

スウェーデン、シルヤンの炭化水素探査深層ボーリング

星野 一 男 (元所員)

Kazuo HOSHINO

1. 深層ボーリングのきっかけ

スウェーデンの炭化水素探査深層ボーリングとは 1986年に開始されたシルヤンのボーリングを指すが、この井戸は他の国の深層ボーリングが科学あるいは学術目的のために行われるのと違って当初から天然ガスの探査を目的として掘削されたものである。しかもこれが現在油ガス田地帯などから得られる通常の堆積岩由来の有機天然ガスではなく、最近いろいろな所で話題を集めている所謂“無機メタン”の探査を目指した異色の深層ボーリングである。したがってシルヤン・ボーリングの計画と経過をめぐる物語りには今世紀末の世界のエネルギーをめぐる社会的な動きが如実に反映されておりこのボーリングについての話は石油技術者や地質屋のような専門家にとってだけでなく一般の人々にも大きな関心と興味を呼び起こす話題となっていたのである。

シルヤン計画が現実動き出すようになった裏には当初は別々に動いていた2つの1つの要因が潜んでいた。その1つは社会的要因であり他は科学的要因である。

まず社会的な要因。原子力発電に対する一般の反応はここ数年間に様々の異った動き方が現われるようになってきている。これに対してスウェーデンではヨーロッパでも最もきびしい対応をすることになった。同国では国民投票によって現在使用電力の50%を占めている原子力発電の比率を徐々に減少させて2010年までに全廃することを国の政策として決定したのである。石油天然ガス石炭など化石燃料資源に乏しいスウェーデンにとってこれは非常にきびしい選択でありあと20年の間に原子力が占めていたエネルギー源の代わりになるものを見出さなければならない。同国の国営電力会社 Vattenfall の経営責任者達にとっては頭の痛い重大で緊迫した状況であった。

一方科学的要因としては丁度この頃大胆な科学的仮説が1人の天文学者によって唱えられた。

アメリカのコネル大学のゴールド教授によって提案されたこの仮説が所謂深層無機メタン説であり地球の深層部には非生物起源のメタンが大量に存在しており現在の天然ガスも今まで有機物が起源物質であると考え

られていたがこれもこのような深層ガスが地球表層部にまで上昇しガス田を形成したものあり無機のメタンであるというものである。ゴールドの仮説が正しければ天然ガス鉱床の成立には堆積岩は必要ではない。スウェーデンのように国全体が先カンブリア紀の硬質花崗岩や片麻岩で占められている国でも適当なガスの通路さえあればガス田が存在し得るかも知れないのである。

Vattenfall はゴールド説に非常な興味と関心を持った。彼等は真面目にスウェーデン国内における無機メタンガス田の可能性について考え始めたのである。その結果浮び上がってきたのがシルヤンの隕石孔跡であった。

