

Question2:

地球一月系へのインパクトフラックスはどのようにして推定されているのか？

参考論文：

“Mass Flux in the ancient Earth-Moon system and benign implication for the origin of life on Earth”

Graham Ryder

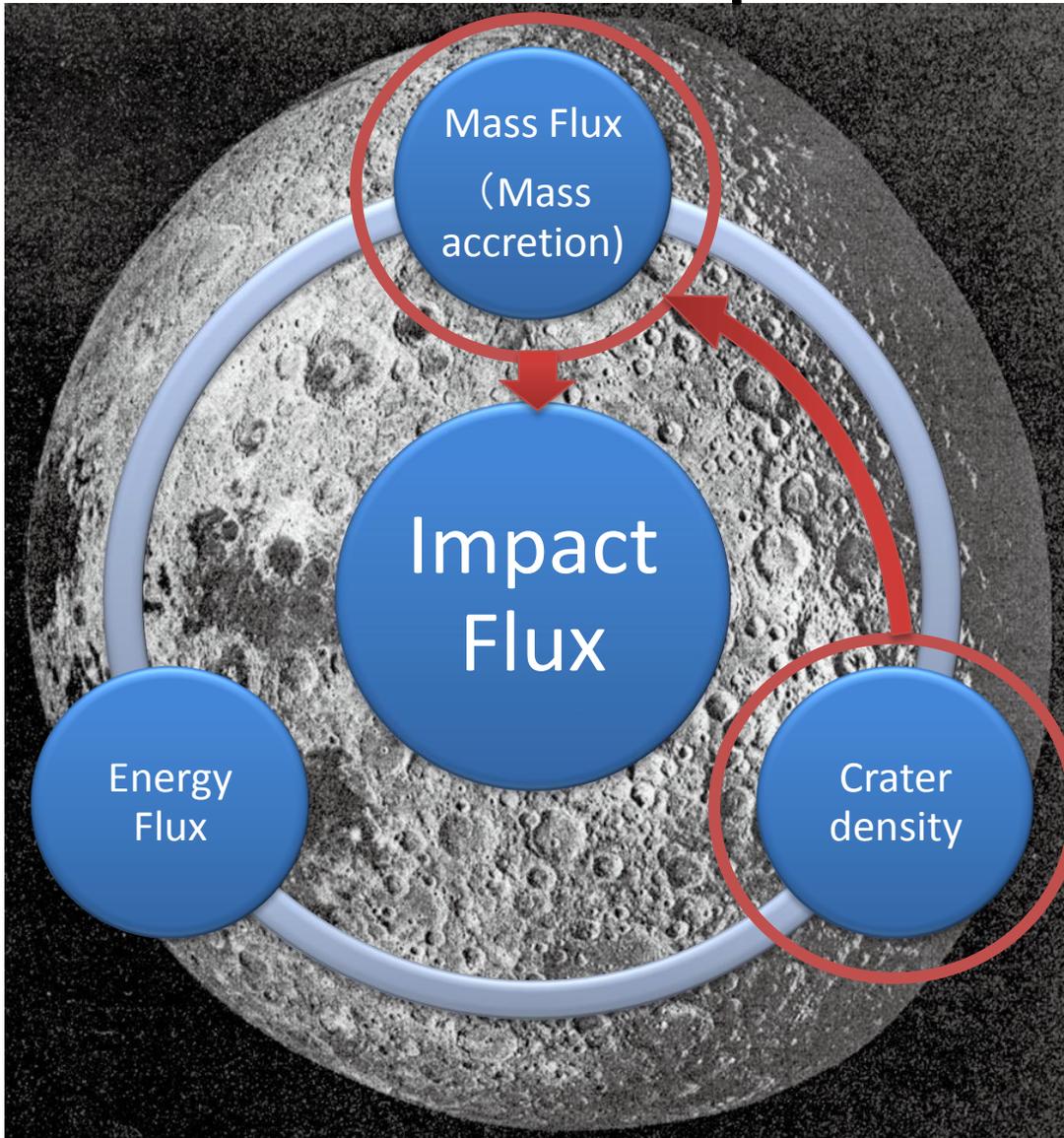
Journal of Geophysical Research, Vol.107, No. E4, 5022 (2002)

巽 瑛理（東大新領域）

地球－月系のインパクトフラックス

- 重要性
 - 太陽系形成
 - 火星などの惑星の地表年代推定
 - Late heavy bombardment
 - 生命の起源
- 地球へのフラックス
 - 地球には水や大気の影響から古いクレーターが残っていない.
 - それに対して, 月は原始からのクレーターが残っている (部分もある) と考えられる.
 - 地球のImpact Fluxは月のImpact Fluxから推定される.

