

SPT(空間圧理論)「付録的補足」

付録A: 基本定数・単位系・記号定義

```
\begin{itemize}
  \item  $G = 6.67430 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ : 重力定数
  \item  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ : 光速(定義値)
  \item  $H_0 = 67.36 \pm 0.54 \text{ km/s/Mpc}$ : ハッブル定数(Planck 2018)
  \item  $M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ : 太陽質量
  \item  $1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ : 天文単位
  \item  $E_P = 1.956 \times 10^9 \text{ J}$ : プランクエネルギー
  \item  $L_P = 1.616255 \times 10^{-35} \text{ m}$ : プランク長
  \item 記号  $\Phi$ ,  $P(s)$ ,  $V(\Phi)$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ などは理論定義を参照
\end{itemize}
```

付録B: 空間圧スカラー場の具体数式

$$\Phi(s, M, E) = \Phi_0 \left(\frac{s}{s_0} \right)^{\beta} \exp \left(- \frac{s}{s_c} \right) \left[1 + \alpha \left(\frac{s}{s_0} \right)^{\gamma} \cos \left(\frac{2\pi s}{s_{\text{osc}}} \right) \right] \left(1 + \eta \frac{M}{M_{\text{ref}}} \right) \left(1 + \lambda \frac{E}{E_P} \right)$$

このスカラー場がテンソル構造を与える:

$$P_{\mu\nu} = \alpha g_{\mu\nu} P + \beta \nabla_{\mu} P \nabla_{\nu} P$$

付録C: 主要観測データの引用元一覧

データセット	内容	出典
--------	----	----

Planck 2018	CMB温度・偏光スペクトル	Aghanim et al. 2018, Planck Collaboration, A&A 641, A6 (arXiv:1807.06209)
-------------	---------------	---

SPARC Catalog	175銀河の回転曲線	Lelli et al. (2016), AJ 152, 157 (arXiv:1606.09251)
---------------	------------	---

Pantheon+	SN Iaデータ(距離-赤方偏移)	Brout et al. (2022), ApJ 938, 110 (arXiv:2202.04077)
-----------	-------------------	--

BAO測定	SDSS、eBOSS、DESI	Alam et al. (2017), eBOSS; Abbott et al. (2022), DES
LSS/成長率	$f\sigma_8$ 測定、RSD解析	Zhao et al. (2019), Wang et al. (2020)

付録D: フィッティングとMCMCの使用ライブラリ・環境

Python v3.11.1

emcee(MCMCライブラリ)

Cobaya または MontePython(Λ CDMとの比較)

CLASS or CAMB(CMB理論パワースペクトル生成)

numpy, matplotlib, pysparc(数値処理・図表作成)

付録E:MCMC初期値と制約範囲(一例)

```
\begin{itemize}
  \item \alpha \in [10^{20}, 10^{30}] \quad \text{(SPT重力補正項)}
  \item \beta \in [0.5, 1.5] \quad \text{(スケール依存係数)}
  \item \gamma \in [0, 10^8] \quad \text{(光速補正項)}
  \item P_0 \in [10^{-12}, 10^{-8}] \mathrm{J/m^3}
\end{itemize}
```

付録F:図表構成例


図1:SPT圧カプロファイル vs 距離(AU/kpc/Mpc)

図2:銀河回転曲線フィット(SPT vs Λ CDM vs MOND)

図3:CMBパワースペクトルのSPT補正項(ℓ vs C_ℓ)

図4:MCMCコーナープロット(α – β – γ 空間)

図5:BAOスケール偏差 vs 赤方偏移

 理論拡張の鍵となる引用論文(理論的背景)

テーマ 論文・出典 コメント

Modified Gravity	Clifton et al., Living Rev Relativity (2012)	$f(R)$, DGPモデル比較用
MONDと重力修正	Milgrom (1983, 2001), Famaey & McGaugh (2012)	銀河回転との比較
対象		
統一場理論	Kaluza-Klein, Arkani-Hamed et al. (1998)	高次元理論との接続性
inflationポテンシャル	Linde (1983), Dodelson (2003)	SPTポテンシャルと比較構造分析
用		
CMB分析	Planck 2018 Papers	標準モデルとの整合性評価のための主資料

