

脳からみた音の科学

Brain Oriented Acousitics

安藤 四一

Yoichi Ando

序

“いのち”とは一体なにか? …ここでは人のいのちには3つあると定義する。図 P.1 に示しているように、第1のいのちは肉体、第2は精神（こころ）。これら2つのいのちは、程度の差はあるものの動物も持っている。最も人間らしい第3のいのち、そこに美が関わっている。それは個性から生まれる美しい“いのち”である。例えて言えば、ベートーベンやモーツァルトが作曲した音楽が奏でられるとき、その“いのち”は蘇る。同時に人は好い音を聴くと生き生きする。好い音は美と関連が深い。演奏者は音楽を解釈し、演奏者の個性を表現して初めて聴く人の心を打つ。このようないのちは、ありとあらゆる人間社会の中に存在し、蓄積されていくと『文化』となる。決して天才と呼ばれるような人だけがこのいのちを持っているのではない。驚くべきことは、すべての人の遺伝子（DNA）は異なるし、育った環境も異なるのでその人独自の視点がある、ということだ。すなわち、人はすべて“天才”なのである。その視点をたどって行くと、いつの間にか誰もたどりついたことのない新しく、美しい独自の世界が開ける。要するに自分が選んだ My way を見据えて積み重ねることに尽きる。

言うまでもなく、今までにわかった『知』の集合 A は、限られており、その外には無限に『未知』の世界 A^C （次頁イラスト参照）が広がっている。そこには一人ひとりのために『謎』（仮説）が待っている。もし、あなたがその謎に取り組みなければ迷宮入りすると言っても過言ではない。すなわち、科学と芸術の『知』は限りがあり（集合 A ）、いつまでも“未熟”である。若いころ集合 A を中から見て、すべてのことが知り尽くされているという錯覚に陥ったことがある。だが一旦未知の世界に旅立つと、集合 A が小さく見えてくる。教育はロケットのブースター役であって、独自 A^C の力で第2段ロケットに点火する時までで十

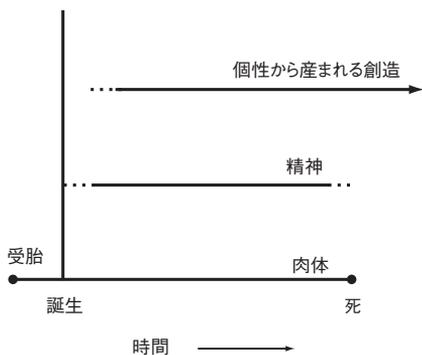
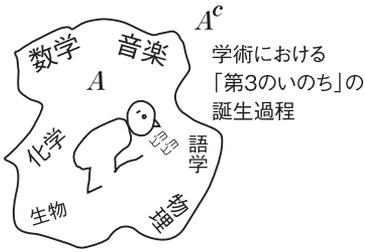
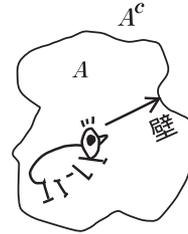


図 P. 1 いのちの3つのステージ。1) 肉体のいのち、2) 精神のいのち、1)と2)のいのちは、程度の差はあるものの動物にもみられる。重要なのは人間だけがもつ、3) 第3のいのち：個性から生まれる創造、それは受け入れられると永遠性がある。例えば、ベートーベンやモーツァルトの曲が演奏されるたびにそのいのちが再生される。このようないのちは作曲に限らず、一人ひとりをもって生まれたユニークな個性で、あらゆる生活の場面において創造性が発揮できる。これが人生の楽しみになるかも！もし公表されれば、時間と空間を越えてお互いに交わり尊敬しあい、蓄積されれば『文化』となり、豊かな生活と平和への第一歩となるから。



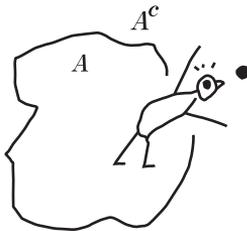
(学術以外の
どのようなことでも同様に
「第3のいのち」は派生し、
人類が生存する限り
生き続ける)

P.1 (1) 第3のいのち.



