

Rubie(2004) Partitioning of oxygen during core formation on the Earth and Mars の再現と考察

菖蒲迫 健介

2020 年 7 月 28 日

目的

Rubie(2004) 中のグラフの再現を通して、コア形成時の酸素分配についての理解を深める。また L^AT_EX の使い方について学ぶ。

導入

地球型惑星である火星と地球はともに金属核と主に橄欖岩からなるマントルを持っていると考えられている [1]。地球のマントル内には約 8 重量 % の FeO が存在し、火星には約 18 重量 % の割合で FeO が存在する。このマントル内の FeO 成分の重量割合の違いを説明できれば、地球・火星形成時の当時の環境の再現に制約を加えることができるかもしれない。形成時の環境を再現することは、地球型惑星の進化という点において非常に重要である。現在のマントル成分の違いは、もちろん集積物質が大きく関係しているだろうが、今回はより問題を単純化して、惑星形成時のマグマオーシャンでの酸化鉄の分化作用の違いによって、現在のマントルの FeO 成分の重量割合を説明したい。

1 iron-wüstite 反応での酸素フガシティーと酸素溶解度の関係

次の表 1 は、本文中の Table1 と同じものである。この表 1 の酸素フガシティー ($\log f_{O_2}$) と酸素溶解度を用いて、下の図 1 を作成した。圧力が 9GPa の結果を用いた。この結果から、酸素フガシティーが高いほど（つまり、酸素の量が多いほど）液体金属中により酸素が分配されることが分かった。また、本文の Figure1a での曲線はここでは書いていないが、酸素フガシティーを調整することで書くことができる。

2 $\ln K_d(\text{liquid metal/magnesiowüstite})$ と圧力の関係

表 1 の 2473K での圧力 (GPa) と $\ln K_d$ のデータを用いて、図 1b を作成した。ここで、本文中の Ref.15 のデータは除いている。この図には、2473K での 9GPa と 18GPa のそれぞれの $\ln K_d$ の値をプロットしている。図 1b 中の黄色の直線は本文中式 (2) で表現される

$$RT \ln K_d = -\Delta H + T\Delta S - p\Delta V \quad (1)$$

Fig.1 (a) oxygen content in liquid Fe-alloy (9GPa)

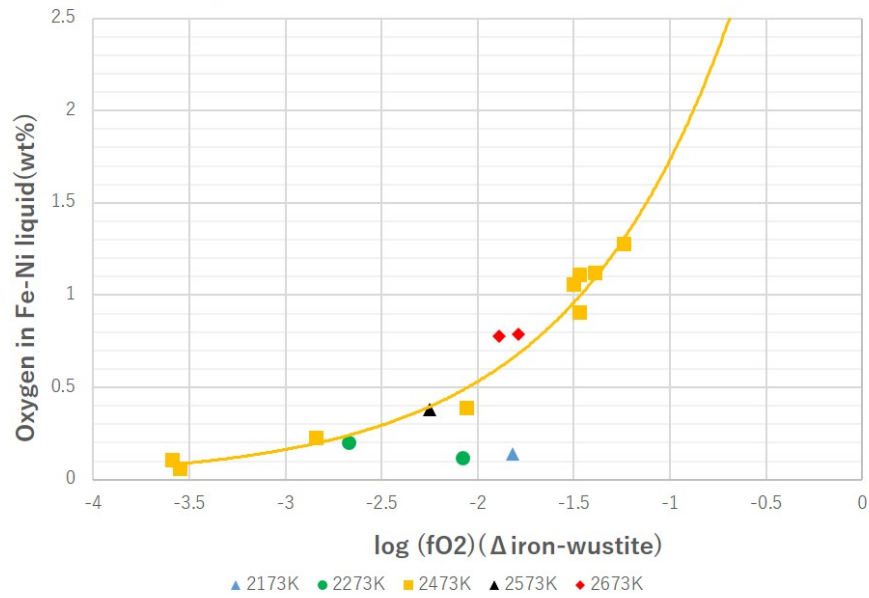


图 1: Oxygen solubility(wt%) vs $\log fO_2$

Fig.1 (b) $\ln K_d$ (liquid metal/magnesiowustite) (2473K)

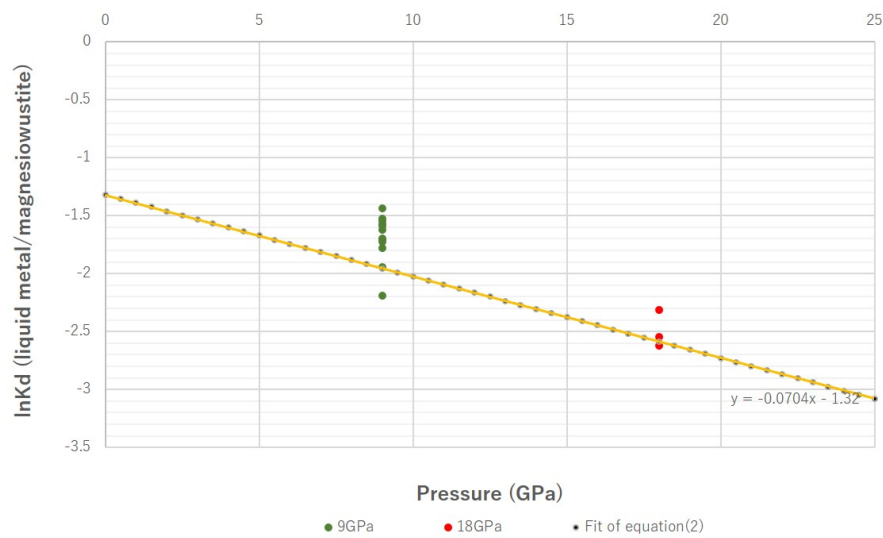


图 2: $\ln K_d$ (liquid metal/magnesiowüstite) vs Pressure(GPa) (2473K)