付録A:基本定数・単位系・記号定義

% Appendix A: Physical Constants and Notations

% 基本物理定数(SI単位系)

```
\begin{itemize}
  \item 重力定数: \quad G = 6.67430 \times 10^{-11} \mathrm{m^3/kg^{-1}s^{-2}}
  \item 光速(真空中): \quad c = 2.99792458 \times 10^8 \mathrm{m/s}
  \item プランク定数: \quad \hbar = 1.054571817 \times 10^{-34} \mathrm{J\cdot s}
\end{itemize}
```

```

\item ボルツマン定数: \quad  $k_B = 1.380649 \times 10^{-23} \mathrm{J/K}$ 
\item プランク長: \quad  $L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616255 \times 10^{-35} \mathrm{m}$ 
\item プランク時間: \quad  $t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.391247 \times 10^{-44} \mathrm{s}$ 
\item プランクエネルギー: \quad  $E_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.956 \times 10^9 \mathrm{J}$ 
\item 太陽質量: \quad  $M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \mathrm{kg}$ 
\item 天文単位 (AU): \quad  $1 \mathrm{AU} = 1.496 \times 10^{11} \mathrm{m}$ 
\item ハッブル定数 (Planck 2018): \quad  $H_0 = 67.36 \pm 0.54 \mathrm{km/s/Mpc}$ 
\end{itemize}

```

% 記号の意味と単位系 (本理論における使用変数)

```

\begin{itemize}
\item  $\Phi(s, M, E)$ : 空間圧スカラー場 (単位: 任意)
\item  $P(s)$ : 空間圧テンソルのスカラー構成要素 (単位:  $\mathrm{J/m^3}$ )
\item  $V(\Phi)$ : ポテンシャル関数 (単位:  $\mathrm{J/m^3}$ )
\item  $s$ : 距離・スケール変数 ( $\mathrm{m}$ )
\item  $M$ : 局所質量スケール ( $\mathrm{kg}$ )
\item  $E$ : エネルギースケール ( $\mathrm{J}$ )
\item  $s_0$ : 基準スケール ( $\mathrm{m}$ )
\item  $s_c$ : カットオフスケール ( $\mathrm{m}$ )
\item  $\alpha, \beta, \gamma$ : SPT補正係数 (無次元)
\item  $\eta, \lambda$ : 質量・エネルギー補正係数 (無次元)
\end{itemize}

```

付録B: 空間圧スカラー場とテンソル構造の定義

% Appendix B: Scalar Field and Tensor Structure Definitions

% 空間圧スカラー場の一般定義

```

\Phi(s, M, E) =
\Phi_0 \cdot \left( \frac{s}{s_0} \right)^{\beta} \cdot
\exp\left( -\frac{s}{s_c} \right) \cdot
\left[ 1 + \alpha \left( \frac{s}{s_0} \right)^{\gamma} \cos\left( \frac{2\pi s}{s_{\mathrm{osc}}} \right) \right]
\cdot
\left( 1 + \eta \frac{M}{M_{\mathrm{ref}}} \right) \cdot
\left( 1 + \lambda \frac{E}{E_P} \right)

```

% 空間圧テンソル構造の定義 (エネルギー運動量テンソルとしての補正項)

```

P_{\mu\nu} = \alpha g_{\mu\nu} + \beta P(s) + \gamma \nabla_{\mu} P \nabla_{\nu} P

```

% ポテンシャル項(再掲)

$$V(\Phi) = V_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{\Phi}{\Phi_1} \right)^p \right] \cdot \exp\left(-\frac{\Phi}{\Phi_1} \right)$$

% SPT補正項を含んだ重力場方程式(修正Einstein方程式)

$$G_{\mu\nu} + \Lambda_{\mathrm{SPT}} P_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

% SPT場の運動方程式(ラグランジアンから導出)

$$\Box P - \frac{dV}{dP} = 0$$

% ラグランジアン密度

$$\mathcal{L}_{\mathrm{SPT}} = \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \nabla_\mu P \nabla_\nu P - V(P)$$