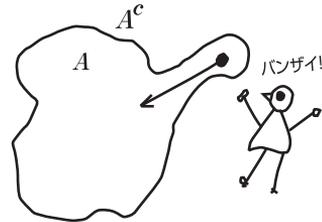
仮説が正しいかどうかを知るため、
ひとつの壁に焦点をあてる。
大変な努力が必要だよー
失敗しても仮説を信じる限り何回でもチャレンジする。
何年かかっても「7転8起」!
ここでベートーベンの第五「運命」などを聞いて下さい。

P.1 (2) 仮説を立てる.



ワー この仮説は
正しいのだ

P.1 (3) 仮説の検証



皆んなに知らせるため、公表する。
その分Aの集合が増える。
未知の世界は大きいなー

これが「第3のいのち」として図書館などに
蓄積される。後に誰かが見付けて読んだり見たり
聞いたりします(再生)。

P.1 (4) 公表、蓄積、再生



離れてみると、集合 A はなんと
小さいことか。
もっと色々仮説を立てて飛んでいこう。

P.1 (5) 未知の世界は膨大-独り立ち

分である。

第1と第2のいのちだけでは、社会は不十分で常に世紀末の様相を呈する。だが生き甲斐となる第3のいのちと出会う時、そこに限りなく豊かな生活が生まれる。さて、好い音楽と出会うとき人は生き生きとする。一方、好くない音を長時間聴かされると音楽であっても生命力が奪われていく。特に人類で最もデリケートな胎児期における騒音の影響は世代を越えた計り知れないものがある。それ故、環境の長時間的効果が重要課題として浮き彫りにされている。

さあ、筆者らが約半世紀に渡って取り組んだ課題に絡み合わせることで、あなた自身の「個性探し」の旅をしよう。機会があれば、脳からみた音の科学と芸術についても、さらに発展させていただければ、幸いである。

読者一人ひとりへ

筆者が好い音を科学するに至った背景には、好くない音（騒音）の胎児-学童の発育への深刻な影響の研究がある（下記第2部論文リスト）。その影響を社会全体でなくしていくために“いのち”を育む音とは何か、研究を再スタートした。人にとって好い音を求める感性音響学の始まりとなった。

第1部はコンサートホールの視点から好い音とは何かを脳を中心として科学的に究明する（下記第1部著書リスト）。第2部では人類史上問題が大きい騒音の発育への影響に関する科学的な結果を述べる。こうすることで好い音がより鮮明に理解できる。第1部と第2部を合わせて読んで頂きたい。好い音について研究を進めていくと音に対する人の好みの重要性が浮かび上がった。音に対する人の好みには、いのちに関わる共通の要素がある。好い音は健康な人が益々生き生きするが、他方好くない長期間の音は最も微妙な立場の胎児に蓄積されて生命の危険を伴うことが明らかにされている。

すなわち「好み」(Preference)とは何か？好みは個人差が大きく科学の対象ではないとされてきた。しかし、その意味するところは、好みは生命を維持し養う方向に判断され、個々の生物にとって最も原始的かつ根源的な反応である。従って、これに関連する大脳活動があるはずだと仮説を立て、好みの世界に初めて科学のメスを入れた。これが一人ひとり『個』の表現の源ともなる。

コンサートホールの設計において、これまで全体的に良かれと設計されてきたが、一人ひとりの好みの満足が得られないことがあった。もし、一人ひとりを満足させられると、全体も満足する。がその逆は成り立たないのである。