2. シルヤン環状体の地質

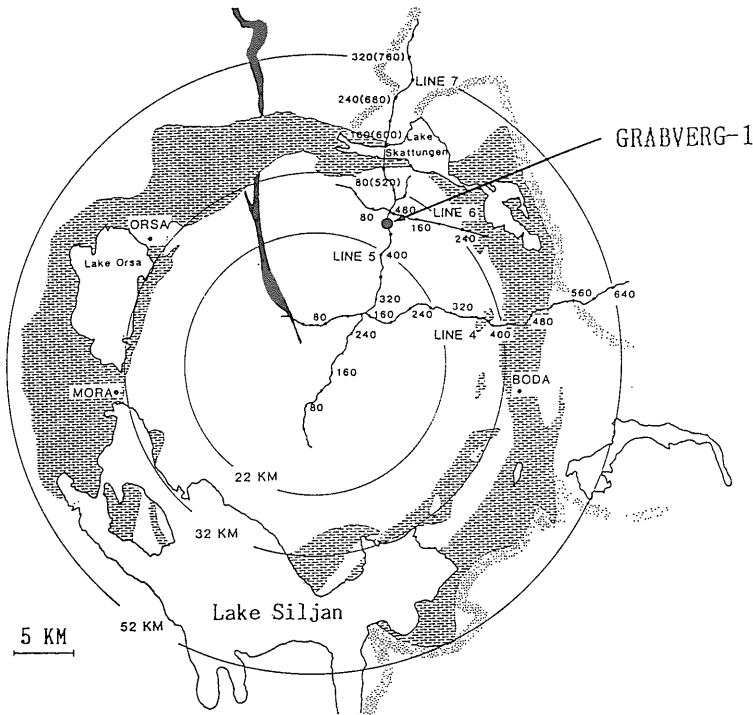
スウェーデンの首都ストックホルムから北西に約300kmのところスカンディナヴィア楕状地のほぼ中央にシルヤン (Siljan) と呼ばれる三日月形の湖がある(第1図)。この一帯がデボン紀の隕石衝突によって形成されたヨーロッパ最大の隕石孔である。隕石落下の中心は現在盛り上った地形となっておりその周囲には直径約40kmの環状凹地溝が形成されている。シルヤン湖はその凹地溝の一部を埋めた環状湖でありこの環状構造はシルヤン環状体 (Siljan Ring) と呼ばれている。この一帯は針葉樹林におおわれたなだらかな丘陵と沢山の小さな湖沼が交互に散在する高原の雰囲気の良いリゾート保養地でありシルヤン湖をはじめとする8つの湖に囲まれた森林と村落の風景はあたかも北欧のお伽話の世界が今も現実に生きているかのような世界でもある。

この附近を構成する岩石は先カンブリア紀原生代の片麻岩変成花崗岩類であり環状体そのものはスウェーデンでダーラ (Dala) と呼ばれている16-17億年前の花崗岩類である。有名なシルヤンの環状構造を形成する原因となった隕石の衝突は溶融岩石の同位体測定により約3億6千万年前と測定されている。第2図が隕石衝突によって作られた環状構造の平面概要図であり第3図が北部の断面図である。

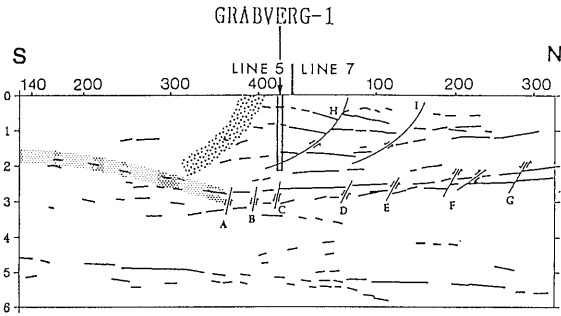
現在シルヤン湖などの8つの外周湖が形成する環状湖の直径は約40kmであるが衝突時の凹状構造は約50



第1図 シルヤン・ボーリング位置図. 黒丸はヨーロッパの超深度ボーリング坑井.



第2図 シルヤン環状体の構造, 地震探査測線およびボーリング, Grabberg 1号井の位置. 横点線模様は堆積岩分布域, 黒色部分は粗粒玄武岩脈.



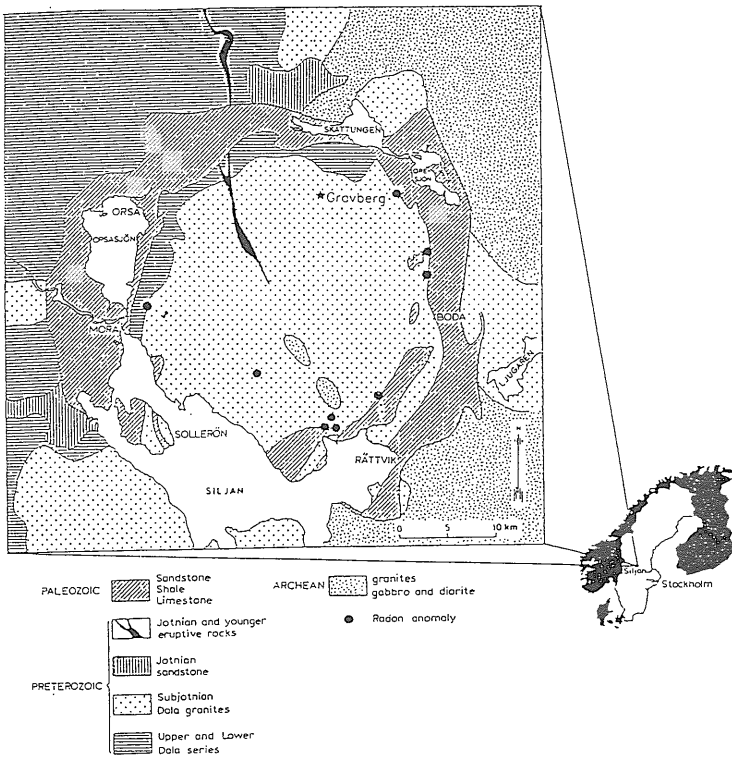
第3図 シルヤン環状体の南北断面構造図 (Juhlin and Pederson 1987)

