

固体地球シミュレーション

陰山 聡

海洋科学技術センター 横浜研究所 地球シミュレータセンター
固体地球シミュレーション研究グループ
Email: kage@jamstec.go.jp

1 固体地球科学とは

固体地球科学の研究対象は、地球内部の構造とダイナミクスである。固体地球という言葉は、動きの全くない、静かなイメージを抱かせるが、実は地球内部は、今この瞬間にもダイナミックに動き、流れている。「固体が流れる」というのは奇異に感じられるかもしれない。しかし、十分に長い時間スケールで見れば、固体も液体と同様に流れ得ることは水河を見れば分かるであろう。地球全体の体積の80%以上を占めるマントルは岩石でできているので、物質の相としては固体だが、地球内部の熱を外に捨てるために対流運動（マントル対流）をしている。マントル対流の駆動源は、地球内部に蓄えられた地球形成時の熱と、放射性同位元素である。

マントル対流は、地球表面にプレートと呼ばれる薄板状の剛体構造を形成し、その動きを誘起している。このプレート運動が、地震や火山活動を引き起こす直接の原因である。プレート運動は、理論的に推測され、長年、間接的な証拠しかなかったが、最近ではGPS等の技術を用いてそのゆっくりとした動き（1年で数mmから十数cmの速度）が直接観測されている。従って、地球内部のマントル対流も同程度の速さ（つまり10cm/年のオーダー）で流れていると考えられる。日常生活の時間スケールでは、これは「速さ」と呼ぶのがためらわれるほどのゆっくりとした動きだが、46億年の歴史を持つ地球にとっては十分に「激しい」動きと言える。

地球表面は、全部で十数枚のプレートで覆われている。それらのプレートが、互いに別々の方向に動き、ぶつかり合ったり、すれ違ったりするところで地震や火山活動が起きている。これがプレートテクトニクス理論である。例えば東太平洋海嶺で生まれたプレートは、東と西に分かれて動いていく。西に向かったプレートは、1億年以上かかって日本列島の近くまで移動し、日本海溝で陸側のプレートの下にもぐり込む。沈み込み帯と呼ばれるこの領域では、壮大なスケールでの摩擦と破壊現象が起きている。これが多くの地震の原因と考えられている。

現在、プレートテクトニクスは、マントル対流の一

部（その表面部分に現れた冷たく堅い境界層）として包括的に理解されようとしている。しかしながら、観測されているようなプレートの構造や挙動を説明するようなマントル理論モデルはなく、また実験室や計算機シミュレーションでの再現に成功した人もいない。固体地球科学の最前線の一つがここにある。

マントルのさらに下、つまり地球中心には、コアと呼ばれる領域がある。マントルは岩石だが、コアは鉄でできている。はるか46億年前、地球が形成された時には、コアの鉄はその全てが高温のためにどろどろに溶けていた。そして、地球全体が次第に冷えていくに従い、コアの温度も下がり、現在でもその一部が少しずつ固化している。地球中心に近いほど圧力が高いので、コアの鉄の固化は地球の中心部分から進行している。固体化したコアの領域は地球の中心（内側のコア）にあるので内核、外側にあるまだ液体状の部分（つまり外側のコア）は外核と呼ばれている。

外核の半径は約3500キロである。地球の半径は約6400キロだから、コアは非常に深いところにあるわけである。我々の足下にあるとは言え、これほど遠いところに存在するコアの鉄だが、意外なことに、我々の日常生活に直接的な影響を及ぼしている。それは、地球の磁場（地磁気）が、外核中のMHD (Magnetohydrodynamics) ダイナモ機構を通じて生成されているからである。MHD ダイナモによっていかにして双極子磁場が生成されるかという物理機構については、我々の論文 [1] を参照して頂きたい。

2 陰陽（インヤン）格子

2.1 緯度経度格子の問題点

地磁気ダイナモのシミュレーションや、あるいは最近我々のグループ（地球シミュレータセンター、固体地球シミュレーション研究グループ）でも始めたマントル対流のシミュレーションでは、球殻ジオメトリの下で流体の時間発展方程式を有限差分法で解いている。差分化するにあたり、少し前まで我々は、普通の球座標上の格子系を用いていた。これは球面上に等間隔に引いた緯度線と経度線の交点をとった格子系である（図