表 1: Experimental conditions and results

Run number	Temperature(K)	Pressure(GPa)	$\log f_{O_2}$	Oxygen(wt%)	$\ln K_d$
1549	2173	9	-1.82	0.14	-3.218
1558	2273	9	-2.08	0.12	-3.077
1358	2273	9	-2.67	0.2	-1.903
1203	2473	9	-3.59	0.11	-1.525
1186	2473	9	-2.06	0.39	-1.945
1316	2473	9	-3.55	0.06	-2.189
1210	2473	9	-1.47	0.91	-1.776
1218	2473	9	-2.84	0.23	-1.574
1383	2473	9	-1.47	1.11	-1.585
1194	2473	9	-1.24	1.28	-1.704
1371	2473	9	-1.39	1.12	-1.7
1352	2473	9	-1.5	1.06	-1.62
1547	2573	9	-2.25	0.38	-1.721
1312	2673	9	-1.89	0.78	-1.435
1551	2673	9	-1.79	0.79	-1.549
1273	2473	18	-2.32	0.14	-2.621
1275	2473	18	-2.08	0.27	-2.314
1285	2473	18	-1.12	0.62	-2.545

の関係を用いて外挿したものである.

ここで以下では, 次の値を定数として扱う.

$$\begin{aligned}
 \text{エンタルピー変化 } \Delta H (\text{J/mol}) &= 153,000 \\
 \text{エントロピー変化 } \Delta S (\text{J/K} \cdot \text{mol}) &= 50.9 \\
 \text{体積変化 } \Delta V (\text{J/GPa}) &= 1,448
 \end{aligned}$$

今, $T = 2473\text{K}$ であるから, これらの値を式 (1) に代入して整理すると

$$\ln K_d = -0.0704p - 1.32 \quad (2)$$

となり, これが図 1b 中の直線である. ここで,

$$K_d = \frac{X_{Fe}^{met} X_O^{met}}{X_{FeO}^{mw}} \quad (3)$$

であったことを思い出すと, 圧力の増加に伴って, $\ln K_d$ が減少するということは, すなわち, 液体金属よりも mw のほうにより酸素が分配される, つまり, 酸素がコアよりもマントルの方に分配されることを示している. これは意外な結果である [2].

3 $\ln K'_d(\text{liquid metal/silicate})$ と温度の関係

表 1 からは, 温度と $\ln K_d(\text{liquid metal/magnesiowüstite})$ の関係は分かるが, 温度と $\ln K'_d(\text{liquid metal/silicate})$ の関係はわからない*¹. ここでは, $\ln K'_d$ について知りたいので, 実験によって得られた本文中の式 (3) にあたる

$$X_{FeO}^{mw} = 1.148X_{FeO}^{sil} + 1.319(X_{FeO}^{sil})^2 \quad (4)$$

を用いて, $\ln K'_d$ と $\ln K_d$ を関係づける. 以下はその計算内容である.

$$K'_d = \frac{X_{Fe}^{met} X_O^{met}}{X_{FeO}^{sil}} \quad (5)$$

に式 (3) を代入して,

$$K'_d = \frac{K_d X_{FeO}^{mw}}{X_{FeO}^{sil}} \quad (6)$$

両辺に自然対数をとって

$$\ln K'_d = \ln K_d + \ln X_{FeO}^{mw} - \ln X_{FeO}^{sil} \quad (7)$$

ここで, 式 (4) について X_{FeO}^{sil} について解くと,

$$X_{FeO}^{sil} = \frac{-0.87035 + \sqrt{0.75752 + 3.326(X_{FeO}^{mw})}}{2} \quad (8)$$

以上から, 求めたい $\ln K'_d$ が, 式 (7) と (8) を用いて次のような X_{FeO}^{mw} に関係した形に書ける.

$$\ln K'_d = \ln K_d + \ln X_{FeO}^{mw} - \ln \frac{-0.87035 + \sqrt{0.75752 + 3.326(X_{FeO}^{mw})}}{2} \quad (9)$$

この式 (9) には, magnesiowüstite 中の FeO のモル分率が変数として含まれている. Supplementary Information 2 から一つ一つの実験データに基づいてこれらを計算できるかもしれないが, ここではより簡単に以下の 3 つのモル分率について考えてみた. さらに, 9GPa のデータ以外にも 18GPa のデータについても, 図に書き入れた (そのようにした方がより本文中の図と整合性があった). また, 図 3-6 中の曲線は, 式 (1) について $\Delta H, \Delta S, \Delta V$ を一定とした

$$\ln K_d = \frac{1}{T}(-174.15p - 18401) + 6.1219 \quad (10)$$

*¹ 本文では $\ln K'_d$ と $\ln K_d$ の区別が明確に用いられていないので注意. ここでは明確に分けて考える.

について, $p = 9 \text{ GPa}$ の時の温度と $\ln K_d$ との関係を表している.