km と考えられている。これが第2図に描かれている3つの円のうちの最大円周である。

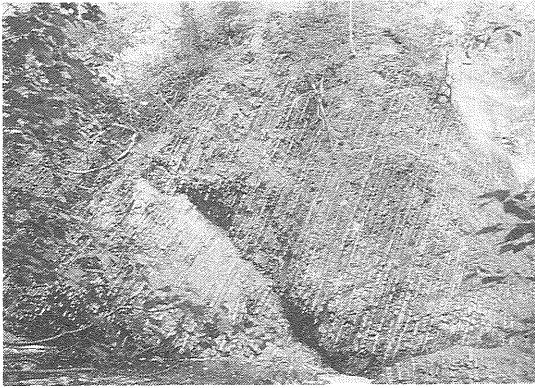
シルヤン隕石孔の最大の特徴でもあり 興味を惹かれる事は凹状構造の内部が隆起し 古期岩類が頭を出していることである。第2図の3つの円のうち 最小円周の内側がその古期岩類隆起部分である。 その間にはシルルー・オールドビス紀の堆積岩が非常な急傾斜の層理面を呈した形で分布している。このような地質構造の解釈

として考えられているのは 隕石の衝突によって直下の岩石は著しい衝撃と高熱のために破碎・溶融されたために広範囲に亘って脆弱化して流動しやすくなり 更に密度が減少した その結果 周辺の比較的高密度の岩石が隕石孔の下に潜り込んで環状構造中央部を持ち上げ 隆起させるに至った という経過である。隕石孔全体に堆積した古生代堆積層のうち 中央部分は隆起の結果削奪され 縁辺部分のみが周縁に残っている。第2図の横点線模様が現在の堆積岩分布域を示している。堆積岩は砂岩 頁岩 および石灰岩であり 上述の隆起運動のために地層はほとんど直立しており ある場所では逆転している。第4図は Jeffrey and Kaplan (1988) による周辺の地質図であり 第5図に環状体東部における古生層の露頭写真を示す。

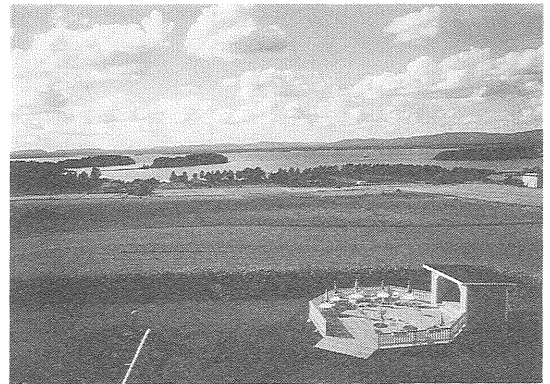
このような地質状況からシルヤン環状体の地下では当初の緻密な岩石が破壊されていて 地下ガスが移動しやすい状態になっているのではないかと つまり ゴールド説で予想される深層ガスがあるとすれば シルヤン環状体こそ最も可能性の大きいところではないかという考えが出て来たのである。



第4図 シルヤン環状体の地質図 (Jeffrey and Kaplan 1988)



