

水 井 戸 検 層 の 研 究

(密度検層機器およびキャリパ検層について)

小 鯛 桂 一

1. は じ め に

石油工業で発達してきた密度検層の理論と実際の相違点 および各種密度検層機の特長について検討し 筆者が水井戸用として試作したインスタントの密度検層機の位置を確認した。また 密度検層の精度的な向上を計る上で キャリパ検層の併用が必要であるので これの性能について調査し この調査資料中から キャリパ検層から知られた 坑径変動と密度および単極電気抵抗の検層値との間の相互関係について検討を加えた。

2. 密 度 検 層 機 器 に つ い て

2-1. 密度検層の発達およびその理論と実際について

検層技術を歴史的にみると ほぼ19世紀の終りから20世紀の初頭にかけてそれらしきもの(温度検層)が実施されだしたらしい。ワイヤライン検層(電気)が実施されだしたのは 1930年代からである。自然ガンマ検層もこれに数年遅れて 定性的および補助的手法として使用されだしたようである。しかし ガンマ・ガンマ法による検層——別名 密度検層が実施されだしたのはこれよりもなお10数年も後で F. HALLENBACH (1947) がこの装置を暗示してからであるといわれている。

密度検層の理論(量子理論)は Klein-Nishina 方程式(散乱と吸収)と Boltzman 方程式(輸送)を基礎にしている。DJADKIN は この輸送方程式とルジャンドル多項式を用いて半数値的に解くモーメント法により 1回散乱の拡散式を導びき 実際的な理解を一層高めた。

これは その後 実際に行なう密度検層を 原理的に確認する研究に対して大いに役立った。

このように 科学的に物理的範囲の問題を序々に明らかにしていったこと他に 検層機器類の進歩 および各種地層の測定データの集積があいまって 急激な発展をみるに至った(米国における間隙率測定を目的とする各種検層のうち 密度検層の占める割合は 1960年代初期に一般で使用されだして以来 急激にその使用領分を増大しはじめ 現在では約65%を占め マイクロ検層に代って首位の座を得るに至っている)。

しかしながら 性質を異にする各種の坑井条件をすべて網羅した定量的解析方法が確立しているわけではない。理論式中の未知数を決定する上で 経験的データが果す役割が重要であることはいうまでもないが DJADKIN の

拡散理論式と実際の係数データとを比較した場合に 相関曲線において後者は前者よりも常に拡散度が大きく傾斜度は小さくなる。この偏差の理由は 1回散乱と多重散乱の相違であるが 多重散乱が理論として考えにくいことに問題がある。したがって 外部影響である各種の坑井パラメータ(大坑径とその変化 鉄ケーシングの厚さ 泥壁の状態 地層内壁とケーシング外壁間のクリアランス およびその間の充添物による影響など)の確認には 経験的なデータの集積が必要であり 現在では各部門においてこのような方向で夫々の目的に合った研究が進められている段階であるといえる。

2-2. 小規模検層(水井戸検層)への応用について

石油開発技術として密度検層の理論と実際の比較研究が盛んであった1956年頃 地下水理学に関する地球物理的手法の記述が P. H. JONES と H. E. SKIBIZKE によりなされた。しかし その後の物理検層自体の複雑化に加えて 石油工業で用いられた地球物理的な新しい手法が これよりも小規模な地下水開発に波及し応用されるまでには なお多くの歳月を要するために 現在では古いものになってしまっている。最近 W. SCOTT KEYS と L. M. MACCARY(1971)により発表された水資源調査のための検層技術に関する記述は 概略的ではあるが 新たな指針を与えてくれる意味で有用であった。このような欧米の技術水準にわが国が到達するまでには さらにある歳月を要するであろう。しかし わが国の多くの地下水賦存帯を欧米のそれと また石油・ガスのそれと比較して 地質的および物理的に異なることも事実である。今後は これまでに得られている検層技術を基礎にして わが国の地下水開発に役立つ 経験的な独自のデータを集積し より確実な定量的算定が行なえるよう研究されていくべきものと考えられる。

