

Generalizations of Bebiano-Lemos-Providência inequality

藤井 正俊 大阪教育大学 名誉教授

Masatoshi Fujii Osaka Kyoiku University

mfujii@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

1 はじめに

ここでは、ヒルベルト空間 H 上の有界線形作用素を単に作用素と呼ぶことにします。作用素 A が positive ($A \geq 0$) であるとは、

$$(Ax, x) \geq 0 \quad x \in H$$

が成り立つこととします。特に、 A が positive かつ invertible のとき、 $A > 0$ で表します。行列で言えば、 A が 非負定値 (positive semidefinite) であることが positive ($A \geq 0$) に、正定値が $A > 0$ に当たります。また、自己共役作用素 A, B に対して、 $A - B \geq 0$ によって、作用素順序 $A \geq B$ が自然に導入されます。 \mathbb{R}^+ 上で定義された連続関数 f による functional calculus がこの順序を保存する、すなわち

$$A \geq B \geq 0 \implies f(A) \geq f(B)$$

のとき、 f を作用素単調といいます。冪関数については、次の重要な事実が知られています。

$$t \rightarrow t^\alpha \text{ は、} \alpha \in [0, 1] \text{ のときのみ、作用素単調である。}$$

通常、これは Löwner-Heinz inequality と呼ばれています。以下 (LH) で表わします。[29], [25], [32] ((LH) に対する Pedersen の見事な証明は、Appendix で紹介します。)

さて、(LH) はノルム不等式による同値な表現を持っています。[12], [22] 代表的なものが、次の Araki-Cordes 不等式 (AC) です：

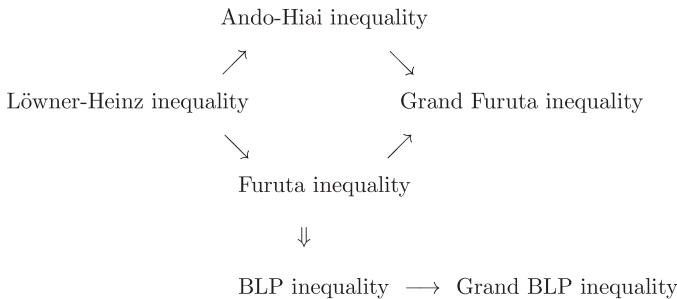
$$(AC) \quad \|B^t A^t B^t\| \leq \|BAB\|^t \text{ for } 0 \leq t \leq 1.$$

(AC) は、次のようにも変形できます：

$$(AC-1) \quad \|B^t A^t B^t\| \geq \|BAB\|^t \text{ for } t \geq 1.$$

$$(AC-2) \quad \|A^t B^t\| \leq \|AB\|^t \text{ for } 0 \leq t \leq 1.$$

本稿では、norm 不等式の方から、Löwner-Heinz 不等式の変身を見ていきたいと思います。そのためのロードマップをここに記しておきたいと思います。



2 作用素幾何平均

Kubo-Ando [28] による作用素平均の理論によって、非負作用素単調関数と作用素平均の間には、アフィン-同型が

$$A \sigma B = A^{\frac{1}{2}} f(A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}}) A^{\frac{1}{2}} \quad \text{for } A > 0, B \geq 0$$

によって与えられます。特に、

$$f(x) = 1 \sigma x$$

は作用素平均 σ の表現関数と呼ばれています。なお、作用素平均は、次の3条件を満たす2項演算を言います：

$$\begin{aligned} \text{Monotonicity:} & \quad A \leq C, B \leq D \Rightarrow A \sigma B \leq C \sigma D \\ \text{Upper semi-continuity:} & \quad A_n \downarrow A, B_n \downarrow B \Rightarrow A_n \sigma B_n \downarrow A \sigma B \\ \text{Transformer inequality:} & \quad T^*(A \sigma B)T \leq (T^*AT) \sigma (T^*BT) \text{ for all } T \\ \text{(Normalization:} & \quad 1 \sigma 1) \end{aligned}$$

さて、(LH) より、 $\alpha \in [0, 1]$ に対して、 α -幾何平均 $\#_\alpha$ が次のような形で定義されます：

$$A \#_\alpha B = A^{\frac{1}{2}} (A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}})^\alpha A^{\frac{1}{2}} \quad \text{for } A > 0, B \geq 0,$$

cf. [33], [34], [1]。このように定義すると、複雑そうに見えますが、 A と B が交換可能であれば、数の場合と同じように、

$$A \#_\alpha B = A^{1-\alpha} B^\alpha$$

特に、 $\alpha = \frac{1}{2}$ の場合は、

$$A \# B = \sqrt{AB}$$

となります。

なお、歴史的には、上記のようにすんなりと α -幾何平均が導入されたのではなく、まず幾何平均 $\#$ が作用素行列を使って定義されました： $A, B \geq 0$ に対して、

$$A \# B = \max\{X \geq 0; \begin{pmatrix} A & X \\ X & B \end{pmatrix} \geq 0\}$$

