

最近の話題から

1. 天体力学的に規正された新地質年代尺度のVLBIによる検証
2. 氷床の後退に伴うVLBI局の鉛直運動

郵政省通信総合研究所・鹿島宇宙通信センター 日置 幸介
(Internet:heki@crl.go.jp)

1. 地質年代尺度の改定

(電話の呼出音)

日置：もしもし。
女性：お名前をどうぞ。
日置：日置幸介です、通総研に通ってます。
女性：日置くんの質問は何ですか？
日置：NUVEL 1¹が4.5%間違ってるって本当ですか？
女性：日置くんは通総研ではどんな勉強してるんですか？
日置：VLBIで地面の動きを測ってます。
女性：NUVEL 1が4.5%間違ってたら困るの？
日置：地面の動きの予測値が違ってくるので困ります。
女性：それじゃこの質問は〇×先生に聞いてみましょう。〇×先生どうですか？
先生：NUVEL 1が間違ってるって誰にきいたの？
日置：Natureという雑誌に書いてありました²。
先生：日置くんはNUVEL 1をどうやって決めるか知ってますか？
日置：地震ですべった方向と、すれ違い境界の向きと、海嶺のまわりの磁気異常の縞模様だって習いました。
先生：そうだよ。じゃあその中でプレートの動く速さの手がかりを与えるのはどれかな？
日置：磁気異常の縞模様だと思います。
先生：磁気異常ができるのは、海嶺で新しい海底が出来たときに岩石が北向きに磁化したり南向きに磁化したりするからなんです。だからこの縞模様の幅を地磁気が逆転した年代で割れば新しい海底が出来た速さつまりプレートの動く速さがわかるんだよね。ここまですごいですか？
日置：地磁気が逆転した年代はどうやってわかるんですか？
先生：それはね、地球のいろんな所からいろんな火山岩を拾ってくるんです。生まれたての岩の中にはK(カリウム)が入ってるんだけど、このカリウムがだんだんAr(アルゴン)に変わっていくんです。だから岩の中のKとArの量を比べるとその岩が何歳かがわかるんだよ。あとね、火山岩が生まれて冷えるときにその時の地球磁場の方向に弱く磁化するんです。こうやって沢山の岩の年齢と磁化の向きを調べたら何百万年前までは地磁気は北向きで、その前何百万年は南向きで、またその前は北向きってということがわかるんだよね。
日置：ふうん。
先生：でも磁場が逆転してるまさにその時できた岩石の年齢を測ってるわけじゃないんだよね。
日置：じゃあ結構間違ってることもあるんですか？
先生：うん。NUVEL 1が4.5%間違ってるのもこの磁場逆転の年齢が間違ってるのがわかったか

らなんだよ。日置くんはセルビアって聞いたことがありますか？
日置：「別れても好きな人」を歌ってたお姉さんですか？
先生：それはシルビアでしょう。セルビアというのはユーゴスラビアの中の国の名前です。昔そこにミランコビッチという偉い数学者がいたんです。地球の傾き(軌道傾斜角)とか地球の軌道のゆがみ具合(軌道離心率)とかは他の星の引力でちょっとづつ変わるんですけど、その人はこれが気候に影響を及ぼして氷期と間氷期をもたらすと考えたんです。でもこの説は当時としては奇抜でいつのまにか忘れられてしまったんだよね。
日置：へーえ。
先生：最近になって海底から堆積物を抜き取って昔のことをいろいろ調べることができるようになったんだ。中でも酸素の同位体比を調べると昔の気温がわかるんだよ。
日置：どうしてですか？
先生：寒くなるってことは北極や南極に水が集まって氷になるってことだよ。暖かくなるってことはその氷が融けて海に戻ってくるっていうことでしょう？酸素には重い酸素と軽い酸素があってね、重い酸素は軽い酸素に比べて重い分だけ北極や南極に飛んで行くのが大変なんです。
日置：じゃあ寒いときは北極に行けないデブな酸素が海に増えて、暖かくなるともどかに戻るんだ。
先生：そうやってね、昔の気温変化の曲線を書いてやると、これが昔ミランコビッチが予測した曲線にそっくりだったんだよ。だからみんなミランコビッチが言ったことは本当だったんだって思うようになったんだ。ミランコビッチの計算は天体力学に基づいているからとても正確で、これで過去の気候変動の様子がわかるだけじゃなく未来の気候変動も予測できるんだ。
日置：すごいですね。
先生：もう一つ最近わかってきたことがあるんだ。海底の堆積物も陸の火山岩と同じようにそれが積もった時の地磁気の方向に弱く磁化するんだよ。堆積物の磁化の北向き、南向きのパターンと気候変動の曲線を照らし合わせると地磁気逆転の年代がドンピシャでわかるんだ。地球の歴史が書かれたロゼッタストーンみたいなもんだよね³。
日置：そうやって調べたら今までの逆転の年代が間違ってたってことですか？
先生：そのとおり。NUVEL 1を求めるときに使った最近数百万年以内のいくつかの逆転年代が今まで考えられてたより数万年古いことがわかったんだ。