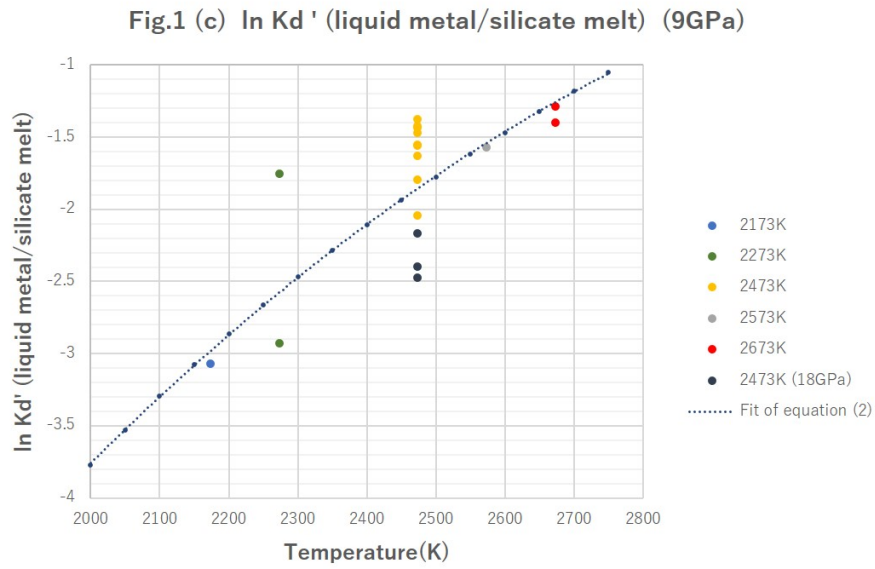


図 3: $X_{FeO}^{mw} = 0.01$ の場合

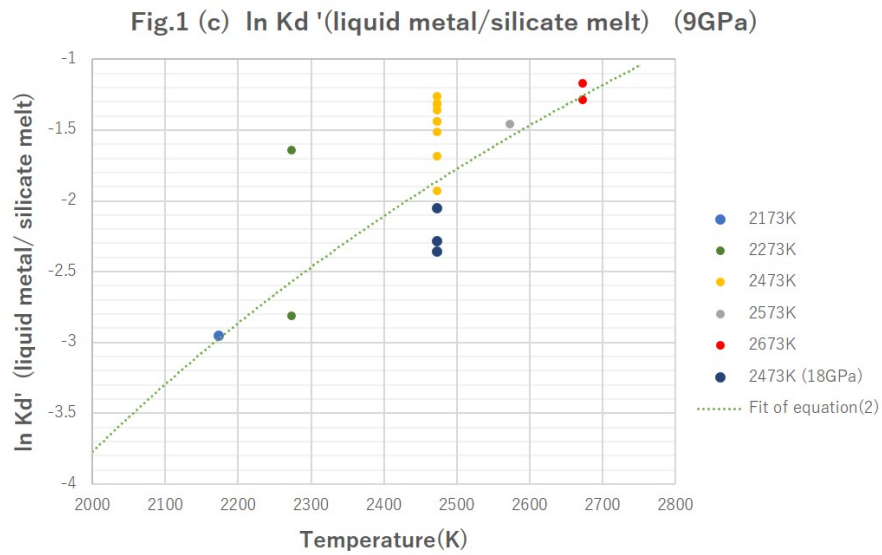


図 4: $X_{FeO}^{mw} = 0.15$ の場合

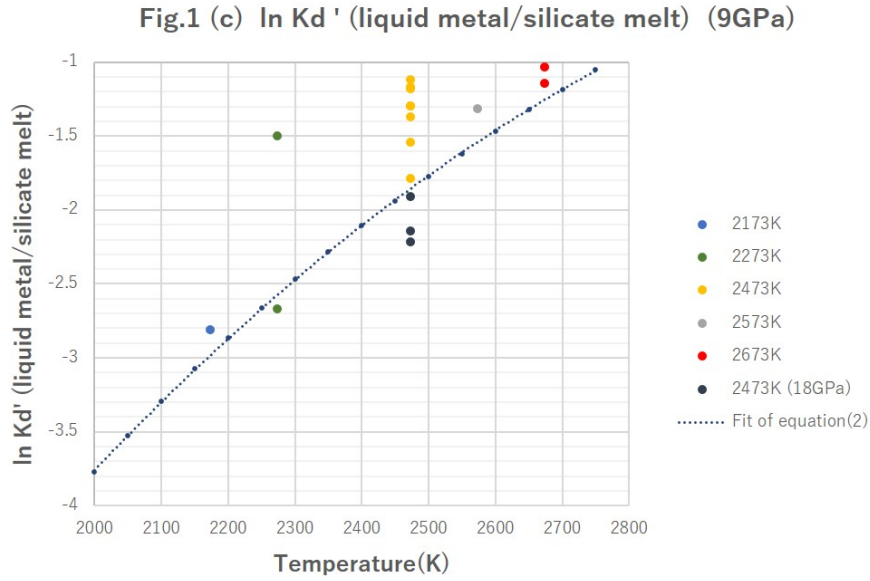


図 5: $X_{FeO}^{mw} = 0.4$ の場合

最も本文の図と整合性があったのは、図 3 の $X_{FeO}^{mw} = 0.15$ の場合であった。 $X_{FeO}^{mw} > 0.4$ では、本文の図とかなり不整合であった（つまり、 $\ln K_d'$ (liquid metal/silicate) の値がかなり大きくなった）。

また、念のため $\ln K_d$ の場合はどうなるのか考えてみた。これは単に表 1 の温度と $\ln K_d$ の関係をプロットしただけである。その結果を図 6 に示す。

