シミュレーションを用いた バイスペクトルのコバリアンス測定

高橋龍一（弘前大）

with 樽家篤史（京大）

研究目的

多数（数千以上）のN体計算を実行し、matter & halo bispectrum の covariance を求める

摂動論（by 樽家さん）と比較して covariance のモデル化

3次元の銀河分光サーベイを想定

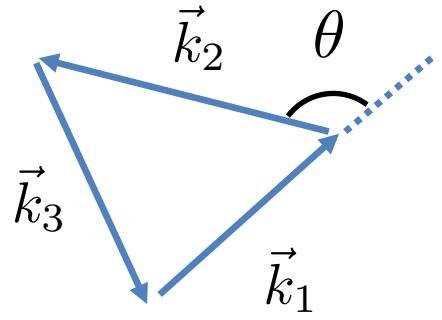
real & redshift spaces 両方

super-sample covariance も考慮

bispectrum estimator

$$\hat{B}(k_1, k_2, \theta) = \frac{1}{N_{\rm mode}} \sum_{\vec{k}_1} \sum_{\vec{k}_2} \sum_{\vec{k}_3} \delta^{\rm Krone}_{\vec{k}_1+\vec{k}_2+\vec{k}_3} \tilde{\delta}(\vec{k}_1)\tilde{\delta}(\vec{k}_2)\tilde{\delta}(\vec{k}_3)$$

Kronecker delta



θ : angle between $\vec{k}_1$ and $\vec{k}_2$

mean

$$B(k_1, k_2, \theta) = \langle \hat{B}(k_1, k_2, \theta) \rangle$$

covariance

$$\mathrm{Cov}_B(k_1, k_2, \theta, k_1', k_2', \theta')$$

$$= \left\langle \left(\hat{B}(k_1, k_2, \theta) - B(k_1, k_2, \theta) \right) \left(\hat{B}(k_1', k_2', \theta') - B(k_1', k_2', \theta') \right) \right\rangle$$

Previous work 1: Chan & Blot（2017）

power spectrum & bispectrum covariance

for matter & halo fields in real space only

a lot of (~4000) N-body simulations

comparison with perturbation theory (tree level)

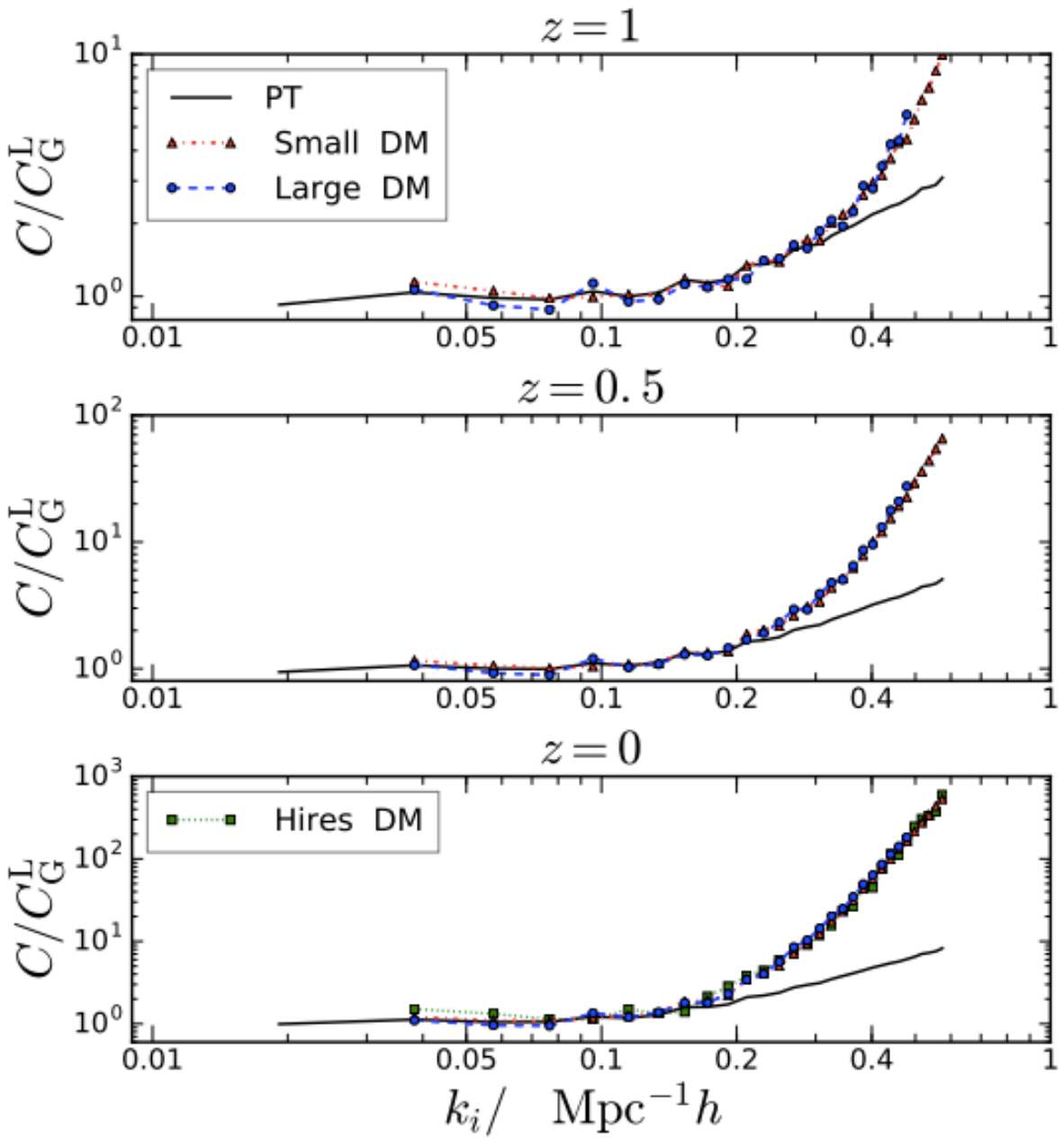
their simulation setting

TABLE I: Details of the simulations.

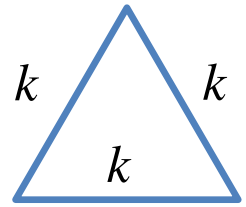
Box label	Box size ($\mathrm{Mpc}\,h^{-1}$)	Number of particles	Redshift snapshots	Number of realizations
Large	1312.5	512^3	1, 0.5, 0	512
Small	656.25	256^3	1, 0.5, 0	4096
Hires	656.25	1024^3	1, 0.5, 0	96

