「加速器」Vol. 6, No. 1, 2009（35–40）

特集１　KEKB B ファクトリー

B ファクトリーによる小林・益川理論の証明

山内　正則*

Testing Kobayashi-Maskawa theory at the B-factory

Masanori YAMAUCHI*

Abstract

The B factory at KEK has been operated successfully with updating world record of the luminosity of electron-positron colliders, and has provided experimental test to the Kobayashi-Maskawa theory. First of all, large CP violation was discovered in B meson system, which is one of the predictions of the model, followed by its confirmation in various B meson decays. On the other hand, some phenomena have been found, which may not be fully explained by the model alone. It is strongly anticipated to clarify them by the upgraded B factory(ies).

1.　はじめに

2008 年のノーベル物理学賞受賞者に南部陽一郎先生とともに小林　誠，益川敏英両先生が選ばれたことは誠に感慨無量であり，まずは心からお祝いを申し上げたい．高エネルギー加速器研究機構（KEK）に建設された B ファクトリー（KEKB）で長年実験を続けてきた Belle（ベル）グループにとって，小林・益川模型（KM 模型）を証明することは大きな目標のひとつであっただけに，それが実現し，両先生の受賞の後押しをしたとすればこれに勝る喜びはない．この稿では歴史的なことにも多少触れながら，この証明がどのように実現してきたかを解説したい．

2.　B ファクトリー実験にいたる経緯

まず，KM 模型について簡単に触れておきたい．CP 対称性とは物理法則において粒子と反粒子を入れ替えても法則は変わらないという性質のことで，1964 年に Fitch, Cronin らが実験的にこの対称性が破れていることを発見[1]するまでは“当たり前”の性質だろうと思われていたものである．この発見によって，粒子と反粒子では物理は少しだけ（K 中間子の場合には 1/1000 程度の小さな効果であった．）違っていることが明らかとなったが，ではどのようにしてこの破れが起こっているかが興味の対象となった．名古屋大学のいわゆる坂田スクールで共に学んだ小林先生と益川先生はこの問題に着目し，色々な可能性を検討した挙句に当時 3 種類しか知られていなかったクォークが 6 種類（以上）あれば自然に CP 対称性の破れが導出できることを指摘した[2]．実験的にこの考え方を証明するためには 6 種類（以上）のクォークを発見することに加えて，K 中間子で最初に発見された CP 非対称性以外にこの対称性がどのように破れているか，またクォークの混合がどのように起こっているかを調べる必要がある．新しいクォークは KM 模型が発表された後に相次いで発見され，1990 年には K 中間子崩壊の精密測定で直接的 CP の破れと呼ばれる KM 模型に特徴的な現象が発見された（一般に ε'/ε の測定と呼ばれることが多い）[3]．これらの結果はいずれも KM 模型を支持するものであったが，クォークの混合行列を理解し，CP の破れがこれに起因していることを示すためには B 中間子の研究を待たねばならなかった．この研究の進展にとって画期的な契機をもたらしたのは 1981 年の三田らの論文である[4]．この論文は，B 中間子が崩壊するまでの時間分布を計れば大きな CP 対称性の破れが見えることを指摘しており，この指摘に沿って実験を行うことは KM 模型の証明には非常に有効であると考えられたが，当時の実験技術としては大変チャレンジングなことであった．B 中間子を大量に作り出してこの実験を行うために，加速した粒子を固定標的に当てて B 中間子を作り出す方法に加えて，髙崎[5]，Oddone[6]によって独立に提

* 高エネルギー加速器研究機構（KEK）
（E-mail: yamauchi@post.kek.jp）

案されたように異なったエネルギーをもつ電子と陽電子による衝突型加速器によってB中間子対を作り出す方法が考案された．この方法はB中間子の測定には非常に適したクリーンな反応を作り出すことが可能であるが，必要なルミノシティ（輝度：電子・陽電子の衝突性能を表す量）が当時可能と考えられていた量の数十倍以上であり，加速器の実現に革新が必要であった．当時KEKではTRISTANという電子・陽電子衝突型加速器による実験が行われていたが，トップクォークの生成にはエネルギーが大幅に不足していることが明らかになり，新しい方向性を探っていた時期であった．このことから，TRISTANの資源を大幅に利用しつつ，高ルミノシティの非対称電子・陽電子衝突型加速器を実現することが高崎らによって提案された[7]．KEK以外でもSLAC, DESY, PSI，コーネル大学などでこのような加速器を実現する計画が持ち上がり，結局世界で2箇所，KEK（KEKB）とSLAC（PEP–II）[8]が同様の加速器をほぼ同時期に建設し，激しい競争をしながらKM模型の証明に挑むというひとつの時代が始まることになった．