第5図 シルヤン環状体縁辺の堆積岩 シルルーオールドビス系



第6図 シルヤン湖

3. 事前調査

このような経過で スウェーデンではシルヤンと深層ガスに対する関心が徐々に高まってきた。そして シルヤン環状体についての地質 物探調査の計画が進められると共に “シルヤン・ガス田” の探鉱を行うために新会社が設立された。

新会社はその名もズバリ ダラ深層ガス探査ボーリング会社 (Dala Djuggas Provboringar, DDP) と名づけられた。探査資金の2800万ドル(約40億円)のうち約半分は Vattenfall 電力会社が負担したと言われる。この他に スウェーデン政府が450万ドル アメリカ・ガス研究所(GRI)が400万ドルを負担し また一般の民間投資家も出費している。

事前調査では 空中磁力 重力 地震など通常の地下地質調査で行われるすべての物理探査 および表層ボーリングを含む地質・地化学調査が実施されている。

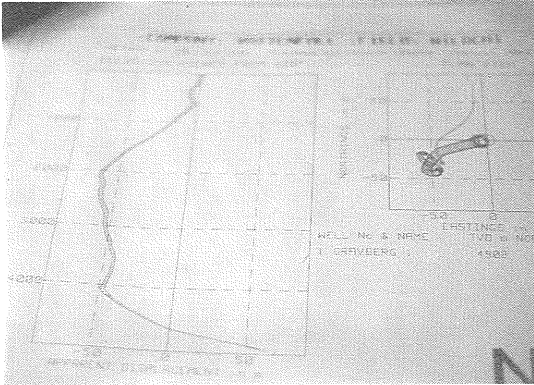
重力調査の結果では環状体は全般に負のブーゲー異常が大きく 特に北部ではそれが顕著であることがわかりこの地区の地下岩盤では割れ目の発達などによる岩盤劣化が存在していると予想された。

また磁力調査の結果では環状体の花崗岩は周辺に比較して磁性が強いことがわかった。更に リモートセンシングとして実施された衛星映像の解析によって見出された北北西-南南東のリニアメントが磁力図でも検出されたことにより このリニアメントがかなりの深部にまで発達していると判断された。

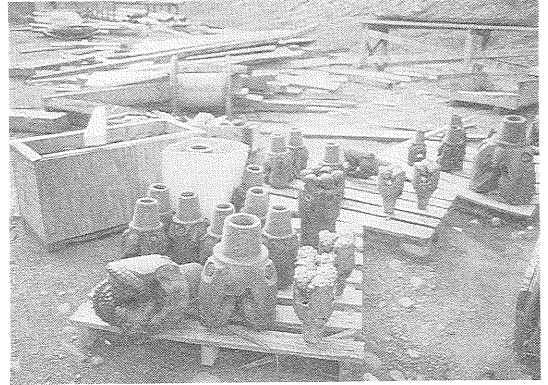
これらの物理探査によって 環状体の北東部が重要な対象地域として認められるように至り この地域を中心に地震探査が第2図に示される測線に沿って行われた。

その結果として 測線5および7に沿った南北断面の構造解析図を Juhlin and Pedersen (1987) により第3図

に示す。第3図の南北断面図を見ると No.5 測線の基点400 附近を境に深部断面の様相が大きく変化する。北側では0.5 1.0 1.8 および2.5秒附近に顕著な反射層が見られる。これが 現地第1 第2 第3 第4 (反射) 層と呼ばれているものである。一方 南側ではこれらの反射層がその後の地質変動のために消滅している状態が反映されていると見られる。すなわちこの部分は隕石の衝突によって作られたクレーターの内部であり 2秒から3秒の深さにクレーターの“底盤”状のものが見える。底盤は上方に湾曲しており 隕石衝突の衝撃のために反射層が破壊されてその部分の密度が軽くなるために周辺から密度のより大きな岩層がクレーター内部の深層部に流れ込み クレーター中央部を押し上げている。このクレーター中央部の外縁は第2図の直径ほぼ22kmの最小円に一致し これは衝突の中心部分と見ることができる。第3図で示されるHおよびIは中央クレーター外側の環状断層に相当するものであり それぞれ第2図に示される直径32 52kmの円周に沿って分布する。H円周縁とI円周縁の間が先に述べたシルルーオールドビス系の主要分布域である(第2図お



