

リニアコライダーの実現に向けて

土木学会・岩盤力学委員会活性化特別小委員会

1. はじめに

国際プロジェクトである大型加速器リニアコライダー（以下 ILC）のわが国への誘致を推進している高エネルギー加速器研究機構（以下 KEK）からの協力要請を受け、土木学会・岩盤力学委員会活性化特別小委員会は、2005 年の 6 月に準備活動を開始した。今回のパネルディスカッションでは半年にわたって検討してきた結果を中間報告し、この国際プロジェクトがわが国に立地するために土木技術はどのように貢献すべきか、そのために今後何をなすべきかについて、岩盤工学に関わる技術者が広く意見を交わすことを提案する。なお、トンネル工学委員会にも協力要請がなされており、協力して準備活動を行っている。

2. リニアコライダープロジェクトとは

(1) ILC 実現の意義

a) 目的

ILC は人類へどのように貢献するのか、どのような施設なのか、ディスカッションの参考とするため、ここに簡単に整理することを試みる。ILC によって期待される成果や技術の詳細については、参考文献^{1)～5)}を参照頂きたい。

まず、素粒子について説明する。素粒子とは物質を構成する最も基本的な粒子のことを言う。図-1 に物質の階層構造を水分子を例として示す。原子核の内部構造が判ったばかりの頃は、電子と陽子と中性子が素粒子だと考えられていた。しかしその後、高エネルギー加速器を用いた研究などにより、アップ、ダウン始め 6 種類のクォークと電子、ミューオン、ニュートリノなどのレプトン

が素粒子であることが判ってきた。素粒子物理学の発展により、このような階層構造が判明することによって様々な応用技術が発展した。電子の発見はコンピュータを始めとした様々な電子機器の発明に貢献し、原子核の発見とその研究は原子力の利用に結びついた。新たな素粒子発見時には、どのような応用分野が広がるか知られていなかった。今後も素粒子物理学の発展によって、新たな応用分野が長期的に発生してくることが期待される。

また、加速器によって作り出される放射光や中性子はバイオテクノロジーなどの様々な研究開発に応用されている。加速器の開発で養われた先端技術は、産業界でもナノテクノロジーなど様々な分野で適用されている。

ILC では直接的成果として、例えばヒッグス粒子、超

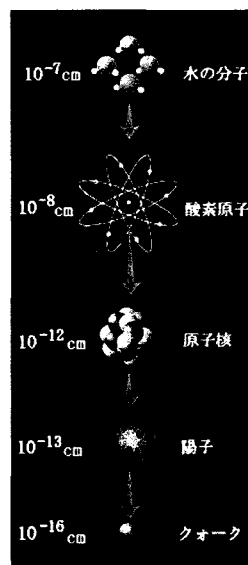


図-1 物質の階層構造⁵⁾
(水の分子からクォークまで)