2-3. 各種密度検層用プローブのデザイン(第1図参照)

密度検層プローブのデザインには 大別して次の2種がある。1つは 坑井中央部に垂下し測定する同軸型(第1図の1と2)であり 2つに アームまたは弓状スプリングなどを用いて これと反対側の側面(厳密に言えば側線)を裸またはケーシング坑内壁に圧着させる圧着型である。

一般に プローブの精度は 線源・検出部間の距離を大きくするほど好結果をもたらすことはよく周知の通りであるが 地層方向への線源部の照射と検出部への入射に対して指向角を与えることは たとえ線源・検出部間の距離が幾らか小さくても 精度的により以上の効果のあることがわかっているの で 同軸型または圧着型を問わず 現在使用されている密度検層プローブの大部分は指向角を与えてある。この指向角を与える窓の形は線源・検出部間の距離 プローブ外径 坑中でのプローブの昇降速度 測定対象の地質条件 そして線源強度などを考慮して各々最適に選ばれる。第1図の1は 大線源・小蛍光体 (200 mCi ≤ の線源 1/2"φ×1/2" の蛍光体) である。計数感度は 蛍光体の体積と比例関係にあるので 蛍光体を小型化したための不利を大線源でカバーし その上 後方散乱によるガンマ線の計数を極力おさえる意味で 遮へい体の厚みを大きくし その分を置換させている。このような背景のもとに 検出しうる最小窓間隔 (実際は 1/2" 前後にしている) を開孔し 線源から照射され 地層中にできる1回散乱の幾何学的な環体から入射するガンマ線だけを おもに計数できるように設計している。しかし 線源 200 mCi ≤ というのは 強度的にかなり大きく わが国の管理規則上 届出手続きのみの範囲を超えるものであり また 水井戸などの小規模検層層での実施面で 軽便性や安全管理上の難点があるといえよう。

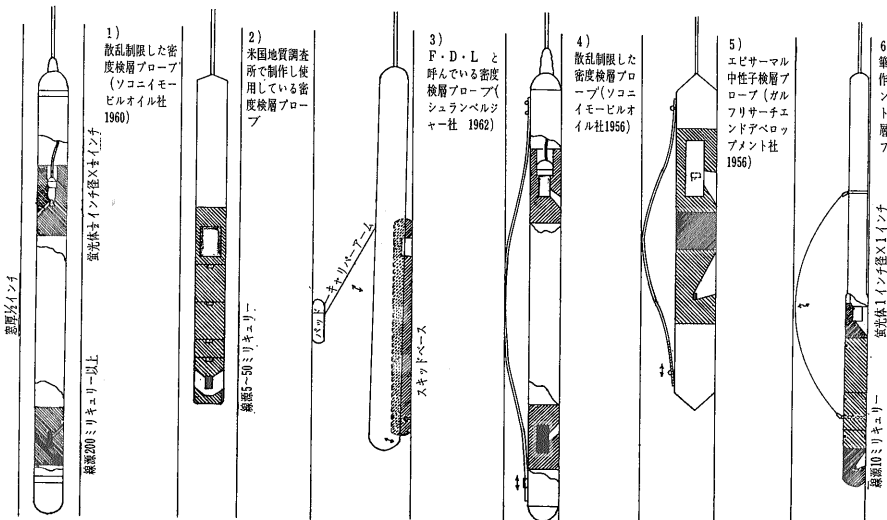
安全性および軽量化による取扱上の可搬性 簡便性そして経済性などを考慮すると 線源はできるだけ小容量化することが望しい。このように小線源を用い 線

源・検出部間の 精度上必要最小限度の距離を確保するとなると 必然的に この条件で計数可能な検出効率のよい大きな蛍光体が必要になる。

第2図中の2の窓形は 同図中の1と同じ同軸型のプローブであるけれども これよりも小さい線源が用いられている。この他 線源・検出部間距離 プローブ外径 対象地質など 各種の条件を考慮して 図中の1に較べ窓面積の大きい設計にしてある。この窓面積の増大は 幾何学的視準により 地層を通過する散乱ガンマ線をおもに補えるという意味では ある程度妥協的な設計であり 地層中を通らないで坑内泥水中を直接的に通過する後方散乱ガンマ線も ある比率で含まれて計数されることになる。