最後に、人のいのちとは何かについて考えてみよう。生物一般にある肉体のいのち、精神のいのち、もう一つ人だけが持っているいのちがある。そのいのちが最も重要で、ここから積み重ねられた人々の創造が、体と心が他界した後でも文化として残るからである。環境全般にしみ込んだ文化が人を育てる力となる。このレベルの文化の共有と交流こそ、時間と空間を越えるから永遠性があり、それがやがてタイムトンネルともなる（例：629-759年の万葉集など）。古今東西にわたる世界のどこかに思いがけない同僚も見つかる。90歳から詩に目覚め、「くじけないで」と多くの人々に生きる勇気を与えている柴田トヨ（1911-）さんのように、どのような人間活動の中にあっても、一人ひとりの個性がもつ異なる視点から生まれるため、このようないのちは人類の宝となって生きていく。

背景となった著書 (第1部)

本書は入門に過ぎない。より深く知りたい方は次に挙げる参考書へと進んで頂ければ幸いである。

- [1] Ando, Y. (1985). *Concert Hall Acoustics*. Springer-Verlag, Heidelberg. 同日本語訳：安藤四一著，岡野利行訳，コンサートホール音響学，シュプリンガー・フェアラーク東京 (1987)。同中国語訳：安藤四一著，G. H. Dai 訳，D.Y. Maa 監修，音楽庁声学，科学出版社 (1989)。
- [2] Ando, Y. (1991). *Architectural Acoustics*, in McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology 1991, McGraw-Hill, New York.
- [3] Ando, Y. and Noson, D. (1997). Editors. *Music and Concert Hall Acoustics*, Conference Proceedings of MCHA 1995. Academic Press, London.
- [4] Tohyama, M., Suzuki, H., and Ando, Y. (1995). *The Nature and Technology of Acoustic Space*. Academic Press, London.
- [5] Ando, Y. (1998). *Architectural Acoustics, Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. AIP Press/Springer-Verlag, New York. 同日本語訳：安藤四一著，酒井博之／佐藤伸一訳，建築音響学—音楽演奏・音響空間と聴衆の融合，シュプリンガー・フェアラーク東京 (2000)。同中国語訳：安藤四一著，S. X. Wu / Y. H. Zhao 訳，建築声学，天津大学出版社 (2006)。
- [6] Ando, Y. (2007). *Concert Hall Acoustics Based on Subjective Preference Theory*, Springer Handbook of Acoustics. Thomas Rossing, Editor, Springer-Verlag, New York, Chapter 10.
- [7] Ando, Y. (2009). *Theory of Temporal and Spatial Environmental Design*, in McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology 2009, McGraw-Hill, New York.
- [8] Ando, Y. (2009). *Auditory and Visual Sensations*, Springer-Verlag, New York.
- [9] 安藤四一. (2009). コンサートホールの音響と音楽表現. アルテスパブリッシング, 東京.

背景となった論文 (第2部)

胎児—学童への大阪国際空港周辺航空機騒音影響関連の原著。

- [1] Ando, Y., and Hattori, H. (1970). *Effects of intense noise during fetal life upon postnatal adaptability (Statistical study of the reactions of babies to aircraft noise)*. Journal of the Acoustical Society of America, 47, 1128-1130.
- [2] Ando, Y., and Hattori, H. (1973). *Statistical studies on the effects of intense noise during human fetal life*. Journal of Sound and Vibration, 27, 101-110.
- [3] Ando, Y., Nakane, Y., and Egawa, J. (1975). *Effects of aircraft noise on the mental work of pupils*. Journal of Sound and Vibration, 43, 683-691.