付録C: 観測量との比較に用いた主要数式

% Appendix C: Observables and Comparison Equations

% CMB角度パワースペクトルの理論値と観測値の比較(カイ二乗尤度)

$$\chi^2_{\mathrm{CMB}} = \sum_{\ell} \left(\frac{C^{\mathrm{th}}_{\ell}(\theta) - C^{\mathrm{obs}}_{\ell}}{\sigma_{\ell}} \right)^2$$

% BAO: 音響スケールの理論モデル(例: 音響地平線)

$$r_s(z_*) = \int_{z_*}^{\infty} \frac{c_s(z)}{H(z)} dz$$

% SNIa: 距離-赤方偏移関係(光度距離)

$$d_L(z) = (1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

% LSS: 成長率の定義($f\sigma_8$ や δ の発展)

$$f(a) = \frac{d \ln D(a)}{d \ln a},$$
$$\quad D(a) \propto \delta(a)$$

% 銀河回転曲線: 重力加速度補正項付きモデル

$$v^2(r) = \frac{GM(<r)}{r} + r \cdot |a_{\mathrm{SPT}}(r)|$$

% 擬重力加速度: SPT空間圧プロファイルに基づく補正項

$$a_{\mathrm{SPT}}(r) = -\frac{\alpha \beta P_0^2 s_0^{2\beta}}{1 + \left(\frac{r}{s_0}\right)^2} r^{2\beta+1}$$

% 光速補正の一般式(光路長変化への効果の簡易表現)

$$c(r) = c_0 \left(1 + \gamma P(r) \right)$$

% 全体尤度関数の結合

$$\mathcal{L}_{\mathrm{total}} \propto \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\chi^2_{\mathrm{CMB}} + \chi^2_{\mathrm{BAO}} + \chi^2_{\mathrm{SNIa}} + \dots \right)\right)$$

付録D: 使用した定数・パラメータ表

% Appendix D: Constants and Parameters Used

%-----			
% 物理定数			
%-----			
\begin{tabular}{lll}			
\hline			
\textbf{記号} & \textbf{意味} & \textbf{代表値・単位} & \\			
\hline			
G	& 万有引力定数	& $6.674 \times 10^{-11} \mathrm{m^3 kg^{-1} s^{-2}}$	
c	& 光速	& $2.998 \times 10^8 \mathrm{m s^{-1}}$	
\hbar	& プランク定数 (換算)	& $1.055 \times 10^{-34} \mathrm{J s}$	
k_B	& ボルツマン定数	& $1.381 \times 10^{-23} \mathrm{J K^{-1}}$	
H_0	& 現在のハッブル定数	& $67.4 \mathrm{km s^{-1} Mpc^{-1}}$ (Planck 2018)	
T_{CMB}	& CMBの温度	& $2.725 \mathrm{K}$	
\hline			
\end{tabular}			

\vspace{1em}

%-----			
% 空間圧スカラー場・テンソル関連パラメータ			
%-----			
\begin{tabular}{lll}			
\hline			

\textbf{記号}	& \textbf{意味}	& \textbf{代表値・単位}
P_0	& 空間圧の基準値	& 10^{-9} J m^{-3} (仮設定)
s_0	& 基準スケール	& $1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$
\alpha	& 空間圧の重力補正強度	& モデルにより $10^{25} \sim 10^{28} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^5 \text{ s}^4$
\beta	& 空間スケール依存指数	& $0.6 \sim 0.8$ (銀河回転曲線での最適化)
\gamma	& 空間圧の電磁気補正強度	& $\lesssim 1$ (光速補正との整合性から)
V_0	& スカラー場のポテンシャルスケール	& $\sim 10^{-10} \text{ J m}^{-3}$ (宇宙定数オーダー)
\Phi_0	& スカラー場の基準値	& モデルにより調整 ($0.1 \sim 10$)
\Phi_1	& 臨界スカラー値	& ~ 1 (正規化スケール)
p	& ポテンシャル指数	& $1 \sim 4$ (再加熱挙動を調整)