これはプレートの速さを本当より少し速く見積もり過ぎてたということになるんだけど、それが4.5%というわけなんだ。わかったかい？
 女性：日置くん、先生のお話わかりましたか？
 日置：難しかったけどなんとかわかりました。
 女性：VLBIやってる他のお友達にも教えてあげて

ね。
 日置：はい。ありがとうございました。
 女性：さよなら。
 (電話を切る音)

2. VLBIによる検証～全地球的な検証

さてここでVLBIデータとNUVEL 1の予測値を比べて本当にNUVEL 1が-4.5%違っているのか確かめてみましょう。コダード宇宙飛行センターのVLBIデータ解析グループは、毎年それまで得られた全部のVLBIデータを同時に解析してレポートしています。その最新版⁴を手にいれ、世界中のVLBI局の速度ベクトルと、NUVEL 1プレートモデルが予測する速度ベクトルと比較してみることにします。ただやみくもに比べるのではなく、プレートの変形のおそれがある境界から500kmの部分を取り除いた安定な地面の上にあると思われる局(全部で15局)を取り出し、それらの予測速度と観測速度がなるべく一致するようにVLBIで観測された速度を3次元空間内で回転、平行移動してやります。そうして得られた予測と観測の違いを速度残差と呼びます。予測値にNUVEL 1をそのまま用いると、

レファレンスに使った15局の速度残差は南北、東西がそれぞれ1mm/年弱、上下が2mm/年強となります(図1a)。つぎにNUVEL 1モデルに「補正」を施してやります。ここでは-10%から1%刻みで+10%までいろんな値の補正を行って、オリジナルの時と同じ3次元空間内の回転/平行移動を行い、残差を求めます。もしNUVEL 1が本当に-4.5%間違っているのなら、丁度それくらいの補正を行ったときに残差が一番小さくなる、つまり予測と観測が一番良く合うはずです。図1bには横軸に補正の割合、縦軸に全体の残差と成分毎の残差をプロットしてあります。あれ？ちょっとおかしいですね。本当なら-4.5%のところでは残差は最小にならなければいけないのに逆にプラス3%程度の所に極小があります。次にこれを別のアプローチで確かめてみましょう。

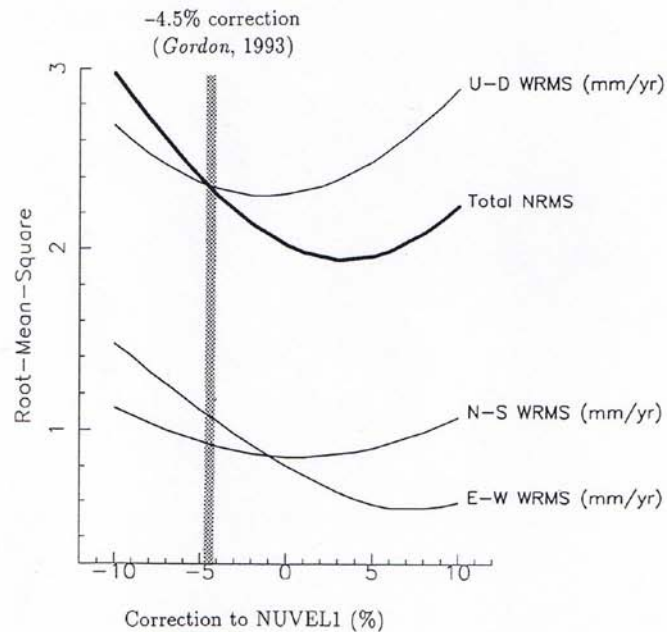
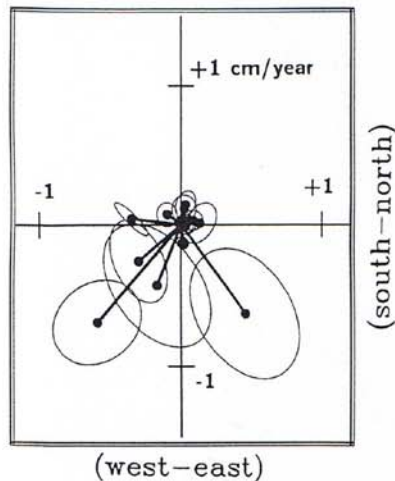