このように 図中の1のような方式を除く 一般の同軸型プローブは 検出応答に 後方散乱によるガンマ線を含む。そして この後方散乱ガンマ線は わずかな坑径変化に対して割合に大きな計数変動を生むために 検層解析を行なう上で大きな障害になる。その他 同軸型プローブが坑内中心に位置する場合と 偏心している場合とではやはり計数差を生む。

以上のような坑井変化の影響を極力縮小 あるいは除去する方法として プローブの片側にアームまたは弓状スプリングなどを装備し プローブの反対側を坑壁に圧着させる圧着型が考案された。現在 石油・ガス井など大坑径井中における密度検層では この圧着型プローブを多く利用している。ただし 米国の地質調査所の水資源部門では 水井戸検層に同軸型 (第1図の2) を使用している。



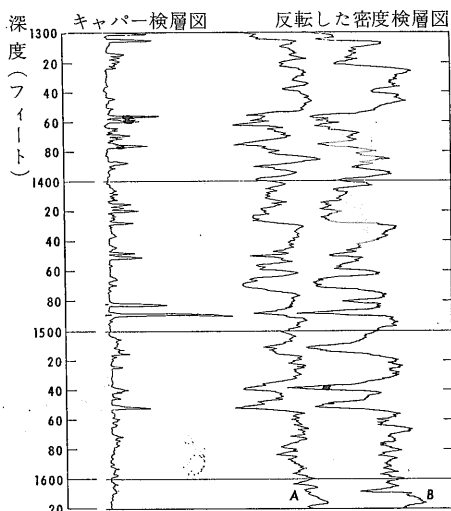
第1図 各種の放射能検層用プローブのデザイン

2-4. 同軸型および圧着型プローブによる密度検層の実験的な比較

第2図は 米国地質調査所の水資源部門で実施した同一坑井中における圧着型プローブと同軸型プローブによる密度検層と キャリパ検層の比較図である。

この図中 Aは市販の圧着型 Bは水資源部門の機器部で自作した同軸型プローブを使用している。このA B両検層図を 左側に示すキャリパ検層図中の崩壊による坑径拡大部分について比較すると ABともこの部分で大きな計数感度を示して 小区間の坑径変化に対して AはBよりも計数感度を縮小しているもの 完全には除去できないようで 理論と実際との差を明示しているものといえよう。これは 種々の坑井影響を限られたプローブハウジングのスペースで完全にカバーすることが機構的に不可能であるからである。したがって 定量算定のためにはA (圧着型) 検層といえどもキャリパ検層を実施して坑径変化をチェックし 場合によっては 疑問の部分を除いて解析を行なわなければならない。一方 逆の見方をすると 著しい坑壁変化のある部分を除けば 地層を通過した散乱ガンマ線以外の後方散乱ガンマ線や 他の坑井影響による不要なガンマ線を多く含むことになるB (同軸型) 検層でも プローブ径と坑内径の比が極端に大きくなければ (Bのプローブ外径は一般のものより大きい) 地層密度とかなり比例的になるので 大きな許容誤差範囲では定量的算定も可能であるといえる。

しかし B検層よりもA検層の方が優れていることは実際的にみても確かである。



第2図 同一坑井中における圧着型(A)と同軸型(B)の密度検層およびキャリパ検層の実施例 W. Scott Keys (1971)らによる

2-5. 筆者が試作したインスタント密度検層機について

当所の技術部特殊技術課・竹内技官におもな製作を依頼し試作した圧着型プローブ (第1図の6) は 既存の小線源および市販の自然放射能検層用プローブといったインスタントの取合わせで改造したために 指向窓は比較的が大きくなり 第1図-5のエピサーマル中性子検層用プローブの窓形と計らずも相似する結果になった。

