幅いっぱい低い灌木が覆っていて川面は見えないが昼なお暗い森でもない。一方、一番東側のパンパ市を通るルートではカナダ川を越えて、しばらく走るとメサ地形が見える(第12図)。ゆるやかに上ったあとペリートン市街をぬけてファンズワースに入る。ファンズワースとペリートンはパンパやボーガーから一段高いところにある。メサ地形は浸食過程の最後の段階で地質の固い部分が半島のように残された地形である。さらに浸食が進んで孤島のような地形も分布する独特の景観は美しくもあり、展望台も設けてある。カナダ川流域では浸食の幼年期と老年期の両方を見ることができるのだ。

メサ地形を眺めるこのルートを通して間もなくメサに関して災害のニュースを聞いた。記録的豪雨でコロラド州のメサが崩れて3名行方不明になったという。大平原は長い時間をかけて浸食作用によって形成されたのだが、浸食作用は断続的に進行する。浸食時にそこに人がいれば災害となる。日本では洪水・がけ崩れの災害に加えて、地震・火山による災害もある。地質学的作用によって形成された

国土で生活していれば、日常的には無意識に国土の恵みを享受していても、地質学的作用が進行する際には災害となりうることを意識しておく必要はある。こうした地質学的事象は発生確率は低くても地質学的時間には必ず発生し、そこに人がいれば災害となる。大災害をもたらすような規模の大きい事象ほど発生確率は低いが、それだけに一層の注意が必要だ。そのような地質学的事象の発生を正確に予測することは難しく、根本的な対応策は困難であるだろうが、地質学的事象についての理解を深めて災害の影響をできるだけ緩和する努力が必要だ。

我々が研究対象としている CO₂ 地中貯留もそのような努力の一環と言える。CO₂ は地球温暖化ガスであり、温室効果によって気候変動が急速に進む恐れがあるならば、増大する CO₂ を抑制しなければならない。地質学的事象としては逆に寒冷化の可能性もありうるかもしれないが、近年の CO₂ 濃度の急激な増加がある以上、温暖化の危険性に対して無策でいるわけにはいかないと思う。

謝辞：本研究は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO₂ 挙動評価技術の開発）」の一部として実施した。チャパラルエネルギー社には現場調査を許可していただいた。米国エネルギー省が主導する SWP には現場調査について便宜を図っていただいた。農場主はじめ地元の方々のご厚意によって順調に現場作業を進めることができています。CO₂ 地中貯留研究グループの方々のご協力は調査に不可欠だった。記して謝意を表します。

文 献

- Gerst, J., Cumming, L., Miller, J., Larsen, G., Gupta, N. and Modroo, A. (2014) Using baseline monitoring data to strengthen the geological characterization of a Niagaran pinnacle reef. *Energy Procedia*, **63**, 3923-3934.
- 石戸経士・杉原光彦・西 祐司 (2014) ポストプロセスによる地球物理観測の変動予測. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 143-148.
- 小山宙也 (2010a) 宇宙兄弟. 10巻, 講談社, 東京, 248p.
- 小山宙也 (2010b) 宇宙兄弟. 11巻, 講談社, 東京, 223p.
- 小山順子 (2012) 藤原良経. 笠間書院, 東京, 117p.
- 蟹澤聰史 (2003) 文学作品の舞台・背景となった地質学 — 1 — スタインベック「怒りの葡萄」とルート 66. *地質ニュース*, no. 581, 58-70.
- 福田 理・永田松三 (1983a) ヘリウム資源問題 (その 1). *地質ニュース*, no. 348, 6-15.
- 福田 理・永田松三 (1983b) ヘリウム資源問題 (その 2). *地質ニュース*, no. 350, 32-45.
- 門馬忠雄 (2014) 全日本プロレス超人伝説. 文藝春秋, 東京, 218p.
- 森田正光・森さやか (2014) 竜巻のふしぎ. 共立出版, 東京, 192p.
- 中尾信典・當舎利行・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留技術の概要と産総研での取り組み. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 133-136.
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 137-142.
- 杉原光彦 (2010) 絶対重力計測の現場から. *地質ニュース*, no. 665, 53-62.
- 杉原光彦 (2011a) 孔内重力計測の疑似体験. *地質ニュース*, no. 679, 32-39.
- 杉原光彦 (2011b) 海底重力計見学記—海底重力計による CO₂ 地中貯留モニタリングの可能性の検討—. *地質ニュース*, no. 679, 40-46.
- 杉原光彦・名和一成・相馬宣和・石戸経士・西 祐司 (2014) テキサス州ファーンズワース CO₂ 地中貯留調査サイトでの超伝導重力計の導入. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 129-132.
- 角田清美 (2015) 武蔵野台地の河川と水環境. *駒澤地理*, **51**, 35-58.
- 須藤 茂 (2012) 産総研つくばセンターから見える百名山など. *GSJ 地質ニュース*, **1**, 69-79.
- ヴェシ lind, P. J. (2004) 取材現場から, 巨大竜巻トルネードの謎を探る. ナショナルジオグラフィック 日本語版, 2004 年 4 月号 電子版, http://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/feature/0404/f_1_spot1.shtml (2015/06/30 確認)
- Vesilind, P. J. (2004) Chasing Tornadoes. *National Geographic*, April 2004, 2-38.
- SUGIHARA Mituhiko (2015) Gravimetric fieldwork visit Farnsworth, Texas.

(受付: 2015 年 7 月 2 日)