yoshi-naga.jp

E-mail: 01@a.nifty.jp

吉永弘志の工夫や研究の紹介（2019.07）.

記載の経緯(PDF): 2019.07, 2018.11

金色文字の作り方（Word 等）
「挿入」→「ワードアート」→「文字のオプション」→「塗りつぶし」で金色の写真などのファイルを選択.

目次

1 創意工夫,日曜大工(職務外)
簡単. 濃厚でまろやかなコーヒー・お茶[106], 音源探査カメラ[105], etc.
2 研究成果(職務外)
100m を 10 秒で駆けるスプリンターと陸上競技場の相対論効果[205], 「やっとわかった！」エネルギーと情報量の関係[204], 逆音源を音源位置に仮想するアレー信号処理に関する研究[202], etc.
3 提案,アイデア(職務外)
4 初めて作成した web site (1996)
5 研究成果(職務.抜粋.)
道路交通騒音対策の参考資料[514], オーバーラップさせた遮音壁の近傍における騒音の計算方法[512], 換気風向の最適化によるトンネル内歩道の環境改善[504], 兵庫県南部地震後における建設機械の活用状況[501], etc.

1 創意工夫,日曜大工(職務外)

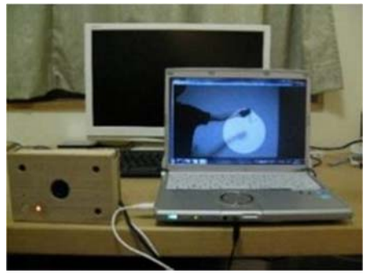
106 **簡単. 濃厚でまろやかなコーヒー・お茶. (2018.03).**

1) フィルタ・茶こしに入れたコーヒー・お茶に少量の水を注ぐ. 2) お湯を沸かす. 3) カップ・急須の薄いコーヒー・お茶を捨てる. 4) 熱湯を注ぐ（温度調整不要.). 最初に濃厚なコーヒー・お茶が出ます.

目次へ

105 **音源探査カメラ(2016.07).**

後述する博士論文の副産物. 性能を落としてリアルタイムで動画表示できるようにした. なお, 分解能は市販されている音源探査装置に劣る.



室内 スピーカ (動画)

道路(セミの音が混入)(動画)

工事と道路(セミ、発電機の音が混入) (動画)

サッカー(セミの音が混入) (動画)

目次へ

104 **ごみ箱の透明化(2015).**

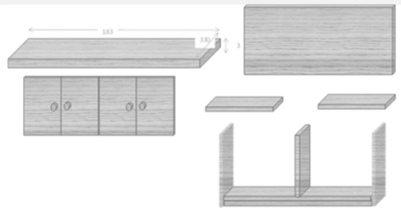
電池, 空き缶等は鮮やかな色彩. ごみ箱を透明に！

目次へ

103 **ラジオペンチでサッシの掃除(2015).**

ウエットティシュをラジオペンチにはさんで掃除. 砂や黒カビ等は他の方法よりよく取れた.

102 **棚(2011).**



01 集成材を切断.

02 ダボで組み付け
(釘で仮止めし, ドリルで外から穴をあけ, ダボを打ち込み,突起を切断).

03 スライド蝶番を設置.

101 **鳥の飛来防止(2009.08).**

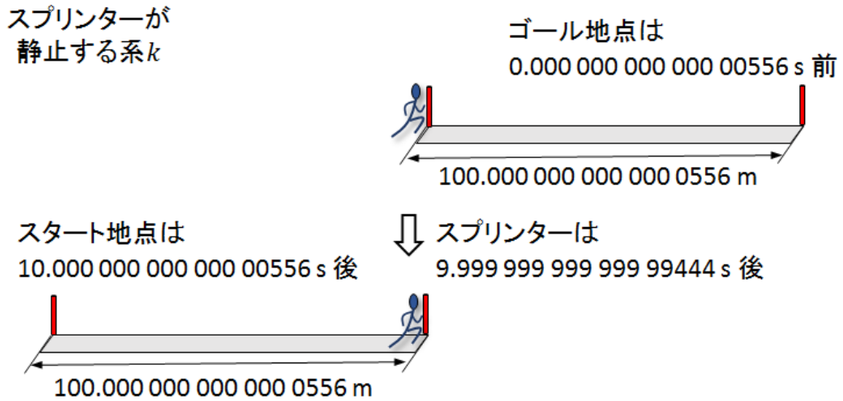
(赤い線で位置を表示)

細くて見えにくいナイロン線等で鳥の飛来防止. 上下方向にも配線してベランダや庭でも効果を確認.

2 研究成果(職務外)

205 **100m を 10 秒で駆けるスプリンターと陸上競技場の相対論効果 -相対性理論の簡素な解説-** (2019.07) 全文PDF

アインシュタインの相対性理論で計算すると「陸上競技場が静止する座標系」でスプリンターが等速で100m を 10 秒で駆ける事象は,図



のように「スプリンターが静止する時計」では 9.999 999 999 999 99444 秒となり短くなるが, スプリンターが静止する系でのスタート地点では 10.000 000 000 000 00556 秒となり長くなること, GPS 衛星の時計は衛星の公転速度の影響で毎秒 0.83×10^{-10} 秒遅れるが地上との重力の位置エネルギーの違いにより毎秒 5.28×10^{-10} 進むことなどを簡素な計算で示した. また上記の具体例をふまえて双子のパラドックスを否定するとともに従来の解説の誤りを指摘した.

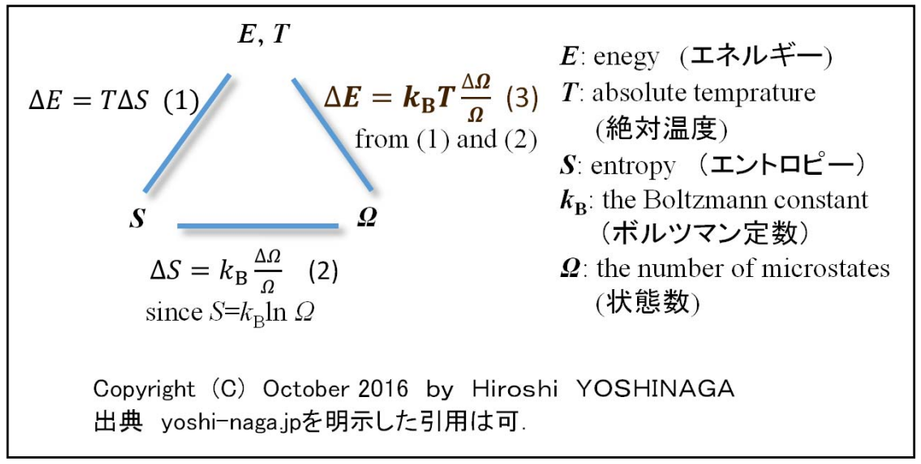
なお, 双子のパラドックスの否定に関する論文を Nature Physics, および日本物理学会に投稿したが不採択となり, arXiv でも掲載許可を得られなかった(2018).

目次へ

204 **「やっとわかった!」エネルギーと情報量の関係(2016.10). 発表はこのサイトのみ.**

$$\Delta E = k_B T \Delta\Omega / \Omega$$

エンロトピーの定義式に基づいて, エネルギー変化 ΔE と状態数の変化率 $\Delta\Omega/\Omega$ には $\Delta E = k_B T \Delta\Omega / \Omega$ の関係があると解釈. ここで, k_B:ボルツマン定数, T:温度. エネルギーとエントロピーと情報量の関係は, 解説本を読んでもわからなかった. 自己流の解釈で「やっとわかった!」.

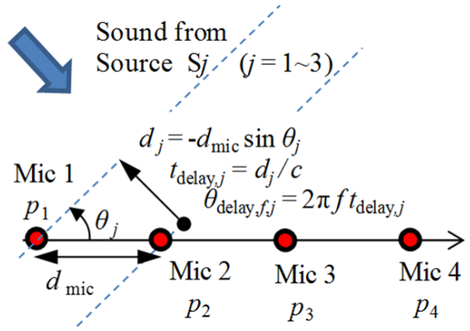


温度 T とは「エネルギー変化 ΔE」と「状態数の変化率 $\Delta\Omega/\Omega$ の比と解した.

「気体」、「光」、および「運動する粒子」への適用.

目次へ

203 **複数の音源を探査するアレー信号処理の方程式と解法例, 日本音響学会講演論文集, pp.607-610, (2015.3).**



音源方向を変数としたアレーの信号処理の方程式を導出し，シミュレーションでは角距離 3°の 3 音源の探査ができることを示した.しかし，音波の測定値は偏差が大きいので，音波での実用は困難と考えている.

時間領域

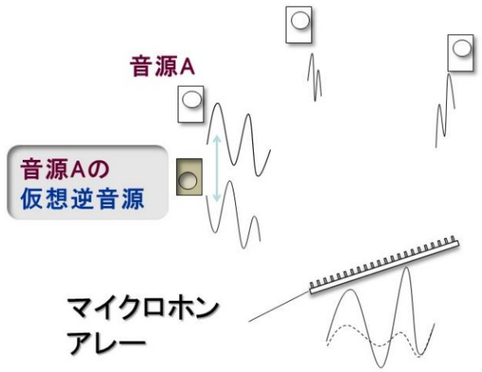
$$p_1(t) - p_2(t + t_{delay,1}) - p_2(t + t_{delay,2}) - p_2(t + t_{delay,3})$$
$$+ p_3(t + t_{delay,1} + t_{delay,2}) + p_3(t + t_{delay,2} + t_{delay,3}) + p_3(t + t_{delay,3} + t_{delay,1})$$
$$- p_4(t + t_{delay,1} + t_{delay,2} + t_{delay,3})$$
$$= 0$$

周波数領域

$$P_1(f) - (e^{i\theta_{delay,f,1}} + e^{i\theta_{delay,f,2}} + e^{i\theta_{delay,f,3}}) P_2(f)$$
$$+ (e^{i(\theta_{delay,f,1} + \theta_{delay,f,2})} + e^{i(\theta_{delay,f,2} + \theta_{delay,f,3})} + e^{i(\theta_{delay,f,3} + \theta_{delay,f,1})}) P_3(f)$$
$$- e^{i(\theta_{delay,f,1} + \theta_{delay,f,2} + \theta_{delay,f,3})} P_4(f)$$
$$= 0$$

目次へ

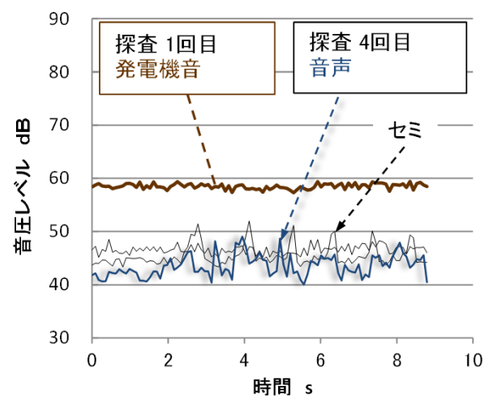
202 **逆音源を音源位置に仮想するアレー信号処理に関する研究，筑波大学，博甲第 6088 号 (2012).**



複数の音をマイクロホンアレーで受信し,大きい音の信号を仮想的な逆音源で打ち消すことで小さい音の信号を抽出．スピーカの音源で実証した．筑波大の社会人学生としての博士論文．内容の一部に入学前の職務成果を含むが，入学後は休日夜間の自費での実験.

目次へ

201 **捜索活動の支援を目的とした高騒音環境での音源探査手法，土木学会論文集 F6（安全問題），Vol. 67, No. 2, pp.I_11-I_16 (2011).**



上記の研究の主要部分．災害時の騒音環境で行方不明者の発するかすかな音を探査する装置の開発を目標とし，セミ等の音が混入する屋外で二つのスピーカから発電機音と音声を発生させる実験で実証した．実用には時間と予算をかけた研究が必要と考えている.

目次へ

3 提案,アイデア(職務外).内容についての責任は負いません.

309 **駅の転落抑制用のポール** (2016.09).

転落抑制のためのポールを駅のホームに設置する.ホームドアが設置されるまでの暫定措置.

308 **100 億人のお祝い**(2016.08).

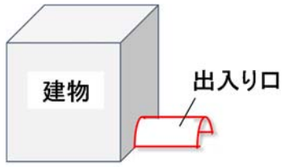
将来, 世界の人口は 100 億人になると思います. その年にお祝いすること, および 100 億人が健康で豊かに暮らせるための科学技術, 政治経済等を世界の目標としてはと思います.

目次へ

307 **旅行体験ができる窓** (2016.07).

窓を模擬したモニタ等に観光地, 夜景等を投影. 遠出が困難な方の旅行体験, レストラン・ホテル・病院・会議室等のサービス向上.

306 **トンネル型エアカーテン**(2016.08).

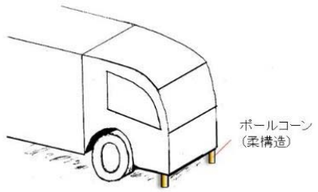


建物の出入り口をトンネル型にし, 天井, 側面のファンで圧力を調整することで冷暖房のロスをなくす. 計算,実験等の根拠はないが,対面交通のトンネルの排気ガス濃度,および風向風速の測定値を観察した経験に基づく発想.

305 **小型で安全な自動車**(2016.08).

燃料費 100 円で 100 km 走行可能で大型車に追突されても乗員が負傷しない構造の小型車の開発.

304 **車輪前方の障害物よけ**(2016.08).



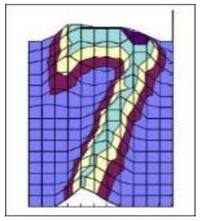
車輪前方にポールコーンのような柔構造の障害物よけを設置.燃費改善の可能性も．実用には安全性の確認が必要.

目次へ

303 重力式マッサージ機, 特開 2004-130019, (2004).出願のみ.

将来，ロボットがマッサージ機に進展するのではとの思いつき.

302 フレキシブルマトリックスパターン認識, 特開 2003-99715, (2003).出願のみ.


「7」のテンプレート

多数の事例の平均をテンプレートとし，照合させるパターン認識．パターン認識の解説本とは全く異なる方法を思いついたので出願した.

301 出資式大規模自然災害保険システム, 特開 2003-058711, (2003).出願のみ.

大規模災害用の募金形の保険．無災害では配当，災害時には募金化. 現状の保険制度の補完. ビジネスモデル特許になるかなとの思いつき.

目次へ

4 初めて作成した web site (1996)

アドレスは http://www3.justnet.ne.jp/~yoshinaga/でした.

パーソナル物流ネットワークの提案（この餅を食べられたら！？）(2019PDF)

様式集！？

重回帰分析（4変数,3変数の重回帰分析が数値を入力するだけでできます.(EXCEL で作成 1996)

ﾊﾞｯﾃﾘ式建設機械について試算したものです.(EXCEL で作成 1996)

地球の反射率と温度の関係を簡易に計算したものです.(EXCE で作成 1996)

論文集

機械施工安全対策評価手法

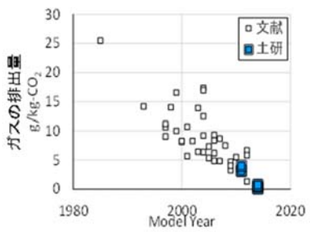
阪神大震災後における建設機械の活用(2019PDF)

目次へ

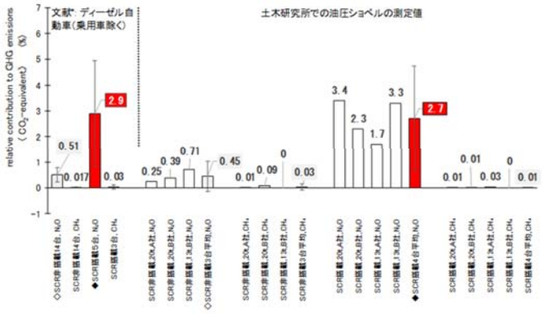
5 研究成果(職務.抜粋.)

521 **建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素およびメタンの研究, 土木研究所資料第 4385 号, 2019.**

油圧ショベル7 台の排出ガスをフーリエ変換赤外分光光度計FTIR で測定し, 以下を明らかにした. (1)亜酸化窒素N_2O の温室効果ガスとしてシェアは, NOx 対策のSCR 搭載した機種で2.7%. (2) NOx, CO, および非メタン炭化水素NMHC の測定値は, エンジン単体の台上試験で定められた規制値と整合. (3) 建設機械もオンロード車と同様に排出ガスの測定よるカーボンバランス法で燃料消費量を測定できる.



NOxの測定値.



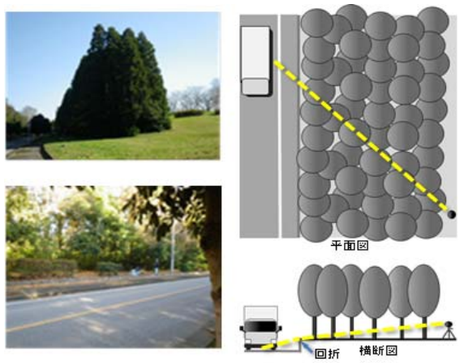
温室効果ガスのCH_4とN_2Oの測定値.