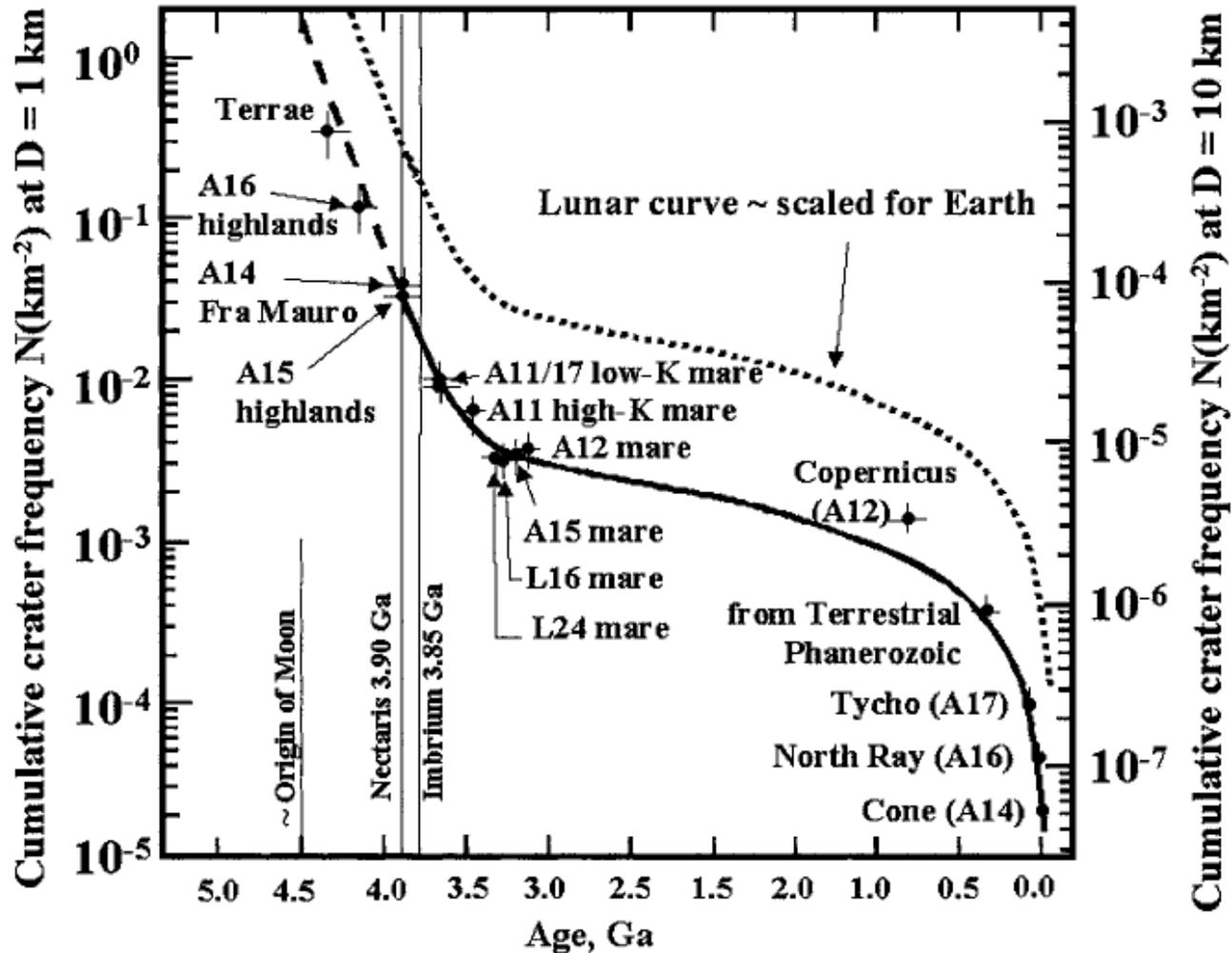
Impact Flux



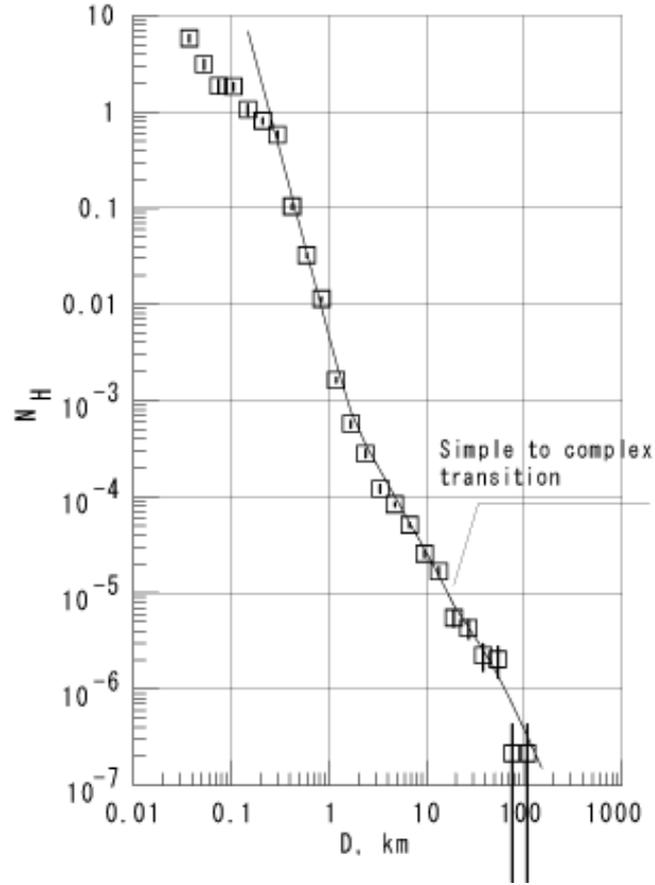
本論文での仮定:

- インパクトの質量が全て月に堆積する.
- 大きなベイスンについては, ベイスンのサイズからプロジェクトイルサイズを推定する.

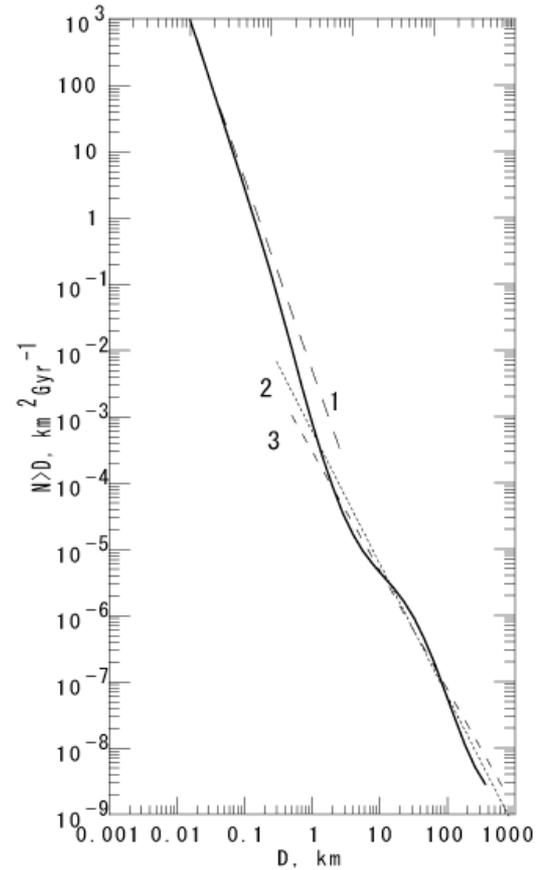
Cumulative crater frequency



Production Function



Hartmann's Production Function



Neukum's Production Function

Crater frequencyとMass fluxの直観的な関係

クレーター直径Dの累積クレーター頻度

$$n(D, t) = g(D)f(t)$$



普遍的な時間への依存関数型

クレーターサイズ分布は時間に依らない (Production func.を積分したもの)