(注) 上述のように 第1図-6は 測定方法の概念において 第1図-5の形に相似するが 下記理由により特許を侵害するものではない。

- a) 米国特許取得年は1956年で 有効期限17年を経過していること。
- b) 日本における特許出願がないとみられること。(国内特許の有効期限は15年)
- c) 第1図-6が試験的な目的のために試作されたこと。

従来使用されている坑内壁に圧着する手法としては 弓状スプリング型 (坑径変化に順応して 弓状スプリングの下端部がスライドし プローブの反対側を一定圧で圧着させる方式) と アーム型 (坑径変化に対して 油圧またはバネの抗力により アーム先端部を一定圧で圧着させる方式) の2型式がおもに用いられている。筆者の場合はその機能を充分満足する範囲で最も簡易化してある。すなわち 坑中のプローブ重量に耐える抗力をもつ最小限の太さのピアノ線を弓状スプリング材として使用した。そして この両端位置は 角自由度をもたせて固定させ 坑径変化に対して弓状スプリングの中央部を局部的に変形させることにより 順応させる方式にしている。

2-4節で述べたように たとえ圧着型プローブによる検層においても キャリパ検層を併用的に実施して チェックまたは把握することがよりベターであるので 次にキャリパ検層について記述することにする。

3. キャリパ検層について

3-1. 坑径の変動要因およびキャリパ検層の目的

坑井掘さくにより 坑内壁は拡大または縮小し乱される。その要因として 地質のおよび掘さく技術的な環境の相違が挙げられる。

地質的な要因としては 亀裂の方位・長さ・大きさ 圧密とセメンテーションの度合と種類 粘土の水和と膨潤の度合 間隙率と透水性などが そして 掘さく技術的な要因としては 掘さくの所用時間 循環泥水の種類・量・圧力 ドリルシステムの長さ重量といったものが考えられる。キャリパ検層を実施することにより このような掘さく坑径の変化を記録することができる。

また 坑井掘さく後に実施される各種の物理検層の値は坑径変化の影響を受けて変動する。

キャリパ検層の最も重要な役目は いうまでもなく 他検層における坑径変化率の影響を補正することである。しかし この他に 地層の裂か部の確認と成層対比 ケーシング尻やジョイントの状態確認 セメンチング施工個所の設定と量の見積り 挿入するケーシングサイズの決定とケーシング挿入後に施工されるグラベルパッキング量の算定 パッカー試験器の圧力設定といった種々の環境評価にも非常に有用である。