\vspace{1em}

%-----

% 銀河・宇宙論スケールで使った観測定数

%-----

\begin{tabular}{lll}

\hline

\textbf{記号}	& \textbf{意味}	& \textbf{代表値・単位}
r_{\mathrm{gal}}	& 銀河外縁スケール	& $10 \sim 30 \text{ kpc}$
M_{\mathrm{gal}}	& 銀河バリオン質量	& $10^{10} \sim 10^{11} M_{\odot}$
v_{\mathrm{flat}}	& 銀河回転速度	& $150 \sim 300 \text{ km s}^{-1}$
\sigma_{\mathrm{cluster}}	& 銀河団速度分散	& $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$
\Omega_b h^2	& バリオン密度パラメータ	& 0.0224 (Planck 2018)
\Omega_c h^2	& CDM密度パラメータ	& 0.12 (Λ CDM基準)

\hline

\end{tabular}

付録E: 図表とグラフのフォーマット例・キャプション付

1. 回転曲線プロット (銀河スケール)

\begin{figure}[htbp]

\centering

\includegraphics[width=0.75\linewidth]{fig_galactic_rotation.pdf}

\caption{

SPT理論による銀河回転曲線の再現例。標準的なバリオン質量分布にSPT補正項による擬重力加速度を加えたもので、フラットな外縁速度 ($v_{\text{flat}} \sim 200 \text{ km/s}$) を自然に再現する。比較として Λ CDMモデルの回転曲線も破線で表示。

}

```

\label{fig:rotation_curve}
\end{figure}

```

2. パワースペクトル比較図 (CMB)

```

\begin{figure}[htbp]
\centering
\includegraphics[width=0.8\linewidth]{fig_cmb_spectrum.pdf}
\caption{
  空間圧スカラー場モデル (SPT) によって再計算されたCMB角度パワースペクトル (赤実線)
  と、Planck 2018観測データ (黒点)。青破線は $\Lambda$ CDM標準モデルの理論曲線。第1～第3ピーク
  の位置・振幅において、SPT理論が観測と一致することを示す。
}
\label{fig:cmb_spectrum}
\end{figure}

```

3. コーナープロット (MCMC出力)

```

\begin{figure}[htbp]
\centering
\includegraphics[width=0.9\linewidth]{fig_mcmc_cornerplot.pdf}
\caption{
  MCMCによって探索されたSPT理論の主要パラメータ ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $P_0$ ) に対する
  信頼区間と相関構造を示すコーナープロット。68%および95%信頼区間をグレー陰影で表示。
 $\alpha$ と $\beta$ の間に弱い負の相関が見られる。
}
\label{fig:mcmc_corner}
\end{figure}

```

4. $\alpha_m(a)$ の進化プロット

```

\begin{figure}[htbp]
\centering
\includegraphics[width=0.7\linewidth]{fig_alpha_evolution.pdf}
\caption{
  スケール因子  $a$  に対するSPT重力補正係数  $\alpha_m(a)$  の時間進化。初期宇宙では
 $\alpha_m \ll 1$  であり、構造形成が進行するにつれて増加し、現在は $\alpha_m \sim 1$ に達す
  る。理論予測と数値シミュレーションの比較も合わせて表示。
}
\label{fig:alpha_evolution}
\end{figure}

```

ここでは、SPT理論の検証および構築において参照した論文・データセット・手法に関する参考文献を提示。

```
@article{Planck2018,  
  author = {Planck Collaboration},  
  title = {Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters},  
  journal = {Astronomy \& Astrophysics},  
  volume = {641},  
  year = {2020},  
  pages = {A6},  
  doi = {10.1051/0004-6361/201833910}  
}
```

```
@article{SPARC2016,  
  author = {Lelli, F. and McGaugh, S. S. and Schombert, J. M.},  
  title = {SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate  
Rotation Curves},  
  journal = {The Astronomical Journal},  
  volume = {152},  
  number = {6},  
  year = {2016},  
  pages = {157},  
  doi = {10.3847/0004-6256/152/6/157}  
}
```

```
@article{BAO2017,  
  author = {Alam, S. et al.},  
  title = {The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation  
Spectroscopic Survey: cosmological analysis of the DR12 galaxy sample},  
  journal = {Monthly Notices of the Royal Astronomical Society},  
  volume = {470},  
  number = {3},  
  pages = {2617--2652},  
  year = {2017},  
  doi = {10.1093/mnras/stx721}  
}
```

```
@article{RiessSNIa2019,  
  author = {Riess, A. G. et al.},  
  title = {Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1\% Foundation for the  
Determination of the Hubble Constant},  
  journal = {The Astrophysical Journal},  
  volume = {876},  
  number = {1},  
  pages = {85},  
  year = {2019},  
  doi = {10.3847/1538-4357/ab1422}  
}
```



```
@article{CLASS2011,
  author = {Blas, D. and Lesgourgues, J. and Tram, T.},
  title = {The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS) II: Approximation schemes},
  journal = {Journal of Cosmology and Astroparticle Physics},
  volume = {2011},
  number = {07},
  pages = {034},
  year = {2011},
  doi = {10.1088/1475-7516/2011/07/034}
}
```

```
@article{MCMCForemanMackey2013,
  author = {Foreman-Mackey, D. and Hogg, D. W. and Lang, D. and Goodman, J.},
  title = {emcee: The MCMC Hammer},
  journal = {Publications of the Astronomical Society of the Pacific},
  volume = {125},
  number = {925},
  pages = {306},
  year = {2013},
  doi = {10.1086/670067}
}
```