クレーター直径がDより大きいものの累積クレーター頻度 (Crater Frequency)

$$N(D, t) = \int_D^\infty n(D', t) dD' = \int_D^\infty g(D') dD' f(t)$$

Mass Fluxは、累積クレーター頻度の増分によって表せて、

$$M(t) = S \times \int_0^\infty W(D) \frac{\partial}{\partial t} n(D, t) dD$$

$W(D)$: Dから計算されるプロ
ジェクティル質量

$$= S \times \int_0^\infty W(D) \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_D^\infty n(D', t) dD' f(t) \right) dD$$

S : 表面積
(tによらないとしている)

$$= S \times \frac{df(t)}{dt} \underbrace{\int_0^\infty W(D) \int_D^\infty g(D') dD' dD}_{\text{Const.}}$$

$$M(t) \propto f'(t)$$



Mass FluxはCrater Frequencyのグラフの傾きに比例している

Crater frequencyとMass fluxの直観的な関係

$$M(t) \propto f'(t)$$

つまり...

$$\frac{M(t_2)}{M(t_1)} = \frac{f'(t_2)}{f'(t_1)}$$


地質年代がよく分かっている

Post-Apollo12, Apollo15の計測結果を基準とする.

ここで、計測結果は時間的に離散的なものであるため、以下のように求めている。

$$f'(t_i) \simeq \frac{f(t_i) - f(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\text{Crater frequencyの増分}}{\text{計測点間の時間差}}$$

現在～100Myr ago

- 地球に近接した場所で微粒子 ($< 10^{-4}$ g) の測定から.

Love and Brownlee[1993]

→ $40 \pm 20 \times 10^9$ g/yr (to the Earth)

- 同位体による地質年代測定 (Ir, Os).

Kyte and Wasson[1986], Peuker-Ehrenbrink and Ravizza[2000]

- 月の表層と表層下での重力断面から.

Hartmann[1980]

- North Ray (Apollo 16) といった新しいクレーターから出たエジェクタ上のクレーター密度から.

Hörz et al.[1975]

 4×10^9 g/yr

3.1-3.4Ga

- Apollo 12, Luna 24, Apollo 15, Luna 16

	Age, Ga	Crater Density(1km), $\times 10^{-3} / \text{km}^2$
Luna16	3.40	3.3 ± 1
Apollo15	3.30	3.2 ± 1
Luna24	3.20	3.0 ± 1
Apollo12	3.15	3.6 ± 1

確からしい値なので、
基準として採用！



$\sim 4 \times 10^9$
g/yr

(今とほとんど変わっていない)

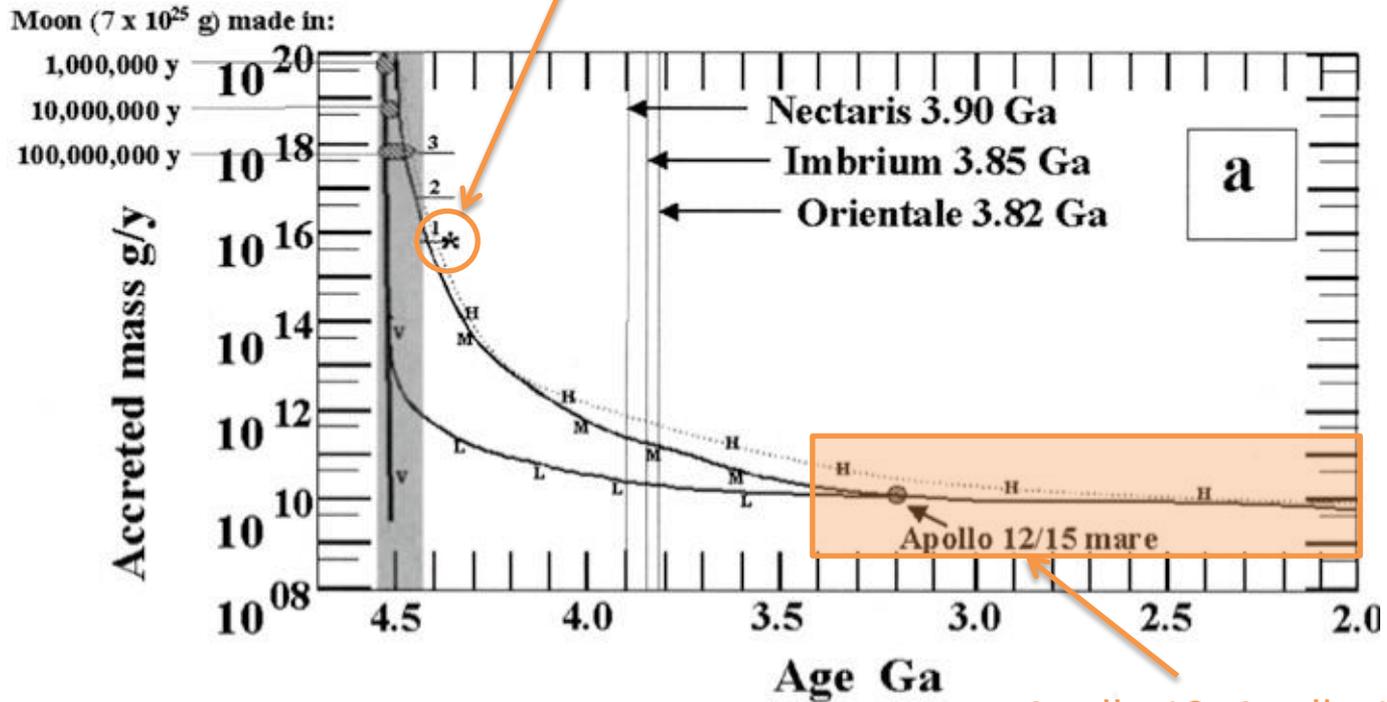
- Apollo 12: $\sim 5\text{m}$ のレゴリス層 & Ir $\sim 8\text{ppb}$
 - Apollo 12と同様の結果をApollo 15のサンプルからも得る.

