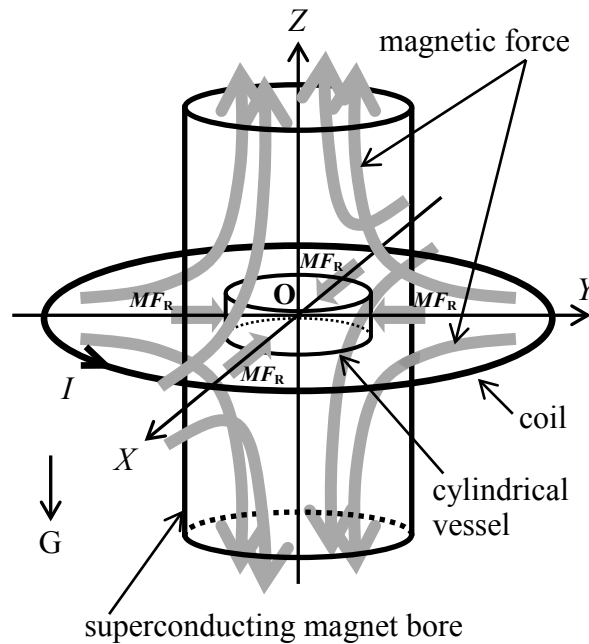


13 マグネット中心で軸対称磁気力が印加された円筒容器内の水のベナール対流(動画 29-32)

<解説>

ソレノイダルの超伝導マグネット内では、磁気力はボアに対し軸対称に作用する。磁気力の半径方向成分は中心軸に近づくにつれ弱くなり、中心軸上 ($r = 0$) ではゼロになる。以下の模式図に示したように、磁気力の向きは、円コイル中心を通る水平面に対して面对称となる。



いま、水を想定した流体を扁平な円筒容器に入れ、上面冷却・下面加熱の Rayleigh-Benard 対流を三次元数値計算した。容器のアスペクト比 (直径/高さ) は 8.0、 $Pr = 6.0$ 、 $Ra = 7020$ である。この計算結果は定常解となり、円筒容器の形状に従って軸対称のロールが形成された。

この計算結果を初期条件として用い、強さの異なる 4 通りの磁気力を印加し、熱対流パターンの経時変化を三次元数値計算で調べた。磁気力の強さは容器側面中央で、重力の(A) 5.0 倍、(B) 1.0 倍、(C) 0.5 倍、(D) 0.1 倍、である。磁気力の強さを示す無次元数 γ は、(A) $\gamma = -2665840$ 、(B) $\gamma = -533169$ 、(C) $\gamma = -266584$ 、(D) $\gamma = -53316.9$ である。数値計算は無次元化した基礎方程式、エネルギー式、連続の式を HSMAC 法の陽解法で解いている。(詳細は文献[1]を参照)

<計算結果>

動画は、扁平容器の中央を通る水平方向断面の温度分布を上面から観察したものである。

(A)は最も強い磁気力 (重力の 5 倍) が側面から印加された場合である (動画 29)。容器中央に低温流体が集中し、側壁近傍に高温流体が移動したことが分かる。これは磁気力が体積磁化率 (密度と質量磁化率の積) に比例するため、密度の大きい低温流体ほど磁気力の効果を強く受けるためである。水は反磁性なので低温流体ほど磁気力の弱くなる容器中央に移動し、高温流体は容器周縁部に移動するのである。

(B)は重力と等倍の磁気力が印加された場合である (動画 30)。(A)と同様に容器中央に低温流体が集中し、側壁近傍に高温流体が移動することが分かる。ただし、磁気力の力がやや弱いため、

容器中央に低温流体が安定的に保持させることができず、軸対称パターンの生成と破壊が繰り返されている。

(C)は重力と 0.5 倍の磁気力が印加された場合である (動画 31)。容器周辺は高温流体が存在するが、容器中心付近に低温流体を移送するほど磁気力の強さが強くない。その結果、流れは不安定のまま推移し、やがて 3 回対称スポークの対流パターンが出現した。

(D)は重力と 0.1 倍の磁気力が印加された場合である (動画 32)。これは(C)の場合よりも磁気力が弱い場合である。容器周辺にのみ高温流体を保持できたが、容器中心付近にも高温流体が集中しているのが判る。これは磁気力の強さが弱すぎるので、低温流体を中心に移動させることができず、初期条件の Rayleigh-Benard 対流のパターンが維持されているためと思われる。対流は 3 回対称スポークパターンとなり、定常解に至った。

類似したスポークパターンはアスペクト比が 10 の場合でも出現した。詳細は文献[2]を参照されたい。

<実施場所>

独立行政法人 産業技術総合研究所関西センター

<論文>

[1] S. Maki and M. Ataka,

“Three-dimensional computation of convection of water at the center of a superconducting magnet,”
Physics of Fluids **17**, pp.087107-1 – 087107-7 (2005).

[2] S. Maki, M. Sumitani, C. Udagawa, S. Morimoto, and Y. Tanimoto,

“Numerical pattern formation on magnetothermal convection of diamagnetic liquids in a cylindrical vessel of Rayleigh-Benard model; effects of axisymmetric horizontal magnetic forces on vertical magnetic forces”,

Journal of the Physical Society of Japan **83**, 074401-1-10 (2014).