ここで、 A が invertible であるとする、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} A & X \\ X & B \end{pmatrix} \geq 0 & \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & A^{-\frac{1}{2}} X A^{-\frac{1}{2}} \\ A^{-\frac{1}{2}} X A^{-\frac{1}{2}} & A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \geq 0 \\ & \Leftrightarrow A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}} \geq (A^{-\frac{1}{2}} X A^{-\frac{1}{2}})^2 \\ & \Rightarrow (A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \geq A^{-\frac{1}{2}} X A^{-\frac{1}{2}} \\ & \Leftrightarrow A^{\frac{1}{2}} (A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{2}} \geq X \end{aligned}$$

従って、

$$A \# B = A^{\frac{1}{2}} (A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{2}}$$

と、丁度 $\alpha = \frac{1}{2}$ の時に適合しています。

作用素幾何平均を使った不等式の典型的なものとして、安藤-日合不等式が挙げられます。Ando-Hiai [2] による log-majorization theorem は、次のように表されています: $\alpha \in [0, 1]$ と正定値行列 A, B に対して、

$$(A\#_{\alpha}B)^r \succ_{(\log)} A^r\#_{\alpha}B^r \quad (r \geq 1)$$

が成り立つ。ところが実際に証明されているのは、次の作用素不等式

$$A\#_{\alpha}B \leq 1 \implies A^r\#_{\alpha}B^r \leq 1 \quad \text{for } r \geq 1$$

で、Ando-Hiai inequality (AH) と呼ばれています。(LH) の運用がその証明の要点です。

Proof of (AH). まず、 $\alpha \notin [0, 1]$ に対して、2項演算

$$A\sharp_{\alpha}B = A^{\frac{1}{2}}(A^{-\frac{1}{2}}BA^{-\frac{1}{2}})^{\alpha}A^{\frac{1}{2}} \quad (A, B > 0)$$

を導入します。($\#_{\alpha}$ と形は同じですが、こちらの方は、作用素平均にはなりません。) 以下で、次の変形公式を使用します: $A\sharp_{\alpha}B = B\sharp_{1-\alpha}A = B(B^{-1}\sharp_{\alpha-1}A^{-1})B$

さて仮定は、次のように変形されます: $A\#_{\alpha}B \leq 1 \iff C^{\alpha} = (A^{-\frac{1}{2}}BA^{-\frac{1}{2}})^{\alpha} \leq A^{-1} \iff C^{-\alpha} \geq A$

この下で示すべきことは、 $r = 1 + \epsilon$ ($\epsilon \in [0, 1]$) に対して、

$$A^r\#_{\alpha}B^r = A^{\frac{1}{2}}(A^{\epsilon}\#_{\alpha}A^{-\frac{1}{2}}B^rA^{-\frac{1}{2}})A^{\frac{1}{2}} \leq 1$$

(1) $C^{-\alpha} \geq A$ に (LH) を適用して、 $A^{\epsilon} \leq C^{-\alpha\epsilon}$ が分かります。

(2) 上記の公式を使い、

$$\begin{aligned} A^{-\frac{1}{2}}B^rA^{-\frac{1}{2}} &= A^{-\frac{1}{2}}(A^{\frac{1}{2}}CA^{\frac{1}{2}})^rA^{-\frac{1}{2}} = A^{-1}\sharp_r C = C(C^{-1}\#_{r-1}A)C \\ &= C(C^{-1}\#_{\epsilon}A)C \leq C(C^{-1}\#_{\epsilon}C^{-\alpha})C = C^{(1-\alpha)\epsilon+1} \end{aligned}$$

従って、 $A^{\epsilon}\#_{\alpha}A^{-\frac{1}{2}}B^rA^{-\frac{1}{2}} \leq C^{-\alpha\epsilon}\#_{\alpha}C^{(1-\alpha)\epsilon+1} = C^{\alpha} \leq A^{-1}$ より

$$A^r\#_{\alpha}B^r = A^{\frac{1}{2}}(A^{\epsilon}\#_{\alpha}A^{-\frac{1}{2}}B^rA^{-\frac{1}{2}})A^{\frac{1}{2}} \leq A^{\frac{1}{2}}A^{-1}A^{\frac{1}{2}} = 1$$