第7図 Gravberg 1号井



よび第4図)。このように地震探査の結果は地下構造についての従来の考えをほぼ裏付けている。

シルル-オールドビス紀の堆積岩は粘板岩や石灰岩より成り、現在はこの狭い環状溝に閉じ込められていて地層面はほぼ垂直である(第5図)。中央クレターの部分では隕石衝突前に当然ダーラ花崗岩の上にシルル-オールドビス系が分布していた筈であるが、衝突時の衝撃およびその後の隆起による剝奪のために現在は欠如している。

以上が先行した地球物理的調査によって判明した地下構造である。これと同時にクレター内の数ヶ所で500-700mのボーリングが行われ、地質・地化学的データに基づき、深層ガス探査のボーリング個所の選定が行われた。その結果(1)クレターの中心部(2)Gravberg 村落内で震探測線 No.5 と No.6 の交叉点附近の2ヶ所が最終候補として残ったが、以上の物探調査結果を重要視して、負の重力異常が明瞭で地下反射層が顕著にとらえられている後者が第1坑のサイトとして選定されたのである。現地で Gravberg 1号井と呼ばれ、一般にはシルヤン・ボーリングと呼ばれている坑井がこれである。その位置は第2図および第4図に示される。

ダラ深層ガス探査ボーリング会社は Gravberg 1号井の掘削を進めるに当たって出資者や協力者に対して、ボーリングの目標は

1. 天然ガスの無機性起源の検証
2. 商業規模のガス田(推定8000億 m^3)の発見であると説明している。

ボーリングの掘削深度は地震探査の第3反射層までとして5,000mの目標を設定した。

4. Gravberg 1号井の掘削と調査結果

Gravberg 1号井(口絵8)はこのような科学的な仮説を実証する商業的ボーリングとしてスウェーデンのみならず世界中の関心と期待を集めて1986年7月2日に開坑した。最初の3ヶ月は非常に順調でトラブルもなく10月8日に深度3931mに達した。そして坑井地質孔内検層およびカッティングスと還流水の化学分析などの中間的検討を行った結果、予期された程のガス量の存在を積極的に支持するデータはまだ得られていないこと、しかしさらに深部の第4反射層は有望と思われるということ、理由から更に第4反射層の予想深度7500mまでの掘削を行うことになった。

この頃から大深度掘削に切り勝ちないろいろなトラブルが発生するようになった。3931mを越えた所で掘削に時間がかかるようになり、4167mに達するまでに6週間以上を要している。また、深度5683mで再度トラブルが生じているが、1987年2月21日について深度6000mに到達した。

しかし、その後掘削は非常に難航するようになる。

その原因として Vattenfall の技術者は2つの理由を挙げている。1つは深部で増大する地圧とくに造構応力から由来する圧縮性偏圧による孔井の孔曲がりであり、その2は深部に至って多くなった割れ目による逸泥である。このような現象は掘削前に予想していた地下の地質構造特性を裏付けるものとして Gold や関係者は深層ガスの貯留層が近づいてきた証拠と考えたようである。

記録によれば、6047mで掘削用泥水が大量に逸出する逸泥現象があり、ここにガスの貯留に適した空隙や割れ目があると思われた。更に深度6081mに達した時に掘削管が抑留されて動かなくなってしまった。掘削管の引上



第8図 Gravberg 1号井の現場には見学者・観光客のための説明コーナーがある。

げ処理を重ねている間に4700m附近の孔曲がりがひどくなってきたために7月に4650mから技掘りを行って掘削を進めたが孔曲がりの増大のために5470mで再度技掘りを行っている。