Comparison of simulation results with perturbation theory

bispectrum variance / Gaussian variance

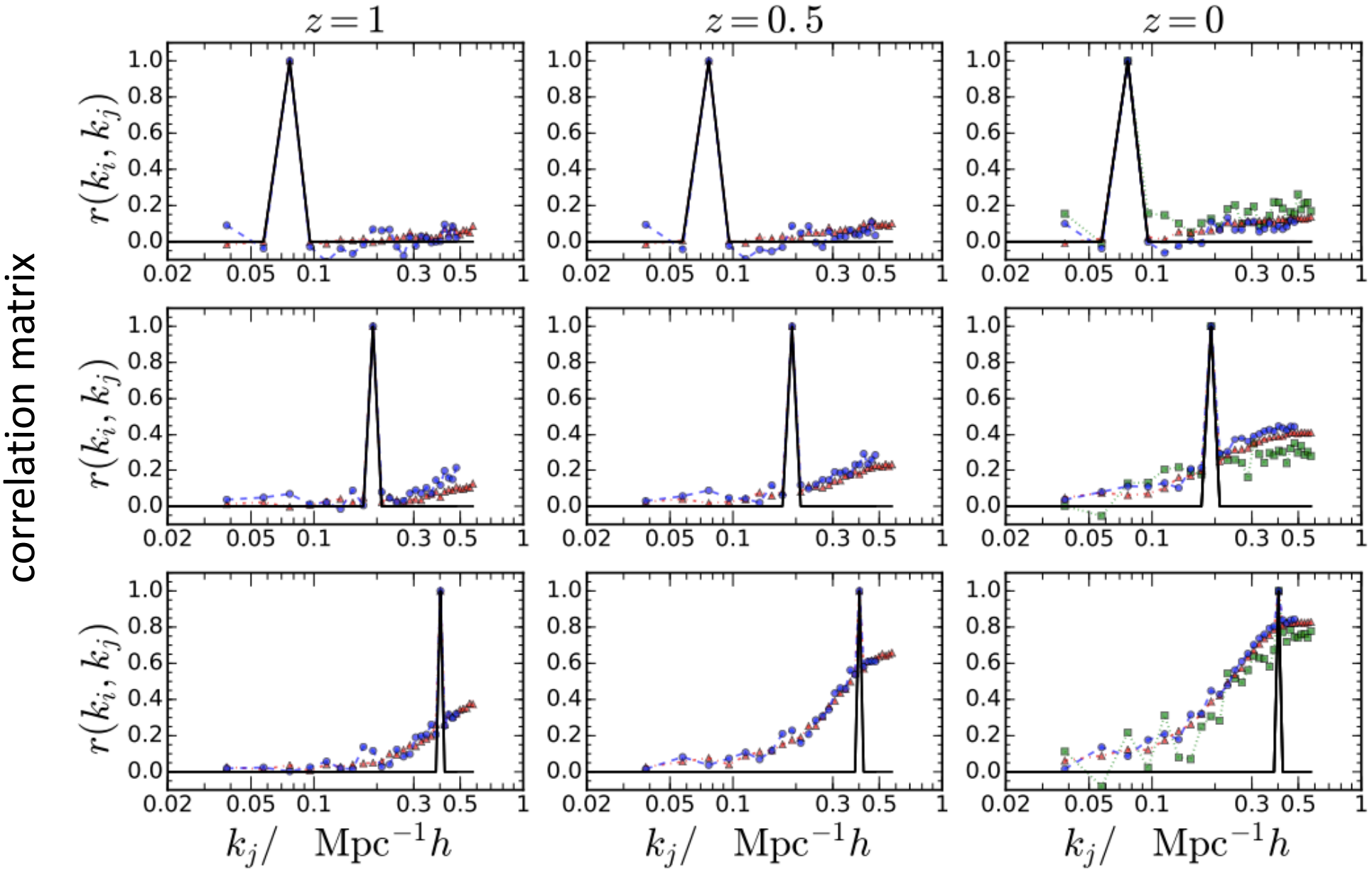


matter,
in real space

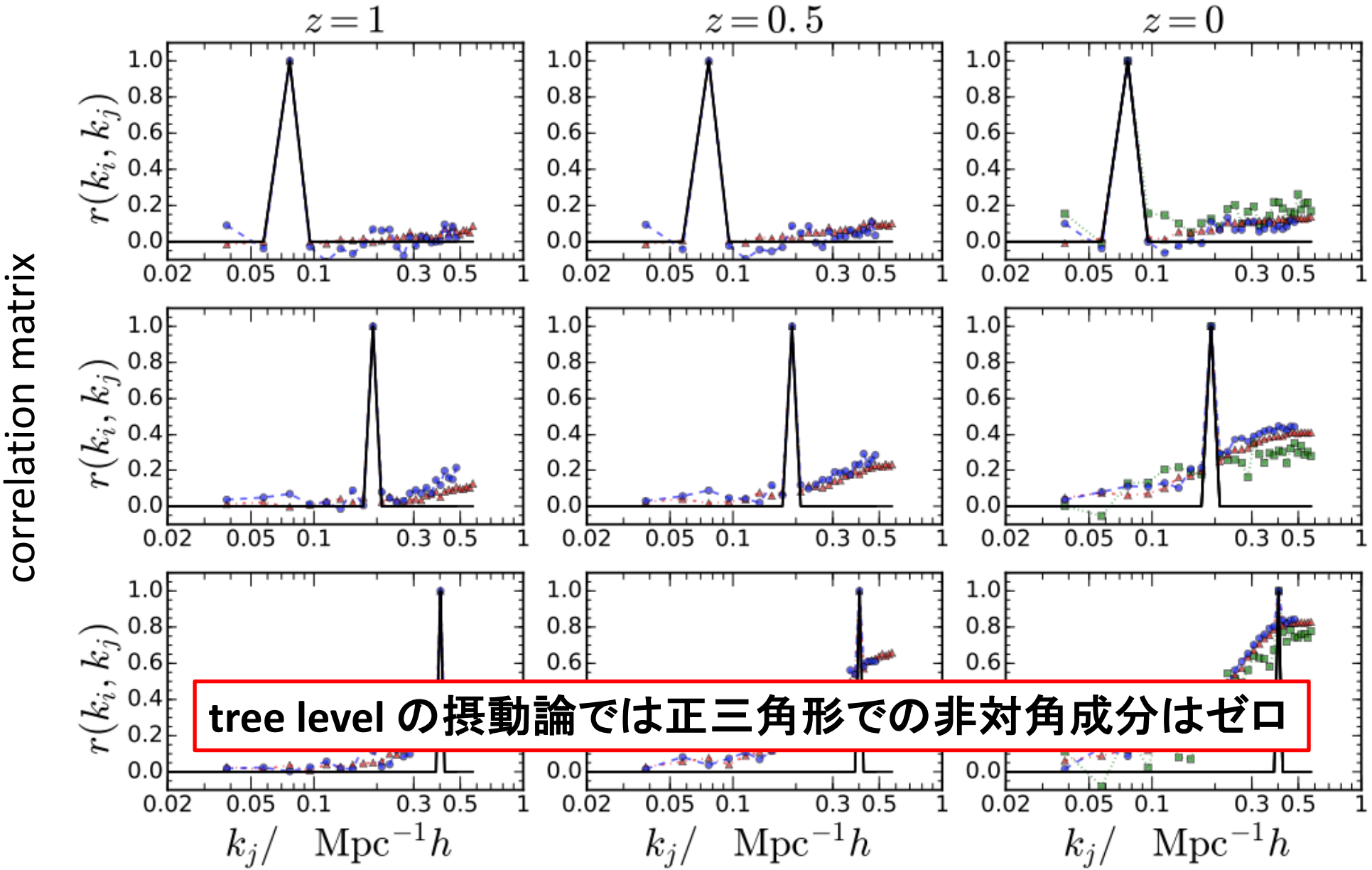


equilateral triangle

同じくcovarianceの非対角成分



同じくcovarianceの非対角成分



power spectrum, bispectrum 測定の S/N

k<k_{max} までの cumulative S/N

S/N for power spectrum

$$\left(\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{N}}\right)^2 = \sum_{k_1,k_2\leq k_{\max}} \mathrm{Cov}_{\mathrm{P}}^{-1}(k_1,k_2)P(k_1)P(k_2)$$