3 古田不等式

作用素幾何平均を使うことにより、より深い分析ができる例として、古田不等式を挙げる事ができると思います。古田不等式は、次のようなものですが (LH) の見事な一般化であります。

Furuta Inequality (FI)

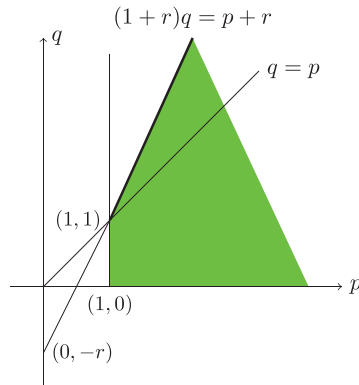
If $A \geq B \geq 0$, then for each $r \geq 0$,

(i) $(B^{\frac{r}{2}}A^pB^{\frac{r}{2}})^{\frac{1}{q}} \geq (B^{\frac{r}{2}}B^pB^{\frac{r}{2}})^{\frac{1}{q}}$

and

(ii) $(A^{\frac{r}{2}}B^pA^{\frac{r}{2}})^{\frac{1}{q}} \geq (A^{\frac{r}{2}}A^pA^{\frac{r}{2}})^{\frac{1}{q}}$

hold for $p \geq 0$ and $q \geq 1$ with $(1+r)q \geq p+r$.



Furuta inequality に関する文献は、[20], [21], [10], [11], [36]、[16] など多岐にわたります。

(FI) は、付帯条件において等号成立のときが最も重要で、それを α -geometric mean を用いてそれを表すと次のような形にまとめられます：

If $A \geq B \geq 0$, then for each $r \geq 0$

$$A^{-r} \#_{\frac{1+r}{p+r}} B^p \leq A$$

holds for $p \geq 1$.

(FI) をこのように表すと、次に挙げる Kamei [26] による精密化の意味が明確になります：

Satellite of (FI) (SFI) If $A \geq B \geq 0$, then for each $r \geq 0$

$$A^{-r} \#_{\frac{1+r}{p+r}} B^p \leq B (\leq A)$$

holds for $p \geq 1$.

実は、もう少し弱い条件の下で (SFI) は成立します：

If $\log A \geq \log B$ for $A, B > 0$, then

$$A^{-r} \#_{\frac{1+r}{p+r}} B^p \leq B$$

holds for $p \geq 1$ and $r \geq 0$.

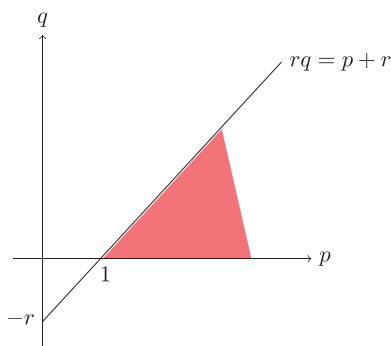
$\log A \geq \log B$ は、chaotic order と呼ばれていますが、 $\log t$ が作用素単調なので、 $A \geq B (> 0)$ より弱い順序になっています。(記号は、 $A \gg B$ と表されます。)

(SFI) を示すための道具が、次の古田型の不等式です。

(FI) for chaotic order. If $\log A \geq \log B$ for $A, B > 0$, then

$$(A^{\frac{r}{2}} B^p A^{\frac{r}{2}})^{\frac{1}{q}} \leq A^{\frac{p+r}{q}}$$

holds for $p \geq 0$, $q \geq 1$ and $r \geq 0$ such that $rq \geq p+r$.



(FI) の場合と同様に、作用素幾何平均で表せば、次のようになります。

(CFI) If $A \gg B$ for $A, B > 0$, then

$$A^{-r} \#_{\frac{r}{p+r}} B^p \leq I$$

holds for $p \geq 0$ and $r \geq 0$.