520 **建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化, 土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6 (環境システム研究論文集 第 45 巻)、Ⅱ_321-Ⅱ_332, 2017.**

建設機械の排出ガスの評価量を CO_2 比とすることで, 測定値の信頼性向上と測定の簡素化が両立すること等を明らかにした.

目次へ

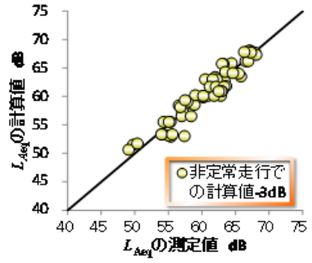
519 **植樹帯での道路交通騒音の減衰量にかかる測定と解析, 土木学会論文集 G(環境), Vol.72, No.6 (環境システム研究論文集 第 44 巻)、Ⅱ_Ⅰ-Ⅱ_8, 2016.**



植樹帯上の樹木による道路交通騒音の低減量を測定し, 母平均の真値は 0.22 ～0.04 dB / m の可能性が高いと推定した.

目次へ

518 **規制速度 40km/h 以下の道路における騒音振動の測定値, 日本音響学会騒音・振動研究会資料 N-2016-03,(2016).**



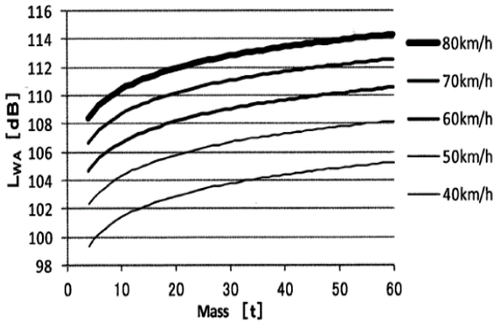
等価騒音レベル L_{Aeq} の計算値と測定値.

規制速度 40km/h 以下の道路における騒音振動の測定値, および測定値の近似式. 規制速度 50km/h 以上の幹線道路と異なり知見がなかったので測定した.

517 **ドライバーへの啓発による騒音対策の試行,第 31 回日本道路会議, 1080, (2015).**

横断幕やポールでドライバーに穏やかな運転を促す啓発を試した．即効性ではなく交通事故の抑制も含めた社会全体の意識改革も目的としていた．

516 **公道を定常走行する大型車の質量・速度・騒音の測定値, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.4,(2015).**



質量 Mass, 速度, 騒音発生量 L_{WA}(dB 換算値)の関係.

大型車の速度, 質量, および騒音を公道で測定し,騒音(mW)が速度(km/h)の 3 乗, 質量(t)の 0.5 乗に比例する式で近似した.

目次へ

515 **遮音壁による道路交通騒音の低減量にかかる計算値および実物大の構内試験値, 日本音響学会講演論文集, pp.999-1001 (2015.03).**

遮音壁による道路交通騒音の低減量について,「回折補正量の計算式」5 種類（式により計算値が最大 4dB 異なる），および「騒音伝搬の考え方」6 種類(地面反射音(Fig. 1)の考慮の有無等)を組み合わせた「30 種類の計算方法」と「実物大の構内試験値」の相関を調べた.「正確さ」と「実務対応」を総合的に考慮すると以下を組み合わせた計算方法が最も妥当（結果は Fig.2）.

①ASJ-RTN Model 2013 の回折補正量

②挿入損失の考え方(ASJ-RTN Model 2013 の（3.13）式)

③地面反射は考慮しない(ただし,反射音の存在は否定しない)

元データを掲載した web site.｜

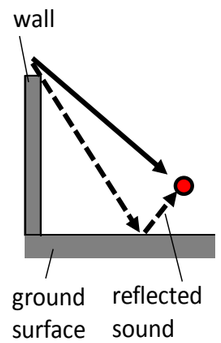


Fig. 1 Reflected sound.

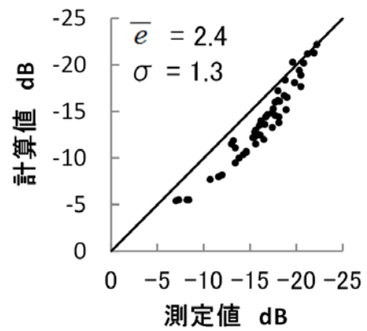


Fig. 2 Best practical way.

目次へ

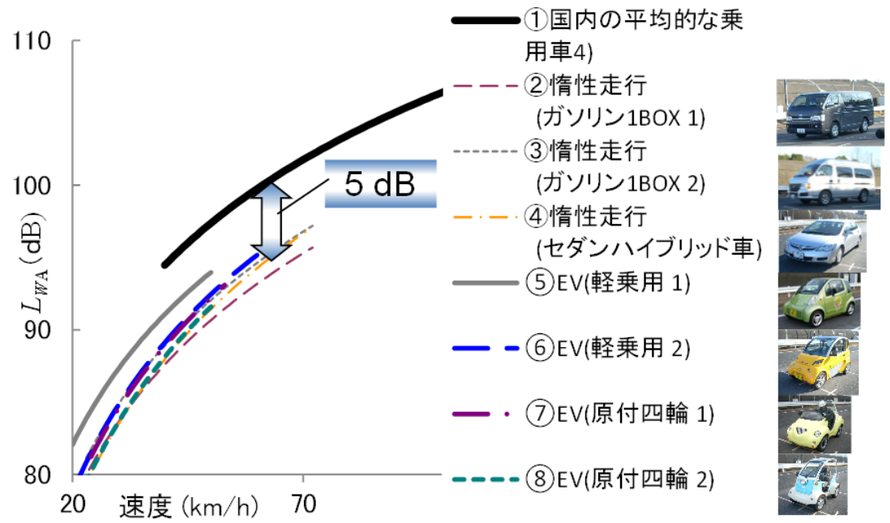
514 道路交通騒音対策の参考資料, 国土技術政策総合研究所資料 第 806 号, (2014).

道路交通騒音に関する法律, 計算, および対策の概要をまとめた. 海外の基準を調査した結果等を含む. 膨大な情報のなかから 100 頁程度に絞り込んだ.

表-A7.2 既設道路にかかる道路交通騒音の基準値

	イギリス	ドイツ	フランス	スウェーデン
基準値	騒音対策最優先地選定は 屋外 $L_{A10,\ 18h\ (6\text{-}24)}$ 76 dB (55dB を超えた騒音に暴露されている人口の 1%とした結果)	屋外 L_{Aeq} dB [6～22 時/ 22～6 時] [70/60]住宅地域 [72/62]中心地域 [75/65]商業・工業地域	屋外 $L_{Aeq,\ 6\text{-}22}$ 65 dB 屋外 $L_{Aeq,\ 22\text{-}6}$ 60 dB 屋外 L_{den} 65 dB 屋外 L_{night} 65 dB (対策後の上限値)	新設・改良の推奨値を 10 dB 以上超過した場合 (屋外 $L_{Aeq,\ 24h}$ 65 dB 定住地 屋外 L_{AFmax} 80 dB 業務地区 屋内 L_{AFmax} 55 dB に相当) はアクションプランを策定.
根拠法および強制力	EU 指令に基づくアクションプラン(作成中) [行政目標]	連邦交通省の通達 州法または州ごとの取組 [行政目標]	騒音に関する通達、環境騒音防止計画(PPBE)の策定に関する施行令	道路交通騒音に関するガイドライン(WHO の推奨に従ったもの)[行政目標]
騒音対策	対策は今後	道路構造対策, 交通流対策, 沿道の既存住宅への防音助成.	道路構造対策、交通流対策、沿道の既存住宅への防音助成(現状では国道のみ)	道路構造対策、交通流対策、建物移転
対策の実施主体	[Highways Agency, 道路管理者および地方自治体]	[道路管理者]		

※本表は各国の担当者への聞き取り調査に基づくものであり、全ての基準等を網羅したものではない。



電気自動車等の騒音(①は公道,その他は試験走路).

目次へ

513 道路用遮音壁に関する景観評価の現状と事例, 国土技術政策総合研究所資料 第 788 号, (2014).

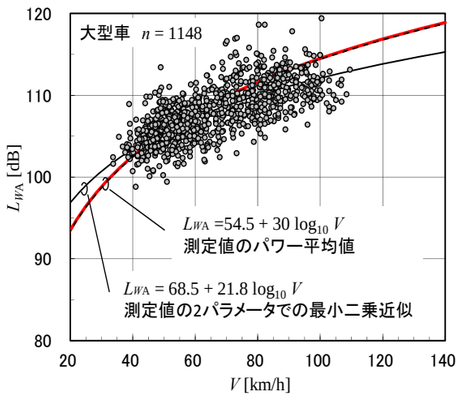
道路景観に関するマニュアルやガイドライン等における景観評価の動向,景観配慮項目と景観対策, および景観に配慮した遮音壁の事例について整理した.

512 オーバーラップさせた遮音壁の近傍における騒音の計算方法, 土木学会論文集 G(環境), Vol.70, No.6 (環境システム研究論文集 第 42 巻), II_331- II_340 (2014).

遮音壁の開口部をオーバーラップさせた構造での騒音の計算方法を提案し, 模型実験で妥当性を確認した.元データを掲載した web site.|

目次へ

511 自動車走行の A 特性音響パワーレベルの現場測定値, 騒音制御, Vol.36, No.1,pp100-105 (2012).



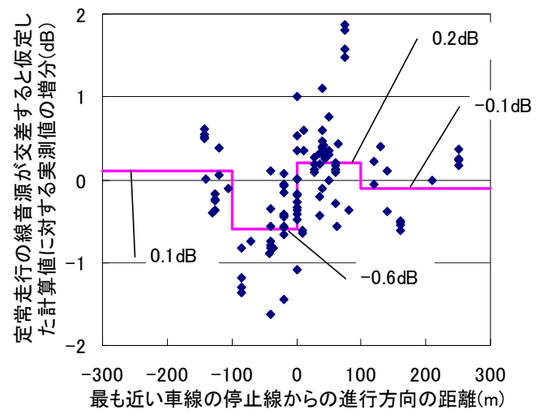
破線はASJ RTN-Model の大型車 L_{WA} = 54.4 + 30 log$_{10}$ V

大型車の測定値の例.

>公道を走行する自動車から発生する騒音 L_{WA} を 2010 年に測定した. 1999 年の文献値と比較して乗用車で 1.0dB, 小型貨物車で 1.6dB 大きい値になり, 中型車および大型車は同程度となったが, 沿道騒音の計算値は 1999 年の文献値に基づく方が正確であった.元データを掲載した web site.｜

目次へ

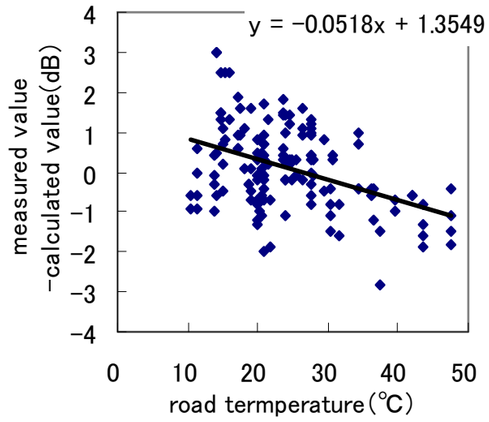
510 信号交差点近傍における交通騒音の現場測定値の分析, 騒音制御, Vol.33, No.1, pp.65-75 (2009).



定常走行の線音源が交差する仮定の計算値に対する実測値の増加.

信号交差点近傍における等価騒音レベル(L_{Aeq})は,定常走行の線音源が交差するとの仮定での計算値に対し,減速部で平均 0.6dB 減少し,加速部で平均 0.2dB 増加していることを明らかにした.元データを掲載した web site.｜

509 定常走行部における道路交通騒音の測定値と計算値との比較および路面温度等の影響, 日本音響学会講演論文集, pp.1081-1082 (2008.9).



路面温度と計算誤差の単回帰.

道路交通騒音の測定値と計算値を比較し, 道路交通騒音は路面温度が高くなると− 0.071 dB / ℃（多変量解析.単回帰では− 0.052 dB / ℃）で低下する傾向等を把握した.

目次へ

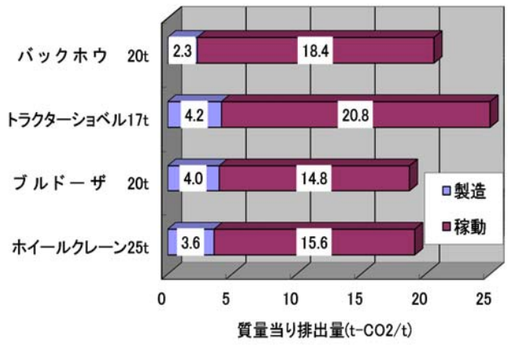
508 **建設工事騒音・振動・大気質の予測に関する研究（第3報），土木研究所資料第 4010 号(2006).**

土木工事で発生する騒音，振動，および降下ばいじんの測定値を整理した．調査結果は以下で活用された．
「道路環境影響評価の技術手法」

507 **土木工事振動の現場測定値，騒音制御，Vol.29，No.5，pp.397-402（2005）.**

工事振動の測定値をBornitzの式にあてはめて整理した．幾何減衰は距離の−1.5 乗に比例する減衰とし，内部減衰(粘性減衰)は超高周波バイブロとその他の全工種の２種類とした．

506 **建設機械のライフサイクルにおける二酸化炭素排出，建設施工と建設機械シンポジウム論文集（2005）.**



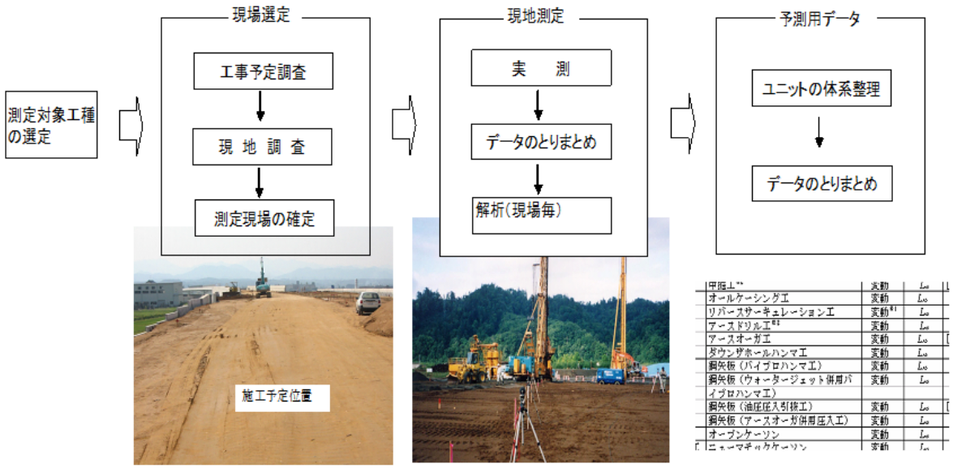
建設機械の製造，稼動，および廃棄のライフサイクルにおける二酸化炭素排出量を整理した．

建設機械のライフサイクルで排出される CO_2.

目次へ

505 **工事の実施による大気環境に係わる環境影響評価に関する研究，建設施工と建設機械シンポジウム論文集（2005）.**

工事中の騒音・振動・粉じんの環境影響評価の手法にかかる「適用範囲の拡大」,「環境保全措置」および「測定方法」の課題への対応策，ならびに「予測用データのとりまとめ方針」を検討した．

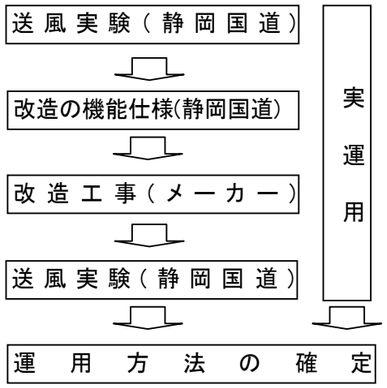


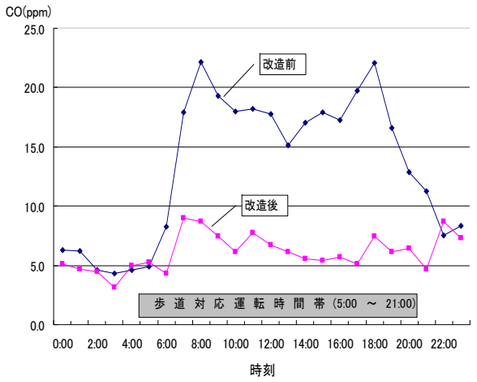
現地測定による予測用データの収集解析.

目次へ

504 換気風向の最適化によるトンネル内歩道の環境改善, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.475-476 (2003).

