

自然科学の発展に寄与する地下空間 DUSEL (Deep Underground Science and Engineering Laboratory) の紹介

第 40 回 US Rock Mechanics Symposium (2005 年 6 月 , アンカレッジ) でのパネルディスカッションのテーマのひとつが , DUSEL (Deep Underground Science and Engineering Laboratory) でした . 合衆国岩盤力学学会 (ARMA) の Web サイトの Top ページにも DUSEL のリンクがあり , 既に多くの方はご存知とは思いますが , 簡単に DUSEL の紹介を行います .

1 . DUSEL とは

DUSEL とは「大深度地下空間を利用した自然科学及び工学に関する実験施設」の総称です . 現在 , DUSEL と呼称される実験施設は , 図-1 に示すとおり北米に 8 ヶ所存在する (Homestake, Cascades, San Jacinto, Soudan, Kimbalton, Henderson, Sudbury, WIPP). これらは今後拡張される予定であり , 現在も調査 , 施工が進められている .

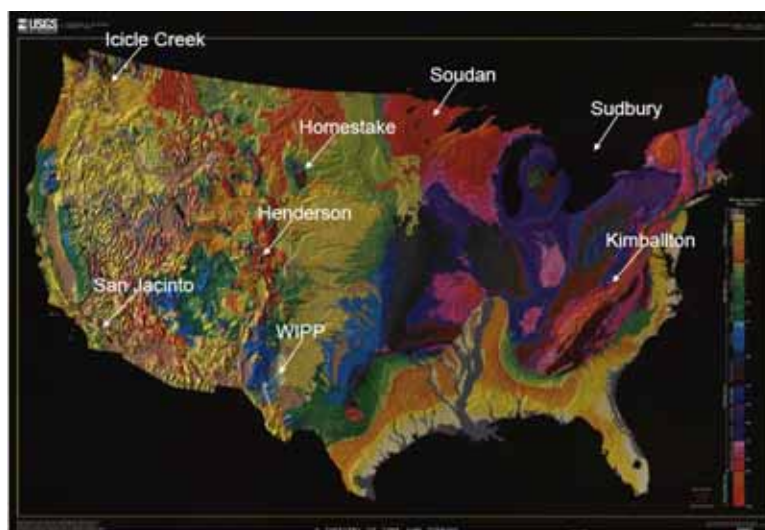


図-1 アメリカの擁する DUSEL の位置¹⁾

日本のカミオカンデやスーパーカミオカンデは , DUSEL に相当するものです . これにより , 東京大学の小柴昌俊率いるチームが , 超新星爆発により放出される高エネルギーニュートリノの検出に成功し , 小柴教授自身もその業績によりノーベル賞物理学賞を受賞したことは記憶に新しいことです .

DUSEL の lead-agency は , NSF (National Science Foundation) です . NSF 以外に , DOE (エネルギー省) , NASA (アメリカ航空宇宙局) , NIH (National Institute of Health) , USGS (アメリカ地質調査所) 等が , 協力して DUSEL を進めています .

2 . DUSEL で対象とされる研究領域

DUSEL は , 総合的な地下自然科学研究センターであり , 対象とする研究分野は , 物理 , 化学 , 地球科学 , 生命科学など , 世界でも類を見ないほど多岐にわたっています . DUSEL には , 表-1 に示す 14 のワーキンググループが設けられて , 研究計画の立案 , 予算の獲得 , 研究の実施が行われています . これらの研究内容は , 多くが筆者にとってはかなり縁遠いもので , 近いのが Infrastructure Requirements and Management と Rock Mechanics / Seismology の 2 ワーキンググループです .