(CFI) の綺麗な証明は、Uchiyama [37] により与えられています。要点は

$$\left(1 + \frac{\log x}{n}\right)^n \rightarrow x \quad (n \rightarrow \infty)$$

の利用にあります。 $A \gg B$ に対して、

$$A_n = 1 + \frac{\log A}{n}, \quad B_n = 1 + \frac{\log B}{n}$$

とおくと、 $A_n \geq B_n$ ($n = 1, 2, \dots$) さらに、十分大なる n については、 $A_n \geq B_n > 0$ が成立します。これらに対して、(FI) を適用すると、

$$(A_n^{\frac{nr}{2}} B_n^{np} A_n^{\frac{nr}{2}})^{\frac{1+nr}{np+nr}} \geq A_n^{1+nr}$$

が得られますが、ここで

$$(A_n)^n \rightarrow A, \quad (B_n)^n \rightarrow B$$

より、

$$(A^{\frac{r}{2}} B^p A^{\frac{r}{2}})^{\frac{r}{p+r}} \geq A^r$$

が得られます。これを幾何平均を用いて表せば、

$$A^{-r} \#_{\frac{r}{p+r}} B^p \leq I$$

になります。蛇足ですが、(FI) と (CFI) は同値であることが分かります。

さて、前述の (SFI) の精密版

If $\log A \geq \log B$ for $A, B > 0$, then

$$A^{-r} \#_{\frac{1+r}{p+r}} B^p \leq B$$

holds for $p \geq 1$ and $r \geq 0$.

ですが、(CFI) より簡単に証明できます。その補助道具は次の2つです：

$$\text{Transposition: } A \#_{\alpha} B = B \#_{1-\alpha} A$$

$$\text{Multiplicativity: } A \#_{\alpha\beta} B = A \#_{\alpha} (A \#_{\beta} B)$$

この準備の下で、証明は以下の通り短いものです：

$$\begin{aligned} A^{-r} \#_{\frac{1+r}{p+r}} B^p &= B^p \#_{\frac{p-1}{p+r}} A^{-r} \\ &= B^p \#_{\frac{p-1}{p}} (B^p \#_{\frac{p}{p+r}} A^{-r}) && \text{by (Mp)} \\ &= B^p \#_{\frac{p-1}{p}} (A^{-r} \#_{\frac{p}{p+r}} B^p) && \text{by (Tp)} \\ &\leq B^p \#_{\frac{p-1}{p}} I && \text{by (CFI)} \\ &= I \#_{\frac{1}{p}} B^p = B. \end{aligned}$$

4 BLP 不等式

BLP は、Bebiano-Lemos-Providência の頭文字を取ったもので、彼らは [4] において次のノルム不等式を提示しました。

Bebiano-Lemos-Providência inequality (BLP)

$$\|A^{\frac{1+t}{2}} B^t A^{\frac{1+t}{2}}\| \leq \|A^{\frac{1}{2}} (A^{\frac{s}{2}} B^s A^{\frac{s}{2}})^{\frac{t}{s}} A^{\frac{1}{2}}\|$$

holds for $A, B \geq 0$ and $s \geq t \geq 0$.

この一般化は [18] で議論されています。

Theorem 4.1. *If $A, B > 0$, then*

$$\|A^{\frac{1+r}{2}} B^{1+r} A^{\frac{1+r}{2}}\|^{\frac{p+s}{p(1+r)}} \leq \|A^{\frac{1}{2}} (A^{\frac{s}{2}} B^{p+s} A^{\frac{s}{2}})^{\frac{1}{p}} A^{\frac{1}{2}}\|$$

holds for $p \geq 1$ and $s \geq r \geq 0$.

この定理が (BLP) の一般化になっていることは、 B を $B^{\frac{r}{1+r}}$ で置き換え、 $p = \frac{s}{r} \geq 1$ に取ると、

$$\frac{p+s}{p(1+r)} = 1, \quad \frac{r(p+s)}{1+r} = s$$

より、(BLP) が得られることより知られます。

なお、もう少し内情を言えば、次の作用素不等式を示し、その norm 不等式版として Theorem 4.1 が位置付けられます。

Theorem 4.2. *If $A, B > 0$ satisfy $A^s \#_{\frac{1}{p}} B^{p+s} \leq A^{1+s}$ for some $p \geq 1$ and $s \geq 0$, then $B^{1+s} \leq A^{1+s}$ and so $B^{1+r} \leq A^{1+r}$ for $0 \leq r \leq s$.*

この不等式は、(FI) から導かれます。実際、仮定： $A^s \#_{\frac{1}{p}} B^{p+s} \leq A^{1+s}$ の両辺に両側から $A^{-\frac{s}{2}}$ を掛けて、仮定を

$$B_1 := (A^{-\frac{s}{2}} B^{p+s} A^{-\frac{s}{2}})^{\frac{1}{p}} \leq A$$

と変形しておいて、(FI) を使います。即ち、

$$A^{1+s} \geq (A^{\frac{s}{2}} B_1^p A^{\frac{s}{2}})^{\frac{1+s}{p+s}} = B^{1+s}$$

となり、結論が得られます。

次に、(FI) と (AH) の同時拡張である Grand Furuta inequality (GFI) は、次のような形で表出されています

Grand Furuta inequality (GFI) *If $A \geq B > 0$ and $t \in [0, 1]$, then*

$$[A^{\frac{r}{2}} (A^{-\frac{t}{2}} B^p A^{-\frac{t}{2}})^s A^{\frac{r}{2}}]^{\frac{1-t+r}{(p-t)s+r}} \leq A^{1-t+r}$$

holds for $r \geq t$ and $p, s \geq 1$.