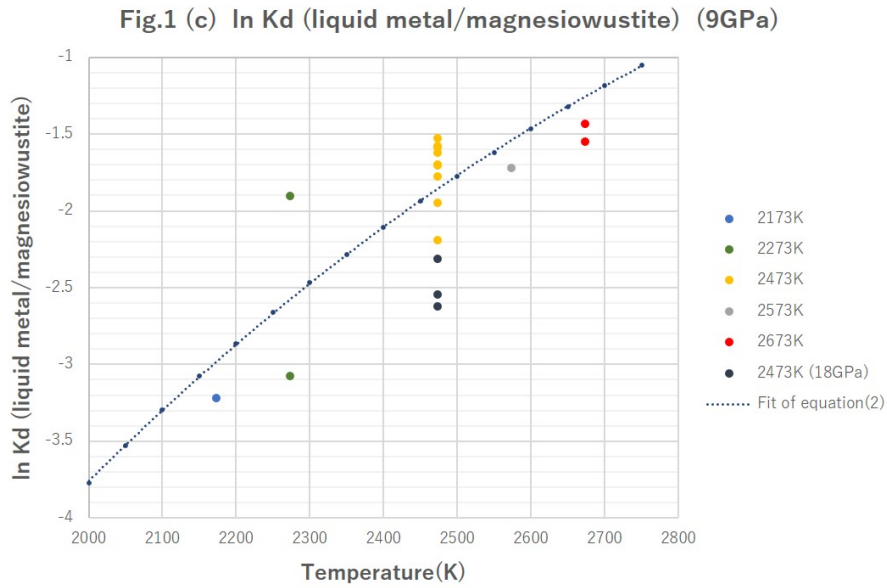


図 6: $\ln K_d$ であった場合

以上の結果から明らかであるように、圧力の場合と異なり、温度の上昇に伴って、 $\ln K'_d$ もしくは $\ln K_d$ は大きくなることが分かった。これの意味することは、昇温により、より酸素がコアへ分配されるということである。 $\ln K'_d$ の温度と圧力の効果は、真逆の酸素分配の傾向を持つようである。どちらがある条件では優位になるのかについて調べてみても面白いだろう。

4 液体金属への酸素溶解度と温度圧力の関係

これまでは実験データに基づいて考えていたが、ここでは温度圧力をさらに大きくしたときの酸素分配の振舞いについて見ていく。ここで、大事になる概念が"酸素フガシティー"である。酸素フガシティーとは、言い換えれば「実在気体の実効的な分圧」のことであり、それは"Oxygen Buffer 反応"のような理想化された条件下では、平衡定数と等しくなる [3]。
まずは、そのことを以下で定式化する。

Iron-wüstite buffer 反応とは、以下の反応 (平衡) であった。



この反応の平衡定数 K_{iw} は活量 a とフガシティー f を用いて、

$$K_{iw} = \frac{(a_{Fe})^2}{(a_{FeO})^2} fO_2 \quad (12)$$

と書くことができる。ここで、 a_{Fe} とは、Iron-wüstite 中の鉄の活量であり、 a_{FeO} は、酸化鉄の活量である。また、 fO_2 は、酸素のフガシティーである。

今、鉄と wüstite 中にそれぞれ不純物がない、つまりどちらも純物質であるような理想的な場合を考えると、活量 a は 1 となるので、式 (12) は、単純に

$$K_{iw} = fO_2 \quad (13)$$

となる。さらに、これは平衡定数であるから、次のようにも書ける。

$$\log K_{iw} = -\frac{\Delta G}{RT} \quad (14)$$

ここで、 G はギブズ自由エネルギー、 R は気体定数、 T は温度である。式 (13)(14) より

$$\log fO_2 = -\frac{\Delta G}{RT} \quad (15)$$

となる。つまり、酸素フガシティーとは、Iron-wüstite buffer 反応の温度圧力によって決まる。これは

$$\log fO_2 = \frac{A}{T} + B + \frac{C(p-1)}{T} \quad (16)$$

のようにも書くことができ、 A, B, C の値は様々な Oxygen Buffer 反応の実験によって求まる定数である。ここで、 p は圧力である。

これはあくまで理想化 ("活量を 1 とした" という理想化) された平衡反応であり、これを種々の鉱物間の酸素分配について応用するために、化学ポテンシャルで考えることにする。式 (11) の反応は、化学ポテンシャルを用いて次のように書ける。

$$2(\mu_{FeO}^* + RT \ln a_{FeO}^w) = 2(\mu_{Fe}^* + RT \ln a_{Fe}^{iron}) + (\mu_{O_2}^* + RT \ln fO_2) \quad (17)$$

ここで、 μ はそれぞれの化学ポテンシャル、 $*$ は"純物質"ということを意味する。これを整理すると、

$$\frac{(a_{Fe}^{iron})^2}{(a_{FeO}^w)^2} fO_2 = \exp \frac{2\mu_{FeO}^* - 2\mu_{Fe}^* - \mu_{O_2}^*}{RT} \quad (18)$$

となり、ここでは理想化されているので、

$$fO_2 = \exp \frac{2\mu_{FeO}^* - 2\mu_{Fe}^* - \mu_{O_2}^*}{RT} \equiv F(T, P) \quad (19)$$

とも書くことができる。

ここで、今回問題にする liquid metal-magnesiowüstite の平衡について考えていく。この反応は以下の反応で書くことができる。



この平衡定数 K_{mw} は^{*2},

$$K_{mw} = \frac{(X_{Fe}^{met})^2}{(X_{FeO}^{mw})^2} fO_2^{mw} \quad (21)$$

式 (21) 中の X はそれぞれの物質中のモル分率 (モル濃度) を示す。活量ではなく、モル分率で考えているのは、この混合物が理想希薄溶液^{*3}であると仮定しているからである。この平衡時の化学ポテンシャルを考えると、

$$2(\mu_{FeO}^* + RT \ln X_{FeO}^{mw}) = 2(\mu_{Fe}^* + RT \ln X_{Fe}^{met}) + (\mu_{O_2}^* + RT \ln fO_2^{mw}) \quad (22)$$

整理すると、

$$\frac{(X_{Fe}^{met})^2}{(X_{FeO}^{mw})^2} fO_2^{mw} = \exp \frac{2\mu_{FeO}^* - 2\mu_{Fe}^* - \mu_{O_2}^*}{RT} = F(T, P) \quad (23)$$