トンネル内の歩道の大気環境の改善を求める住民要望に対応し, 換気装置を改造した. 改造では遠隔で実験できるようにし, 送風方向を制御するパラメータを測定データに基づいて最適化した. パラメータの最適化にあたっては, 風向風速計の測定値が近車線の走行風の影響を受け真値とは異なる値になることを考慮した. 排ガス濃度は半減したが通行者の８割は不満との評価であった.住民要望から改造機の実運用までの期間は１年.





手動制御での送風実験
→改造工事→送風実験
→運用方法の確定

排ガス濃度は改造前の 1/2 以下.

503 汎用機械を 10 分で無人化, 日経コンストラクション 1998 2-27.

電気レバー式の油圧ショベルを10分で遠隔操作化する公開実験を行った.

目次へ

502 機械施工安全対策評価手法について, 中部地方建設局管内事業研究発表会 (1997).

機械化施工における安全対策を整理し（１２００項目）, 死亡事故事例と照合することで特に重要な安全対策を抽出した（７７項目）. 抽出した（７７項目）.

501 兵庫県南部地震後における建設機械の活用状況, 土木研究所資料第 3410 号(1996). /震災復旧における建設機械, 建設の機械化 96.9, pp.4-11. / 要約(PDF)

兵庫県南部地震（阪神大震災）後における建設機械の活用についてヒヤリング，および記事の調査を行い以下の要点をまとめた.

・直後は人命救助等の需要が発生.
・基準,マニュアルの想定外のことがおこった.
（協定会社の被災等）.
・復旧工事における労働災害の多発
（約１年間で４０名死亡，９０４人負傷）.
・粉塵の発生.
・交通渋滞による輸送時間の増加
（通常の２～３倍，直後は１０倍以上の例も）.
・人,機械の手配は平時の付き合いを中心として行われる.
・水が使用できない（水道 98%復旧まで２ケ月）.
・給水用としての散水車の活用 （建設省で３４台）.

以上. 目次へ

100m を 10 秒で駆けるスプリンターと陸上競技場の相対論効果
−相対性理論の簡素な解説−

座標系K（例:陸上競技場が静止する座標系）とKに対して動いている座標系k（例:スプリンターが静止する座標系）では時間の進み方が異なる（相対論効果）. 本稿では 100m を 10 秒で駆けるスプリンターと陸上競技場で計算して相対性理論を解説する. 最初に 10 秒間の等速の条件で計算し(1.), 次にスタートから 5 秒間の等加速度と残り 5 秒間の等速の条件で計算し(2.), 最後にまとめる(3.). **付録**として重力による相対論効果について GPS 衛星の時計の計算例で述べる.

なお, K, k, t, x, τ, ξの記号はアインシュタインの特殊相対性理論[1]に準じ, 位置は 1 次元x, ξのみとした.

1. 一定速度を前提とした特殊相対性理論での計算

1.1 計算式

座標系Kの時間t, および位置xと, Kに対して速度$v = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$で移動している座標系$k$の時間$\tau$, および位置$\xi$の関係（いわゆる「ローレンツ変換」）は, 光速を$c$とすれば,

$$\begin{pmatrix}\tau\\ \xi\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}1 & -v/c^2\\ -v & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}t\\ x\end{pmatrix} \qquad \textbf{(1).}$$

kで静止する点$\xi = 0$への変換（スプリンターが静止し, $\xi = 0$となる座標系kへの変換）の場合には$x = vt$となるので, (スプリンターの）時間$\tau_{\xi=0}$は, 式**(1)**から,

$$\tau_{\xi=0} = \sqrt{1-v^2/c^2}\,t \qquad \textbf{(2).}$$

また, Kにおける$x = 0$（陸上競技場のスタート地点）のkでの時間$\tau_{x=0}$と位置$\xi_{x=0}$は, 式**(1)**から,

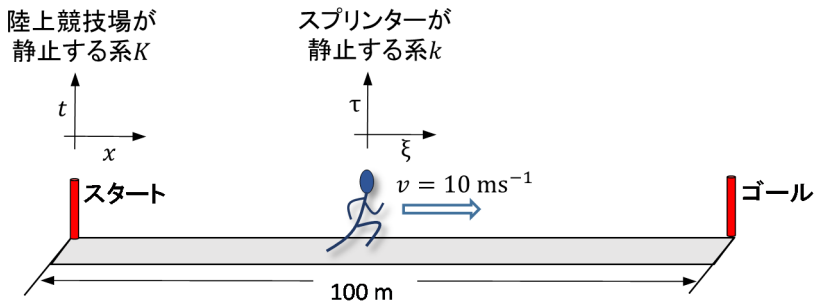
$$\begin{pmatrix}\tau_{x=0}\\ \xi_{x=0}\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}t\\ -vt\end{pmatrix} \qquad \textbf{(3).}$$

$v^2 \ll c^2$を前提として式**(2),** および**(3)**を近似すると,

$$\tau_{\xi=0} \cong t - \frac{v^2}{2c^2}t \qquad \textbf{(4),}$$

$$\tau_{x=0} \cong t + \frac{v^2}{2c^2}t \qquad \textbf{(5),}$$

$$\xi_{x=0} \cong -vt - \frac{v^3}{2c^2}t \qquad \textbf{(6).}$$



図−1 100m を 10 秒で駆け抜けるスプリンターと陸上競技場.

1.2 計算

以上について 100m を 10 秒間の一定速度で駆け抜けるスプリンターと陸上競技場（**図-1**）で計算した結果を**図-2** に示す.

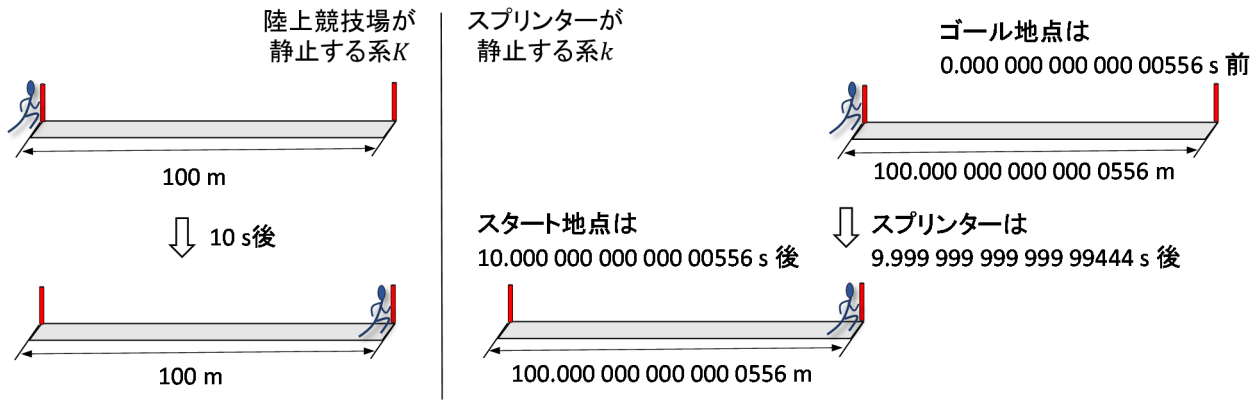


図-2 100m を 10 秒で駆け抜けるスプリンターと陸上競技場の相対論効果.

以下，スプリンターが静止する座標系kにおけるスプリンターの時間$\tau_{\xi=0}$，スタート地点の時間$\tau_{x=0}$，およびスタート地点の位置$\xi_{x=0}$について説明する．式**(4)**で $t = 10\ \mathrm{s}, v = 100/10 = 10\ \mathrm{ms}^{-1}$, および$c = 3.00 \times 10^8\ \mathrm{ms}^{-1}$とすれば，$\tau_{\xi=0} \cong 10 - (5.56 \times 10^{-15})$ =9.$\overset{1\,2\,3}{999}\ \overset{4\,5\,6}{999}\ \overset{7\,8\,9}{999}\ \overset{101112}{999}\ \overset{131415}{99444}$ 秒．式**(5)**より，$\tau_{x=0} \cong 10 + (5.56 \times 10^{-15})$ =10.$\overset{1\,2\,3}{000}\ \overset{4\,5\,6}{000}\ \overset{7\,8\,9}{000}\ \overset{101112}{000}\ \overset{131415}{00556}$ 秒，式**(6)**より，$\xi_{x=0} \cong -100 - (5.56 \times 10^{-14})$ =100.$\overset{1\,2\,3}{000}\ \overset{4\,5\,6}{00}\ \overset{7\,8\,9}{0}\ \overset{101112}{000}\ \overset{1314}{000}\ 0556$ m．座標系K（陸上競技場が静止）におけるスプリンターとスタート地点の同時刻$t = 10$ sが，座標系k（スプリンターが静止）においては同時刻ではなく，「スプリンターの時間$\tau_{\xi=0}$」$< 10\ \mathrm{s} <$「スタート地点の時間$\tau_{x=0}$」．また，座標系Kにおいてスプリンターが100 m前進する事象は，座標系kにおいて陸上競技場が 100.000 000 000 000 0556 m 後退する事象になる.

1.3 双子のパラドックス

ここで，双子のパラドックスについてさきほどの 100m 走の例を[ ]で併記して考察する．宇宙旅行する兄(elder) [スプリンター] の年齢T_{eld}は地球に残っている弟(younger) [スタート地点] の年齢T_{yng}よりも若く，$T_{\mathrm{eld}} < T_{\mathrm{yng}}$ となるが兄eld [スプリンター] が静止する座標系では弟yng [スタート地点] が移動するので$T_{\mathrm{eld}} > T_{\mathrm{yng}}$となり矛盾するとの論理が双子のパラドックである．しかし，弟yng [スタート地点] が静止する座標系Kから兄eld [スプリンター] が静止する座標系kへの変換で兄eld [スプリンター] の年齢T_{eld}は収縮するのに対して弟yng [スタート地点] の年齢T_{yng}は拡張する．この拡張を見込まず，座標系kと座標系Kが対等（ シンメトリー ）と誤解していることがパラドックスの要因である．kからKへの変換で拡張していた弟yng [スタート地点] の年齢T_{yng}は収縮するのでパラドックスとはならない．

補足　ミンコフスキー空間の距離

ミンコフスキー空間の距離の 2 乗$s^2 = -c^2\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$をスプリンターと陸上競技場のスタート地点の双方で計算すると**表−1**．ミンコフスキー空間の距離は「スプリンター」と「陸上競技場のスタート地点」で異なるが座標変換では不変である．「スプリンター[宇宙旅行する兄]」と「陸上競技場のスタート地点[地球に残っている弟]」ではミンコフスキー空間の距離が等しくないので対等（ シンメトリー ）でなく，固有時（ 位置が変化しない時計の時間 ）が異なる．

表−1 「スプリンター」と「陸上競技場のスタート地点」におけるミンコフスキー空間の距離．

	陸上競技場が静止する座標系K	スプリンターが静止する座標系k
スプリンター	$-c^2t^2 + (vt)^2$	$-c^2{\tau_{\xi=0}}^2 = -c^2\left(\sqrt{1-v^2/c^2}\,t\right)^2$ $= -c^2t^2 + (vt)^2$
陸上競技場のスタート地点	$-c^2t^2$	$-c^2{\tau_{x=0}}^2 + {\xi_{x=0}}^2$ $= -c^2\left(\frac{t}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right)^2 + \left(\frac{-vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right)^2$ $= -c^2t^2$

補足　双子のパラドックスに関する解説書等の誤り

(a)　「宇宙旅行する兄は往復での折り返しがあるから」とする説明は詭弁．

地球に残っている弟yngが静止する座標系で $T_{\mathrm{eld}} < T_{\mathrm{yng}}$ ，宇宙旅行する兄eldが静止する座標系kでは$T_{\mathrm{eld}} > T_{\mathrm{yng}}$となるが，「折り返し点」で$T_{\mathrm{yng}}$が増加して$T_{\mathrm{eld}} < T_{\mathrm{yng}}$になる旨の解説がみうけられる．往復距離が長くなれば,「折り返し点」で増加する時間をつじつま合わせのように増やすことになる．論理の誤りを「折り返し点」で粉飾した詭弁．

(b)　「宇宙旅行する兄は加速するから」との説明は不十分．

兄eldと弟yng の違いは加速であり，加速することが$T_{\mathrm{eld}} < T_{\mathrm{yng}}$の原因としているが，等速において$T_{\mathrm{eld}} < T_{\mathrm{yng}}$となることがパラドックスでないことを説明していない．加速をすることは時間の進み方が異なる座標系へ移行することである．加速を考慮した計算は後述する．

1.4 動く棒の長さが縮む相対論効果

座標系kで静止している長さ$l = 1$ mの棒が座標系Kにおいて速度vで動く場合の長さLを計算する（ **図−3**).

$$\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}1 & -v/c^2\\ -v & 1\end{pmatrix}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}1 & +v/c^2\\ +v & 1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix} \qquad \textbf{(7),}$$

となるので式(1)の逆変換は,

$$\begin{pmatrix}t\\ x\end{pmatrix}=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}1 & +v/c^2\\ +v & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\tau\\ \xi\end{pmatrix} \qquad \textbf{(8).}$$

座標系kでは棒の一方の端を$(\tau,\xi)=(0,0)$とし，もう片方を$(\tau,\xi)=(0,l)$と同時刻にしても式**(8)**から，座標系Kにおいては$t\neq 0$となり同時刻でなくなる．ここでは座標系Kにおける同時刻$t=0$を前提とし，この条件を満たすようにτを設定する．式**(1)**で$(t,\ x)=(0,L),\xi=l$とすれば,

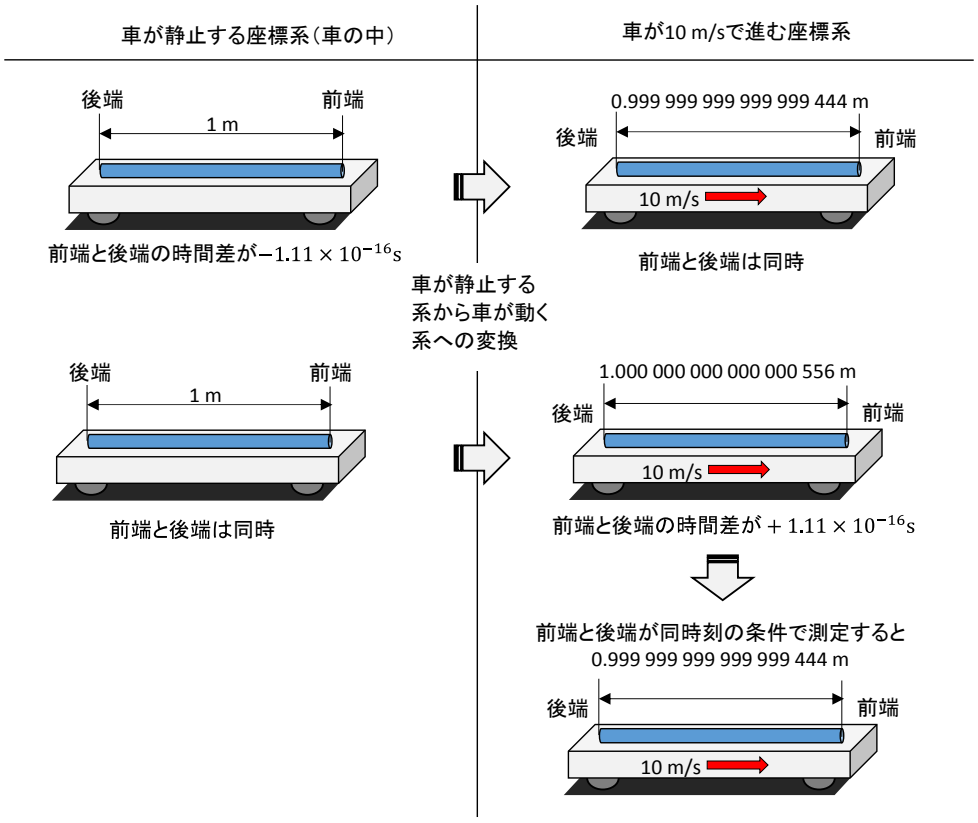
$$\begin{pmatrix}\tau\\ l\end{pmatrix}=\frac{L}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}-v/c^2\\ 1\end{pmatrix} \qquad \textbf{(9).}$$

よって,

$$L=\sqrt{1-v^2/c^2}\,l\cong\left(1-\frac{v^2}{2c^2}\right)l \qquad \textbf{(10),}$$

$$\tau=-\frac{v}{c^2}l \qquad \textbf{(11).}$$

式**(10)**から，スプリンターと同じ速度で走っている車の中の$l=1$ mの棒は，陸上競技場が静止する座標系Kでは$L\cong\left(1-(v^2/(2c^2))\right)l\cong 1-\left(5.56\times10^{-16}\right)=0.999\,999\,999\,999\,999\,444$ m に収縮する.



図−3 動く棒の相対論効果.