これを作用素平均の言葉で表せば、次のようになります。

(GFI) If $A \geq B > 0$ and $t \in [0, 1]$, then

$$A^{-r+t} \#_{\frac{1-t+r}{(p-t)s+r}} (A^t \natural_s B^p) \leq A$$

holds for $r \geq t$ and $p, s \geq 1$.

次に、(GFI) に対応する BLP 不等式の一般化を考えてみます。そのために、次の作用素不等式提起します。当然のことながら、これは Theorem 4.2 の (GFI) 版に当たっています。

Theorem 4.3. Suppose that $A, B > 0$ and $t \in [0, 1]$. If $A^{r-t} \natural_{\frac{1}{p}} (A^r \natural_{\frac{1}{s}} B^{(p-t)s+r}) \leq A^{1-t+r}$ for some $p, s \geq 1$ and $r \geq t$, then $B^{1-t+r} \leq A^{1-t+r}$.

次の系は、Grand BLP inequality と呼ぶのは、自然の成り行きとして、許されるものと考えます。

Corollary 4.4. Suppose that $A, B > 0$ and $t \in [0, 1]$. Then

$$\|A^{\frac{1-t+r}{2}} B^{1-t+r} A^{\frac{1-t+r}{2}}\|_{\frac{(p-t)s+r}{ps(1-t+r)}} \leq \|A^{\frac{1}{2}} \{A^{-\frac{t}{2}} (A^{\frac{r}{2}} B^{(p-t)s+r} A^{\frac{r}{2}})^{\frac{1}{s}} A^{-\frac{t}{2}}\}^{\frac{1}{p}} A^{\frac{1}{2}}\|$$

holds for $p, s \geq 1$ and $r \geq t$.

Theorem 4.3 及び Corollary 4.4 で、 $t = 0, s = 1$ とすると、Theorem 4.2 及び Theorem 4.1 が得られます。また、(GFI) と (AH) の関係は、

$$(GFI) \text{ for } t = 1, r = s \iff (AH)$$

であることがわかっていますので、Theorem 4.3 で、 $t = 1, s = r$ とすると、

$$\text{Let } r \geq 1 \text{ be given. If } A^{r-1} \#_{\frac{1}{p}} (A^r \#_{\frac{1}{r}} B^{pr}) \leq A^r \text{ for some } p \geq 1, \text{ then } B^r \leq A^r.$$

が、成立することになります。仮定の方は、

$$A^{-1} \#_{\frac{1}{p}} (I \#_{\frac{1}{r}} A^{-\frac{r}{2}} B^{pr} A^{-\frac{r}{2}}) \leq I$$

さらに、 $\alpha = \frac{1}{p}$, $B_1 = (A^{-\frac{r}{2}} B^{pr} A^{-\frac{r}{2}})^{\frac{1}{r}}$ とおくと、仮定は、 $A^{-1} \#_{\alpha} B_1 \leq I$ と書き換えられます。一方、結論 $B^r \leq A^r$ は、 $B^r = (A^{\frac{r}{2}} B_1^r A^{\frac{r}{2}})^{\alpha}$ より、

$$(A^{\frac{r}{2}} B_1^r A^{\frac{r}{2}})^{\alpha} \leq A^r \iff A^{-\frac{r}{2}} (A^{\frac{r}{2}} B_1^r A^{\frac{r}{2}})^{\alpha} A^{-\frac{r}{2}} \leq I \iff A^{-r} \#_{\alpha} B_1^r \leq I$$

となるので、(A の代わりに A^{-1} とすると) (AH) が得られます。

5 作用素相対エントロピー

1961 年、Nakamura and Umegaki [31] は、

$$S(A) = -A \log A$$

によって、作用素エントロピーを導入しました。その後、作用素平均の理論の発展の下で、1989 年、J-I Fujii and Kamei [9] により、作用素相対エントロピーが

$$S(A|B) = A^{\frac{1}{2}} \log(A^{-\frac{1}{2}} B A^{-\frac{1}{2}}) A^{\frac{1}{2}}$$