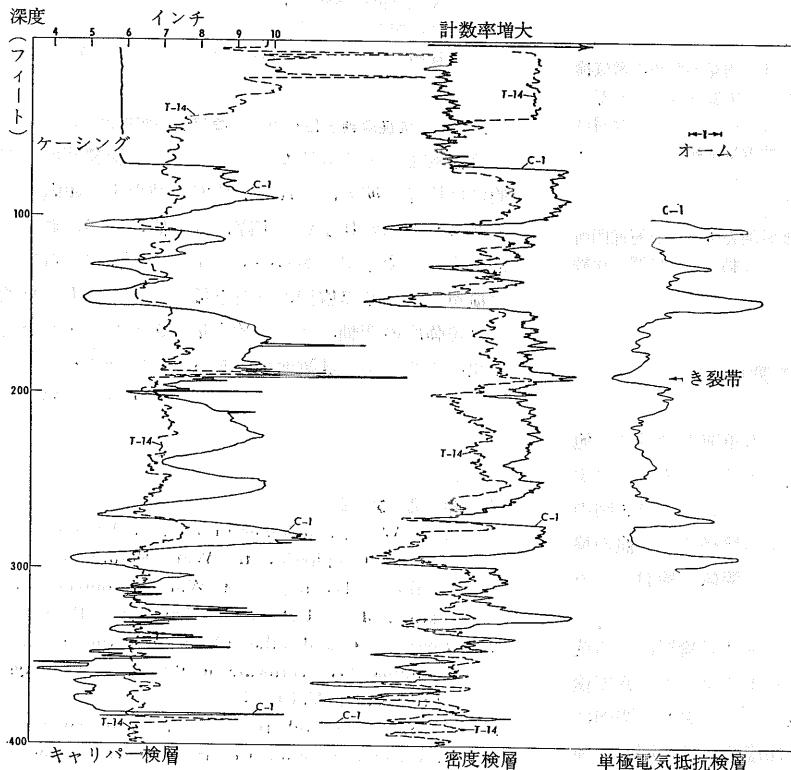
3-2. キャリパ検層機器の性能

キャリパ検層の測定装置は 坑径変化によりプローブ中で伸縮するスプリングの動きを電磁誘導などの電気的量に変換し 搬送されたパルスを連続的に記録するものである。

坑径変化を機械的に直接キャッチする感受部として

1. 弓状スプリング型
2. アーム・パッド型
3. フィーラ型

の3型式があり 坑壁との接触点を機構的にみた感度は



フィーラ型が最も優れている。これは 小型化すればするほどより感度が向上し 垂直的な感度が良好になるけれども その長さは 測定する坑径変化の範囲との関係から決定される。次に アーム・パッド型が優れており 弓状スプリング型は感度的な面では劣る。

これら感受部はまた その用途に応じて1~4本の構成数を選ぶ。すなわち 坑口が楕円やゆがんだ円などの非対称口では 1~2本より3~4本が用いられ 検出パルスも2元以上にすることが望ましい。

他方 感受部の作動方式としては (a) 直流モータ内蔵による電動方式 (b) プローブが坑底着底時に自重で作動する自重方式 そして特殊なものとして (c) 電氣的に爆発するキャップで 感受部を保持するワイヤを破壊して作動させる火薬方式がある。 (b) はスライム泥など坑底に軟弱な堆積物がある場合は作動しにくい難点がある。そして 繰返し測定を行なう頻度からくる能率を考慮すると (a)が最も便利である。

キャリパ検層は 圧力の設定に問題がある。すなわち 坑内の地質等の環境にマッチした圧力に可変可能な機構にするのが理想的であるが 適合範囲をはずれた条件下では感度的にも精度的にも劣化することになる。

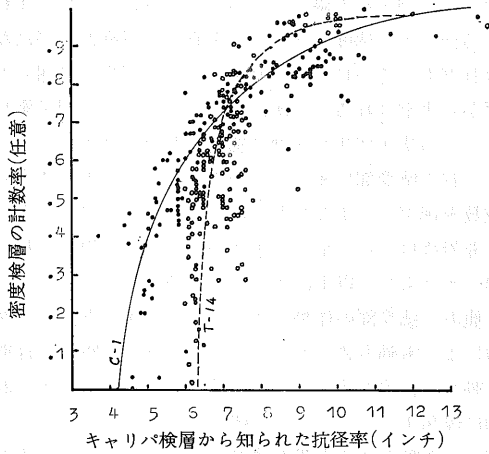
また一般に 現用のキャリパ検層機は 坑壁肌の不規則的な細かい荒れに対して検出応答の完全な追従が不可能であるほか 機構的に 坑口断面積の正確な測定が不可能である点が問題点として残されている。

3-3. 米国における検層実施例

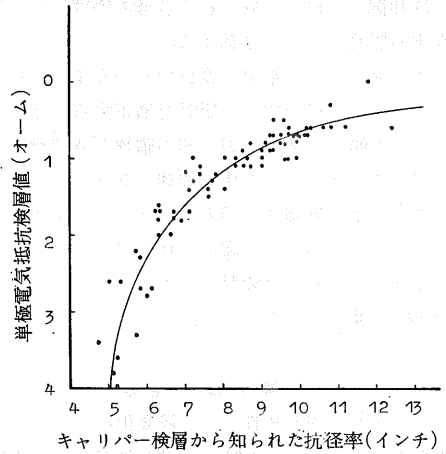
米国地質調査所・水資源部門の手により テキサス州ブラズス川上流に近接した地点に 2本の坑井が掘さくされ キャリパ 単極電気抵抗 密度等の各種検層が実施された。(第3図参照)