表- 1 DUSEL の 14 のワーキンググループ

| | |
|------------------------------------|---|
| Low Energy Neutrinos | Neutrino less Double-Beta Decay |
| Long Baseline Neutrino Experiments | Nucleon Decay / Atmospheric Neutrinos |
| Dark Matter | Nuclear Astrophysics and Underground Accelerators |

| | |
|--|--|
| Coupled Processes | Rock Mechanics / Seismology |
| Applications | Geo-microbiology |
| Microbial Biology and Evolution | Low-Background Counting Facilities and Prototyping |
| Infrastructure Requirements and Management | Education and Outreach |

合衆国では（日本も同じかもしれませんが）、生命科学の分野への予算処置は手厚いものです。文教予算には厳しい Bush 政権でさえ、Life Science には手厚いものがあります。ただし、DUSEL に関しては、表-1 から分かりますように宇宙物理の研究分野が中心となっています。

宇宙物理の基礎研究領域としては、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、超新星爆発で産まれるような高エネルギーニュートリノといった宇宙ニュートリノの検出や、実験室で生成した人工ニュートリノを射出して遠く離れたところに位置する別の実験施設でそのニュートリノを検出し、ニュートリノの存在確率のゆらぎを観測することで、ニュートリノ振動問題を解決すること、さらにニュートリノ以外でも、二重崩壊や果ては環境流出物の研究まで及んでいます（DUSEL 公式 HP¹⁾より）。特に、ニュートリノの研究は、カミオカンデ、スーパーカミオカンデに代表されるように、研究領域の中でも特に熱心に取り組まれているようです。

3. なぜニュートリノか？

DUSEL でニュートリノの研究が盛んに行われている理由は、DUSEL の実験環境がニュートリノの検出に非常に適しているからです。通常、ニュートリノ（以下本稿で示すニュートリノは、特に断りがない場合、太陽の核融合から放出される太陽ニュートリノや、超新星爆発から放出される高エネルギーニュートリノなどの宇宙ニュートリノのこととする）は宇宙線に含まれて地球に飛来するため、単独で検出することが難しいものなそうです。そこで研究者たちは、物質透過性が非常に強く、他の物質とほとんど反応することなく地球を通り抜けていってしまうニュートリノの性質を利用することにしました。宇宙線に含まれる他の物質は、ニュートリノに比べ物質透過性が劣っているため、深さ 1,000 m 程度の大深度地下空間に検出器を設置すれば、そこでは他の宇宙線成分は観測されず、ニュートリノの反応のみが観測されることとなります。そのため、世界各地の DUSEL では古くからニュートリノ研究が進められてきました。

現在までに、DUSEL で挙げられた大きな研究成果を抜粋すると、以下の成果が挙げられます。

(1) アメリカ合衆国、ホームステーク鉱山²⁾

1967 年から、デービスは合衆国サウスダコタ州にある Homestake 鉱山に設置した装置で太陽ニュートリノの観測を行い、太陽が核融合反応を起こしている証拠をつかんだそうです。しかし同時に、観測されたニュートリノが、理論値の 3 分の 1 しかないという問題も発見されています。これは太陽ニュートリノ問題と呼ばれています。

(2) 日本、カミオカンデ^{3), 4)}

1983 年からカミオカンデで陽子崩壊実験を行っていた小柴らのグループは、1985 年からペンシルバニア大学のグループと共同で実験装置を太陽ニュートリノの検出に使えるよう改造し、1987 年 1 月 1 日から運用を開始しました。これによって 1989 年、デービスの提唱した太陽ニュートリノ問題の存在が確認されています。

続いて行われた実験は K2K 実験 (*-from KEK to Kamioka- Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment*) です。この実験は、高エネルギー加速器研究機構で人工的に発生させたミューニュートリノを 250 km 離れたスーパーカミオカンデに向けて射出し、事象数の減少やエネルギー分布の変化を観測することによりニュートリノ振動を検出する実験です。1998 年までに行われた実験結果から、ニュートリノ振動が 99 % 以上の確率で存在することが確認されています。

近年の研究 Topics は、上述のニュートリノ振動のカミオカンデ以外での追証実験、およびニュートリノ振動のパラメータ（質量の 2 乗の差と混合角）を精度良く決定することのようです。

4. DUSEL で行われるニュートリノ関連の研究^{1), 2), 5), 6)}

DUSEL で実施される予定ニュートリノ関連の研究は、以下の通りです。

(1) 長基線ニュートリノの用いたニュートリノ振動問題の解決

FNAL (Fermi Natural Accelerator Laboratory) にある加速器からニュートリノを人工的に生成し、

合衆国内各地に点在する DUSEL (Homestake, Cascades, San Jacinto, Soudan, Kimbalton, Henderson, Sudbury, WIPP) 内に設置された検出器でニュートリノを観測することにより, ニュートリノ検出回数を増やし, 効率的にニュートリノ振動問題を解決しようとするものです. 図-2 に長基線ニュートリノ検出実験に参加する DUSEL と FNAL の位置関係を示します.