として導入されました。これが作用素エントロピーの相対化であることは、

$$S(A|I) = S(A) = -A \log A$$

より知られます。なお、作用素相対エントロピーの自然な近似として、Yanagi, Kuriyama and Furuichi [38] は、Tsallis 作用素相対エントロピー $T_\alpha(\rho|\sigma)$ ($\alpha \in [0, 1]$) を導入しました：

$$T_\alpha(\rho|\sigma) = \frac{\rho \#_\alpha \sigma - \rho}{\alpha}$$

ここで、 ρ, σ は、正定値行列ですが、そのまま正作用素にも適用でき、次のことが成り立ちます。

$$T_\alpha(\rho|\sigma) \downarrow S(\rho|\sigma) \quad (\alpha \downarrow 0);$$

$$\frac{d(\rho \#_\alpha \sigma)}{d\alpha} \Big|_{\alpha=0} = S(\rho|\sigma)$$

最後に、作用素相対エントロピーに関する BLP inequality について、考えてみたいと思います。まず、(CFI) の応用として、次の不等式が得られます。

Theorem 5.1. *Let $A, B > 0$ and $r > 0$ be given. Then, if $S(A^r|A^{p+r}) \geq S(A^r|B^{p+r})$ for some $p > 0$, then $A^r \geq B^r$.*

Proof. まず、 $\frac{1}{p}S(A^r|B^{p+r}) = A^{\frac{r}{p}} \log(A^{-\frac{r}{p}} B^{p+r} A^{-\frac{r}{p}})^{\frac{1}{p}} A^{\frac{r}{p}}$ なので、仮定は、次のように言い換えられます。

$$\log A \geq \log(A^{-\frac{r}{p}} B^{p+r} A^{-\frac{r}{p}})^{\frac{1}{p}}.$$

そこで、 $B_1 = (A^{-\frac{r}{p}} B^{p+r} A^{-\frac{r}{p}})^{\frac{1}{p}}$ とおくと、 $A \gg B_1$ が仮定ということになり、この結果、(CFI) より

$$I \geq A^{-r} \#_{\frac{r}{p+r}} B_1^p = A^{-r} \#_{\frac{r}{p+r}} A^{-\frac{r}{p}} B^{p+r} A^{-\frac{r}{p}},$$

が得られ、その結果、

$$A^r \geq I \#_{\frac{r}{p+r}} B^{p+r} = B^r$$

が得られ、無事証明が終わることになります。

さらに、作用素相対エントロピーに関する GBLP inequality は、次のような形で与えられます。

Theorem 5.2. *Let $A, B > 0$ and $t, r \geq 0$ be given. Then, if*

$$S(A^{t+r}|A^{p+t+r}) \geq S(A^{t+r}|A^r \natural_{\frac{1}{s}} B^{(p+t)s+r})$$

holds for some $p, s > 0$ with $(p+t)s \geq t$, then $A^{t+r} \geq B^{t+r}$.

この証明の基になる (GFI) 型の作用素不等式を挙げておきます [16, Theorem 3.16]:

If $A \gg X$ for $A, X > 0$, then

$$A^{\frac{(p+t)s+r}{q}} \geq [A^{\frac{r}{q}} (A^{\frac{t}{q}} X^p A^{\frac{t}{q}})^s A^{\frac{r}{q}}]^{\frac{1}{q}}$$

holds for $p, t, r, s \geq 0$, $q \geq 1$ with $(t+r)q \geq (p+t)s+r$.

Proof. まず最初に、仮定は次のように変形できます。

$$\log A \geq \log[A^{-\frac{t+r}{2}} (A^r \natural_{\frac{1}{s}} B^{(p+t)s+r}) A^{-\frac{t+r}{2}}]^{\frac{1}{p}}.$$