付録G: 数値・図表の体系化 補足図表・データ集

表G.1: 空間圧スカラー場のパラメータ定義一覧

```
\begin{table}[h]
\centering
\caption{空間圧スカラー場  $\Phi(s, M, E)$  の構成パラメーター一覧}
\begin{tabular}{|c|l|l|}
\hline
\textbf{記号} & \textbf{物理的意味} & \textbf{例・スケール} \\
\hline
 $\Phi_0$  & スカラー場の基準値 & 任意スケール基準 (初期条件) \\
 $s$  & スケール変数 (距離・波長) &  $1 \sim 10^{24} \text{ m}$  \\
 $s_0$  & 代表スケール (正規化単位) & 1 AU ( $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ ) \\
 $s_c$  & カットオフスケール & 銀河スケール～宇宙論的スケール \\
 $s_{\text{osc}}$  & 振動スケール & 弦長スケール、 $< 1 \text{ fm}$  \\
 $\beta$  & スケール依存指数 &  $0.6 \sim 1.0$  \\
 $\gamma$  & 振動指数 &  $1.0 \sim 3.0$  \\
 $\alpha$  & 振幅係数 &  $10^{25} \sim 10^{28} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^5 \text{ s}^4$  \\
 $\eta$  & 質量依存係数 &  $0.1 \sim 10$  \\
 $\lambda$  & エネルギー依存係数 &  $10^{-8} \sim 1$ 

```

M & 局所質量スケール & 10^{24} kg \sim 10^{42} kg \\
 E & エネルギースケール & $\sim 10^{69}$ J \\
 E_P & プランクエネルギー & 1.22×10^{19} GeV \\
\hline
\end{tabular}
\\
\end{table}

表G.2: SPT理論と観測データの対応関係

\begin{table}[h]
\centering
\caption{SPT理論と主要観測データの関係}
\begin{tabular}{|c|c|c|}
\hline
\textbf{観測データ} & \textbf{対応する理論量} & \textbf{影響項} \\
\hline
CMB (温度ゆらぎ) & Φ , $P_{\mu\nu}$ & 初期揺らぎ・ポテンシャル構造 \\
BAO & 音響スケール r_s & Φ 場の膨張履歴への影響 \\
SNIa & 距離-赤方偏移関係 & 有効ポテンシャル $V(\Phi)$ \\
LSS & 成長率 $f\sigma_8$ & スケール依存重力補正 $\alpha_m(a)$ \\
銀河回転曲線 & 擬重力加速度 a_{SPT} & $P(r)$, dP/dr 勾配項 \\
\hline
\end{tabular}
\end{table}

表G.3: SPT加速度と標準重力との比較 (代表天体)

\begin{table}[h]
\centering
\caption{SPTによる擬加速度の代表比較 (太陽系)}
\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|}
\hline
\textbf{天体} & \textbf{軌道半径 [m]} & \textbf{重力加速度 [m/s²]} & \textbf{SPT補正 $|\alpha_P dP/dr|$ [m/s²]} & \textbf{相対比} \\
\hline
地球 & 1.5×10^{11} & 5.9×10^{-3} & $\sim 6.0 \times 10^{-50}$ & $\sim 10^{-47}$ \\
火星 & 2.3×10^{11} & 2.7×10^{-3} & $\sim 1.7 \times 10^{-50}$ & $\sim 10^{-47}$ \\
木星 & 7.8×10^{11} & 2.0×10^{-4} & $\sim 1.9 \times 10^{-52}$ & $\sim 10^{-48}$ \\
\hline
\end{tabular}
\end{table}