図1a. 安定な15のVLBI局について観測速度と予測速度の差をプロットしたもの。 図1b. NUVEL 1に様々な補正(横軸)を施して、予測と観測の速度残差(3成分と全体)の変化を見たもの。

3. VLBIによる検証～特定プレートによる検証

前の章ではプレートの動き全体に対する補正をみたのですが、次に個々のプレートについて同じような議論をしてみましょう。とはいっても全部のプレート

の上に十分な数のVLBI局があるわけではありません。ここでは比較的数字がそろっている北米-ユーラシア、北米-太平洋の二つのペアについてプレートの相

対運動の速さをVLBIから求めて、NUVEL 1のオリジナルの速さと比べてみましょう。

数学的な取扱いは次のようにします。まず北米プレートの安定な部分にのっかってるVLBI局を6局取り出して、それらの動きが全体として最もゼロに近くなるように世界中のVLBI局の速度に再度3次元の回転/平行移動を与えます。そうやって得られたVLBI局の速度ベクトルは北米プレートの上に乗った人から見た速度と考えてよいのです。プレートの動きというのは、ある極(オイラー極といいます)を中心とした数百万年に 1° というゆっくりした回転運動として表現できます。北米-ユーラシアの運動パラメータを求める場合は、ヨーロッパの地中海地方を除いた安定な部分のVLBI局が、地球上の「どの極のまわりに」、「どれくらいの角速度で」回転しているかをパラメータ推定すれば良いわけです。

図2はこうやって推定した北米-ユーラシア(左上)、北米-太平洋(右上)のオイラー局の位置とその 2σ 誤差楕円を、現行標準モデルであるNUVEL 1および一世代前の標準モデルであるRM2⁵の、極位置と 2σ 誤差楕円とを比較したものです。VLBIの極位置誤差楕円がずいぶんひしゃげているのが目につきます。これは広大なユーラシアプレートに対してVLBI局の分布が西欧に限られているという幾何学的な条

件の悪さからくるもので、シベリアあたりにもう一局あったら誤差楕円はずっとカッコ良くなるはずですが。

それでもVLBIによる極位置と地質学的なモデルの極位置は 2σ の範囲内では一致しており、統計的に有意な差はないと考えてよいでしょう。そこで次に極位置をNUVEL 1のそれと一致させて固定し、回転速度だけを推定してみます。これによって極位置と回転率の両方を推定したときより推定精度はずっと良くなります。推定された回転率を 2σ の誤差範囲と共にNUVEL 1、RM2の二モデルと比較してみます(図2下)。北米-太平洋、北米-ユーラシアのどちらについてもVLBIの結果はNUVEL 1より数%速い回転率を示し、前章でプレート全体を見たときと同じ傾向となります。

これはいったいどういうことなのでしょう? NUVEL 1が4.5%速すぎるという情報は嘘だったのでしょうか? K-Ar法より信頼性の高いAr-Ar法を使って、地磁気逆転そのものを記録している火山岩の年代を決め直したところ、やはり以前知られていた年代より数万年古くなったというはなし⁶もありますから、NUVEL 1が4.5%の系統誤差を含んでいることはおそらく確かだろうと思われれます。だとすると残された可能性は二つあります。一つはNUVEL 1