この研究計画を盛んに議論していた1990年頃には小林誠先生はKEKに在職され，われわれ実験家もいろいろな折に議論させていただくことができた．当時まだ不慣れなBの物理を勉強するために年に一度はどこかに出かけて勉強会を開いたが，小林先生もほとんどの会に参加してくださって夜遅くまで議論した．小林先生もご一緒に，加速器の性能はここまで欲しい，こんな測定ができればすばらしい，あるいは小林，益川両先生にはぜひノーベル賞を，などといった夢を語り合ったのは懐かしい思い出であるが，それから20年弱の歳月を経てその夢がすべて実現したことは信じられない思いである．TRISTANで大きな物理成果が出せなかったにも関わらずKEKBの建設が認められたのは当時の菅原KEK所長をはじめとする研究者コミュニティのリーダー諸氏の一方ならぬ努力の結果であることも忘れてはならない．

3.　KEKB加速器とBelle実験

KEKBは周長3 kmのトンネルに設置した電子（8 GeV），陽電子（3.5 GeV）の二つの蓄積リング，およびそれらに電子，陽電子を入射する線形加速器からなる．この加速器についてはこの号に他の方が書かれていると思うので詳細は省くが，この加速器で最も重要なのは$1.7\times10^{34}/\mathrm{cm}^2/\mathrm{s}$という高いルミノシティを実現したことである．この値は今のところKEKB自身でしか更新することのできない世界記録である．衝

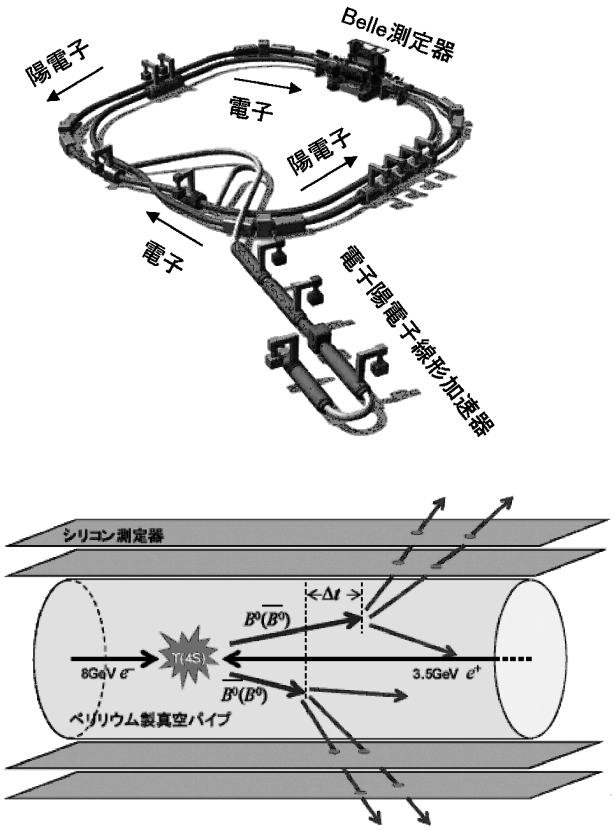

図1　KEKB加速器の概観（上）．右回りに蓄積された8 GeVの電子と逆向きの3.5 GeVの陽電子が一箇所の衝突点で衝突する．衝突によって発生したB中間子と反B中間子の対はエネルギーの非対称性のために電子の進行方向に0.2 mm程度飛んだ後に崩壊する（下）．崩壊位置を測定することによって崩壊までの時間が測定できることがこの電子・陽電子衝突型加速器の特徴．