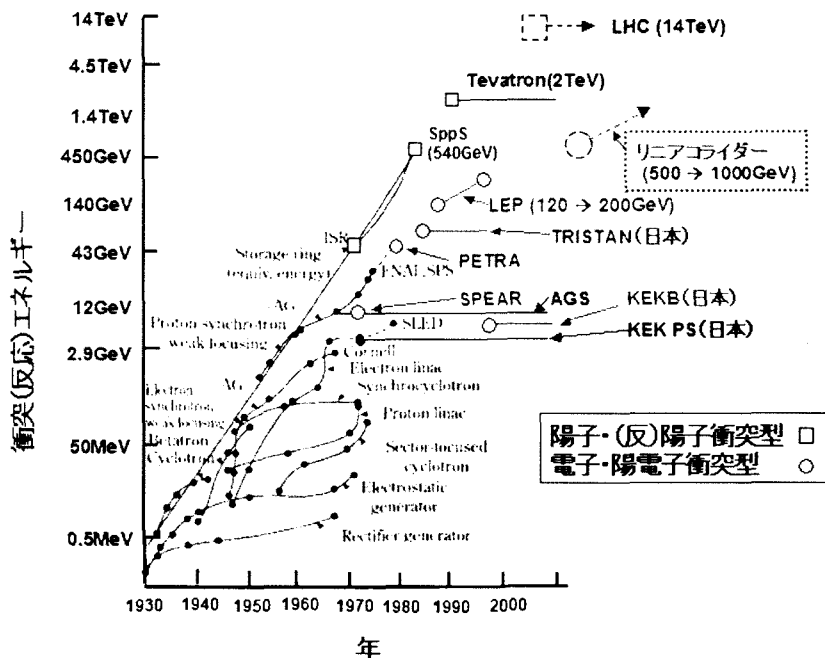


図-2 加速器の発展⁵⁾

対称性粒子の発見や、宇宙の未知の課題の解明が期待されている。また、高品質ビームを応用して高輝度硬X線レーザーを得ることができるので、これにより原子、分子の三次元構造を直接知ることができる。これらの成果が得られることにより、さらに長期的に応用分野が広がる事が期待されている。

b) ILC の加速器としての位置付け

図-2 は加速器の発展を年代と衝突エネルギーの関係で整理したものである。加速器には陽子・(反)陽子衝突型のハドロンコライダーと電子・陽電子衝突型のレプトンコライダーがあり、どちらも基本的な新しい物理原理を見出すために必要な加速器とされている。ハドロンコライダーとしてはジュネーブ近郊にある CERN (欧州原子核研究機構) が、衝突エネルギー14TeV の LHC を建設中 (後述する LEP のトンネルを利用) であり、2007 年に実験を開始する。

一方、電子・陽電子衝突型加速器としては、CERN に周長 27km におよぶ円形加速器 LEP が建設されたが、2000 年に実験を終了した。電子の場合、円形加速器ではビームの方向を電磁石で曲げる必要があり、その際、放射光

が発生し多大なエネルギーロスが生じる。そのため、電子・陽電子を直線的に加速して衝突させるリニアコライダーが必要であるというのが世界中の素粒子物理学者の共通認識となっている。

(2) ILC 計画の概要

ILC の地下施設全体図を図-3 に示す。施設は加速器トンネル、クライストロントンネルからなる主トンネル部、実験ホール、アクセストンネルおよびアクセスホール、ダンピングリングトンネル、ダンプホールなどから構成される。以下に主な施設について述べる。なお、施設の諸元は今後の検討により変わるので、参考値である。

主トンネル (図-4) は、長さ 40km 以上におよぶ直径 4.5m 程度の加速器トンネルと直径 5.0m 程度のクライストロントンネルからなる。加速器トンネルにはビームラインが通る加速空洞を内蔵したクライオスタット (図-5) を連続的に設置する。加速空洞は、ニオブ金属製で液体ヘリウムにより絶対温度 2 度に保つことにより超伝導状態となる。クライストロントンネルは、加速空洞に入力する高周波を供給制御するクライストロンとその電源装置であるモジュレータを収納するサービストンネルであ