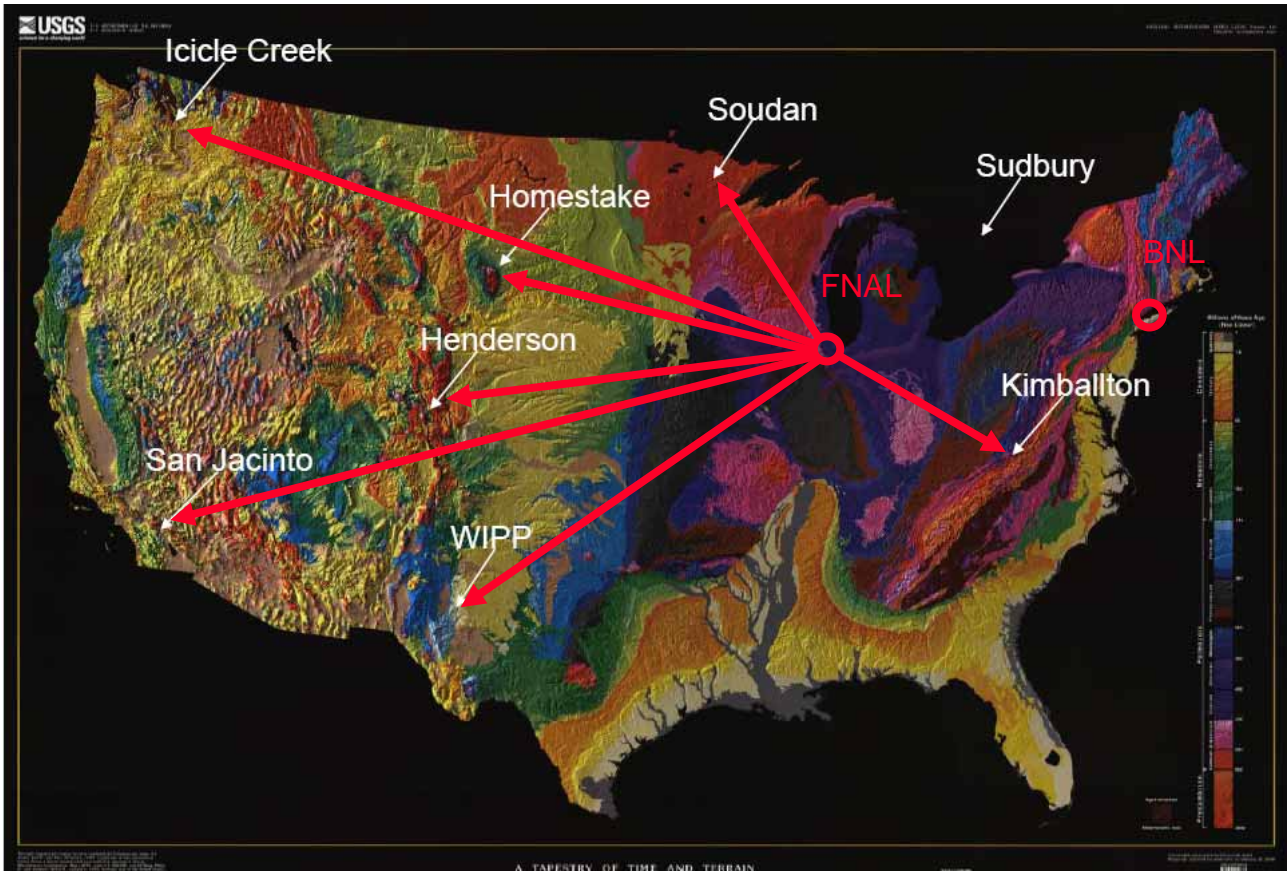


図-2 長基線ニュートリノ検出実験の概要¹⁾

(2) 太陽ニュートリノ問題の解決

太陽の核融合反応は太陽の中心付近で起き、反応で発生した熱が太陽中心から表面まで伝わるのに約 10 万年かかると考えられています。したがって、我々が今見ている太陽の輝きは、約 10 万年前に太陽中心で起きた反応の結果という事になります。一方、太陽からのニュートリノは、太陽の中心近くで作られ約 500 秒で地球に到達します。このことを用いると太陽ニュートリノを直接観測する事で、太陽中心で今起きている核融合反応を把握することが可能であることとなります。このため、太陽ニュートリノの研究も盛んに行われています。

(3) ダークマターの物性解明

NASA の人工衛星「WMAP」による、宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の観測結果が発表され、大きな話題を呼びました。その解析結果によれば、宇宙の年齢は 137 億歳だそうです。