第3図中のC-1井のキャリパ検層図に示されるような坑径率の連続的な変動はたとえコアリング井にせよ非常に極端な部類に属すも

第3図 密度および単極電気抵抗の検層とキャリパ検層から知られる坑径変動の関係 W. Scott Keys (1971) ちによる



第4図 坑径変動による密度検層値の影響 (第3図より作成)



第5図 坑径変動による単極電気抵抗検層値の影響 (第3図より作成)

のと思われるが 坑壁はひどく荒れている。このC-1井に近接して掘さくされた T-14井は 最小の洗浄効果で迅速に掘さくされたために 坑壁はあまり荒れていない。C-1井のドリルコアから鑑定された地質がほとんど類似的な同一地層であるので 単極電気抵抗検層と密度検層の計数応答要因の大きな比率は 坑径影響によるものといえる。

単極電気抵抗検層: わが国における水井戸開発のための電気検層としては ノルマルデバイスが最も多く実施されているがここでは 単極電気抵抗検層が実施されている。この検層は地層対比と層厚の識別に有用で 比抵抗電気検層のショートノルマルの性質と相似している。

密度検層機: 使用機器は 米国地質調査所・水資源部門所有の軸対称型プローブであるので 坑壁変動による影響が比較的に大きい。

3-4. 坑径変動と各種検層値の関係

3-4-1. 第3図の検討結果

前述のように キャリパ検層の最も重要な役目は 他検層の坑径変化率を補正することである。それでは実際に 坑径差がどの程度影響するかについて 第3図の実施例をもとに キャリパ検層による坑径変化と他の検層(単極電気抵抗と密度の検層)との関係を検討してみる。

第4図と第5図は 第3図中のキャリパ検層による坑径変化に対する単極電気抵抗検層によるオームと密度検層による応答計数を 深度別に読みとり 夫々相関図にしたものである。この試験井が深度的にほぼ同一の地層であり また 坑壁の荒れが特異的に顕著であること、

3本のショートアームからなる高感度のキャリパ検層機を使用したこと。そして 密度検層機として軸対称のプローブを使用したことがここではかえって幸いし 第4と5図は 坑径変化による影響の傾向を明示している。この図から次のようなことがいえる。

- 1) 密度検層の応答係数は 坑径の増大につれて増大する。
- 2) 単極電気抵抗検層のオームは 坑径の増大につれて減少し 密度検層の応答係数と逆の性状になる。
- 3) 両検層値は 小口径の坑径変動ほど大きく変動する。

3-4-2. 坑径変動と自然ガンマ検層値の関係について

坑径変化による自然ガンマ計数率への影響度は 理論的には坑径の拡大につれて計数率が減少する傾向を示すであろうと思われるが 実際には 他の検層に較べて非常に小さい変化率であるので キャリパ検層と自然ガンマ検層との比較実施例の資料を検討してみても 自然ガンマ線強度の変動による計数変化であるか または坑径変化の影響による計数変化であるか不明確である。

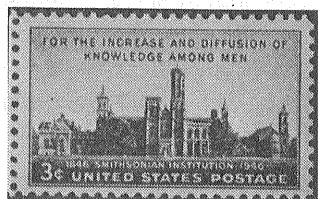
(筆者は応用地質部)

4. 参考文献

- 1) KEYS, W. S., and other (1971): Application of Borehole Geophysics to Water-Resources Investigations. Techniques of Water-Resources Investigation of the U. S. G. S. Chapter-E.1. Book 2.
- 2) HOMILIUS, J. and other (1958): On the Theory of Gamma Ray Scattering in Boreholes. Geophysical Prospecting. Vol. 6, No. 4.
- 3) TITTMAN, J. and other (1965): The Physical Foundations of Formation Density Logging. Geophysics, Vol. 30, No. 2.