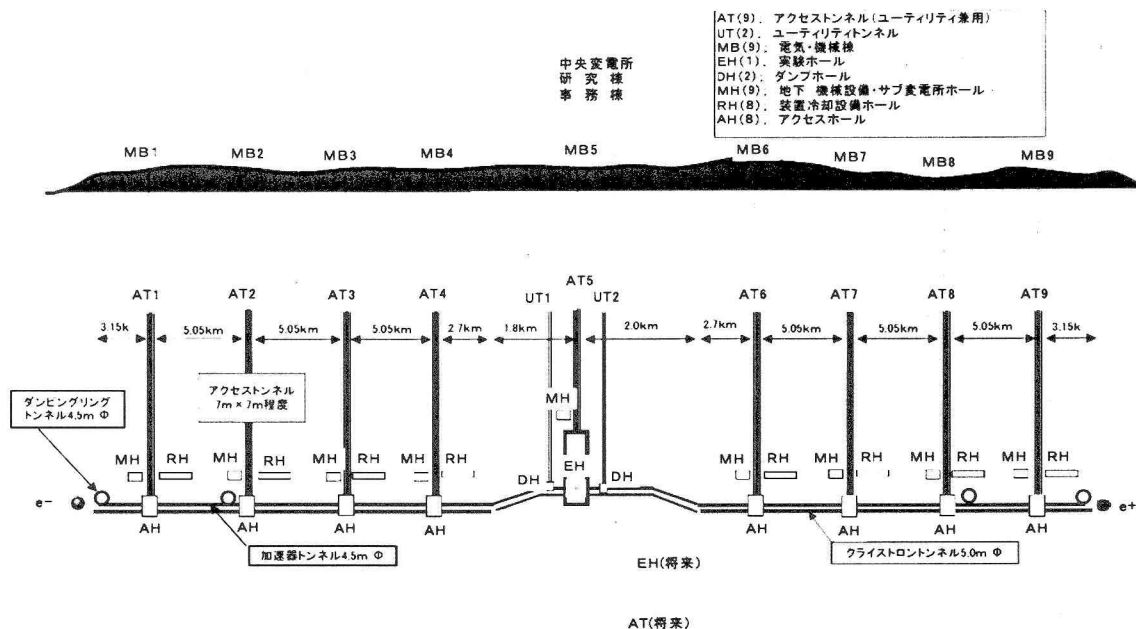


図-3 ILC地下施設全体図⁵⁾

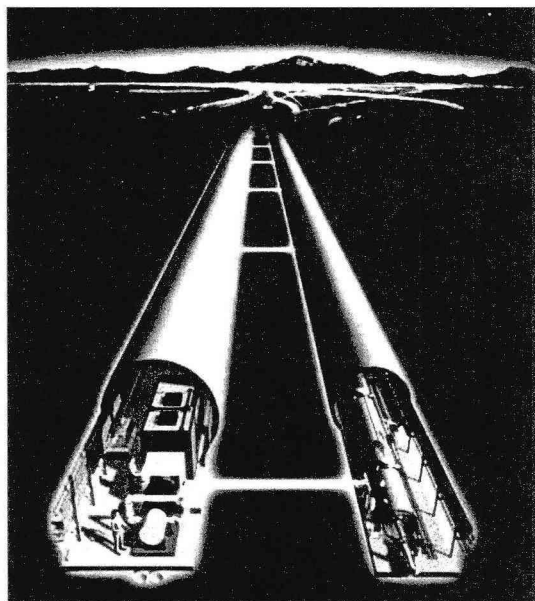


図-4 加速器トンネル(右)とクライストロントンネル(左)⁵⁾

る。加速器トンネル内は加速器の運転中は微量だが放射線が発生するため、立ち入ることができない。加速器トンネルとクライストロントンネルを1本のトンネルに集約することも考えられるが、クライストロンやモジュール

ータの点検補修を加速器運転中も行なうために、それぞれ独立したトンネルとすることになった。

実験ホールはビームラインの衝突点に建設され、図-6のような測定装置が設置される。測定装置の重量は約15,000t、ホールのサイズは、幅35m×高さ40m×長さ80m程度で、測定装置の搬入のため直径12~15m程度のアクセス立坑が必要である。最適な機器の組み立て方法、搬入方法については更に検討の余地があると思われる。また、実験ホールはビームサイズを絞って衝突させるため、振動、変位に対して最も厳しい制約がある。