更に、宇宙に存在するエネルギー密度の内訳は、光を発している通常の物質はわずか 4% にすぎず、光を発していない「暗黒物質」が 26%、残りの 70% は「暗黒エネルギー（宇宙項）」と呼ばれるものであることが判明しました。渦巻き銀河の回転速度の観測から、光を発していない物質、すなわちダークマター（暗黒物質）が銀河のまわりにたくさん存在していることが以前から予想されていましたが、WMAP の観測によってその存在をフォローする結果が得られたこととなります。宇宙のエネルギー密度の内訳を明らかにすべく、多くの研究者により暗黒物質の候補が理論的に予測されました。その候補としては、ニュートリノ、ニュートラリーノ（超対称性粒子の 1 つ）、シャドーマターなどです。この中で実験的に存在が確認されていた粒子は、ニュートリノのみです。ニュートリノが宇宙空間に大量に存在する（計算では $\sim 100/\text{cm}^3$ ）ことから、質量が 10eV 程度あれば暗黒物質問題が解決す

ると考えられていました。その後、カミオカンデにてニュートリノが質量を持つことが証明されましたが、その質量は非常に小さく、宇宙の全エネルギーの僅か 0.5% を占める程度だそうです。このため近年では、ニュートリノの検出が可能になる検出器の建設が予定されているようです。