最右辺には、式 (19) を用いた。ここで、理想化された Iron-wüstite buffer 反応では、 $F(T, P) = fO_2$ であったので、現実の鉱物での酸素分配については Iron-wüstite buffer 反応の〇〇桁下もしくは上と条件を指定すると、 $\frac{(X_{Fe}^{met})^2}{(X_{FeO}^{mw})^2}$ の部分が決まり、ここから酸素分配の式 (3) に代入することで、種々の酸素分配が分かることになる。本文では、Iron-wüstite buffer 反応の 2 桁下という指定であったので^{*4}、式 (23) に $fO_2^{mw} = 10^{-2} fO_2 = 10^{-2} F(T, P)$ を代入して、

$$\frac{(X_{Fe}^{met})^2}{(X_{FeO}^{mw})^2} 10^{-2} F(T, P) = F(T, P) \quad (24)$$

$$\frac{X_{Fe}^{met}}{X_{FeO}^{mw}} = 10$$

^{*2} 式 (3) の分配係数 K_d とは違うことに注意！

^{*3} 混合液体において、それぞれの成分の蒸気圧がラウールの法則もしくはヘンリーの法則に従う理想的な溶液

^{*4} この指定が良いのかは分からない

これを式 (3) に代入すると,

$$K_d = 10X_O^{met} \quad (25)$$

ここで, K_d は式 (10) で表されるので, これに式 (24) を代入して

$$\begin{aligned} 10X_O^{met} &= \exp \frac{1}{T}(-174.15p - 18401) + 6.1219 \\ X_O^{met} &= \frac{1}{10} \exp \frac{1}{T}(-174.15p - 18401) + 6.1219 \end{aligned} \quad (26)$$

液体金属中に, O が式 (24) のモル分率で存在するときを考える (これが今回考えている問題であるが⁵). 液体金属中にはニッケルも存在しているが, ここでは無視する^{*5}. この時の液体金属中の酸素の質量分率 (Oxygen Solubility) は, 以下の式で与えられる.

$$\text{Oxygen Solubility(wt\%)} = \frac{15.999X_O^{met}}{55.845(1 - X_O^{met}) + 15.999X_O^{met}} \quad (27)$$

式 (24) と (25) から, 温度圧力と Oxygen solubility の関係をグラフにした.

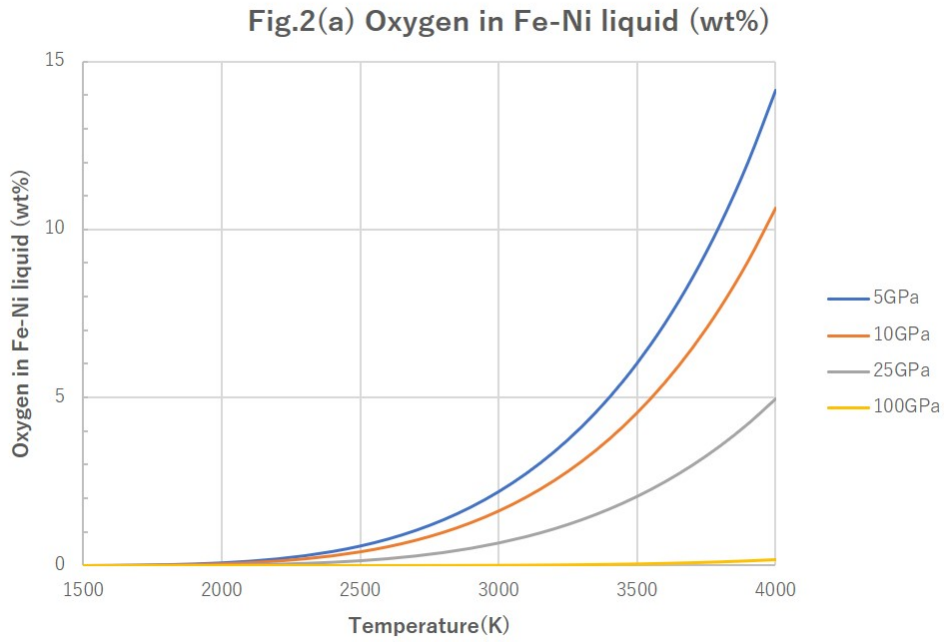


図 7: Oxygen Solubility vs Temperature

^{*5} ニッケルの存在を加味しても平均分子量を考えれば, 結果に問題はない

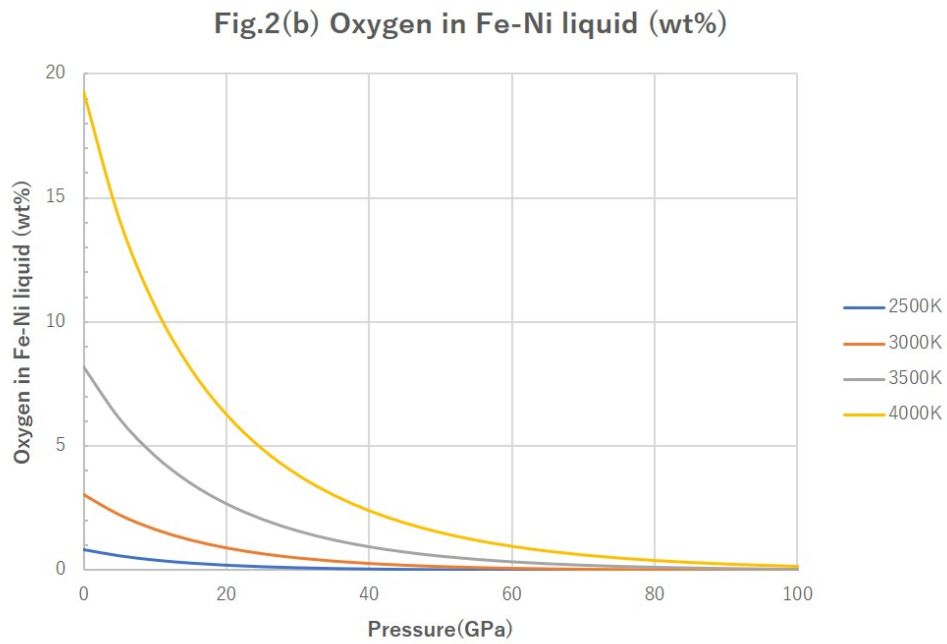


図 8: Oxygen Solubility vs Pressure

このグラフから明らかであるように、酸素溶解度は温度が高いほど大きくなる。しかし、圧力がかなり大きくなると温度をどれだけ高くしても、酸素溶解度は大きくならない。つまり、あまりに圧力が大きいと酸素はコアへはあまり分配されないということである。