これより、 $q = \frac{(p+t)s+r}{t+r}$ and $X = [A^{-\frac{t+r}{2}}(A^r \natural_{\frac{1}{s}} B^{(p+t)s+r})A^{-\frac{t+r}{2}}]^{\frac{1}{p}}$ として上記の (GFI) 型の作用素不等式を用いると、

$$\begin{aligned} A^{t+r} &\geq [A^{\frac{r}{2}}(A^{\frac{t}{2}} X^p A^{\frac{t}{2}})^s A^{\frac{r}{2}}]^{\frac{t+r}{(p+t)s+r}} \\ &= [A^{\frac{r}{2}}(A^{\frac{t}{2}} [A^{-\frac{t+r}{2}}(A^r \natural_{\frac{1}{s}} B^{(p+t)s+r})A^{-\frac{t+r}{2}}] A^{\frac{t}{2}})^s A^{\frac{r}{2}}]^{\frac{t+r}{(p+t)s+r}} \\ &= [A^{\frac{r}{2}}(A^{-\frac{r}{2}}(A^r \natural_{\frac{1}{s}} B^{(p+t)s+r})A^{-\frac{r}{2}})^s A^{\frac{r}{2}}]^{\frac{t+r}{(p+t)s+r}} \\ &= [A^{\frac{r}{2}}(A^{-\frac{r}{2}} B^{(p+t)s+r} A^{-\frac{r}{2}} A^{\frac{r}{2}})]^{\frac{t+r}{(p+t)s+r}} \\ &= B^{t+r}, \end{aligned}$$

によって、証明が完了します。

Appendix–Pedersen’s proof of (LH)

$I = \{\alpha \in [0, 1]; x^\alpha \text{ is operator monotone}\}$ とおく。

$0, 1 \in I$ なので、 I が凸、即ち、 $2\alpha, 2\beta \in I \Rightarrow \alpha + \beta \in I$ を示せばよい。結論を書き直せば、

$$A^{-1} \geq B \geq 0 \Rightarrow A^{-(\alpha+\beta)} \geq B^{\alpha+\beta}, \text{ i.e., } A^{\frac{\alpha+\beta}{2}} B^{\alpha+\beta} A^{\frac{\alpha+\beta}{2}} \leq 1$$

さて、仮定より、 $A^{-1} \geq B \geq 0$ の下では、

$$A^\alpha B^{2\alpha} A^\alpha \leq 1, \quad A^\beta B^{2\beta} A^\beta \leq 1, \text{ i.e., } \|A^\alpha B^\alpha\| \leq 1, \quad \|B^\beta A^\beta\| \leq 1$$

従って、($r(X)$ is the spectral radius of X .)

$$\begin{aligned} \|A^{\frac{\alpha+\beta}{2}} B^{\alpha+\beta} A^{\frac{\alpha+\beta}{2}}\| &= r(A^{\frac{\alpha+\beta}{2}} B^{\alpha+\beta} A^{\frac{\alpha+\beta}{2}}) = r(A^\alpha B^{\alpha+\beta} A^\beta) \\ &\leq \|A^\alpha B^{\alpha+\beta} A^\beta\| \leq \|A^\alpha B^\alpha\| \|B^\beta A^\beta\| \leq 1. \end{aligned}$$

参考文献

- [1] T. ANDO, *Topics on Operator Inequalities*, Lecture Note, Hokkaido University, Sapporo, 1978.
- [2] T. ANDO and F. HIAI, *Log majorization and complementary Golden-Thompson type inequalities*, Linear Algebra Appl., **197**, **198** (1994), 113–131.
- [3] H. ARAKI, *On an inequality of Lieb and Thirring*, Let. Math. Phys., **19** (1990), 167–170.
- [4] N. BEBIANO, R. LEMOS and J. PROVIDÊNCIA, *Inequalities for quantum relative entropy*, Linear Algebra Appl., **401** (2005), 159–172.
- [5] G. CORACH, H. PORTA and L. RECHT, *An operator inequality*, Linear Algebra Appl., **142** (1990), 153–159.
- [6] G. CORACH, H. PORTA and L. RECHT, *Convexity of the geodesic distance on spaces of positive operators*, Illinois J. Math., **38** (1994), 87–94.
- [7] J. FUJII, M. FUJII, T. FURUTA and R. NAKAMOTO, *Norm inequalities related to McIntosh type inequality*, Nihonkai Math. J., **118** (1993), 827–830.
- [8] J. FUJII, M. FUJII, T. FURUTA and R. NAKAMOTO, *Norm inequalities equivalent to Heinz inequality*, Proc. Amer. Math. Soc., **3** (1992), 67–72.