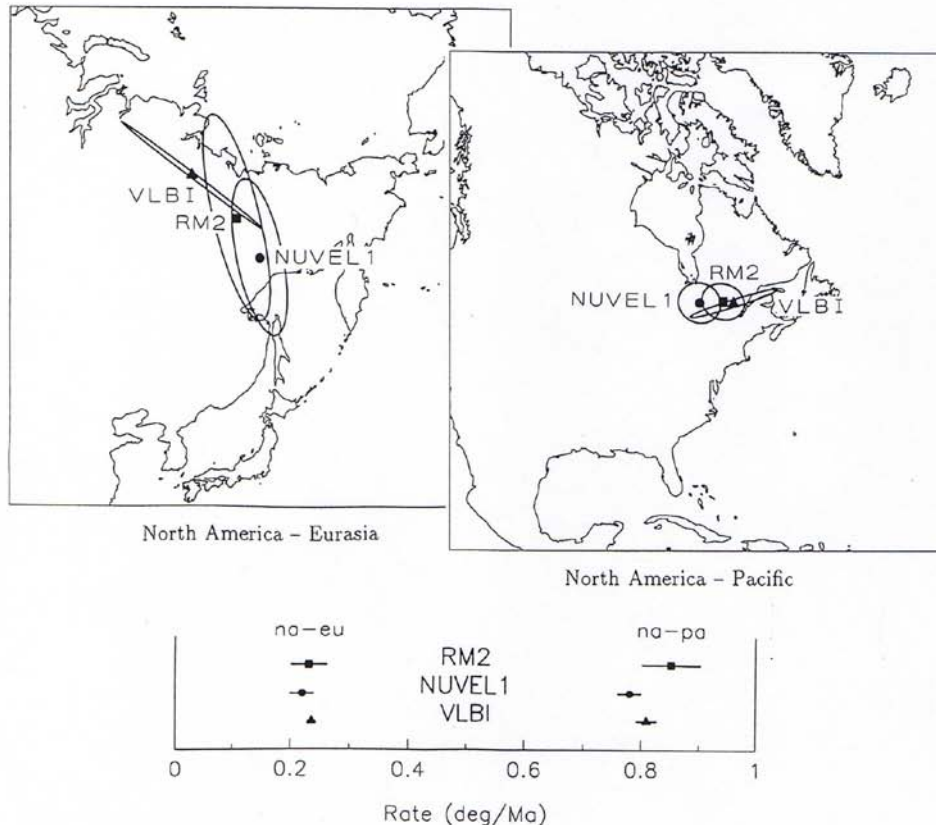


図2. VLBIデータから推定したオイラー極とプレート運動モデルのオイラー極。誤差はすべて 2σ 。下の図で示すVLBIデータは極位置をNUVEL 1と同じに固定して回転速度のみを推定したときのもの。

のランダム誤差です。図2下を見て気がつくようにNUVEL 1の4.5%といってもNUVEL 1そのものの2σ誤差と同じぐらいなのです。4.5%の誤差を云々する前にNUVEL 1の精度を上げて出直してこいというわけです。もう一つはプレート運動に数百

万年より短い周期の数%の速度のふらつきがあるという可能性です。NUVEL 1は過去数百万年の「平均」速度ですから、瞬時の速度が平均からずれることはあり得るわけです。もし本当ならなかなかの大発見なのですが...