(いわゆるローレンツ収縮). ここで注意しなければいけないのは，前端と後端の時間差$\tau = -(v/c^2)\,l = -1.11\times10^{-16}$ s の1 mの棒は，$1-(5.56\times10^{-16})$ m に収縮するが，両端が同時の1 mの棒は，前端と後端の時間差が1.11×10^{-16} s の $1+(5.56\times10^{-16})$ m に拡張することである(**図-3**). 座標系Kでの同時刻を前提として距離を比較することは偏った(対等でない．シンメトリーでない.)比較であり，長さに関しても双子のパラドックス(弟からみた兄の物差しは短く，兄からみた弟の物差しも短い.)が生じるように誤解される.

2. 加速を考慮した相対性理論

2.1 計算式

加速を考慮した計算は，特殊相対性理論で速度vを変数にすれば可能である．vを変数として扱えるように式**(1)**，式**(2)**，式**(3)**を書き換えると，

$$\begin{pmatrix}\mathrm{d}\tau\\ \mathrm{d}\xi\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}1 & -v/c^2\\ -v & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\mathrm{d}t\\ \mathrm{d}x\end{pmatrix} \qquad \textbf{(12),}$$

$$\begin{pmatrix}\mathrm{d}\tau_{\xi=0}\\ \mathrm{d}\xi_{\xi=0}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\sqrt{1-v^2/c^2}\,\mathrm{d}t\\ 0\end{pmatrix} \qquad \textbf{(13),}$$

$$\begin{pmatrix}\mathrm{d}\tau_{x=0}\\ \mathrm{d}\xi_{x=0}\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\begin{pmatrix}\mathrm{d}t\\ -v\mathrm{d}t\end{pmatrix} \qquad \textbf{(14),}$$

となる．一定の加速度aでの加速$v = at$，および $v^2 \ll c^2$を前提とすると式**(13)**から，

$$\mathrm{d}\tau_{\xi=0} \cong \left(1-\frac{v^2}{2c^2}\right)\mathrm{d}t = \left(1-\frac{a^2t^2}{2c^2}\right)\mathrm{d}t \qquad \textbf{(15),}$$

$t = 0$で$\tau_{\xi=0} = 0$を条件として積分すると，

$$\tau_{\xi=0} = t - \frac{a^2t^3}{6c^2} \qquad \textbf{(16),}$$

同様にして式**(14)**から，

$$\mathrm{d}\tau_{x=0} \cong \left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)\mathrm{d}t = \left(1+\frac{a^2t^2}{2c^2}\right)\mathrm{d}t \qquad \textbf{(17),}$$

$$\mathrm{d}\xi_{x=0} \cong -v\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)\mathrm{d}t = -\left(at+\frac{a^3t^3}{2c^2}\right)\mathrm{d}t \qquad \textbf{(18).}$$

$t = 0$で$\tau_{x=0} = 0$，および$\xi_{x=0} = 0$を条件として積分すると，

$$\tau_{x=0} \cong t + \frac{a^2t^3}{6c^2} \qquad \textbf{(19),}$$

$$\xi_{x=0} \cong -\frac{a}{2}t^2 - \frac{a^3t^4}{8c^2} \qquad \textbf{(20).}$$

2.2 計算例

スタートから$t_\mathrm{a} = 5$ 秒間，等加速度aで加速（accelerate）して速度$v_\mathrm{c} = 5a$に達し，次の$t_\mathrm{c} = 5$秒間，等速（constant velocity）で走って 100 m を駆けるスプリンターと陸上競技場の相対論効果を加速区間と等速区間に分けて計算する．相対論効果は，相対論効果を見込まない場合との差とする．

(a) 加速区間

$1/2a \cdot {t_\mathrm{a}}^2 + v_\mathrm{c} \cdot t_\mathrm{c} = 100$ となることから，$a = 8/3\,\mathrm{ms}^{-2}$．よって，式**(16)**から，スプリンターでの座標系kと座標系Kの時間差$\tau_{\xi=0} - t_\mathrm{a} = -a^2{t_\mathrm{a}}^3/(6c^2) = -1.65 \times 10^{-15}$ 秒．一方，スタート地点での座標系kと座標系Kの時間差は式**(19)**から，$\tau_{x=0} - t_\mathrm{a} = a^2{t_\mathrm{a}}^3/(6c^2) = 1.65 \times 10^{-15}$ 秒．座標系kにおけるスタート地点の位置$\xi_{x=0}$は相対論効果を見込まないと$-(a/2){t_\mathrm{a}}^2$であるが，式**(20)**より，$\xi_{x=0} - \left(-(a/2)\,{t_\mathrm{a}}^2\right) = -a^3{t_\mathrm{a}}^4/(8c^2) = -1.65 \times 10^{-14}\mathrm{m}$ の相対論効果が生じる．

(b) 等速区間

式**(4)**より，座標系kと座標系Kのスプリンターでの時間差$\tau_{\xi=0} - t_\mathrm{c} \cong -({v_\mathrm{c}}^2/(2c^2))\,t_\mathrm{c} = -4.94 \times 10^{-15}$ s. 一方，スタート地点での時間差は式**(5)**より，$\tau_{x=0} - t_\mathrm{c} = ({v_\mathrm{c}}^2/(2c^2))\,t_\mathrm{c} = 4.94 \times 10^{-15}$ s.　座標系kにおけるスタート地点の位置$\xi_{x=0}$は，相対論効果を見込まないと$-v_\mathrm{c}t_\mathrm{c}$ であるが，式**(6)**より，$\xi_{x=0} - (-v_\mathrm{c}t_\mathrm{c}) \cong -({v_\mathrm{c}}^3/(2c^2))\,t_\mathrm{c} = -6.58 \times 10^{-14}$ m の相対論効果が生じる．

3 まとめ

1.，および 2. の計算結果を**表-1** にまとめた．

表-1 100m を 10 秒で駆けるスプリンターと陸上競技場の相対論効果-スプリンターが静止する座標での時間と位置

	100m を 10 秒間の等速で駆ける場合	100m を 5 秒間の等加速と 5 秒間の等速で駆ける場合		
		加速区間と等速区間の合計		
		= 加速区間	+	等速区間
スプリンターの時間	$10 - (5.56 \times 10^{-15})$ s	$10 - (6.59 \times 10^{-15})$ s		
		$= 5 - (1.65 \times 10^{-15})$	+	$5 - (4.94 \times 10^{-15})$ s
スタート地点の時間	$10 + (5.56 \times 10^{-15})$ s	$10 + (6.59 \times 10^{-15})$ s		
		$= 5 + (1.65 \times 10^{-15})$	+	$5 + (4.94 \times 10^{-15})$ s
スタート地点の位置	$-100 - (5.56 \times 10^{-14})$ m	$-100 - (8.23 \times 10^{-14})$ m		
		$= (-100/3) - (1.65 \times 10^{-14})$		$+ (-200/3) - 6.58 \times 10^{-14}$ m

100m を 10 秒間の等速で駆ける場合よりも等加速 5 秒と等速 5 秒の計 10 秒で駆ける場合の方が等速区間での速度が大きくなるので相対論効果が大きくなる．

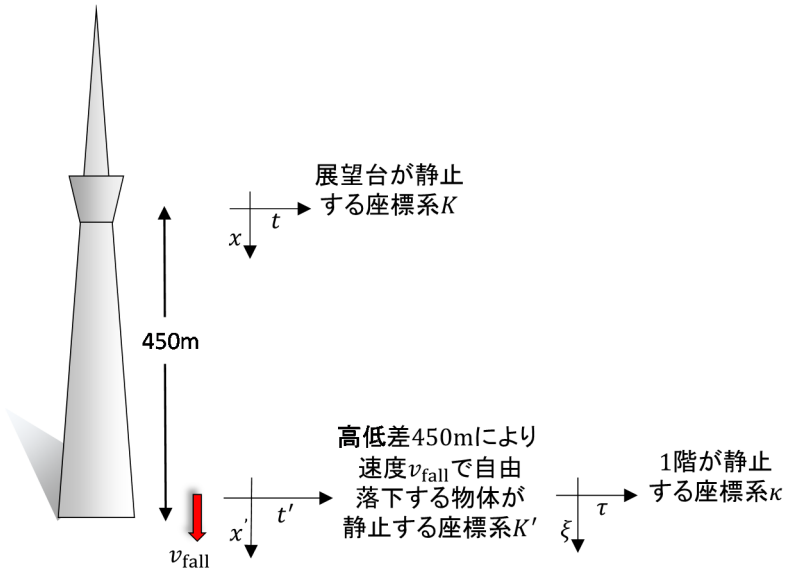
付録　重力による相対論効果

(1) スカイツリー

スカイツリーの 1 階での時間$\tau_{0\mathrm{m}}$と展望台（高低差$h = 450\ \mathrm{m}$）での時間$t_{450\mathrm{m}}$が重力の影響で異なる相対論効果は**図−4** のように考えて計算できる．「展望台が静止する座標系K(時間t, 位置x)」と「展望台から重力加速度$g = 9.8\ \mathrm{ms}^{-2}$で自由落下(free fall) して 1 階の位置で自由落下の速度がv_{fall}となった座標系K'(時間t', 位置x')」では時間は一致する．また，1 階が静止する座標系kは，座標系K'に対して速度$-v_{\mathrm{fall}}$で移動するとみなせる．よって，式(4)，および$v_{\mathrm{fall}} = (2gh)^{0.5}$より

$$\tau_{0\mathrm{m}} \cong t_{450\mathrm{m}} - \frac{(-v_{\mathrm{fall}})^2}{2c^2} t_{450\mathrm{m}} = t_{450\mathrm{m}} - \frac{gh}{c^2} t_{450\mathrm{m}} \qquad \textbf{(21).}$$

結果的に重力ポテンシャルでの計算（ 例えば[2] ）と整合する．31 日間（ 1 ケ月 ）に相当する$t_{450\mathrm{m}} = 2.7 \times 10^6\ \mathrm{s}$での展望台と 1 階の時間差は$t_{450\mathrm{m}} - \tau_{0\mathrm{m}} \cong ghc^{-2} t_{450\mathrm{m}} \cong 1.3 \times 10^{-7}\ \mathrm{s}$ ．この計算値は光格子時計の実験における計算値のマスコミ報道[3]と一致する．



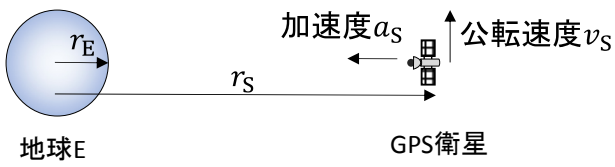
図−4 重力による相対論効果の考え方．

(2) GPS 衛星

同様にして地上での時間Tに対する GPS 衛星（米国）での時間T_{GPS}の進む割合$(T_{\mathrm{GPS}}-T)/T=\Delta T/T$を GPS 衛星の公転速度による進み$\Delta T_{\mathrm{V}}/T$（ 遅れるので負の値 ）と地球の重力による進み$\Delta T_{\mathrm{G}}/T$の和

$$\frac{\Delta T}{T}=\frac{\Delta T_{\mathrm{V}}}{T}+\frac{\Delta T_{\mathrm{G}}}{T} \qquad \textbf{(22),}$$

として計算する．地球の自転速度を考慮すると計算が複雑になること，および地球の自転速度は衛星の公転速度よりも十分に小さいことから地球の自転速度は見込まない．また，ΔTは十分に小さいので$\Delta T/T\cong\Delta T/T_{\mathrm{GPS}}$とみなす．



図−5 GPS 衛星の模式図.

a) GPS 衛星の公転速度による時計の進み $\Delta T_{\mathrm{V}}/T$

質量M_{S}の衛星 S が半径R_{S}, 速度v_{S}で質量M_{E}の地球に対して公転しているとき（**図−5** ），万有引力定数をGとした重力$F=GM_{\mathrm{E}}M_{\mathrm{S}}R_{\mathrm{S}}^{-2}$，質量$M_{\mathrm{S}}$，および加速度$a_{\mathrm{S}}=v_{\mathrm{S}}^2R_{\mathrm{S}}^{-1}$の運動方程式は,

$$GM_{\mathrm{E}}M_{\mathrm{S}}R_{\mathrm{S}}^{-2}=M_{\mathrm{S}}v_{\mathrm{S}}^2R_{\mathrm{S}}^{-1} \qquad \textbf{(22),}$$

式**(4)**で$t=T$，$\tau_{\xi=0}-t=\Delta T_{\mathrm{V}}$,および$v=v_{\mathrm{S}}$とすると$\Delta T_{\mathrm{V}}/T\cong-v_{\mathrm{S}}^2/(2c^2)$ となるので，v_{S}を式**(22)**で置き換えると,

$$\frac{\Delta T_{\mathrm{V}}}{T}\cong-\frac{GM_{\mathrm{E}}}{2c^2R_{\mathrm{S}}}\cong-0.83\times10^{-10} \qquad \textbf{(23).}$$

ここで，$G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{m^3kg^{-1}s^{-2}}$, $M_{\mathrm{E}}=5.97\times10^{24}$ kg, および $R_{\mathrm{S}}=2.66\times10^{7}$ mとした.

b) 地球の重力による時計の進み$\Delta T_{\mathrm{G}}/T$

地球からの距離xにある質量mの物体に作用する重力$F=-GM_{\mathrm{E}}mx^{-2}$が，衛星の公転半径$R_{\mathrm{S}}$から地球の半径$R_{\mathrm{E}}$の位置まで自由落下する物体に作用する仕事量$\int F\mathrm{d}x$は落下速度$v_{\mathrm{fall}}$の運動エネルギーと等しくなるので,

$$\int_{R_{\mathrm{S}}}^{R_{\mathrm{E}}}-GM_{\mathrm{E}}mx^{-2}\mathrm{d}x=\frac{1}{2}\,m{v_{\mathrm{fall}}}^2 \qquad \textbf{(24).}$$

スカイツリーでの計算と同様に考え，式**(4)**で$t=T_{\mathrm{GPS}}$，$\tau_{\xi=0}=T$，および$v^2={v_{\mathrm{fall}}}^2$とすると,
$(T_{\mathrm{GPS}}-T)/T_{\mathrm{GPS}}\cong{v_{\mathrm{fall}}}^2/(2c^2)$．左辺の$(T_{\mathrm{GPS}}-T)/T_{\mathrm{GPS}}\cong\Delta T_{\mathrm{G}}/T$とし，右辺の$v_{\mathrm{fall}}$を式**(24)**で置き換え積分を計算すると,

$$\frac{\Delta T_{\mathrm{G}}}{T}\cong\frac{GM_{\mathrm{E}}}{c^2}\left(-\frac{1}{R_{\mathrm{S}}}+\frac{1}{R_{\mathrm{E}}}\right)\cong5.28\times10^{-10} \qquad \textbf{(25).}$$

ここで，$R_{\mathrm{E}}=6.37\times10^{6}$ mとした.

c) GPS 衛星での時計の進み

以上より, GPS 衛星での時計の進みは

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T_{\mathrm{V}}}{T} + \frac{\Delta T_{\mathrm{G}}}{T} = (-0.83 \times 10^{-10}) + (5.28 \times 10^{-10}) = 4.45 \times 10^{-10} \qquad \textbf{(26),}$$

となり，衛星から周波数fで送信した電波の周波数の増加Δfは$\Delta f/f = -4.45 \times 10^{-10}$となる（ 周波数は時間の逆数なので正負が反転 ）. 解説書[4]では上記と同様な簡易な計算で$\Delta f/f = -4.464 \times 10^{-10}$としており，式**(26)**の計算値は整合する．また，文献[5]に記載された GPS 衛星 NTS-2 での時間の進みの計算値 445.0×10^{-12}，および測定値442.5×10^{-12}ともよく整合する．文献[5]には GPS 衛星の信号の周波数のずれ（ offset ）を相対論効果の補正で縮小した旨が記載されている．

補足： 大気と自転がない星の地上すれすれの位置を公転する衛星の場合

式**(25)**より，大気がない星の地上すれすれの位置$R_{\mathrm{S}} \cong R_{\mathrm{E}}$を公転する衛星の場合には重力による進み$\Delta T_{\mathrm{G}}/T \cong 0$となり,この星の自転がなければ，$\Delta T/T \cong \Delta T_{\mathrm{V}}/T \cong -GM_{\mathrm{E}}/(2c^2R_{\mathrm{E}})$ となり，衛星の時計のずれは公転速度による遅れ

$$\Delta T \cong \Delta T_{\mathrm{V}} \cong -\frac{GM_{\mathrm{E}}}{2c^2R_{\mathrm{E}}}T \qquad \textbf{(27),}$$

のみとなる．衛星の時計の遅れ$-\Delta T$は経過時間Tに比例して増え，「双子のパラドックス」の論理のように「衛星から観測すると地上の時計が遅れる」ということはない．

References

[1] A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik, **17**, 891 (1905) [in German]. (web site で英訳を入手).