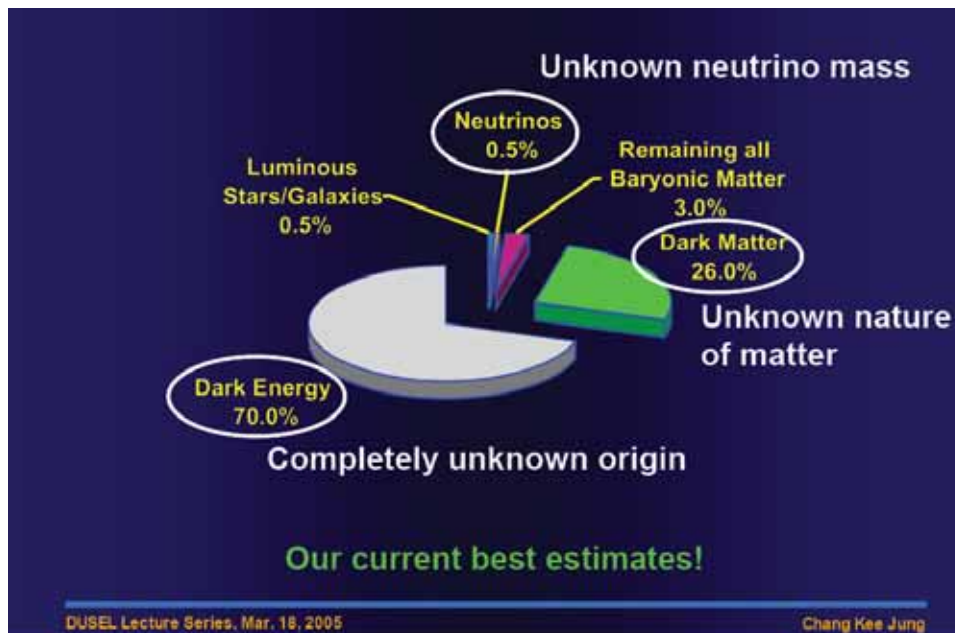


図-3 宇宙に存在するエネルギーの構成¹⁾

5. DUSEL で行われる Life Science 関連の研究¹⁾

地下深部では、当然のことですが高圧・高温の環境にあります。そのような環境にマッチしたバクテリアは、放射線抵抗性、自己再生能力、自己分裂能力等ユニークな機能を有していると考えられています。そのようなユニークな機能を有する未知のバクテリアを発見し、そのゲノムを解読することで、医学や工学分野への応用を目指す研究がなされようとしています。

6. DUSEL の研究施設¹⁾

ニュートリノに代表される素粒子の検出実験に関連した実験施設は、次のように分類されています。

- (1) 6000 フィート以深 : 二重 崩壊, 太陽ニュートリノの検出等
- (2) 4000 ~ 6000 フィート : 暗黒物質の検出
- (3) 2000 ~ 4000 フィート : 陽子崩壊, 超基線ニュートリノに関する研究

素粒子以外の分野では、大深度地下空間に生息するバクテリア等の微生物ゲノムの解読や、未発見の微生物を発見するための探索等が行われる予定です。

7. 施工コストと維持管理コスト

初期の DUSEL は廃坑のなった鉱山 (Homestake 鉱山, Soudan 鉱山 (ミネソタ州) など) を利用して建設されてきました。しかし、科学技術の進歩と研究領域の深化により、さらなる科学の発展のためには、より深くより大きな研究施設へと発展させる必要が生じてきました。この要請に応えるべく、合衆国各地に存在するそれぞれの DUSEL で拡張計画が練られているのが現状です。さらに、予算を獲得すべく、それぞれがその立地の優位性を競争し、それぞれの研究計画にたいして、大深度地下での地盤の状態 (= 岩の硬さ)、地震発生頻度、地下水量、近郊都市からのアクセス、等々において、どれだけ自らの立地がさらなる大深度地下実験施設建設にふさわしいかということで、候補地の競争の競争がなされています。

図-4 は、Homestake 鉱山にある DUSEL の拡張計画の概要です²⁾。図中に緑色で示す範囲が、新たに

建設が予定されている大深度地下実験施設です。また、図-5は、施工予定のエントランストンネルの断面である。現在の概算では、工事費：3億USドル、オペレーション・コスト：5000万USドル/年であり、施設は40年かあるいはそれ以上稼動する予定だそうです。HomestakeのDUSELでは、施工やオペレーションに必要な物資あるいは人員のうち60～70%程度を地元から採用する予定であり、地域経済にもたらすインパクトを住民に説明し、DUSEL拡張計画に理解を求めているのが現状です。