突点では電子・陽電子の衝突によってさまざまな反応が起こるが，我々が注目するのはB中間子と反B中間子の対が作られる反応である．この加速器でエネルギーをあえて非対称にしてあるのは，生成されたB中間子が電子の進行方向に適当な運動量を持つ条件を作るためである．このエネルギー非対称性によって，B中間子が崩壊するまでの時間を測定することができ，さらに，この時間分布におけるCP非対称性を測定することが可能となった．B中間子の寿命は約1.6ピコ秒で崩壊前に飛ぶ距離は0.2 mm程度である．従ってB中間子が飛ぶ様子を直接測定器で測定することはできないが，B中間子の崩壊でできた粒子群を詳細に測定することでB中間子の振る舞いを測定することができる．このために衝突点を囲むように測定器Belleが設置されている（**図2**）[9]．この測定器はおよそ8 m立方の巨大な装置で，中心の衝突点で発生する粒子の種類，発生点の位置，運動量ベクトルを精度

良く測定するための様々な工夫がされている．ここで実験を続けている研究グループBelleは世界14ヶ国，59の研究機関から集まる約360人の研究者によって構成される国際研究グループであり，SLACのBaBarグループ[10]と激しい国際競争を続けながら成果を挙げ続けてきた．

この競争において当初重要だったのはいかにして高いルミノシティを実現して相手より先に十分な統計精度でKM模型が予言するCP非対称性を発見するかであった．KEKBにおいて高いルミノシティを達成するまでには様々な問題を乗り越えることが必要であったが，ここではその中のひとつ，電子雲の問題の解決について紹介しておきたい．陽電子の蓄積リングにおいて大電流のビームが作るシンクロトロン光（電子，陽電子が磁場で曲げられる時に発するX線など）が銅製のビームパイプの内側に当たると大量の光電子が発生し，ビームのプラスの電荷に引き寄せられ，ビームの陽電子と散乱し合ってビームを太らせる原因となる．このようなことが起こることはあらかじめ知られていたが，実際にはその影響は予想より深刻で，このために運転開始当初のルミノシティは大幅に制限されたものであった．この問題を解決するためにはビームパイプ内壁で発生する電子がビームに引き寄せられないような条件を作ればよい．最も簡単なのは光電子が発生する付近に磁場を作って，低エネルギーの電子が遠くまで飛べないようにすることである．このために何万個という永久磁石をビームパイプに沿って並べる作業を関係者総出で行った．これが功を奏したことが確認されると，次にはもっと徹底的に光電子を閉じ込めるために3 kmの全周にわたってコイルを巻いてソレノイド磁場で光電子を閉じ込める作戦を実行した．目の前に横たわるパイプをはずすことなく3 kmに渡ってコイルを巻くのは実に大変な作業であったが，電磁石の場合にはオンとオフを比較することによって効き目を確認することができるのは大きなメリットであった．結局コイルを巻けるほとんどの場所にはコイルが設置され，この電子雲の問題は大幅に改善されることとなった．KEKBが加速器として大きな成功を収めるまでにはこのような問題をいくつも解決しなければならなかったが，それが可能だったのは自分たちの手でKM模型を証明したいという明確な目標があったからに他ならない．

4. B中間子におけるCP非対称性の発見とKM模型の検証

B^0中間子は反bクォークとdクォークが束縛しあった状態であるが，**図3**(上)に示すような過程によってB^0中間子が反B^0中間子に変化する，という反応が起こる．この現象をB^0中間子の振動と呼ぶ．ここで重要なのは変化が起こるまでの平均時間がB^0中間子の寿命と同じオーダーで，すなわち，B^0中間子は崩壊するまでに平均一回ほど「化ける」ことである[10]．この事実は次に述べるようなCP非対称性の測定にとって大変都合が良い．

B^0中間子がJ/ψとK_Sの二つの粒子に崩壊する場合を考えると，この終状態はB^0中間子，反B^0中間

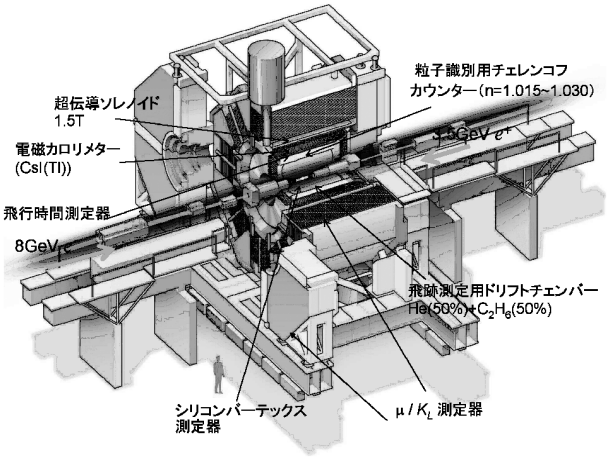

図2 Belle測定器．衝突点を囲むように7種類の測定装置が配置され，B中間子の崩壊で発生する粒子の種類，運動量やBの崩壊位置を精度よく測定することができる．（イラスト遠藤孝悦）