Crater frequency to Mass flux

	Age, Ga	Crater Density(1km), $\times 10^{-3}/\text{km}^2$	$\Delta N,$ $\times 10^{-3}/\text{km}^2$	$\Delta t,$ Myr	$\Delta N/\Delta t \propto f'(t),$ $\times 10^{-3}/(\text{km}^2 \cdot \text{Myr})$	$f'(t)/f'_{A12/15}$	M g/yr
present	0	0					3×10^9
Apollo12 mare	3.15	3.6 ± 1	3.3 ± 1	330	0.0010 ± 0.003	1	4×10^9
Luna24 mare	3.20	3.0 ± 1					
Apollo15 mare	3.30	3.2 ± 1					
Luna16 mare	3.40	3.3 ± 1					
Apollo11 mare	3.58	6.4 ± 2	6.7 ± 2	350	0.019 ± 0.005	18	7.2×10^{10}
Apollo17 mare	3.75	10 ± 3					
oldest mare	3.80	20?	12 ± 5	70	0.17 ± 0.05	165	6.6×10^{11}
Oriente basin	3.82	22?					
Imbrium basin	3.85	37 ± 7					
Nectarian basin	3.90	120 ± 40	83 ± 30	50	1.7 ± 0.5	1650	6.6×10^{12}
Pre-Nectarian Crustal completion	4.42		$> 200 \pm 100$	520	0.38 ± 0.20	> 370	$> 1.4 \times 10^{12}$