5 コアマンタルへの酸素分配の帰結による現在の地球と火星のマンタルの酸化鉄含有量についての説明

ここまではマンタルとコアの酸素分配の傾向を、主に一般的な熱化学の考え方に基づいて調べてきた。以下では、これらを応用して、実際の地球と火星の場合についての酸素分配とその結果について考える。

5.1 モデルの概要 (setting)

1. 表 2 のような組成比を持つ CI コンドライトのみによる集積を考える^{*6}
2. 1 の CI コンドライト中の Fe について、還元的な金属鉄 (Fe^0) が、全 Fe 成分の 10 – 80 wt% の質量割合で含まれる場合をそれぞれ考える
3. 還元的な金属が Fe, Ni のみであるとする (つまり、その他の金属成分はシリケイト中もしくは鉱物中に取り込まれているとする)
4. 1 の CI コンドライト中のシリケイト成分は、 $SiO_2, Al_2O_3, MgO, CaO, FeO$ のみであるとする。
5. マグマオーシャンの底でシリケイト成分の酸化鉄の平衡が起こるとする^{*7}
6. マグマオーシャンの底の温度は、橄欖岩のリキダス [5][6] で決まるとする
7. マグマオーシャン内は静水圧平衡が成り立っているとする
8. マグマオーシャンの底の深さは次のようにしてそれぞれ決める
 - (a) 地球の場合、PREM[7] の Table 2 を用いて密度と深さの関係を計算し、静水圧平衡の式より、圧力と深さを関係づける
 - (b) 火星の場合、橄欖岩の主な鉱物を KLB-1 rock とし、その密度は 3.6 g/cm^3 [8] 一定、重力加速度は Wikipedia より 3.72076 m/s^2 として、静水圧平衡の式より圧力と深さを関係づける
9. 5~8 より、酸化鉄分化の生じる圧力温度の関係を深さの関数として置き換える。
10. 圧力温度条件から、 K_d もしくは K'_d が求まるので、平衡後のシリケイト成分中の FeO の重量比を求めることができる。すなわちこれが現在のマンタル中の FeO 重量比と同等となると考える。

5.2 モデルの計算

まず、還元的な金属鉄が全 Fe 中の 50 wt% 含まれる場合、つまり、CI コンドライト中の鉄成分のうち、50% が Fe 、50% が FeO として存在する場合を考える。この時、CI コンドライト 100g 中のシリケイトと還元的な金属の重量、物質量は表 2 より表 3 に改めて書くことができる。

^{*6} 複雑な Heterogeneous accretion model ではなく、より単純な Homogeneous accretion model に基づいて考えるという意味 [2].

^{*7} この仮定は本文の "polybaric metal-silicate fractionation model[4]" と異なる。定量的な結果は変わるが、定性的な結果は変わらない

表 2: CI コンドライト中の元素存在度 (愛媛大学院理工学研究科ホームページより <http://earth.sci.ehime-u.ac.jp/hrmori/jp1/research.html>)

Element	abundance(wt%)
Si	10.40
Al	0.84
Mg	9.60
Ca	1.01
Ni	1.03
Fe	18.67
S	5.92
H	2.08
Ca	3.61
O	45.61
	98.77

表 3: CI コンドライト 100g 中の重量と物質質量

component	weight(g)	amount of substance(mol)
SiO_2	22.24	0.37037
Al_2O_3	1.586	0.015559
MgO	15.91	0.39488
CaO	5.050	0.090082
FeO	11.98	0.16678
Fe	9.335	0.16717
Ni	1.030	0.017549

ここで、平衡作用によって FeO のみが liquid metal に溶け込んでいけるとする*8. この時平衡に達するまでに Y g が liquid metal に分配されたとすると、マスバランスより、平衡後のシリケイト成分中の FeO と liquid metal 中の Fe, O の重量と物質質量は次のようになる.

component	weight(g)	amount of substance(mol)
FeO	$11.98 - Y$	$(11.98 - Y)/71.83$
Fe	$9.335 + 0.77739Y$	$(9.335 + 0.77739Y)/55.84$
O	$0.22260Y$	$0.22260Y/15.99$

求めたいのは、 FeO (wt%) in residual silicate であり、これは以上より次の関係式で求まる.

*8 その他のシリケイト成分は liquid metal に溶け込めないという仮定である

$$\text{FeO(wt\%)} \text{ in residual silicate} = \frac{11.98 - Y}{22.24 + 1.586 + 15.91 + 5.050 + (11.98 - Y)} \quad (28)$$

したがって、この Y の値を温度圧力条件から求めていく．ここで、全 Fe 成分のうち半分が還元的な金属鉄であるとして今回考えているので、

$$X_{Fe}^{met} = \frac{0.16717 + 0.013921Y}{0.18472 + 0.027842Y} \quad (29)$$

$$X_O^{met} = \frac{0.013921Y}{0.18472 + 0.027842Y} \quad (30)$$

$$X_{FeO}^{sil} = \frac{0.16678 - 0.013921Y}{1.03767 - 0.013912Y} \quad (31)$$

となる．あとで 50wt% 以外の場合も調べるので、より一般化して

$$X_{Fe}^{met} = \frac{a + bY}{c + dY} \quad (32)$$

$$X_O^{met} = \frac{bY}{c + dY} \quad (33)$$

$$X_{FeO}^{sil} = \frac{h - bY}{j - bY} \quad (34)$$

マスバランスを考慮して変数 a から j を決めた．式 (4) についても l,m を用いて

$$X_{FeO}^{mw} = lX_{FeO}^{sil} + m(X_{FeO}^{sil})^2 \quad (35)$$

式 (32)-(35) を用いて平衡定数の式 (3) に代入すると、

$$K_d = \frac{\left(\frac{a+bY}{c+dY}\right)\left(\frac{bY}{c+dY}\right)}{l\left(\frac{h-bY}{j-bY}\right) + m\left(\frac{h-bY}{j-bY}\right)^2} \quad (36)$$