アクセストンネル及びアクセスホールのイメージを図-7,8に示す。アクセストンネルは、電力および冷却水の供給、ヘリウム、機材および人員の輸送のために、5km

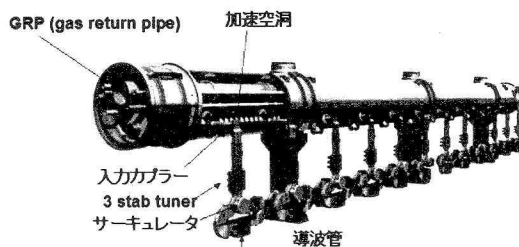


図-5 クライオスタット (加速器トンネル内に設置)⁵⁾

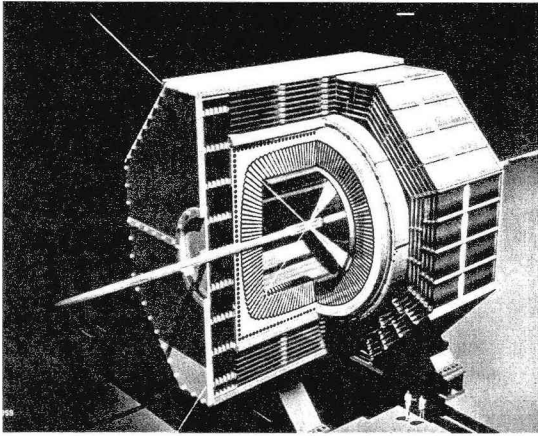


図-6 実験ホールに設置される測定装置⁵⁾

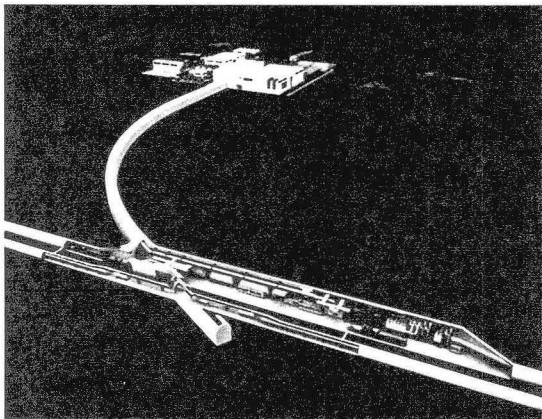


図-7 アクセストンネルおよびアクセスホール⁵⁾

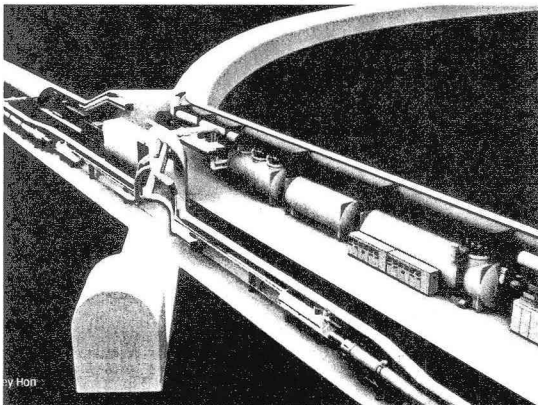


図-8 アクセスホール付近の拡大イメージ⁵⁾

に一ヶ所程度計画されている。アクセストンネルと主トンネルの交点部には、変電所、冷却設備ホールが併設され、加速器を運転、維持管理するための地下基地となる。

その他、実験ホール付近の地上には中央変電所、研究棟、事務棟などが整備される。また、国内外の研究者をサポートするための施設なども計画されることになろう。

(3) プロジェクトの現状と今後

本プロジェクトは総事業費が巨額になることから、世界で1台のリニアコライダー (ILC) を共同で建設する方向で、世界の主な加速器研究機関の意思統一が図られ、国際設計チーム GDE (Global Design Effort) が今年組織された。GDE ではセントラルチームの所長を米国の B. Barish 氏が勤め、その下に欧州、米国、アジアのリージョナルチームを設置している。アジアでは、日本の KEK の他、韓国、中国、インドなどの研究機関が加わっている。

図-9 に示す GDE の設計スケジュールによれば、各リージョナルチームはそれぞれサンプルサイトを決め、それについて設計を行い、2010 年にはサイトを1本化する予定である⁵⁾。欧州に建設が進む陽子衝突型加速器 LHC の成果を参照しながら、相互に補完する役割を果たす ILC を早期に建設することが切望されており、2010 年から5年ほどで建設することをめざしている⁶⁾。この最先端の研究施設が我が国に立地されれば、アジアの国際研究拠点として科学技術面、国際面、経済面での波及効果は誠に大きなものがあると言える。

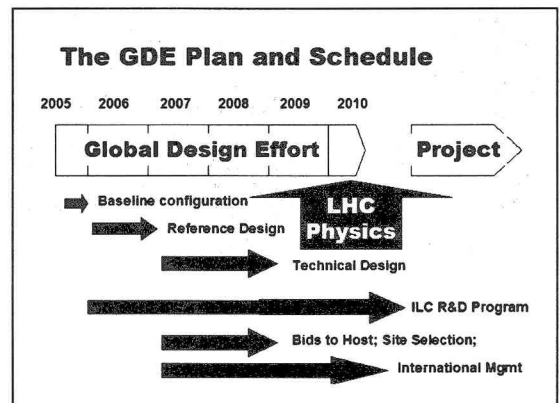


図-9 GDEによる設計スケジュール⁵⁾

(4) ILC と岩盤工学の関わり

加速器はその大型化に伴い、半地下からさらに地下に建設されるようになった。ILC は安定した地盤に建設した方が有利であり、40km 以上にもおよぶことから岩盤内に建設されることになる。岩盤工学上の検討課題は今後さらに議論していかなければならないが、以下に現時点で想定される主な課題を挙げる。