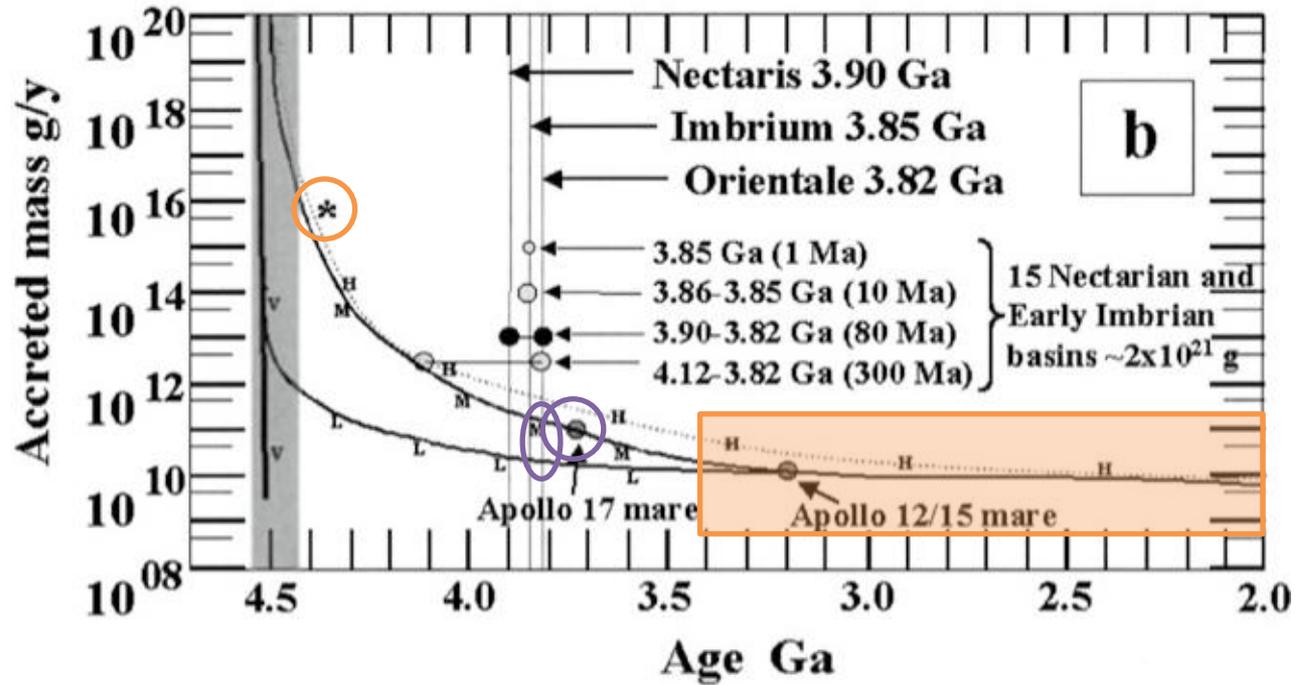
Mass flux

$$\int_0^t M(t') dt' < 1\% \text{ of the mass of Moon}$$



Apollo 12, Apollo 15のサンプル
より年代推定

Mass flux



Nectaris-Orientale (その1)

- Imbrium, Nectarisのクレーター密度

	Age, Ga	Crater Density(1km), $\times 10^{-3}/\text{km}^2$
Imbrium basin	3.85	37 ± 7
Nectarian basin	3.90	120 ± 40

- レゴリス

– ~ 13 ppb Ir, 厚さ35m

→10x A12/15 クレーター密度

 $\sim 1.9 \times 10^{12} \text{ g/y}$
(Imbrium-Orientale)
 $\sim 6.6 \times 10^{12} \text{ g/y}$
(Nectaris-Imbrium)

Nectaris-Orientale (その2)

- 15の巨大basinの大きさからプロジェクトイル質量の推定
 - basinの大きさから, 各Basinへのプロジェクトイルの質量を推定する. (Spudis[1993])
 - その際, 入射速度は20km/sと仮定.
- Basin内のクレーター密度から年代を推定 (Δt)
 - 15のBasinへのプロジェクトイルの総質量を年代間隔で割るより, この年代のMass Fluxを推定.