- [4] Ando, Y., and Hattori, H. (1977a). *Effects of noise on sleep of babies*. Journal of the Acoustical Society of America, 62, 199-204.
- [5] Ando, Y., and Hattori, H. (1977b). *Effects of noise on human placental lactogen (HPL) levels in maternal plasma*. British Journal of Obstetrics and Gynaecology, 84, 115-118.
- [6] Ando, Y. (1988). *Effects of daily noise on fetuses and cerebral hemisphere specialization in children*. Journal of Sound and Vibration, 127, 411-417.
- [7] Schell, L. M., and Ando, Y. (1991). *Postnatal growth of children in relation to noise from Osaka International Airport*. Journal of Sound and Vibration, 151, 371-382.
- [8] Ando, Y. (2001). *Differential effects of noise and music signals on the behavior of children*. Journal of Sound and Vibration, 241 (2001) 129-140.

建築・環境の時間設計に関する国際学術誌

- [1] *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment*. Since 2001:
[http:// www.jtdweb.org/journal/](http://www.jtdweb.org/journal/)

謝辞

神戸大学大学院自然科学研究科等における過去約 45 年にわたる一連の研究成果をわかり易く述べた。特に、本書の第 2 部にまとめた騒音の蓄積的影響に関する共同研究の成果は現神戸大学名誉教授服部 浩先生（医学部）との出会いの賜物である。第 1 部にまとめさせて頂いた好い音の科学的アプローチは、1971 年ゲッチンゲン大学第 3 物理学研究所故 Professor Manfred Schroeder の招聘を受け、1 ヶ月間滞在して行った Dr. Peter Damaske との共同研究「IACC と拡がり感」に関する研究や故 Dr. Deter Gottlob らとの出会いがきっかけであった。その後 1975 年西ドイツのアレクサンダー・フォン・フンボルト財団のフェローとして同研究所で本格的な研究を開始した。神戸大学大学院自然科学研究科の研究室メンバー、特に酒井博之（現京都大学准教授）、佐藤伸一（現華南理工大学教授）、添田喜治（現産業総合研究所研究員）、藤井健司（現オムロン）や留学生であった Professor Seong-Hoon Kang（韓国）および Professor Chiung Yao Chen（台湾）らの目を見張る研究成果があった。共に研究した日々が与えられたことを感謝している。また、乳児の容積脈波記録の協力と書き下ろし原稿を一般の読者に読み易くしてくれたのは安藤恵子の労による。

本書執筆の機会を与えて下さったのは一灯舎の平野皓正氏である。同氏はシュプリングァー・フェアラク東京の元社長でいわゆる赤本（Ando, 1985）と黒本（Ando, 1998）を発行して頂いた経緯がある。第三校では、平野ご夫妻の熱心な修正・校正をいただいた。また、野崎洋氏には、印刷のレイアウトを初め、原稿の不備を修正していただいた。甲南病院腎センター藤森明先生および関係者との出会いにより筆者の体調が回復し執筆が可能となった。ここに心からお礼申し上げます。

2011 年 1 月 神戸にて
安藤四一

目次

序	iii
読者一人ひとりへ	vii
背景となった著書（第1部）	viii
背景となった論文（第2部）	viii
謝辞	x
第I部 感性音響学-好い音の科学	1
第1章 はしがき	3
第2章 音場の時間的・空間的ファクター	7
第3章 大脳半球の分化	11
第4章 聴覚-大脳系のモデル	13
4.1 頭部, 耳介と外耳道の物理システム	13
4.2 鼓膜と耳小骨の物理システム	14
4.3 蝸牛の進行波システム	16
4.4 聴覚路の神経機能システム	16
4.5 聴覚-大脳系の全体モデル	18
第5章 好みに対応する大脳活動	23
5.1 頭頂部緩反応 (Slow Vertex Response: SVR)	23
5.2 脳波上の反応 (Electro-Encephalogram: EEG)	24
5.3 脳磁波上の反応 (Magnetro-Encephalogram: MEG)	25
第6章 音場の時・空間的ファクターに対する好み	29
6.1 単一反射音の音場 (時間的ファクター)	29
6.2 単一反射音の好ましい到来方向 (空間的ファクター)	30
6.3 多重初期反射音の音場	31
6.4 残響音付加の音場	32
第7章 プリファレンス理論 (好みの理論)	37
7.1 プリファレンス理論	37
7.2 設計の具体化・具現化	40