covariance の逆行列

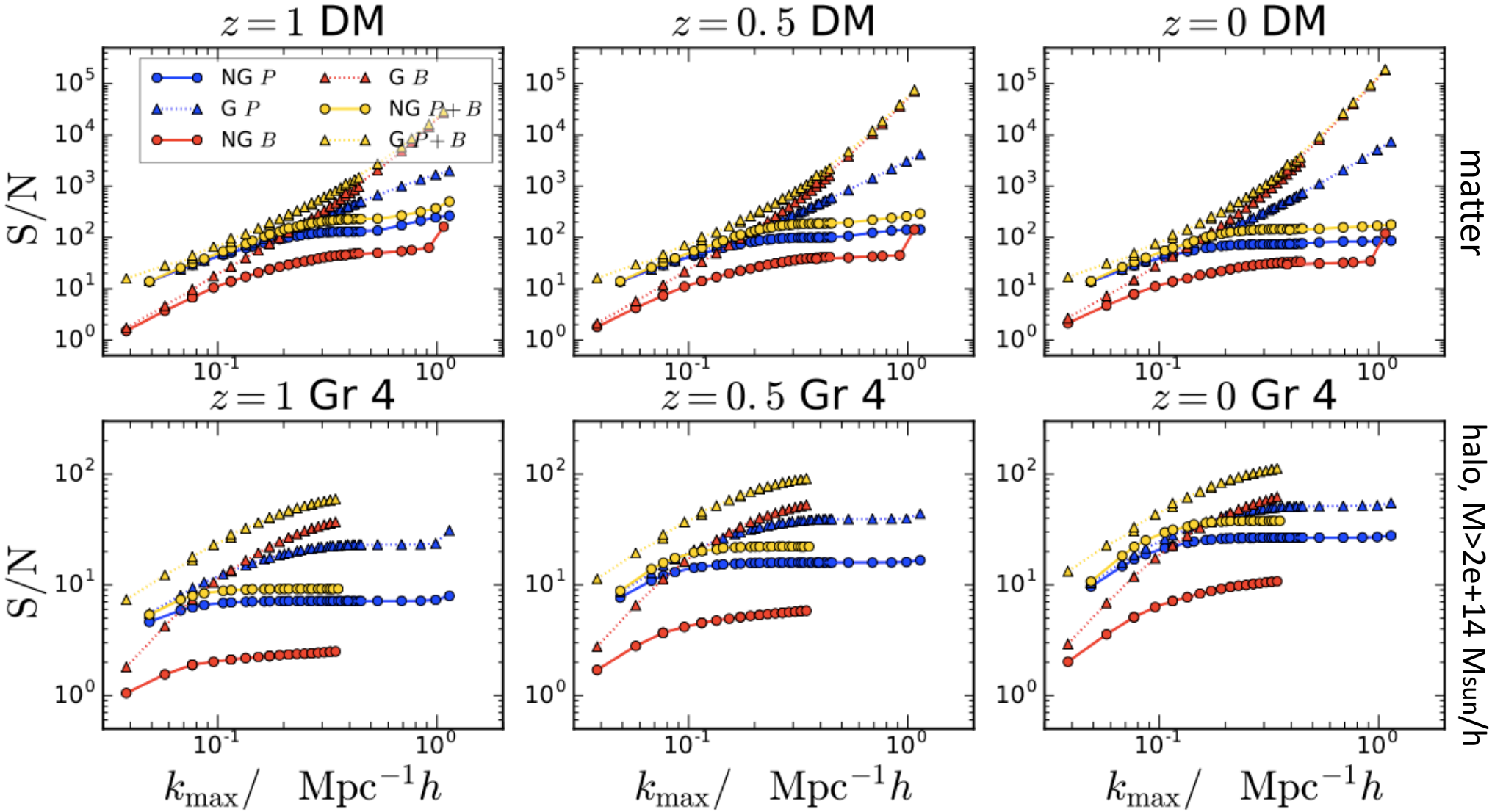
S/N for bispectrum

$$\left(\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{N}}\right)^2 = \sum_{k_1,k_2,k_1',k_2'\leq k_{\max}} \sum_{\theta,\theta'} \mathrm{Cov}_{\mathrm{B}}^{-1}(k_1,k_2,\theta,k_1',k_2',\theta')B(k_1,k_2,\theta)B(k_1',k_2',\theta')$$

S/N for power spectrum & bispectrum

青 : power spectrum　赤 : bispectrum　黄 : power spectrum + bispectrum

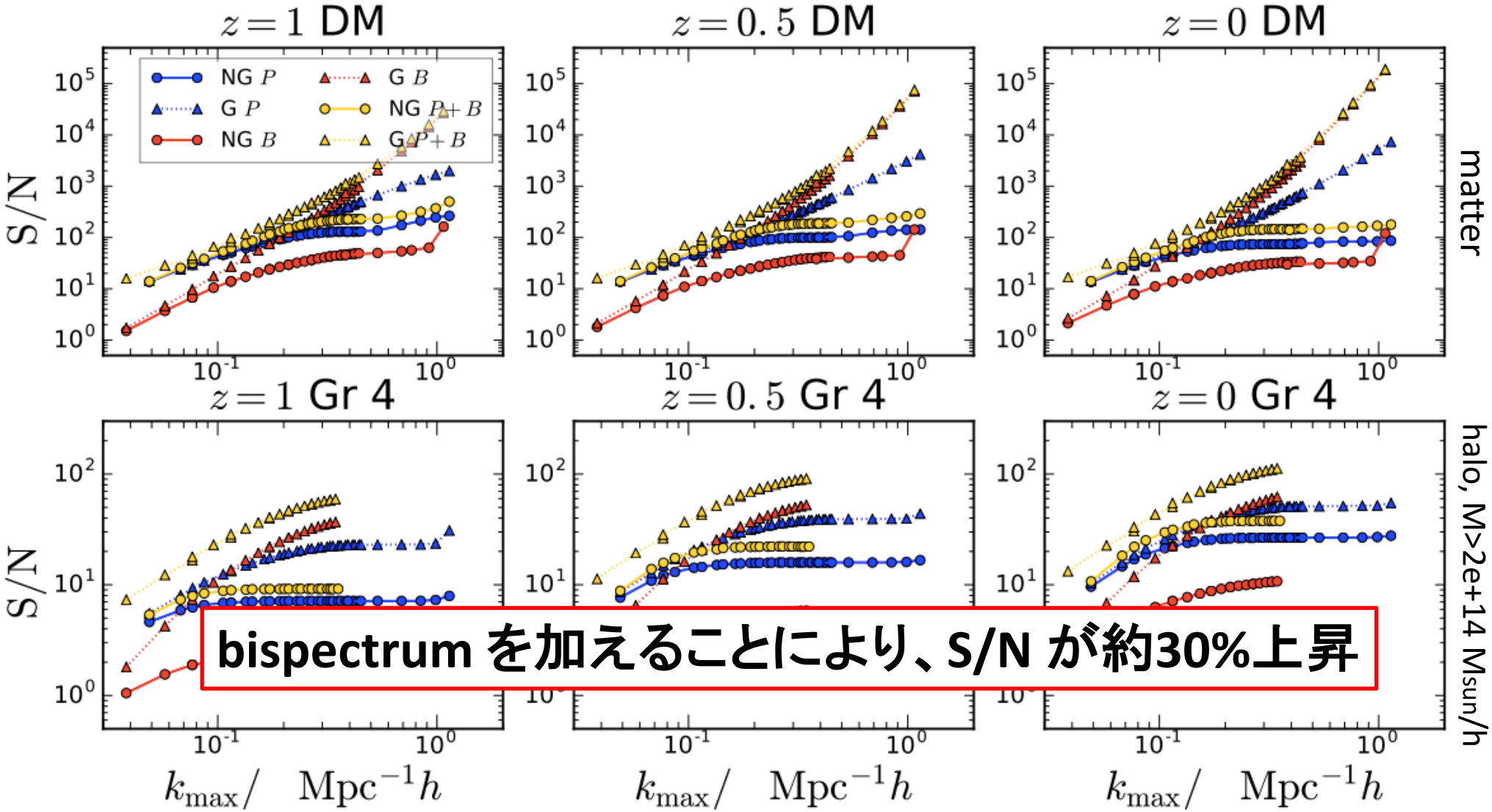
● : Gaussian + non-Gaussian terms　▲ : Gaussian term only