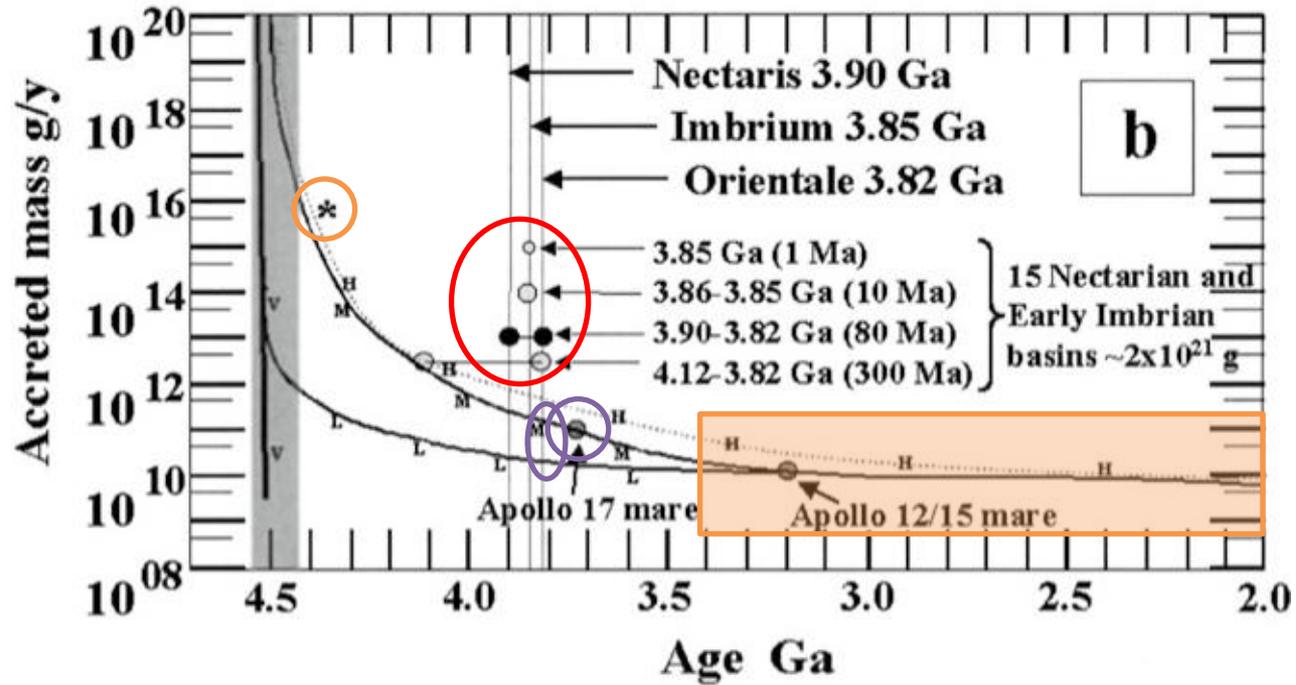
少なく見積もっても


$$\sim 6 \times 10^{12} \text{ g/y}$$

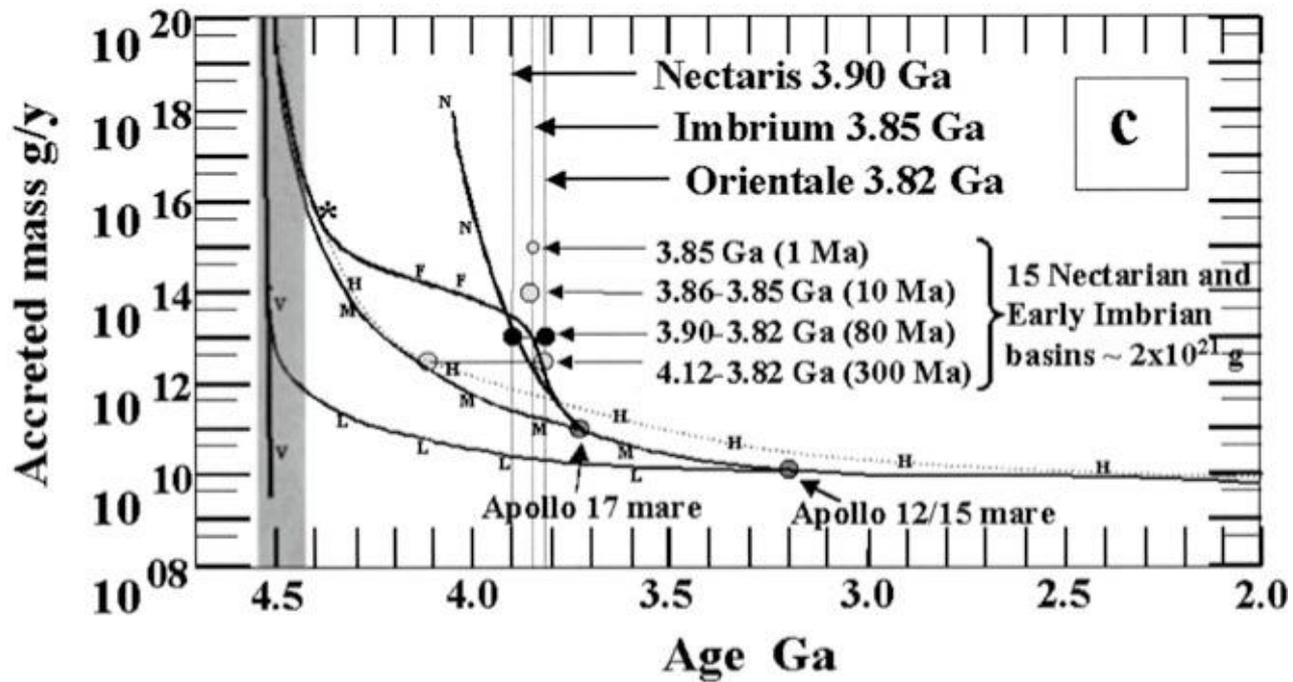
$$\sim 6 \times 10^{13} \text{ g/y}$$

程度の可能性も!