第 8 章	ホールの音響設計例	45
8.1	ニューヨークフィルハーモニックホールの改修案	45
8.2	世界に誇るホールの誕生過程	45
8.2.1	「改良シューボックス型」の神戸市東灘区民センター（うはらホール）	46
8.2.2	「木の葉型」の霧島国際音楽ホール（みやまコンセル）	48
第 9 章	実存のホール音場における理論の検証	55
9.1	ホール音場の時間的・空間的ファクターの計測システム	55
9.2	ホール音場の時間的・空間的ファクターの実測例	56
9.3	プリファレンス理論の検証	56
第 10 章	一人ひとりに好い座席	63
第 11 章	音の四要素（時間的基礎感覚）	67
11.1	音の高さ（Pitch）-空耳基本波（Missing Fundamental）の解明	67
11.2	音の大きさ（Loudness）	68
11.3	音色（Timbre）	70
11.4	音の継続時間感覚（Duration）	71
第 12 章	音場の三要素（空間的基礎感覚）	73
12.1	水平面内の定位（Localization）	73
12.2	音源の見かけの幅（ASW）	73
12.3	拡がり感（Subjective diffuseness）	75
第 13 章	第 2 の楽器としてのホール音場	77
13.1	音源と音場の融合理論の概要	77
13.1.1	音源と音場の時間的ファクターの融合（左脳）	77
13.1.2	空間的ファクターの条件（右脳）	77
13.2	作曲による音場の時間的ファクターとの融合	78
13.3	作曲による空間的表現	79
13.3.1	音源の見かけの幅（ASW）	80
13.3.2	音場の拡がり感	80
13.4	演奏による空間的表現	80
13.5	演奏による音場の時間的ファクターとの融合	80
第 14 章	楽音，騒音や音声等の計測	83
14.1	楽音，騒音や音声等の計測システム	83
14.2	ピアノのピッチの実測例	83
14.3	美の表現要素 ϕ_1	84
14.4	音声認識方式	86

14.4.1 モノーラルの音声認識	87
14.4.2 バイノーラルでの音声認識	87
第 15 章 むすび	89
第 II 部 騒音の蓄積的影響-好くない音の科学	91
第 16 章 はしがき	93
第 17 章 生後乳児の睡眠中の反応	97
17.1 母親へのアンケート調査	97
17.2 容積脈波上の反応	98
17.3 順応の限界-睡眠リズムの乱れ	100
第 18 章 胎盤機能	103
第 19 章 生時体重	105
第 20 章 児童の大脳半球分化	107
20.1 加算（左脳）作業について	107
20.2 欠陥発見（右脳）作業について	108
20.3 大脳半球分化	109
第 21 章 児童の身長	111
第 22 章 学童の時間感覚	113
第 23 章 成人への影響	117
23.1 聴覚系への影響	117
23.2 不快感（アノイアンス）	118
23.2.1 冷蔵庫騒音の不快感	118
23.2.2 交通騒音の不快感	120
23.3 不快感（アノイアンス）に対応した脳波	120
23.4 睡眠妨害	122
23.5 聴取妨害の取り組み方針（一例）	123
23.6 ストレスと内分泌系への影響	124
第 24 章 むすび	127
謝辞	127
付録 A.1. 音源信号の自己相関関数（ACF）	129
付録 A.2. 両耳間に到来する音の相互相関関数（IACF）	131

付録 A.3. 音場の 4 つの時間的・空間的ファクター	133
A.3.1. 時間的ファクター	133
A.3.2. 空間的ファクター	134
付録 A.4. 有限板からの反射伝達関数	135
付録 A.5. 音声のプリファレンスと明瞭度	137
付録 A.6. 音声認識の原理	139
おわりに	141
記号と用語説明	144
参考文献	149