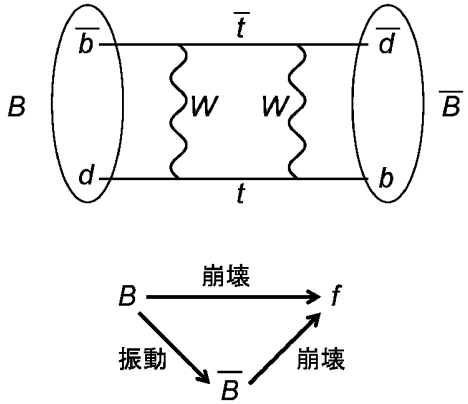

図3 B^0中間子は上図のような過程を通して反B^0中間子に移り変わる．この逆のことも起こる．この現象をB^0—反B^0振動と呼ぶ．B^0中間子がある終状態fに崩壊する場合，反B^0中間子もfに壊れられるようなfを選ぶとB^0中間子が直接fに壊れたのか，いったん振動によって反B^0中間子に変化した後にfに壊れたのかが区別できないので量子力学的干渉が起こる（下図）．

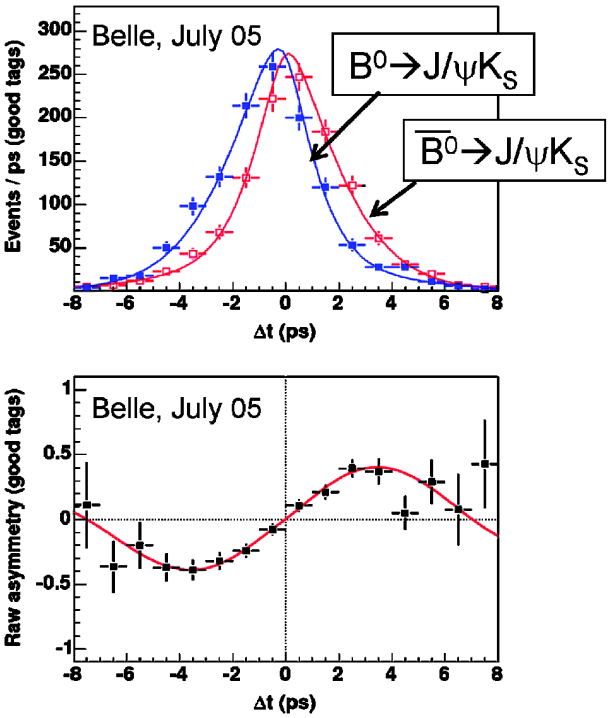

図 4　対で発生した B^0—反 B^0 中間子対のうちの一方が B^0 中間子であると特定できる崩壊をした場合にもう一方が $J/\psi K_S$ に崩壊するまでの時間（Δt）分布（上図赤）とその逆（上図青）．この二つの不一致が B^0 中間子における CP 非対称性の証拠である．赤と青の差を和で割ると下の図のようなサインカーブとなり，この振幅が CP 非保存の大きさを与える．

子のいずれもが崩壊できる状態であるため，測定にかかる終状態では B^0 中間子の直接的な崩壊と，B^0 中間子が振動の結果反 B^0 中間子に変化した後に崩壊した場合との区別がつかず，量子力学的干渉が起こる（図 3（下））．KM 模型に基づく三田らの指摘によればこの干渉の様子は B^0 中間子と反 B^0 中間子で異なり，この結果，崩壊までの時間分布が B^0 中間子と反 B^0 中間子で異なる．粒子と反粒子で崩壊までの時間分布が異なればこれは直ちに CP 対称性の破れである．この測定の最新結果を図 4 に示す[11]．ここで B^0 中間子と反 B^0 中間子について時間分布が明らかに異なっており，これは CP 非対称性の証拠である．この現象がはじめて測定されたのは 2001 年であり，これは K 中間子の系以外で始めて測定された CP 非保存である．両者の差を和で割るとサインカーブを描くが，この振幅は KM 行列に含まれる複素位相 ϕ_1 を使って sin2ϕ_1 と表される量であり，模型に現れるパラメターの直接的な測定になっている．