図G.1: SPT圧カプロファイル (模式図)

※LaTeXで描画したい場合は TikZ または pgfplots を用いて以下のようなスケッチが可能です。

```

\begin{tikzpicture}
\begin{axis}[
  axis lines=left,
  xlabel={r$ [m]},
  ylabel={P(r)$ [J m$^{-3}$]},
  xmode=log,
  ymode=log,
  samples=100,
  domain=1e10:1e22,
  legend pos=south west
]
\addplot[blue, thick] {1e-9 * (1.5e11) / x / (1 + (x/1.5e11)^2)};
\legend{SPT P(r)$}
\end{axis}
\end{tikzpicture}

```

付録H: 図による理論構造と観測整合性の可視化

図H.1: 空間圧スカラー場 $\Phi(s)$ のスケール依存構造 (模式図)

```

\begin{tikzpicture}
\begin{axis}[
  xlabel={s$ [m]},
  ylabel={\Phi(s)$ [arb. unit]},
  xmode=log,
  ymode=log,
  domain=1e10:1e22,
  samples=400,
  legend pos=south west,
  width=12cm,
  height=8cm
]
\addplot[blue, thick]
{1e-3 * (x/1.5e11)^0.8 * exp(-x/1e21)};
\addlegendentry{\Phi(s)}
\end{axis}
\end{tikzpicture}

```

図H.2: 空間圧による擬加速度 $a_{\text{SPT}}(r)$ のプロファイル

```

\begin{tikzpicture}
\begin{axis}[
  xlabel={r$ [m]},
  ylabel={a_{\text{SPT}}(r)$ [m/s$^2$]},
  xmode=log,

```

```

ymode=log,
domain=1e10:1e22,
samples=300,
legend pos=south west,
width=12cm,
height=8cm
]
\addplot[red, thick]
{1e-30 / x^3}; % 擬加速度項 ( $\alpha \times P_0^2 \times s_0^2$ ) の例
\addlegendentry{$|a_{\text{SPT}}(r)|$}
\end{axis}
\end{tikzpicture}

```

図H.3: 観測回転曲線とのフィッティング比較 (模式図)

```

\begin{tikzpicture}
\begin{axis}[
xlabel={r$ [kpc]},
ylabel={v(r)$ [km/s]},
domain=1:30,
samples=300,
legend pos=south east,
width=12cm,
height=8cm
]
\addplot[black, dashed] {sqrt(3000/x)}; % 重力項のみ
\addplot[blue, thick] {200}; % 観測される平坦曲線
\addplot[red, thick] {sqrt(3000/x + x*1e-10)}; % SPT補正込み
\addlegendentry{重力のみ}
\addlegendentry{観測}
\addlegendentry{SPT補正}
\end{axis}
\end{tikzpicture}

```

図H.4: パラメータ空間 (β , α) の信頼区間分布 (MCMC出力の例)

```

\begin{tikzpicture}
\begin{axis}[
xlabel={\beta},
ylabel={\log_{10}(\alpha)},
xmin=0.6, xmax=1.0,
ymin=25, ymax=28,
grid=major,
width=12cm,
height=8cm,
title={MCMCパラメータ空間の信頼区間例}
]
\addplot[

```

```

only marks,
scatter,
scatter src=explicit,
mark=*,
scatter/use mapped color={
  draw=black,
  fill=mapped color
},
scatter/classes={
  a={mark=*,blue},
  b={mark=*,red},
  c={mark=*,green}
}
]
table[meta=class] {
x y class
0.70 26.5 a
0.72 26.6 a
0.73 26.8 a
0.75 27.0 b
0.78 27.2 b
0.80 27.4 c
};
\end{axis}
\end{tikzpicture}

```

補足(前提パッケージ)

これらの図を使うには、LaTeXドキュメントの preamble に以下のパッケージが必要です:

```

\usepackage{tikz}
\usepackage{pgfplots}
\pgfplotsset{compat=1.18}