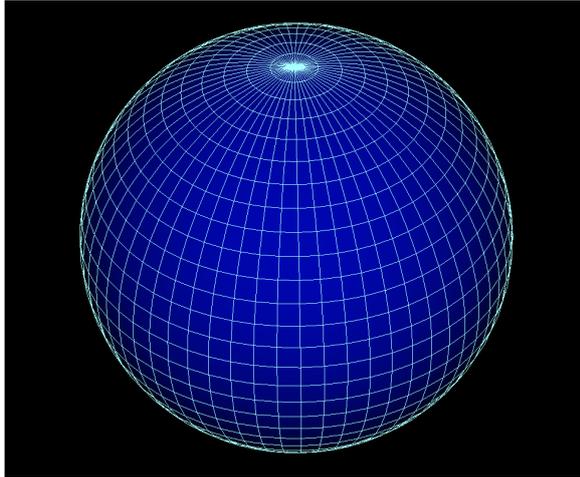


図 1: 緯度経度格子

1 参照)。しかしこの緯度経度格子系では、北極と南極近くに格子点が集まりすぎ、その分だけ低緯度部分（赤道近く）が粗くなるという欠点があった。これはシミュレーションの計算上効率が悪い。

緯度経度格子系がもつこの欠点を克服するために、最近私は「陰陽（インヤン）格子」という新たな格子系を考案した [2]。我々のグループでは、今では地磁気ダイナモとマントル対流のどちらのシミュレーションコードも、この陰陽（インヤン）格子で計算している。

陰陽格子とは、図 2 に示したように、全く同じ形をした二つの要素格子を二つ（イン格子とヤン格子）組み合わせ、球面全体を覆った格子系である。要素的格子を複数合わせて計算領域全体を覆うこのような格子形成手法は一般にキメラ法と呼ばれる。

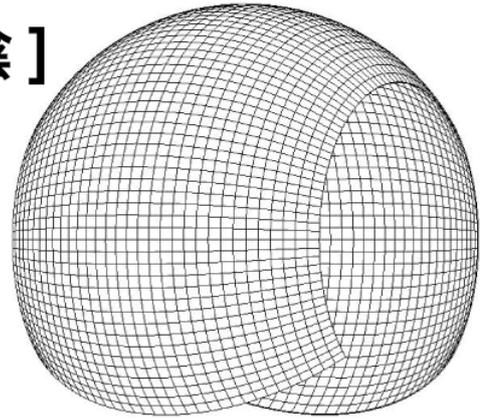
2.2 キメラの一種としての陰陽格子

キメラ格子 (Chimera grid または overset grid または overlaid grid) とは、複数の要素格子を用いて計算領域全体を覆う複合型の格子の一種である。要素格子同士はその境界部分で部分的に重なり合っている。一つの要素格子の境界上の値は、他の要素格子の値から補間により求める。

球の 2 次元表面を覆うキメラ格子には無数のバリエーションが考えられるが、要素格子の数が多いと補間計算の負荷が増えるので、その数は最小値の 2 が望ましい。二つの要素格子だけで球面を覆う方法もまた無数に存在するであろうが、全く同じ形の二つの要素格子で球面を覆うことができれば、プログラムが簡単になるし、何よりエレガントであろう。また、計算速度を考えると、要素格子は直交系であるべきである。

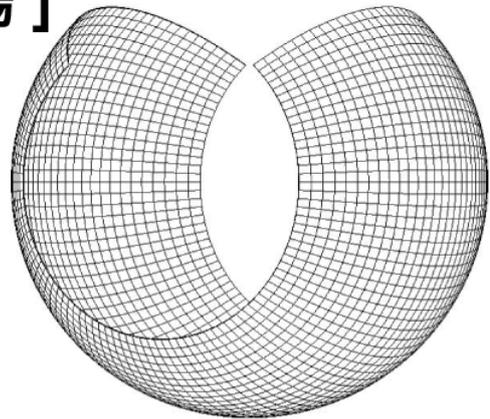
陰陽（インヤン）格子はこのような条件を満たしている。陰陽格子の要素格子は、通常の球座標の低緯度の一部に他ならない。緯度方向には赤道付近の南北

[陰]



+

[陽]



||

[陰陽]