ここに述べた CP 非対称性の発見は KM 模型の予言のひとつを証明したという点で，この模型の証拠であるが，この模型が我々が知っているエネルギー領域での CP 非対称性を説明していることはより完全な方法で証明することができる．この模型によればクォー

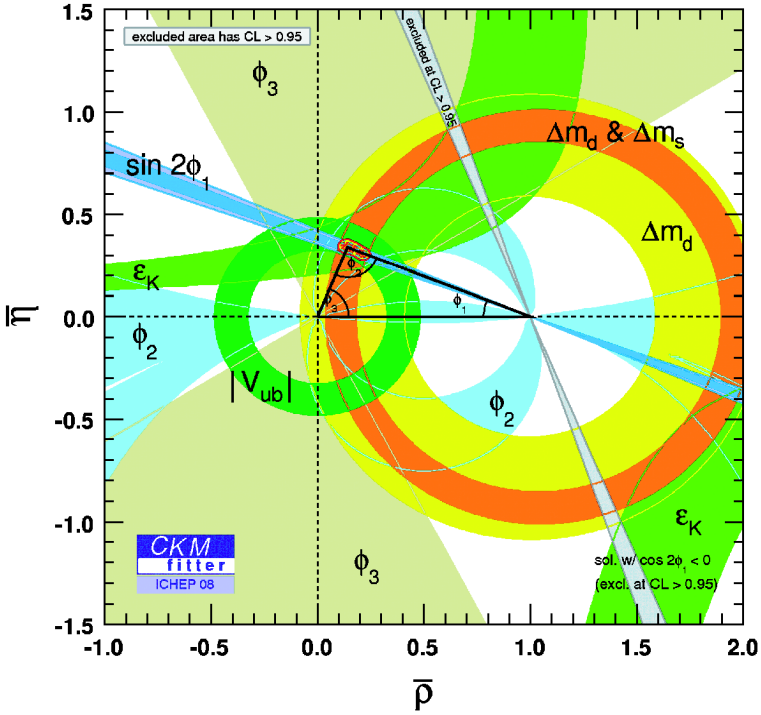

図 5　小林・益川模型によるとクォークの混合や CP 非対称性は良く知られているパラメータを除いて ρ，η という二つの量だけで表すことができる．この図は B 中間子，K 中間子などの実験で測定した（ρ，η）に関して許される領域を重ねて表示してある．すべての結果が一箇所で交わることが小林・益川模型の定量的証明を与えている．

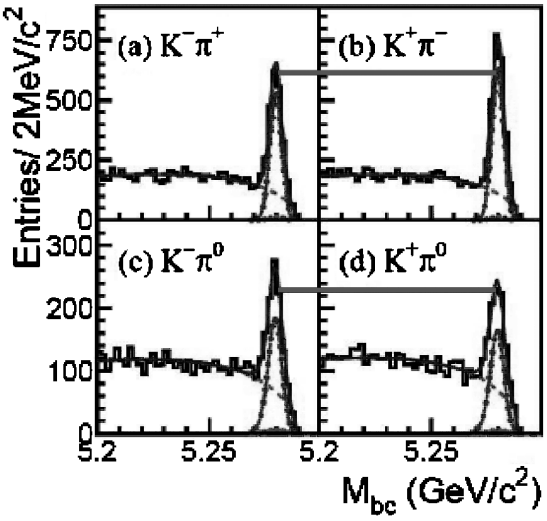

図6　(α)と(β)に見られるピークはそれぞれ反 B^0 と B^0 が $K\pi$ に壊れた数を示しており，明らかに右のピークのほうが高い．このことから左右の非対称性（直接的CP非対称性）は－10％と測定されている．一方，(c)と(d)は B^- と B^+ が $K\pi$ に壊れる数を示しており，このときのCP非対称性は＋5％である．標準模型では両者の非対称性は一致すると考えられ，従って，この不一致は未知の物理法則の関与を示唆している可能性がある．