S/N for power spectrum & bispectrum

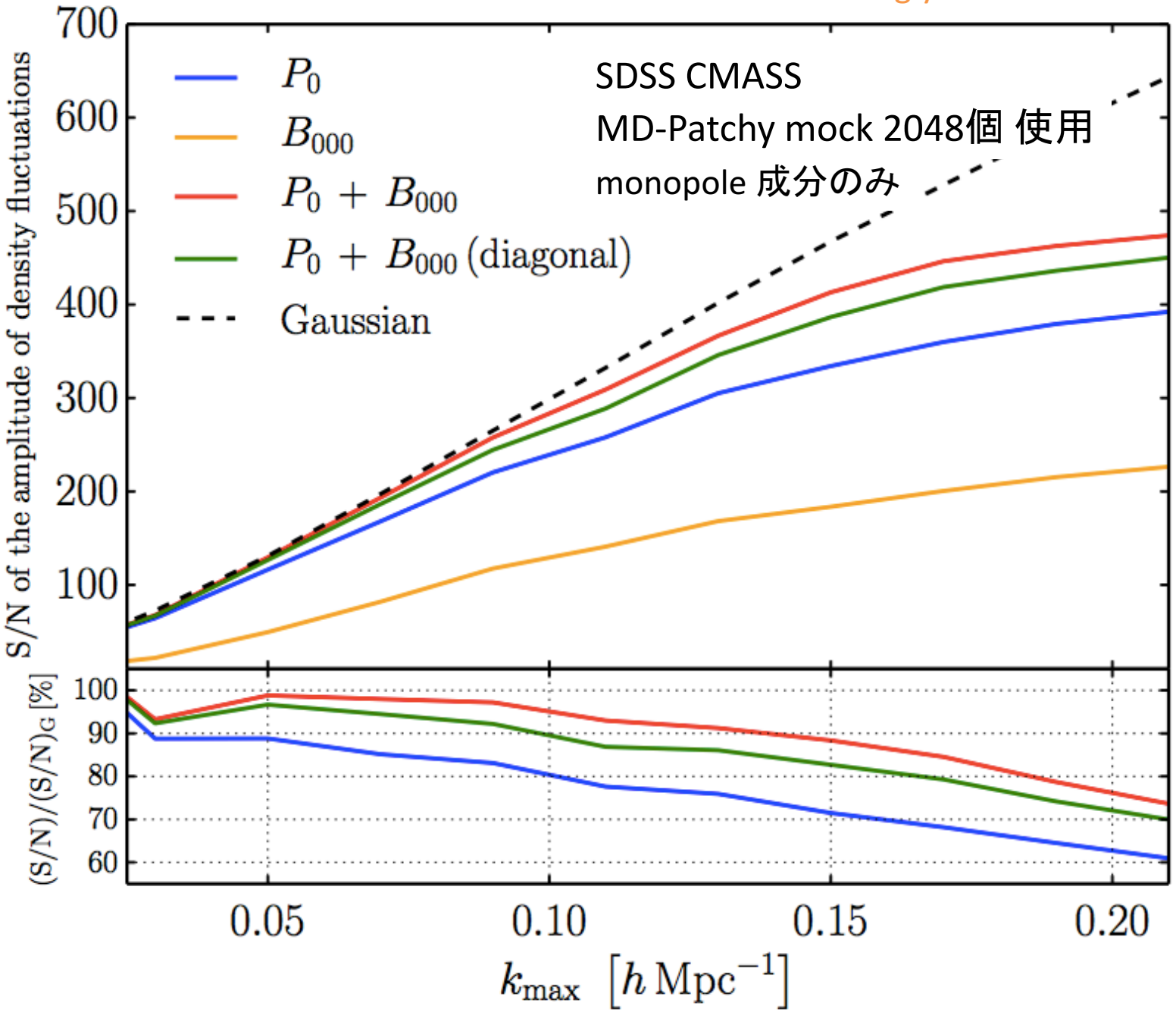
青 : power spectrum　赤 : bispectrum　黄 : power spectrum + bispectrum

● : Gaussian + non-Gaussian terms　▲ : Gaussian term only



bispectrum を加えることにより、S/N が約30%上昇

（Sugiyama+ 2018）



Previous work 2 : Chan, Dizgah & Norena (2017)

先程の Chan & Blot (2017) の続き

super-sample covariance も含む

bispectrum response to background density も導出

matter & halo fields in real space

N体計算でコバリアンスを測定

perturbation theory & halo model と比較

their simulation setting

small box : L=656.25Mpc/h with 256^3 particles × 4096 realizations
（w/o super survey mode）