- 4) U. S. Patent 2,934,652 : RICHARD, L. C. Apr. 26, 1960. (Selected Scatterd Gamma-Ray Density Logging.)
- 5) U. S. Patent 2,769,918 : TITTLE, C. W. Nov. 6, 1956. (Epithermal Neutron Logging Method using Collimation.)
- 6) HILCHIE, D. W. (1968) : Caliper Logging-Theory and Practice : The Log Analyst, Vol.4 No.1.
- 7) 小鯛桂一 (1974) : 地下水調査のための密度検層 (測定上の問題点と機器の試作について) 地質調査所月報 Vol.25, No.4

地学と切手



スミソニ
アン協会
100年
記念切手

P. Q.

1946年8月10日100年記念切手を発行されたスミソニアン協会はワシントンの4番街から12番街にわたるビルディングの一群であり図書館自然科学博物館天文台飛行機博物館動物園美術館に至るまでの知識の宝庫である。ここには約2,000人が仕事に従事している。それはイギリスの化学者で鉱物学者であったスミスソン (James SMITHSON, 1765~1829) の遺贈によって創立されたものである。しかし彼は1度もアメリカの土は踏まなかった。だが彼の遺骨はゼノアから1904年に改葬されて協会内のチャペルに葬られている。

彼はイギリスでノーザンバーランド公爵の庶子として生まれた。その母の血筋をたどるとサマーセット公爵を通じてヘンリー7世に至るといわれている。はじめ母の性を名乗っていたが後に認知されてスミスソンとなりオックスフォードを卒業して化学者・鉱物学者となった。菱亜鉛鉱 (Smithsonite) は1802年に分析した彼の業績にちなんで命名された名前である。

1度もアメリカに行ったことのない彼が何故遺産をアメリカに寄贈したかは憶測しか出来ないが彼の出生の環境と無関係ではないと一般に考えられている。1826年に全財産を甥に子供のなかった時の条件付だったが

“アメリカ合衆国ワシントンにおいてスミソニアン協会の名のもとに人類の間の知識の増大と普及のための国立施設を作る” ために遺贈することとした。1838年にアメリカに到着した遺産額は588,318ドル46セントであり8年の審議の後に1846年8月10日に法律がサインされた。協会はその後の100年間に遂次充実されて来た。スミソニアン協会の理事会は大統領・最高裁判事・閣僚からなり長官をえらぶ。4代目のWALCOTT

(1907~1927)は連邦地質調査所の所長だった。

協会には前述の多くの施設と機能があるが地学と関係あるのは出版図書館博物館である。

出版物は考古学から始めて哲学に至る科学の各分野を覆う17種の出版物 (途中廃刊も含む) があり地質学古生物学鉱物学が含まれている。これらの出版物は世界中のおもな研究機関に送られ見返りとして世界中から文献が集ってくる。図書館は世界で最大なそしてもっとも重要なもののひとつである。それは協会内にある50万冊以上のものと国会図書館にある100万冊のとありいずれも有効に各界に利用されている。それらに密接に関するものとして国際交換サービスがある。それはアメリカ国内の図書館・学会・研究所・個人で自身の出版物を国外の機関へ交換または寄贈しようとする場合に出版物を協会へ送れば協会では一括して船便で国外の機関へ無料で送ってくれる。国外からの交換出版物が協会へ一括して到着するとアメリカ内のあて先へは無料で送られる仕組である。

国立博物館は歴史技術博物館と自然史博物館からなる。自然史博物館には全世界から現在も集められている動物・植物・鉱物・考古品の標本総数は5,500万点にのぼり展示されているのはそのうち1%にみえない。100人以上の科学者が研究に従事して報告を出版している。その収蔵品は19世紀のアメリカ西部への探険隊の収集品にさかのぼりこれらは現在環境汚染以前のサンプルとして研究の対象となっている。

連邦地質調査所 (U. S. G. S.) は独自の標本館は有していなく研究のすんだ標準的標本はこの博物館に収めることになっている。たとえば1867~73にC. KINGの指揮の下に行なわれたU. S. G. S北緯40度沿いの調査では岩石の記載はZIRKELによって行なわれた。それらの薄片は国立博物館に保管されているがSMITHらによる再検討の結果総数800枚中200枚が熔結凝灰岩だった等は標準標本収納の必要のよい例である。

切手にはスミスソンの遺言の1部 Increase and diffusion of Knowledge among men が Smithsonian Institution Buildingの正面図の上に記されている。