クの混合を記述するためにA, λ, ρ, η という四つのパラメターがあり，Aと λ は比較的精度良く決定されている．残りの ρ と η の測定が重要で，特に η はCP非保存に関係している．したがってこの模型の証明のためにはできるだけ多くの反応でこの ρ, η を測定し，すべての反応が一組の（ρ, η）で記述できることを示せばよい．図5にこの測定の最新の結果を示す[12]．実際にはさまざまな測定の一つ一つは（ρ, η）の二次元平面での領域に制限を加えることになるので，この図に示した様々な領域が一点で交わっていることがこの模型の証明になっている．現在の測定精度では，図中に示された小さな閉曲線の中に正しい答えがあるとすれば7種類の反応がこの（ρ, η）で説明できると結論され，KM模型が少なくともよい近似であることが証明されている．

5.　標準模型を超えた物理法則のヒントとなる現象

このようにBファクトリー実験などでKM模型はKやB中間子で見られるクォークの混合やCP非保存を正しく記述することが確かめられてきたが，KM模型を含む標準模型が素粒子の究極の理論であるとは考えられていない．1 TeV以上のエネルギースケールを支配する新しい物理法則があって，その低エネルギー近似として標準模型が成り立っているという考え方が一般的である．そのような新しい物理法則があれば，それはB中間子などの崩壊にも影響を及ぼしていると考えられ，したがってこれまでに行った測定の中にもその手がかりが見つかる可能性がある．現行のBファクトリーでこのような新しい物理の痕跡を探索した結果，そのヒントと考えられる現象がいくつか見つかっている．その例をひとつ挙げる（図6参照）．これまでの測定で B^0 がKと π に崩壊する際に大きなCP非対称性が現れることが知られており[13]，定量的には

$$A_{\mathrm{CP}}(B^0) = \frac{Br(\bar{B}^0 \to K^-\pi^+) - Br(\bar{B}^0 \to K^+\pi^-)}{Br(\bar{B}^0 \to K^-\pi^+) + Br(\bar{B}^0 \to K^+\pi^-)} = -0.098^{+0.012}_{-0.011}$$

である．一方，Bの崩壊データの蓄積と同時に荷電Bについても同様な測定が可能となり，その結果は，

$$A_{\mathrm{CP}}(B^+) = \frac{Br(B^- \to K^-\pi^0) - Br(B^+ \to K^+\pi^0)}{Br(B^- \to K^-\pi^0) + Br(B^+ \to K^+\pi^0)} = +0.050 \pm 0.025$$

である．標準模型ではこの二つのCP非対称性はよい精度で一致するはずであるが，実験的には両者の間には5.3σ（標準偏差）の有為な差がある．この差を標準模型の範囲内で説明するのはかなり困難であるために[14]，まだ知られていない粒子の関与によってこのような差が現れているという可能性が指摘されているが[15]，この仮説を理論的不定性なしに確認するためにはさらに B^0 が $K_S\pi^0$ に壊れる場合の同様なCP非対称性を測定する必要があり[16]，さらに10倍程度のデータ量が必要である．この例以外にもいくつか標準模型だけでは説明の難しい現象が知られているが[17]，いずれも新しい物理法則の証拠と断定するにはさらに多くのデータと多面的な解析が必要である．今後LHC（大型ハドロン衝突型加速器）の運転開始とともに新しい物理法則が次第に姿を現すことが強く期待されるが，これと同時にB中間子などの崩壊に新しい物理が影響を及ぼす様子を明らかにするためにKEKBをアップグレードする計画も進行中である[18]．

6.　おわりに

KM模型は多くの実験による厳しいテストに耐え，標準模型のエネルギースケールにおいてはクォーク混合とCP非対称性を記述する正しい理論であることが証明されてきた．Bファクトリーによる実験はこの証明の最終段階で決定的な証拠を示したものと位置

づけることができるであろう．この模型の成功は標準模型の重要な側面として確立したことにとどまらない．信頼すべき理論とそのパラメターが明らかになったことによって，その予言と実験結果を比較することで，その向こうにあるはずの新しい物理を探索できるようになったことも注目すべき重要な進歩である．この点に関する今後の展開が期待される．