gigantic box : L=21Gpc/h with 8192^3 particles

➡ small box（L=656.25Mpc/h）を 32768（=32^3）取り出す
（w/ super survey mode）

Small : small box 使用

Subbox : large box から一部を切り出した subbox 使用

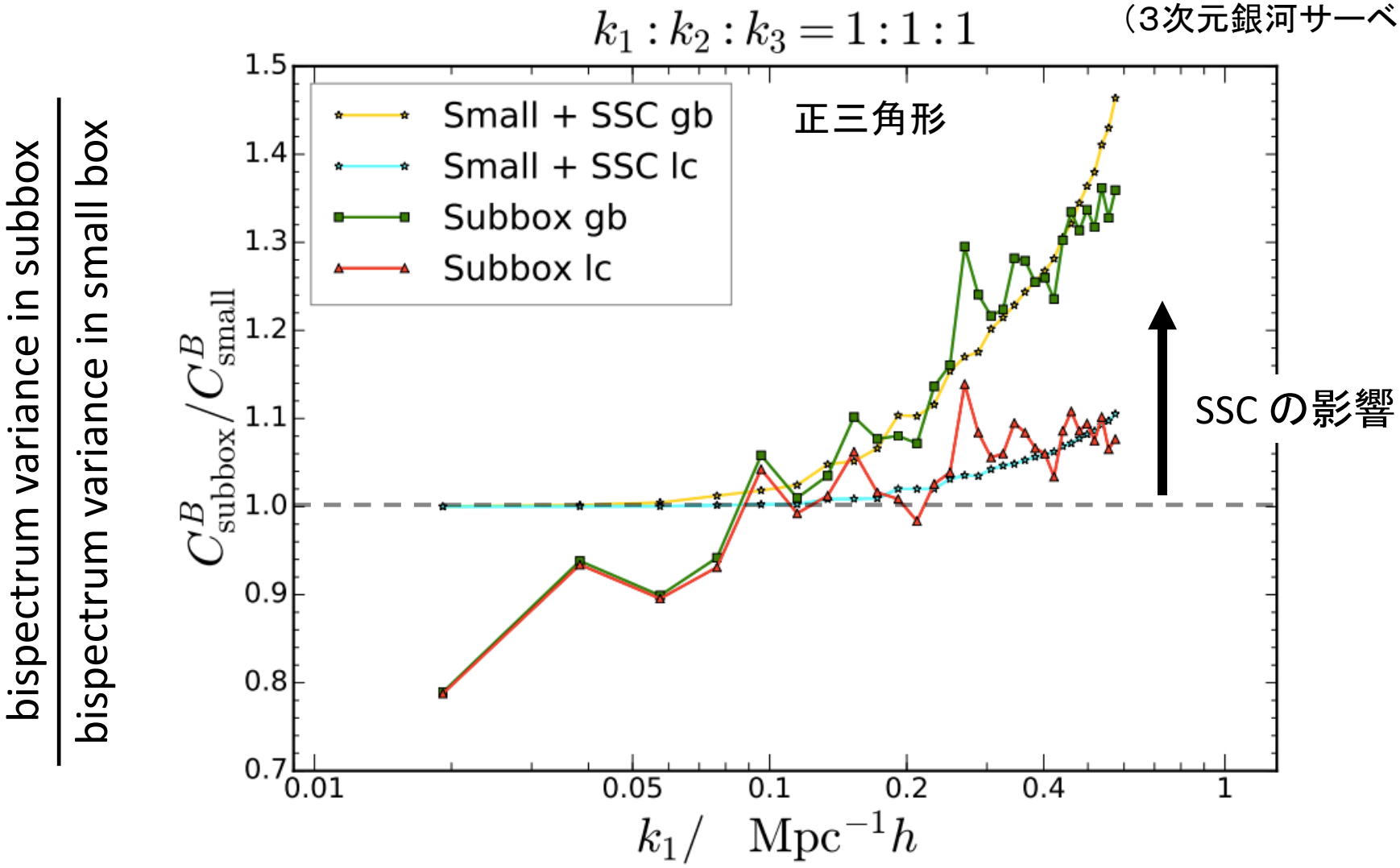
SSC : super-sample covariance の寄与（halo model使用）

$$\delta(\vec{r}) = \frac{\rho(\vec{r})}{\bar{\rho}} - 1$$

gb : global mean density 使用

lc : local mean density 使用

（3次元銀河サーベイは lc）



Small : small box 使用

Subbox : large box から一部を切り出した subbox 使用

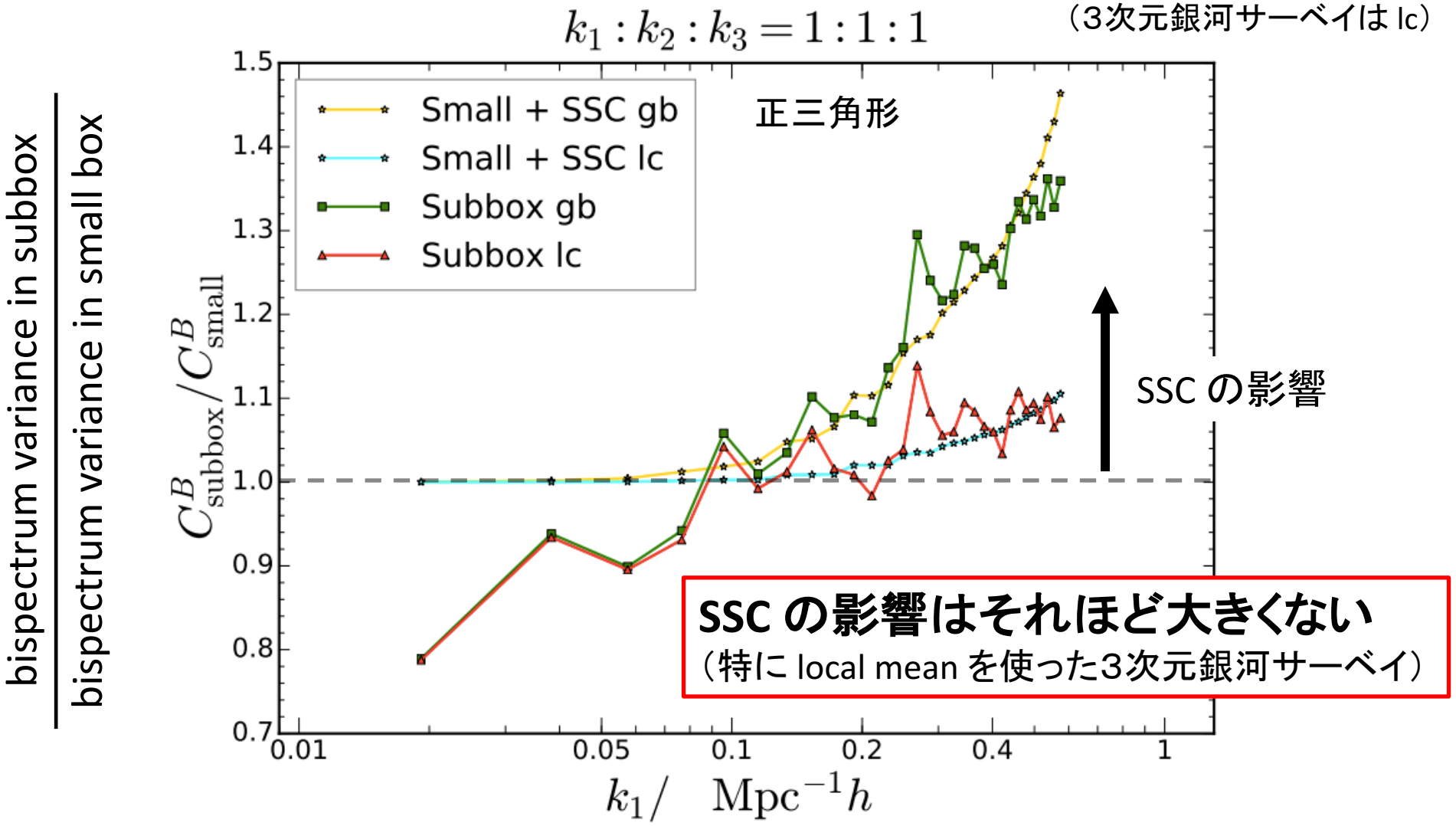
SSC : super-sample covariance の寄与（halo model使用）