①岩盤の変動、振動

ILC は、クライオスタットや測定器の設置床の変位や振動が少ないことが求められる。特に、実験ホールではビームサイズを絞って衝突させるという性質上、特に厳しい条件がかせられ、変位は年間数 mm 以下、振動は周波数により 10Hz 以上の早い周波数の積分で 5 ナノメートル以下、0.1Hz 以上の周波数の積分で 100 ナノメートル以下であることが必要とされている。

②地震、断層、地質

ILC の日本誘致に当っては、安定な岩盤に建設することを念頭に置きサイト選定を進めるため、花崗岩などの硬岩が広く分布する地域がサンプルサイトに選ばれると思われる⁵⁾。我が国では、様々な地質、岩盤工学上の課題を克服し、地下発電所、長大トンネル、原子力発電所などの大規模構造物を完成させてきたが、サンプルサイトの地質条件により、地震、断層、地質上の課題に対して十分な検討が必要である。

③地下施設の設計、施工法とコスト

図-10 に B. Barish GDE 所長の示した ILC のコスト内訳

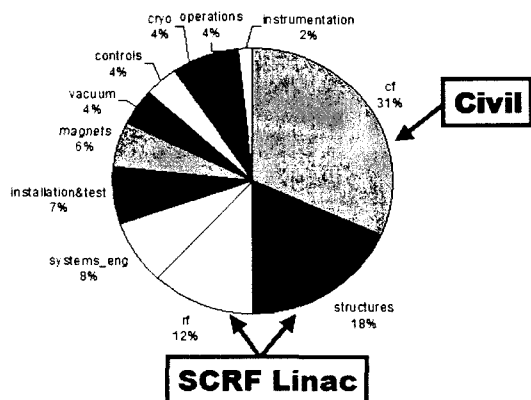


図-10 ILC のコスト内訳試算結果⁶⁾

試算結果⁶⁾を示す。全体事業費の内、土木工事費は約 30% を占めるとされている。そのため、実験ホールの合理的な設計・施工法、40km 以上におよぶ加速器トンネル、クライストロントンネルの TBM を始めとした適切な設計・施工法、複雑なレイアウトとなるダンピングリングトンネルの適切な設計・施工法の検討とコストダウンが課題になるとと思われる。

今後の議論により ILC の技術的課題を十分に把握した上で、土木学会の委員会として取り上げるべき課題を絞り込んでいきたいと考える。

3. 岩盤力学委員会特別小委員会の活動内容と今後の方針

(1) 特別小委員会のこれまでの活動の経緯

岩盤力学委員会の活性化特別小委員会メンバー 33 名と、トンネル工学委員会の長大トンネル技術検討委員会 5 名 (内 2 名は双方の組織に所属) で準備活動を開始し、リニアコライダーの実現に向け土木学会としてどのように協力できるか協議を行なった。活動メンバーは表-1 の通りである。

(2) 今後の検討体制

このような活動を開始するにあたっては今後岩盤力学委員会およびトンネル工学委員会としての決定を待つ必要がある。特別小委員会としては以下のように進めることを考えている。検討組織としてリニアコライダー土木技術研究委員会 (仮称) およびワーキンググループを設置する。ワーキンググループはプロジェクトのフローに合わせ、例えば下記に示すような 5 つに分けて活動することが考えられる。それぞれの検討内容については今後調整していく必要があるが、以下に概略の内容をキーワードによって示す。

①計画・マネジメントワーキンググループ

(計画：立地条件、配置計画、空洞の形状寸法、設置深度、構造形式、地盤条件、工程、経済性、施設の再利用、法制度や環境保全などの付帯条件)