[2] 石井俊全: 一般相対性理論を一歩一歩数式で理解する，ベレ出版.

[3] NHK: 展望台の時計　地上より早く進む? スカイツリーで実験, 2018.10.03.

[4] B.ホフマン-ウェレンホフ, H.リヒテネガー, J.コリンズ，西修二郎（訳）: GPS 理論と応用，丸善出版.

[5] James A. Buisson, Roger L. Easton, Thomas B. McCaskill; INITIAL RESULTS OF THE NAVSTAR GPS NTS-2 SATELLITE, Proceedings of the 9th Annual Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting, 177–199, 1977. (web site で入手).

Refutation of the twin paradox by considering expansion in Lorentz transformation
ローレンツ変換での拡張を考慮した双子のパラドックスの反駁

Hiroshi Yoshinaga

Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0024, Japan

E-mail: 01@a.nifty.jp, web site: yoshi-naga.jp

Numerous attempts have been made to refute the twin paradox associated with Einstein's special theory of relativity. However, none of these, including Einstein's answer, have made the essential puzzle clear; namely, 'the Earth's clock would either lose time or not lose time, if we assume that the rocket is stationary and the Earth moves.' The following claim is discussed in this paper: although the moving Earth's clock would lose time at the same rate, the time course would be equal to the time course which we would assume if the Earth were stationary, because **the distance traveled by the moving Earth would be extended by Lorentz transformation if we assume the rocket to be stationary.** In the end, the relativity not only of the clock speed but of the travel distance must be considered in Lorentz transformation. By considering the expansion of time and length in Lorentz transformation that everyone overlooked, the twin paradox is easily resolved. It is described using simple equations and simple case studies.

アインシュタインの特殊相対性理論にかかる双子のパラドックスに対する反駁は数多くある．しかし,「ロケットが静止し地球が動く仮定すると地球の時計が遅れるか否か.」という本質的な問にはアインシュタイン自身も答えていない．この論文では,**ロケットが静止していると仮定すると**動く地球の時計も同じ割合で遅れるが,**動く地球が移動する距離はローレンツ変換によって拡大される**ので，地球が静止すると仮定した場合と時間経過が同じになることについて述べる．すなわち，時計の速度だけでなく移動距離の相対性もローレンツ変換で考慮する必要がある．誰もが見落としていたローレンツ変換での時間と長さの拡張を考えると，双子のパラドックスは簡単に解消できる．以上を簡素な式と簡素なケーススタディで説明した.

Keywords: twin paradox, clock paradox, theory of relativity, special relativity, Lorentz transformation, inertial frame, relativity of length, relativity of clock speed, relativity of time course, Lorentz expansion

1. Introduction

Numerous attempts have been made to refute the twin paradox associated with Einstein's special theory of relativity[1]. However, none of these, including Einstein's answer[2], have made the essential puzzle clear; namely, 'the Earth's clock would either lose time or not lose time, if we assume that the rocket is stationary and the Earth moves.' The following claim is discussed in this paper: although the moving Earth's clock would lose time at the same rate, the time course would be equal to the time course which we would assume if the Earth were stationary, because **the distance traveled by the moving Earth would be extended by Lorentz transformation if we assume the rocket to be stationary** (see **Fig. 1**.). In the end, the relativity not only of the clock speed but of the travel distance must be considered in Lorentz transformation. **By considering the expansion of time and length in Lorentz transformation that everyone overlooked, the twin paradox is easily resolved.**

1. はじめに

アインシュタインの特殊相対性理論 [1]にかかる双子のパラドックスに対する反駁は数多くある．しかし,「ロケットが静止し地球が動く仮定すると地球の時計が遅れるか否か.」という本質的な問にはアインシュタイン自身も答えていない [2]．この論文では,**ロケットが静止していると仮定すると動く地球の時計も同じ割合で遅れるが，動く地球が移動する距離がローレンツ変換によって拡大される**（**Fig. 1** 参照）ので，地球が静止すると仮定した場合と時間経過が同じになることについて述べる．すなわち，時計の速度だけでなく移動距離の相対性もローレンツ変換で考慮する必要がある.**ローレンツ変換における時間と長さの拡張（誰もが見落としていた.）を考慮すると，双子のパラドックスは簡単に解消できる.**

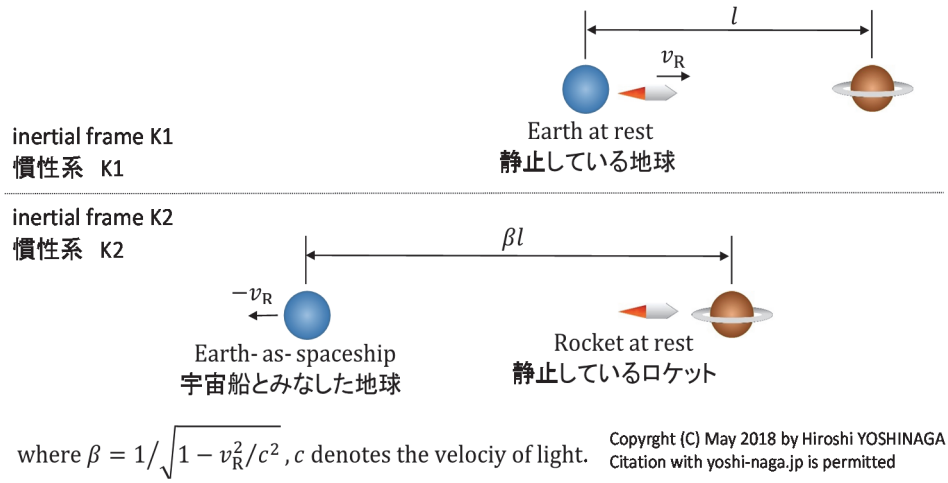


Fig. 1. Expansion of distance by converting the inertial frame K1 where the earth is stationary into the inertial frame K2 where the rocket is stationary by Lorentz transformation (schematic figure).

Fig. 1. 地球が静止している慣性系 K1 をロケットが静止している慣性系 K2 にローレンツ変換することによる距離の拡張(模式図).

It is described using simple equations and simple case studies in this paper. **The effects of acceleration and gravity are not considered**. To understand the essentials of the special theory of relativity, they are not needed, **because as the travel distance becomes long, these effects become relatively small**. There are explanations in books and web sites that the time of the Earth-as-spaceship (or the twin's clock stayed at the Earth) would go discontinuously at turning points of round trips if we assume the rocket to be stationary, however, the time discontinuity comes from the wrong turning points mistakenly shortened.

本論文では簡素な式と簡素なケーススタディで説明する．加速と重力の影響は考慮していない．移動距離が長くなれば，これらの影響は相対的に小さくなるので，特殊相対性理論の本質を理解するためには必要ない．ロケットが止まっていると仮定すると Earth-as-spaceship (宇宙船地球号)の時間（または，地球に残った双子の時計）が，往復旅行の折り返し点で不連続に進む旨の説明が書籍，および web site に見受けられるが，時間が不連続になる原因は，間違って短くした折り返し点に起因する．

2. Presuppositions, etc.

The presuppositions, etc., in this paper are as follows.

1) ‘Lorentz transformation’ is the transformation of coordinates and times from one inertial frame system to another, in Einstein’s special theory of relativity. ‘Galilean transformation’ is also described, to differentiate it from Lorentz transformation.

2) Only one direction, x, among the three dimensions of x, y, z, is selected to describe locations. The time t and location x of a point P_i is described as (t, x) or $\binom{t}{x}$.

3) The difference between P_i, and P_j (where i and j are indices denoting individual points) is described as $\boldsymbol{\Delta P = P_i - P_j = (\Delta t, \Delta x)}$**, where $\boldsymbol{\Delta t}$ and $\boldsymbol{\Delta x}$ denote the time course and difference in location**, respectively.

4) **Galilean and Lorentz transformations are applied to $\boldsymbol{\Delta P}$**. It should be noted that the equations in the special theory of relativity are modified in this paper; however, the essential import of the equations is not changed.

5) ‘Motion of the Earth’ denotes neither the Earth’s orbital rotation around the sun, nor its axial rotation, but rather, extremely high speed uniform linear motion, as is relevant to the special theory of relativity.

2. 前提条件等

本論文では以下を前提条件等とした.

1)「ローレンツ変換」は, アインシュタインの特殊相対性理論における, ある慣性系から別の慣性系への座標と時間の変換である. ローレンツ変換との違いを示すために「ガリレイ変換」も併記した.

2) 位置を示す座標はx, y, zの 3 つの次元のうちのxのみとした. 点P_i の時間t および位置xは(t, x) または$\binom{t}{x}$と表記した.

3) P_iとP_jの差 (i とj は個々の点を示すインデックス) は, $\Delta\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P_i} - \boldsymbol{P_j} = (\Delta\boldsymbol{t}, \Delta\boldsymbol{x})$とした. ここで$\Delta\boldsymbol{t}$および$\Delta\boldsymbol{x}$は, 時間経過および位置の差.

4) ガリレイ変換とローレンツ変換で$\Delta\boldsymbol{P}$を変換する. この論文では, 特殊相対性理論の式を書き換えているが, 式の本質的な意味は変えていない.

5)「地球の動き」は, 太陽の周りの公転や自転ではなく, 特殊相対性理論にかかわるような非常に高速かつ一定の線形運動を意味する.

3. Galilean Transformation and Lorentz Transformation

First, Galilean and Lorentz transformation will be distinguished. The equations which transform $(\Delta t_{\mathrm{K1}}, \Delta x_{\mathrm{K1}})$ in inertial frame K1 to $(\Delta t_{\mathrm{K2}}, \Delta x_{\mathrm{K2}})$ in inertial frame K2, which moves at the constant velocity v_{C}, in the direction of increasing x_{K1} in K1, are:

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(1)},$$

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_L}} \end{pmatrix} = \beta \begin{pmatrix} 1 & -v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(2)},$$

$$\beta = 1/\sqrt{1 - v_{\mathrm{C}}^2/c^2} \qquad \textbf{(3)},$$

where c denotes the velocity of light. The subscripts "_G", and "_L" denote Galilean and Lorentz transformation, respectively.

Since $(\Delta t_{\mathrm{K1}}, 0)$ is a stationary point in K1, $\Delta x_{\mathrm{K2}}/\Delta t_{\mathrm{K2}}$ obtained by substituting $(\Delta t_{\mathrm{K1}}, 0)$ into **Eqs. (1)** and **(2)** are the velocities of K1 in K2. The velocity is equal to $-v_{\mathrm{C}}$in both transformations. The equations of transformations from K2 to inertial frame K3, which move at the constant velocity $-v_{\mathrm{C}}$, in the direction of increasing x_{K2} in K2, are:

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_G}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(4)},$$

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_L}} \end{pmatrix} = \beta \begin{pmatrix} 1 & +v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_L}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(5)}.$$

The matrices in **Eq. (1)** vs. **Eq. (4)** and **Eq. (2)** vs. **Eq. (5)** are the inverse of each other, as:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \qquad \textbf{(6)},$$

$$\beta \begin{pmatrix} 1 & +v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} = \left[\beta \begin{pmatrix} 1 & -v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix}\right]^{-1} \qquad \textbf{(7)}.$$

Thus, we obtain **Eq. (8)** from **Eqs. (1), (4)**, and **(6)**. Furthermore we obtain **Eq. (9)** from **Eqs. (2), (5)**, and **(7)**:

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(8)},$$

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_L}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(9)}.$$

Eq. (9) implies a refutation of the twin paradox, as illustrated by several case studies in **§4**.

In addition, the changing rate of the clock speed obtained by dividing **Eq. (2)** by Δt_{K1} is:

$$\frac{\Delta t_{\mathrm{K2_L}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}} = \beta\left(1 - v_{\mathrm{C}}/c^2 \frac{\Delta x_{\mathrm{K1}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}}\right) \qquad \textbf{(10)}.$$

Eq. (10) varies as a function of v_{C} and $\Delta x_{\mathrm{K1}}/\Delta t_{\mathrm{K1}}$, which denotes the velocity of an object moving in K1. If $\Delta x_{\mathrm{K1}}/\Delta t_{\mathrm{K1}}$ in **Eq. (10)** equals v_{C}, **Eq. (11)**, expressing the delay in the traveler's clock, is obtained;

$$\frac{\Delta t_{\mathrm{K2_L}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}} = 1/\beta \qquad \textbf{(11)},$$

whereas, if $\Delta x_{\mathrm{K1}}/\Delta t_{\mathrm{K1}}$ in **Eq. (10)** equals 0, which denotes a stationary point in K1, **Eq. (12)**, expressing the expansion of the time course in Lorentz transformation, is obtained;

$$\frac{\Delta t_{\mathrm{K2_L}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}} = \beta \qquad \textbf{(12)}.$$

3. ガリレイ変換とローレンツ変換

まず, ガリレイ変換とローレンツ変換の違いを示す. 慣性系 K1 の$(\Delta t_{\mathrm{K1}}, \Delta x_{\mathrm{K1}})$を K1 の$x_{\mathrm{K1}}$の正方向に一定速度$v_{\mathrm{C}}$で移動する慣性系 K2 の$(\Delta t_{\mathrm{K2}}, \Delta x_{\mathrm{K2}})$に変換する式は,

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(1)},$$

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_L}} \end{pmatrix} = \beta \begin{pmatrix} 1 & -v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(2)},$$

$$\beta = 1/\sqrt{1 - v_{\mathrm{c}}^2/c^2} \qquad \textbf{(3)},$$

ここで, c は光の速度を示す. 添え字の「_G」および「_L」は, それぞれガリレイ変換およびローレンツ変換を示す.

$(\Delta t_{\mathrm{K1}}, 0)$は K1 の静止点なので, $(\Delta t_{\mathrm{K1}}, 0)$を式(1), および(2)に代入して得られる$\Delta x_{\mathrm{K2}}/\Delta t_{\mathrm{K2}}$は K2 における K1 の速度である. 速度は両変換で$-v_{\mathrm{C}}$となり等しい. K2 から K2 のx_{K2}の正方向に一定速度$-v_{\mathrm{C}}$で移動する慣性系 K3 への変換の式は,

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_G}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(4)},$$

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_L}} \end{pmatrix} = \beta \begin{pmatrix} 1 & +v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K2_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K2_L}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(5)}.$$

Eq. (1) と **Eq. (4),** および **Eq. (2)** と **Eq. (5)** の行列は互いに次のように逆行列である.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \qquad \textbf{(6)},$$

$$\beta \begin{pmatrix} 1 & +v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ +v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} = \left[\beta \begin{pmatrix} 1 & -v_{\mathrm{C}}/c^2 \\ -v_{\mathrm{C}} & 1 \end{pmatrix} \right]^{-1} \qquad \textbf{(7)}.$$

よって, **Eqs. (1), (4)**, および **(6)** から **Eq. (8)** が得られる. さらに, **Eqs. (2), (5)**, および **(7)** から **Eq. (9)** が得られる.

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_G}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(8)},$$

$$\begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K3_L}} \\ \Delta x_{\mathrm{K3_L}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta t_{\mathrm{K1}} \\ \Delta x_{\mathrm{K1}} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(9)}.$$

Eq. (9)は, **§4** のケーススタディで示すように双子のパラドックスに対する反駁を意味する.

補足しておくが, **Eq. (2)** を Δt_{K1} で割ることにより得られる時計の速さの変換率は,

$$\frac{\Delta t_{\mathrm{K2_L}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}} = \beta \left(1 - v_{\mathrm{C}}/c^2 \frac{\Delta x_{\mathrm{K1}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}} \right) \qquad \textbf{(10)}.$$

Eq. (10)は v_{C} と $\Delta x_{\mathrm{K1}}/\Delta t_{\mathrm{K1}}$の関数である. $\Delta x_{\mathrm{K1}}/\Delta t_{\mathrm{K1}}$は K1 で移動する物体の速度を表す. **Eq. (10)**の$\Delta x_{\mathrm{K1}}/\Delta t_{\mathrm{K1}}$が$v_{\mathrm{C}}$なら, 旅行者の時計の遅れを表す **Eq. (11)**が得られる.

$$\frac{\Delta t_{\mathrm{K2_L}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}} = 1/\beta \qquad \textbf{(11)},$$

一方, **Eq. (10)**の$\Delta x_{\mathrm{K1}}/\Delta t_{\mathrm{K1}}$が, K1 での静止点を意味する 0 なら, ローレンツ変換による時間経過の拡張を表す **Eq. (12)**が得られる.

$$\frac{\Delta t_{\mathrm{K2_L}}}{\Delta t_{\mathrm{K1}}} = \beta \qquad \textbf{(12)}.$$

4. Case Studies

4.1 Outline

As aforementioned, **Eq. (9)** implies a refutation of the twin paradox. To illustrate this, several

case studies, which assume the velocity $v_{\mathrm{C}} = \pm c/2$ in Lorentz transformation, will be discussed. Space travel at $c/2$ may never actually be possible, however, the velocity is reasonable for the purpose, because here the difference from Galilean transformation is obvious and moderate. The principle of the constancy of the velocity of light, and the relativity of simultaneity, of length, and of time course will first be discussed, before discussing the time course during virtual space travel and refutation of the twin paradox. In the case studies, the units of length and time are meter and second. The β in **Eq. (3)** is $\beta = 1/\sqrt{0.75} \cong 1.15$, and $1/\beta \cong 0.86$.