参考文献

1) J. H. Christenson *et al.*, "Evidence for the 2π Decay of the $k^0_{(2)}$ Meson", *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 138 (1964).
2) K. Kobayashi and T. Maskawa, "CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction", *Prog. Theor. Phys.*, **49**, 652 (1973).
3) A. Alavi-Harati *et al.*, "Observation of direct CP violation in $K_{(S,L)}\to\pi\pi$ decays", *Phys. Rev. Lett.*, **22**, 83 (1999); V. Fanti *et al.*, "A New measurement of direct CP violation in two pion decays of the neutral kaon", *Phys. Lett.*, **B 465**, 335 (1999)；山中卓，CP の破れの起源をめぐって，日本物理学会誌，**54**(9), 726 (1999).
4) A. B. Carter and A. I. Sanda, "CP Violation in B Meson Decays", *Phys. Rev.*, **D 23**, 1567 (1981).
5) Fumihiko Takasaki, private communication.
6) Pier Oddone, Private communication.
7) S. Kurokawa *et al.*, "Accelerator Design of the KEK B-Factory", KEK Report 90–24, March 1991.
8) PEP–II Conceptual Design Report, SLAC–372, LBL–PUB–5303, CALT–68–1715, UC–ID–106426, UC–IIR-PA–91–01 (1991).
9) A. Abashan et al., "The Belle Detector", *Nucl. Instr. Meth.*, **A 479**, 117 (2002); http://belle.kek.jp.
10) B. Aubert *et al.*, "The BaBar Detector", *Nucl. Instr. Meth.*, **A 479**, 1 (2002); http://www.slac.stanford.edu/BFROOT.
11) K. Abe *et al.*, "Improved measurement of CP violation parameters sin2 ϕ_1 and $|\lambda|$, B meson lifetimes, and B^0–B^0bar mixing parameter Δ_{md}", *Phys. Rev.*, **D 71**, 072003 (2005)；相原博昭，B 中間子における大きな CP 非対称の発見，日本物理学会誌，**56**(11), p. 845 (2001)；片山伸彦，物質と反物質の非対称性の起源を探る—Belle 実験の成果，日本物理学会誌，**61**(9), p. 658 (2006).
12) See Chapter 11 of "2006 Review of Particle Properties", J. Phys. G **33**, 1 (2006), and references therein; http://ckmfitter.in2p3.fr/plots_Summer2008/; "CP Violation and the CKM Matrix: Assessing the Impact of the Asymmetric B Factories" Eur. Phys. J. C41:1, 2005.
13) S.-W. Lin *et al.*, "Difference in direct CP violation between charged and neutral B meson decays", *Nature*, **452**, 332 (2008); B. Aubert *et al.*, "Direct CP violating asymmetry in $B^0\to K^+\pi^-$ decays" *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 131801 (2004).
14) H. Li *et al.*, "Resolution to the $B\to\pi$ K puzzle", *Phys. Rev.*, **D72**: 114005, 2005.
15) S. Mishima and T. Yoshikawa, "Large electroweak penguin contribution in $B\to K\pi$ and $\pi\pi$ decay modes", *Phys. Rev.*, **D70**: 094024, 2004; A. Buras *et al.*, "The $B\to\pi\pi$, π K puzzles in the light of new data: Implications for the standard model, new physics and rare decays", *Acta Phys.Polon.*, **B36**: 2015–2050, 2005; T. Feldmann *et al.*, "Is there a non-Standard-Model contribution in non-leptonic $b\to s$ decays?", *JHEP*, 0808: 066,2008.
16) M. Gronau, *Phys. Lett.*, **B 627**, 82 (2005); D. Atwood & A. Soni, *Phys. Rev.*, **D 58**, 036005 (1998).
17) Y. Chao *et al.*, "Measurements of time-dependent CP violation in $B^0\to\omega K^0_S$, $f_0(980)$ K^0_S, $K^0_S\pi^0$ and $K^+K^-K^0_S$ decays", hep-ex/060906, submitted for publication in Phys. Rev. D; K.-F. Chen *et al.*, "^Observation of time-dependent CP violation in $B^0\to\eta' K^0$ decays and improved measurements of CP asymmetries in $B^0\to\phi K^0$, $B^0\to K_S K_S K_S$ and $B^0\to J/\psi K^0$ decays", *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 031802 (2007); M. Staric *et al.*, "Evidence for D^0-D^0bar Mixing", *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 211803 (2007).
18) SuperKEKB Task Force, "Letter of Intent for KEK Super B Factory", KEK Report 2004–4, June 2004；大西幸喜，驚異の加速器計画：SuperKEKB ファクトリー，日本物理学会誌，**63**(10), p. 10 (2008)；山内正則，スーパー B ファクトリーで探る標準模型を超えた物理，日本物理学会誌，**63**(1), p. 2 (2008).