- [9] J. FUJII and E. KAMEI, *Relative operator entropy in noncommutative information theory*, Math. Japon., **34** (1989), 341–348.
- [10] M. FUJII, *Furuta's inequality and its mean theoretic approach*, J. Operator Theory, **23** (1990), 67–72.
- [11] M. FUJII, *Furuta inequality and its related topics*, Ann. Funct. Anal., **1** (2010), 28–45.
- [12] M. FUJII and T. FURUTA, *Löwner-Heinz, Cordes and Heinz-Kato inequalities*, Math. Japon., **38** (1993), 73–78.
- [13] M. FUJII, T. FURUTA and R. NAKAMOTO, *Norm inequalities in the Corach-Porta-Recht theory and operator means*, Illinois J. Math., **40** (1996), 527–534.
- [14] M. FUJII, M. ITO, E. KAMEI and A. MATSUMOTO, *Operator inequalities related to Ando-Hiai inequality*, Sci. Math. Japon., **70** (2009), 229–232.
- [15] M. FUJII and E. KAMEI, *Mean theoretic approach to the grand Furuta inequality*, Proc. Amer. Math. Soc., **124** (1996), 2751–2756.
- [16] M. FUJII, J. MIĆIĆ HOT, J. PEČARIĆ and Y. SEO, *Recent Developments of Mond-Pečarić Method in Operator Inequalities*, Element, Zagreb, Monographs in Inequalities **4**, 2012.
- [17] M. FUJII and E. KAMEI, *Ando-Hiai inequality and Furuta inequality*, Linear Algebra Appl., **416** (2006), 541–545.
- [18] M. FUJII, R. NAKAMOTO AND M. TOMINAGA, *Generalized Bebiano-Lemos-Providência inequalities and their reverses*, Linear Algebra Appl., **426** (2007), 33–39.
- [19] M. FUJII AND Y. SEO, *reverse inequalities of Cordes and Löwner-Heinz inequalities*, Nohonkai Math. J., **16** (2005), 145–154.
- [20] T. FURUTA, $A \geq B \geq 0$ assures $(B^r A^p B^r)^{1/q} \geq B^{(p+2r)/q}$ for $r \geq 0$, $p \geq 0$, $q \geq 1$ with $(1+2r)q \geq p+2r$, Proc. Amer. Math. Soc. **101** (1987), 85–88.
- [21] T. FURUTA, *Elementary proof of an order preserving inequality*, Proc. Japan Acad. **65** (1989), 126.
- [22] T. FURUTA, *Norm inequalities equivalent to Löwner-Heinz theorem*, Rev. Math. Phys., **1** (1989), 135–137.
- [23] T. FURUTA, *Extension of the Furuta inequality and Ando-Hiai log-majorization*, Linear Algebra Appl., **219** (1995), 139–155.
- [24] F. HANSEN, *An operator inequality*, Math. Ann., **246** (1980), 249–250.
- [25] E. HEINZ, *Beiträge zur Störungstheorie der Spectral-zegung*, Math. Ann., **123** (1951), 415–438.
- [26] E. KAMEI, *A satellite to Furuta's inequality*, Math. Japon. **33** (1988), 883–886.
- [27] M. KIAN and Y. SEO, *Norm inequalities related to the matrix geometric mean of negative power*, Sci. Math. Japon., Online, 2018–7.
- [28] F. KUBO and T. ANDO, *Means of positive linear operators*, Math. Ann., **246** (1980), 205–224.
- [29] K. LÖWNER, *Über monotone Matrix function*, Math. Z., **38** (1934), 177–216.
- [30] A. MCINTOSH, *Heinz inequalities and perturbation of spectral families*, Macquarie Math. Reports, 1979.
- [31] M. NAKAMURA and H. UMEGAKI, *A note on the entropy for operator algebras*, Proc. Japan Acad., **37** (1961), 149–154.
- [32] G. K. PEDERSEN, *Some operator monotone functions*, Proc. Amer. Math. Soc., **36**(1972), 309–310.
- [33] G. K. PEDERSEN and M. TAKESAKI, *The operator equation $THT = K$* , Proc. Amer. Math. Soc., **36**(1972), 311–312.

- [34] W. PUSZ and S. L. WORONOWICZ, *Functional calculus for sesquilinear forms and the purification map*, Rep. Math. Phys., **8** (1975), 159–170.
- [35] Y. SEO, *Matrix trace inequalities related to the Tsallis relative entropy of negative order*, J. Math. Anal. Appl., **472** (2019), 1499–1508.
- [36] K. TANAHASHI, *Best possibility of the Furuta inequality*, Proc. Amer. Math. Soc., **124** (1996), 141–146.
- [37] M. UCHIYAMA, *Some exponential operator inequalities*, Math. Inequal. Appl., **2** (1999), 469–471.
- [38] K. YANAGI, K. KURIYAMA, S. FURUICHI, *Generalized Shannon inequalities based on Tsallis relative operator entropy*, Linear Algebra Appl., **394** (2005) 109–118.