4. ケーススタディ

4.1 概要

前述したように, **Eq. (9)** は双子のパラドックスに対する反駁を意味する. このことを説明するために, ローレンツ変換で速度$v_{\mathrm{C}} = \pm c/2$を仮定するケーススタディについていくつか述べる. 現実には$c/2$での宇宙旅行は実現不可能かもしれないが, ガリレイ変換との違いが明らかで程よいので, 説明に適している. 仮想的な宇宙旅行での時間経過と双子のパラドックスに対する反駁について述べる前に, まず, 光速度の不変の原理, ならびに同時性, 長さ, および時間経過の相対性について述べる. ケーススタディでは, 長さと時間の単位はメートルと秒とする. **Eq. (3)**のβは, $\beta = 1/\sqrt{0.75} \cong 1.15$と $1/\beta \cong 0.86$になる.

Some transformed cases of $\Delta P_{i,j}$ are shown in **Table I**. The $\Delta P_{i,j}$ are transformed from K1 to K2, and then transformed from K2 to K3, at the relative velocity v_{C}. The positive/negative values of v_{C} for $\Delta P_{6,5}$ are the inverse of those for $\Delta P_{5,0}$, because the return trip of $\Delta P_{5,0}$ is assumed in $\Delta P_{6,5}$. The $\sum \Delta P$ is the sum of $\Delta P_{5,0}$, and $\Delta P_{6,5}$. The meanings of these transformations are explained in **§4.2-4.4**.

$\Delta P_{i,j}$のいくつかの変換事例を **Table I** に示す. $\Delta P_{i,j}$は K1 から K2, そして K2 から K3 に速度v_{C}で変換している. $\Delta P_{6,5}$では, $\Delta P_{5,0}$ の帰路を仮定しているので, v_{C}の正負が$\Delta P_{5,0}$と逆である. $\sum \Delta P$ は $\Delta P_{5,0}$と $\Delta P_{6,5}$を合計したものである. これらの変換の意味は**§4.2-4.4**.で説明する.

Table I. Galilean and Lorentz transformations of $\Delta \boldsymbol{P}$ (**Time course**, **Difference in location**).

Table I. $\Delta \boldsymbol{P}$ (**時間経過**, **位置の差**) のガリレイ変換とローレンツ変換.

$\Delta P_{i,j}$ or $\sum \Delta P$	K1	Transformation from K1 to K2 with velocity v_{C}			Transformation from K2 to K3 with velocity v_{C}		
		v_{C}	K2_G Galilean	K2_L Lorentz	v_{C}	K3_G Galilean	K3_L Lorentz
$\Delta P_{0,0} = P_0 - P_0$	$(0,0)$	$+c/2$	$(0,0)$	$(0,0)$	$-c/2$	$(0,0)$	
$\Delta P_{1,0} = P_1 - P_0$	$(1,c)$		$(1,0.5c)$	$(0.58,0.58c)$		$(1,c)$	
$\Delta P_{2,0} = P_2 - P_0$	$(1,-c)$		$(1,-1.5c)$	$(1.73,-1.73c)$		$(1,-c)$	
$\Delta P_{3,0} = P_3 - P_0$	$(0,c)$		$(0,c)$	$(-0.58,1.15c)$		$(0,c)$	
$\Delta P_{4,0} = P_4 - P_0$	$(2,0)$		$(2,-c)$	$(2.31,-1.15c)$		$(2,0)$	
$\Delta P_{5,0} = P_5 - P_0$	$t_{\mathrm{trp}}(2,c)$		$t_{\mathrm{trp}}(2,0)$	$t_{\mathrm{trp}}(1.73,0)$		$t_{\mathrm{trp}}(2,c)$	
$\Delta P_{6,5} = P_6 - P_5$	$t_{\mathrm{trp}}(2,-c)$	$-c/2$	$t_{\mathrm{trp}}(2,0)$	$t_{\mathrm{trp}}(1.73,0)$	$+c/2$	$t_{\mathrm{trp}}(2,-c)$	
$\sum \Delta P = \Delta P_{5,0} + \Delta P_{6,5}$	$t_{\mathrm{trp}}(4,0)$	-	$t_{\mathrm{trp}}(4,0)$	$t_{\mathrm{trp}}(3.46,0)$	-	$t_{\mathrm{trp}}(4,0)$	

4.2 Principle of the constancy of the velocity of light

The $\Delta P_{1,0}$ in **Table I** means that the velocity of light in K1 is $+c$. Though the velocity in K2_G is changed to $0.5c$, the velocity in K2_L is $0.58c/0.58 = c$. The $\Delta P_{2,0}$ means that the velocity of light in K1 is $-c$. Though the velocity in K2_G is changed to $-1.5c$, the velocity in K2_L is $-1.73c/1.73 = -c$. K3 transformed from both K2_G and K2_L accords with the original K1. The above is represented in **Fig. 2**, where the horizontal and vertical axes represent the time and location, respectively, and the positive and negative velocities of light, c and $-c$, are represented by solid arrows and dotted arrows, respectively. The graphs of K1, K2, and K3 are arranged left to right, with the Galilean and Lorentz transformations on the top and bottom, respectively. Though the slopes of the arrows representing the velocity of light change in K2_G, they do not change in K2_L.

4.2 光速度不変の原理

Table I の$\Delta P_{1,0}$は K1 での光速が$+c$であることを意味する. K2_G での光速は$0.5c$に変わるが, K2_L での光速は $0.58c/0.58 = c$である. $\Delta P_{2,0}$は K1 での光速が$-c$であることを意味する. K2_G での光速は$-1.5c$に変わるが, K2_L での光速は$-1.73c/1.73 = -c$である. K2_G と K2_L から変換された K3 は, ともに元の K 1 と一致する. 以上を **Fig. 2** に示す. 水平軸および垂直軸はそれぞれ時間および位置を表し,光の正負の速度cおよび$-c$は, それぞれ実線およ

び点線の矢印で示した． K1, K2, および K3 のグラフは左から右の順に配置し，ガリレイ変換とローレンツ変換はそれぞれ上側および下側に配置した．光の速度に相当する矢印の傾きは K2_G では変化するが K2_L では変化しない．

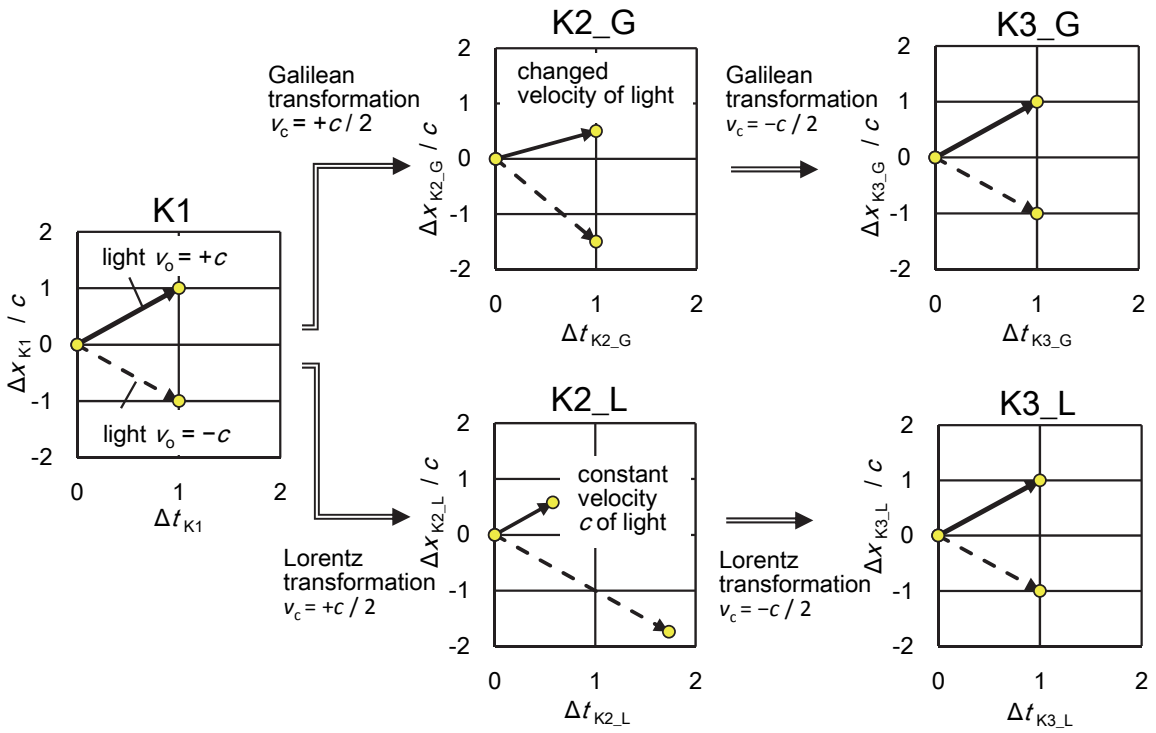


Fig. 2. Transformed time and location of light.

Fig. 2. 光の時間と位置の変換.

4.3 Relativity of simultaneity, length and time course

The $\Delta P_{3,0}$ values in **Table I** show that 0 sec (as simultaneity) and length of c m in K1 are transformed to -0.58 s and $1.15c$ m in K2_L, while these changes do not occur in K2_G. The $\Delta P_{4,0}$ values in **Table I** show the time course of a stationary point in K1, with 2 s in K1 changing to 2.31 s in K2_L.

4.3 同時，長さ，および時間経過の相対性

Table I の$\Delta P_{3,0}$は, K1 における 0 秒 (すなわち同時) で長さ c m が K2_L では-0.58 秒と $1.15c$ m に変換されること示す．このような変化は K2_G では起こらない．**Table I** の $\Delta P_{4,0}$ は, K1 での静止点の 2 秒が K2_L では 2.31 秒に変換されることを示す．

4.4 Time course during virtual space travel

Here we consider a virtual round-trip space journey by a rocket from Earth to Planet A,

located $l = t_{\mathrm{trp}} \cdot c$ away from the Earth, at the velocity $v_{\mathrm{R}} = c/2$. If v_{C}, which is the velocity of the inertial frame K2 in K1, equals v_{R}, the rocket is stationary in K2. The effects of acceleration and gravity are not considered. To understand the essentials of the special theory of relativity, they are not needed, because as the distance becomes long, these effects become relatively small.

The $\Delta P_{5,0}$ in **Table I** indicates the outward journey. The time course in K1 is $2t_{\mathrm{trp}}$, while the time course in K2_L, which means the time course in the rocket, is reduced to $2t_{\mathrm{trp}}/\beta = 1.73t_{\mathrm{trp}}$. This change does not occur in K2_G. However, the $1.73t_{\mathrm{trp}}$ in K2_L is recovered to $2t_{\mathrm{trp}}$ in K3. The time courses in K1 and K3 mean the time course of the clock in the Earth at rest and the time courses of the clock in the Earth-as-spaceship. $\Delta P_{6,5}$ means the return journey with the velocity $v_{\mathrm{R}} = -c/2$. Here, the $2t_{\mathrm{trp}}$ in K1 is also reduced, to $1.73t_{\mathrm{trp}}$ in K3_L. The time $\sum \Delta P$ in **Table I** means the time course over the round-trip. The time courses in K1, K2_G, and K3 are $4t_{\mathrm{trp}}$, while the time course in K2_L is reduced to $4t_{\mathrm{trp}}/\beta = 3.46t_{\mathrm{trp}}$. The above is represented in **Fig. 3**, with the location of the rocket represented by the vertical axis and the time represented by the horizontal axis. The rocket is at rest in both K2_G and K2_L. Though the time course in K2_L is reduced, it is recovered in K3.

4.4 仮想的な宇宙旅行での時間経過

ここでは，地球からの距離が$l = t_{\mathrm{trp}} \cdot c$ の惑星 A への速度 $v_{\mathrm{R}} = c/2$のロケットによる仮想的な往復の宇宙旅行を考察する．慣性系 K1 での慣性系 K2 の速度v_{C} がv_{R} に等しい場合，ロケットは K2 で静止している．加速と重力の影響は考慮しない．距離が長くなるにつれてこれらの影響は相対的に小さくなるため，特殊相対性理論の本質を理解するためには必要ない．

Table I の$\Delta P_{5,0}$ は往路を示す．K1 での時間経過は $2t_{\mathrm{trp}}$であり，ロケットでの時間経過を意味する K2_L での時間経過は $2t_{\mathrm{trp}}/\beta = 1.73t_{\mathrm{trp}}$に減少する．このような変化は K2_G では起こらない．しかし，K2_L での $1.73t_{\mathrm{trp}}$ は K3 では$2t_{\mathrm{trp}}$ に戻る．K1 および K3 での時間経過は，静止した地球での時間経過，および Earth-as-spaceship 内での時間経過を意味する．$\Delta P_{6,5}$ は速度 $v_{\mathrm{R}} = -c/2$ での復路を意味する．ここでも K1 での$2t_{\mathrm{trp}}$は $1.73t_{\mathrm{trp}}$に減少する．**Table I** の $\sum \Delta P$ の時間は往復旅行での時間経過を意味する．K1, K2_G, および K3 での時間経過は$4t_{\mathrm{trp}}$であるが，K2_L では $4t_{\mathrm{trp}}/\beta = 3.46t_{\mathrm{trp}}$に減少する．以上についてロケットの位置を横軸，時間を縦軸とした **Fig. 3** に示す．K2_G および K2_L ではロケットは静止している．K2_L では時間経過が減少するが，K3 では元に戻る．

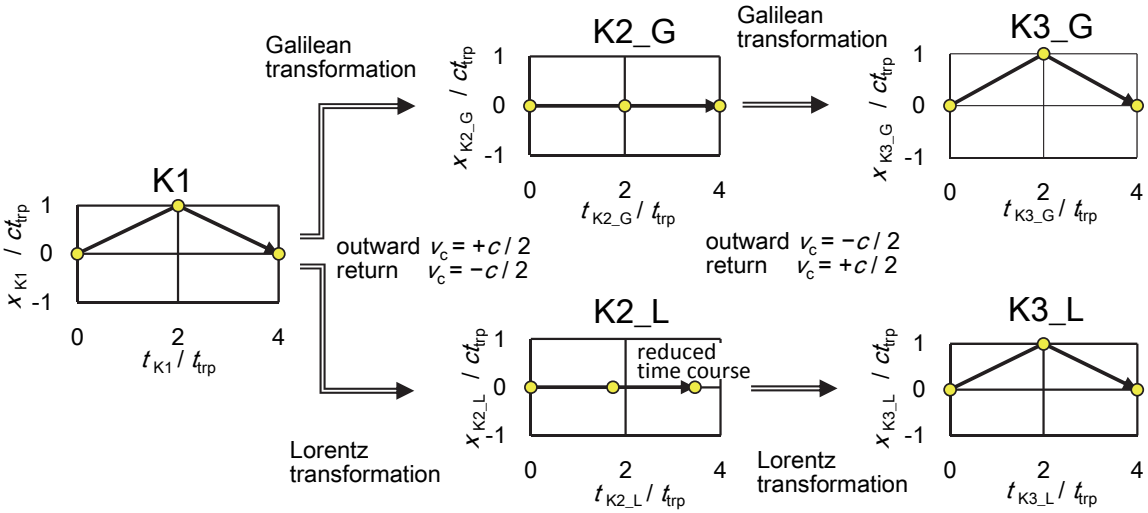


Fig. 3. Space travel at 1⁄2 the velocity of light.
Fig. 3. 光速の 1/2 の速度での宇宙旅行.

4.5 Refutation of the twin paradox

A fundamental refutation of the twin paradox will now be discussed, based on the case studies in **§4.1** and **4.4**. The schematic in **Fig. 4** shows the Earth as the point of departure, Planet A as the turning point, and the rocket in flight. Only the outward journey is represented in **Fig. 4**, because the return is similar to this as described in **§4.4**. The horizontal and vertical axes represent the time and location, respectively. Lorentz transformation with velocity v_{C} is abbreviated to $L(v_{\mathrm{c}})$.

In the inertial frame system K1 (left in **Fig. 4**), the Earth is stationary. K1 is transformed to the inertial frame system K2 by $L(c/2)$ (right). We can assume, in K2, that the Earth-as-spaceship is launched in the opposite direction to Planet A, with velocity $v_{\mathrm{E}} = -c/2$. K2 is transformed to K3 by $L(-c/2)$. K 3 matches K 1(left), because contractions and expansions return completely by the transformation with the positive / negative inverse velocity. **The essence of the twin paradox refutation lies in the difference between the rocket in K1 and the Earth-as-spaceship in K2 in Fig. 4**. It is **Fig. 1** that made it more schematic.