$$\delta(\vec{r}) = \frac{\rho(\vec{r})}{\bar{\rho}} - 1$$

gb : global mean density 使用

lc : local mean density 使用

（3次元銀河サーベイは lc）



SSC の影響はそれほど大きくない

（特に local mean を使った3次元銀河サーベイ）

我々の研究目的

多数（数千以上）のN体計算を実行し、matter & halo bispectrum の covariance を求める

摂動論（by 樽家さん）と比較して covariance のモデル化

3次元の銀河分光サーベイを想定

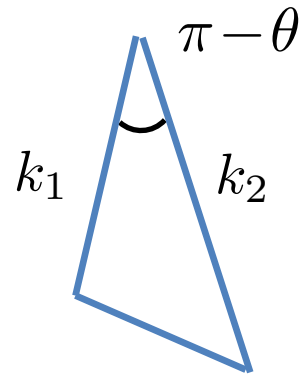
real & redshift spaces 両方

super-sample covariance も考慮

Mock は何 realization 必要か？

bispectrum がガウス分布に従うなら（Hartlap+ 2007）

realization 数 > bispectrum の全ビン数



ℓ : multipole

$B_\ell(k_1, k_2, \theta)$ in redshift space の全ビン数

= k1のビン数 × k2のビン数/2 × θのビン数 × multipoleの数

$$= 4050 \left(\frac{k_{\max}}{0.3\,h/\mathrm{Mpc}}\right)^2 \left(\frac{\Delta k}{0.02\,h/\mathrm{Mpc}}\right)^{-2} \left(\frac{\Delta\theta}{10\,\mathrm{deg}}\right)^{-1} \left(\frac{N_\ell}{2}\right)$$

波数の最大値　波数のビン幅　角度のビン幅　multipole の数

monopole & quadrupole

● N-body simulation set

Dark matter only, Gadget2（N-body code）+ Rockstar（halo finder）

two kinds of simulations prepared to see super-survey covariance

Small box (preparation done) w/o super-survey mode

L=500Mpc/h with 512^3 particles

4000 realizations

Large box (plan to start at June @ NAOJ CfCA) w/ super-survey mode

L=4Gpc/h with 4096^3 particles

>10 realizations

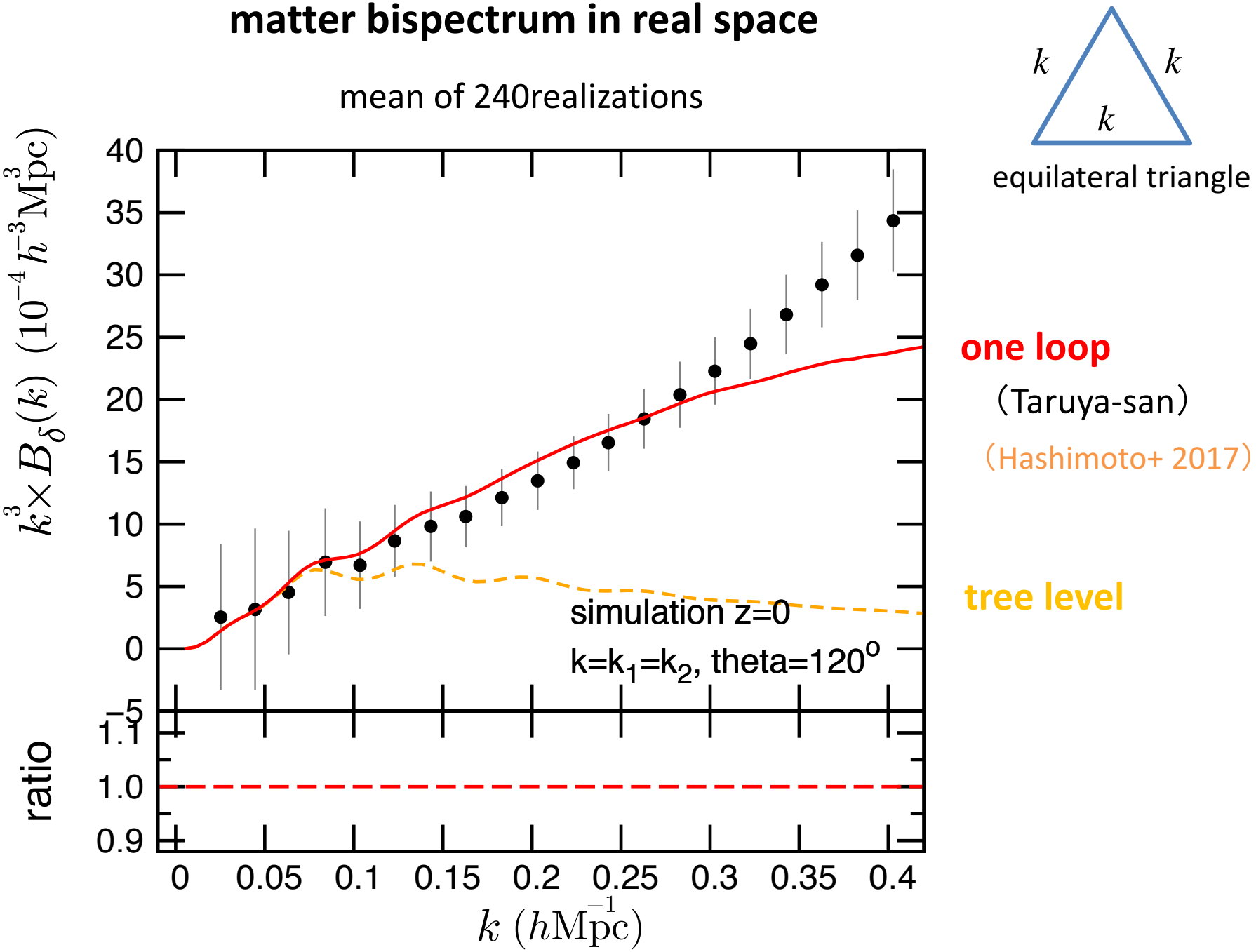
512(=8^3) small boxes taken from a single large box