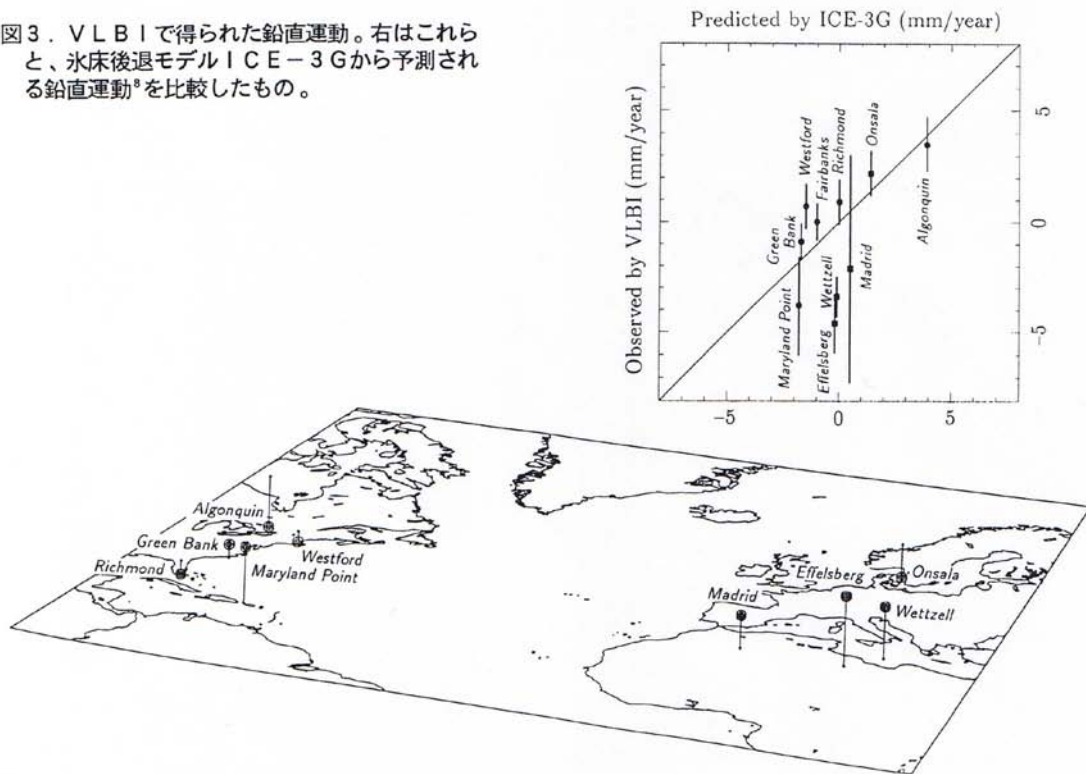
4. VLBIによる鉛直運動の検出

プレート運動というのは水平運動ですが、では鉛直運動というものはあるのでしょうか？またそれはVLBIで見えるのでしょうか？鉛直運動をもたらす最大のは氷床の後退に伴うアイソスタシー回復運動です。最終氷期が終わってからスカンジナビアや北米にあった巨大な氷床は大幅に縮小しました。巨大な質量を持つ氷床が取り除かれるということは、今までその下にあった大地がむくむくと隆起を始めるということを意味します。むくむく隆起するために必要な中身はまわりから取り込みます。そこで隆起地域のまわりに沈降帯が生じます。また消えた氷床は海水の増加になるので海底とその周辺も沈降します。この隆起沈降は地球内部の物性を知る良い手がかりになるので従来から良く研究されています。

世界中の海水面変動のデータを最も良く説明する氷

床後退モデル⁷から、北米東部とヨーロッパ北部のVLBI局の鉛直運動が予測できます⁸。第二章で述べた方法ではVLBI局の水平速度だけでなく上下速度も得られます。図3はそこで得られた北米東部とヨーロッパのVLBI局の上下速度を示します。図3の右上にはこれらの観測速度と氷床後退から予測される上下速度を比較したものを示します。これらはすべて年間数mm以下という微小なものであるにもかかわらず、両者には有意な相関が見られます。国際測地VLBIが本格化して一年後に太平洋プレートの運動という水平運動が観測されたのと同じように、開始十年を経た今日、信号が一桁小さい上下運動が観測にかかり始めたと言ってよいかもしれません。

図3 VLBIで得られた鉛直運動。右はこれらと、氷床後退モデルICE-3Gから予測される鉛直運動⁸を比較したもの。



参考文献

¹DeMets, C. et al., Geophys. J. Int., 101, 425, 1990.
²Gordon, R. G., Nature, 364, 760, 1993.
³J. インブリー他、「氷河時代の謎を解く」、岩波書店
⁴Ryan, J. W. et al., NASA Tech. Mem., 104572, 1993.
⁵Minster, J. B. and Jordan, T. H., J. Geophys. Res., 83, 5331, 1978.

⁶Baksi, A. et al., Science, 256, 356, 1992.
⁷Tushingham, A. M. and W. R. Peltier, J. Geophys. Res., 96, 4497, 1991.
⁸James, T. S. and A. Lambert, Geophys. Res. Lett., 20, 871, 1993.