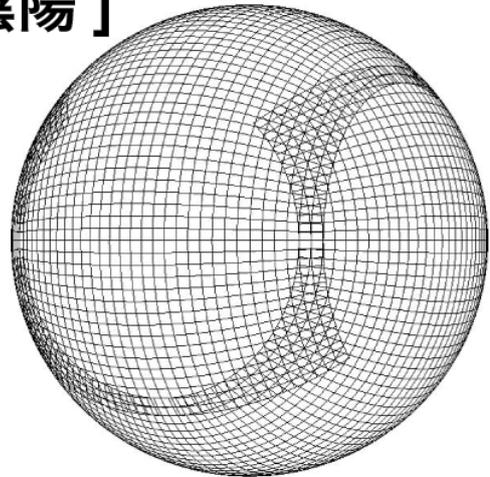


図 2: 陰陽（インヤン）格子

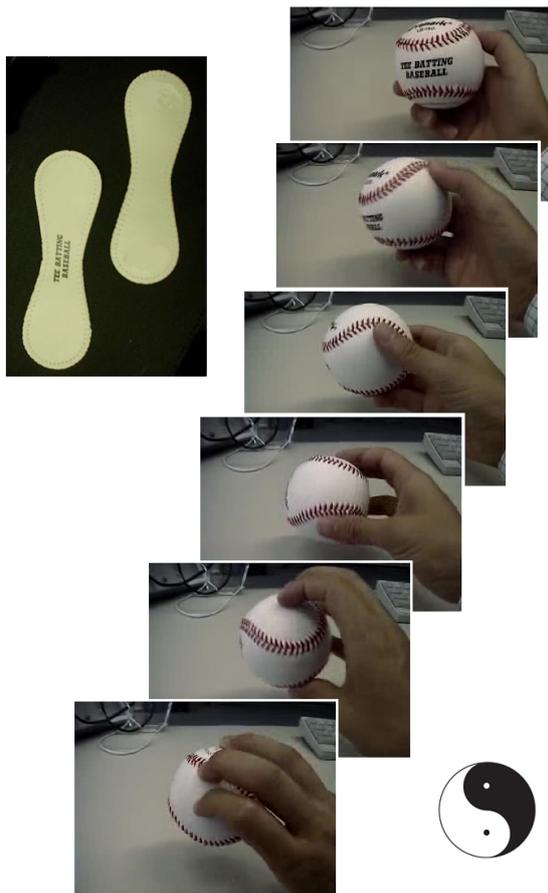


図 3: 野球のボールは、2枚の合同な布を縫い合わせて作られている。その縫い目は1本である。野球ボールは、図右下にある陰陽思想のシンボルマーク（その3次元拡張版）を連想させる。

90度、経度方向には270度の領域を抜き出したものである(図2の一番上)。これは球座標の一部なので当然直交系であり、格子間隔の極端な不均一性は持たないので計算効率が高い。この要素格子の全く同じものをもう一つ用意し(図2の上から二番目)、それを角度をずらして組み合わせたものが陰陽格子である(図2の一番下)。このような組み合わせ方は、野球のボールでも見られる(図3)。

格子の形状と、二つの要素格子の相補的な役割が中国の陰陽思想のシンボル(あるいはその3次元拡張版)を連想させるので、陰陽格子と名付けた。陰陽と書いて「インヤン」と読む。要素格子の「カド」の部分の少し削れば、重複面積を最小化させることは可能だが、今はベクトル・並列化の効率を優先させている。

上述のように、地球シミュレータセンターの固体地球シミュレーショングループでは、陰陽格子を使った地



図 4: 陰陽格子によるコア対流のシミュレーション。地球シミュレータセンターのCAVEシステムBRAVEを使った解析の様子。

磁気ダイナモの3次元シミュレーションコード、及びマントル対流シミュレーションコードを開発している。図4は、陰陽格子で計算したコア内部の対流パターンを、地球シミュレータセンターのCAVE装置“BRAVE”で、VR可視化ソフトVFIVE [3]を用いて解析している様子である。また、地球シミュレータセンターの他のグループ(ホリステックシミュレーショングループ)では、陰陽格子に基づいた大気・海洋シミュレーションコードを開発中である [4, 5, 6]。

参考文献

- [1] Kageyama, A. and Sato T.: Generation mechanism of the dipole field by a magnetohydrodynamic dynamo, *Phys. Rev. E*, Vol.55, pp.4617-4626 (1997)
- [2] 陰山 聡: 陰陽格子の開発, 第17回数値流体力学講演論文集, (2003), C8-1
- [3] Kageyama, A., Tamura, Y., and Sato, T.: Visualization of Vector Field by Virtual Reality, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, Vol. 138, (2000), pp.665-673
- [4] 彭、肖、高橋: 球面上の高精度高効率移流計算, 第17回数値流体力学講演論文集, (2003), C6-1
- [5] 高橋、大平、陰山、渡邊: 陰陽格子における浅水波方程式による力学的検証, 第17回数値流体力学講演論文集, (2003), C6-2
- [6] 小峯、高橋、陰山、渡邊: 陰陽格子法を用いた全球・非静力学大気モデルの開発, 第17回数値流体力学講演論文集, (2003), C6-3