(マネジメント：プロジェクト・マネジメント、ライフ・サイクル・マネジメント、ライフ・サイクル・コ

表-1 岩盤力学委員会・活性化特別小委員会、およびトンネル工学委員会・長大トンネル建設技術検討部会メンバー

	氏名	所属	備考
委員長	西脇芳文	東電設計（株）	岩盤力学委員会・活性化特別小委員会
幹事長	日比谷啓介	鹿島建設（株）	〃
委員	石塚与志雄	清水建設（株）	〃
〃	市川康明	名古屋大学	〃
〃	井上博之	前田建設工業（株）	〃
〃	岩楯敏広	首都大学東京	〃
〃	宇野晴彦	東電設計（株）	〃
〃	大石富彦	関西電力（株）	〃
〃	太田岳洋	（財）鉄道総合技術研究所	〃
〃	大津宏康	京都大学	〃
〃	岡田哲実	（財）電力中央研究所	〃
〃	亀村勝美	大成建設（株）	〃
〃	小杉昌幸	（独）産業総合技術研究所	〃
〃	笹尾春夫	鉄建建設（株）	〃
〃	清水則一	山口大学	〃
〃	下河内隆文	竹中工務店（株）	〃
〃	鈴木一郎	東電設計（株）	〃
〃	鈴木一巳	北海道電力（株）	〃
〃	清木隆文	宇都宮大学	〃
〃	関根一郎	戸田建設（株）	〃
〃	武内邦文	（株）大林組	〃
〃	近久博志	飛島建設（株）	〃
〃	鶴田正治	九州電力（株）	〃
〃	西村和夫	首都大学東京	〃
〃	橋本 哲	東京電力（株）	〃
〃	羽鳥明満	原子力発電環境整備機構	〃
〃	福井勝則	東京大学大学院	〃
〃	福田和寛	清水建設（株）	〃
〃	福原 明	電源開発（株）	〃
〃	真下英人	（独）土木研究所	〃
〃	南 将行	東京電力（株）	〃
〃	森岡宏之	（独）日本原子力研究開発機構	〃
〃	山口嘉一	（独）土木研究所	〃
部会長	西村和夫	首都大学東京	トンネル工学委員会 長大トンネル建設技術検討部会
委員	佐野信夫	中日本高速道路（株）中央研究所	〃
〃	服部修一	（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構	〃
〃	福田和寛	清水建設（株）	〃
〃	領家邦泰	大成建設（株）	〃

スト, リスク・マネジメント, 建設マネジメント)

②調査・試験ワーキンググループ

(地震の影響, 断層, 長期変位, 常時微動, 地下水, 環境影響評価, 環境保全)

③設計ワーキンググループ

(小土被り大空洞の設計, 断層部のトンネル設計, トンネル分岐部の構造検討, 支保設計の合理化)

④施工・メンテナンスワーキンググループ

(建設コスト, 機械化施工, 急速施工, 高規格化支保, 情報化施工, 地質評価, データベース (施工・計測・地質), 耐久性)

⑤海外情報調査ワーキンググループ

(海外候補地点の地質構造, 水理地質構造, 振動特性, 環境影響評価, 法制度, 関連各機関からの支援状況)

電子リニアコライダー計画 (JLC Project)

4) リニアコライダー研究会: 大いなる目標に向かって 2003 年度成果報告書, リニアコライダー研究会, 2005

5) 地下から宇宙の謎へ, 土木学会平成 17 年度全国大会研究討論会, 高エネルギー加速器研究機構戸塚機構長講演配布資料, 2005

6) B. Barish: The ILC Global Design Effort, ILC Industrial Forum Japan 講演配布資料, 2005

本格的活動を目指して近々に公募を開始する予定であるので, 積極的な参画をお願いする。

4. おわりに

岩盤力学委員会がそもそもこのこのような活動を始めたきっかけは, 当委員会活動の更なる活性化を目指し, 今後の活動方針を策定することを目的として委員長命により 1 年間の会期で特別小委員会が招集されたことに端を発している。この活動の成果は会期末に答申「社会に貢献する岩盤力学委員会をめざして」として取りまとめ, 土木学会ホームページ上で公開した。社会からの要請に応え, 確かに社会に貢献する活動を軸に据えることを改めて確認するという内容となっている。(社)土木学会では学会としての社会貢献活動のさらなる活性化を図るため近年様々な努力を積み重ねているが, 今回の岩盤力学委員会・トンネル工学委員会合同で実施する活動がひとつの好例を残せることを切に願っている。

参考文献

- 1) 岩田正義, 木原元央: リニアコライダー素粒子の謎に挑む最強の加速器, (株)技術経済研究所, 2005
- 2) 加速器将来計画アジア委員会, 高エネルギー委員会, 高エネルギー加速器研究機構: JLC Project, 2003
- 3) KEK 文部科学省・高エネルギー加速器研究機構: 電子・陽