4.5 双子のパラドックスに対する反駁

§4.1 および **4.4** でのケーススタディに基づいて, 双子のパラドックスに対する本質的な反駁を述べる. **Fig. 4** の模式図は, 出発点としての地球, 折り返し点としての惑星 A, および飛び立つロケットを示す. **Fig. 4** では往路しか示していないのは, **§4.4** で示したように復路も同様であるからである. 横軸, および縦軸はそれぞれ時間と位置を示す. 速度 v_{C} でのローレンツ変換は $L(v_{\mathrm{c}})$と略記した.

慣性系 K1(**Fig. 4 の左**)では地球は静止している. K1 は$L(c/2)$によって慣性系 K2 に変換さ

れる(右). K2 では Earth-as-spaceship は惑星 A と反対方向に速度$v_{\mathrm{E}} = -c/2$で旅立つとみなせる. K2 は$L(-c/2)$ によって K3 に変換される. 正負が逆の速度の変換で収縮と拡張は完全に元に戻るので K3 は K1 と一致する(左). **双子のパラドックスに対する反駁の本質は Fig. 4 の K1 でのロケットと K2 の Earth-as-spaceship の違いにある.** より模式的にしたのが **Fig. 1** である.

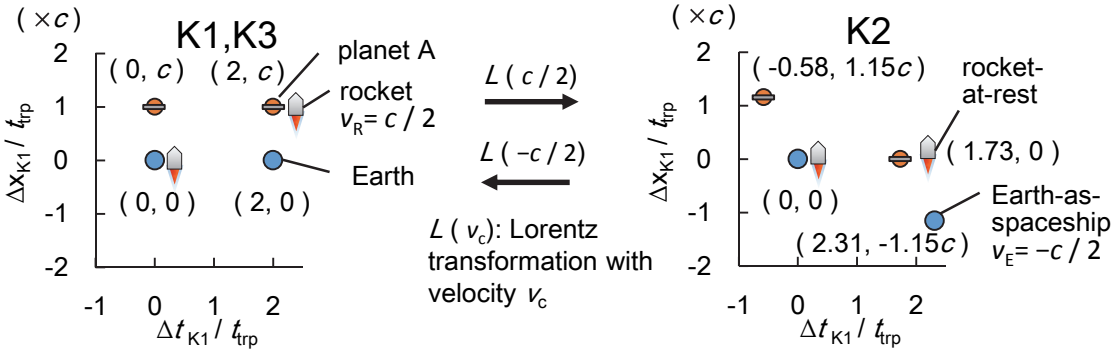


Fig. 4. Transformation to an inertial frame system in which the Earth-as-spaceship moves at 1⁄2 the velocity of light, and a rocket is stationary (schematic figure).
Fig. 4. Earth-as-spaceship が光速の 1/2 の速度で進み,ロケットが静止する系への変換(模式図).

Here we reconsider the time course of the journey of distance l in three inertial frames K1, K2, and K3.

(1) In K1: The rocket arrives at Planet A in $T_{\mathrm{K1}} = l/v_{\mathrm{R}}\,(= 2t_{\mathrm{trp}})$.

(2) In K2: The rocket is at rest. The distance l is increased to $l_{\mathrm{K2}} = l\beta\big(= 1.15ct_{\mathrm{trp}}\big)$, T_{K1} is reduced to $T_{\mathrm{K2_R}} = T_{\mathrm{K1}}/\beta(= 1.73t_{\mathrm{trp}})$ at the rocket-at-rest, and T_{K1} is increased to $T_{\mathrm{K2_E}} = T_{\mathrm{K1}}\beta(= 2.31t_{\mathrm{trp}})$ at the Earth-as-spaceship. These differences do not reflect a contradiction but rather the **relativity of length and time course**, as explained in **§4.1** and **4.3**.

(3) In K3: The Earth-as-spaceship is at rest. The distance l_{K2} is reduced to $l_{\mathrm{K3}} = l_{\mathrm{K2}}/\beta = l$, $T_{\mathrm{K2_E}}$ is reduced to $T_{\mathrm{K3_E}} = T_{\mathrm{K2_E}}/\beta = T_{\mathrm{K1}}$ at the Earth-as-spaceship at rest, and $T_{\mathrm{K2_R}}$ is increased to $T_{\mathrm{K3_R}} = T_{\mathrm{K2_R}}\beta = T_{\mathrm{K1}}$ at the rocket-at-rest as spaceship.

These time courses and distances are doubled in the round trip as summarized in **Table II**.

Table II. Summary of the time courses and travel distances in the virtual space journey.

Inertial frame system	(**Time course**, **Travel distance**)	
	Earth	Rocket
K1, and K3 where the Earth is stationary	$\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 0\right)$	$\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 2l\right)$
K2 where the rocket is stationary	$\beta\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 2l\right)$	$\frac{1}{\beta}\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 0\right)$
l and v_{R} respectively denote the one-way distance of the round trip and the velocity of the rocket; and $\beta = 1/\sqrt{1 - v_{\mathrm{R}}^2/c^2}$, where c denotes the velocity of light.		

ここで距離l の旅行での時間経過を三つの慣性系 K1, K2, および K3 で再考する.

(1) K1: ロケットは $T_{\mathrm{K1}} = l/v_{\mathrm{R}}\,(= 2t_{\mathrm{trp}})$で惑星 A に到着する.

(2) K2: ロケットは静止している. 距離 l は $l_{\mathrm{K2}} = l\beta(= 1.15ct_{\mathrm{trp}})$に増加し, 静止したロケットでは$T_{\mathrm{K1}}$が$T_{\mathrm{K2_R}} = T_{\mathrm{K1}}/\beta(= 1.73t_{\mathrm{trp}})$ に減少し, Earth-as-spaceship ではT_{K1}が$T_{\mathrm{K2_E}} = T_{\mathrm{K1}}\beta(= 2.31t_{\mathrm{trp}})$に増加する. これらは矛盾ではなく, **§4.1** および **4.3** で示したように**長さと時間経過の相対性**である.

(3) K3: Earth-as-spaceship は静止している. 距離l_{K2}は$l_{\mathrm{K3}} = l_{\mathrm{K2}}/\beta = l$に減少し, 静止した Earth-as-spaceship では$T_{\mathrm{K2_E}}$が$T_{\mathrm{K3_E}} = T_{\mathrm{K2_E}}/\beta = T_{\mathrm{K1}}$に減少し, 宇宙船としての rocket-at-rest では$T_{\mathrm{K2_R}}$が$T_{\mathrm{K3_R}} = T_{\mathrm{K2_R}}\beta = T_{\mathrm{K1}}$に増加する.

時間経過と旅行距離を往復で２倍として **Table II** にまとめた.

Table II. 仮想的な宇宙旅行での時間経過と旅行距離のまとめ.

慣性系	(時間経過, 旅行距離)	
	地球	ロケット
地球が静止している K1, および K3	$\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 0\right)$	$\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 2l\right)$
ロケットが静止している K2	$\beta\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 2l\right)$	$\frac{1}{\beta}\left(\frac{2l}{v_{\mathrm{R}}}, 0\right)$
l および v_{R} はそれぞれ往復旅行の片道の距離とロケットの速度を示す. また, $\beta = 1/\sqrt{1 - v_{\mathrm{R}}^2/c^2}$, ここで c は光速.		

The twin paradox and the wrong explanations are caused by lack of consideration as follows.
(a) The expansion of the travel distance in K2 is not taken into account, probably because Lorenz contraction is erroneously considered applicable to all transformation.
(b) Only the time course of the Earth-as-spaceship is considered in K2, probably because the time course at the rocket-at-rest and the time course at the Earth-as-spaceship are not properly distinguished.

There are explanations in books and web sites that the time of the Earth-as-spaceship (or the twin's clock stayed at the Earth) would go discontinuously at turning points of round trips if we assume the rocket to be stationary, however, the time discontinuity comes from the wrong turning points mistakenly shortened.

双子のパラドックスおよび間違った説明は, 以下のように思慮不足が原因である.
(a) K2 で旅行距離が拡張することが考慮されていない. おそらくローレンツ収縮が全ての変換に適用されると誤解されているためであろう.
(b) K2 では Earth-as-spaceship の時間しか考慮されていない. おそらく rocket-at-rest での時間経過と Earth-as-spaceship での時間経過を正しく区別していないためであろう.

ロケットが止まっていると仮定すると Earth-as-spaceship (宇宙船地球号)の時間（または, 地球に残った双子の時計）が, 往復旅行の折り返し点で不連続に進む旨の説明が書籍, および web site に見受けられるが, 時間が不連続になる原因は, 間違って短くした折り返し点に起因する.

5. Conclusion and postscript

The time courses in a virtual space journey at an extremely high speed of v_{R}, as is relevant to the theory of relativity, was considered. The effects of acceleration and gravity were neglected, because as the travel distance becomes long, these effects become relatively small. A clock in the inertial frame system K2, where the rocket is stationary, loses time at a rate of $1/\beta = \sqrt{1 - v_{\mathrm{R}}^2/c^2}$, where c denotes the velocity of light, compared to the clock in the inertial frame system K1, where the Earth is stationary. While a clock in the Earth-as-spaceship in the inertial frame system K3, where the Earth is stationary, also loses time at a rate of $1/\beta$, compared to the clock in the rocket in K2. This is not a paradox, however, because the distance which the Earth-as-spaceship travels is extended at a rate of β in K2 (see **Fig. 1**.). The end result is that the time courses of the clock in the Earth-as-spaceship equal the time courses of the clock in the Earth at rest.

P.S.: The Earth at rest is like the rocket in K2 in **Fig. 1**. It may thus be worthwhile to think about the movement of the Earth in the universe as Galileo Galilei did.

5. 結論と追伸

相対性理論の影響を受けるような高速v_{R}での仮想的な宇宙旅行を考察した. 加速と重力の影響は旅行距離が長くなると相対的に小さくなるので無視した. ロケットが静止している慣性系 K2 での時計は地球が静止している慣性系 K1 の時計に対し$1/\beta = \sqrt{1 - v_{\mathrm{R}}^2/c^2}$ (c : 光速)の割合で遅れる. 一方, 地球が静止している慣性系 K3 での Earth-as-spaceship の時計も K2 のロケットでの時計に対して$1/\beta$の割合で遅れる. しかし, これはパラドックスではない. なぜなら, K2 での Earth-as-spaceship の旅行距離はβの割合で拡大されるからである(**Fig. 1** 参照). 結果として Earth-as-spaceship の時計での経過時間は, 静止している地球の時計での経過時間と一致することになる.

追伸: 静止している地球は **Fig. 1** の K2 でのロケットのようなものである. ガリレオガリレイのように宇宙の中での地球の動きについて考えることは価値があるかもしれない.

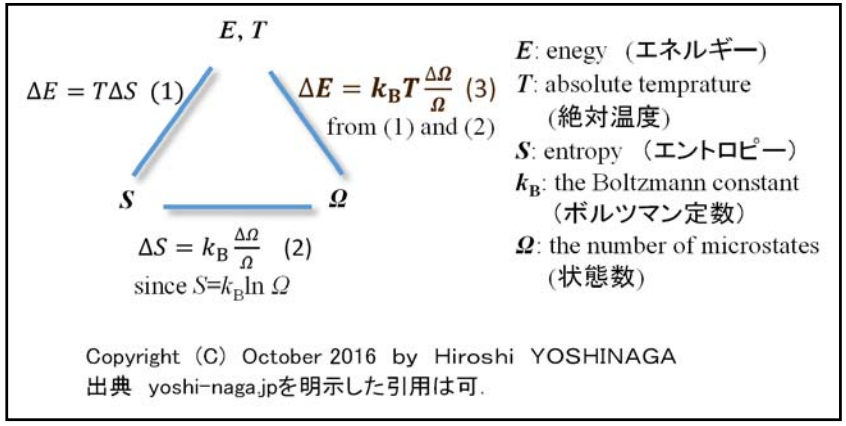
References

1) A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik, **17**, 891 (1905) [in German].
2) A. Einstein, Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie, Die Naturwissenschaften, **6**, 697 (1918) [in German].

「やっとわかった！」エネルギーと情報量の関係(2016.10). 発表はこのサイトのみ.

$$\Delta E = k_B T \Delta\Omega / \Omega$$

エンロトピーの定義式に基づいて，エネルギー変化ΔEと状態数の変化率$\Delta\Omega/\Omega$には$\Delta E = k_B T \Delta\Omega/\Omega$の関係があると解釈．ここで，$k_B$:ボルツマン定数，$T$:温度．エネルギーとエントロピーと情報量の関係は，解説本を読んでもわからなかった．自己流の解釈で「やっとわかった！」.



温度 T とは「エネルギー変化 ΔE 」と「状態数の変化率 $\Delta\Omega/\Omega$ の比と解した.

「気体」、「光」、および「運動する粒子」への適用.

$\Delta E = k_B T \frac{\Delta\Omega}{\Omega}$を「気体」,「光」,および「粒子の運動」の計算式へ適用したら単純明快な結果が得られました．素人による自己流の論理のため，誤っているかもしれません.

気体, 光, および運動する粒子で共通

$$\Delta E = k_B T \frac{\Delta\Omega}{\Omega} \quad (3)$$

$$\Omega = a_1 p^{n_f \cdot n_p} \quad (4)$$

式(4)では以下を仮定した.

・(3)式の$\frac{\Delta\Omega}{\Omega}$は比なので個々の粒子を区別する前提で状態数$\Omega$を計算しても良い.

・粒子1個の状態数は運動量pの自由度n_f乗に比例.
（n_fの例：Heではx, y, zの3, N_2では伸縮と回転が 加わり5)

・粒子数n_pの状態数Ωはp^{n_f}のn_p乗に比例.

$$(4) \rightarrow \frac{\Delta\Omega}{\Omega} = n_f n_p \frac{\Delta p}{p} \quad (5)$$

$$(3),(5) \rightarrow \Delta E = n_f n_p k_B T \frac{\Delta p}{p} \quad (6)$$

ここで

E: 粒子n_p個のエネルギー (J)

k_B:ボルツマン定数 1.381×10^{-23} JK^{-1}

T: 絶対温度(K)

Ω: 粒子n_p個の状態数

a_1: 比例定数

Copyright (C) October 2016 by Hiroshi YOSHINAGA

気体への適用

$$p = a_2\left(\frac{E}{n_\mathrm{p}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (7)$$

式(6)では,粒子1個の運動量がエネルギーの1/2乗に比例すると仮定した.

$$(7)\rightarrow\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{2}\frac{\Delta E}{E} \qquad (8)$$

一方,式(9)が公知

$$E = \frac{n_\mathrm{f}}{2}\frac{n_\mathrm{p}}{N_\mathrm{a}}RT \qquad (9)$$

$$(6),(8),(9)\rightarrow \boldsymbol{R = k_\mathrm{B}N_\mathrm{a}} \qquad (10)$$

式(10)は公知であるが,ごく簡単に導出できた.

ここで

a_2: 比例定数

R : 気体定数　8.314 $\mathrm{JK^{-1}mol^{-1}}$

N_a : アボガドロ数 6.022×10^{23} $\mathrm{mol^{-1}}$

Copyright (C) October 2016 by Hiroshi YOSHINAGA

光への適用

$$p = \frac{h\nu}{c} \qquad (11)$$

$$E = n_\mathrm{P}h\nu \qquad (12)$$

$$(11)\rightarrow\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta\nu}{\nu} \qquad (13)$$

$$(12)\rightarrow\Delta E = n_\mathrm{P}h\Delta\nu \qquad (14)$$

光の自由度n_fはx, y, z方向の3と仮定し

$$(6),(13),(14)\rightarrow \boldsymbol{h\nu = 3k_\mathrm{B}T} \qquad (15)$$

ここで

h :プランク定数　6.626×10^{-34} Js

ν :振動数 $\mathrm{s^{-1}}$

c:光速 $\mathrm{ms^{-1}}$

式(15)は黒体放射のピーク$\boldsymbol{h\nu = 2.82k_\mathrm{B}T}$や

太陽光のピーク$\boldsymbol{h\nu \cong 5k_\mathrm{B}T}$に近い.

Copyright (C) October 2016 by Hiroshi YOSHINAGA

運動する粒子への適用

$p = mv$ (16)

$E = n_{\mathrm{P}} \cdot \frac{1}{2} m v^2$ (17)

(16)→$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta v}{v}$ (18)

(17)→$\Delta E = n_{\mathrm{P}} m v \Delta v$ (19)

(6),(18),(19)→$\boldsymbol{m v^2 = n_{\mathrm{f}} k_{\mathrm{B}} T}$ (20)

ここで

m :粒子1個の質量 kg

v :粒子の速度　m s^{-1}

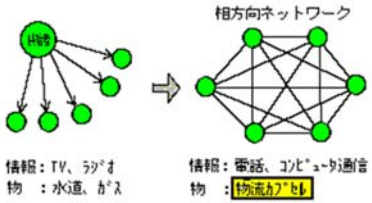
式(20)より,「運動する粒子の温度」は粒子1個のエネルギーに比例し,自由度に反比例, 粒子の数によらない！

(17),(20)→$E = \frac{1}{2} n_{\mathrm{f}} n_{\mathrm{P}} k_{\mathrm{B}} T$ (21)

$n_{\mathrm{f}} = 3$とすれば式(9),(10)で自由度3とした気体と同じ.