この年の9月には Gravberg 1号井の掘削現場からそれ程遠からぬ地 シルヤン湖の辺りの景勝の勝れたモラの町で深部掘削の国際会議が予定されていた。会議の正式名称は「ボーリングによる大陸地殻の観測に関する国際シンポジウム (3rd International Symposium on Observation of the Continental Crust through Drilling)」で Vattenfall スウェーデン地質調査所 Chalmers 工科大学の共催である。ちなみに この種の国際会議の第1回は1984年に米国で 第2回は1985年10月に西独で開かれている。スウェーデンに続く第4回は1988年8月にソ連で開かれた International Seminar on Super Deep Continental Drilling and Deep Geophysical Research である。

ボーリング関係者はこの国際会議に合わせて Gravberg 1号井の掘削を進めていた。順調に行けば会議のころ 関係者が有望ゾーンと期待していた7000m以深の深さに達することが出来たかも知れない。

しかし 以上のような“不本意な”経過を迎えることになってしまい それでも9月には6000mを再び突破し 上旬 会議の直前には6337mに到達してこの深度で一応掘削を休止した。

シルヤン・ボーリングをめぐる以上のような背景と経過の下にスウェーデンのみならず全世界にセンセーショナルな話題が振りまかれたが 一方において専門の研究者はボーリングから得られたコアー カッティングス ガス 地層水 などの試料について冷静な分析・測定を行っており その結果は関係する学会誌に公表されつつある。上述のモラで行われた国際会議には欧米をはじめ

めとする20ヶ国から学者 研究者 236人が参加し 4日間に亘って講演発表が行われたが 深層無機ガス仮説と Gravberg 1号井に関する多くの発表があり 賛否双方の側から熱の籠った討論が行われたと聞いている。会議の最終日には Gravberg 1号井の見学と シルヤン・クレーターの地質巡検が行われている。

これらの公表論文から Gravberg 1号井の調査の結果をみてみよう。

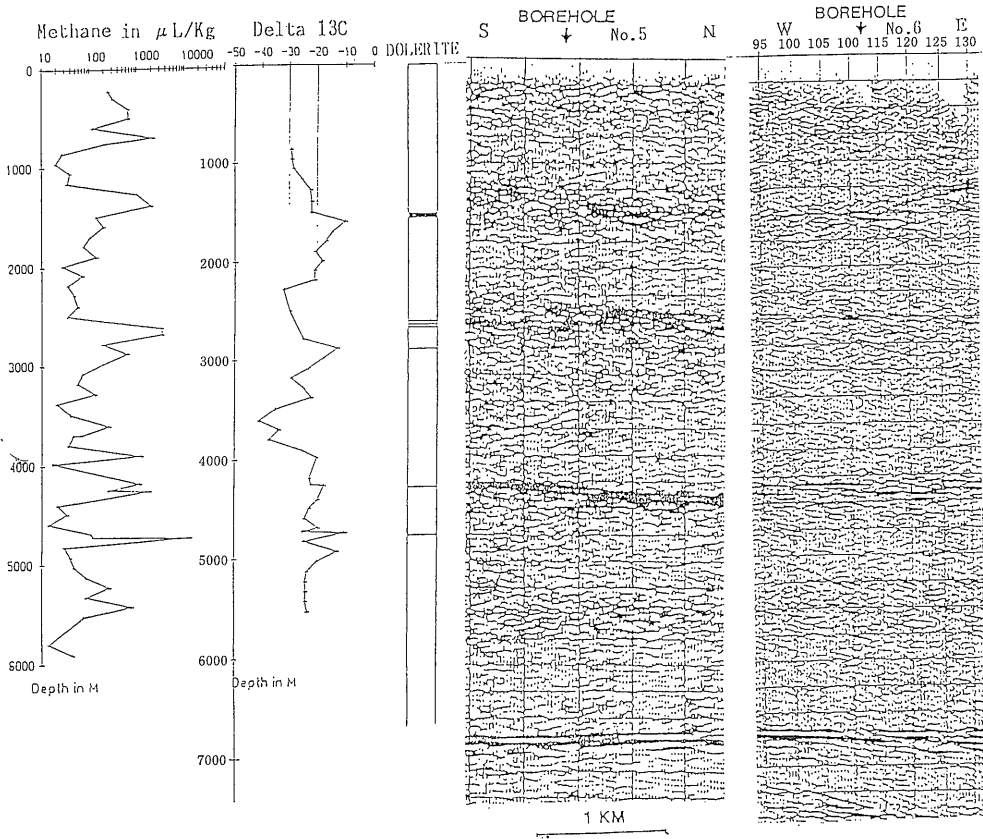
環状体の地下構造や熱的構造については Juhlin and Pedersen (1987) や Komor 他 (1988) の報告がすでに公表され 隕石衝突構造について多くの興味ある研究成果が明らかにされている。