Cosmological model : Planck2015

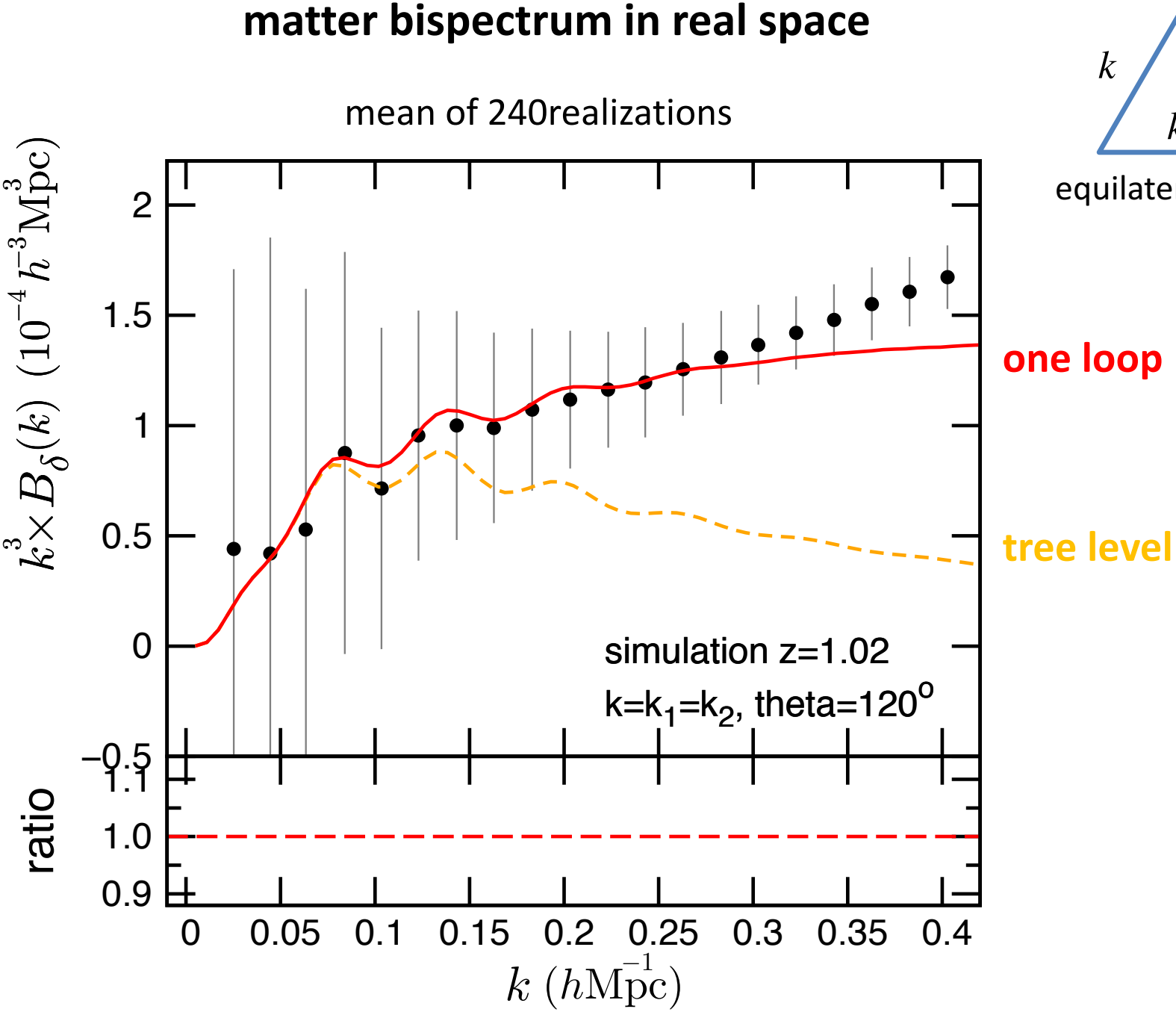
4 output redshifts : z=0, 0.48, 1.03, 1.48

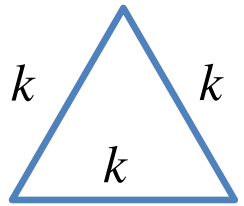
Same as default setting in Nishimichi+ emulator