Copyright (C) October 2016 by Hiroshi YOSHINAGA

戻る.



もうすぐ21世紀です。高度情報化社会は着実に進展し、個人間で多種多様な情報が交換できるようになっています。一方、物流は従来のトラックと人力を中心として行われ、あまり変化がありません。

「パーソナル物流ネットワーク」の研究は、電話の感覚で、ガスや水道のように物を自由に個人間で送れる装置を目標としています。実現までには数十年かかると予想されますが、以下のメリットが考えられます。

☆電話の感覚で手軽に物が送ることができ、人々の生活はより便利になります。

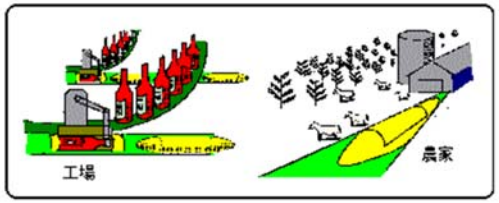
☆生産者と消費者を直結させることができ、流通が合理化されます。

☆輸送における積み換え、一時保管等の手間が省けます。

☆必要な物を必要なだけ生産し、相互に融通できるので廃棄の無駄が省けます。

☆貨物輸送を一部肩代わりできるので、交通渋滞の緩和が期待できます。

設備投資は大きくなりますが、今の自動車と同じように便利な機器になります。

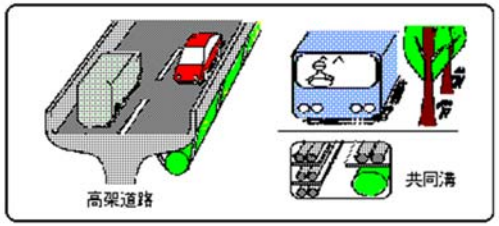


生産者からは、生産物が小型カプセルで発送されます。

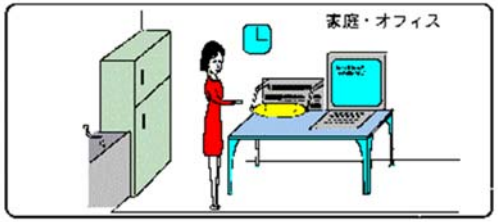
発送は自動化され積込等の手間がかかりません。

生産者は必要な物を必要なだけ生産し発送するため保存、廃棄等の無駄がなくなります。

生産者と消費者を直結でき、新鮮な物を流通させることができます。



カプセルの通路は高架式の道路や共同溝を考えています。カプセルを小型化、高速化することにより、小さな設備で大量の物を送れるようになり、設備等の工事費を節約できます。



家庭では、一つの電化製品のように使用できることを想定しています。当初は相当高価なものになりますが、今の車のように便利な機器になります。

Copyright （C） 1996　by Hiroshi YOSHINAGA

戻る．

阪神大震災後における建設機械の活用

1 はじめに

平成7年1月17日の早朝に発生した兵庫県南部地震は，家屋や各種構造物 に大きな被害を与え，多くの人命を奪い去った．この地震においては，建設機械 が本来の建設作業は勿論「人命救助」「道路啓開作業」「構造物解体」等多目的 に使用された．未曾有の大地震のため通常と異なる使用方法，需要，供給，運用 があったと考えられる．従来も，地震後の応急作業において建設機械の活用はあ ったものの，それらの実態は明らかではなかった．そこで，今回の地震において ，このような事実を記録として整理し，課題をとりまとめておくことにより，国，自治体，業団体，企業等各機関の今後の大規模な震災対策の基礎資料とすること を目的として調査を行った．

2 調査内容

震災後における建設機械の活用について業団体，企業等へのヒヤリング調査 ，新聞雑誌等の記事の収集分析を行った．

3 震災後の経過

震災後における建設機械関係の経過は**表－1**のとおりとなる．

表－1　震災後の経過（建設機械関係）

月日	経過日数	全体 建設機械・リース	コメント
1/17		建設省　災害対策車等派遣準備 人命救助、道路啓開の需要	緊急対策期 人命救助の緊急使用 対策窓口設置 協力要請 注文殺到 輸送の問題
18	1	建設相、業団体に協力要請 建設省　災害対策車等派遣	
19	2	近畿地建　動員重機対応窓口設置	
20	3	建設省　給水活動開始	
21	4	106 時間ぶりの救出 リース注文が殺到	
22	5	阪神高速倒壊部分の解体作業本格化	公共構造物の解体復旧本格化

23	6	JR、阪急、阪神の代替バス運行 リース建機を集結	
24	7	アタッチメント増産	
25	8	部品の調達に苦慮	建設機械の生産への障害
26	9	リース保有機械の増強	
30	13	R43号の上下線開通	
31	14	アスベストが野ざらし	
2/6	20	粉塵問題	粉塵の問題が表面化
9	23	家屋解体作業本格化	民間構造物の解体復旧
11	25	がれきの海上輸送本格化	がれきの問題 廃棄物　約 2,000 万 t コンクリート塊　約 1,600 万 t
23	37	建設省アスベスト防止対策を依頼	
24	38	野焼き現場で有毒ガス 二酸化窒素増加	
3/1	43	建設省　給水活動終了	
6	48	震災で公共工事減	
14	56	破砕機使いがれき再生	
17	59	水道復旧 98%	
22	64	輸出額1月5%減	
27	69	破砕機増産	

震災直後には，建設業各社が建設機械の確保に動いたためリース業等に注文が 殺到し，次に解体用のアタッチメントの需要が高まった．また解体用のガラが大 量に発生したため破砕機（ガラ処理用）の需要が徐々に高まった． 建設業には 各公共機関から要請が殺到し，建設業 57 社に対し 111 の公共機関から 1,274 件（1 公共機関からの要請を 1 件とする），民間企業から 10,047 件の要請があった．（ 日本建設業団体連合会調査[1]）

4 供給活用

4.1 供給活用の概要

建設業56社に対し1月25日に調査した建設機械の派遣台数の調査結果を**表－2**に示す．

表－2　建設機械の派遣台数1)

機種	派遣台数
油圧ショベル	2,205
クレーン	850
ブルドーザ	542
コンクリート破砕機	137
ブレーカ	100
その他	263
合計	**4,097**

派遣数は今回調査では約 4,000 台と日本国内における建設機械の保有台数 120 万台の 0.3%程度であった. マクロ的に見れば台数不足は生じなかったと考えられる が, 短期的（～3ケ月程度）, 局所的には機械の不足が見られた. 神戸に向かう 道路は大渋滞になり,建設機械の輸送もその影響を受けた.ヒヤリング調査による と大阪から神戸まで35時間を要した例などもあり,機械の調達が1～2日程度 遅れたと回答した例が多かった. また, 今回の震災では遠方からの応援が多かっ たが, ヒヤリング調査による地域別の割合は**表－3**のとおりとなる.

表-3 建設機械の調達先（民間）

兵庫県内	41%
大阪府	45%
和歌山県	4%
京都府	4%
その他	6%

ほとんどを兵庫県内, 大阪府から調達している. また, 建設省では災害対策用 の機械を保有しており, 今回の震災では全国から応援が集まった. 今回の震災 で特徴的だったのは散水車が給水用として活用されたことである. **表－1**に示すように水道が98%復旧するのに2ケ月を要した.

4.2 人命救助への活用

今回の震災では, 数多くの建設機械が人命救助に使用さた. たまたま被災地 の旅館に宿泊した建設業の方が, 近くにあったバックホウを活用して救出した例 や, 被災した親戚を救出するため大阪から駆けつけて, 消防局と協力して多くの 被災者を救出

した例などがある. しかし, 被災直後は人命救助用の重機が不足し た. **表－4**は神戸市消防局が調達した建設機械の台数である.

表－4 神戸市消防局に派遣された建設機械

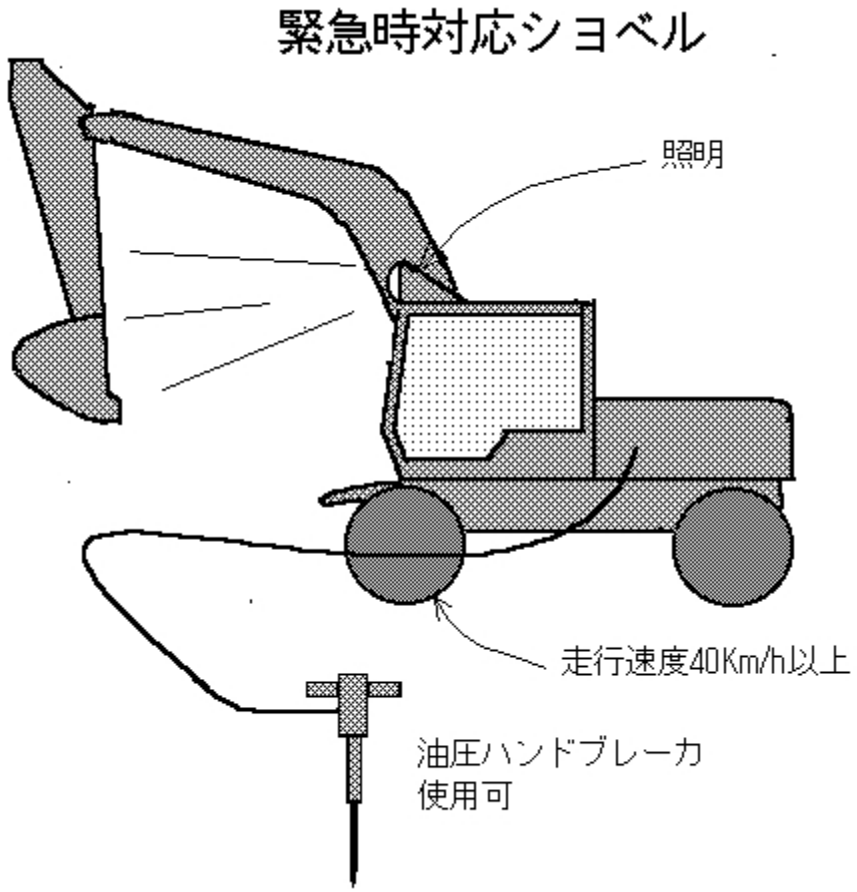
所属	機種	1/18	1/19	1/20	1/21	1/22	1/23	1/24	小計	合計
生田	油圧ショベル	1	3	3	3	3	0	0	13	23
	トラック	1	1	1	1	1	0	0	5	
	コンプレッサ	1	1	1	1	1	0	0	5	
東灘	油圧ショベル	0	0	1	12	1	1	0	15	74
	トラック	0	0	0	0	1	1	0	2	
	コンプレッサ	0	0	0	0	1	1	0	2	
	ダンプ	0	0	1	30	0	0	0	31	
	クレーン	0	0	0	12	1	0	0	13	
	電源車	0	0	0	10	1	0	0	11	
灘	油圧ショベル	0	0	2	0	1	1	0	4	11
	ブルドーザ	0	0	0	2	0	0	0	2	
	トラック	0	0	0	0	1	1	0	2	
	コンプレッサ	0	0	0	0	1	1	0	2	
	ダンプ	0	0	0	1	0	0	0	1	
長田	油圧ショベル	0	0	0	1	1	0	0	2	4
	ブルドーザ	0	0	0	0	1	0	0	2	
	ダンプ	0	0	0	1	0	0	0	1	
須磨	油圧ショベル	0	0	2	0	0	0	0	2	5
	ダンプ	0	0	2	0	0	0	0	2	
	クレーン	0	0	0	1	0	0	0	1	
計		3	5	13	72	15	6	3	117	117

注）全て救助用。通りがかりを含まず。（神戸市消防局より）

人命救助に特に必要な1月１８日, １月１９日には十分な建設機械が確保でき なかった. 消防署との協定会社が被災したこと等が原因である. また, 人命救 助を行った人へのヒヤリング結果より,重要と考えられる点を列記する.

①油圧式のハンドブレーカの活用

コンクリート建築物の倒壊した場所では, ブレーカが必要不可欠であった. 油圧式バックホウの油圧を利用できればという意見があった.これらの意見をふ まえ現場への迅速な移動と通常の工事への使用も考えた建設機械のイメージを図 －1 に示す.



図－1 緊急時対応ショベル（イメージ）

②建設機械に関する知識
救助に当たった人の多くは，建設機械になじみがなく，名称もわからない状 態であり，機械を要請する際にどのような機械を建設業が保有していて，どのよ うに活用できるか等もわからないため，調達に苦慮したそうである．教育，パン フレットの配布等により，建設機械について知ってもらった方が良い．

4.3 情報
今回の震災で現場が必要とした情報をヒヤリング調査等からまとめると**表－5**のとおりとなる．

表－5 現場が特に必要とした情報

情報の種類	必要と回答した率
道路（工事、渋滞）情報	47%
機械の調達先	37%
在庫状況	37%

オペレータの調達先	26%
機械のメンテナンス	21%
工法	16%
専用機の扱い方	16%

また,情報伝達の手段としてNTT回線が設備の被災,電話の輻輳で使用でき なくなったが,建設省では,専用のマイクロ回線を保有しておりこれが威力を発揮 した.また,ゼネコンにおいても専用の周波数帯を持っていて無線機を活用した例 もある.無線を利用して通信網を作成する場合, 出力の大きさによって使用範囲 が制限されるので移動中継局を設置してカバーする. 災害時のように情報が殺到 する場合には,需要側と供給側の情報をコンピュータ通信で処理する方法も有効 と考えられる.このような情報システムを整備する上での留意事項を列記する.
(1) 経済性や信頼性を考慮すると災害用の専用システムよりも通常の業務に使 用できる ものの方が良い.
(2) 震災後といえども形式的な連絡網よりも普段の付き合いによる連絡網の方 を優先する行動をとることが多い. (3) 不特定多数からの情報には不正行為が行 われる可能性があるので対象者の審査や問題発生時のルールについても検討して おく必要がある.
　なお,被災直後の緊急時には殺到する情報の中から重要なものを選択しなけ ればならない.現場指揮所を車庫前に置いて,駆け込みで来る本当に必要な情報を 口コミで入手し殺到する通報に対処した消防署の例などもある.

4.4 工事災害

労働省の発表によると12月までの約1年間における兵庫労働基準所管内と 大阪労働基準所管内の震災復旧工事における死亡災害者は40名,負傷者は90 4人だった.特に,地震で被害を受けた住宅の屋根の上から足を滑らせて墜落する 事故が多かった.工事現場388か所を労働基準監督署が抜き打ち調査したとこ ろ,約半数の191か所で,墜落防止の措置がとられていないなどの法令違反が見 つかった. 建設機械を使用した解体工事においても「にわか解体屋」がバックホ ウのバケットで解体するなど危険な作業が多く事故増加の要因となったと言われ ている.

4.5 粉塵問題

今回の震災においては,解体工事で粉塵が大量に発生し,住民がマスクをして いる様子がマスコミ等で報道された.また,現場で作業している作業員が声を出せ いないほど喉をいためた例もあった.建設機械のエアフィルターが詰まって故障 の原因になるほどであった.　粉塵対策としては水タンクを用意して水をまいた り,防塵シートをつける方法があるが,現場では水が不足していた.

5 まとめ

今回の震災の特徴をヒヤリング, 記事等よりまとめると以下のとおりとなる .

・直後においては人命救助等の需要が発生.

・基準,マニュアルの想定外のことがおこりうる.（協定会社が被災者になる 等）
・復旧工事における労働災害の多発（約1年間で40名死亡，904人負傷 ）
・粉塵の発生
・交通渋滞による輸送時間の増加（通常の2～3倍，直後は10倍以上の例も ）
・人,機械の手配は平時の付き合いを中心として行われる
・水が使用できない（水道 98%復旧まで2ケ月）
・給水用としての散水車の活用（建設省で34台）

6 参考文献

1)（社）日本建設業団体連合会:「兵庫県南部地 震に関する最終調査結果に ついて」1995 年 5 月
2) 通商産業省大臣官房調査統計部:「機械統計月報」

その他
（社）日本建設機械化協会:「建設の機械化」1995 年 4 月
神戸市消防局「雪」編集部:「阪神大震災　消防隊員死闘の記」
建設省建設経済局:「建設関連業等動態調査」
（社）日本建設機械化協会:「建設業における機電部門の危機管理」1995 年 12 月
建設省土木研究所「兵庫県南部地震後における建設機械の活用状況」1996 年 3 月

戻る．