コアー カッティングスの地化学分析については このボーリングの掘削目的に最も関連するものだけに そのサンプルは各国の研究者に分支され 通常のマツドガス分析の他に各種の専門的測定 研究が行われ モラの国際会議にも速報的報告が行われている。

以下に デンマーク地質調査所の Troeles Laier がボーリング直後に行った報告 (Troeles Laier 1987) からその要点を抜粋してみる。

第10図はボーリング地点を通る地震探査の南北と東西断面と Laier の地化学分析結果との対応図である。

Laier は溶存ガスとヘッド・スペースガスについてメタン エタン エチレンの分析を行っているが ここではカッティングスの溶存ガスのメタン量とその炭素同位体組成の深度分布に関するデータを採録した。中央の柱状図は粗粒玄武岩層の分布である。粗粒玄武岩はほぼ1500m付近 2700-3000m間 および4400mと4800m付近に現われている。これらが第1 第2 第3の強反射層の実態であることがボーリングの結果明らかとなった。この結果に従って メタン量および炭素同位体組成のピークの深度と 粗粒玄武岩の出現深度に地震の



第9図 Gravberg 1号井のメタン濃度と炭素同位体および地震断面 (Laier 1987および Juhlin and Pedersen 1987より編集) sl=スライド

反射層は約7000mの深度で出現することが読み取れる。

容存メタン量は10000から10 ($\mu\text{L}/\text{kg}$) の範囲に分布しているが粗粒玄武岩の分布するところで高い量が現われる傾向が明らかである。粗粒玄武岩層附近のメタンが周辺よりも多い傾向はヘッドスペースガスの分析値にも現われておりこれらの所ではメタンが0.1%に近い数値が計測されている。一方PDBスケールによる炭素同位体組成 $\delta^{13}\text{C}$ は一般には-10から-40の範囲に分布しているがここでも重い同位体組成値は粗粒玄武岩層附近に集中していることがわかる。

マイナス15以上のメタンはこれまで東太平洋海膨の熱水など無機天然ガス中のみ発見されておりこれらの重いメタンは無機起源である可能性が大きい。Laier (1987) は今回ボーリング孔で採取された炭化水素ガスは2種類のものが含まれていると考えている。一つは重い同位体組成を持っている無機起源ガスでありこれは以上の産出状況から粗粒玄武岩層より放出されたガスでその98%はメタンである。第2は炭素同位体組成が-20から-40のガスで高濃度のエタン(オレフィン)とプロ

パンを含んでいる。これは粗粒玄武岩層を含まない部分の花崗岩から由来したものでダーナ花崗岩に多い磁鉄鉱を触媒としてFischer-Tropsch反応によって生成されたと考えている。最近にGravberg No.1の地化学分析結果を発表したJeffrey and Kaplan (1988) もほぼ同様の結論を述べている。

これらの報告を要約すれば極めて微量ではあるがGravberg 1号井で採取されたメタンのうち粗粒玄武岩に由来するものは無機起源メタンであると思われる。

基盤岩のインクルージョン・ガスを研究したKomor (1988) よれば衝突時には 10^{21} から 10^{22} ジュールのエネルギーが発生しその直下(ほぼ2kmの深さ)では250-350°Cにまで温度が上がったと推定される。ボーリング時の坑内測定によればGravberg坑の地温勾配は $17^\circ/\text{km}$ である。

環状体の現在の地形的大きさは約40kmであるが衝突時の直径は約50kmであったと推定されている。これは隕石衝突による環状構造としてはヨーロッパ最大である。衝突時に熔融した岩石の同位体年代測定によ