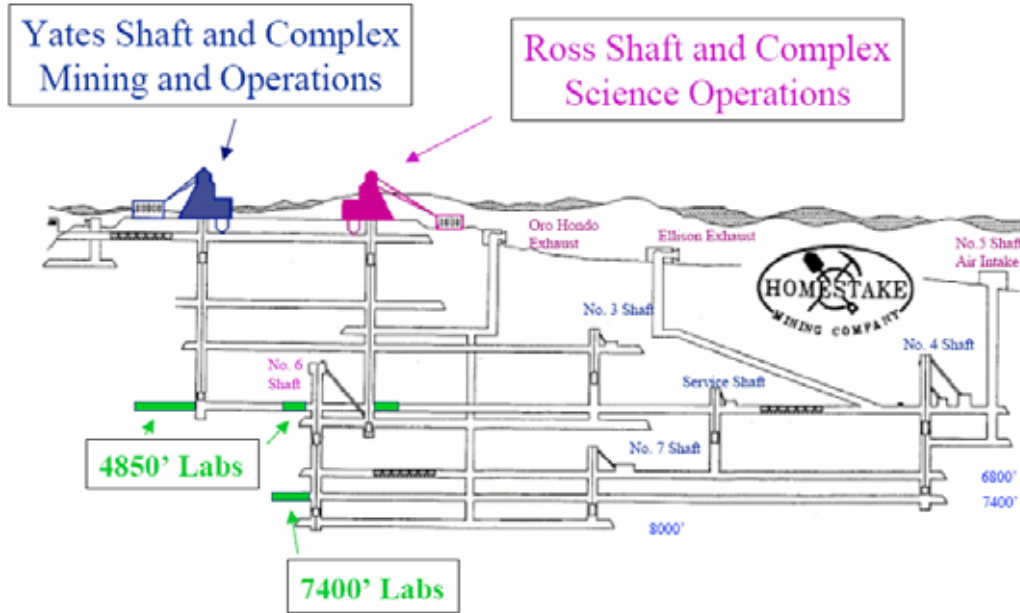


図-4 Homestakeの拡張計画²⁾

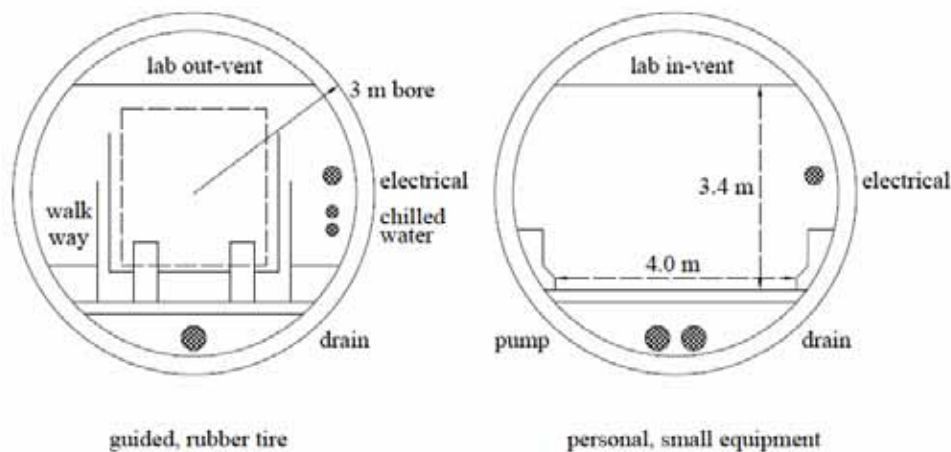


図-5 Homestakeの施工予定のトンネル断面²⁾

8. 岩盤工学の出番です

ニュートリノ関連の実験では、地下深部に大規模な実験装置を設置するための空間が必要となります。岩盤工学の出番です。Soudan Dusel Projectでは、約10万トンの岩盤が掘削されて、大規模地下空間の建設が行われ、ニュートリノ関連の実験が行われています。また、南極でもProject Ice Cubeが進められており、地下1400～2400mに実験室が建設されようとしています⁷⁾。大きさは、1.0 km³である。岩盤工学者がノーベル賞を獲得することは難しいと思いますが、ノーベル賞を陰で支える技術であることは確かです。

専門家でないものが説明しているので、理解しづらいかと思われます。また、正確でない表現、情報

があるかもしれません．どうかお許し下さい．

【参考文献】

- 1) Dusel 公式 HP : <http://www.dusel.org/>
- 2) Dusel at Homestake : <http://www.int.washington.edu/DUSEL/homestake.html>
- 3) スーパーカミオカンデ公式 HP : <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>
- 4) 神岡宇宙素粒子研究施設 : <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index.html>
- 5) Dusel at Mt. San Jacinto : <http://www.ps.uci.edu/~SJNUSL/>
- 6) Dusel at Cascades : <http://www.int.washington.edu/DUSEL/cascades.html>
- 7) <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/CRC/Symposium/2005-01/04.pdf>