これを頑張って整理すると、

$$\begin{aligned} & \left(K_d b^2 d^2 (l + m) - b^4\right) Y^4 + \left(K_d (b d^2 (-j l - l h - 2 m h) + 2 b^2 c d (l + m)) + 2 b^3 j - a b^3\right) Y^3 \\ & + \left(K_d (d^2 h (j l + m h) - 2 b c d l (h + j) + b^2 c^2 (l + m) - 4 b c d m h) - b^2 j^2 + 2 a b^2 j\right) Y^2 \\ & + \left(K_d (2 c d h (j l + m h) - b c^2 l (h + j) - 2 b c^2 h m) - a b j^2\right) Y \\ & + K_d c^2 h (j l + h m) = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

従って、これは Y についての 4 次方程式となる．ここで K_d は温度圧力により決まる定数であったので、式 (37) は出発物質の組成を決める (つまり、a から m までの定数を決めること) ことで解くことができる．

地球の場合

地球の場合の橄欖岩のリキダスは，次のような鉱物のリキダス相として求めた．

olivine	< 14 GPa
garnet+MW	14~28 GPa
bridgmanite	> 28 GPa

それぞれの鉱物のリキダスは，上部マントル，マントル遷移層での実験結果 [5] と，下部マントル領域での実験結果 [6] から求めた．

火星の場合

火星の場合は，KLB-1 のリキダスを用いた (詳しくはモデルの概要を参照)