matter bispectrum in real space



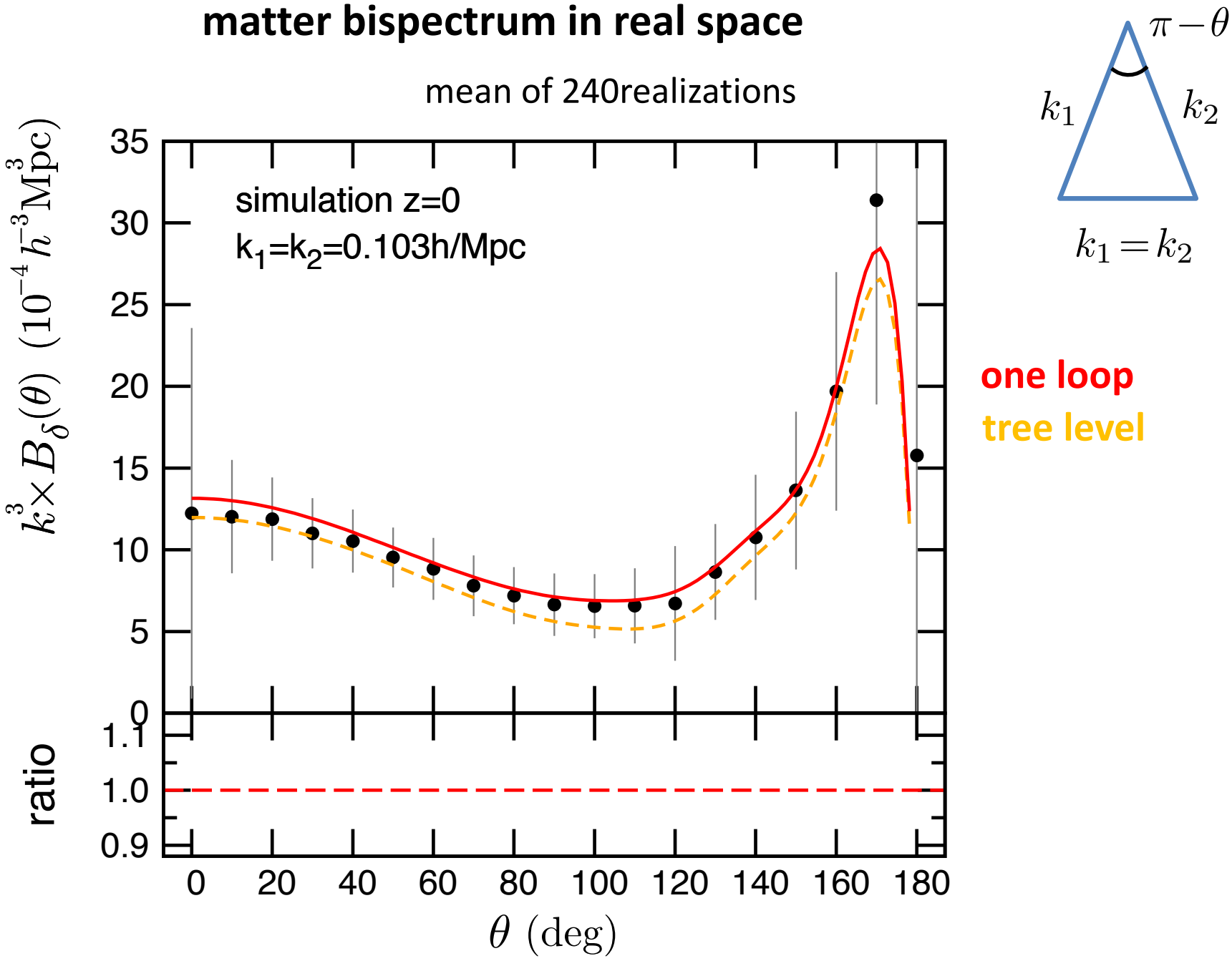
matter bispectrum in real space



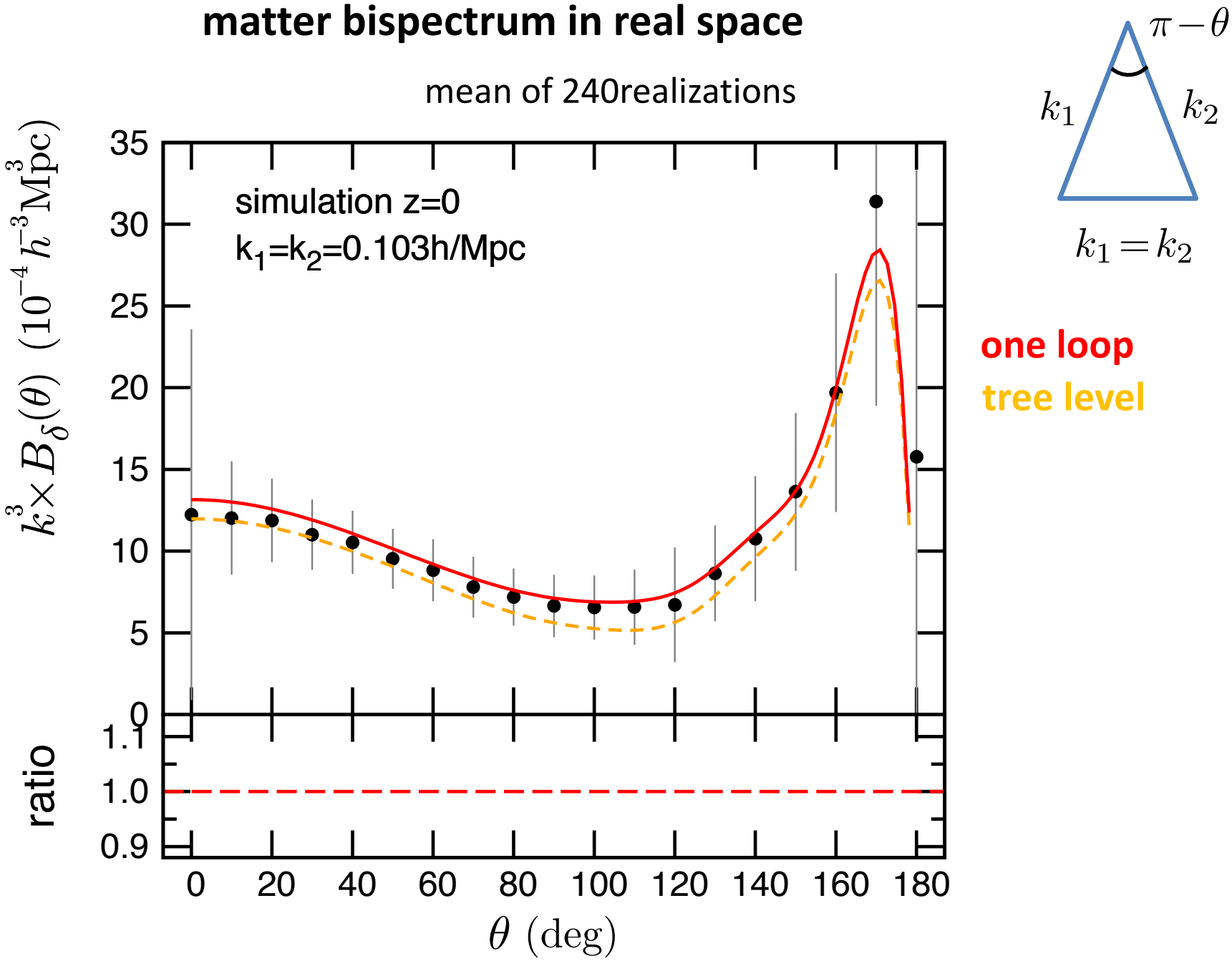


equilateral triangle

matter bispectrum in real space



matter bispectrum in real space



power spectrum & bispectrum の covariance の主要な計算法

3次元銀河サーベイ

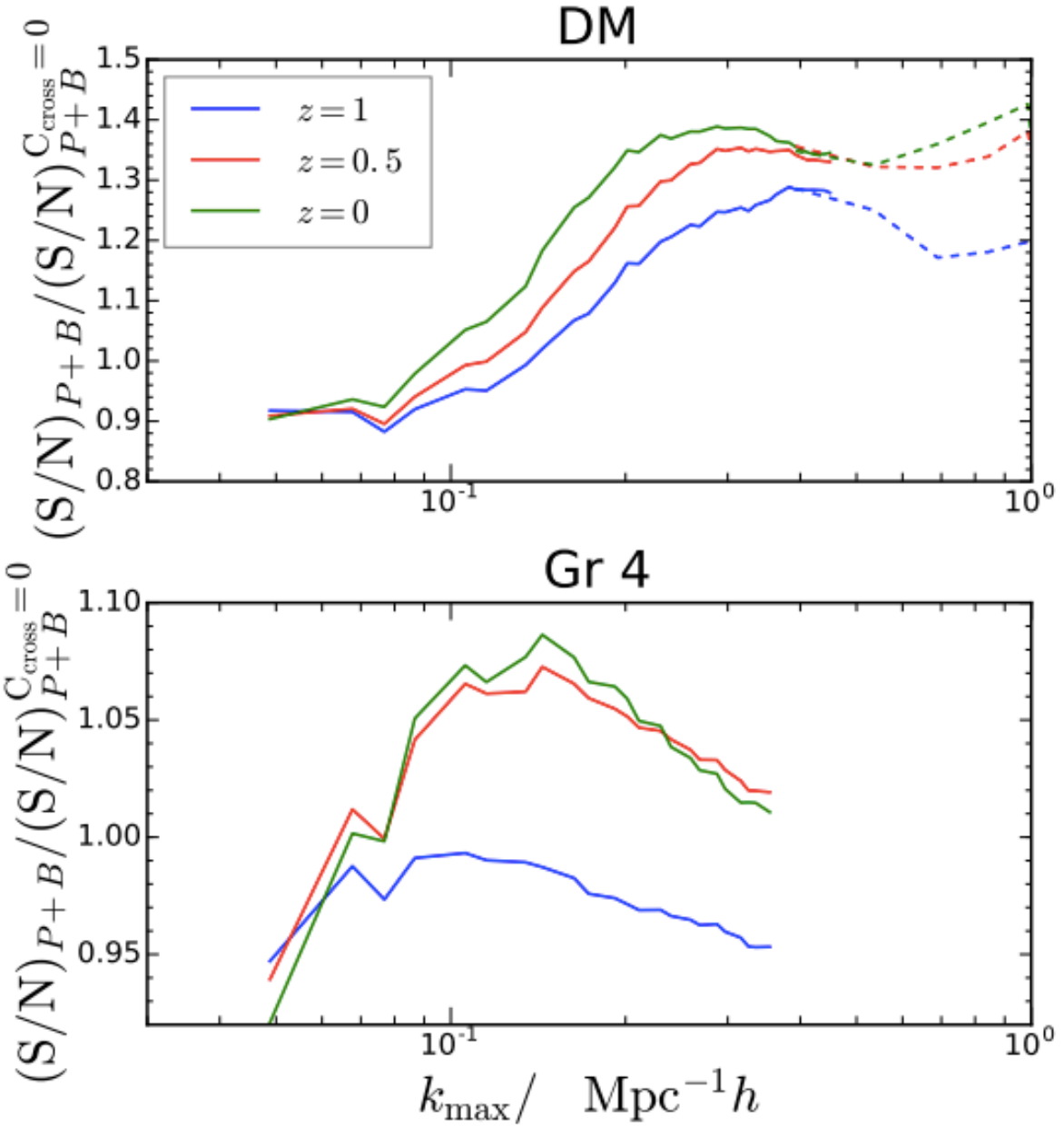
- （簡単な）mock を大量に作る
- （単純に）ガウス誤差を仮定
- 摂動論で covariance を求める（あまり見ない？）

摂動論で求めた covariance に需要があるか知りたい

弱い重力レンズサーベイ

- mock を大量に作る
- halo model
- jackknife
- N-body sim. から求めた covariance の fitting formula（あまり見ない）

power spectrum + bispectrum の cross covariance の影響



S/N with cross covariance / S/N without cross covariance

matter

halo, M>2e+14 Msun/h