Mass flux



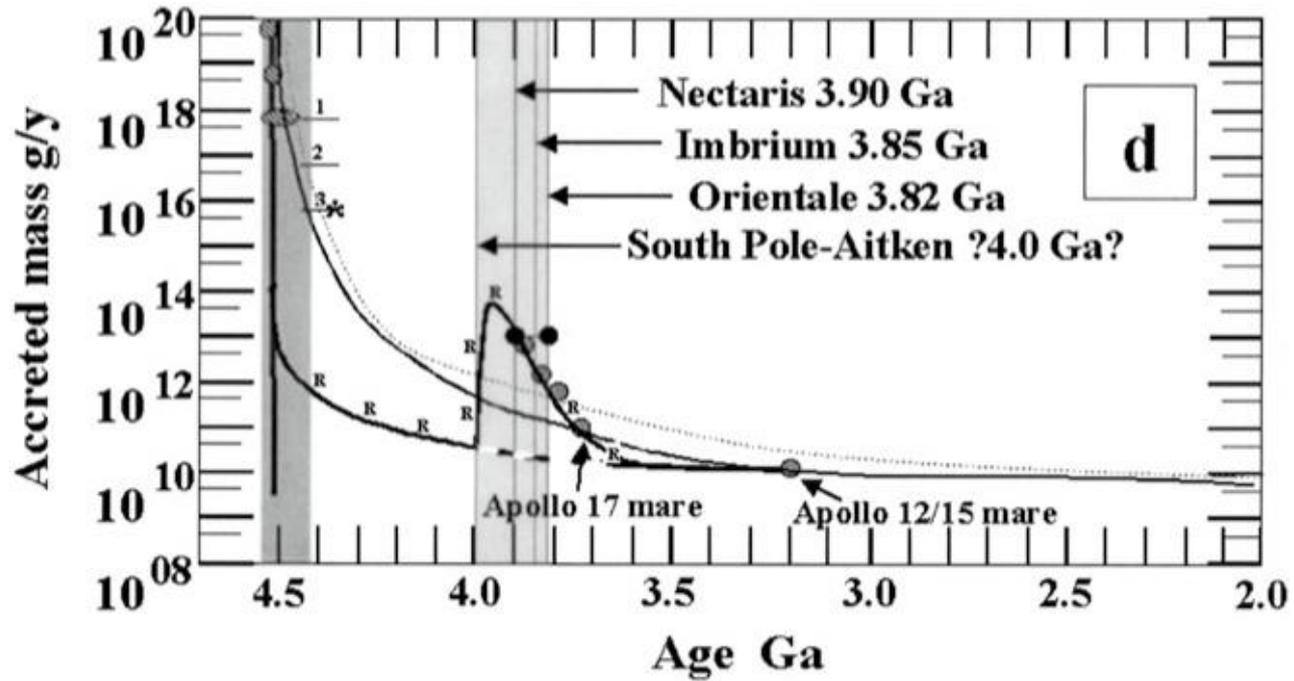
Mass flux



Pre-Nectarian

- Pre-Nectarian期には～30の大きなbasinができたと考えられる。
 - 単純に考えてNectarian期(15のbasin)の流入総質量の約2倍の質量が流入したと考えられる。
- South Pole-Aitken
 - 最も古く、最も大きいbasinであるSouth Pole-Aitkenの年代が分かれば、インパクトフラックスの年代を制限することができる。

Mass Flux



Answer

Q. 地球一月系へのインパクトフラックスはどのようにして推定されているのか？

月サンプルから得られる
絶対年代×クレーター密度
関係



クレーターサイズ
×プロジェクティルサイズ
関係

- 現在のMass Fluxが分かっている
- Mass Fluxはクレーター密度分布の傾きに比例

- クレーターサイズからプロジェクティルサイズを推定
- プロジェクティル質量はすべて月に堆積

月へのMass Flux

地球へのMass Flux