5.3 結果

以上の計算結果が図 9 と図 10 である．

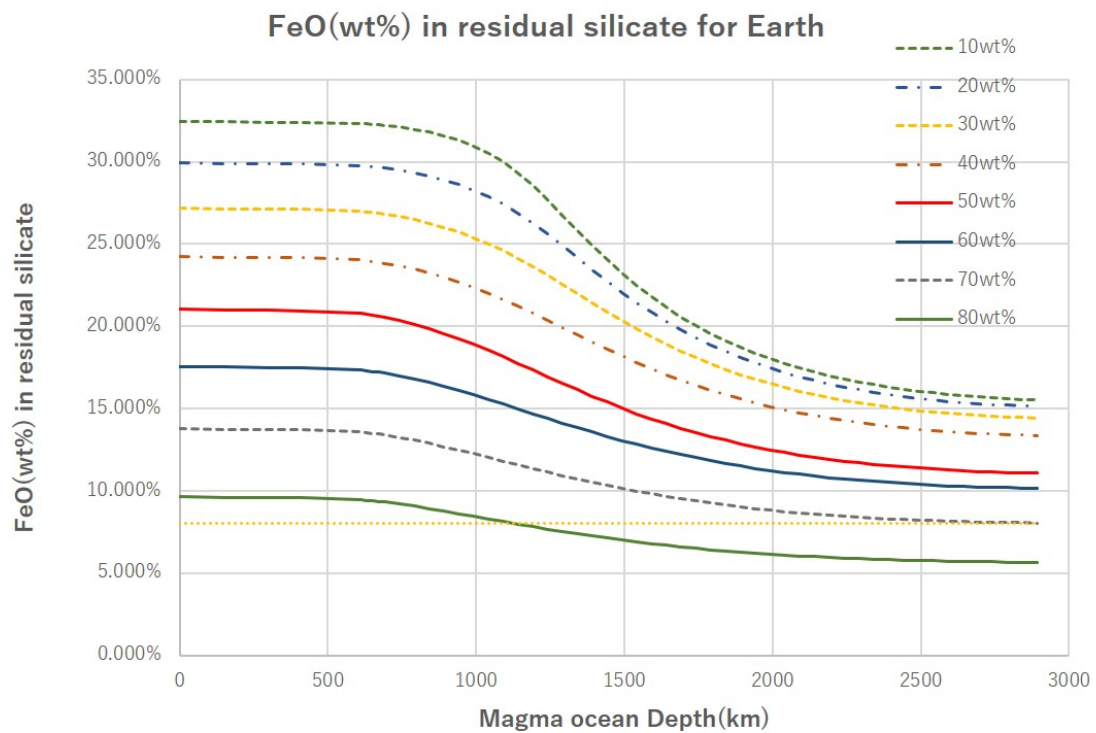


図 9: 地球の場合のマグマオーシャンの深さとシリケイト中の FeO の関係

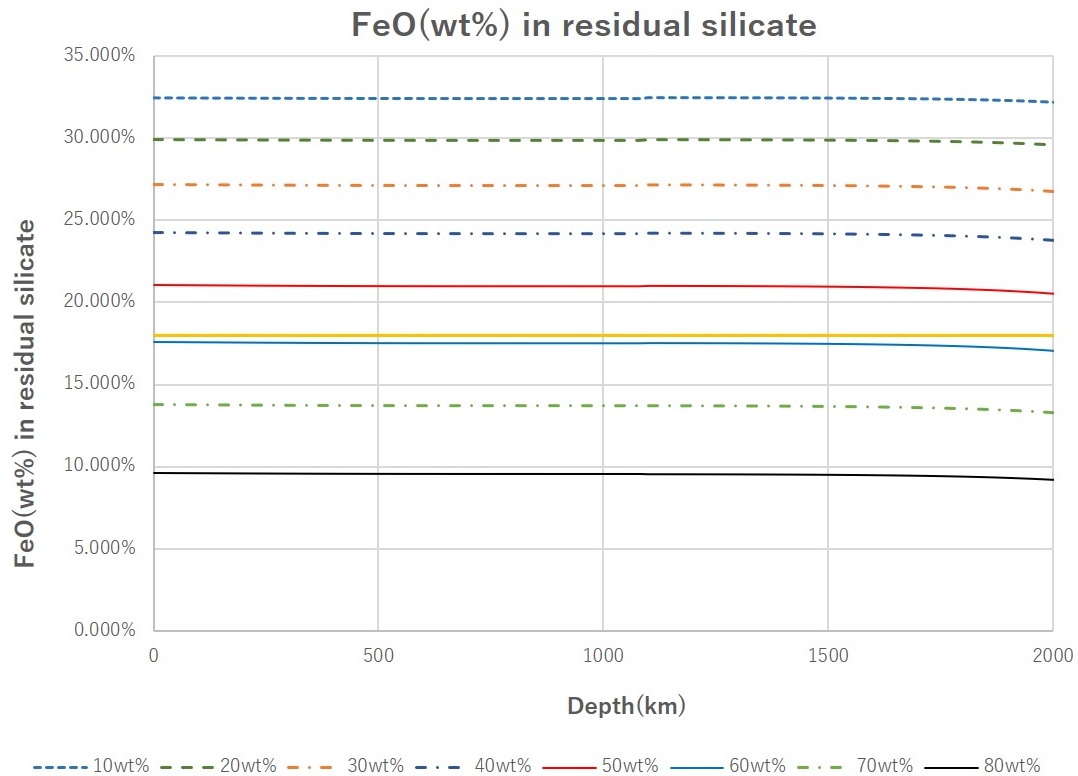


図 10: 火星の場合のマグマオーシャンの深さとシリケート中の FeO の関係

C1 コンドライトは地球マントルに比べてより酸化的である (金属鉄割合が大きい) という本文の説明から、出発組成の FeO 成分が 70,80wt% よりも、60wt% 以下であるほうが適切であるだろう。しかし、地球の場合、かなり本文の図とずれが生じた。これは、CI コンドライトの組成比の違い、また、polybaric metal-silicate fractionation model を考えず、単純に"マグマオーシャンの底で"酸化鉄の平衡が起こったという仮定をしたためだろう。

火星の場合、内部圧力が小さいために地球ほど多くの酸化鉄平衡による酸素分配が生じにくく、シリケート中にそのまま残った可能性が高い。現在の火星のマントルの酸化鉄の重量割合が約 18wt% であることを考えると、出発組成の FeO 成分が 60wt% 程度であると、説明がつく。また、SNC 隕石の研究から火星の圧力温度が地球に比べて小さいことがわかっており、このことによって、地球よりもコアへの酸素分配が小さいということが予想される [9]。以上から、マグマオーシャンでの酸素分配の効果の帰結として、地球に比べて火星の方がマントル内の酸化鉄成分に富んでいる、言い換えれば、核内の鉄の重量割合は地球に比べて火星の方が乏しいということになる。

6 今後の展開について

この論文では、酸素について焦点をあて、コアへの分配の効果によって現在のマントル成分を説明しようとしていた。しかし、実際にはコアには酸素以外にも、水素、炭素、硫黄、窒素などの軽元素 (特に水素) が入っ

ていると言われている [10]. そこで、酸素以外の軽元素についても平衡の計算を行うことで、コア内の軽元素の割合に新たな制約を加えることができるかもしれない。

現在読み進めている論文で、マグマオーシャン内での金属鉄の分化モデルについて書いた、Rubie(2003) Mechanisms of metal-silicate equilibration in the terrestrial magma ocean という論文があり、ここに"polybaric metal-silicate fractionation model" が登場している。これを読んで理解したあとで、再度この計算を行うのも面白いだろう。

参考文献

- [1] 佐々木昌ら (2019)『現代地球科学入門シリーズ 1 太陽・惑星系と地球』, 共立出版株式会社
- [2] C.B.Agee.(1996) Melting temperature of the Allende meteorite : Implications for a Hadean magma ocean *physics of the Earth and Planetary Interiors* 100 **41-47**
- [3] B.Ronald Frost: Introduction to Oxygen Fugacity and its petrologic importance(access date 2020/7/18)
- [4] D.C.Rubie, H.J.Melosh, J.E.Reid, C.Liebske, and K.Righter (2003) Mechanisms of metal-silicate equilibration in the terrestrial magma ocean *Earth and Planetary Science Letters* 205 **239-255**
- [5] Claude Herzberg, and Jianzhong Zhang (1996) Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1: Compositions of magmas in the upper mantle and transition zone *journal of geophysical research* 101 **8271-8295**
- [6] Eiji Ohtani (1983) Melting temperature distribution and fractionation in the lower mantle *physics of the Earth and Planetary Interiors*,33 **12-25**
- [7] Dziewonski,A.M. and Anderson,D.L. (1981) Preliminary reference and Earth model *physics of the Earth and Planetary Interiors*,25 **297-356**
- [8] T.R.McGETCHIN, and J.S.SMITH (1978) The mantle of Mars: Some possible Geological Implications of Its High Density *ICARUS* 34 **512-536**
- [9] R.Kevin, .H.L.Richard, and K.A.David (1998) Accretion and core formation on Mars: Molybdenum contents of melt inclusion glasses in three SNC meteorites *Geochimica et Cosmochimica Acta* **2167-2177**
- [10] 廣瀬敬 (2015)『できたての地球-生命誕生の条件』岩波科学ライブラリー