反射層を合わせてみた。この傾向から推定すると第4ば衝突が起ったのは約3億6千年前である。

5. 現 況

DDP は1987年9月に深度6637mで掘削を中断した後それまで得られた試料による研究を行うかわらいろいろな坑井調査を続行していた。そして彼等が期待する7000m以深の“有望ゾーン”への掘削への準備を進めた。

その結果追加資金のメドもついて1988年更に再び掘削を開始した。第2次の資金は440万ドル(約6億円)でその内50%をVattenfall残り50%を企業などからの投資によって手当てしたと言われる。筆者が1988年9月初めにシルヤンの現地に関係者から聞いた話によれば再開後の状況は次のようである。

7月に坑内温度測定を行った。8月15日に掘削を開始したが8月下旬にビットつきの掘管を孔底に落とし回収不能となったため深度5450mのところから3本目の技掘りを行い掘進中である。訪問時の9月5日の深度は5720mということであった。孔曲がりの傾向は依然続いておりその深度で約25°の傾斜がついていると話していた。

しかし掘削作用は引続き続けられており最近のニュースによれば1989年3月上旬には6945mに到達したということである。

6. エピローグ

シルヤン・ボーリングほど社会的な話題を集めた科学ボーリングは最近無かったであろう。科学的にも非常に意義の大きいボーリングであった。スカンディナヴィア楯状地の古期花崗岩中を7000メートルも掘削するというので地質学者の好奇心を惹き起こし隕石孔の地下深部に隠れている未知のガス田の探査ということで一般人の昂奮を捲き起こしたのである。

シルヤン計画そのものはまだ終わっていない。当事者はボーリングの終了をまだ宣言していない。しかし1986-67年における熱狂的雰囲気は一変していまは

シルヤンの現地でもスウェーデンの国内でも人々は冷静にボーリング槽を眺めているようである。ボーリング中断の翌年に開かれたソ連の超深部探査国際セミナーには筆者も出席したが無機ガスやシルヤンについて話す人はむしろ少数であった。

いまこそシルヤン・ボーリングの成果を科学的に検討するのに非常に良い時期であろう。この深層ボーリング計画を契機として行われた地球物理調査と地化学調査の資料は大変に貴重なものである。

スウェーデンは世界に魁けて石油の地下空洞内貯蔵という新奇な発想を実行しこれを成功させた。地球深部の無機メタン仮説に対する実証ボーリングはこれに比較しても非常に冒険的な科学プロジェクトである。私は幸運にも石油地下貯蔵の場合にも今回の深層無機ガスの場合にも直接に関係者と会い実際に現場に立つことができた。科学における論理と証拠技術における発想と実証をめぐって私にはまだ解答は出せないがスウェーデン人の冒険を重んずる精神はことによったら科学技術にとって最も基本的な必要条件の一つなのかも知れないと感ずる。

いずれにしてもシリヤン・ボーリングはエネルギーの世紀20世紀の掉尾を飾るのに相応しい象徴的記念碑といってよいのではないだろうか。あるいは次の世紀のエネルギー状況を予告する風見鶏なのかも知れない。

文 献

- 星野一男 1989; 最近の深層ボーリングと深部炭化水素調査の動向 石油技術協会誌 54巻 127-137頁
- Juhlin, C., and Pedersen L. B., 1987: Reflection seismic investigations of the Siljan impact structure, Sweden, Jour, Geophysical Research v. 92 p.14113-14122.
- Komor S. C., Valley J. W. and Brown P. E., 1988: Fluid inclusion evidence for impact heating at the Siljan Ring, Sweden, Geology v. 16 p.711-715.
- Laier T., 1987; Light hydrocarbon analyses on cuttings from Gravberg-1 well, Swedish Deep Gas Project internal Report No.10. 1987.
- Jeffrey A. W. A. and Kaplan I. R., 1988; Hydrocarbons and inorganic gases in the Gravberg-1 well Siljan Ring Sweden, Chemical Geology v.71 p.237-255.