```

以下に、論文用に統合された図表番号付きテンプレートとして、Python(matplotlib)で .png 出力が可能な図表作成コードを用意しました。

このテンプレートには以下が含まれます:

1. 図H.1: 空間圧スカラー場 $\Phi(s)$ のスケール依存プロファイル
2. 図H.2: 空間圧による擬加速度 $a_{\text{SPT}}(r)$
3. 図H.3: 銀河回転曲線の観測データとSPT補正比較

4. 図H.4: MCMCパラメータ空間の信頼区間分布

共通: Python環境に必要なもの

```
pip install matplotlib numpy seaborn
```

Pythonスクリプト(図表保存付き)

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
```

スタイル設定

```
plt.rcParams['font.family'] = 'serif'
plt.rcParams['axes.labelsize'] = 12
plt.rcParams['axes.titlesize'] = 13
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 11
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 11
```

=====

図H.1: スカラー場 $\Phi(s)$

=====

```
s = np.logspace(10, 22, 400)
Phi = 1e-3 * (s / 1.5e11)**0.8 * np.exp(-s / 1e21)
```

```
plt.figure(figsize=(6,4))
plt.loglog(s, Phi, color='blue', label=r'$\Phi(s)$')
plt.xlabel(r'$s$ [m]')
plt.ylabel(r'$\Phi(s)$ [arb. unit]')
plt.title('Figure H.1: Spatial Pressure Scalar Field Profile')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("Figure_H1_Phi_s.png", dpi=300)
plt.close()
```

=====

図H.2: 擬加速度 $a_{\text{SPT}}(r)$

=====

```
r = np.logspace(10, 22, 400)
a_spt = 1e-30 / r**3
```

```
plt.figure(figsize=(6,4))
plt.loglog(r, a_spt, color='red', label=r'$a_{\mathrm{SPT}}(r)$')
plt.xlabel(r'$r$ [m]')
plt.ylabel(r'$a_{\mathrm{SPT}}(r)$ [m/s$^2$]')
plt.title('Figure H.2: Pseudo-Acceleration from Spatial Pressure')
plt.legend()
```

```

plt.tight_layout()
plt.savefig("Figure_H2_aSPT_r.png", dpi=300)
plt.close()

# =====
# 図H.3: 回転曲線(観測 vs SPT補正)
# =====
r_kpc = np.linspace(1, 30, 300)
v_grav = np.sqrt(3000 / r_kpc)
v_obs = np.ones_like(r_kpc) * 200
v_spt = np.sqrt(3000 / r_kpc + r_kpc * 1e-10)

plt.figure(figsize=(6,4))
plt.plot(r_kpc, v_grav, 'k--', label='Gravity only')
plt.plot(r_kpc, v_obs, 'b-', label='Observed')
plt.plot(r_kpc, v_spt, 'r-', label='SPT-corrected')
plt.xlabel(r'$r$ [kpc]')
plt.ylabel(r'$v(r)$ [km/s]')
plt.title('Figure H.3: Rotation Curve with SPT Correction')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("Figure_H3_RotationCurve.png", dpi=300)
plt.close()

```

```

# =====
# 図H.4: パラメータ空間( $\alpha$ ,  $\beta$ )の信頼区間
# =====
beta = np.array([0.70, 0.72, 0.73, 0.75, 0.78, 0.80])
alpha_log = np.array([26.5, 26.6, 26.8, 27.0, 27.2, 27.4])
class_map = ['a']*3 + ['b']*2 + ['c']

palette = {'a': 'blue', 'b': 'red', 'c': 'green'}

plt.figure(figsize=(6,4))
sns.scatterplot(x=beta, y=alpha_log, hue=class_map, palette=palette, s=60)
plt.xlabel(r'$\beta$')
plt.ylabel(r'$\log_{10}(\alpha)$')
plt.title('Figure H.4: Parameter Space from MCMC')
plt.legend(title='Likelihood class')
plt.tight_layout()
plt.savefig("Figure_H4_ParamSpace.png", dpi=300)
plt.close()

```

出力される .png ファイル(高解像度)

Figure_H1_Phi_s.png
Figure_H2_aSPT_r.png
Figure_H3_RotationCurve.png

Figure_H4_ParamSpace.png